



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

ESTUDIO DE LA ADHERENCIA Y DEL COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN PRETENSADO CON ARMADURA PRETESA DE FRP.

Treball realitzat per:

Castillo Méndez José Francisco

Dirigit per:

Oller Ibars Eva María

Tutor Extern:

Ortiz Bernal Galo Fabian

Màster en:

Enginyeria Estructural i de la Construcció

Barcelona, **Setembre 2018**

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

AGRADECIMIENTOS:

Este trabajo es la conclusión de una etapa en mi vida que me propuse hace mucho tiempo cumplir y que en el camino hubo personas que estuvieron y se fueron, otras que sin imaginarlo estuvieron allí sin saber que llegarían y estarían, que me apoyaron y que creyeron en mí.

A mi familia; mi padre que aun que no se encuentra en esta vida, siempre me ha guiado desde el cielo, a mi madre que la vida me ha permitido compartir con ella este logro, a mi hermana que ha estado allí para aconsejarme, apoyarme y que me dio una sobrinita que es alegría.

Me he forjado un camino para llegar hasta aquí, solo dios sabe lo que me ha costado este trabajo de tesis, estos años fueron complicadas las cuestiones personales y emocionales, pero al final me queda la gran satisfacción de haber logrado culminar estos estudios en una gran universidad como lo es la UPC.

A mi tutora la profesora Eva María Oller Ibars, por darme la oportunidad y la confianza de participar en este grandioso proyecto de investigación, a mi tutor externo Galo Ortiz por todo el apoyo y acompañamiento de este trabajo de investigación.

A mis compañeros con los que compartí tiempo en el master y trabajo en el laboratorio, al mismo personal del laboratorio de tecnologías de estructuras de la UPC.

A esa persona que en el futuro le mostrare con orgullo todo lo que hice en la vida.

¡Gracias!

“La verdadera enseñanza que trasmitimos es lo que vivimos; y somos buenos predicadores cuando ponemos en práctica lo que decimos”

San Francisco de Asís.

RESUMEN:

El uso de nuevos materiales para estructuras de hormigón, como los polímeros reforzados con fibras (FRP) con una resistencia a la corrosión intrínseca, permite el proyecto y construcción de nuevas estructuras de altas prestaciones y durabilidad (HPDS), con una mayor vida útil, reduciendo futuros costes de mantenimiento, refuerzo e incluso sustitución.

En este contexto, este trabajo se enmarca en un proyecto de investigación que se enfoca en explorar la viabilidad y desarrollar un marco científico y técnico que facilite el proyecto y construcción de estructuras pretensadas de altas prestaciones y durabilidad, utilizando armaduras activas y pasivas de FRP. Se trata de sustituir las armaduras de acero por otras de FRP, para evitar la corrosión en ambientes fuertemente agresivos, aumentar la durabilidad y la vida útil de las estructuras.

Este trabajo forma parte de un estudio experimental para analizar la respuesta estructural de elementos de hormigón pretensado de alta resistencia utilizando FRP como armadura activa, a fin de establecer las bases para el proyecto y construcción de estructuras altamente durables en ambientes agresivos. En la UPC, se están llevando a cabo dos campañas experimentales con elementos de hormigón pretensado con FRP para estudiar el comportamiento a corto plazo en servicio y bajo carga creciente hasta rotura. En la primera fase de la primera campaña, se realizarán ensayos a flexión y cortante de vigas con armadura pretesa y con armaduras activas de FRP. La segunda fase consistirá en un ensayo a flexión de un elemento continuo posteso con este tipo de armadura [1].

Durante el desarrollo de esta tesis de master se ha realizado una revisión bibliográfica donde se resumen las campañas experimentales que se han realizado a la fecha para calcular la longitud de anclaje de barras convencionales de acero y que llevó a desarrollar una campaña experimental previa con armaduras pretensadas de FRP, que incluía ensayos de tracción y adherencia de las barras pretensadas y sin pretensar. Mediante esta campaña, se determinaron las características del material y se obtuvo el comportamiento adherente de las armaduras pasivas y activas de FRP. Para ello, el ensayo de adherencia para armaduras convencionales de acero pretensado desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia, ECADA, se adaptó para cuantificar la longitud de transferencia y la longitud de adherencia de las armaduras activas de FRP. El estudio experimental se ha realizado con barras de alta resistencia tipo, CFRP Carbopree®, barras GFRP Glasspree® FL E46 y un nuevo tipo de barra de fibra de vidrio con una resina termoplástica TGFRP.

Con lo anterior podremos realizar una metodología para pruebas experimentales de las barras FRP, así como dejar antecedentes de los problemas que se podrían encontrar durante el desarrollo de estas y poder hacer más efectivos los tiempos de ejecución de las pruebas experimentales y así tener un parámetro para saber si los resultados arrojados durante las mismas están dentro de lo admisible.

ABSTRACT:

The use of new materials for concrete structures, such as fiber-reinforced polymers (FRP) with intrinsic corrosion resistance, allows the design and construction of new high-performance and durable structures (HPDS), with a longer useful life, reducing future maintenance, reinforcement and even replacement costs.

In this context, this work is part of a research project that focuses on exploring the feasibility and developing a scientific and technical framework that facilitates the design and construction of high performance and durability prestressed structures, using active and passive FRP reinforcements. It is a matter of replacing the steel reinforcements with other FRP ones, to avoid corrosion in highly aggressive environments, increase the durability and the useful life of the structures.

This work is part of an experimental study to analyze the structural response of high-strength prestressed concrete elements using FRP as active reinforcement, in order to establish the bases for the design and construction of highly durable structures in aggressive environments. At the UPC, two experimental campaigns are being carried out with prestressed concrete elements with FRP to study the short-term behavior in service and under increasing load until failure. In the first phase of the first campaign, bending and shear tests will be carried out on beams with prestressed reinforcement and with active FRP reinforcement. The second phase will consist of a bending test of a post-tensioned continuous element with this type of reinforcement [1] .

During the development of this master's thesis, a bibliographic review has been carried out summarizing the experimental campaigns that have been carried out to date to calculate the anchorage length of conventional steel bars and that led to the development of a previous experimental campaign with prestressed reinforcement. of FRP, which included tensile and adherence tests of the prestressed and non-prestressed bars. Through this campaign, the characteristics of the material were determined and the adherence behavior of the passive and active FRP reinforcements was obtained. For this, the adhesion test for conventional prestressed steel reinforcements developed by the Polytechnic University of Valencia, ECADA, was adapted to quantify the transfer length and the adhesion length of active FRP reinforcements. The experimental study has been carried out with CFRP Carbopree ® high-strength bars, GFRP Glasspree ® FL E46 bars and a new type of fiberglass bar with a TGFRP thermoplastic resin.

With the foregoing, we will be able to carry out a methodology for experimental tests of FRP bars, as well as leave a history of the problems that could be found during their development and be able to make the execution times of the experimental tests more effective and thus have a parameter for know if the results thrown during the same are within the admissible.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. OBJETIVO PRINCIPAL	11
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	11
2. ESTADO DEL ARTE	12
2.1. EL FENOMENO DE ADHERENCIA EN BARRAS DE REFUERZO DE FRP	12
2.2. TIPOLOGIA DE ENSAYOS DE ADHERENCIA	13
2.2.1. Armadura pasiva.....	14
2.2.2. Arrancamiento con armadura tesada.....	20
2.2.3. Simulación de la zona de transmisión	21
2.2.4. Simulación de las zonas de transmisión y de anclaje	22
2.3. CONSIDERACIONES DE ADHERENCIA EN BARRAS FRP	25
2.4. LONGITUD DE TRANSFERENCIA Y LONGITUD DE ANCLAJE	26
2.5. PRUEBA ECADA (2001)	27
2.5.1. Bases de la prueba ECADA en barras de acero tradicionales.....	28
2.5.2. Fundamentos del método de ensayo.....	28
2.5.3. Método de ensayo.....	30
2.6. NORMATIVA PARA CALCULO.....	31
2.6.1. Diseño ACI 440.4R-04 (2000) elementos de hormigón pretensado con tendones FRP.....	32
3. ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE LOS POLIMEROS REFORZADOS CON FIBRAS	32
3.1. FIBRAS.....	32
3.1.1. FIBRAS DE CARBONO:.....	33
3.1.2. FIBRAS DE VIDRIO:.....	33
3.2. BARRAS	34
3.2.1. MODULO DE ELASTICIDAD:	35
3.2.2. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN:	35
4. DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL	36
4.1. ENSAYO DE TRACCIÓN DE LAS ARMADURAS (TENSILE TEST).....	36
4.1.1. BASES DE ENSAYO:	36
4.1.2. NUMEROS DE ENSAYOS:.....	37
4.1.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS CON BARRAS FRP:.....	37
4.2. PRUEBA PULL OUT	41
4.3.1. BASES DE ENSAYO:	41
4.3.2. NUMEROS DE ENSAYOS:.....	42
4.3.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS CON BARRAS FRP:.....	42
4.3. PRUEBA ECADA.....	47
4.3.4. BASES DE ENSAYO:	48
4.3.5. NUMEROS DE ENSAYOS:.....	48
4.3.6. PREPARACIÓN DE EQUIPOS PARA ENSAYOS DE BARRAS FRP:.....	49
4.3.7. PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS CON BARRAS FRP:.....	53
4.4. ENSAYO DE COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN	60
4.4.1. ENSAYO PARA PRUEBA PULL OUT:	60
4.4.2. ENSAYO PARA PRUEBA ECADA:.....	61
4.4.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN:.....	61
4.5. ENSAYO A FLEXIÓN Y CORTANTE CON BARRAS FRP.....	63
4.5.1. BASES DE ENSAYO:	63

4.5.2.	NUMEROS DE ENSAYOS:.....	63
4.5.3.	PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS A FLEXIÓN:.....	64
4.6.	EQUIPOS DE PRUEBAS	68
4.6.1.	EQUIPO A LA TRACCIÓN (INSTRON 8803):	68
4.6.2.	LVDT:.....	68
4.6.3.	CELULA DE CARGA (CLP-NB):	69
4.6.4.	GATOS HIDRÁULICOS “Enerpac RCH-206”:	69
4.6.5.	GALGAS EXTENSIOMETRICAS DE MEDICIÓN:	70
4.6.6.	SISTEMA DE ANCLAJE:	70
5.	ANALISIS DE RESULTADOS DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL	72
5.1.	ENSAYO DE TRACCIÓN DE LAS ARMADURAS (TENSILE TEST).....	72
5.1.1.	CARACTERISTICAS DE FALLOS EN BARRAS FRP:.....	73
5.1.2.	Fallo por anclaje:	73
5.1.3.	Fallo por salto de la curva Tensión-Deformación:.....	74
5.2.	PRUEBA PULL OUT	75
5.2.1.	Fallo de adherencia en barra TGFRP:	76
5.3.	PRUEBA ECADA.....	77
5.3.1.	Fallo de anclaje en barra CFRP:	77
5.3.2.	Ensayos en barra GFRP:	78
5.4.	ENSAYO PARA FUNCIONAMIENTO DE ANCLAJE CON BARRAS FRP:.....	78
5.4.1.	Ensayos de anclajes en barra GFRP:	79
5.4.2.	Resultados de anclajes en barra GFRP:	80
5.4.3.	Ensayos de anclajes en barra TGFRP:	81
5.4.4.	Resultados de anclajes en barra TGFRP:	82
5.4.5.	Ensayos de anclajes en barra CFRP:	83
5.4.6.	Cambio de tipo de anclajes en barras FRP:	88
5.4.7.	Resultados de anclajes en barra CFRP:.....	89
5.5.	ENSAYO DE COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN	90
6.	CONCLUSIONES.	92
6.1.	FALLAS EN BARRAS POR ANCLAJE.	92
6.2.	COMPORTAMIENTO DE LA ADHERENCIA EN BARRAS FRP.....	92
6.3.	CONCLUSIÓN DE BARRA TGFRP:.....	93
6.4.	CONCLUSIÓN EN BARRAS CFRP Y GFRP:.....	93
7.	RECOMENDACIONES.	93
8.	REFERENCIAS.....	94

ILUSTRACIONES

Ilustración 1.- Diagrama tensión de adherencia-deslizamiento para	12
Ilustración 2.- Esquema de los ensayos de Edwards y Picard (1972)	14
Ilustración 3.- Esquema de carga de las probetas Salmons y McCrate (1977)-[3]	15
Ilustración 4.- Esquema de las configuraciones de ensayo. Burnett y Anis (1981)	15
Ilustración 5.- Esquema del equipo Hopkinson utilizado en los ensayos. Vos y Reinhardt (1982).	16
Ilustración 6.- Disposiciones de armaduras ensayadas. Jokela y Tepfers (1982).	16
Ilustración 7.- Esquema del ensayo. Scribner y Kobayashi (1984).	17
Ilustración 8.- Esquema del ensayo Laldji y Young (1988).	17
Ilustración 9.- Esquema del ensayo. Lorrain y Khélafi (1989).	18
<i>Ilustración 10.- Esquema de la disposición de la instrumentación.</i>	<i>19</i>
Ilustración 11.- Equipo de ensayo. Brearley y Johnston (1990).	19
Ilustración 12.- Esquema de ensayo. Chew (1991).	20
Ilustración 13.- Esquema de ensayo. Tassios y Bonataki (1992).	21
Ilustración 14.- Esquema de ensayo. Planta y sección A-A. Yu (1993).	21
<i>Ilustración 15.- Esquema del ensayo de simulación de la zona de transmisión.</i>	<i>22</i>
Ilustración 16.- Bastidor de ensayo. Cousins, Badeaux y Moustafa (1992).	22
<i>Ilustración 17.- Fuerzas en el cordón tras la actuación del sistema hidráulico.</i>	<i>23</i>
<i>Ilustración 18.- Gradiente de tensiones en el cordón. Cousins, Badeaux y Moustafa (1992).</i>	<i>23</i>
<i>Ilustración 19.- Esquema del ensayo. Modalidad b). Abrishami y Mitchell (1993).</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 20.- Esquema del ensayo. Modalidad c) Abrishami y Mitchell (1992).</i>	<i>24</i>
Ilustración 21.- Tesis doctoral consultada UPV.	28
Ilustración 22.- Variación de la tensión de la armadura pretesa en un elemento tras el destesado tesis doctoral José Martí UPV.	29
Ilustración 23.- Esquema general de las partes del equipo de ensayo ECADA UPV.	29
Ilustración 24.- Esquema del sistema de arrancamiento ECADA UPV.	30
Ilustración 25.- Esquema simplificado del comportamiento de diferentes tipos de fibra y acero convencional.	33
Ilustración 26.- Barras de análisis GFRP, TFRP y CFRP. Marca Sireg Geotech srl.	34
Ilustración 27.- Esfuerzo-deformación para barras FRP y barras de acero.	35
Ilustración 28.- Numero de barras y longitud para pruebas.	37
Ilustración 29.- Pegamento X60 de HBM de endurecimiento rápido.	38
Ilustración 30.- Preparación de barras FRP para prueba Tensile Test.	38
Ilustración 31.- Pegado de galga en barra GFRP.	39
Ilustración 32.- Protección de galga NP-50B en barra TGFRP.	39
Ilustración 33.- Colocación de galgas Extensiométricas en barras FRP.	39
Ilustración 34.- Instalación de extensómetro para pruebas Tensile Test.	40
Ilustración 35.- Muestra montada en equipo de tracción, barra GFRP.	40
Ilustración 36.- Procesamiento de datos y control de prueba UPC.	41
Ilustración 37.- Moldes con barras instaladas para hormigonado.	42
Ilustración 38.- Esquema de probeta de hormigón para prueba Pull out.	43
Ilustración 39.- Probetas hormigonadas y cilindros de prueba Pull out desencoformados a las 24 hrs.	43
Ilustración 40.- Preparación de probeta con tubo metálicos de agarre.	44
Ilustración 41.- Preparación de probetas para prueba Pull out.	44
Ilustración 42.- Muestra montada en equipo de tracción, barra GFRP.	45
Ilustración 43.- Partido de la probeta cubica.	46
Ilustración 44.- Probeta después de romper la probeta.	46
Ilustración 45.- Compression test, probeta cilíndrica para ensayo Pull out.	47
Ilustración 46.- Procesamiento de datos y control de prueba Pull out.	47
Ilustración 47.- Procedimiento de montaje de bastidor seleccionado. Laboratorio UPC.	49
Ilustración 48.- Perspectiva del Bastidor. (Ortiz y Ramírez).	50
Ilustración 49.- Esquema de cálculo de marco. (Ortiz y Ramírez).	50



Ilustración 50.- Planta del Bastidor UPC (Ortiz y Ramírez).....	50
Ilustración 51.- Montaje de base modular y encofrado móvil. Laboratorio UPC.	50
Ilustración 52.- Colocación de 2 LVDT para monitoreo de bastidor UPC.	51
Ilustración 53.- Encofrado de madera para fabricación de probetas.	51
Ilustración 54.- Configuración del Lado Pasivo del sistema ECADA.	52
Ilustración 55.- Configuración del Lado activo del sistema ECADA.	52
Ilustración 56.- Cuña elastómera con barril metálico sistema completo Sireg Geotech srl. (Foto propia fecha 11/04/2022).....	53
Ilustración 57.- Cuña elastómera de dos secciones. (Foto propia fecha 11/04/2022).	53
Ilustración 58.- Enfilado de Barra GFRP.....	53
Ilustración 59.- Sistema de cuñas para barra CFRP.....	54
Ilustración 60.- Surcos de cuña para barra TGFRP. (Foto propia fecha 18/05/2022).	54
Ilustración 61.- Sistema de Cuña para barra TGFRP. (Foto propia fecha 11/04/2022).....	54
Ilustración 62.- Colocación de placa y LVDT en barra TGFRP.	55
Ilustración 63.- Esquema general para tesado de barras FRP.	55
Ilustración 64.- Esquema general de proceso de pretensado ECADA.	56
Ilustración 65.- Software de medición y control de datos (catmanEasy V5.3.3).....	56
Ilustración 66.- Equipo de ensayo MEH-2000-H.	56
Ilustración 67.- Muestras cilíndricas de probeta ECADA.....	57
Ilustración 68.- Condiciones de conservación de probeta ECADA.....	58
Ilustración 69.- Esquema general del proceso de destesado y transferencia de carga ECADA.	58
Ilustración 70.- Instalación de LVDT probeta ECADA.	59
Ilustración 71.- Programación de ciclos de arranque en equipo de ensayo MEH-2000-H.	59
Ilustración 72.- Esquema del proceso de arranque ECADA.	60
Ilustración 73.- Equipo de pulido de cilindros de prueba UPC.	62
Ilustración 74.- Equipo de prueba compression test MEH-3000 UPC.	62
Ilustración 75.- Gráficos de ensayo mediante el software Win Test32, UPC.	62
Ilustración 76.- Alzado y sección tipo de la viga a utilizar para los ensayos a flexión.	64
Ilustración 77.- Preparación de las barras para su instrumentación.	65
Ilustración 78.- Pegado de galgas en barras GFRP para vigas de ensayo a flexión.	65
Ilustración 79.- Protección de galgas en barras FRP con tubo PVC.	66
Ilustración 80.- Planta de la distribución de galgas a Flexión.	66
Ilustración 81.- Sección de vigas con instrumentación a flexión.	66
Ilustración 82.- Vigas transportadas y montadas en el Laboratorio de la UPC.	67
Ilustración 83.- Equipo para pruebas de tracción marca “Instron 8803” UPC.	68
Ilustración 84.- LVDT utilizado para medir deformación del bastidor UPC.	69
Ilustración 85.- Cedula de carga utilizada UPC.....	69
Ilustración 86.- Gato hidráulico utilizado en las pruebas ECADA test, UPC.....	70
Ilustración 87.- Galga 5-3-5 CFRP (Foto propia fecha 31/05/2022).....	70
Ilustración 88.- Galga 2-3-3 TFRP (Foto propia fecha 31/05/2022).....	70
Ilustración 89.- Tipos de abrazaderas y anclajes para barras FRP.	71
Ilustración 90.- Fallo de anclaje de barra CFRP.	73
Ilustración 91.- Detalle de barra TGFRP, falla de ensayo por geometría de diseño.	75
Ilustración 92.- Barras FRP después de los Ensayos Test and test.....	75
Ilustración 93.- Fallo de adherencia en barra TGFRP.	76
Ilustración 94.- 1er ensayo ECADA en barra CFRP, Fallo de anclaje corte por presión transversal.....	77
Ilustración 95.- Sistema de ensayo para verificación de anclaje de barras FRP.	79
Ilustración 96.- Anclaje en el lado pasivo de barra GFRP. (Foto de fecha 20/01/2022).....	80
Ilustración 97.- Anclaje en el lado activo de barra GFRP. (Foto de fecha 20/01/2022)	80
Ilustración 98.- Anclaje al fallo en el lado pasivo de barra GFRP. (Foto de fecha 20/01/2022).....	80
Ilustración 99.- Anclaje al fallo en el lado activo de barra GFRP. (Foto de fecha 20/01/2022)	80
Ilustración 100.- Anclaje en el lado pasivo de barra TGFRP. (Foto de fecha 03/02/2022)	81
Ilustración 101.- Anclaje en el lado activo de barra TGFRP. (Foto de fecha 03/02/2022)	81

Ilustración 102.- Ensayo para verificación de anclaje con pegamento X60 en barra TGFRP.	81
Ilustración 103.- Surcos en barra TGFRP y pegamento X60. (Foto de fecha 11/02/2022)	82
Ilustración 104.- Cuña plástica con surcos y pegada con X60 para barra TGFRP. (Foto de fecha 11/02/2022)	82
Ilustración 105.- Tesado de Cuña plástica con surcos y pegada con X60 con relajación para barra TGFRP. (Foto de fecha 11/02/2022)	82
Ilustración 106.- Prueba de anclaje con relajación hasta roturade barra TGFRP. (Foto de fecha 11/02/2022)	82
Ilustración 107.- Cuña al fallo colocación normal TGFRP. (Foto de fecha 03/02/2022)	83
Ilustración 108.- Anclaje seleccionado con surcos y pegamento X60 a 24 horas de barra TGFRP. (Foto de fecha 11/02/2022)	83
Ilustración 109.- 1er Ensayo de anclaje en barra CFRP en barra de 4.9 mts de longitud.	83
Ilustración 110.- Sistema de anclaje utilizado para las pruebas de ensayo en barra CFRP.....	84
Ilustración 111.- Abrazadera metálica de aluminio para barra CFRP. (Foto de fecha 15/02/2022)	85
Ilustración 112.- Abrazadera metálica de cobre para barra CFRP. (Foto de fecha 14/02/2022).....	85
Ilustración 113.- Penetración lado activo para barra CFRP (cobre). (Foto de fecha 14/02/2022).....	86
Ilustración 114.- Penetración lado pasivo para barra CFRP (cobre). (Foto de fecha 14/02/2022)	86
Ilustración 115.- Penetración 2do ensayo lado activo para barra CFRP (cobre). (Foto de fecha 14/02/2022)	86
Ilustración 116.- Penetración 2do ensayo lado pasivo para barra CFRP (cobre). (Foto de fecha 14/02/2022)	86
Ilustración 117.- Penetración 3er ensayo lado pasivo para barra CFRP (aluminio). (Foto de fecha 15/02/2022).....	87
Ilustración 118.- Penetración 3er ensayo lado activo para barra CFRP (aluminio). (Foto de fecha 15/02/2022).....	87
Ilustración 119.- Penetración 4to ensayo lado pasivo para barra CFRP (aluminio y pegamento).	88
Ilustración 120.- Penetración 4tor ensayo lado activo para barra CFRP (aluminio y pegamento).	88
Ilustración 121.- Fallo en 4tor ensayo lado activo para barra CFRP (aluminio y pegamento).	88
Ilustración 122.- Fallo de la cuña en 4to ensayo en barra CFRP (aluminio y pegamento).	88
Ilustración 123.- Anclaje de cuña en 4 piezas y pegamento X60 en lado activo, barra CFRP.	89
Ilustración 124.- Anclaje de cuña en 4 piezas y pegamento X60 en lado pasivo, barra CFRP.	89
Ilustración 125.- Fallo en 1er ensayo de anclaje en barra CFRP.	89
Ilustración 126.- Fallos de anclajes final de la 2ª campaña en los dos lados de barra CFRP.....	90
Ilustración 127.- Fallo de anclaje final de la 3ª campaña de barra CFRP.....	90

TABLAS

Tabla 1.- Resistencia de los Hormigones Lorrain y Khélaifi. (1988 y 1989).	18
Tabla 2.- Ejemplo de estructuras de hormigón pretensadas y postensadas con FRP. Datos extraídos de (ACI Committee 440, Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, 2007)	27
Tabla 3.- Propiedades de Fibras de carbono y vidrio.	34
Tabla 4.- Características de las barras FRP, Sireg Geotech srl.	35
Tabla 5.- Numero de ensayos Tensile test, campaña experimental UPC.	37
Tabla 6.- Numero de ensayos pull-out, campaña experimental UPC.	42
Tabla 7.- Numero de ensayos ECADA test, campaña experimental UPC.	48
Tabla 8.- Diseño de mezcla de Hormigón SCC40.	60
Tabla 9.- Propiedades mecánicas del ensayo compression test.	61
Tabla 10.- Diseño de mezcla de Hormigón inicial para ECADA test.	61
Tabla 11.- Nomenclatura de ensayos, por tipo de ensayo.	63
Tabla 12.- Numero de ensayos de vigas a Flexión o Cortante, campaña experimental UPC.	64
Tabla 13.- Comparativa general Tensión-Deformación de las diferentes barras.	72
Tabla 14.- Comparativo de los valores medios frente a la literatura de barras FRP.	73
Tabla 15.- Presión de sujeción de ensayos en barra CFRP.	74
Tabla 16.- Grafico de salto Tensión-Deformación en barra GFRP.	74
Tabla 17.- Comparativa de medidas con extensómetro y galgas extensométricas.	74
Tabla 18.- Grafico de adherencia de las barras CFRP, GFRP y barra de acero convencional.	76
Tabla 19.- Grafico de arrancamiento en barras TGFRP.	76
Tabla 20.- Valores promedio de la tensión de adherencia en barra TGFRP.	77
Tabla 21.- Longitud de Adherencia en Barras GFRP ensayo ECADA UPC.	78
Tabla 22.- Resumen de ensayos ECADA realizados a barras GFRP.	78
Tabla 23.- Campaña experimental de verificación de anclajes en barras FRP.	79
Tabla 24.- Resultados de penetración de cuña en ensayo de anclaje barra GFRP.	80
Tabla 25.- Datos obtenidos de penetración de cuña instantes antes de fallo de barra CFRP.	84
Tabla 26.- Datos de elongación antes del fallo de barra CFRP.	84
Tabla 27.- Penetración de las cuñas 1er ensayo con abrazadera de cobre en barra CFRP.	85
Tabla 28.- Penetración de las cuñas 2do ensayo con abrazadera de cobre en barra CFRP.	86
Tabla 29.- Penetración de las cuñas 3er ensayo con abrazadera de aluminio en barra CFRP.	86
Tabla 30.- Penetración de las cuñas 4to ensayo con abrazadera de aluminio y pegamento en barra CFRP.	87
Tabla 31.- Tabla de temperaturas y humedades durante la campaña de experimentación.	91
Tabla 32.- Dosificaciones utilizadas para el hormigón a 24 horas en la campaña experimental Straduravius UPC.	91

1. INTRODUCCIÓN

La técnica de pretensado de estructuras de hormigón fue patentada por Eugène Freyssinet en 1920. El pretensado con armaduras pretensas es lo que actualmente rige a nivel mundial en la industria de prefabricados. Es una técnica que ya lleva dentro de los procesos constructivos casi 100 años, con pequeños avances en cuestión de materiales de mayor resistencia. Dicha técnica consiste en tesar la armadura previamente al hormigonado del elemento estructural, procediendo al tesado una vez alcanzada la resistencia determinada en el diseño. Posterior a esto se realiza el destesado en el cual el esfuerzo dado en el pretensado en las armaduras es transmitido por adherencia al hormigón del elemento estructural. Por lo que la adherencia entre el hormigón y la armadura es algo fundamental para garantizar la correcta transmisión de la fuerza dada en el pretensado y que durante la vida útil del elemento estructural no pierda sus propiedades de anclaje de la armadura.

Este trabajo pretende aportar la parte experimental del estudio de la adherencia y su comportamiento de las armaduras pretensas al hormigón, con elementos de hormigón pretensado utilizando FRP como armadura activa.

Uno de los momentos más importantes dentro del proceso de la fabricación de elementos estructurales es la transferencia de la fuerza de pretensado, como anteriormente lo mencionamos, en ese preciso momento el hormigón debe tener la suficiente resistencia para soportar las tensiones elevadas y debe ser capaz de transferir los esfuerzos de las armaduras activas por adherencia. Por esta razón se presta una atención especial a la capacidad resistente del hormigón, en los primeros días o incluso horas de su fabricación, cuando más pronto alcance la resistencia de diseño necesaria, más pronto se procederá al destesado y con ello un mejor rendimiento en la producción de los elementos estructurales.

Actualmente existen códigos nacionales e internacionales como el Código Estructural aprobado el 29 de junio de 2021[2], en el que se desarrolla una serie de prescripciones relativas a estos materiales, relacionado con sus materiales constituyentes como la tecnología de sus aplicaciones y criterios de diseño, estos criterios de diseño están basados en investigaciones y experiencias previas, de las cuales todavía existen grandes campos por estudiar, como lo es en este caso la adherencia y su comportamiento de las armaduras pretensas al hormigón, con elementos de hormigón pretensado de alta resistencia utilizando FRP como armadura activa.

Dentro de la realización de este trabajo nos encontramos que existe un vacío normativo por lo que respecta al comportamiento de elementos pretensados con FRP, y en particular en las condiciones de adherencia de las armaduras pretensas en hormigones de alta resistencia, de lo cual añadiendo que ocuparemos materiales de barras de alta resistencia CFRP Carbopree®, barras GFRP Glasspree® FL E46 y un nuevo tipo de barra de fibra de vidrio con una resina termoplástica (TGFRP), la normativa está en pleno desarrollo.

Por lo anterior en este trabajo de investigación experimental, pretendemos dejar un antecedente que permita profundizar en el conocimiento del comportamiento adherente de las armaduras pretensas al hormigón con barras activas FRP y así se contribuirá describiendo el proceso, equipo y camino a seguir para realizar las pruebas de adherencia, donde también podremos describir que nos ponemos encontrar durante las mismas.[3]

Este Trabajo Final de Master (TFM), está orientado al proceso de investigación experimental del cual tuve la oportunidad de participar durante el periodo octubre 2021 a septiembre 2022, dentro del proyecto de investigación *Straduravius*, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España, el cual estudia la aplicación de materiales de construcción avanzados en estructuras de hormigón de altas prestaciones. Este proyecto está enfocado en la vida útil de las estructuras de hormigón, en ambientes agresivos, el cual puede verse reducida a causa del deterioro producido por la corrosión de la armadura interna.

1.1. OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de este trabajo de investigación es dejar un precedente sobre los procedimientos que se deben de realizar para el estudio experimental de la adherencia y del comportamiento a flexión de elementos de hormigón pretensado con armaduras pretesa de FRP.

Así también comprender los diversos aspectos del comportamiento adherente de las barras de refuerzo FRP en elementos de hormigón mediante ensayos pull-out, Tensile test y Ecada, llegar a algunas conclusiones que ayudarán al desarrollo de pautas de diseño para garantizar la funcionalidad, durabilidad y seguridad incluso en ambientes agresivos de estructuras.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Para lograr el objetivo principal será necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- 1.- Realizar una revisión de la literatura y normativa existente orientada al comportamiento adherente entre las barras FRP y el hormigón, e identificar los diversos parámetros que influyen en las características de la adherencia, y diferentes modelos analíticos que representen el comportamiento adherente.
- 2.- Investigar experimentalmente mediante ensayos pull-out y Ecada de los principales parámetros que afectan el comportamiento de la adherencia de barras de alta resistencia CFRP Carbopree®, barras GFRP Glasspree® FL E46 y un nuevo tipo de barra de fibra de vidrio con una resina termoplástica (TGFRP) termoestable o termoplástica, y compararlas con armaduras convencionales de acero.
- 3.- Con base en los resultados experimentales, definir la influencia de las diferentes variables en el desarrollo de las pruebas tanto en el desarrollo de la adherencia como en el modo de falla adherente de las muestras de las diversas barras en estudio.
- 4.- Contribuir a la definición de una campaña experimental más extensa de ensayos a flexión y cortante de vigas pretensadas con armadura pretesa de FRP.

2. ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo, se presenta el estado actual de conocimiento sobre las investigaciones previas realizadas relativas a la adherencia entre las armaduras y el hormigón, y al comportamiento estructural de elementos de hormigón pretensado con armadura pretesa de FRP.

Se realizará una descripción de los fenómenos de transmisión y anclaje del pretensado, así como se pondrá de manifiesto el que actualmente este tipo de ensayo no está normalizado. Se presentará un ensayo de adherencia para armaduras pretensadas de acero convencional, desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia (método Ecada). Este ensayo se adaptará para el caso de armadura de FRP pretensada.

También se incluye una recopilación de los estudios llevados a cabo a lo largo del tiempo por diferentes autores y lo efectos que nos permitan determinar los parámetros dispuestos mediante los ensayos pull-out, Tensile test y Ecada.

Todo esto se complementará con la recopilación de expresiones existentes en algunas recomendaciones o publicaciones existentes para evaluar la adherencia de armaduras activas de FRP. Con ello se pretende poder encontrar el procedimiento, determinación y aplicación de la caracterización de la capacidad adherente de las armaduras con los tres tipos de barras correspondientes a este trabajo experimental de tesis.

2.1. EL FENOMENO DE ADHERENCIA EN BARRAS DE REFUERZO DE FRP

La teoría general basada en la técnica tradicional nos dice que el pretensado del hormigón mediante armadura pretesas comprende a grandes rasgos las siguientes fases:

- **Tesado de la armadura:**

Es la operación mediante la cual se aplica una tensión de tracción a la armadura, quedando está anclada en sus extremos mediante anclajes provisionales.

- **Hormigonado del elemento:**

Mediante un molde de encofrado es el vertido del hormigón y su correcta compactación para evitar oquedades.

- **Destesado de la armadura:**

Es la operación mediante la cual se transmite la fuerza de pretensado de las armaduras pretesas al hormigón, y se efectúa liberando dichas armaduras de los anclajes provisionales dispuestos en sus extremos una vez endurecido el hormigón y alcanzada una resistencia suficiente.

Así es como mediante este proceso se realiza la transmisión de la fuerza de pretensado al hormigón, todo esto se realiza por adherencia.[4]

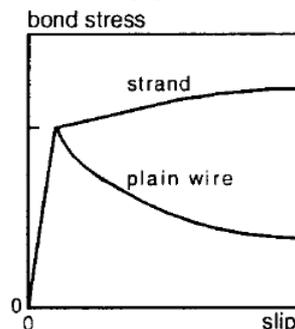


Ilustración 1.- Diagrama tensión de adherencia-deslizamiento para alambres lisos y cordones lisos. FIB 2000. [2]

Debido a que en este trabajo de tesis realizaremos la investigación con un tipo de barra diferente a la convencional, el comportamiento resistente de las estructuras reforzadas con FRP se basa en el adecuado proceso de transferencia de tensiones entre la fuerza de tesado y el hormigón, con esto la adherencia es clave para poder controlar la eficacia y buen comportamiento en la estructura.

Debido a las diferentes prestaciones que tienen las barras de FRP se espera que el comportamiento de adherencia entre las barras de FRP y el hormigón sea diferente al de las barras de acero convencional descritas en la (Ilustración 1).

Por lo mencionado, entonces la adherencia entre el refuerzo y el hormigón se puede describir como la suma de tres factores, adhesión, fricción y cizallamiento de los componentes[5]. La unión adhesiva se basa en las fuerzas de adherencia y capilaridad que surgen con el endurecimiento del hormigón. Este tipo de enlace tiene una importancia secundaria para el refuerzo convencional con banda de rodadura. La unión por fricción se activa a través de un desplazamiento relativo del refuerzo al hormigón y, además, necesita una tensión perpendicular. La tensión perpendicular puede ser inducida por cargas externas, retracción o por la prevención de una extensión lateral. La unión por fricción aumenta a través de las imperfecciones en la superficie de las barras. Es alto para deslizamientos pequeños y disminuye para deslizamientos grandes. El tercer y más importante componente de unión para el refuerzo convencional es la unión por cortante. Se basa en el enclavamiento o cizallamiento mecánico de la barra.

2.2. TIPOLOGIA DE ENSAYOS DE ADHERENCIA

En este punto se expone una recopilación de diferentes tipologías de ensayos de adherencia, los cuales a lo largo de la línea del tiempo analizada serán los que tienen un antecedente similar o se asemejan a las pruebas que realizaremos en esta jornada experimental descrita en el trabajo de investigación.

A continuación desglosaremos los procedimientos a lo largo de la historia relacionados con pruebas experimentales para hormigón en general con armaduras convencionales y pretesas[6].

▪ ARMADURA PASIVA

1.1. Ensayos tipo tirante:

Los ensayos de tipo tirante comprenden los ensayos en los que la armadura, embebida en una probeta de hormigón, es sometida a tracción desde ambos extremos.

1.2. Ensayos de adherencia con armadura pasiva

Dentro de este grupo se incluyen los ensayos en los que la armadura, embebida total o parcialmente en una probeta de hormigón, es sometida a tracción desde un extremo.

▪ ARMADURA ACTIVA:

▪ ARMADURA SIN DESTESAR:

- Ensayos de arrancamiento

▪ ARMADURA DESTESADA:

▪ Ensayos de simulación:

(sin desarrollo total de longitudes de transmisión y/o anclaje)

- de la zona de transmisión
- de las zonas de transmisión y anclaje

▪ **Ensayos para determinación de longitudes:**

- de transmisión
- de transmisión y/o anclaje

A continuación, se exponen, en orden cronológico, diferentes concepciones de este tipo de ensayos con armadura de pretensado, destacando el reciente desarrollo de ensayos de arrancamiento en probeta con varios cordones embebidos[6]:

2.2.1. Armadura pasiva

Armstrong (1949)

La literatura científica relativa a la adherencia de las armaduras pretesas era todavía muy escasa a mediados del siglo XX. Por ello, Armstrong realiza una ambiciosa investigación experimental, destacando las distintas tipologías de ensayos empleadas, así como la variedad de tipos de probetas ensayadas y el amplio abanico de variables estudiadas (rugosidad de la armadura, dosificación y curado del hormigón, evolución en el tiempo, ...).

Desarrolla, entre otras tipologías, ensayos de arrancamiento con probetas de sección cuadrada de 10 cm de lado y 2.4 m de longitud, con un alambre de alta resistencia (2050 MPa de carga unitaria máxima) centrado de 3/16" de diámetro. El hormigón tiene una resistencia a compresión de 35 MPa a 7 días en probeta cúbica de arista 15 cm.

En relación con el ensayo de arrancamiento, Armstrong concluye que las condiciones bajo las que falla la adherencia de un alambre pretensado no pueden reproducirse mediante este tipo de ensayos realizados con armadura sin tesar.

Blakey (1955)

Realiza ensayos de arrancamiento para estudiar la influencia del procedimiento de curado en la adherencia de alambres de 0.2", lisos e indentados, y concluye que el comportamiento adherente de estos últimos es mejor y que una ganancia en la resistencia a compresión del hormigón no siempre va acompañada de un aumento de la capacidad adherente.

Edwards y Picard (1972)

Edwards y Picard realizaron ensayos de tirante y ensayos de arrancamiento para determinar los deslizamientos de las armaduras y establecer una relación tensión de adherencia-deslizamiento (Ilustración 2).

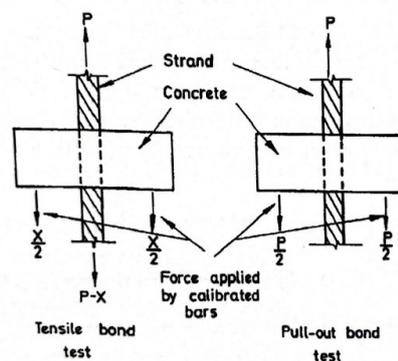


Ilustración 2.- Esquema de los ensayos de Edwards y Picard (1972)

Salmons y McCrate (1977)

Desarrollan ensayos de arrancamiento para estudiar el comportamiento de uniones entre elementos prefabricados. Analizan las curvas tensión en la armadura-deslizamiento para distintas longitudes adherentes (entre 100 y 915 mm), combinando varios diámetros de armadura (3/8", 7/16", 0,5" y 0,6") con varios hormigones de resistencia a compresión a 28 días comprendida entre 25 y 50 MPa.

Los ensayos los realizan con una máquina servocontrolada especialmente diseñada para este ensayo.

Las dos configuraciones de ensayo empleadas, con una o 2 armaduras, se ilustran en la (Ilustración 3)

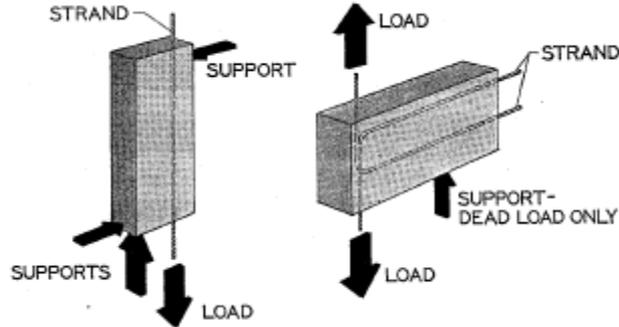


Ilustración 3.- Esquema de carga de las probetas Salmons y McCrate (1977)-[3]

Deducen un criterio de diseño para las longitudes adherentes óptimas, y concluyen que el efecto de la resistencia del hormigón (en el rango estudiado) y del diámetro de las armaduras (en términos de relación tensión de la armadura-deslizamiento) tienen una influencia despreciable en la adherencia.

Burnett y Anis (1981)

También desarrollan ensayos de arrancamiento para estudiar el comportamiento de uniones entre elementos prefabricados, en este caso con cordones de 7 alambres de 3/16" de diámetro. Son 3 las configuraciones de ensayo experimentadas (Ilustración 4): en placas alveolares, en prismas y en prismas modificados. Obtienen curvas fuerza en la armadura-desplazamiento, y constatan que, aunque la naturaleza de los elementos ensayados afecta a los resultados obtenidos, las diferencias no son significativas para los objetivos del estudio. No obstante, reconocen que la investigación debe ser ampliada para fijar los ratios longitud adherente/diámetro de la armadura.

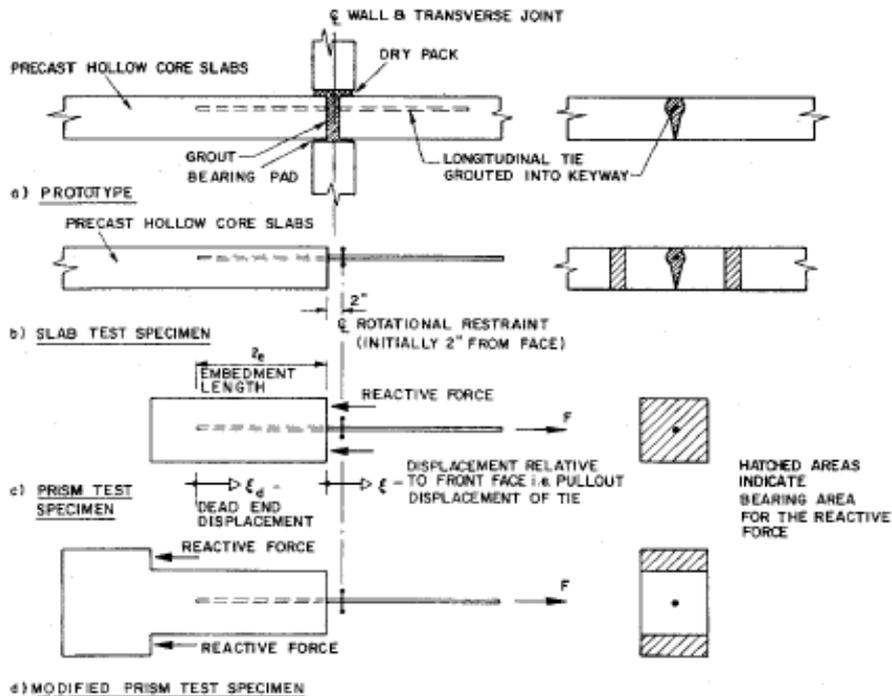


Ilustración 4.- Esquema de las configuraciones de ensayo. Burnett y Anis (1981)

Vos y Reinhardt (1982)

Con la finalidad de estudiar la influencia de la velocidad de aplicación de la carga sobre la adherencia en elementos de hormigón armado y hormigón pretensado, llevan a cabo ensayos de arrancamiento con longitud embebida corta aplicando un amplio rango de velocidades de carga a probetas con distintos tipos de armadura y diferentes calidades de hormigón.

El equipo de ensayo empleado se ilustra en la (Ilustración 5).

Como instrumentación utilizan galgas extensométricas, colocadas en la armadura, para medir la fuerza de arrancamiento, y transductores de desplazamiento para medir los deslizamientos.

Realizan 4 ensayos en probetas de 10.2 cm de diámetro con cordones de pretensar de 3/8" de diámetro y de 1730 MPa: dos de ellos con una velocidad de carga de 40 MPa/ms y otros dos con una velocidad de carga de 0.0003 MPa/ms. La resistencia del hormigón es de 55 MPa a 28 días en probeta cúbica de 15 cm de arista.

Obtienen curvas tensiones de adherencia-deslizamiento, y concluyen que la velocidad de carga no influye significativamente ni en la máxima tensión de adherencia ni en el deslizamiento registrado en el caso de cordones.



Ilustración 5.- Esquema del equipo Hopkinson utilizado en los ensayos. Vos y Reinhardt (1982).

Jokela y Tepfers (1982)

Presentan una investigación experimental con un total de 62 ensayos de arrancamiento con cordones, tanto sin tesar como tesados, con el objeto de clarificar, a raíz de las diferencias en las prescripciones de las normas finlandesa y sueca, la influencia del agrupamiento de armaduras y el efecto del pretensado en la adherencia.

Las probetas son cúbicas de 30 cm de arista, quedando limitada la longitud adherente a los 15 cm centrales. En la (Ilustración 6) se representan las distintas disposiciones de armaduras ensayadas.

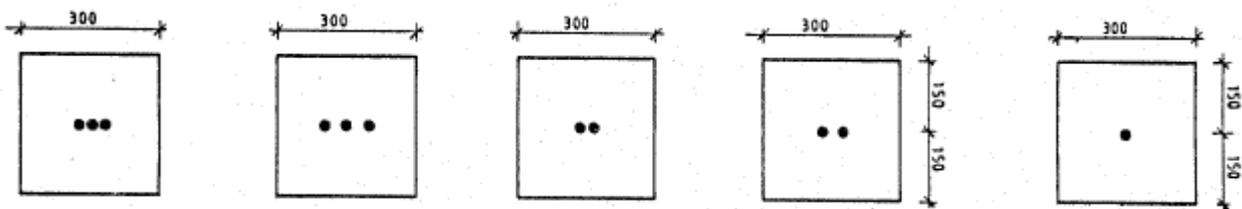


Ilustración 6.- Disposiciones de armaduras ensayadas. Jokela y Tepfers (1982).

Los cordones son de 7 alambres, de 2012 MPa de carga unitaria de rotura y 12.5 mm de diámetro. La resistencia a compresión del hormigón en probeta cilíndrica a los 4 días es de 35 MPa. Obtienen

y comparan las curvas fuerza en la armadura-deslizamiento, y concluyen, en relación con las armaduras sin tesar, que el agrupamiento de 2 ó 3 armaduras no aumenta la tendencia a hendimiento, no reduce la capacidad de anclaje y produce un ligero incremento de los deslizamientos registrados.

Scribner y Kobayashi (1984)

Realizan una investigación sobre la adherencia de cordones de 7 alambres no tesados sometidos a cargas cíclicas de arrancamiento. Consideran 4 variables: la resistencia del hormigón (20, 45 y 63 MPa), el diámetro del cordón (6.4, 11 y 13 mm), el confinamiento (0, 6.9 y 10.3 MPa de presión) y la historia de carga aplicada (7 secuencias diferentes).

El ensayo se esquematiza en la (Ilustración 7). Mediante gatos hidráulicos anulares dispuestos en los extremos se introduce la fuerza de arrancamiento de forma alterna. Se registran las fuerzas aplicadas, mediante células de carga anulares, y los deslizamientos de la armadura a través de transductores de desplazamiento y micrómetros analógicos. En algunos casos aplican confinamiento envolviendo la probeta con una célula de presurización.

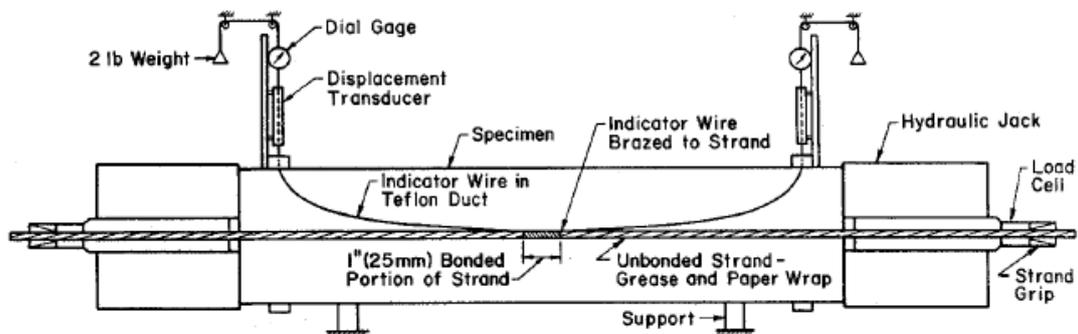


Ilustración 7.- Esquema del ensayo. Scribner y Kobayashi (1984).

Las probetas de ensayo son prismas de 102x102x460 mm, con una armadura centrada. Para conseguir una distribución de la tensión de adherencia prácticamente uniforme, limitan la longitud adherente a 2.54 mm (1").

Realizan un total de 111 ensayos, y concluyen que la resistencia del hormigón apenas influye en la capacidad adherente pero sí afecta considerablemente a los deslizamientos registrados.

Laldji y Young (1988)

Estudian el comportamiento adherente de cordones de pretensado en morteros de cemento para anclajes al terreno. Las variables del programa experimental son: tipo de cordón (normal, compacto e indentado), resistencia a compresión del mortero (46 y 40 MPa a 15 días en probeta cúbica, correspondientes a relaciones agua-cemento de 0.5 y 0.6), longitud adherente (25, 50 y 75 mm) y confinamiento (de 0 a 15 MPa). El esquema de ensayo se ilustra en la (Ilustración 8).

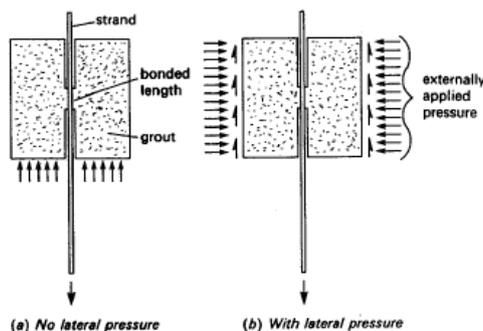


Ilustración 8.- Esquema del ensayo Laldji y Young (1988).

Las probetas son cúbicas de 10 cm de arista, con longitud adherente corta. Los diámetros de los cordones son: 12.9 mm (normales), 12.7 (compactos) y 12.5 (indentados).

Entre las conclusiones destacan que la tensión media de adherencia de cordones indentados es un 20% superior a la de cordones normales, mientras que en el caso de los cordones compactos es un 10% inferior a la de los normales. Por otro lado, para presiones de confinamiento biaxial inferiores al 30% de la resistencia a compresión de la probeta, la resistencia a adherencia aumenta 1 MPa por cada 3 MPa de presión de confinamiento, no observando aumento una vez que se supera dicho límite.

Lorrain y Khélafi (1988 y 1989)

Presentan los primeros resultados de un programa de investigación cuyo objetivo es estudiar la adherencia en hormigones de alta resistencia (con humo de sílice). Realizan dos tipos de ensayo: tirante y arrancamiento (véase apartado 1.2. Arrancamiento con armadura no tesada) con la finalidad de determinar relaciones fuerza-deslizamiento de armaduras de pretensar.

No aportan descripción del equipo utilizado. El esquema del ensayo se presenta en la (Ilustración 9).

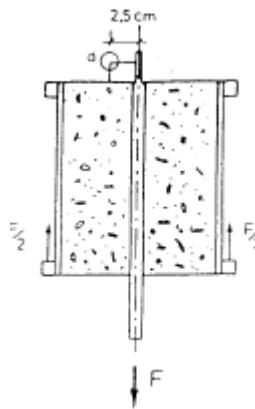


Ilustración 9.- Esquema del ensayo. Lorrain y Khélafi (1989).

Se realizan dos series de ensayos: una para comparar la adherencia en hormigón de alta resistencia y hormigón convencional, y otra para estudiar la variación de las características adherentes en hormigón de alta resistencia.

Realizan ensayos a 1, 3, 7, 14, 28, 90 y 180 días en probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y longitud entre 12 y 25 cm. No aportan datos sobre el número de probetas ensayadas. Utilizan alambre de pretensar de 8 mm de diámetro, liso y grafilado, de límite elástico 1500 MPa, resistencia nominal 1700 MPa y módulo de elasticidad 200000 MPa. Las resistencias de los hormigones son:

Tipo de Hormigón	MPa	1 día	3 días	7 días	14 días	28 días
Alta resistencia	f_c	53.7	72	86	92.6	106
	f_t	5.1	6	7	7.5	64
Convencional	f_c	33.2	46.5	55.8	61	7.9
	f_t	3.2	4.4	4.8	5.5	5.8

Tabla 1.- Resistencia de los Hormigones Lorrain y Khélafi. (1988 y 1989).

Como instrumentación utilizan un captador de desplazamiento inductivo emplazado en el extremo libre de la armadura y galgas extensométricas eléctricas para medir las deformaciones en la armadura. Las galgas son de pequeñas dimensiones y dispuestas en diferentes generatrices de la armadura para perturbar lo menos posible el fenómeno observado en la (Ilustración 10).

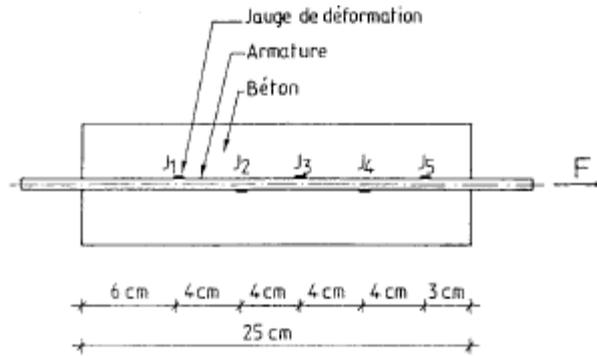


Ilustración 10.- Esquema de la disposición de la instrumentación.
Lorrain y Khélaifi (1989).

Las variables estudiadas son: edad del hormigón, dosificación de humo de sílice, dosificación de cemento, relación agua-cemento, longitud adherente, rugosidad de la armadura y tipo de carga.

Las principales conclusiones son que el hormigón de alta resistencia presenta mejores propiedades adherentes que el hormigón convencional y que, cualitativamente, los resultados que se obtienen en ambos tipos de ensayo (arrancamiento y tirante) son similares.

Brearley y Johnston (1990)

Desarrollan una investigación experimental para determinar el comportamiento adherente de cordones recubiertos con resina epoxi y contrastar los resultados obtenidos mediante ensayos de arrancamiento con los resultados obtenidos por Cousins (1986)

El equipo de ensayo se ilustra en la (Ilustración 11). La carga es aplicada mediante un gato hidráulico, colocado en el extremo superior de la probeta.

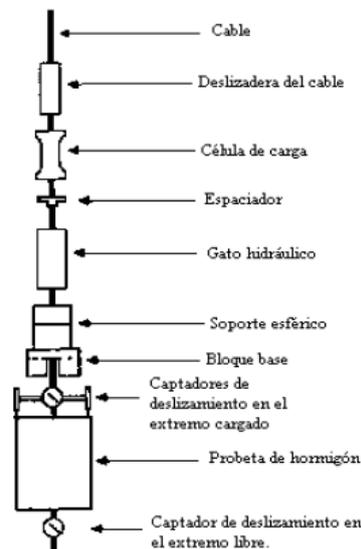


Ilustración 11.- Equipo de ensayo. Brearley y Johnston (1990).

Emplearon armaduras de 1862 MPa (Grade 270) de diámetros 9.5, 12.7 y 15.2 mm (3/8", 0.5" y 0.6"). Para las armaduras recubiertas se empleó como recubrimiento un polímero adherente con distintas densidades de impregnación (baja, media y alta). Se utilizó un hormigón convencional, con aditivo superplastificante y sin adiciones. La resistencia a compresión simple media en el momento del ensayo en probeta cilíndrica fue de 27.6 MPa, y de 34.5 MPa a 28 días.

Realizaron un total de 52 probetas prismáticas de 203x203x305 mm, con una armadura centrada adherida a todo lo largo de la probeta.

Observaron que los cordones recubiertos con resina epoxi presentan mejor adherencia que los no

recubiertos y que del ensayo de arrancamiento no se pueden deducir los parámetros del modelo de Cousins obtenidos en ensayo de vigas. No obstante, se muestran partidarios de la implantación de un ensayo de arrancamiento como ensayo de control de calidad dado que sí permite analizar variables como el diámetro de la armadura y la densidad de la impregnación de recubrimiento.

Chew (1991)

Inicia en 1989 un programa experimental como consecuencia de la controversia sobre la aplicabilidad a cordones de alta resistencia de las prescripciones de ACI 318-83 relativas a las longitudes de transmisión y anclaje. Realiza tres tipos de ensayos: arrancamiento, transmisión de pretensado en prismas y transmisión de pretensado y rotura de vigas de puente.

El esquema del ensayo de arrancamiento se ilustra en la (Ilustración 12).

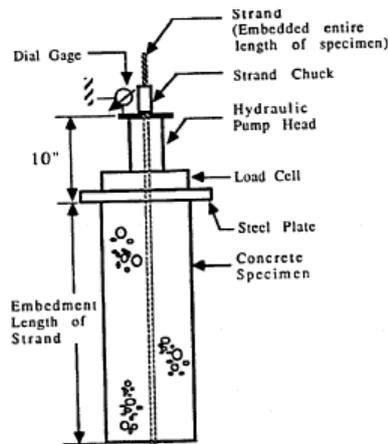


Ilustración 12.- Esquema de ensayo. Chew (1991).

Concluye que las variables diámetro del cordón, condición superficial y resistencia del hormigón muestran los mismos efectos en los ensayos de arrancamiento y en los ensayos de transmisión en prismas, aunque con diferente magnitud.

2.2.2. Arrancamiento con armadura tesada

Al igual que en los ensayos del apartado anterior, la armadura, embebida total o parcialmente en una probeta de hormigón, es sometida a tracción desde un extremo. La diferencia estriba en que la armadura ha sido tesada previamente y, por tanto, la armadura ya está sometida a una determinada tensión de tracción al inicio del ensayo de arrancamiento.

A continuación, se presentan, cronológicamente, diferentes concepciones de este tipo de ensayos¹ con armadura de pretensado.

Tulin y Al-Chalabi (1969)

Estudian la influencia del nivel de tesado y del contenido de cemento en la adherencia de cordones de 0.5" Grade 270 en hormigones con árido ligero de 35 MPa de resistencia a compresión a los 7 días. Las probetas son cilíndricas, de 15 cm de diámetro y 74 cm de longitud, con un cordón centrado.

El procedimiento de ensayo requiere un cambio de ubicación y posición de la probeta. Así, la probeta se tesa y hormigona en un bastidor horizontal. Tras el destesado, la probeta se dispone en una prensa de ensayos en posición vertical. Con ello resulta que, necesariamente, el pretensado es transferido en ambos extremos de la probeta, desconociéndose si la longitud de la probeta es suficiente como para que se desarrollen 2 longitudes de transmisión.

Concluyen que la capacidad adherente aumenta ligeramente, bien cuando se disminuye la fuerza de pretensado, bien cuando se disminuye el contenido de cemento.

Tassios y Bonataki (1992)

Presentan un ensayo para estudiar la influencia de la fisuración en la adherencia de tendones compuestos por 4 cordones de 7 alambres. El esquema del ensayo se presenta en la (Ilustración 13). Ensayaron dos tipos de probeta: con longitud adherente total o parcial a lo largo de la longitud de la probeta. Como resultado del ensayo se obtienen relaciones tensión de adherencia-deslizamiento con la finalidad de contrastar un modelo teórico.

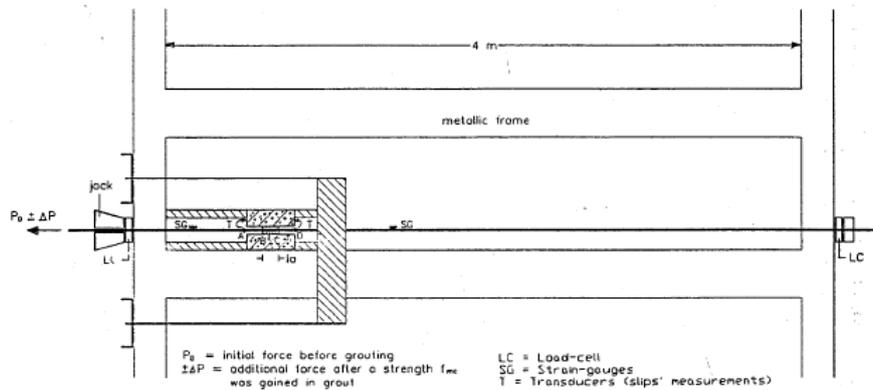


Ilustración 13.- Esquema de ensayo. Tassios y Bonataki (1992).

2.2.3. Simulación de la zona de transmisión

Este tipo de ensayos se caracteriza por la realización del destensado de la armadura en probetas en las que no se desarrolla completamente la transmisión del pretensado. Las probetas empleadas son de corta longitud y/o de pequeño espesor, produciéndose fisuración en algún momento de la transferencia del pretensado. Consecuentemente, en este tipo de ensayos no se puede medir la longitud de transmisión. Las tipologías más destacables se muestran a continuación[6].

Yu (1993)

Presenta un ensayo para investigar el comportamiento adherente en la zona de transmisión (Ilustración 14). Ensayó probetas de 15 cm de longitud con cordón centrado de 0.5" 270 K, con y sin recubrimiento epoxi. La resistencia a compresión del hormigón es de 40 MPa a 28 días.

Al tesar introducen separadores entre el segundo anclaje y la segunda placa para mantener la tensión del cordón. El segundo anclaje del extremo izquierdo queda liberado al traccionar el cordón justo antes de proceder al destensado.

Detecta una gran influencia de la compactación del hormigón en la adherencia y, aunque reconoce que el alcance de la experimentación es muy limitado, obtienen un modelo analítico que también aplican para verificar los resultados obtenidos por Cousins et al. (1990). Asimismo, sugiere que este ensayo puede perfeccionarse para estudiar el efecto de diferentes velocidades de destensado.

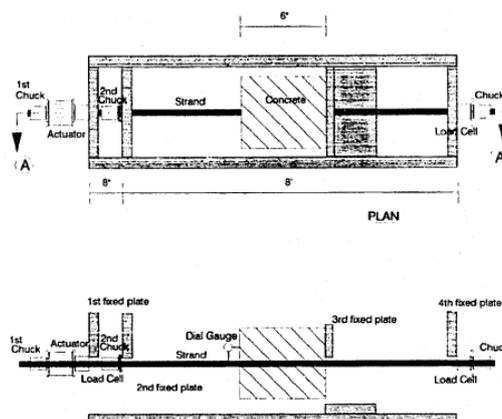


Ilustración 14.- Esquema de ensayo. Planta y sección A-A. Yu (1993).

Vandewalle y Mortelmans (1994)

Mediante un ensayo de simulación de la transmisión del pretensado en probetas de 50 cm de longitud (Ilustración 15) cubren la primera parte de una investigación, correspondiente al establecimiento de un modelo teórico de adherencia basado en el coeficiente de fricción armadura-hormigón. En el ensayo se registra la variación de tensión en la armadura y el deslizamiento durante la operación de destesado. Una longitud de probeta tan corta permite asumir una distribución uniforme de tensiones de adherencia. Ensayaron probetas con secciones cuadradas de 10, 8 y 6 cm de lado.

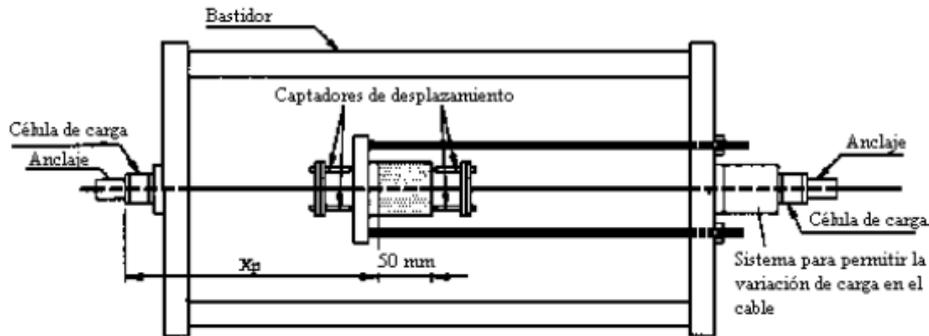


Ilustración 15.- Esquema del ensayo de simulación de la zona de transmisión. Vandewalle y Mortelmans (1994).

2.2.4. Simulación de las zonas de transmisión y de anclaje

Este tipo de ensayos se caracteriza por la realización del destesado de la armadura en probetas en las que no se desarrolla completamente la transmisión del pretensado y/o por la realización de una operación de arrancamiento en condiciones en las que no es posible alcanzar la máxima tensión de tracción resistida por la armadura. Se realizan en probetas de corta longitud y/o de pequeño espesor, produciéndose fisuración en algún momento de la transferencia del pretensado y/o de la operación de arrancamiento. Consecuentemente, en este tipo de ensayos no se pueden medir las longitudes de transmisión y de anclaje. Las técnicas más destacables dentro de este tipo de ensayos se exponen a continuación[6].

Cousins, Badeaux y Moustafa (1992)

Proponen un nuevo ensayo (Ilustración 16) para reproducir las condiciones de la transmisión y anclaje del pretensado con la finalidad de evaluar las características adherentes de los cordones de 3/8", 0.5" y 0.6" Grade 270 K, con y sin recubrimiento epoxi. La probeta es de sección cuadrada de 20 cm de lado y 30 cm de longitud. La resistencia a compresión del hormigón es de 27.6 MPa a la edad de ensayo (3 días).

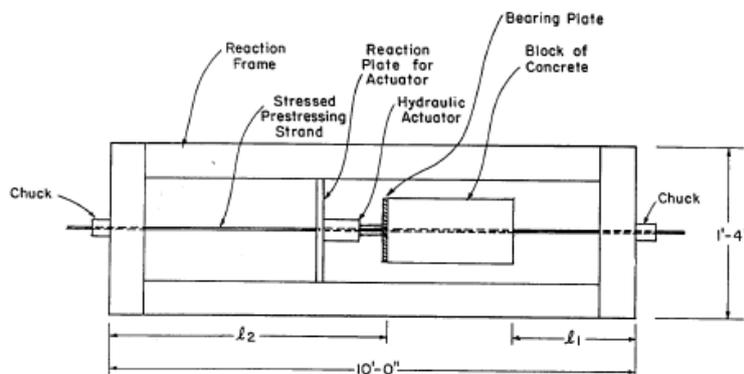


Ilustración 16.- Bastidor de ensayo. Cousins, Badeaux y Moustafa (1992).

Tras el tesado del cordón y el hormigonado de la probeta, se procede a la actuación sobre el sistema hidráulico, de modo que en uno de los extremos de la probeta se incrementa la tensión del cordón, simulando así la zona de anclaje, y en el otro extremo la tensión del cordón disminuye,

simulando de esta manera la zona de transmisión (Ilustración 17 y 18). El efecto Hoyer se manifiesta a lo largo de la distancia R.

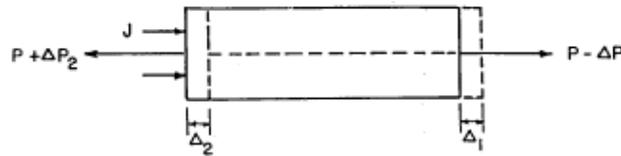


Ilustración 17.- Fuerzas en el cordón tras la actuación del sistema hidráulico.

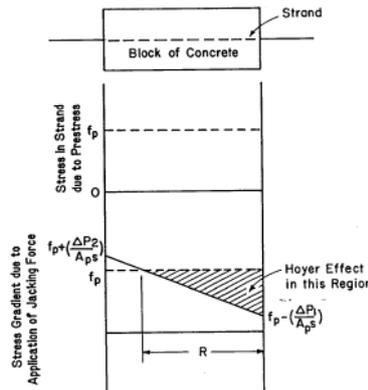


Ilustración 18.- Gradiente de tensiones en el cordón. Cousins, Badeaux y Moustafa (1992).

Realizaron ensayos preliminares para fijar las dimensiones del bastidor de ensayo y las dimensiones y posición de la probeta. Asimismo, realizaron ensayos de transmisión del pretensado en prismas de sección 9x9 cm y 2.44 m de longitud con cordón de 3/8" centrado.

Concluyen que el ensayo propuesto es fácil de realizar y de reproducir, y que las desviaciones típicas de los resultados obtenidos son elevadas si se tiene en cuenta que se ha trabajado en condiciones de laboratorio, aunque son del mismo orden de magnitud que las de los resultados de ensayos de arrancamiento convencional, si bien las tensiones de adherencia que se obtienen en el nuevo ensayo son mayores dado que se reproduce el efecto Hoyer. Por otro lado, no consiguen establecer una relación clara entre los resultados obtenidos en el ensayo propuesto y las longitudes de transmisión en prismas.

Abrishami y Mitchell (1992) y Abrishami (1994)

Presentan una nueva técnica de ensayo para simular, en un principio, una distribución uniforme de tensiones de adherencia en armaduras pasivas. Posteriormente utilizan esta técnica para estudiar el comportamiento adherente de cordones de pretensado de 3/8", 0.5" y 0.6" de diámetro.

Desarrollan 3 modalidades de ensayo:

- Simulación de la zona de transmisión, reduciendo la fuerza en el cordón (destesado) desde un extremo (Ilustración 19).
- Simulación de la zona de anclaje, aumentando la fuerza del cordón (arrancamiento) por encima de la fuerza del cordón al inicio del ensayo (cordón tesado) (Ilustración 20).
- Combinación de las dos anteriores (Ilustración 20).

La probeta de ensayo es cilíndrica 15x30 cm, con una armadura centrada, y se dispone verticalmente en un bastidor de ensayo que incorpora en sus extremos superior e inferior sistemas mecánicos para variar la fuerza en la armadura en las operaciones de tesado, destesado y arrancamiento. Durante el ensayo se registran la fuerza y el deslizamiento del cordón en ambos extremos.

Mediante esta técnica investigan la influencia de la resistencia del hormigón, del recubrimiento, del tipo y diámetro de armadura, del recubrimiento epoxi y de la velocidad de carga [5, 2, 3].

Obtienen [5, 4] que la capacidad adherente en la simulación de la zona de transmisión es mayor que en la simulación de la zona de arrancamiento, con ratios que aumentan con el diámetro del cordón: 1.5, 2 y 2.3 veces mayor para 3/8", 0.5" y 0.6", respectivamente. Asimismo, obtienen que la relación tensión de adherencia-deslizamiento presenta una respuesta más rígida en la simulación de la zona de transmisión.

A partir de los resultados experimentales elaboran un modelo analítico para predecir las longitudes de transmisión y de anclaje [5, 6].

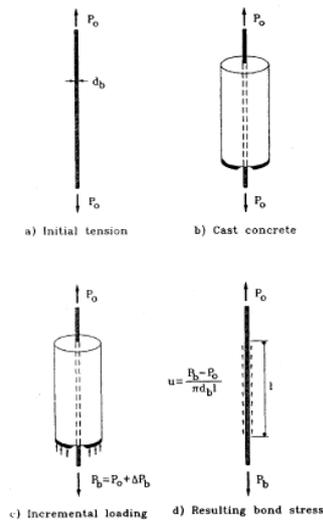


Ilustración 19.- Esquema del ensayo. Modalidad b). Abrishami y Mitchell (1993).

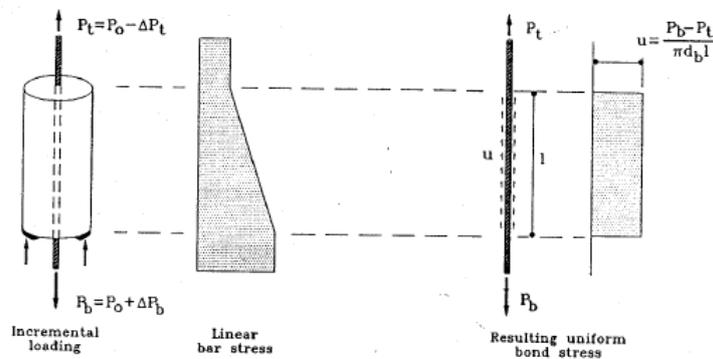


Ilustración 20.- Esquema del ensayo. Modalidad c) Abrishami y Mitchell (1992).

Martínez et al. (1999) y Vázquez (2000)

Llevaron a cabo un estudio experimental comparativo de las propiedades de adherencia de cordones de pretensado de 15.2 mm y 1860 MPa en hormigones ligeros de altas prestaciones iniciales.

Realizan ensayos a 3 niveles: de simulación de transmisión y anclaje en probetas, de transmisión del pretensado en prismas y de transmisión y rotura en vigas.

Los ensayos de simulación se corresponden con las modalidades a) y b) de la técnica de ensayo de Abrishami (Ilustración 19 y 20).

Indican la conveniencia de profundizar en la búsqueda de un ensayo representativo, sistemático, reproducible y económico para la caracterización de las propiedades adherentes de cordones de pretensado. Para ello proponen desarrollar el ensayo de Abrishami.

2.3. CONSIDERACIONES DE ADHERENCIA EN BARRAS FRP

Con base en tesis y normativas consultadas la teoría convencional para la adherencia nos dice, CEB (1990) [7], que la transmisión del pretensado por adherencia es un fenómeno complejo que depende de multitud de parámetros como:

- Características superficiales de las armaduras (lisas, indentadas, onduladas, oxidadas, ...)
- Tipo (alambre, cordón) y diámetro de la armadura
- Resistencia del hormigón en el momento de la transmisión
- Retracción y fluencia del hormigón
- Grado de compactación del hormigón
- Procedimiento de destesado (gradual o brusco)
- Tiempo transcurrido desde el destesado
- Tipo de cargas aplicadas (estáticas, cíclicas, impactos, ...)
- Efectos de confinamiento
- Recubrimiento de hormigón
- Distancia entre armaduras
- Posición de las armaduras en la sección
- Tipo de curado del hormigón

Vázquez (2000) [6] indica, adicionalmente a los anteriores, los siguientes parámetros:

- Tipo de hormigón: tipo de árido y tipo y cantidad de los componentes
- Orden de destesado de las armaduras de una sección
- Tipo de pretensado (centrado / excéntrico)
- Nivel de tesado
- Tipo de lubricante empleado durante el proceso de trefilado
- Relación agua/cemento
- Consistencia del hormigón
- Rigidez del hormigón
- Enfundado de la armadura
- Aplicación de recubrimiento epoxi a la armadura
- Cercanía del elemento de hormigón a la zona desde la que se procede al destesado
- Longitud libre de armadura entre elementos de hormigón
- A efectos de anclaje: resistencia del hormigón a la edad de carga, pérdidas de pretensado y tensión del pretensado en rotura.

Con lo anterior debido a que, en nuestro caso de estudio en esta tesis, contamos con barras de tipo FRP, el comportamiento resistente de las estructuras reforzadas con FRP, las transferencias de tensiones entre el hormigón y el refuerzo, la adherencia es un punto clave para controlar el desempeño y aportar los resultados del desempeño de estos tres tipos de barras en las estructuras.

Se espera que el comportamiento de adherencia con barras de alta resistencia CFRP Carbopree®, barras GFRP Glasspree® FL E46 y un nuevo tipo de barra de fibra de vidrio con una resina termoplástica (TGFRP) y el hormigón varíen del de las barras convencionales de acero, ya que algunos parámetros claves que influyen en el comportamiento de la adherencia son diferentes a los parámetros antes mencionados, tanto por sus características físicas como químicas.

- El módulo de elasticidad de las barras de FRP es más bajo en comparación con el del acero, tanto en la dirección longitudinal como transversal (material ortotrópico).
- La rigidez a cortante de las barras de FRP es mucho menor que la del acero.
- La resistencia al cortante de la matriz de resina es menor que la del acero, un factor que se espera que controle la resistencia de las corrugas superficiales de las barras.

2.4. LONGITUD DE TRANSFERENCIA Y LONGITUD DE ANCLAJE

Longitud de desarrollo: En hormigón pretensado se define como la longitud total de adherencia requerida para anclar el tendón mientras resiste cargas externas aplicadas al elemento. Esta longitud es resultado de la suma de las longitudes de enlace necesarias para satisfacer dos condiciones de tensión diferentes ubicadas en regiones adyacentes claramente separadas a lo largo del tendón. La liberación de la tensión de pretensado introduce tensiones de transferencia en el tendón en los extremos libres de un elemento de hormigón pretensado. La distancia a lo largo del tendón sobre la cual se producen estas tensiones se denomina longitud de transferencia.

Una segunda situación de tensión en el tendón se produce cuando un miembro de hormigón pretensado se coloca bajo una carga de flexión, lo que provoca un aumento en la tensión del tendón. Cuando el miembro se fisura bajo carga creciente, la tensión del tendón aumenta aún más. Aunque la fisuración puede deberse a cargas de flexión o a cargas cortantes, el tendón registra ambos como un incremento de tensión. Embebido en el hormigón, el aumento de la tensión del tendón es resistido por los mecanismos de adhesión combinados, el efecto de Hoyer y el bloqueo mecánico o “mechanical interlock”. La unión entre la armadura y el hormigón en un miembro estructural es el resultado de la acción exitosa de estos mecanismos.

La transferencia y longitud de desarrollo de un tendón de FRP es una función del área de configuración del perímetro y el estado de la superficie del FRP, la tensión en el FRP y el método utilizado para transferir la fuerza de FRP al hormigón. El mecanismo de adherencia difiere entre las fibras de FRP y de acero debido a la gran variación de las barras de FRP en términos de formas, tratamientos de superficie y módulos elásticos[8].

Longitud de transferencia: Es la longitud del tendón requerida para transferir la fuerza efectiva o total de pretensado al hormigón por medio de la adherencia. En general, la mayoría de los tendones FRP exhiben longitudes de transferencia menores que las requeridas en acero[8].

(Nanni, Utsunomiya, Yonekura, & Tanigaki, 1992) examinaron la longitud de transferencia de tendones de AFRP trenzadas impregnadas con epoxi y encontraron que la fricción era el mecanismo de unión predominante en las fibras de aramida y que estas fibras mostraban poco deslizamiento del tendón en comparación con el acero. (Taerwe & Pallemans, 1995) también estudiaron los tendones de AFRP y sugirieron una longitud de transferencia de 16 veces el diámetro nominal de los tendones. (Ehsani, Saadatmanesh, & Nelson, 1997) encontraron que la longitud de transferencia estaba entre 33 y 50 diámetros de barra, dependiendo del tipo de tendón.

(Mahmoud & Rizkalla, Bond of CFRP Prestressing Reinforcement, 1996) estudiaron la adherencia de tendones de CFRP en 24 vigas de hormigón pretensadas y encontraron que la longitud de transferencia medida varió de 450 a 650 mm (17,7 a 25,6 pulg.) para los tendones Leadline™. y de 300 a 425 mm (11,8 a 16,7 pulg.) para hebras de CFCC. Después de un estudio adicional y una comparación con un modelo analítico, recomendaron una fórmula para la longitud de transferencia que depende del pretensado del tendón, el diámetro y el tipo, y la resistencia del hormigón (Mahmoud, Rizkalla, & Zaghoul, Transfer and Development Length of CFRP Reinforcement, 1997).

(Ehsani, Saadatmanesh, & Nelson, 1997) realizaron ensayos en los tendones de carbono Leadline™ (8 mm ó 0,31 pulg.) Y CFCC (8,3 mm ó 0,33 pulg.) y encontraron que la longitud de transferencia era de 54 diámetros de barra para Leadline™ y de 50 diámetros de barra para CFCC.

(Soudki, Green, & Clapp, Transfer Length of Carbon Fiber Rods in Precast Pretensioned Concrete Beams, 1997) obtuvieron que la longitud de transferencia para los tendones de CFRP del orden de 80 veces el diámetro de barra, y encontró que los modelos existentes para el acero pueden proporcionar longitudes de transferencia no conservadoras para el tendón de CFRP.

Longitud de adherencia por flexión (flexural bond length): Es la longitud de empotramiento (embedment length) más allá de la longitud de transferencia requerida para desarrollar la resistencia a la tracción final del tendón de pretensado.

La adherencia y el desarrollo para pretensar tendones de FRP hechos de carbono, aramida, basalto o fibra de vidrio están diseñados para proporcionar integridad en la adherencia para la resistencia del elemento.

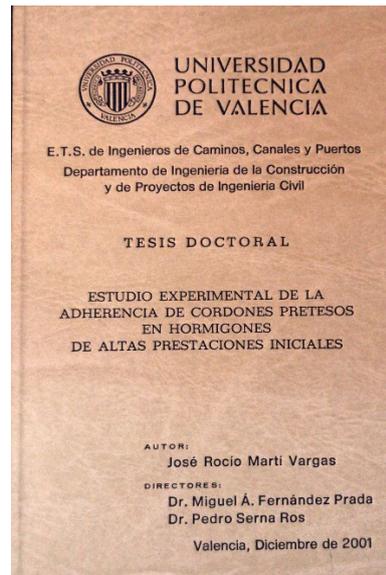
Empleo del FRP como armadura activa en estructuras. El empleo de FRP pretensado en estructuras reales está algo limitado por la falta de normativas y conocimiento sobre el comportamiento del material como se ha mencionado previamente en este documento. La (Tabla 2) recopila algunas estructuras construidas y las ordena cronológicamente. Puesto que la mayoría de las aplicaciones existentes son en puentes, como apoyo a este subapartado puede recurrirse al Proyecto de Tesina de Especialidad “Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures” elaborado por Pawel Bernard Potyrala para la UPC, quien desarrolla una tabla cronológica extensa según el tipo de uso del compuesto de FRP[8].

Tendón	Descripción	Dimensiones	País	Fecha
CFRP	Puente de Shinmiya	Luz de 5,7 m	Japón	1988
	Puente losa pretensado	6 tendones en la base, 2 en la parte superior de la losa		
	Puente de Ludwigshafen	Vano total de 85 m.	Alemania	1991
	4 vanos, postensados, vanos simples	Dos vanos rectos y dos vanos curvos R=62,8 m.		
	Puente de autopista			
	Puente de Rapid City	Luz de 9 m, ancho de 5,2 m.	USA	1992
	Prefabricado, puente de losa postensado, en una planta de cemento	Losa de 180 mm. de espesor 2/3 de FRP pretensado		
	Puente de Beddington Trail	22,8 y 19,2 m.	Canadá	1993
	Prefabricado, pretensado, dos vanos	6 de 26 viguetas en T con FRP		
	Puente de autopista			
	Puente de Headingley	5 vanos, cada uno de 32,5 m.	Canadá	1996
	Prefabricado, viguetas pretensadas	4 de 40 Viguetas AASHTO Tipo I con FRP		
GFRP	Puente de Lunensche-Gasse	Luz de 6,55 m.	Alemania	1980
	Puente de losa de un solo vano	GFRP 100 Polystall, no adherente		
	Puente de Ulenberg-Strass	59 cables, cada 19-7,5 mm. Polystall	Alemania	1986
	Puente de autopista de dos vanos			
	Puente de Khabarovsk	Luz de 15 m.	Rusia	1989
	Cinco viguetas prefabricadas y pretensadas	24 GFRP's		
	Puente de Notsch	Luces de 13, 18 y 13 m.	Austria	1991
	Puente de autopista de tres vanos	Espesor de la losa: 650 mm.		
	AFRP	Puente de Tabras Golf Club	Vano de 11,8 m. y un ancho de 2,4 m.	Japón
Puente de losa pretensado de tres vanos		3 de 21 viguetas pretensadas de AFRP		
Puente de Birdie		Vano de 54,4 m. y un ancho de 2,1 m.	Japón	1990
	Puente peatonal postensado con losa suspendida	16 cables con 8 AFRP's agrupados		
	Puente Sumitomo	Luz de la losa de 12,5 m.	Japón	1991
	Puente de autopista, losa pretensada/viguetas cajón postensada	Luz de la vigueta cajón 25 m. 3 hebras de AFRP para la losa y 26 hebras de AFRP para la vigueta		

Tabla 2.- Ejemplo de estructuras de hormigón pretensadas y postensadas con FRP. Datos extraídos de (ACI Committee 440, Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, 2007)

2.5. PRUEBA ECADA (2001)

En este subcapítulo hablaremos de unos de los antecedentes fundamentales que sirvió como base de una de las pruebas base para el desarrollo de este trabajo de tesis experimental que es el desarrollado en el año 2001 por los doctores; J.R. Martí, P. Serna, M.Á. Fernández, P. Miguel (Ilustración 21).



*Ilustración 21.- Tesis doctoral consultada UPV.
(Foto propia fecha 17/10/2021).*

2.5.1. Bases de la prueba ECADA en barras de acero tradicionales.

Se ha concebido por parte de José Roció Martí Vargas Tesis doctoral UPV 2001[9], un método de ensayo para la caracterización de la adherencia de las armaduras pretesas al hormigón, denominado ECADA, que permite reproducir de manera secuencial sobre una misma pieza de hormigón las operaciones de transmisión del pretensado y de puesta en servicio, a los efectos de analizar el comportamiento adherente por transmisión y por anclaje.

El procedimiento de ensayo que se propone se fundamenta en la sustitución de una parte del elemento de hormigón pretensado por un sistema que reúne tres condiciones básicas:

- servir de anclaje de la armadura, de modo que pueda materializarse la transmisión del pretensado en un extremo del elemento;
- permitir el acceso a la armadura, en el extremo opuesto al de transmisión, para aumentar su tensión, solicitando así las tensiones tangenciales de adherencia correspondientes al anclaje mediante una operación de arrancamiento;
- tener una rigidez igual a la de la parte sustituida, para que la tensión de la armadura en el sistema sea igual a la tensión en la zona de meseta del elemento.

El método de ensayo reúne simultáneamente las características de sencillez, economía y representatividad, y no requiere la utilización de dispositivos de medida internos en los elementos a ensayar, de tal forma que no se distorsiona el fenómeno de la adherencia.

En este trabajo se describe el ensayo ECADA, concebido para la determinación de las características de adherencia de las armaduras pretesas tradicionales de acero al hormigón. Se exponen los fundamentos del ensayo y las diferentes fases que componen el procedimiento de ensayo.

2.5.2. Fundamentos del método de ensayo.

En un elemento lineal de hormigón pretensado con armaduras pretesas suficientemente largo se desarrollan, tras el destesado, sendas zonas de transmisión del pretensado en sus extremos en las que la tensión en la armadura aumenta con la distancia al extremo libre de la pieza (Ilustración 22). Así, queda conformada una zona central (meseta) en la que la tensión de la armadura es constante. En esta meseta, una vez concluida la operación de transmisión del pretensado, sólo es

posible aumentar la tensión de la armadura aplicando cargas exteriores sobre el elemento. La longitud de la zona en la que la tensión de la armadura es creciente se define como longitud de transmisión[9].

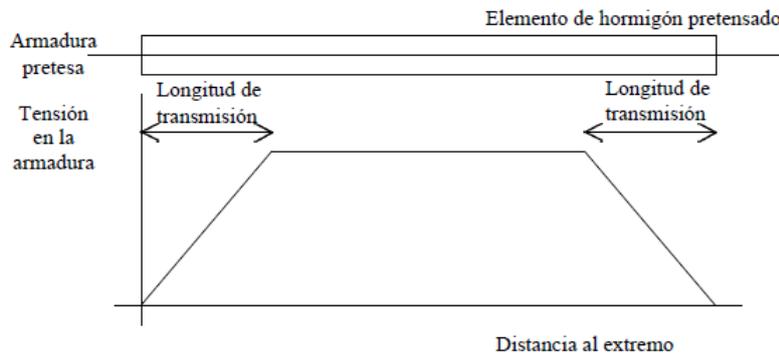


Ilustración 22.- Variación de la tensión de la armadura pretesa en un elemento tras el destesado tesis doctoral José Martí UPV.

Con esta idea se propone (Ilustración 23) fabricar probetas en un bastidor de pretensado, disponiendo el sistema de arrancamiento en uno de los extremos del bastidor y acoplando un sistema mecánico de aproximación para realizar las operaciones de tesado y destesado en el extremo opuesto. El equipo de ensayo se completa con un sistema hidráulico, adaptable a cualquiera de los dos extremos del bastidor, para las operaciones de tesado, destesado y arrancamiento.

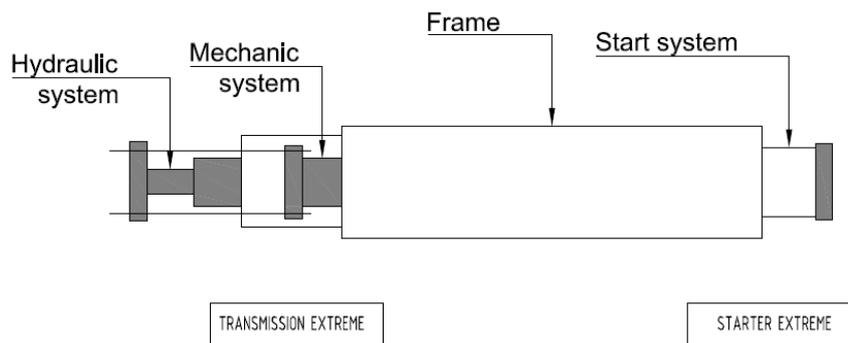


Ilustración 23.- Esquema general de las partes del equipo de ensayo ECADA UPV. (Dibujo propio basado en la tesis Martí 2001).

Si los elementos ensayados tienen una longitud adherente menor que la de transmisión, tras el destesado la tensión en la armadura no alcanzará el valor correspondiente a la zona de meseta (transmisión parcial del pretensado). En el caso contrario, la tensión en la armadura sí alcanzará el valor de la meseta y se generará una zona de tensión constante (transmisión total del pretensado). La longitud de transmisión será la longitud adherente del elemento de menor longitud para el cual la fuerza transmitida alcanza el máximo de la serie.

Una vez realizado el destesado se accede a la armadura en el sistema de arrancamiento, aplicando una fuerza creciente sobre la armadura (operación de arrancamiento).

Si la longitud adherente del elemento es menor que la longitud de anclaje correspondiente, la tensión en la armadura no alcanzará la tensión que se pretende anclar.

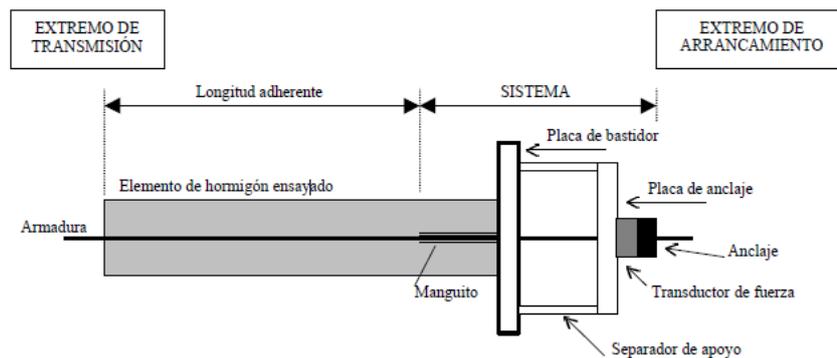
En cambio, si la longitud adherente del elemento es igual o mayor que la longitud de anclaje correspondiente, la tensión en la armadura sí alcanzará el valor de dicha tensión.

De este modo, la longitud de anclaje corresponderá a la longitud adherente del elemento de menor longitud para el cual la tensión en la armadura alcanza el valor que se pretende anclar.

La precisión en la determinación de las longitudes de transmisión y anclaje dependerá de la secuencia de longitudes ensayadas.

En la (Ilustración 24) se ilustra el sistema de arrancamiento diseñado, compuesto por:

- El tramo final del elemento de hormigón a ensayar, en el que se evita la adherencia armadura/hormigón mediante la disposición de un manguito.
- La placa del bastidor del extremo de arrancamiento, cuya función es la de servir de apoyo al elemento a ensayar durante y tras el destesado.
- Una placa de anclaje, para apoyar el dispositivo de anclaje de la armadura a una distancia fija de la anterior mediante unos separadores de apoyo.



*Ilustración 24.- Esquema del sistema de arrancamiento ECADA UPV.
(Dibujo propio basado en la tesis Martí 2001).*

2.5.3. Método de ensayo.

Una vez montado el equipo de ensayo de acuerdo con lo indicado en la (Ilustración 23), con el sistema hidráulico acoplado al bastidor en el extremo de transmisión, las diferentes fases del procedimiento de ensayo son[9]:

- **Enfilado (a):** consiste en disponer la armadura a través de los orificios pasantes practicados en las placas del bastidor, en el sistema mecánico y en el sistema de arrancamiento.
- **Tesado de la armadura (b):** incluye las operaciones de colocación de los dispositivos de anclaje y de tesado de la armadura. El sistema hidráulico, apoyado en el extremo de transmisión del bastidor tira de la placa de anclaje de este extremo y la separa del sistema mecánico.
- **Anclaje de la armadura (c):** consiste en actuar sobre el sistema mecánico de aproximación hasta que contacta con la placa de anclaje del extremo de transmisión, recogiendo de esta forma la fuerza introducida en la armadura. El sistema hidráulico se descarga. La fuerza introducida en la armadura se controla mediante un transductor de fuerza dispuesto en el sistema de arrancamiento.
- **Hormigonado de la probeta (d):** en esta fase se realiza la fabricación del hormigón, su vertido y compactación en el molde dispuesto en el propio bastidor de ensayo. La probeta permanece, tras el hormigonado, en las condiciones de conservación previamente decididas hasta el instante en que se pretende realizar el ensayo. Antes de iniciar el ensayo se procede al desmoldeo de la probeta.
- **Destesado (e):** consiste en actuar nuevamente sobre el sistema hidráulico, situado en el extremo de transmisión, para recuperar la fuerza soportada por el sistema mecánico de aproximación. Éste queda liberado y se recoge. Mediante la descarga del sistema hidráulico, a velocidad controlada, se produce el destesado de la armadura y, como consecuencia, la transmisión del pretensado al hormigón, midiendo la fuerza transmitida en el sistema de arrancamiento mediante el transductor de fuerza.

2.6. NORMATIVA PARA CALCULO

En este punto abordaremos una breve reseña cronológica de la introducción de las barras de FRP por diferentes institutos y comités para la elaboración de códigos y guías de diseño:

- 2001: Publicación del fib Bulletin 14 sobre refuerzo de FRP externamente adherido (Externally bonded FRP reinforcement) ISIS Canada publica una serie de manuales para el uso del FRP como refuerzo interno, externo y pretensado El comité 440 del Instituto Americano del Hormigón (ACI Committe 440) publica la primera versión de sus recomendaciones de diseño sobre refuerzo de FRP interno (440.1R)
- 2002: El comité 440 del Instituto Americano del Hormigón (ACI Committe 440) publica la primera versión de sus recomendaciones de diseño sobre refuerzo de FRP externo (440.2R).
- 2003: El comité 440 del Instituto Americano del Hormigón (ACI Committe 440) publica la segunda versión de sus recomendaciones de diseño sobre refuerzo de FRP interno (440.1R)
- 2004: El comité 440 del Instituto Americano del Hormigón (ACI Committe 440) publica el ACI 440.3R Guía para métodos de ensayo y el ACI 440.4R Estructuras de hormigón pretensado con tendones de FRP El consejo de investigación nacional italiano (CNR – National Research Council) publica las recomendaciones de diseño italianas para refuerzo de FRP externamente adherido (CNR-DT 200/2004)
- 2006: El consejo de investigación nacional italiano (CNR – National Research Council) publica las recomendaciones de diseño italianas para refuerzo de FRP interno (CNR-DT 203/2006) El comité 440 del Instituto Americano del Hormigón (ACI Committe 440) publica la tercera versión de sus recomendaciones de diseño sobre refuerzo de FRP interno (440.1R)
- 2007: Publicación del fib Bulletin 40 sobre estructuras de hormigón reforzadas con armadura de FRP (FRP reinforcement in RC structures)
- 2018: El comité 440 del Instituto Americano del Hormigón (ACI Committe 440) publica el ACI 447.1R Report on the Modeling Techniques Used in Finite Element Simulations of Concrete Structures Strengthened Using Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Materials
- 2019: Publicación del fib Bulletin 90 sobre estructuras de hormigón reforzadas con FRP externamente adherido.

Desde la fusión de CEB y FIP (Federation Internationale de la Precontrainte), este grupo de tareas se ha integrado en el nuevo fib (Federation Internationale du Béton). El grupo de tareas 5.1 de la Comisión 5 (antes 9.3) de la fib se encarga de desarrollar pautas de diseño para estructuras de hormigón reforzadas, pretensadas o reforzadas con FRP, según el formato de diseño del Código de modelo CEB-FIP y el Eurocódigo 2 (fib TG9.3).

La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) estableció un comité de normas para abordar los productos FRP independientes.

En Estados Unidos, el Transportation Research Board (TRB) ha establecido formalmente el Comité A2C07 para examinar el uso de FRP en estructuras de puentes. Otras sociedades establecidas en este país, como la Sociedad para el Avance de la Ingeniería de Materiales y Procesos (SAMPE) y la Alianza de Desarrollo de Mercados (MDA) de la Industria de Compuestos de FRP, han estado activas en el área de FRP para uso en la construcción. (ACI Committee 440, ACI 440.4R-04[10] (Reapproved 2011): Prestressing Concrete Structures with FRP tendons, 2004).

2.6.1. Diseño ACI 440.4R-04 (2000) elementos de hormigón pretensado con tendones FRP.

El diseño de las armaduras de FRP, tienen una característica específica de tener una relación lineal tensión-deformación hasta rotura, lo que puede provocar roturas frágiles. Esto lo diferencia a las armaduras tradicionales de acero, por lo que las consideraciones cambian con base al criterio de diseño. Por lo mencionado cuando se diseña con este tipo de armaduras se debe de considerar que la ductilidad y la robustez son esenciales, como lo son las zonas susceptibles a terremotos, acciones accidentales y cargas inesperadas.

Actualmente los elementos pretensados con FRP todavía no se incluyen en ningún código de hormigón estructural europeo[11], los principios básicos se incluirán en la nueva versión del Eurocódigo 2[2]. El Código Modelo 2010 incluye algunos principios a tener en cuenta en la estructura de diseño con armadura pasivo de FRP. La norma ACI 440.4R-04 [10] trata sobre estructuras de hormigón pretensado con tendones FRP. Aunque existen algunas investigaciones y aplicaciones reales de elementos pretensados con FRP, todavía hay varios aspectos que faltan por investigar.

3. ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE LOS POLIMEROS REFORZADOS CON FIBRAS

A continuación, se presenta una breve descripción de los componentes constituyentes de los polímeros reforzados con fibras y los 3 tipos de barras que se ocuparon en esta campaña de experimentación.

3.1. FIBRAS

Las fibras son las responsables de las buenas propiedades estructurales del composite. Principalmente, consiguen que el material compuesto presente elevadas propiedades específicas de rigidez y resistencia en su dirección longitudinal. Son más resistentes que el material por el que están conformadas, debido a la orientación preferencial de las moléculas a lo largo de la dirección de la fibra.

Para un desempeño estructural adecuado, las fibras deben cumplir ciertos requerimientos, como presentar una alta resistencia última, una conveniente elongación en tracción, baja variación de resistencia entre fibras individuales, mantener estables sus propiedades durante su manejo y fabricación, uniformidad del diámetro y superficie de la fibra, alta tenacidad, durabilidad, disponibilidad de diversas formas y un costo aceptable[12].

Existen muchos tipos de fibras, pero las más utilizadas en aplicaciones de ingeniería civil son las fibras de carbono, aramida, vidrio y basalto. Todas las fibras tienen generalmente mayor capacidad de resistencia que el acero ordinario y son elásticas hasta su falla. En la (Ilustración 25) se presenta un esquema simplificado del comportamiento de varios tipos de fibras, de una barra de acero ordinaria y un tendón de acero. Se puede apreciar que las propiedades más importantes que difieren entre los tipos de fibra son la rigidez y la deformación por tracción.

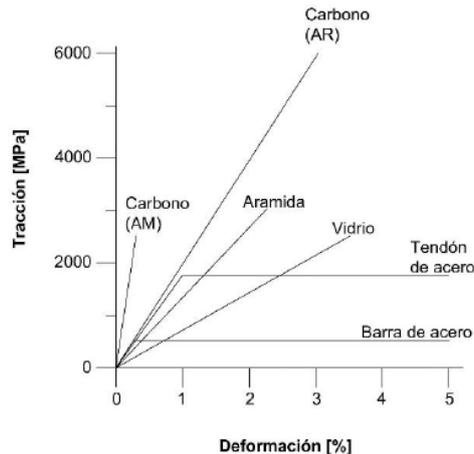


Ilustración 25.- Esquema simplificado del comportamiento de diferentes tipos de fibra y acero convencional.

3.1.1. FIBRAS DE CARBONO:

Las fibras de carbono poseen mayor resistencia y rigidez que otros tipos comunes de fibras y no se ven afectadas por los rayos ultravioletas o los materiales alcalinos. Su módulo de tracción y su resistencia son estables a medida que aumenta la temperatura; también son muy resistentes a factores ambientales agresivos. Estas fibras se comportan elásticamente y fallan de manera frágil. Sin embargo, su resistencia al impacto es menor que las fibras de aramida y vidrio. Y la desventaja más importante, es su alto costo causado por el elevado precio de las materias primas y el largo proceso de carbonización y grafitización, lo que genera un gran obstáculo para su uso en aplicaciones de ingeniería civil. No obstante, se debe mencionar que, dado que el consumo de este material ha aumentado considerablemente y la calidad ha mejorado, el coste se ha reducido significativamente [12].

3.1.2. FIBRAS DE VIDRIO:

La fibra de vidrio está hecha principalmente de arena de sílice. Los tipos de vidrio más comunes son eléctricos (vidrio E), de alta resistencia (vidrio S) y resistente a los álcalis (vidrio AR)[13].

El vidrio E presenta altas propiedades de aislamiento eléctrico, baja susceptibilidad a la humedad y altas propiedades mecánicas. El vidrio S tiene mayor resistencia a la tracción y módulo, pero su mayor costo lo hace menos popular que el vidrio E. Las fibras de vidrio AR son altamente resistentes al ataque de álcalis en matrices a base de cemento, pero, por el momento, no se dispone de tamaños compatibles con resinas termoestables que se utilizan comúnmente para barras de FRP [13].

Las fibras de vidrio poseen gran resistencia, pero es el bajo costo lo que hace que los polímeros reforzados con fibras de vidrio (GFRP) sean el refuerzo de FRP más popular en aplicaciones de ingeniería civil.

Una de las desventajas de las fibras de vidrio es su módulo relativamente bajo en comparación con las fibras de carbono [14]. Aparte de su uso en el campo estructural y en la industria aeroespacial, las fibras de vidrio se utilizan en la fabricación de aislantes térmicos, cascos de barcos, piezas ligeras de automóviles y neumáticos de caucho (Tabla 3).

	Resistencia a tracción	Módulo	Resistencia álcalis	Resistencia al impacto	Conductividad eléctrica	Costo
Fibra de Carbono	MUY ALTA	ALTO	ALTO	BUENA	ALTA	MUY ALTO
Fibra de Vidrio						
Vidrio E	MEDIA	MEDIA	ALTO	ALTA	ALTA	MEDIO
Vidrio S	ALTA	ALTO	ALTO	ALTA	MEDIA	MEDIO
Vidrio AR	BUENA	MEDIA	MUY ALTO	ALTA	MEDIA	MEDIO
Fibra de Aramida	ALTA	ALTO	ALTO	MUY ALTA	NULA	ALTO

Tabla 3.- Propiedades de Fibras de carbono y vidrio.

3.2. BARRAS

Al ser un material compuesto, las propiedades mecánicas de las barras de FRP varían significativamente de una muestra a otra, dependiendo de la naturaleza y el volumen de las fibras, las propiedades mecánicas de la resina, la orientación de las fibras y la adherencia entre fibras y matriz. Motivos por los cuales, no es posible establecer valores universales para las propiedades mecánicas y sólo pueden establecerse valores indicativos.

A diferencia de las barras de acero, las barras de FRP son ortotrópicas, es decir, sus propiedades mecánicas son diferentes en sus dos direcciones transversales, teniendo el eje longitudinal como el más fuerte y no presentan ductilidad [15].

Las propiedades de la matriz influyen en la resistencia a cortante del material compuesto, así como en sus propiedades químicas, eléctricas y térmicas; adicionalmente, la matriz brinda soporte lateral contra el pandeo de las fibras bajo solicitaciones de compresión [16].

Las propiedades físicas del material compuesto se pueden estimar aproximadamente, si se conocen las propiedades de la fibra y de la matriz, junto con su fracción volumétrica. Este análisis a nivel de fibra se conoce como micromecánica.

El refuerzo de FRP utilizado en este estudio experimental incluye barras de CFRP, TFRP y GFRP, como se ve en la (Ilustración 26). Las barras son producidas por Sireg Geotech srl. Las barras de CFRP investigadas son barras de alta resistencia Carbopree® ((1) en la (Ilustración 22). Las barras de GFRP probadas incluyen las barras redondas Glasspree® FL E46 ((2) en la (Ilustración 26) y un nuevo tipo de barra de GFRP con una resina termoplástica ((3) en la (Ilustración 26), denominada barra TGFRP.

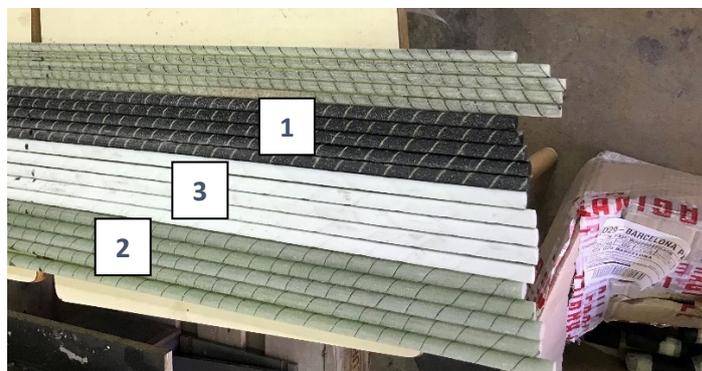


Ilustración 26.- Barras de análisis GFRP, TFRP y CFRP. Marca Sireg Geotech srl. (Foto propia fecha 15/11/2021)

Las propiedades del material proporcionadas por las hojas de datos técnicos de los fabricantes se pueden encontrar en la (Tabla 4). Según Sireg, las barras TGFRP tienen las mismas propiedades materiales que la barra Glasspree®.

		Glasspree® [47]	Glasspree® [47]	Carbopree® [46]
Diámetro	[mm]	9.5	12.7	10
Área de barra nominal	[mm ²]	71	129	
peso lineal	[g/m]	150	260	
Resistencia a la tracción garantizada	[MPa]	900	850	
Resistencia a la tracción	[MPa]			2'450
Modulos elasticos	[GPa]	46	46	130
Tensión definitiva	[%]	1.8	1.8	1.8
mín. carga última garantizada [kN]		59	96	
Carga última [kN]				192

Tabla 4.- Características de las barras FRP, Sireg Geotech srl.

3.2.1. MODULO DE ELASTICIDAD:

Las barras de FRP generalmente poseen un módulo de Young menor que las de acero (presentando las barras de GFRP los valores más bajos), con lo cual, las deformaciones en estructuras de hormigón reforzadas con FRP son mayores que las deformaciones de las estructuras de hormigón reforzadas con acero. Así también, el módulo de elasticidad de las barras de FRP permanece habitualmente constante hasta la falla, es decir, presentan un comportamiento elástico frágil; mientras que las barras de acero presentan un comportamiento dúctil. Estas dos diferencias en las propiedades mecánicas afectan el comportamiento adherente entre el hormigón y las barras de refuerzo, motivo por el cual, es importante considerarlas al momento de desarrollar códigos de diseño[15].

3.2.2. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN:

Usualmente, las barras de GFRP pueden desarrollar más del doble de la resistencia a tracción de las barras de acero, mientras que las de CFRP y AFRP pueden desarrollar más de tres veces de la resistencia, dependiendo de la naturaleza de las fibras y la matriz. En la (Ilustración 27) se presenta una comparación de las resistencias a tracción de barras FRP y barras de acero[12].

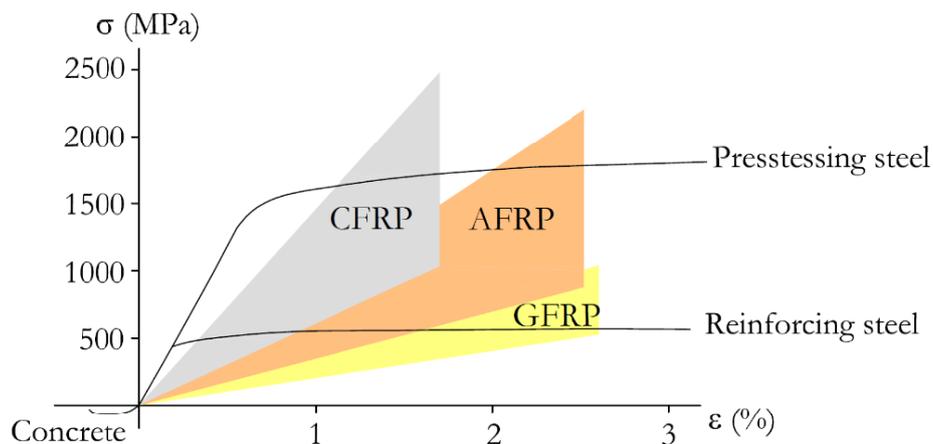


Ilustración 27.- Esfuerzo-deformación para barras FRP y barras de acero.

Como se observa en la (Ilustración 27), para un valor determinado de deformación, las barras de FRP no presentan un único valor de resistencia a la tracción como el caso del acero, sino un rango de valores, esto es debido a que su resistencia varía en función del área de la sección transversal. Según el Boletín 10 de fib [17], cuando se tracciona una barra de FRP, puede existir un movimiento diferencial entre el núcleo y las fibras de la superficie de la barra, lo que da como resultado una

distribución no uniforme de las tensiones normales a lo largo de la sección transversal; es decir, las fibras ubicadas cerca del centro de la sección transversal de la barra no están sujetas a tanta tensión como las que están cerca de la superficie exterior.

4. DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.

En este capítulo se hará una descripción detallada del procedimiento que se llevó a cabo para la determinación de las condiciones de adherencia y las características mecánicas del material de las armaduras pretensas en hormigones, de lo cual añadiendo que ocuparemos materiales de barras de alta resistencia producidas por Sireg Geotech srl. CFRP Carbopree®, barras GFRP Glasspree® FL E46 y un nuevo tipo de barra de fibra de vidrio con una resina termoplástica (TGFRP), las cuales en el capítulo anterior fueron descritas sus diferencias mecánicas a las barras de acero convencional.

Esta será una de las bases fundamentales para la campaña experimental llevada a cabo dentro de proyecto de Estructuras de hormigón de altas prestaciones utilizando materiales y tecnologías avanzados de diseño y construcción (*Straduravius*) en la *UPC*.

Se ha tomado como referencia un método de ensayo para la caracterización de la adherencia de las armaduras pretensas al hormigón, denominado ECADA, que permite reproducir de manera secuencial sobre una misma pieza de hormigón las operaciones de transmisión del pretensado y de puesta en servicio, a los efectos de analizar el comportamiento adherente por transmisión y por anclaje.

Para realizar este método denominado ECADA del que se han realizado programas experimentales en barras de acero convencional como se ha comentado en el subcapítulo 2.5, y de las cuales muestran diferencias en sus características físicas y mecánicas en el capítulo 3.

Nos lleva a realizar primero dos tipos de pruebas que nos permitan verificar que las características mecánicas de los 3 tipos de barras suministrado por Sireg Geotech srl. sean los parámetros que se tomarán en consideración para los análisis numéricos, para esta verificación se harán las pruebas Tensile test (*tracción de barras*), así también se verificará su adherencia al hormigón de alta resistencia con la prueba *Pull out*.

Y finalmente proseguir a las pruebas *ECADA* verificando la capacidad de los sistemas de anclaje a utilizar, así como su adherencia. Donde finalmente se realizará secuencialmente las operaciones de transmisión y arrancamiento en uno de los extremos del elemento determinando las longitudes de transmisión y anclaje.

Complementando estas pruebas, para poder estar en posibilidad de llevar un control del hormigón y para confirmar la resistencia de fraguado rápido a 24 horas se realizarán las pruebas *Compresión del Hormigón*, la cual también en un subcapítulo de este, se describirán cuáles fueron los detalles de su ejecución.

Todos estos ensayos serán las bases para realizar la siguiente etapa de la campaña experimental del proyecto *Straduravius* que es el ensayo a flexión de vigas doble T, las cuales se describe brevemente la participación que se tuvo dentro de este trabajo de investigación experimental que se llevó a cabo en el periodo de noviembre de 2021 a septiembre de 2022.

4.1. ENSAYO DE TRACCIÓN DE LAS ARMADURAS (TENSILE TEST)

4.1.1. BASES DE ENSAYO:

Este método de prueba llamado Tensile test (tracción de barras) se realizará para determinar la resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y alargamiento máximo de barras de FRP y acero

utilizadas como barras de refuerzo o tendones de pretensado.

La resistencia a tracción y el módulo de Young de las barras FRP se obtendrán según el apartado B.2 del ACI 440.R3-04 [10], y según la norma UNE-EN 10080 [21] para las barras de acero.

Las características materiales de las barras que se utilizarán para esta campaña experimental, son las siguientes: de CFRP Carbopree® con un diámetro de 10 mm para armaduras pasivas, GFRP Glasspree® con un diámetro de 9,5 y 12,7 mm y la barra TGFRP con un diámetro de 12,7 mm, para armaduras activas. Con fines comparativos, los ensayos también se realizaron en probetas de acero.

4.1.2. NUMEROS DE ENSAYOS:

De acuerdo a la normativa utilizada se realizarán 5 pruebas para cada caso de estudio. Cada caso de estudio estará determinado por el tipo de material y diámetro de la barra, siendo en total 7 los casos a estudiar. Esto se puede apreciar en la siguiente (tabla 5).

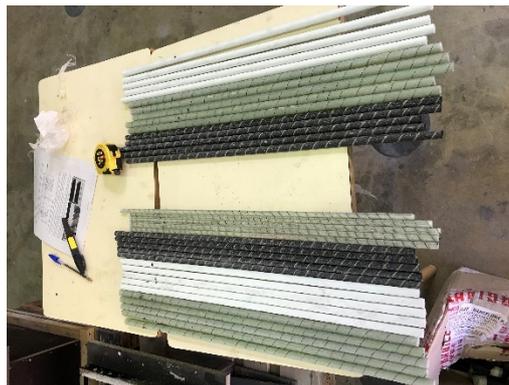
No	Material	Diámetro (mm)	# Ensayos	Normativa Utilizada
1	Acero	10	5	UNE-EN 10080
2	GFRP	9.5	5	ACI 440.R3-04
3	GFRP	12.7	5	ACI 440.R3-04
4	CFRP	10	5	ACI 440.R3-04
5	TGFRP	12.7	5	ACI 440.R3-04

Tabla 5.- Numero de ensayos Tensile test, campaña experimental UPC.

4.1.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS CON BARRAS FRP:

- Preparación de barras:

Las muestras tienen una longitud de 500 mm (Ilustración 28) y por tipo de barra y diámetro se realizaron cinco ensayos.



*Ilustración 28.- Numero de barras y longitud para pruebas.
(Foto propia fecha 15/11/2021)*

Las barras de FRP son sensibles a las cargas aplicadas perpendicularmente a la dirección de la fibra. Por lo tanto, si la barra se montara directamente en la máquina de ensayo, fallaría en el anclaje debido a la presión ejercida por las mordazas. Algunos productores ofrecen sistemas de anclaje especiales para su tipo de barra. Si no existe un dispositivo de anclaje, las barras generalmente se protegen pegando un tubo de acero a los extremos de la muestra.

Para preparar las muestras de FRP, se pegó un tubo de acero de 100 mm de longitud a cada extremo de la barra con el pegamento X60 de curado rápido producido por HBM. Se tendrá que

tener cuidado que este pegado sea lo más centrado posible.

El pegamento a usar es de endurecimiento rápido y está conformado por dos componentes: componente A-polvo y componente B-líquido (Ilustración 29). Tras la mezcla de ambos componentes, el adhesivo endurece a los 5 minutos, teniendo un plazo de trabajabilidad de 1 minuto. La proporción utilizada para el pegamento X60 es de *3 cucharadas por 1 probeta*, procurando que la mezcla sea lo suficientemente espesa, pero sin ser muy fluida para que ingrese en todo el interior del tubo.

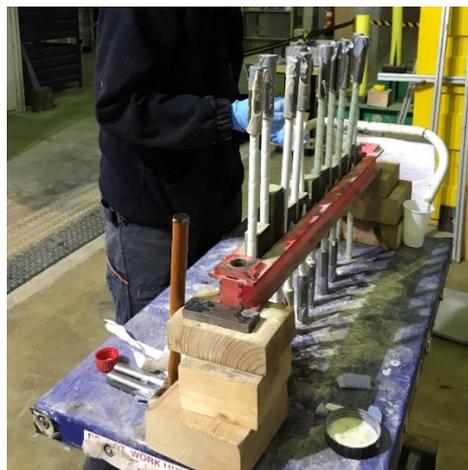
Equipo de seguridad: Gafas, mascarilla y guantes de látex.



*Ilustración 29.- Pegamento X60 de HBM de endurecimiento rápido.
(Foto propia fecha 15/11/2021)*

Nota: Las muestras de acero no necesitaron preparación especial, ya que el acero no es sensible a la presión transversal.

Para garantizar el pegado que sea lo más centrado posible se recomienda que se haga de manera vertical para esperar su secado como se muestra en la (Ilustración 30).



*Ilustración 30.- Preparación de barras FRP para prueba Tensile Test.
(Foto propia fecha 24/11/2021).*

- Instrumentación:

A cada barra se le colocara una galga extensiométrica las cuáles serán las encargadas de medir el desplazamiento último de las barras (Ilustración 31) y así poder comparar estos resultados con el extensómetro.

- Procedimiento de Instrumentación:

Las galgas extensiométricas se colocarán a la mitad de la barra muestra que es a 250 mm, para esto se seguirán los siguientes pasos:

1.- Esmerilado de la barra: Se realizará a la distancia indicada con una maquina Dremmer pequeña en la cual se cuidará no tocar los surcos espirales y que sea un desbaste de la capa superior solo para eliminar el material de recubrimiento rugoso.

2.- Pegado de las galgas: Se colocará un solvente limpiador en el área esmerilada, se cuidará colocar la galga correspondiente a cada tipo de barra indicado en el apartado 4.6.5. este será pegado con un pegamento tipo CN-E Adhesivo, de deberá procurar que la galga quede lo más paralela centrada a la barra para poder obtener lecturas del desplazamiento último de las barras.



*Ilustración 31.- Pegado de galga en barra GFRP.
(Foto propia fecha 22/11/2021).*

3.- Protección para galga: Se colocará una protección de adhesivo para galga de tipo NP-50B el cual es de secado rápido de un minuto, este adhesivo se deberá preparar con una proporción de 10 g. de pasta por 4 gotas de solvente, esta será una mezcla viscosa que se cristalizara al secado y deberá proteger una parte de los cables de las galgas para evitar se arranquen en la manipulación (Ilustración 32 y 33).



*Ilustración 32.- Protección de galga NP-50B en barra TGFRP.
(Foto propia fecha 22/11/2021).*



*Ilustración 33.- Colocación de galgas Extensiométricas en barras FRP.
(Foto propia fecha 24/11/2021).*

- Procedimiento de Ensayo:

Cada muestra será montada en la máquina de ensayo, en este caso se ocupó el equipo de tracción (INSTRONG 8803) cuidando que el eje longitudinal de la barra coincida con la línea que une las

dos mordazas de la máquina de ensayo (Ilustración 34 y 35). Se debe verificar que la distancia libre entre las mordazas sea de 325mm (esto de acuerdo a lo especificado en el ACI 440.R3-04 y la máquina de ensayo a utilizar) antes de empezar el ensayo.

Las barras de FRP se anclan en la máquina de prueba, montando los extremos en las mordazas de la máquina. La presión de montaje fue de 40 bar para las de 10 mm y de 65 bar para las de 12,7 mm. La presión tuvo que ser ajustada durante los experimentos, ya que se observaron fallas en el anclaje debido a la diferencia de materiales de los 3 tipos de barras utilizadas en este programa experimental. Las presiones respectivas influirán en los resultados los cuales se mencionarán en el capítulo 5 posterior a este. Las muestras de acero se montaron con una presión de agarre de 100 bar, como lo exige el código UNE-EN 10080.

Para medir la deformación que se presentará en la barra se utilizarán galgas extensométricas unidireccionales, debido a que se necesita la medida de deformación en una sola dirección, y un extensómetro de $\pm 5\text{mm}$ de rango de medición (Ilustración 34).

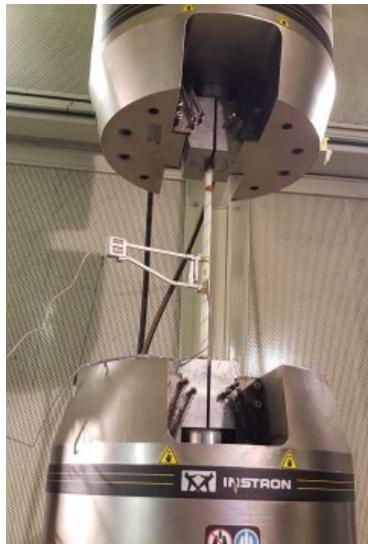


Ilustración 34.- Instalación de extensómetro para pruebas Tensile Test.

La prueba se controló por desplazamiento y la velocidad de las barras de FRP, se eligió un desplazamiento de 1 mm/min hasta la plastificación y seguido a esto se aumentó la velocidad a 5 mm/min después de alcanzar la plastificación.



*Ilustración 35.- Muestra montada en equipo de tracción, barra GFRP.
(Foto propia fecha 30/11/2021).*

- **Para este ensayo hay que tomar en cuenta las siguientes consideraciones:**

El alargamiento de la barra se midió diez veces por segundo mediante un extensómetro montado

en el medio de la barra. La longitud de referencia del extensómetro fue de 50 mm.

Durante el ensayo a tracción de las barras FRP, cuando el extensómetro marque 0.5mm para llegar a su límite de abertura, éste será desmontado de la barra como medida de precaución, debido a que dichas barras presentan una falla frágil y puede causar daños en el aparato de medición, motivo por el cual, las galgas extensométricas serán las encargadas de medir el desplazamiento último de las barras.

En dos muestras por tipo de barra, el alargamiento fue medido con galgas extensométricas BFLAB para materiales compuestos. La precisión del extensómetro es del 1 % y la precisión de la galga extensiométrica es del 0,5 %.

- **Procesamiento de datos post-ensayo:**

Los datos obtenidos por la máquina de prueba se proporcionan en una hoja de Excel como entradas, cada una de las cuales consta de la fuerza aplicada por la máquina, la posición de las mordazas y los alargamientos medidos por el extensómetro y la galga extensiométrica en un momento determinado (Ilustración 36).

Los datos que entrega el equipo de prueba se procesaron eliminando primero los valores de calibración al comienzo del experimento, luego se determinaron las respectivas características de los materiales aplicando las fórmulas proporcionadas por ACI 440.4R-04 y UNE-EN 10080.



*Ilustración 36.- Procesamiento de datos y control de prueba UPC.
(Foto propia fecha 30/11/2021).*

4.2. PRUEBA PULL OUT

4.3.1. BASES DE ENSAYO:

Este método de prueba llamado Pull-out (ensayo de adherencia) especifica los requisitos para determinar la fuerza de unión de las barras de FRP con el hormigón mediante ensayos de extracción.

El resultado principal del ensayo es la fuerza de adherencia de la barra al hormigón. Según el ACI 440.3R-04, el ensayo está diseñado para usarse en pruebas de laboratorio en las que la variable principal es el tamaño o tipo de barra FRP, no debe usarse para establecer valores de adherencia de diseño y longitudes de desarrollo para barras de FRP empotradas en hormigón.

El objetivo es la determinación de la tensión de adherencia media entre las barras de FRP no pretensadas y el hormigón circundante, ya que estas trabajarán como refuerzo pasivo. Con ello determinaremos las propiedades de unión de CFRP Carbopree® con un diámetro de 10 mm, GFRP Glasspree® con un diámetro de 12,7 mm y la barra TGFRP con un diámetro de 12,7 mm.

4.3.2. NUMEROS DE ENSAYOS:

De acuerdo a la normativa utilizada se realizarán 5 pruebas para cada caso de estudio. Cada caso de estudio estará determinado por el tipo de material y diámetro de la barra, siendo en total 3 los casos a estudiar. Esto se puede apreciar en la siguiente tabla. (tabla 6).

No	Material	Diámetro (mm)	# Ensayos	Normativa Utilizada
1	GFRP	12.7	5	ACI 440.R3-04
2	CFRP	10	5	ACI 440.R3-04
3	TGFRP	12.7	5	ACI 440.R3-04

Tabla 6.- Numero de ensayos pull-out, campaña experimental UPC.

4.3.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS CON BARRAS FRP:

- Preparación de barras:

Las barras de FRP utilizadas serán de 500mm de longitud. En el extremo de las barras que actúa como extremo cargado durante el ensayo, se debe usar el mismo sistema de protección utilizado durante los ensayos tensile test de las barras FRP a tracción. En el otro extremo de las barras, que actúa como extremo descargado durante el ensayo, se delimita la longitud de adherencia, $l_b = 5d_b$, donde d_b es el diámetro de la barra FRP.

- Preparación de moldes para encofrado:

Los moldes utilizados para los ensayos pull out fueron de 2 tipos de probetas cúbicas, uno metálica de 10mm de espesor y de 200mm cada lado como refiere la norma ACI 440.3R-04. Otro de madera con las mismas dimensiones. Se debe recubrir el interior del molde con una fina capa de aceite desencofrante para facilitar el desmoldé de los cubos de hormigón.

- Instalación de barras en moldes de encofrado:

Se colocará cada barra en el encofrado, dentro del espacio en la abertura del molde por donde se inserta la barra, será sellado con burletes para impedir la entrada de agua y otras sustancias. Cada barra será ajustada al molde mediante abrazaderas metálicas a ambos lados del molde, de manera que la barra no se deslice durante el hormigonado.

Para evitar el contacto entre las barras FRP y el hormigón en la zona fuera del área perteneciente a la longitud de adherencia, las barras serán revestidas con tubos de PVC de diámetro interior ligeramente mayor que el diámetro exterior de las barras. Es importante impedir el deslizamiento de los tubos de PVC y la entrada de hormigón al interior, por lo que se colocaran burletes en los extremos de los tubos PVC, confiriendo así su impermeabilidad.

En el extremo libre, las barras sobresaldrán ligeramente del hormigón (5 cm) de modo que se pueda apoyar el LVDT en la barra (Ilustración 37).

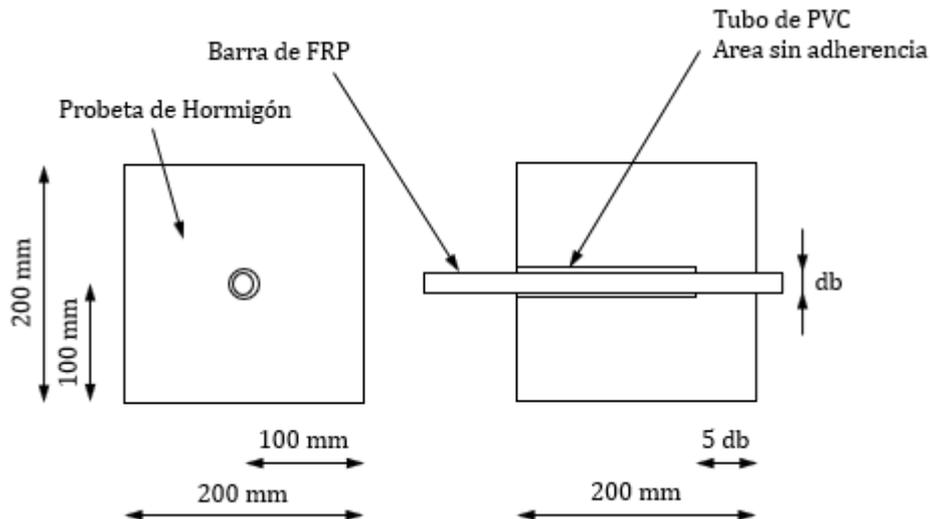


*Ilustración 37.- Moldes con barras instaladas para hormigonado.
(Foto propia fecha 18/11/2021)*

- Hormigonado de probeta:

El hormigón autocompactante 35 MPa utilizado para la prueba se describe mediante el diseño de la mezcla en el subcapítulo 4.4. Las muestras se hormigonaron de una sola vez y no se vibraron. De cada lote se tomaron seis muestras cilíndricas de hormigón para determinar las características del mismo (Ilustración 39).

En el caso del hormigón utilizado, para determinar su consistencia, se realizó el ensayo de asentamiento con el cono de Abrams.



*Ilustración 38.- Esquema de probeta de hormigón para prueba Pull out.
(Dibujo propio)*

Finalmente, para evitar la pérdida de humedad se cubrieron las muestras con plástico para desencofrar al día siguiente, Las muestras se sacaron del encofrado después de un día y se almacenaron a 20 °C y 80 % de humedad. Los especímenes se ensayaron después de cinco días, ya que se alcanzó la resistencia mínima requerida del hormigón de 35 MPa.



*Ilustración 39.- Probetas hormigonadas y cilindros de prueba Pull out desencofrados a las 24 hrs.
(Foto propia fecha 19/11/2021).*

- Preparación de probeta para arrancamiento:

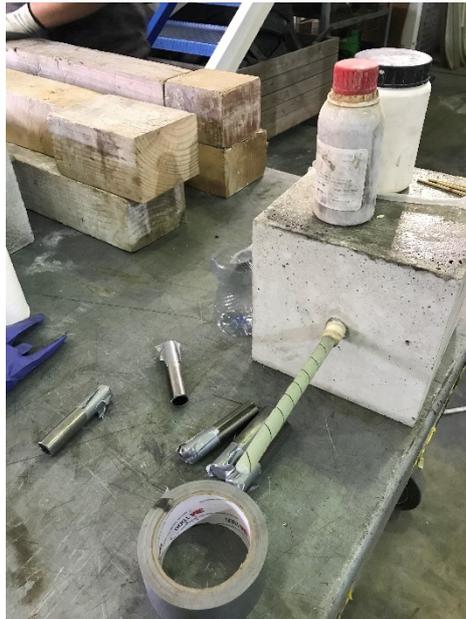
Pasadas las 24 horas de desencofrado la probeta, para preparar las muestras cubicas, como en el caso anterior del tensile test, se pegó un tubo de acero de 100 mm de longitud a cada extremo de la barra FRP con el pegamento X60 de curado rápido producido por HBM. Se deberá tener cuidado que este pegado sea lo más centrado posible (Ilustración 41).

Las barras de FRP son sensibles a las cargas aplicadas perpendicularmente a la dirección de la fibra. Por lo tanto, si la barra se montara directamente en la máquina de ensayo, fallaría en el anclaje debido a la presión ejercida por las mordazas. Algunos productores ofrecen sistemas de

anclaje especiales para su tipo de barra. Si no existe un dispositivo de anclaje, las barras generalmente se protegen pegando un tubo de acero a los extremos de la muestra.

El pegamento a usar es de endurecimiento rápido y está conformado por dos componentes: componente A-polvo y componente B-líquido (Ilustración 29). Tras la mezcla de ambos componentes, el adhesivo endurece a los 5 minutos, teniendo un plazo de trabajabilidad de 1 minuto. La proporción utilizada para el pegamento X60 es de *3 cucharadas por 1 probeta*, procurando que la mezcla sea lo suficientemente espesa, pero sin ser muy fluida para que ingrese en todo el interior del tubo.

Nota: Se deberá tomar en cuenta el equipo de seguridad descrito para la preparación del X60.



*Ilustración 40.- Preparación de probeta con tubo metálicos de agarre.
(Foto propia fecha 19/11/2021).*

Para garantizar el pegado que sea lo más centrado posible se recomienda que se haga de manera vertical para esperar su secado como se muestra en la (Ilustración 42).



*Ilustración 41.- Preparación de probetas para prueba Pull out.
(Foto propia fecha 19/11/2021).*

- **Procedimiento de Ensayo:**

Las probetas se ensayaron en la misma máquina de ensayo utilizada para el ensayo de tracción tensile test (INSTRONG 8803). La configuración de la máquina se modificó ligeramente para adaptarse a la prueba de extracción. Esto se realizó montando cuatro barras de acero en la empuñadura superior para soportar una placa de carga. El espécimen se colocó sobre un tapete de neopreno de 5 mm de espesor que cumple la función de sello esférico en el montaje propuesto por ACI 440.4R-04 (Ilustración 43).

A continuación, las barras de FRP se montaron en la empuñadura inferior a una presión de 40 bares para las barras de 10 mm y 65 bares para las barras de 12,7 mm ya que cada barra analizada es de un material diferente. Para las barras de acero se eligió una presión de 100 bar. La velocidad de carga no se proporciona en el código ACI [11]. Se calculó en base al requisito de una duración máxima de la prueba de 10 minutos. La deformación de rotura debe alcanzarse antes de este tiempo y, por lo tanto, la velocidad de carga se eligió a 0,6 mm/min hasta medir un deslizamiento de 5 mm y luego aumentar a 1,2 mm/min hasta la extracción total de la barra.



*Ilustración 42.- Muestra montada en equipo de tracción, barra GFRP.
(Foto propia fecha 24/11/2021).*

- **Para este ensayo hay que tomar en cuenta las siguientes consideraciones:**

En conjunto de propuesto por el ACI, el deslizamiento solo se midió en el extremo descargado de la barra. El deslizamiento se registró a través de un LVDT con un rango de ± 5 mm y una precisión del 1 % montado en la parte superior de la muestra. La máquina de ensayo registró diez mediciones por segundo. Con un deslizamiento de 9,5 mm, se retira el LVDT para garantizar que no se dañe durante la prueba.

Una vez concluida la prueba de adherencia en el equipo de ensayo se desmonta la probeta y es llevada para ser partida en el equipo de compresión a por lo menos una probeta de cada uno de los casos de estudio con la finalidad de verificar que las condiciones de estudio se mantuvieron en todo momento correctas (Ilustración 44 y 45).



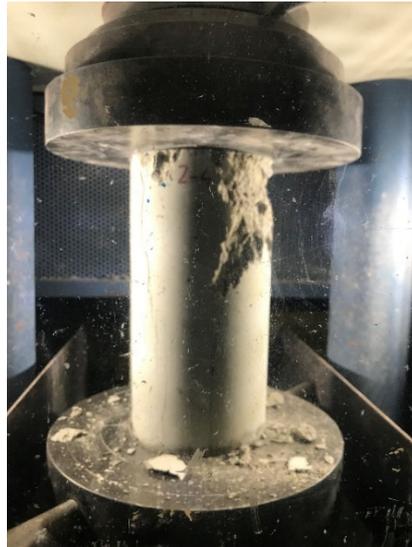
*Ilustración 43.- Partido de la probeta cubica.
(Foto propia fecha 24/11/2021).*

Inmediatamente después de romper de la probeta cubica se cuidará montar a la mitad la probeta para verificar si hubo alguna penetración de hormigón y se observarán los tipos de deslizamientos hechos en el hormigón por las diferentes barras FRP (Ilustración 45). Esto se describirá más a detalle en el Capítulo 5.



*Ilustración 44.- Probeta después de romper la probeta.
(Foto propia fecha 24/11/2021).*

Se deberá realizar los ensayos a compresión de las probetas cilíndricas a la misma edad en que se realizaron los ensayos pull-out buscando que el hormigón alcanzara el umbral requerido de 35 MPa de resistencia a la compresión después de 24 horas siguiendo la norma UNE-EN-12390-3-2009 [22] (Ilustración 46).



*Ilustración 45.- Compression test, probeta cilíndrica para ensayo Pull out.
(Foto propia fecha 24/11/2021).*

- Procesamiento de datos post-ensayo:

Los datos obtenidos por la máquina de prueba se proporcionan en una hoja de Excel como entradas, cada una de las cuales consta de la fuerza aplicada por la máquina, la posición de los agarres y el deslizamiento medido por el LVDT en un momento determinado. Los valores de calibración al comienzo del experimento se eliminaron primero de los datos sin procesar. Luego se aplicó a los datos la fórmula para calcular la tensión de adherencia promedio proporcionada por ACI 440.4R-04 (Ilustración 47).



*Ilustración 46.- Procesamiento de datos y control de prueba Pull out.
(Foto propia fecha 24/11/2021).*

4.3. PRUEBA ECADA

El ECADA test elaborada en la UPV dentro de la tesis doctoral de MARTÍ [23] tal y como se expone en el subcapítulo 2.5 esta prueba fue desarrollada para barras tradicionales de acero.

El objetivo de esta prueba realizada en la campaña experimental es que sea adaptada a las barras FRP en las cuales es determinar la transferencia y la longitud de adherencia de los tendones de preesfuerzo. La prueba se realizó con barras CFRP Carbopree® con un diámetro de 10 mm, GFRP Glasspree® con un diámetro de 12,7 mm y la barra TGFRP con un diámetro de 12,7 mm..

4.3.4. BASES DE ENSAYO:

El ensayo consiste en realizar secuencialmente las operaciones de pretensado, transferencia de carga y arrancamiento en uno de los extremos del elemento determinando las longitudes de transmisión y adherencia. Para ello se sustituye parte del elemento por un sistema (sistema de arrancamiento) que simule el comportamiento de la parte sustituida y que debe reunir las siguientes condiciones[9]:

- 1.- Servir de anclaje de la armadura, y poder materializar la transmisión en el extremo no eliminado del elemento (extremo de transmisión).
- 2.- Medir la fuerza en el sistema de arrancamiento (extremo de arrancamiento).
- 3.- Permitir aumentar la tensión de la armadura (operación de arrancamiento).
- 4.- Tener una rigidez igual a la de la parte sustituida.
- 5.- No generar efectos de confinamiento en el extremo de la probeta.

Se determinará la longitud de transición cuando al momento del destesado del elemento, la tensión de la barra en la zona del arrancamiento sea similar a la medida después de las pérdidas de pretensado. Considerando una variación de hasta el 2%.

Se determinará la longitud de anclaje cuando la tensión necesaria para que se produzca el deslizamiento de la barra en la zona de arrancamiento sea igual similar a la medida después de las pérdidas de pretensado. Considerando una variación de hasta el 2%.

4.3.5. NUMEROS DE ENSAYOS:

Al ser un programa experimental y buscando un proceso de pruebas adecuado para barras FRP y al tratarse de un método iterativo, no se puede preparar un conjunto de muestras para ser ensayadas, ya que se necesita de los resultados preliminares de una muestra anterior para diseñar la siguiente.

Al principio se estimó que dichos resultados se pueden obtener en un mínimo de 5 intentos, pero por cuestiones que no sabíamos cuál sería el resultado y al presentarse diversos casos no contemplados se realizaron más pruebas entre ellas algunas fallidas que hizo que nos llevara más tiempo de lo estimado dándonos un total de **37 ensayos**, todo esto se mencionara en el capítulo 5.4 dentro del capítulo 5 Campaña experimental, por lo que a continuación se presenta al número de ensayos realizados con resultados que se pueden considerar para estudio. (tabla 7).

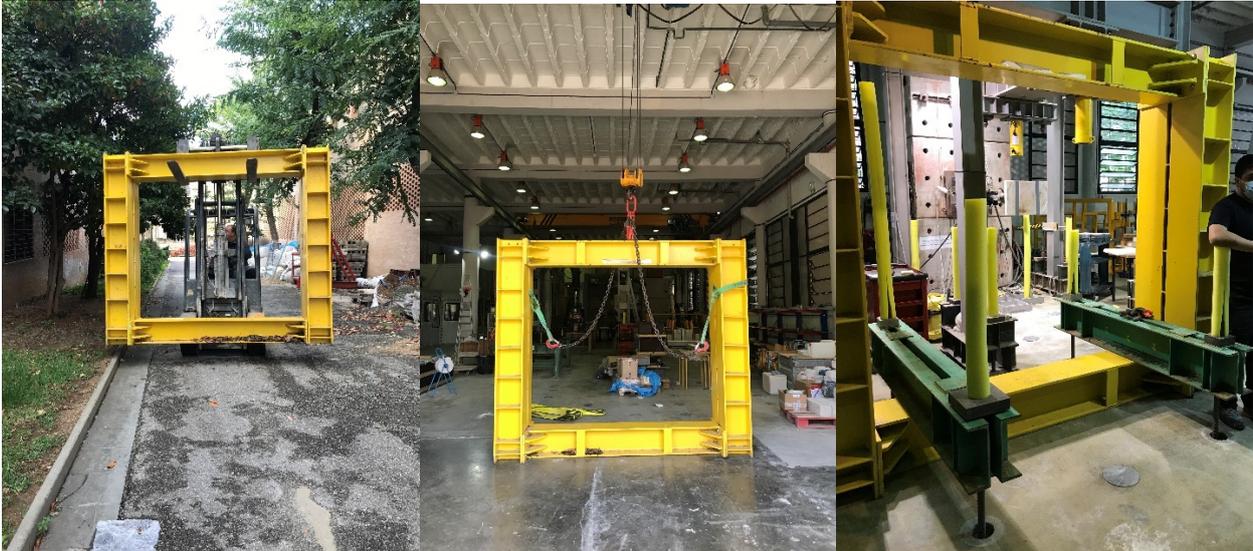
Ensayos ECADA					
No	Material	Diámetro (mm)	Tipo de prueba	Nivel de pretensado	# Ensayos
1	CFRP	10	Prueba	-	1
2	GFRP	12.7	Anclaje	-	1
3	TGFRP	12.7	Anclaje	-	2
4	CFRP	10	Anclaje	-	3
5	TGFRP	12.7	ECADA	45%	9
6	GFRP	12.7	ECADA	45%	5
7	GFRP	12.7	ECADA	45%	9
8	CFRP	10	ECADA	45%	6
9	CFRP	10	ECADA	45%	1

Tabla 7.- Numero de ensayos ECADA test, campaña experimental UPC.

4.3.6. PREPARACIÓN DE EQUIPOS PARA ENSAYOS DE BARRAS FRP:

- Preparación de Bastidor:

Una de las primeras actividades realizadas al iniciar los trabajos en el laboratorio con fecha 15 de octubre de 2021, fue la selección del bastidor que se ocupó. Podemos mencionar que la decisión de la selección de este bastidor fue con base a lo que nos marca el procedimiento hecho por MARTI, así como que la estructura existente seleccionada se le realizara un análisis de rigidez cuyas deformaciones no interfieran con las del ensayo (Ilustración 48).



*Ilustración 47.- Procedimiento de montaje de bastidor seleccionado. Laboratorio UPC.
(Foto propia fecha 15/10/2021).*

EL bastidor desempeña la función de bancada de pretensado, este se montará en una ubicación donde cuente con espacio necesario para la movilidad e instalación de todo el equipo correspondiente y distancia de seguridad para la realización de pruebas, el bastidor ocupado en esta campaña experimental cuenta con las siguientes características:

Está formado por un marco metálico, el sistema de arrancamiento ideal, de acuerdo con lo expuesto hasta ahora, debe tener una rigidez igual a la del hormigón sustituido. Esta rigidez depende del tipo de hormigón, de la edad del hormigón en el momento del ensayo y de la sección transversal del elemento. Por ello, para la realización del ensayo propuesto se ha realizado un análisis previo del bastidor del cual previamente se verificó en la UPC [24] por el equipo del proyecto *Straduravius*, donde se concluye que la rigidez del marco de acero y el sistema AMA están dentro de los límites proporcionados por el método de ensayo a través de un modelo de Elementos Finitos (FEM) y un cálculo numérico (Ilustración 49, 50 y 51) que cuenta el laboratorio para su realización, aceptando como condición válida que la rigidez del sistema sea igual o ligeramente superior a la del hormigón sustituido.

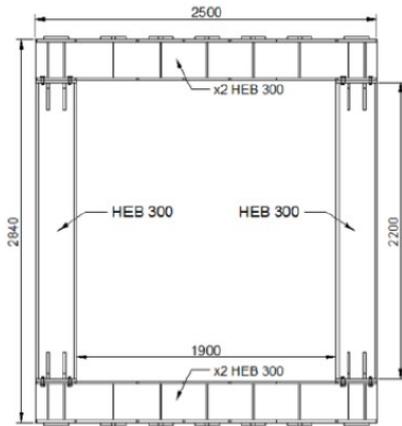


Ilustración 50.- Planta del Bastidor UPC (Ortiz y Ramírez).

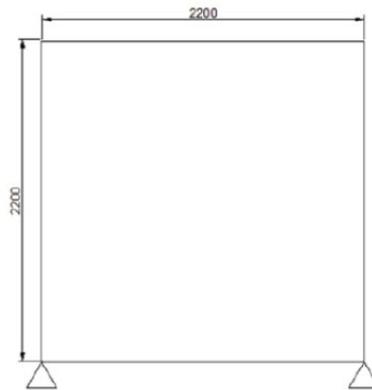


Ilustración 49.- Esquema de cálculo de marco. (Ortiz y Ramírez).

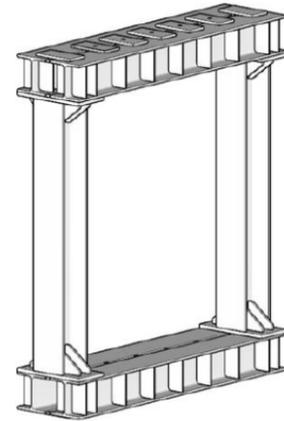


Ilustración 48.- Perspectiva del Bastidor. (Ortiz y Ramírez).

- Preparación de base modular móvil para soporte de encofrado:

Para esta parte se realizó un modelo de base que pudiera ser móvil y pueda ser montada y desmontada fácilmente adecuándose a las características de cada prueba (Ilustración 52), así también que sea lo suficiente mente rígida para no deteriorar los resultados de las pruebas ECADA, y tenga la capacidad de soporte del encofrado de madera:



Ilustración 51.- Montaje de base modular y encofrado móvil. Laboratorio UPC. (Foto propia fecha 15/10/2021).

- Instrumentación del Bastidor:

Se colocaron 2 LVDT (Ilustración 53) en el lado activo para dar un seguimiento a la deformación en el bastidor y corroborar que en el momento del tesado no hubiera lo cual quedo registrado sin ninguna anomalía corroborando los datos previamente analizados por el equipo de trabajo del proyecto *Straduravius*.



*Ilustración 52.- Colocación de 2 LVDT para monitoreo de bastidor UPC.
(Foto propia fecha 01/12/2021).*

- Encofrado de Madera para fabricación de probetas:

Los especímenes tenían una sección transversal de 100 x 100 mm por recomendación de lo que marca la tesis doctoral de MARTÍ [9] y fueron pretensados con una sola barra colocada en el centro.

Se realizaron diferente número de pruebas (Tabla 7), los primeros 100 mm de la barra están despegados para garantizar que las fuerzas de compresión introducidas a través de la placa de soporte no influyan en las medidas. La longitud de la muestra se varió en cada prueba para determinar iterativamente la transferencia y la longitud de desarrollo.



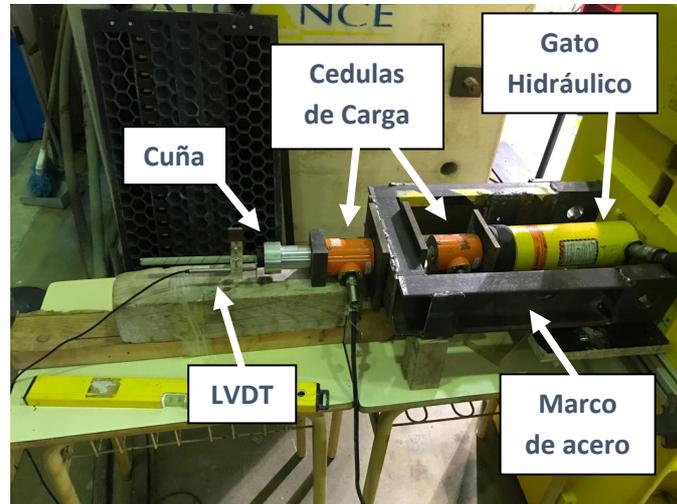
*Ilustración 53.- Encofrado de madera para fabricación de probetas.
(Foto propia fecha 06/05/2022).*

- Sistema Mecánico – Hidráulico y de Arrancamiento:

Se realizó el montaje de los lados pasivos y activos, los cuales incluirán la configuración de los dispositivos de medición y carga del lado activo y pasivo (Ilustración 55 y 56). La fuerza aplicada se midió a través de celdas de carga con una capacidad de 200 kN y el deslizamiento de la barra con respecto al ancla se midió a través de LVDT. Con una precisión del 1 % y un rango de ± 5 mm para el LVDT y una precisión del 0,2 % para la celda de carga, las mediciones se registraron diez veces por segundo.

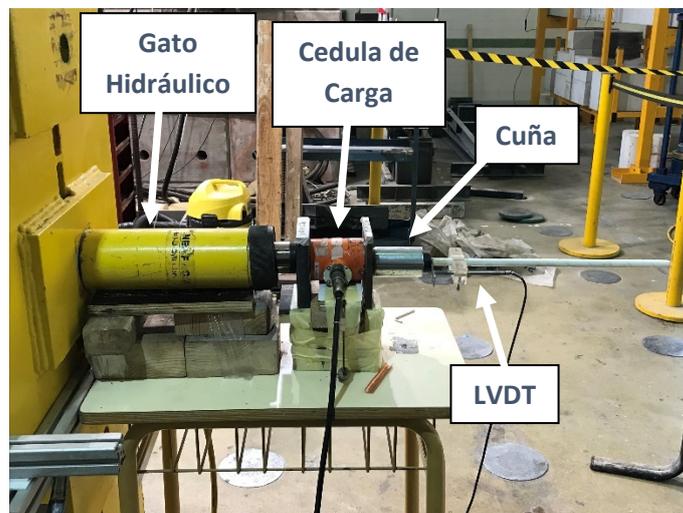
El sistema AMA del lado pasivo se compone de un pequeño marco de acero con un orificio en el lado corto para poder pasar la barra de FRP a través de ella. Fuera del marco de acero en su extremo se da el anclaje y la medición de la fuerza durante la carga en el lado activo. Tan pronto como se libera la fuerza de pretensado, el gato en el lado pasivo comienza a cargar la barra y la barra se extrae de la muestra. Por lo tanto, cumple con los requisitos presentados en el subcapítulo 2.5.

Para asegurar unas mediciones más precisas, se colocaron 4 placas de acero y con ellas poder medir una fuerza distribuida equilibradamente: 1 de la cuña a la cedula de carga, 2 de la cedula de carga al marco de acero, 3 del marco de acero a la cedula de carga dos que medirá la fuerza de arrancamiento y 4 la placa que va de la cedula de carga al gato de arrancamiento.



*Ilustración 54.- Configuración del Lado Pasivo del sistema ECADA.
(Foto propia fecha 26/01/2022).*

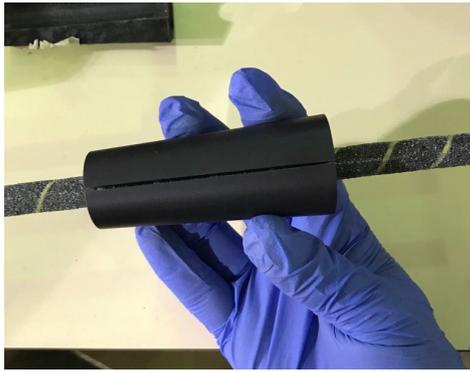
El lado Pasivo solo consta de 2 placas; 1 que va de la cuña a la cedula de carga para el procedo de tesado y la 2 entre la cedula de carga y el gato de tesado.



*Ilustración 55.- Configuración del Lado activo del sistema ECADA.
(Foto propia fecha 26/01/2022).*

- Dispositivos de anclaje tipo cuñas:

Los dispositivos de anclaje tienen la misma importancia para el ensayo ECADA, que para los ensayos de tracción y extracción. El sistema de anclaje utilizado fue proporcionado originalmente por la compañía Sireg Geotech srl. La (Ilustración 57 y 58) muestra que el dispositivo de anclaje consta de dos cuñas elastómericas que se colocan en un barril metálico. La longitud de las cuñas de plástico y la longitud de la barra de FRP en contacto con el anclaje es de 80 mm.



*Ilustración 57.- Cuña elastómera de dos secciones.
(Foto propia fecha 11/04/2022).*



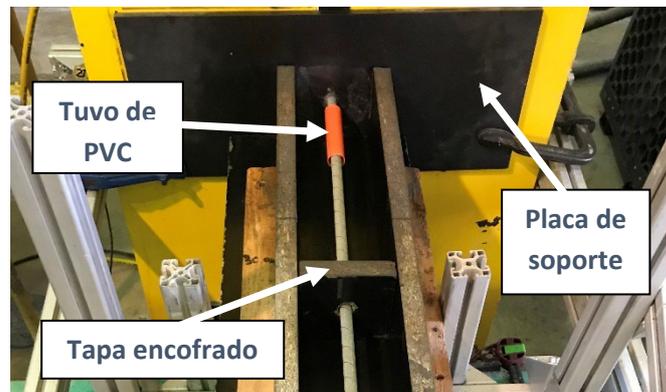
*Ilustración 56.- Cuña elastómera con barril metálico sistema completo Sireg Geotech srl.
(Foto propia fecha 11/04/2022).*

4.3.7. PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS CON BARRAS FRP:

Para las pruebas ECADA se utilizó tres tipos de barras FRP. Se normalizo la prueba, considerando los mismos parámetros de fuerza, resistencia de hormigón, tiempos de ejecución y procedimiento, así se tendrán resultados comparables y se podrá realizar una comparativa más certera de los resultados obtenidos para los tres tipos de barras estudiadas.

- Enfilado:

Para este ensayo se cortaron barras con una longitud de 4,9 metros por prueba, esta barra se dispone a través de los orificios del sistema activo, marco del bastidor, encofrado de madera previamente nivelado y centrado. Antes de pasar la barra por el marco del bastidor lado pasivo se colocó un tubo de PVC en los primeros 100 mm para provocar que la barra este despegada y esto para garantizar que las fuerzas de compresión introducidas a través de la placa de soporte no influyan en las medidas. Para finalizar se dispondrá la barra a través del sistema del lado pasivo (Ilustración 59).



*Ilustración 58.- Enfilado de Barra GFRP.
(Foto propia fecha 28/04/2022).*

- Colocación de cuñas:

Al ser dispuesta la barra FRP, y estar centrada en todo el sistema ECADA, se dispuso a colocar las cuñas las cuales por variación a las pruebas experimentales (Tabla 7) realizadas, cada cuña fue colocada dependiendo el tipo de barra FRP, Esta colocación se hizo con mazo y un tubo de manera manual ejerciendo golpes para penetración y verificando mediante medida de vernier que fueran entre 11 a 14 mm de sobrante de la cuña plástica, este valor dependió del tipo de barra y su forma de colocación de la cuña y quedando de la siguiente manera:

Para barras GFRP:

El anclaje utilizado fue un sistema de cuñas plásticas de dos secciones que están en contacto con

la barra de GFRP y se introducirá en un barril metálico[25] (Ilustración 57).

Para barras CFRP:

El anclaje utilizado fue un sistema de cuñas plásticas dividida en 4 secciones que están en contacto con la barra de CFRP mediante pegamento X60 y se introdujo rápidamente cuidando el centrando de las 4 secciones en un barril metálico (Ilustración 60).



*Ilustración 59.- Sistema de cuñas para barra CFRP.
(Foto propia fecha 13/06/2022).*

Para barras TGFRP:

El anclaje utilizado fue un sistema de cuñas plásticas dividida en 2 secciones a las cuales se les hicieron surcos con un disco dremel (Ilustración 61) que están en contacto con la barra de TFRP mediante pegamento X60 y se introdujo rápidamente cuidando el centrando de las 4 secciones en un barril metálico (Ilustración 62).



*Ilustración 60.- Surcos de cuña para barra TGFRP.
(Foto propia fecha 18/05/2022).*



*Ilustración 61.- Sistema de Cuña para barra TGFRP.
(Foto propia fecha 11/04/2022).*

NOTA: En el siguiente capítulo 5, se ampliará y explicará la decisión del porque cada sistema de cuña fue diferente para cada caso de barra FRP ya que se experimentaron diferentes métodos.

- Instrumentación del sistema para mediciones en anclajes:

En este paso se colocó una placa metálica de 20 x 60 mm a cada cuña elastómera, pegada con adhesivo CN-E de pegado rápido, esto permite colocar posteriormente los LVDT que deberán de estar lo más paralelo posible a la barra y servirán para medir la penetración de la cuña al ejercer las fuerzas de tesado tanto en el lado activo como en el lado pasivo (Ilustración 63).

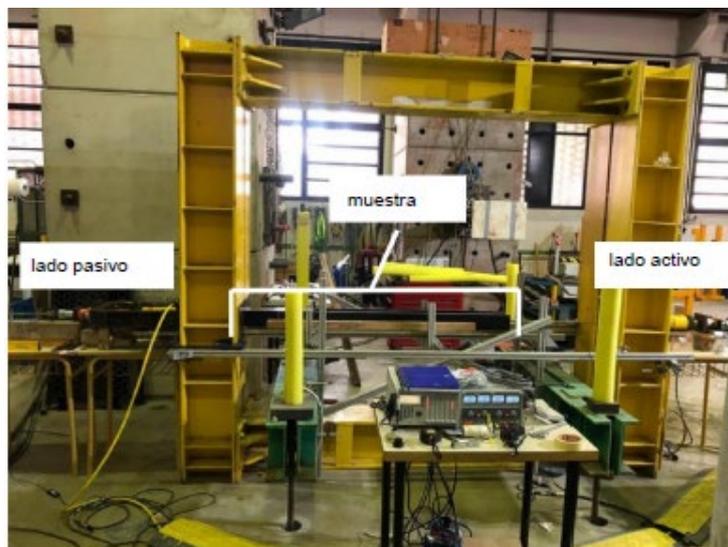


*Ilustración 62.- Colocación de placa y LVDT en barra TGFRP.
(Foto propia fecha 31/05/2022).*

- Verificación del todo el sistema:

En este momento se verificará que todo el sistema este en orden antes de continuar con el tesado de la barra, por lo cual se verifico los siguientes parámetros (Ilustración 64):

- 1.- Que en los sistemas activos y pasivos estén colocadas todas las placas de transferencias para medición de la cedulas de carga y que estén centrados.
- 2.- Que los LVDT estén funcionando y a una distancia de penetración de 2,4 mm.
- 3.- Revisar que la barra FRP este nivelada y no rose con ninguna parte del sistema.
- 4.- Se realizó una marca en el límite de la placa de soporte (lado pasivo) para posterior medir el alargamiento de la barra.
- 5.- Se verificará que existan películas de protección adecuadas a cada lado del sistema para evitar riesgos.
- 6.- Se pondrá en marcha el equipo de presión que activa los gatos, verificando las mangueras de presión.
- 7.- Se configurará y pondrá el sistema de medición de cedulas de carga y LVDT en función.



*Ilustración 63.- Esquema general para tesado de barras FRP.
(Foto Kathrina Vangen 2022)[26].*

- Pretensado de la armadura:

Después de haber verificado todo el sistema se muestra en la (Ilustración 65), cual es el esquema de funcionamiento de la operación del pretensado.

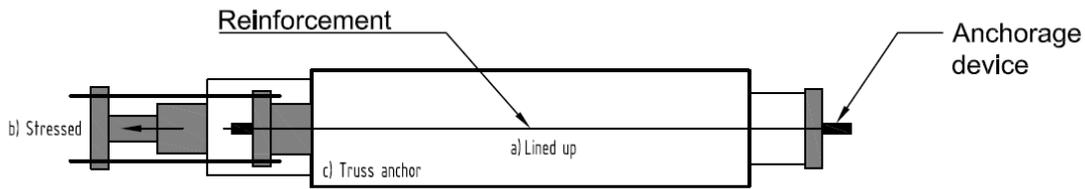


Ilustración 64.- Esquema general de proceso de pretensado ECADA. (Dibujo propio).

Para esta campaña de experimentación se utilizó como software de medición y control de datos el catmanEasy V5.3.3 DAQ Project. (Ilustración 66). En este se monitoreo y se llevaba el control de seguridad en tiempo real de la penetración de cuñas, así como de las pérdidas que presentaba la barra, este equipo se utilizó en las tres etapas de la prueba ECADA test, (pretensado), (destensado y transferencia) y (Arrancamiento).

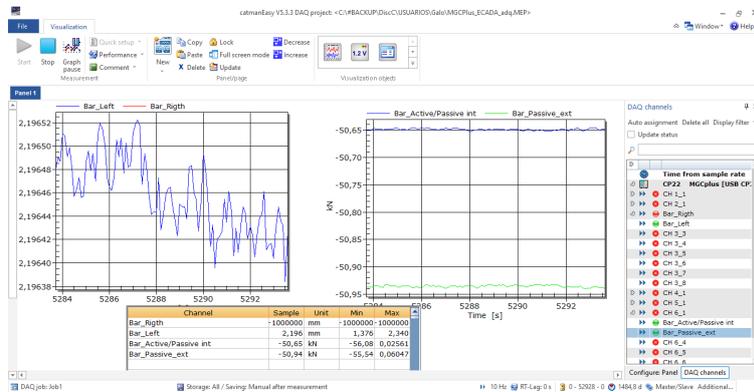


Ilustración 65.- Software de medición y control de datos (catmanEasy V5.3.3). (Captura generada 01/07/2022).

Al verificar el funcionamiento de medición, se inicia la configuración de equipo de Ensayo para el funcionamiento de los gatos, en esta campaña se utilizó el Modelo (MEH-2000-H) en el cual ingresamos los parámetros de velocidad, ciclos de tiempo y fuerzas a ejercer en el gato correspondiente, verificando que la válvula del gato hidráulico este abierta en su totalidad menos media vuelta, para evitar presiones excesivas (Ilustración 67).

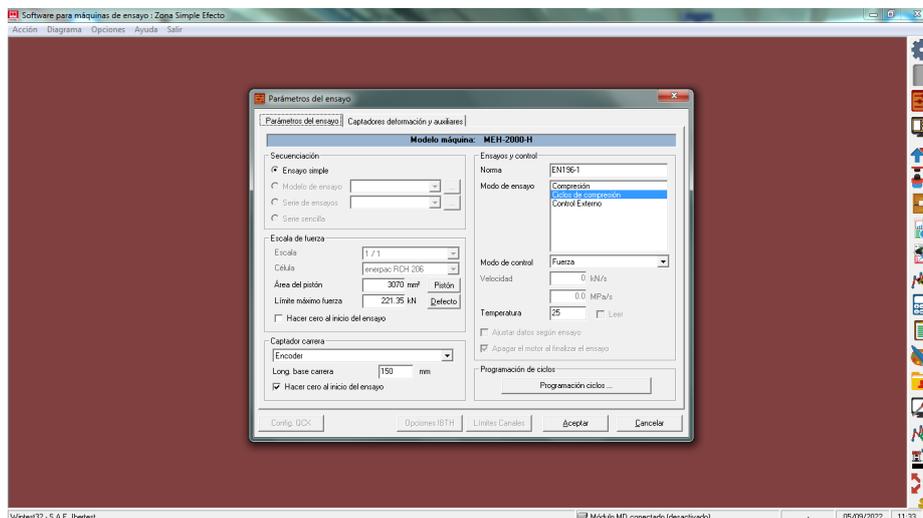


Ilustración 66.- Equipo de ensayo MEH-2000-H. (Captura generada 01/07/2022).

El primer paso del ensayo ECADA es el pretensado de la probeta. El gato del lado activo aumenta la fuerza con una velocidad de 150 N/s hasta que se alcanza un esfuerzo de tracción en la barra. Esto corresponderá al porcentaje de f_{pu} de cada barra. Luego, la fuerza se mantiene en un valor constante durante una hora con el objetivo de minimizar las pérdidas que se puedan presentar en el sistema.

En este paso es importante monitorear los dispositivos de medición y carga del lado activo y pasivo. La fuerza aplicada se midió a través de celdas de carga con una capacidad de 200 kN y el deslizamiento de la barra con respecto al ancla se midió a través de LVDT. Con una precisión del 1 % y un rango de ± 5 mm para el LVDT y una precisión del 0,2 % para la celda de carga, las mediciones se registraron diez veces por segundo.

Así también se tomó medidas manuales de la penetración de las cuñas y de la deformación-alargamiento que tuvo la barra con respecto a la marca realizada al inicio de la placa de soporte.

- **Hormigonado de la probeta:**

Para evitar el contacto entre las barras FRP y el hormigón en la zona fuera del área perteneciente a la longitud de adherencia, previo en el enfilado de las barras como se comentó anteriormente se dejó colocado un tubo de PVC de diámetro interior ligeramente mayor que el diámetro exterior de las barras. Es importante impedir el deslizamiento de los tubos de PVC y la entrada de hormigón al interior, por lo que se colocaran burletes en los extremos de los tubos PVC, confiriendo así su impermeabilidad.

Se aplicó desencofrante en el molde de la probeta, donde se debe de tener cuidado de no aplicar en la barra para así evitar que se altere la muestra en la adherencia de la barra con el hormigón.

El siguiente paso es el hormigonado de la probeta la cual tiene una sección de 100 x 100 mm y una longitud variable que se ira determinando. Para que la campaña de experimentación fuera acorde en las diferentes barras FRP se determinó el diseño de mezcla presentado en el subcapítulo siguiente 4.4 (Prueba a compresión del hormigón), se buscó que el hormigón alcanzara el umbral requerido de 35 MPa de resistencia a la compresión después de 24 horas. A continuación, la fuerza de pretensado se bloquea y se mide durante las 24 horas siguientes.

En este paso se sacarán del mismo hormigón 3 muestras cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura y deberán permanecer en las mismas condiciones de conservación que la probeta, como lo indica la Norma-EHE-08 (Ilustración 68).



*Ilustración 67.- Muestras cilíndricas de probeta ECADA.
(Foto propia fecha 20/06/2022).*

La probeta permanece, tras el hormigonado, en las condiciones de conservación previamente decididas hasta el instante en que se pretende realizar el ensayo de transferencia que será pasadas las siguientes 24 horas (Ilustración 69).



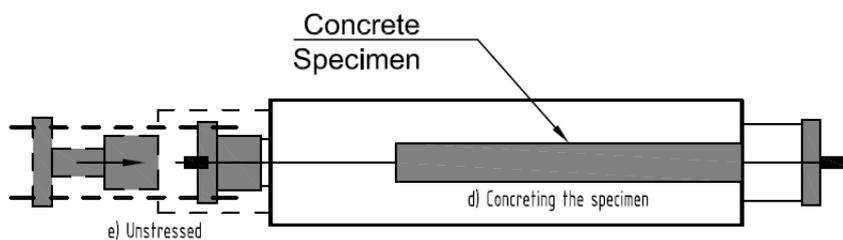
*Ilustración 68.- Condiciones de conservación de probeta ECADA.
(Foto propia fecha 20/06/2022).*

- Proceso de destensado y transferencia de carga:

Antes de iniciar el proceso de la operación de destensado y transferencia de carga se realizará la prueba compression test, descrita en el subcapítulo siguiente 4.4, para verificar que el hormigón haya alcanzado el umbral requerido de 35 MPa de resistencia a la compresión después de 24 horas.

Posterior a la verificación de que el hormigón alcanzó la resistencia de diseño se procede al desmolde de la probeta.

El destensado consiste en actuar nuevamente sobre el sistema hidráulico, situado en el extremo del lado activo, para recuperar la fuerza soportada por el sistema mecánico de aproximación. Éste queda liberado y se recoge con una velocidad de 150 N/s. Mediante la descarga del sistema hidráulico, a velocidad controlada, se produce el destensado de la barra y como consecuencia, la transmisión del pretensado al hormigón, midiendo la fuerza transmitida en el sistema de arrancamiento mediante la cedula de carga. Aquí verificamos la longitud de transferencia. Todo esto se muestra en el esquema siguiente (Ilustración 70).



*Ilustración 69.- Esquema general del proceso de destensado y transferencia de carga ECADA.
(Dibujo propio).*

Se supone que la longitud de transferencia es suficiente cuando la fuerza en el lado pasivo no varía en gran medida. Durante esta medición, se considera que una variación de fuerza depende del tipo de barra dentro de la variación experimental (dada por el proyecto de investigación Straduravius). Después de la liberación total de la fuerza de pretensado, se corta la barra en el lado activo a unos 300 mm de la probeta y se monta un LVDT en el extremo restante de la barra para medir el deslizamiento de la misma con respecto a la superficie de hormigón (Ilustración 71).

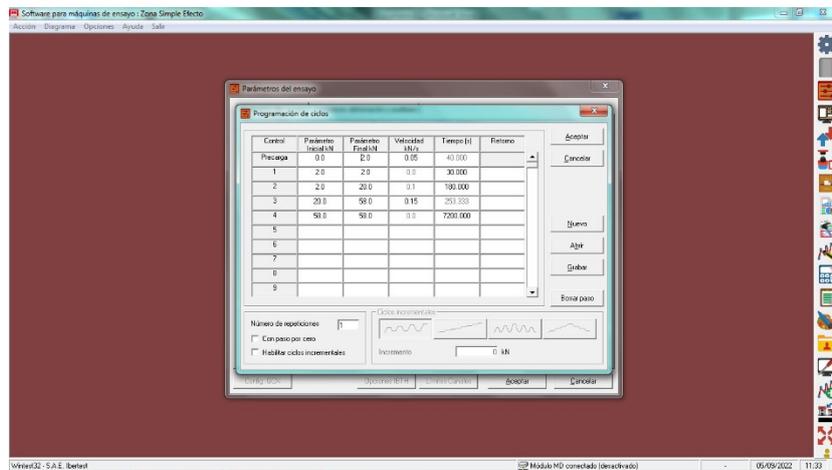


*Ilustración 70.- Instalación de LVDT probeta ECADA.
(Foto propia fecha 26/05/2022).*

- Operación de arrancamiento de la barra FRP:

Antes de iniciar el proceso de la operación de arrancamiento se realizará la prueba compression test, descrita en el subcapítulo siguiente 4.4, para verificar que el hormigón haya alcanzado el umbral requerido de 35 MPa de resistencia a la compresión después de 24 horas.

Para este paso configuraremos el equipo de gatos hidráulicos, cerrando la válvula del lado activo y abriendo la del lado pasivo, así mismo se configurará el equipo (MEH-2000-H) en el cual ingresamos los parámetros de velocidad, ciclos de tiempo y fuerzas a ejercer en el gato correspondiente (Ilustración 72).



*Ilustración 71.- Programación de ciclos de arrancamiento en equipo de ensayo MEH-2000-H.
(Captura generada 01/07/2022).*

Este cuarto y último paso es traccionar la barra desde el lado pasivo, en esta fase el sistema hidráulico se acopla en el extremo de arrancamiento del bastidor y aumenta la tensión en la barra FRP tirando con una velocidad de 150 N/s, velocidad en que fue tomada de la normativa de acero y que debe durar como máximo 10 min, (Ilustración 72) la barra se extrae del hormigón hasta que se produzca uno de los 3 siguientes fallos; el deslizamiento de la barra, su rotura, o el fallo del hormigón por hendimiento. Aquí verificamos la longitud de anclaje.

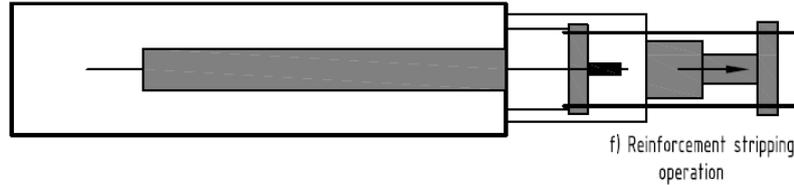


Ilustración 72.- Esquema del proceso de arrancamiento ECADA.
(Dibujo propio).

NOTA: Se debe tomar en consideración que esta parte del proceso es una de las que implica más riesgo ya que llevamos la barra hasta el fallo y ya que no sabemos cuál de las 3 variantes de fallo se puede producir es necesario retirar el LVDT montado en el proceso de transferencia y en cuanto se presente cualquiera de los tres fallos detener el avance del sistema hidráulico.

A diferencia del ensayo del prisma desarrollado por MAHMOUD [27], la deformación del hormigón no se mide durante el ensayo ECADA. Por lo tanto, la determinación de la transferencia y la longitud de desarrollo son dos pasos en el procedimiento de prueba. Después de una primera aproximación de la longitud de desarrollo, la longitud de la muestra se cambia iterativamente. Dependiendo del resultado observado, se puede determinar la transferencia y la duración del desarrollo de la siguiente manera:

- La fuerza en el lado pasivo es constante durante la liberación de la fuerza de pretensado: muestra lado pasivo la longitud es igual o mayor que la longitud de transferencia.
 - La fuerza en el lado pasivo disminuye durante la liberación de la fuerza de pretensado: la longitud de la muestra es más corta que la longitud de transferencia.
 - La carga de diseño se alcanza durante la carga desde el lado pasivo: la longitud de la probeta es igual o mayor que la longitud de desarrollo.
 - No se alcanza la carga de diseño durante la carga desde el lado pasivo: la longitud de la probeta es más corta que la longitud de desarrollo.
- **Procesamiento de datos post-ensayo:**

La salida de datos obtenida por el equipo de ensayo dentro del software de medición y control de datos catmanEasy V5.3.3 DAQ Project, se proporcionan en una hoja de Excel como entradas, cada una de las cuales consta de la fuerza medida por las cédulas de carga y los deslizamientos obtenidos por el LVDT en un momento determinado.

4.4. ENSAYO DE COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN

4.4.1. ENSAYO PARA PRUEBA PULL OUT:

El concreto utilizado en la prueba de extracción fue un concreto SCC40 autocompactante premezclado ordenado. La (Tabla 8) enumera el diseño de mezcla de concreto del SCC40.

Pull-out test (SCC40)		
Componente	Tipo de elemento	Cantidad
CEM II/AL 42.5N		500 Kg/m ³
Relación Agua-Cemento		0.44
Agregados	0/2 mm	360 Kg/m ³
	0/4 mm	879 Kg/m ³
	5/12 mm	150 Kg/m ³
	10/20 mm	300 Kg/m ³
Plastificante		0.62%
Superplastificante		1.53%

Tabla 8.- Diseño de mezcla de Hormigón SCC40.

Los especímenes de GFRP se hormigonaron con un lote de hormigón y los especímenes de CFRP y TGFRP con un segundo lote. Para caracterizar el hormigón se realizó el ensayo de asentamiento 0/2 mm 360 kg/m³. Se realizó sobre el material fresco y se realizó un ensayo de resistencia a la compresión y a la tracción por hendimiento en cilindros de hormigón endurecido a 24 horas. Los resultados de la caracterización del material se pueden ver en la (Tabla 9). La resistencia a la compresión mínima requerida del concreto al momento de la prueba fue de 35 MPa, como lo requiere el programa experimental Straduravius.

	fcm(5)	fcm(7)	fct,sp(7)	cm(7)
	Separación [mm][MPa]		[MPa]	[GPa]
PRFV	525	33,7 (2,0 %)	38,3 (1,8 %)	2,63 (10,7 %)
CFRP, TGFRP	575	40,0 (0,5 %)	43,5 (2,6 %)	3,37 (2,4 %)

Tabla 9.- Propiedades mecánicas del ensayo compresion test.

4.4.2. ENSAYO PARA PRUEBA ECADA:

El hormigón utilizado en las pruebas ECADA fue diseñado para tener una resistencia a la compresión de 35 MPa después de 24 horas con una temperatura media de 20 grados. El programa experimental de Straduravius requiere una resistencia a la compresión del hormigón de 35 MPa, ya que esta será la resistencia a la compresión en la transferencia en las vigas pretensadas de FRP probadas como parte de la investigación. Debido al corto período de fraguado, la mezcla de concreto de fraguado rápido permitió optimizar el tiempo de laboratorio y soportar un mayor número de ensayos. El diseño de la mezcla inicial del hormigón se muestra en la (Tabla 10).

ECADA		
Componente	Tipo de elemento	Cantidad
CEM I 52,5 R		420 Kg/m ³
Relación Agua-Cemento		0.38
Agregados	0/2 mm	300 Kg/m ³
	0/4 mm	600 Kg/m ³
	5/12 mm	870 Kg/m ³
Superplastificante		2%

Tabla 10.- Diseño de mezcla de Hormigón inicial para ECADA.

Además del hormigonado de la probeta en la prueba ECADA, se produjeron tres cilindros de hormigón por cada ensayo para probar la resistencia a la compresión en el momento de la liberación del pretensado.

4.4.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN:

El hormigón utilizado dentro del periodo de la campaña de experimentación fue elaborado in-situ, ocupando el material clasificado en la (Tabla 10). Cuidando siempre su correcta elaboración, pesado y mezclado.

Después de haber realizado el hormigonado a las probetas cilíndricas y de la probeta de ensayo ECADA, posterior a las 24 hrs, se desencofran los cilindros y se llevan para su pulido utilizando el equipo del laboratorio propio de la UPC (Ilustración 74) y estén en capacidad de ser puestos en el equipo de ensayo a la compresión.



Ilustración 73.- Equipo de pulido de cilindros de prueba UPC.
(Foto propia fecha 05/09/2022).

Finalmente se configurará el equipo MEH-3000 (Ilustración 75), mediante el software Win Test32, en el cual se ingresarán los parámetros de prueba, temperatura ambiente actual, detección de rotura al 20% y características del cilindro de prueba y resistencia de diseño (Ilustración 75 y 76).



Ilustración 74.- Equipo de prueba compresión test MEH-3000 UPC.
(Foto propia fecha 24/11/2021).

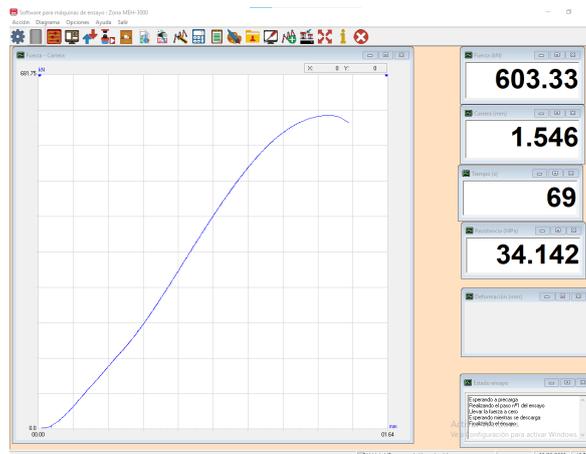


Ilustración 75.- Gráficos de ensayo mediante el software Win Test32, UPC.
(Captura generada 05/09/2022)

4.5. ENSAYO A FLEXIÓN Y CORTANTE CON BARRAS FRP

4.5.1. BASES DE ENSAYO:

El proyecto *Straduravius* tiene como objetivo principal el desarrollo de bases de diseño y construcción para elementos pretensados con una alta durabilidad y rendimiento, con armaduras activas y pasivas de polímeros reforzados con fibras (FRP), así como también el uso de fibras embebidas en el hormigón.

La campaña experimental contempla realizar dentro de una etapa del proyecto ensayos del comportamiento estático de elementos de hormigón pretensados con armadura pretesa de FRP y con armadura transversal pasiva de FRP (en algún caso). El objetivo es el ensayo a flexión o cortante de 22 vigas, siendo las variables de los ensayos: a) Tipo de ensayo: flexión o cortante; b) Material para la armadura activa: acero, fibra de carbono (Carbon fiber, CF), fibra de vidrio (Glass fiber, GF) o fibra de vidrio termoplástica (Thermoplastic Glass fiber, TGF);; c) Fuerza de pretensado: tres niveles (High/Alta 60% fpu; Low/Baja 40% fpu; Null/Nula 0% fpu); d) Cuantía de armadura transversal: sin armadura de cortante, con armadura transversal de GFRP separada 150 mm, y con armadura transversal de GFRP separada 250 mm.

4.5.2. NUMEROS DE ENSAYOS:

A continuación, se indica la nomenclatura de los ensayos a realizar, donde consta de manera ordenada la siguiente información: el tipo de ensayo (flexión o cortante), el material de la armadura de refuerzo activo, la fuerza de pretensado y por último si lleva o no armadura trasversal y en el caso de llevar cuál será su espaciamiento. Dicha información consta en la (Tabla 11).

Nomenclatura	Significado
B	Bending: ensayo a flexión
S	Shear: ensayo a constante
H,L,N	Fuerza de pretensado (H:alta; L:baja; N:nulo)
s	Steel: armaduras activas de acero
c	Carbon: armaduras activas de fibra de carbono
g	Glass: armaduras activas de fibra de vidrio
t	Thermoplastic: armaduras activas de fibra de vidrio termoplástica.
wo	Sin armadura transversal

Tabla 11.- Nomenclatura de ensayos, por tipo de ensayo.

En la (Tabla 12) se muestra la matriz de ensayos que consiste en 22 vigas (8 ensayos a flexión y 28 ensayos a cortante). Para los ensayos de cortante se realizarán dos ensayos para cada viga (1 ensayo en cada extremo, "a" o "b"). Estos ensayos se denominarán con la letra a y b, respectivamente. Por ejemplo, para la viga Schwo, habrá un ensayo Schwoa y otro ensayo Schwob.

Muestra	#	Tipo	Pretensado		Armadura	
			%	Tensión / Fuerza total A_p	Activa	Transversal
BsH	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	20%	377 MPa / 100 kN	Steel	Sin armadura
BcL	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	26%	637 MPa / 100 kN	CFRP	Sin armadura
BcN	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	0%	0 MPa	CFRP	Sin armadura

BgH*	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	60%	510 MPa / 132 kN	GFRP	Sin armadura
BgH	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	46%	388 MPa / 100 kN	GFRP	Sin armadura
BgL	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	40%	340 MPa / 88 kN	GFRP	Sin armadura
BgN	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	0%	0 MPa	GFRP	Sin armadura
BtL	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	40%	340 MPa / 88 kN	TP-GFRP	Sin armadura
BtN	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	0%	0 MPa	TP-GFRP	Sin armadura
SsHwo	1	2 ensayos a cortante	20%	377 MPa / 100 kN	Steel	Sin armadura
ScLwo	1	2 ensayos a cortante	26%	637 MPa / 100 kN	CFRP	Sin armadura
ScNwo	1	2 ensayos a cortante	0%	0 MPa	CFRP	Sin armadura
SgHwo	1	2 ensayos a cortante	46%	388 MPa / 100 kN	GFRP	Sin armadura
SgLwo	1	2 ensayos a cortante	40%	340 MPa / 88 kN	GFRP	Sin armadura
SgNwo	1	2 ensayos a cortante	0%	0 MPa	GFRP	Sin armadura

Tabla 12.- Numero de ensayos de vigas a Flexión o Cortante, campaña experimental UPC.

4.5.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS A FLEXIÓN:

Uno de los primeros pasos de esta campaña experimental fue el diseño y análisis de la geometría de las vigas que se utilizarían que tienen una sección en forma de doble "T", cabe mencionar que este proceso no estuvo dentro de este trabajo de tesis experimental.

A continuación, se muestra el croquis general del alzado y sección del diseño a utilizar (Ilustración 76).

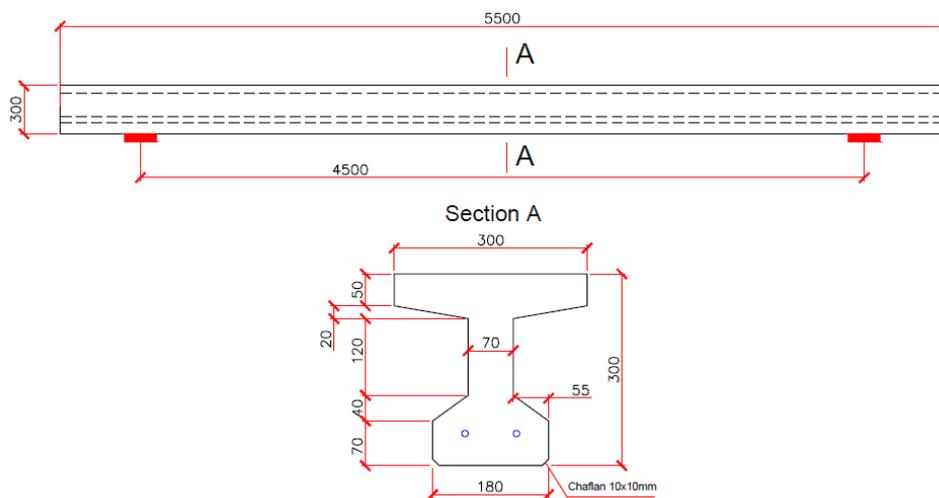


Ilustración 76.- Alzado y sección tipo de la viga a utilizar para los ensayos a flexión.

- Instrumentación de las barras FRP:

Dentro del periodo de la campaña de experimentación se realizó dentro de los laboratorios de la UPC la instrumentación de los 3 tipos de barras a utilizar. La instrumentación de las vigas dependerá del tipo de ensayo que se va a realizar, es decir que se va dividir en dos grupos: ensayos a flexión y ensayos a cortante.

Las galgas extensiométricas se colocarán a la distancia indicada para cada ensayo del tipo de viga, para esto se seguirán los siguientes pasos:

1.- Esmerilado de la barra: Se realizará a la distancia indicada con una maquina Dremmer pequeña en la cual se cuidará no tocar los surcos espirales y que sea un desbaste de la capa superior solo para eliminar el material de recubrimiento rugoso.



*Ilustración 77.- Preparación de las barras para su instrumentación.
(Foto propia fecha 22/12/2021).*

2.- Pegado de las galgas: Se colocará un solvente limpiador en el área esmerilada, se cuidará colocar la galga correspondiente a cada tipo de barra indicado en el apartado 4.6.5. este será pegado con un pegamento tipo CN-E Adhesivo, de deberá procurar que la galga quede lo más paralela centrada a la barra para poder obtener lecturas del desplazamiento último de las barras.



*Ilustración 78.- Pegado de galgas en barras GFRP para vigas de ensayo a flexión.
(Foto propia fecha 31/05/2022).*

3.- Protección para galga: Se colocará una protección de adhesivo para galga de tipo NP-50B el cual es de secado rápido de un minuto, este adhesivo se deberá preparar con una proporción de 10 g. de pasta por 4 gotas de solvente, esta será una mezcla viscosa que se cristalizara al secado y deberá proteger una parte de los cables de las galgas para evitar se arranquen en la manipulación, añadiendo también que cada galga será protegida adicionalmente con un tubo de PVC de no más de 5 cm de longitud y de diámetro interior ligeramente mayor que el diámetro exterior de las barras.

Esto para evitar el contacto entre las barras FRP y el hormigón en la zona fuera del área perteneciente a la longitud de adherencia, es importante impedir el deslizamiento de los tubos de PVC y la entrada de hormigón al interior, por lo que se colocaran burletes en los extremos de los tubos PVC, confiriendo así su impermeabilidad (Ilustración 79).



*Ilustración 79.- Protección de galgas en barras FRP con tubo PVC.
(Foto propia fecha 31/05/2022).*

- Distribución de instrumentación de ensayos a flexión.

Antes del hormigonado se instrumentaron las armaduras longitudinales activas utilizando 10 galgas por viga. Las galgas extensométricas se colocaron a una distancia “x” desde el inicio del borde izquierdo como se detalle en la siguiente manera:

- 1) Armadura 1. $x=0,05$ m, $x= 0,50$ m, $x= 1,0$ m, $x= 2,75$ m, $x= 4,50$ m
- 2) Armadura 2. $x= 1,0$ m, $x= 2,75$ m, $x= 4,50$ m, $x= 5,0$ m, $x= 5,45$ m

Adicionalmente se colocarán LVDTs en los bordes libres de las dos armaduras longitudinales activas, es decir se necesitará 4 LVDTs por viga. Esto para medir el desplazamiento relativo de las dos armaduras respecto del hormigón, la distribución se puede observar en la (Ilustración 80).

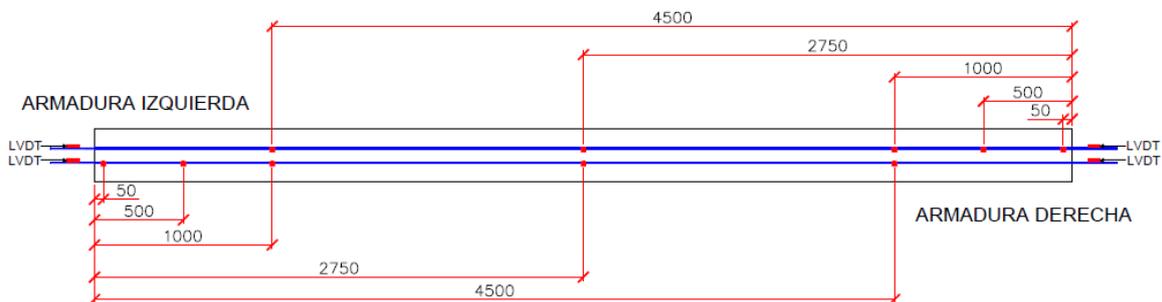


Ilustración 80.- Planta de la distribución de galgas a Flexión.

También se colocarán 2 galgas en la sección centro luz de las dos armaduras longitudinales superiores e inferiores que tenemos siempre en las vigas con y sin armadura transversal (Ilustración 81). Es decir, se necesitan 4 galgas extensométricas por viga en la armadura longitudinal pasiva.

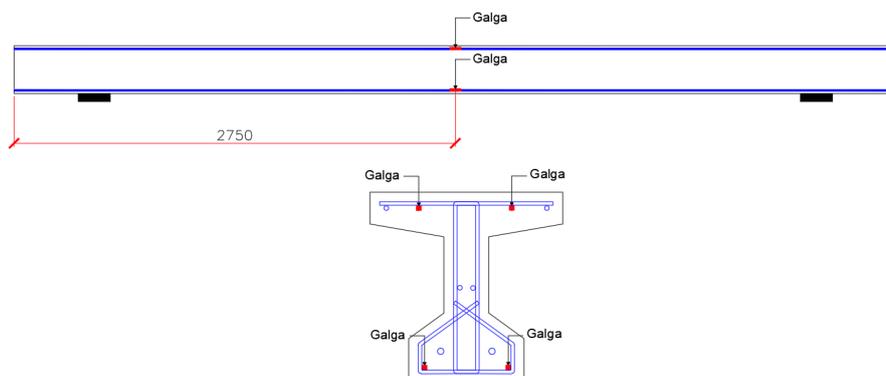


Ilustración 81.- Sección de vigas con instrumentación a flexión.

- **Hormigonado de las vigas.**

Para cada lote o amasada, la caracterización del hormigón se realizará en dos etapas: la primera consistirá en un grupo de mínimo 9 probetas cúbicas que se ensayaran a compresión de la siguiente manera:

- 3 probetas cúbicas ensayadas a compresión a 3 días del hormigonado.
- 3 probetas cúbicas ensayadas a compresión a 7 días del hormigonado.
- 3 probetas cúbicas ensayadas a compresión a 28 días del hormigonado.

La segunda fase consta de un grupo 18 probetas cilíndricas (15x30cm) que se ensayaran de la siguiente manera:

- 3 probetas cilíndricas ensayadas a compresión a 28 días del hormigonado.
- 3 probetas cilíndricas ensayadas a compresión el día del ensayo.
- 3 probetas cilíndricas ensayadas a tracción indirecta a 28 días del hormigonado.
- 3 probetas cilíndricas ensayadas a tracción indirecta el día del ensayo.
- 3 probetas cilíndricas para ensayos de módulo de elasticidad a 28 días del hormigonado.
- 3 probetas cilíndricas para ensayos de módulo de elasticidad el día del ensayo.

En total será necesario como mínimo obtener 27 probetas por amasada (es decir cada 2 vigas), 9 probetas cubicas que serán ensayadas a compresión y 18 probetas cilíndricas que serán ensayadas a compresión, tracción indirecta y para obtener el módulo de elasticidad.

- **Traslado de las vigas.**

Para el traslado de las vigas prefabricadas será necesario establecer un sistema para poder izar las vigas, de modo que se puedan fijar las eslingas del puente grúa. Este sistema de apoyo no deberá interferir en los demás elementos de la viga. Por lo que se ha decidido que dicho sistema se encuentre ubicado en la zona de apoyo de la viga (es decir a 500mm de los bordes de la viga).

Este sistema puede estar formado por un cable de alta resistencia embebido en el hormigón como máximo 200 mm, o puede estar formado por un perfil omega embebido la distancia suficiente para soportar el peso de la viga o similar.



*Ilustración 82.- Vigas transportadas y montadas en el Laboratorio de la UPC.
(Foto Galo Ortiz fecha 21/09/2022).*

4.6. EQUIPOS DE PRUEBAS

En este subcapítulo realizaremos una descripción e ilustraremos de forma esquemática el equipo de ensayo necesario en las diferentes fases de la campaña experimental que se realizó entre octubre de 2021 a septiembre de 2022, dentro del proyecto de investigación *Straduravius*, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España.

En estas pruebas mencionadas en primer punto se utilizará la máquina de pruebas para tracción con la que cuenta el laboratorio de tecnología de estructuras de la UPC, cede de la campaña de experimental.

La configuración para la prueba de tracción es simple. La máquina de ensayo consta de dos mordazas que anclan la barra. La máquina puede ser controlada por desplazamiento o carga y debe ser capaz de medir la fuerza aplicada.

Cada muestra será montada en la máquina de ensayo, cuidando que el eje longitudinal de la barra coincida con la línea que une las dos mordazas de la máquina de ensayo. Se debe verificar que la distancia libre entre las mordazas sea de 325mm (esto de acuerdo a lo especificado en el ACI 440.R3-04 y la máquina de ensayo a utilizar) antes de empezar el ensayo.

4.6.1. EQUIPO A LA TRACCIÓN (INSTRON 8803):

Los modelos de mesa de doble columna de la serie 6800 proporcionan una capacidad de hasta 50 kN disponible en opciones de altura/anchura estándar y extra. Cuentan con extensómetro de contacto automático de alta precisión que produce resultados confiables y repetibles sin pasos manuales (Ilustración 83)[18].



*Ilustración 83.- Equipo para pruebas de tracción marca "Instron 8803" UPC.
(Foto propia fecha 17/11/2021)*

4.6.2. LVDT:

El Transformador Diferencial Variable Lineal es un dispositivo de sensado de posición que provee un voltaje de salida de CA proporcional al desplazamiento de su núcleo que pasa a través de sus arrollamientos. Los LVDTs proveen una salida lineal para pequeños desplazamientos mientras el núcleo permanezca dentro del bobinado primario. La distancia exacta es función de la geometría del LVDT[19].

El LVDT responde al movimiento del núcleo a lo largo del eje del bobinado, pero es generalmente insensible al movimiento en el eje transversal del núcleo o a su posición radial. Por ello, un LVDT generalmente puede funcionar sin efectos adversos en aplicaciones que implican movimientos no alineados o flotantes, y en casos donde el núcleo no se mueve exactamente en línea recta.

Este equipo será utilizado para las pruebas de Pull out y ECADA, en las cuales nos permitirá medir las deformaciones del bastidor y penetraciones de las barras y cuñas (Ilustración 84).



*Ilustración 84.- LVDT utilizado para medir deformación del bastidor UPC.
(Foto propia fecha 01/12/2021).*

4.6.3. CELULA DE CARGA (CLP-NB):

La CLP-NB de origen japonés es una celda de carga de compresión de propósito general que tiene un elemento sensor de tensión en forma de columna. Hay disponible una variedad de capacidades que van desde 10 kN hasta 10 MN [20].

Este equipo será utilizado en las pruebas ECADA para medir las fuerzas de pretensado y las pérdidas obtenidas después del destesado, así como la fuerza de arrancamiento (Ilustración 85).



*Ilustración 85.- Cedula de carga utilizada UPC.
(Foto propia fecha 15/12/2021).*

4.6.4. GATOS HIDRÁULICOS “Enerpac RCH-206”:

Enerpac Cilindro de émbolo hueco RCH-206 es para uso en aplicaciones donde se requieren fuerzas de empuje y tracción es de cuerpo de acero con hornado en el acabado para resistencia a la corrosión y durabilidad, Cuenta con retorno por resorte de acción simple para mejorar la velocidad de retracción, hilos de cuello para sujetarlos fácilmente, viene con un acoplador hembra CR-400 de conexión rápida.

Este equipo será utilizado en las pruebas ECADA y se ocuparán 2 unidades una en el lado activo y otro en el lado pasivo de la prueba, servirán para ejercer las fuerzas de pretensado y las fuerzas de arrancamiento de las barras en el cilindro (Ilustración 86).



*Ilustración 86.- Gato hidráulico utilizado en las pruebas ECADA test, UPC.
(Foto propia fecha 15/12/2021).*

4.6.5. GALGAS EXTENSIOMETRICAS DE MEDICIÓN:

Estos calibradores están diseñados para medir las deformaciones por flexión y tracción por separado simplemente uniendo los calibradores en un lado de la barra. Estos son medidores de tensión de alambre que utilizan un respaldo de resina de poliéster. Se utilizan principalmente para la medición de deformaciones superficiales en barras dependiendo su material.

Este equipo será utilizado en las pruebas Tensile test y se instalaran para la campaña de elementos a flexión (Ilustración 87 y 88).

- Para barras GFRP: Modelo 2-3-5.
- Para barras CFRP: Modelo 5-3-5.
- Para barras TFRP: Modelo 2-3-3.



*Ilustración 87.- Galga 5-3-5 CFRP
(Foto propia fecha 31/05/2022).*



*Ilustración 88.- Galga 2-3-3 TFRP
(Foto propia fecha 31/05/2022).*

4.6.6. SISTEMA DE ANCLAJE:

Los diversos tipos de anclajes utilizados con los tendones FRP se pueden clasificar como abrazaderas, tapones y conos, fundas de resina, capas de resina, recubrimientos metálicos y anclajes de cuña dividida, y se muestran en la (Ilustración 89). De estos anclajes se describirá brevemente el que se utilizará para esta campaña de experimentación.

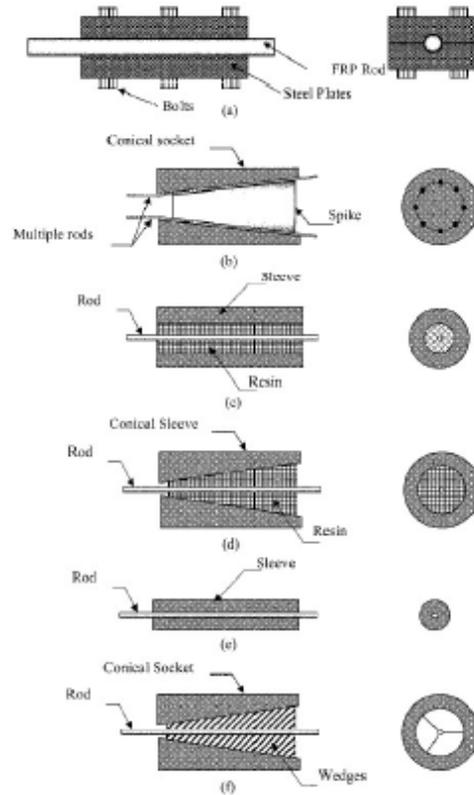


Ilustración 89.- Tipos de abrazaderas y anclajes para barras FRP.

Anclaje de cuña dividida: generalmente se prefieren los anclajes de cuña dividida debido a su compacidad, facilidad de ensamblaje, reutilización y confiabilidad. Este tipo de anclaje se puede subdividir en dos categorías: sistemas con contacto directo entre las cuñas de plástico o de acero y el tendón, y sistemas que usan una manga entre las cuñas y el tendón. Los anclajes de cuña se usan ampliamente en el anclaje de tendones de acero, pero deben modificarse para usarlos con tendones de FRP aumentando su longitud para reducir la tensión transversal en el tendón y controlando la rugosidad de la cuña para evitar que se formen muescas. El número de cuñas en el anclaje de cuña dividida varía de dos a seis cuñas insertadas en el barril. La razón principal para aumentar el número de cuñas es proporcionar una distribución de la tensión lateral más suave en la dirección radial del tendón. El mecanismo de sujeción se basa en la fricción y la fuerza de sujeción entre las cuñas, el barril y el tendón. El uso de una pequeña forma cónica en las cuñas es de gran importancia para proporcionar una tensión transversal suave y uniformemente distribuida.

Se desarrolló un anclaje metálico como parte del programa ISIS Canada program (Sayed-Ahmed & Shrive, 1998) y (Campbell, y otros, 2000) para tendones de CFRP Leadline™ de 8 mm. El anclaje consta de tres componentes: un barril de acero inoxidable con un receptáculo cónico; un juego de cuatro piezas que consisten en cuñas cónicas de acero inoxidable y una funda fina y suave de metal que se coloca entre las cuñas y el tendón. La característica distintiva del anclaje es que el ángulo de inclinación de la cuña es 0,1 grados mayor que el de la superficie interna del barril. La diferencia de ángulo entre el barril y las cuñas ayuda a producir una distribución de tensión radial más deseable en el tendón y asegura que la falla del tendón se produzca fuera del anclaje. (Al-Mayah, Soudki, & Plumtree, 2001) han informado sobre una investigación experimental y analítica de este anclaje. Se han desarrollado y probado versiones no metálicas de este anclaje, en el que los elementos están hechos de hormigón de ultra alta resistencia (UHPC), donde el barril está envuelto con lámina de CFRP (sheet) (Reda Taha & Shrive, New Concrete Anchors for Carbon Fiber-Reinforced Post-Tensioned Tendons—Part 1: State-of-the-Art Review/Design, 2003) (Reda Taha & Shrive, New Concrete Anchors for Carbon Fiber-Reinforced Post Tensioned Tendons—Part 2: State-of-the-Art Review/Design, 2003), o de hormigón en polvo reactivo reforzado con fibra de carbono (Shaheen, 2004), respectivamente[8].

5. ANALISIS DE RESULTADOS DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

En este capítulo de la campaña experimental, se describirá cuáles fueron los imprevistos que se presentaron durante el periodo que duro esta.

Para que este trabajo de tesis cumpla con el objetivo se deberán realizar los ensayos, y como algo fundamental es importante plasmar los casos e imprevistos que se puedan presentar durante el transcurso de estos y así poder aprovechar mejor los tiempos de ejecución en futuras campañas experimentales.

Los experimentos realizados incluyeron pruebas de tracción para la caracterización de los 3 tipos de barras FRP, pruebas de extracción para mediciones de propiedades de adherencia y pruebas ECADA para la determinación de la longitud de transferencia y desarrollo en elementos pretensados de FRP. Los siguientes subcapítulos describen cuales fueron los problemas que se presentaron en cada prueba a detalle.

5.1. ENSAYO DE TRACCIÓN DE LAS ARMADURAS (TENSILE TEST)

Los resultados de la caracterización del material se pueden observar en la gráfica de tensión-deformación (Tabla 13) donde se muestran los datos de las barras FRP obtenidos en comparación con las barras de acero tradicional ensayadas.

Las muestras de acero muestran el comportamiento típico de un material dúctil. Alcanzan una plataforma de rendimiento a un valor de 520 MPa. Los especímenes de FRP fallaron de manera frágil cuando alcanzaron su resistencia a tracción. Hasta ese punto tienen un comportamiento material elástico-lineal. Se puede observar que las barras de GFRP y TGFRP alcanzan una resistencia a la tracción similar a las barras de acero con valores que van desde 664 a 839 MPa, donde las barras de CFRP tienen una resistencia a la tracción notablemente mayor de 1'668 MPa. El módulo de elasticidad de las barras de CFRP se encuentra entre el acero y las barras de GFRP y TGFRP [26].

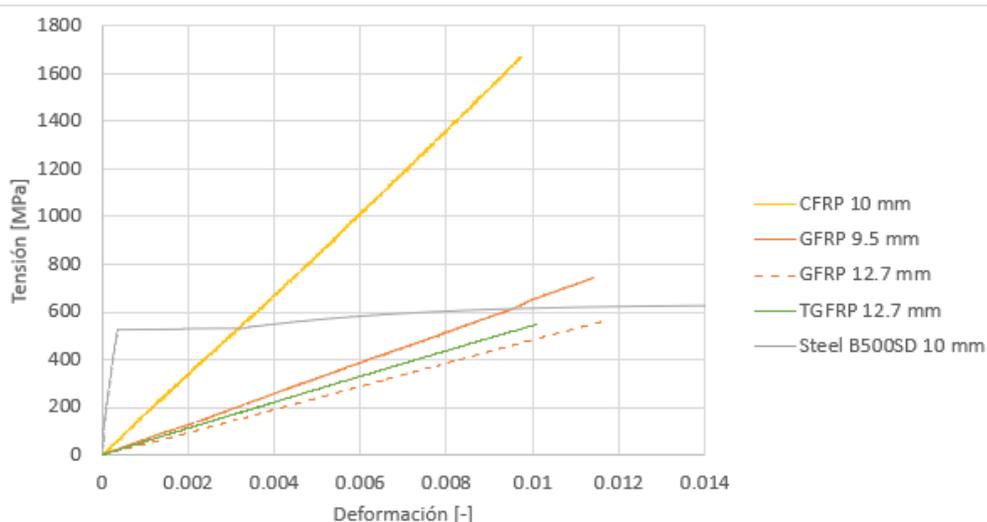


Tabla 13.- Comparativa general Tensión-Deformación de las diferentes barras.

Los valores de las características del material fueron calculados a partir de los datos experimentales. Según el código ACI 440.4R-04[10].

5.1.1. CARACTERISTICAS DE FALLOS EN BARRAS FRP:

Además de la (Tabla 13) la siguiente (Tabla 14) ofrece la posibilidad de comparar numéricamente los valores experimentales con los valores proporcionados por las hojas de datos proporcionadas por Sireg Geotech srl.

La (Tabla 12) muestra los datos medidos frente a los valores proporcionados en las hojas de datos técnicos. Los gráficos de valores de la literatura muestran el curso hasta una resistencia a la tracción del 60 % f_u y la cruz simboliza la máxima resistencia a la tracción (Kathrina Vangen 2022)[26].

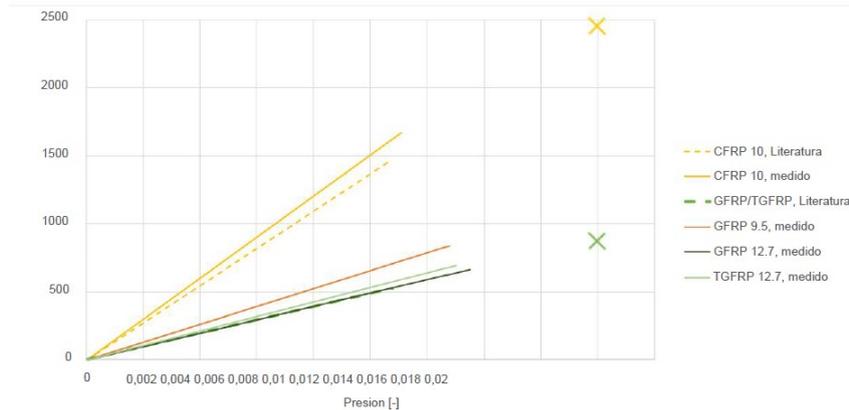


Tabla 14.- Comparativo de los valores medios frente a la literatura de barras FRP. (Resultado tesis Kathrina Vangen 2022).

Debe observarse que el módulo de elasticidad medido es superior a los valores de la hoja de datos técnicos y que todas las resistencias máximas a la tracción medidas se encuentran por encima de la marca del 60 %, que es el valor de diseño actual recomendado por los códigos.

De acuerdo con el código ACI 440.4R-04, los valores de las características del material deben ser el promedio de cinco especímenes para que sean representativos. Dos tipos de complicaciones llevaron al rechazo de los datos obtenidos.

5.1.2. Fallo por anclaje:

La primera complicación que se presentó se debió al fallo del anclaje. De acuerdo al código ACI 440.4R 04, estos resultados deben ser descartados. Tres de las muestras de CFRP fallaron de esa manera. Como muestra la (Ilustración 90), la barra de CFRP deslizó del tubo de acero de anclaje.



Ilustración 90.- Fallo de anclaje de barra CFRP. (Foto tomada por Kathrina Vangen 29/11/2021).

La presión de sujeción original de 40 bar se ajustó para garantizar un fallo dentro de la muestra y no en el tubo de anclaje.

La (Tabla 15) muestra las presiones de agarre ajustadas y el tipo de falla correspondiente.

Muestra	Presión de sujeción	Tipo de fallo
CFRP 10.1	40 bares	Fallo de anclaje
CFRP 10.2	60 bares	Fallo de anclaje
CFRP 10.3	70 bares	Fallo por tracción
CFRP 10.4	70 bares	Fallo de anclaje
CFRP 10.5	80 bares	Fallo por tracción

Tabla 15.- Presión de sujeción de ensayos en barra CFRP.

5.1.3. Fallo por salto de la curva Tensión-Deformación:

La segunda complicación se puede ver en los diagramas de tensión-deformación. La (Tabla 16) muestra a modo de ejemplo un salto en la curva de tensión-deformación de las lecturas del extensómetro del espécimen GFRP (Resultado Kathrina Vengen 2022)[26]. Este salto se debe a la falla de una sola fibra dentro de la sección de medición. Las deformaciones de dos probetas por tipo de barra se midieron adicionalmente mediante galgas extensométricas. Los especímenes con dos dispositivos de medición solo mostraron un salto en la tensión de un conjunto de datos. Por lo tanto, los datos de muestras con dos dispositivos de medición no deben descartarse. Sin embargo, los datos de los especímenes medidos únicamente por el extensómetro tuvieron que ser descartados, ya que no se puede descartar una falla en la prueba.

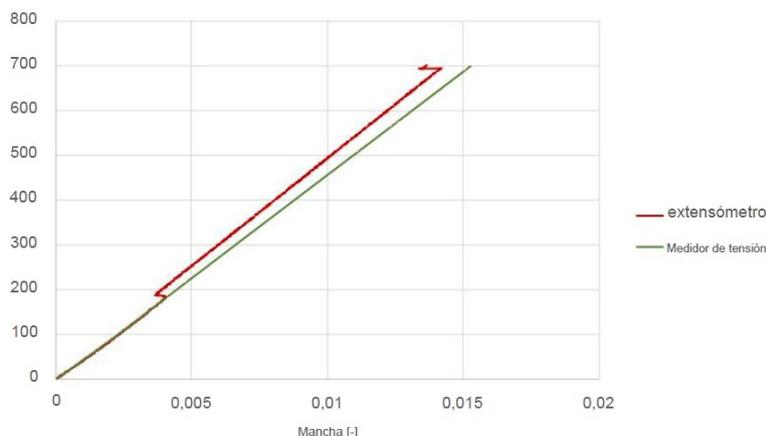


Tabla 16.- Grafico de salto Tensión-Deformación en barra GFRP.

Las probetas con galgas extensométricas permitieron comparar las medidas obtenidas con extensómetros y galgas extensométricas (Tabla 17).

Specimen	80 % f_u [MPa]	Extensometer [microstrain]	Strain Gauge [microstrain]	Extensometer vs. Strain Gauge
CFRP10.5	1'480	8.64	9.09	+ 5 %
GFRP10.5	768	11.61	12.44	+ 7 %
GFRP13.4	526	10.91	10.98	+ 1 %
TGFRP13.5	527	10.33	9.04	- 12 %

Tabla 17.- Comparativa de medidas con extensómetro y galgas extensométricas.

Las desviaciones y saltos presentados en las deformaciones medidas entre el extensómetro y la galga extensométrica en la barra TGFRP se puede explicar por su tipo de acabado y geometría

de diseño en los surcos espirales que están destinados para que funcione la adherencia de la barra al hormigón, en este caso la galga extensiométrica debe colocarse en la parte lisa de la superficie. La longitud de referencia del extensómetro incluye múltiples espirales y la medición es un valor promedio sobre toda la longitud de referencia. Las mediciones del extensómetro, por lo tanto, representan la realidad con mayor precisión. Las medidas de la galga extensiométrica solo representan una pequeña parte de la barra. La inexactitud de las mediciones de la galga extensiométrica se ve incrementada adicionalmente por el hecho de que debe estar perfectamente alineado con el eje longitudinal para obtener resultados exactos. Por lo tanto, este medio de medición es más propenso a errores humanos.

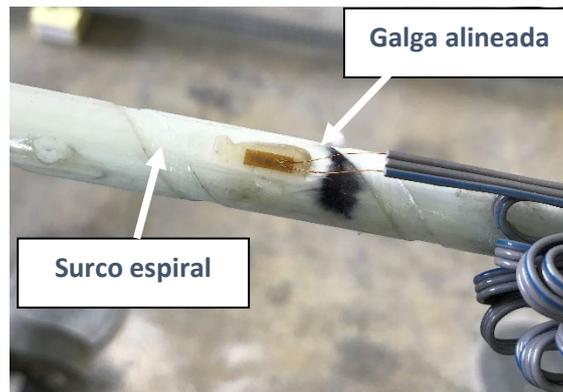


Ilustración 91.- Detalle de barra TGFRP, falla de ensayo por geometría de diseño. (Foto propia fecha 29/11/2021).

Al finalizar esta etapa en la campaña experimental, podemos observar que la geometría, sus surcos espirales y el diseño de cómo están conformadas cada tipo de barra, fallan con características especiales cada una como se muestra en la (Ilustración 91).



Ilustración 92.- Barras FRP después de los Ensayos Test and test. (Foto propia fecha 29/11/2021).

5.2. PRUEBA PULL OUT

El esfuerzo de adherencia medio se calcula según el código ACI 440.4R-04. El esfuerzo de adherencia se grafica luego contra el deslizamiento de la barra en el extremo libre. La (Tabla 18) muestra la barra de CFRP de 10 mm y GFRP de 12,7 mm en comparación con la barra convencional de acero. El valor de adherencia máximo para ambas barras es significativamente más bajo que para el acero. Sin embargo, la tensión de adherencia de las barras de FRP no disminuye después de alcanzar el valor máximo. La tensión de unión permanece más o menos constante para deslizamientos más grandes.

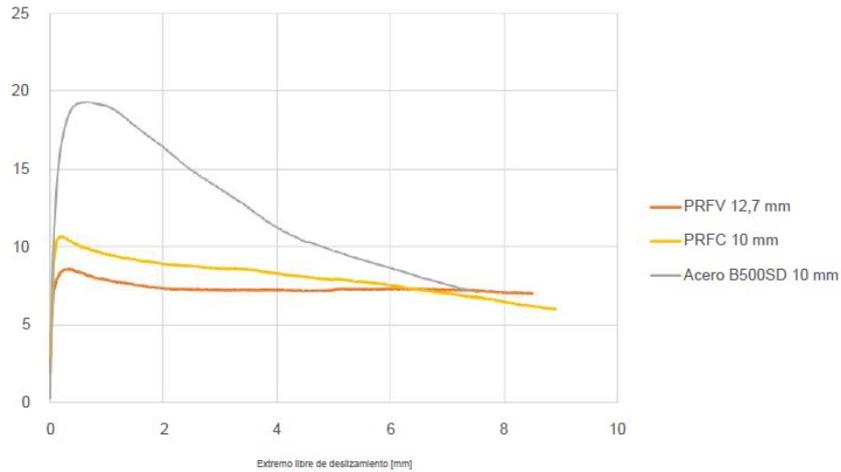


Tabla 18.- Gráfico de adherencia de las barras CFRP, GFRP y barra de acero convencional.

5.2.1. Fallo de adherencia en barra TGFRP:

Las barras TGFRP de 12,7 mm no se incluyen en la figura anterior, ya que se observaron pequeños arranques en las hendiduras en espiral. La tensión de unión en la barra de TGFRP investigada no se acumula gradualmente a lo largo de la longitud de unión, sino que se concentra en los sunchos de las espirales dentadas. En la (Ilustración 93) se puede observar claramente la falla de la adherencia de la barra TGFRP al hormigón.



Ilustración 93.- Fallo de adherencia en barra TGFRP. (Foto propia fecha 24/11/2021).

Cuando el deslizamiento en relación con la superficie de hormigón se traza a lo largo del tiempo, como en la (Tabla 19), se pueden visualizar los saltos por las extracciones repentinas. Además, se puede ver que los surcos en espiral absorben la tensión de unión y la barra falla en estos picos de tensión.

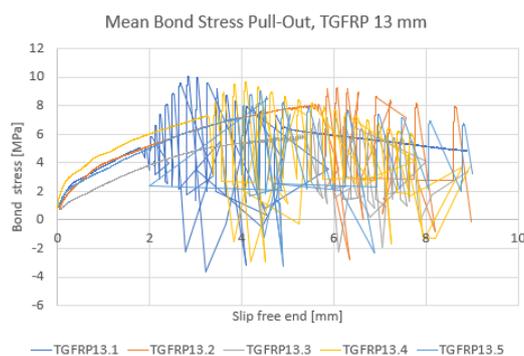


Tabla 19.- Gráfico de arrancamiento en barras TGFRP.

El código ACI 440.4R-04 requiere la comparación de las tensiones de adherencia a valores dados de deslizamiento. La (Tabla 20) se muestra las tensiones de adherencia determinadas experimentalmente. La barra TGFRP muestra valores más bajos en comparación con los otros dos tipos de barras. Los valores obtenidos también pueden respaldar la formación de picos de tensión elevados, ya que la barra TGFRP alcanza F_{max} con un deslizamiento muy pequeño.

tipo de barra	Tensión de enlace media [MPa]			$F_{m\acute{a}x}$
	0,05 mm	0,10 mm	0,25 mm	
	deslizar	deslizar	deslizar	
PRFC 10 mm	8.182	10.150	10.593	10.776
PRFV 12,7 mm	6.769	7.713	8.519	8.639
TGFRP 12,7 mm	1.066	1.429	2.122	8.988
Aceros B500SD 10 mm 9.224		13.136	17.559	19.686

Tabla 20.- Valores promedio de la tensión de adherencia en barra TGFRP.

5.3. PRUEBA ECADA

En la campaña experimental de la prueba ECADA test se planeó originalmente para incluir los tres tipos de barras investigadas, realizando 5 pruebas como mínimo de cada tipo de barra. Los ensayos de las barras de CFRP y TGFRP se tuvieron que realizar en un momento posterior, ya que se observaron fallos de anclaje descritos en los ensayos anteriores de caracterización de los materiales, en cuanto a las barras GFRP se consideraron que cumplían con todas las características necesarias para iniciar este proceso de ensayo.

A continuación, se describirá de manera cronológica la campaña experimental realizada.

5.3.1. Fallo de anclaje en barra CFRP:

La primera prueba se realizó el día 17 de enero de 2022, por lo anterior descrito se tuvo que modificar la planeación de las pruebas quedando finalmente como se mostró en la (Tabla 7). Primero se realizó una prueba general con una barra CFRP, para observar el comportamiento del anclaje con la cuña suministrada por la compañía Sireg Geotech srl. Las barras de CFRP fallaron de manera frágil al comienzo del dispositivo de anclaje (Ilustración 94). La barra falló con una carga de pretensado de 59 kN, que corresponde al 31 % de su carga máxima de 192 kN de la fuerza de pretensado. Se considera que las cuñas ejercen demasiada presión lateral sobre la barra, lo que conduce a esta gran reducción de la resistencia a la tracción.

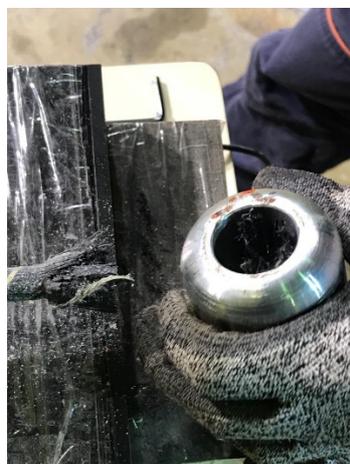


Ilustración 94.- 1er ensayo ECADA en barra CFRP, Fallo de anclaje corte por presión transversal. (Foto propia fecha 17/01/2022).

5.3.2. Ensayos en barra GFRP:

Al presentarse esta falla en la zona del anclaje de las barras CFRP, se procedió a realizar las 5 pruebas programadas a las barras GFRP, las cuales como anteriormente se comentó, sus parámetros de caracterización eran aceptable para continuar con la campaña experimental con fechas: 21, 25, 26, 27 y 31 de enero de 2022.

El ensayo ECADA se realizó en cinco probetas pretensadas con barras de GFRP Glasspree® de 12,7 mm. Como la determinación de la longitud de transferencia y desarrollo es un proceso iterativo, la longitud de unión de la muestra resultante se determina a partir de los resultados de la prueba anterior. Las diferentes longitudes de adherencia se pueden observar en la (Tabla 21).

Longitud de Adherencia en Barra GFRP					
	GFRP 13.1	GFRP 13.2	GFRP 13.3	GFRP 13.4	GFRP 13.5
Longitud Adherida (mm)	300	100	200	150	120

Tabla 21.- Longitud de Adherencia en Barras GFRP ensayo ECADA UPC.

Se realizó una segunda campaña experimental para verificar datos estos resultados corresponderán a otro trabajo de investigación el resumen de los resultados. Por lo que en la (Tabla 22) se observa que en total se realizaron 14 ensayos.

Campaña experimental Barra GFRP						
Material	Diámetro (mm)	Tipo de prueba	Nivel de pretensado	1er Campaña	2a Campaña	# Ensayos
GFRP	12.7	ECADA	1e campaña 40%	21/01/2022	25/04/2022	1
				25/01/2022	26/04/2022	2
				26/01/2022	28/04/2022	3
			2a campaña 45%	27/01/2022	09/05/2022	4
				31/01/2022	12/05/2022	5
					16/05/2022	6
					17/05/2022	7
					22/06/2022	8
					11/07/2022	9

Tabla 22.- Resumen de ensayos ECADA realizados a barras GFRP.

5.4. ENSAYO PARA FUNCIONAMIENTO DE ANCLAJE CON BARRAS FRP:

Al presentarse los fallos antes descritos en el sistema de anclaje de la barra CFRP y TGFRP, se procedió a hacer una adaptación del bastidor para realizar diferentes números de ensayos y así obtener la capacidad de carga de las cuñas y la forma en la que se debían utilizar.

Campaña experimental de anclaje Barras FRP					
Material	Diámetro (mm)	Tipo de prueba	No de campaña	1er Campaña	# Ensayos
CFRP	10	Anclaje	1a	17/01/2022	1
GFRP	12.7	Anclaje	2ª	20/01/2022	2
TGFRP	12.7	Anclaje	2ª	03/02/2022	3
TGFRP	12.7	Anclaje	2ª	11/02/2022	4
CFRP	10	Anclaje	2ª	14/02/2022	5
CFRP	10	Anclaje	2ª	15/02/2022	6

CFRP	10	Anclaje	2ª	15/02/2022	7
CFRP	10	Anclaje	3ª	21/04/2022	8

Tabla 23.- Campaña experimental de verificación de anclajes en barras FRP.

Estos ensayos se realizaron con las fechas marcadas en la (Tabla 23) los que nos llevó un total de 3 meses de detención y atraso en la campaña experimental, y continuación, se describirá el procedimiento del ensayo para la verificación de anclaje:

- Preparación de Bastidor:

Derivado a que se presentaron algunas anomalías se tuvo que hacer adecuaciones al bastidor y a todo el sistema ECADA que estaba instalado, ya que para evitar desperdicio de material se realizó la instalación del marco pasivo en la zona del lado activo como se muestra en la (Ilustración 88).



Ilustración 95.- Sistema de ensayo para verificación de anclaje de barras FRP.
(Foto propia fecha 20/01/2022)

- Procedimiento de Ensayo:

Consistió en el pretensado de las barras FRP mediante un sistema de presión con un gato hidráulico de 200kN. La barra utilizada tenía una longitud total de 1835,5 mm, y una longitud entre anclajes de 1635 mm.

El anclaje utilizado será un sistema de cuñas plásticas que están en contacto con la barra FRP y se introducirá en un barril tipo cilindro metálico.

La carga final de pretensado dependerá de cada tipo de barra de la carga final garantizada por el fabricante Sireg Geotech srl. Una vez verificado el funcionamiento del anclaje, se determinará la carga máxima que soporta el mismo.

5.4.1. Ensayos de anclajes en barra GFRP:

Se realizó un ensayo con carga final de pretensado de 43 kN que equivale al 40% de la carga final garantizada por el fabricante.

Para este ensayo se intentó medir la penetración de la barra en la cuña plástica, la penetración de la cuña plástica al barril metálico, la elongación de la barra y la carga tanto en la zona activa como pasiva (Ilustración 97 y 98) y (Tabla 24).



Ilustración 97.- Anclaje en el lado activo de barra GFRP.
(Foto de fecha 20/01/2022)

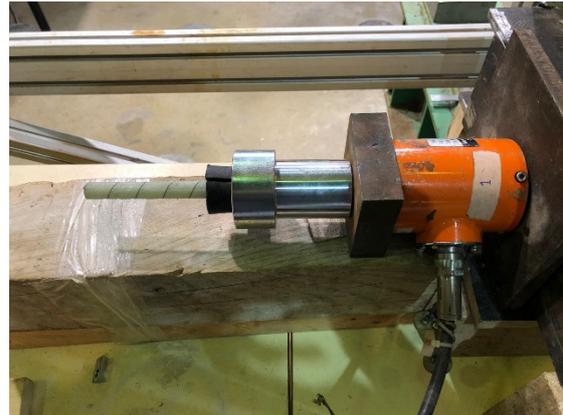


Ilustración 96.- Anclaje en el lado pasivo de barra GFRP.
(Foto de fecha 20/01/2022)

Etapa	Lado	Penetración de Cuña plástica en casquillo metálico (cm)	Penetración de barra en cuña plástica (cm)
Pre-ensayo	Activo	2.2	0
	Pasivo	2.1	0
Pos-ensayo	Activo	1.2	0.05
	Pasivo	1.1	0.05
Etapa	Distancia entre anclajes (cm)		Elongación %
Pre-ensayo	163.5		0
Pos-ensayo	164.2		0.42

Tabla 24.- Resultados de penetración de cuña en ensayo de anclaje barra GFRP.

5.4.2. Resultados de anclajes en barra GFRP:

El anclaje funcionó correctamente al cargar la barra hasta el 40% de su capacidad máxima. Y la carga máxima alcanzada antes del fallo del anclaje fue de 85.65 kN, es decir, un 199% más de la carga de diseño inicial y un 89% de la capacidad máxima a tensión que el catálogo del fabricante Sireg Geotech srl determina.



Ilustración 99.- Anclaje al fallo en el lado activo de barra GFRP. (Foto de fecha 20/01/2022)



Ilustración 98.- Anclaje al fallo en el lado pasivo de barra GFRP. (Foto de fecha 20/01/2022)

5.4.3. Ensayos de anclajes en barra TGFRP:

Se realizaron 2 ensayos en barras TGFRP con una carga final de pretensado será de 43 kN que equivale al 40% de la carga final garantizada por el fabricante.

- 1er Ensayo en barra TGFRP:

Debido a la falla temprana en el primer ensayo de los anclajes no se tomaron datos. El anclaje no funcionó correctamente, esto debido al deslizamiento de la barra. (Ilustración 101 y 102).



Ilustración 101.- Anclaje en el lado activo de barra TGFRP. (Foto de fecha 03/02/2022)



Ilustración 100.- Anclaje en el lado pasivo de barra TGFRP. (Foto de fecha 03/02/2022)

- 2do Ensayo en barra TGFRP:

Para este ensayo de fecha 11 de febrero de 2022, se tomó la decisión de mejorar la adherencia de la cuña plástica mediante las siguientes opciones.

1.- Pegado con X60: Se realizó una prueba donde la cuña solo se utilizó pegamento de endurecimiento rápido X60 (Ilustración 102), donde se dejó reposar por 1 hora para después aplicar el pretensado en la barra alcanzando una ligera mejoría resultando una carga de 46 kN que equivale al 42.8% de la carga final garantizada por el fabricante Sireg Geotech srl.



Ilustración 102.- Ensayo para verificación de anclaje con pegamento X60 en barra TGFRP. (Foto propia fecha 11/02/2022)

2.- Anclaje de cuña con surcos: Se realizó una prueba donde la cuña se le realizaron unos surcos de forma diagonal estando al sentido contrario de la fuerza para mejorar su adherencia a la barra (Ilustración 104 y 105), así también a la barra se le realizó un desbaste con surcos para que en conjunto mejorara la fuerza de anclaje y fue pegada con X60, donde se dejó reposar por 1 hora, resultando una carga de 74 kN que equivale al 68.3% de la carga final garantizada por el fabricante Sireg Geotech srl.



Ilustración 104.- Cuña plástica con surcos y pegada con X60 para barra TGFRP. (Foto de fecha 11/02/2022)



Ilustración 103.- Surcos en barra TGFRP y pegamento X60. (Foto de fecha 11/02/2022)

3.- Anclaje de cuña con surcos y periodo de relajación: Se realizó una prueba donde la cuña se le realizaron unos surcos de forma diagonal estando al sentido contrario de la fuerza para mejorar su adherencia a la barra (Ilustración 106 y 107), así también a la barra se le realizó un desbaste con surcos para que en conjunto mejorara la fuerza de anclaje y fue pegada con X60 donde se dejó reposar por 1 hora.

Realizado este paso se experimentó haciendo un tesado el cual alcanzó una carga de 63 kN que equivale al 58.6% de la carga final, para después destensar la barra, relajarla e inmediatamente llevara al límite de rotura donde alcanzó una carga de 60 kN que equivale al 55% de la carga final garantizada por el fabricante Sireg Geotech srl.



Ilustración 105.- Tesado de Cuña plástica con surcos y pegada con X60 con relajación para barra TGFRP. (Foto de fecha 11/02/2022)



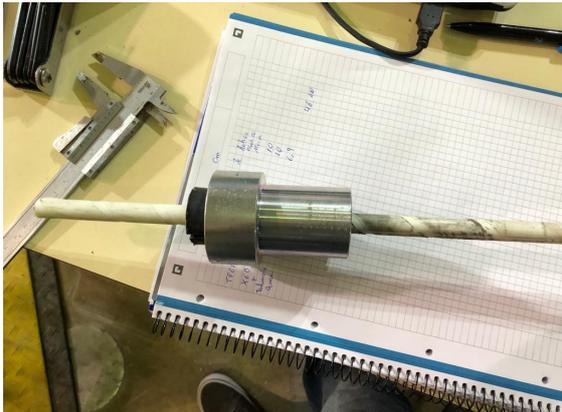
Ilustración 106.- Prueba de anclaje con relajación hasta rotura de barra TGFRP. (Foto de fecha 11/02/2022)

5.4.4. Resultados de anclajes en barra TGFRP:

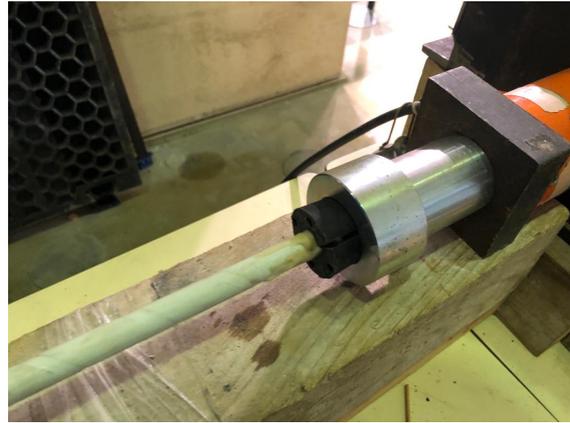
Los resultados obtenidos fueron de varias pruebas realizadas, las cuales tuvieron una importante aleatoriedad de resultados, no teniendo una constante de funcionamiento, siendo los métodos presentados en este trabajo de experimentación las alternativas válidas para laboratorio y que al final no son viables para ejecutar en procesos de la vida real.

El primer anclaje con la cuña original no funcionó correctamente, esto debido a la geometría de la misma barra y su acabado al deslizamiento de la barra. La carga máxima alcanzada antes del fallo del anclaje fue de 12.9 kN, es decir, un 70% menos de la carga de diseño inicial y un 13.4% de la capacidad máxima a tensión que el catálogo determina, después de haber realizado la campaña de experimentación y la prueba de diferentes formas de instalar la cuña se decidió por el sistema de surcos en la cuña y barra, pegándolo con X60 y dejándolo reposar durante 24 horas. Con estas acciones poco ortodoxas se alcanzó la capacidad de carga al 45% de la carga de prueba que

requiere programa experimental de Straduravius.



*Ilustración 107.- Cuña al fallo colocación normal TGFRP.
(Foto de fecha 03/02/2022)*

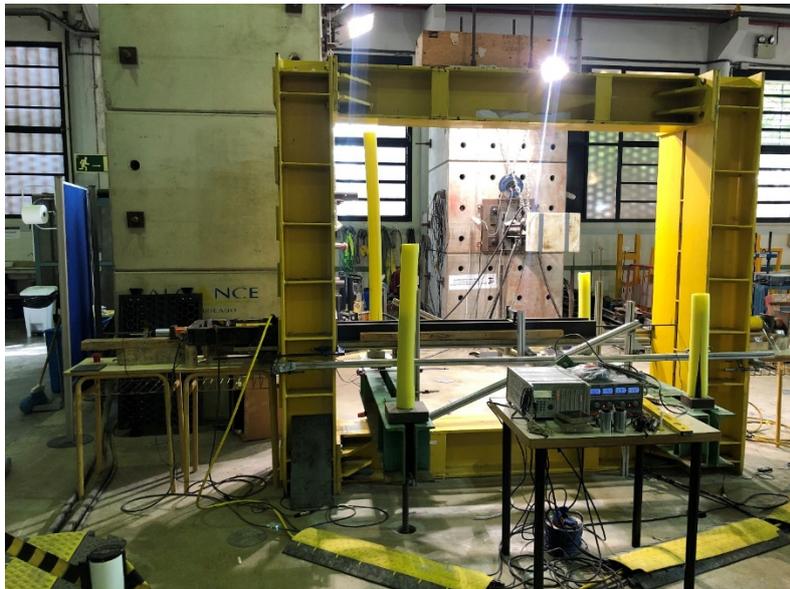


*Ilustración 108.- Anclaje seleccionado con surcos y
pegamento X60 a 24 horas de barra TGFRP.
(Foto de fecha 11/02/2022)*

5.4.5. Ensayos de anclajes en barra CFRP:

Como se comentó en el apartado 5.3.1. Fallo de anclaje de barra CFRP, se realizó una primera prueba en esta campaña de experimentación de ECADA, en la cual se experimentó con el tipo de anclaje con el que se disponía suministrado por la compañía Sireg Geotech srl. Que es un sistema de cuñas plásticas que estarían en contacto con la barra de CFRP y se introducirá en un cilindro metálico y que con ella se realizó el pretensado de una barra de CFRP (diámetro 10mm) mediante un sistema de presión con un gato hidráulico de 200kN.

La carga final de pretensado fue de 115 kN que equivale al 60% de la carga final garantizada por el fabricante y la barra utilizada tenía una longitud total de 4.9 metros, y una longitud entre anclajes de 4.19 metros.



*Ilustración 109.- 1er Ensayo de anclaje en barra CFRP en barra de 4.9 mts de longitud.
(Foto propia fecha 17/01/2022)*

Para este ensayo se intentó medir la penetración de la barra en la cuña plástica, la penetración de la cuña plástica al barril metálico, la elongación de la barra y la carga tanto en la zona activa como pasiva, pero debido a una falla explosiva del sistema no se pudo medir todos estos parámetros (Tabla 25 y 26).

A continuación, mostramos como se adaptó el sistema mostrado en la (Ilustración 110), con un tubo metálico de cobre y un tubo metálico de aluminio los dos seccionados en dos partes.



Ilustración 112.- Abrazadera metálica de cobre para barra CFRP. (Foto de fecha 14/02/2022)



Ilustración 111.- Abrazadera metálica de aluminio para barra CFRP. (Foto de fecha 15/02/2022)

Para estos ensayos se intentó medir la penetración de la barra en la cuña plástica, la penetración de la cuña plástica al barril metálico, la carga máxima y el tipo de falla.

Y se realizaron de la siguiente manera:

- **1er ensayo con abrazadera de cobre en anclajes de barra CFRP:**
TEST_01 – CFRP_PHI 10MM_ANCLAJE 13MM_ABRAZADERA DE COBRE

Carga Máxima: 55Kn (28.6% Capacidad máxima).

Tipo de falla: Deslizamiento de la barra en la zona pasiva.

Etapa	Zona	Distancia entre Cuña plástica y Barril metálico (cm)	Distancia entre extremo de la barra y cuña plástica (cm)
Pre-Ensayo	Activa	1.4	10
	Pasiva	1.3	10
Post-Ensayo	Activa	0.4	7.3
	Pasiva	0.6	<0

Tabla 27.- Penetración de las cuñas 1er ensayo con abrazadera de cobre en barra CFRP.

De acuerdo a la (Tabla 27), existió una penetración de 1.0 cm de la cuña plástica en el barril metálico en el lado activo de la prueba, y una penetración de 0.7 cm en la zona pasiva. Por otra parte, la barra deslizo 2.7 cm en la zona activa con respecto a la cuña plástica, y en la zona pasiva no se pudo medir ya que la barra penetro por completo en la cuña plástica. Esto se puede apreciar en las siguientes (Ilustración 114 y 115).

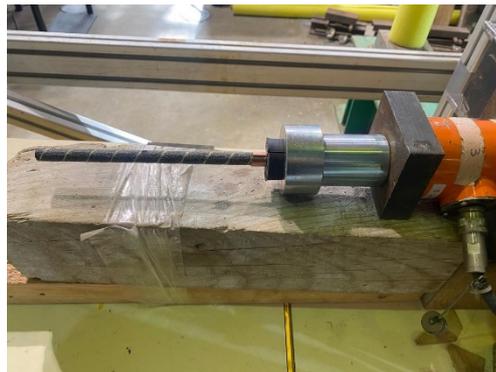


Ilustración 113.- Penetración lado activo para barra CFRP (cobre). (Foto de fecha 14/02/2022)

Ilustración 114.- Penetración lado pasivo para barra CFRP (cobre). (Foto de fecha 14/02/2022)

- **2do ensayo con abrazadera de cobre en anclajes de barra CFRP:**
TEST 02 – CFRP_PHI 10MM_ANCLAJE 13MM_ ABRAZAREDA DE COBRE

Carga Máxima: 42Kn (21.8% Capacidad máxima)

Tipo de falla: Deslizamiento de la abrazadera de cobre.

Etapa	Zona	Distancia entre Cuña plástica y Barril metálico (cm)	Distancia entre extremo de la barra y cuña plástica (cm)
Pre-Ensayo	Activa	1.3	10
	Pasiva	1.3	10
Post-Ensayo	Activa	0.1-0.8	7.9
	Pasiva	0.7	9.5

Tabla 28.- Penetración de las cuñas 2do ensayo con abrazadera de cobre en barra CFRP.

De acuerdo a la (Tabla 28), existió una penetración entre 1.2 y 0.5 cm de la cuña plástica en el barril metálico en el lado activo de la prueba, y una penetración de 0.6 cm en la zona pasiva. Por otra parte, la barra deslizo 2.1 cm en la zona activa con respecto a la cuña plástica, y en la zona pasiva 0.5 cm con respecto a la cuña plástica. Esto se puede apreciar en las siguientes (Ilustración 116 y 117).



Ilustración 115.- Penetración 2do ensayo lado activo para barra CFRP (cobre). (Foto de fecha 14/02/2022)



Ilustración 116.- Penetración 2do ensayo lado pasivo para barra CFRP (cobre). (Foto de fecha 14/02/2022)

- **3er ensayo con abrazadera de aluminio en anclajes de barra CFRP:**
TEST 02 – CFRP_PHI 10MM_ANCLAJE 13MM_ ABRAZAREDA DE ALUMINIO

Carga Máxima: 46Kn (23.9% Capacidad máxima)

Tipo de falla: Deslizamiento de la abrazadera de aluminio y barra.

Etapa	Zona	Distancia entre Cuña plástica y Barril metálico (cm)	Distancia entre extremo de la barra y cuña plástica (cm)
Pre-Ensayo	Activa	1.8	10
	Pasiva	1.9	5
Post-Ensayo	Activa	1.0	7.8
	Pasiva	0.6-1.4	3.1

Tabla 29.- Penetración de las cuñas 3er ensayo con abrazadera de aluminio en barra CFRP.

De acuerdo a la (Tabla 29), existió una penetración de 0.8 cm de la cuña plástica en el barril metálico en el lado activo de la prueba, y una penetración entre 1.3 y 0.5 cm en la zona pasiva. Por otra parte, la barra deslizo 2.2 cm en la zona activa con respecto a la cuña plástica, y en la zona pasiva deslizo 1.9 cm con respecto a la cuña plástica. Esto se puede apreciar en las siguientes (Ilustración 118 y 119).



Ilustración 118.- Penetración 3er ensayo lado activo para barra CFRP (aluminio). (Foto de fecha 15/02/2022)



Ilustración 117.- Penetración 3er ensayo lado pasivo para barra CFRP (aluminio). (Foto de fecha 15/02/2022)

- **4to ensayo con abrazadera de aluminio y reforzado con pegamento en anclajes de barra CFRP:**

TEST 04 – CFRP_PHI 10MM_ANCLAJE 13MM_ABRAZADERA ALUMINIO_REFORZADO

Una vez identificado que el problema se presenta por la adherencia entre los materiales del anclaje, se utilizó un material de refuerzo (pegamento X60), de tal manera que se fortalezca la unión entre los mismo. Dando los siguientes resultados.

Carga Máxima: 89Kn (46.35% Capacidad máxima)

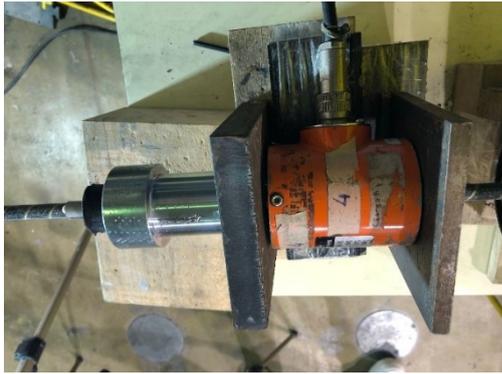
Tipo de falla: Rotura barra en zona de anclaje.

Etapa	Zona	Distancia entre Cuña plástica y Barril metálico (cm)	Distancia entre extremo de la barra y cuña plástica (cm)
Pre-Ensayo	Activa	1.9	10
	Pasiva	2.2	10
Post-Ensayo	Activa	1.2	6.9
	Pasiva	0.7-1.2	10-9.5

Tabla 30.- Penetración de las cuñas 4to ensayo con abrazadera de aluminio y pegamento en barra CFRP.

De acuerdo a la (Tabla 30), existió una penetración entre 1.5 y 1.0 cm de la cuña plástica en el barril metálico en el lado pasivo de la prueba, y una penetración de 0.7 cm en la zona activa. Por otra parte, la barra deslizo 3.1 cm en la zona activa con respecto a la cuña plástica, y en la zona pasiva 0.5 cm con respecto a la cuña plástica.

Esto se puede apreciar en las siguientes (Ilustración 120, 121, 122 Y 123).



*Ilustración 120.- Penetración 4to ensayo lado activo para barra CFRP (aluminio y pegamento).
(Foto de fecha 15/02/2022)*



*Ilustración 119.- Penetración 4to ensayo lado pasivo para barra CFRP (aluminio y pegamento).
(Foto de fecha 15/02/2022)*



*Ilustración 121.- Fallo en 4to ensayo lado activo para barra CFRP (aluminio y pegamento).
(Foto de fecha 15/02/2022)*



*Ilustración 122.- Fallo de la cuña en 4to ensayo en barra CFRP (aluminio y pegamento).
(Foto de fecha 15/02/2022)*

5.4.6. Cambio de tipo de anclajes en barras FRP:

- 3a Campaña de experimentación de anclajes en barras CFRP:

Durante la campaña de experimentación en los ensayos de tesado se observó que utilizando el sistema de anclaje suministrado por Sireg Geotech srl, se podía llegar a tesar al 40% de la tensión última de las barras de fibra de vidrio (GFRP).

Sin embargo, con las barras de fibra de carbono (CFRP) y el sistema de cuñas proporcionado por el fabricante no logramos alcanzar el 60% de la tensión última en las barras CFRP, que era el valor que nos había recomendado el fabricante. El porcentaje inicial obtenido fue del 23%, siendo el principal problema una rotura de la barra por cizalla causada por las cuñas plásticas. Después de estos resultados se modificó la geometría interna de la cuña para evitar la rotura por cizalla y se utilizó resina X60 con la finalidad de aumentar la adherencia entre la barra y la cuña plástica, obteniéndose una fuerza de tesada media de 52 kN, es decir un 27% de la capacidad máxima.

Transcurridos dos meses después de la última campaña de experimentación echa a los anclajes suministrado por la compañía Sireg Geotech srl. Para intentar mejorar los resultados, se encargaron unas cuñas plásticas a la empresa Mecyplastec modificando ligeramente la geometría, siguiendo las recomendaciones de Hossein Heydarinouri, en su artículo "FE analysis and experimental validation of mechanical wedge-barrel anchors for CFRP rods".

Con estas nuevas cuñas se llegó a una fuerza de tesado de 46 kN, es decir un 24% de la capacidad máxima, siendo la principal causa de falla, la falta de adherencia entre la cuña y la barra. Se ha intentado solucionar este problema usando un material intermedio entre la cuña y la barra, como se realizó en la 2ª campaña de experimentación descrita en este trabajo como, por ejemplo: 1.- Adhesivo (X60), 2.- Tubo de aluminio, 3.- Tubo de cobre.

En el mejor de los casos se ha logrado aumentar la fuerza de tesado a 52 kN, algo insuficiente para el diseño que se pretende realizar.

Por lo que se optó por distribuir las fuerzas en 4 piezas, seccionando la cuña elastomérica y pegándola con adhesivo X60, cuidando que su penetración a la hora de la instalación sea equidistante.

Es importante mencionar que se trata de un método rudimentario ya que es muy complejo lograr que las 4 piezas estén en contacto por igual con la barra, siendo necesario de una guía previa como tienen las cuñas de acero tradicional (Ilustración 124 y 125).



*Ilustración 123.- Anclaje de cuña en 4 piezas y pegamento X60 en lado activo, barra CFRP.
(Foto de fecha 13/06/2022)*



*Ilustración 124.- Anclaje de cuña en 4 piezas y pegamento X60 en lado pasivo, barra CFRP.
(Foto de fecha 13/06/2022)*

5.4.7. Resultados de anclajes en barra CFRP:

- 1er Ensayo en barra CFRP:

La carga máxima alcanzada antes del fallo del anclaje fue de 59 kN, es decir, un 49% menos de la carga de diseño inicial y un 69% menos de la capacidad máxima a tensión que el catálogo determina.

Se realizaron en total 3 ensayos cuyo fallo fue idéntico al mencionado en esta campaña de experimentación, por tanto, se utilizaron los datos del ensayo que alcanzo la mayor carga de tensión para representar este comportamiento en su conjunto.



*Ilustración 125.- Fallo en 1er ensayo de anclaje en barra CFRP.
(Foto propia fecha 17/01/2022)*

- **2da Campaña de ensayos de experimentación de anclajes en barras CFRP:**

El adhesivo logro aumentar la adherencia entre todos los componentes del sistema de anclaje de tal manera que se duplico la carga de las pruebas iniciales, pero en este caso la barra fallo al 46, 35 % de la capacidad carga máxima de la barra. Esto nos indica que a pesar de los cambios realizados en el sistema de anclaje no se ha logrado llegar a la carga de diseño deseada, ya que las características de la barra no lo permiten.



*Ilustración 126.- Fallos de anclajes final de la 2ª campaña en los dos lados de barra CFRP.
(Foto propia fecha 15/02/2022)*

- **3a Campaña de ensayos de experimentación de anclajes en barras CFRP:**

Los resultados obtenidos en estos ensayos previos de la campaña de experimentación dieron como conclusión el que se debía modificar la definición de la campaña experimental en lo que respecta a las vigas con armadura de fibra de carbono, ya que el nivel de tensión se ha tenido que disminuir al 26% de su capacidad máxima. Para lograr este valor ha sido necesario utilizar un sistema modificado de las cuñas proporcionadas por Sireg Geotech srl, el cual consiste en transformar la cuña de 2 piezas a una de 4 piezas, lo que aumenta la capacidad de carga hasta un 35% de su capacidad máxima.



*Ilustración 127.- Fallo de anclaje final de la 3ª campaña de barra CFRP.
(Foto propia fecha 16/06/2022)*

5.5. ENSAYO DE COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN

Como se mencionó en el programa experimental el proyecto *Straduravius* requiere una resistencia a la compresión del hormigón de 35 MPa, ya que esta será la resistencia a la compresión en la transferencia en las vigas pretensadas de FRP probadas como parte de la investigación.

Derivado de la duración de la campaña experimental, la cual estuvo dentro de las diferentes estaciones del año, nos sirvió para observar que el hormigón es afectado por la temperatura lo que nos hizo modificar su dosificación de los agregados conforme a la bajada o subida de temperatura, así también que a menos temperatura es necesario mantener la temperatura del

agua a una media de 18° ya que esto afecta su resistencia, en esta campaña no se lograba alcanzar la resistencia de proyecto a las 24 horas.

A continuación, mostramos en la (Tabla 31) la variante de temperaturas y humedad que se presentaron en el periodo que se realizó la campaña experimental.

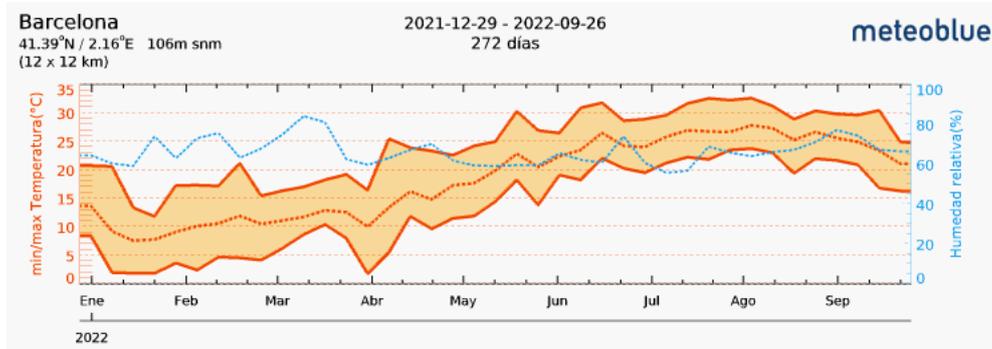


Tabla 31.- Tabla de temperaturas y humedades durante la campaña de experimentación.
(Meteoblue-Archivo meteorológico de Barcelona)

A continuación, se mostrará como agregado de este trabajo de investigación las dosificaciones utilizadas a las temperaturas que fue llevada a cabo la campaña experimental (Tabla 32).

Esto servirá para que futuras campañas tomen en cuenta este factor del hormigón.

Hormigón 20 lts			Hormigón 20 lts		
Relación Agua-Cemento		0.45	Relación Agua-Cemento		0.41
Componente	Tipo de elemento	Cantidad (Kg)	Componente	Tipo de elemento	Cantidad (Kg)
CEM I 52,5 R		10	CEM I 52,5 R		8.2
Agua		4.5	Agua		3.4
Agregados	0/2 mm	7.5	Agregados	0/2 mm	6
	0/4 mm	15		0/4 mm	12
	5/12 mm	21.75		5/12 mm	17.4
Superplastificante		0.1	Superplastificante		0.17
Hormigón 20 lts			Hormigón 20 lts		
Relación Agua-Cemento		0.45	Relación Agua-Cemento		0.38
Componente	Tipo de elemento	Cantidad (Kg)	Componente	Tipo de elemento	Cantidad (Kg)
CEM I 52,5 R		8	CEM I 52,5 R		8.4
Agua		3.6	Agua		3.2
Agregados	0/2 mm	6	Agregados	0/2 mm	6
	0/4 mm	12		0/4 mm	12
	5/12 mm	17.4		5/12 mm	17.4
Superplastificante		0.16	Superplastificante		0.16

Tabla 32.- Dosificaciones utilizadas para el hormigón a 24 horas en la campaña experimental Straduravius UPC.

6. CONCLUSIONES.

Al dar por terminada esta campaña experimental podemos encontrar diferentes conclusiones de los materiales analizados dentro del programa *Straduravius*.

En lo que corresponde a la caracterización de los materiales podemos concluir que el comportamiento lineal-elástico del material de las barras de FRP puede verificarse realizando los ensayos de tracción Tensile Test.

Los valores de la ficha técnica proporcionada por Sireg Geotech srl, se pudo verificar en parte. El módulo elástico medido fue más alto que el valor dicho por la compañía para cada tipo de barra y, por lo tanto, se encuentran dentro del lado de la seguridad.

El anclaje en las barras de FRP en donde actuaban las mordazas de la máquina, como se describió en este trabajo fue mediante tubos de acero pegados al extremo de la barra. Las barras ensayadas la mayoría fallaron por falta de anclaje correcto. Para las demás probetas que no alcanzaron los valores dados en la ficha técnica, no se pudo observar falla de anclaje visible.

Sin embargo, tampoco se descarta el hecho de que pudo haber sido mal ejecutado el sistema de anclaje por parte de este equipo.

6.1. FALLAS EN BARRAS POR ANCLAJE.

Durante los experimentos se pudieron observar los dos tipos de fallos en el anclaje, primero se dio la falla por deslizamiento de la barra de CFRP fuera del tubo de acero protector. La presión de agarre tuvo que ser ajustada varias veces. La presión de agarre inicial se calculó para las barras de GFRP, que tienen aproximadamente la mitad de la resistencia a la tracción de las barras de CFRP.

Por lo tanto, el deslizamiento se produjo debido a las mayores fuerzas aplicadas en las barras de CFRP. El segundo tipo de falla se observó durante la prueba ECADA. La barra de TGFRP se deslizó del dispositivo de anclaje y la barra de CFRP falló al comienzo del dispositivo de anclaje por corte transversal.

De los resultados experimentales se puede concluir, por tanto, que el anclaje seguro de las barras de FRP es un tema que se debe desarrollar especialmente y que los anclajes y su método de aplicación para este estudio son poco convencionales y funcionales.

6.2. COMPORTAMIENTO DE LA ADHERENCIA EN BARRAS FRP.

Para esta campaña experimental y la parte fundamental de este trabajo de investigación es la adherencia al hormigón de las barras FRP, por lo que podemos concluir que al extraer las barras del hormigón se produjo como se esperaba y muestra la literatura los tres tipos de fallos.

Los cuales fueron el deslizamiento de la barra, su rotura, o el fallo del hormigón por hendimiento. Aquí fue donde se verificó la longitud de anclaje.

El ECADA, como método de prueba iterativo, ofrece un rango para las dimensiones de la transferencia y la longitud de adherencia. Tal y como predicen los cálculos basados en el código EHE-08.

Como generalidad, se concluye que la transferencia y la longitud de adherencia dependen mucho del tipo de barra y su geometría.

6.3. CONCLUSIÓN DE BARRA TGFRP:

Los resultados experimentales para las barras de FRP muestran una gran variabilidad media. Las espirales dentadas en la superficie de las barras de TGFRP agregan más heterogeneidad a un material que ya tiene una dispersión significativa en sus propiedades materiales. La comparación de la deformación medida por el extensómetro y la galga extensométrica muestra la gran desviación de la barra TGFRP.

Además de la heterogeneidad añadida, las barras TGFRP muestran deficiencias en sus propiedades de adherencia. Los reportes presentados durante este trabajo sobre el comportamiento de su adherencia de las barras TGFRP pueden demostrar que la unión de las barras al hormigón o a los anclajes es insuficiente. Las muescas en espiral conducen a saltos de tensión y pequeñas extracciones.

La superficie lisa no permite el anclaje de la barra TGFRP en los dispositivos de anclaje provistos. Las campañas experimentales descritas en este trabajo mostraron la inaplicabilidad de este tipo de barra recientemente desarrollado ni como refuerzo activo ni pasivo ya que el material con el que está fabricado se muestra impredecible en los ensayos, teniendo variantes de uno a otro, aun contando con los debidos cuidados para que fueran idénticas las pruebas.

6.4. CONCLUSIÓN EN BARRAS CFRP Y GFRP:

En este trabajo de experimentación se muestra que la resistencia a la tracción de la barra de GFRP es menor y la resistencia a la tracción de la barra de CFRP la cual es notablemente más alta que los valores obtenidos por las barras de acero. Esto lleva a afirmar que la resistencia a la tracción de diseño es admisible en comparación con el acero.

Además de los valores nominales de las características del material, la rotura por fragilidad de las barras es motivo de preocupación, ya que las estructuras siempre están diseñadas para fallar de forma dúctil. La falla dúctil asegura una detección temprana de una falla estructural.

Todas las demás características del material de estas dos barras observadas llevan a la conclusión de que las barras de CFRP y GFRP investigadas se consideran una alternativa segura a las barras de acero convencional, solo cuidando el diseño de anclaje con las que serán pretensadas.

7. RECOMENDACIONES.

Este trabajo tuvo como objetivo el desarrollar un método estándar de ensayos en barras FRP, pero al encontrarnos con la problemática de las cuñas y anclajes, se recomienda poner mayor atención en el diseño y forma que se producirán los nuevos anclajes y cuñas.

Con lo que respecta a la barra TGFRP la cual como se plasma en este trabajo experimental, tuvo un fallo muy evidente de adherencia, por lo que se recomienda rediseñar sus características mecánicas y acabado de la barra para mejorar su adherencia.

En la parte de la campaña de los ensayos a flexión y cortante de vigas T, es recomendable que al utilizar las barras TGFRP se deba realizar un análisis más a detalle para evitar el fallo y no alcanzar las fuerzas que se proponen en el proyecto de investigación *Straduravius*.

8. REFERENCIAS

- [1] I. R. Clariana, M. M. Vidal, T. General, D. E. L. Proyecto, y C. Cebadas, “MEMORIA CIENTÍFICO-TÉCNICA DE PROYECTOS COORDINADOS Convocatorias”, pp. 1–30, 2015.
- [2] EHE-08, “Capítulo 8 Estructuras de hormigón. Propiedades tecnológicas de los materiales”, pp. 95–153, [En línea]. Disponible en: https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/CPH/codigo_estructural/capitulo_8_estructuras_de_hormigon._propiedades_tecnologicas_de_los_materiales.pdf.
- [3] D. Construcciones, “Plan de investigación”.
- [4] I. Civil, “Qb`Kliidö^=Abi=Mobqbkp^Al”, núm. c, 2010.
- [5] B. V. Moya, “Apuntes De Hormigón Armado”, *Apunt. Hormig. Armado*, pp. 1–277, 2012, [En línea]. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/25610/1/Apuntes_2012-13.pdf.
- [6] P. D. E. Hormigón y P. Y. Tendencias, “La Adherencia En Elementos Prefabricados”, pp. 143–157, 2002.
- [7] CEB-FIP, “CEB_FIP_model_code_1990_ing.pdf”. p. 462, 1990.
- [8] G. Gandarillas Pérez, “Estudio del comportamiento estructural de elementos de hormigón pretensados con armadura de FRP”, 2019.
- [9] P. Serna y P. Miguel, “PROCEDIMIENTO ENSAYO ‘ ECADA ’ PARA”, núm. Astm 1998, pp. 43–50, 2002.
- [10] ACI Committee 440, “ACI 440.4R-04 Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons Reported by ACI Committee 440”, *Concrete*, pp. 1–35, 2004.
- [11] ACI440.3R, “Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures”, *Test*, pp. 1–40, 2004.
- [12] A. M. Tello, “Estudio de la adherencia de armaduras de polímeros reforzados con fibras con resinas termoplásticas”, 2021.
- [13] A. Nanni, A. De Luca, y H. J. Zadeh, *Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and Design*. 2014.
- [14] Fédération internationale du béton. Task Group 9.3. Working Party., *FRP reinforcement in RC structures : technical report*. 2007.
- [15] M. B. Muñoz, *Study of bond behaviour between FRP reinforcement and concrete*. 2010.
- [16] M. Prieto Rábade, “Estudio de la adherencia de armaduras corroidas y su influencia en la capacidad resistente de elementos de hormigòn armado”, *Esc. Técnica Super. Ing. Caminos, Canales y Puertos*, 2014.
- [17] *Documento descargado de www.e-ache.com el 30/03/2020 por Sr. Mar Bernat NIF: 22517945-W*. 2020.
- [18] U. T. Systems, “6800 Series”, p. 28, 2020.
- [19] H. Maros y S. Juniar, “濟無No Title No Title No Title”, pp. 1–23, 2016.
- [20] “CLP-NB cedula de carga.pdf”. .
- [21] E. D. E. L. D. Une-en, “española”, pp. 0–3, 2007.
- [22] UNE 12390-3, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a la compresión de probetas.”, *Aenor*, pp. 3–6, 2003.
- [23] A. Del, E. Ecada, y P. La, “PRETENSADO”, núm. 1989, pp. 651–660, 2002.
- [24] “Reporte ensayos SAP”. .
- [25] T. Gfrp, “Glasspre TP”, pp. 1–11.
- [26] K. E. Vangen, “Experimental Study of the Bond Performance in Fibre Reinforced Polymer Prestressed Concrete”, 2022.
- [27] Z. Lu, T. E. Boothby, C. E. Bakis, y A. Nanni, “Transfer and development lengths of FRP prestressing tendons”, *PCI J.*, vol. 45, núm. 2, pp. 84–95, 2000, doi: 10.15554/pcij.03012000.84.95.
- [28] H. Heydarinouri, A. Vidovic, A. Nussbaumer, y E. Ghafoori, “FE analysis and experimental validation of mechanical wedge-barrel anchors for CFRP rods”, *Compos. Struct.*, vol. 275, núm. April, p. 114509, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114509.