



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería de la Construcción y P.I.C.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ADHERENCIA ENTRE LAMINADOS DE GFRP Y EL HORMIGÓN

JOSÉ RAMÓN ALBIOL IBÁÑEZ

TESIS DOCTORAL

Noviembre de 2015

Supervisores:

Prof. Dr. Pedro Serna Ros
Prof. Dr. José Rocío Martí Vargas

Tribunal:

Prof. Dr. Lluís Gil Espert
Prof. Dr. Manuel Octavio Valcuende Payá
Prof. Dra. Eva Oller Ibars

**A la meua dona Conxa
i al meu fill Pau**

**A Ramón i Remedios
pare i mare**

“La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica”

Aristóteles

AGRADECIMIENTOS

A mis Directores de Tesis, D. Pedro Serna Ros y D. José Rocío Martí Vargas por sus consejos, ayuda y guía, para desarrollar esta Tesis Doctoral.

Al personal técnico del Laboratorio de Hormigón del Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la U.P.V., Paco, Pascual, Jurgen, Juan, Enrique, Javier.

Especialmente al personal técnico del Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la U.P.V. Rafa Calabuig y Jesús Martínez.

A mis compañeros Juan Font, Deme Mosquera y Juanmi Murillo, por su inestimable ayuda.

A mis compañeros del departamento por su ánimo y ayuda: Luis García, Vicente Monzó, Marisa Navarro, Héctor Navarro, Arsenio Navarro y Juan Aznar. Un agradecimiento muy especial a Rafa Capuz.

A mi amigo Paco Martínez, aunque ya no estás, me acuerdo mucho de tí.

A Marcos Comamala de la empresa Nioglas, S.L. por facilitarme los perfiles pultrusionados de GFRP.

A Pepe, gerente de "Pinturas José Antonio García, S.L.", por el suministro de las resinas de poliéster y epoxi. A Javier Pedrola de la empresa CEMENTVAL, S.L. por el suministro de cemento. A la cantera "Los Carasoles" de Valencia, por el suministro de áridos. A Helena de la empresa "Fibrotec, S.L.", por el suministro de los perfiles pultrusionados tipo I. A D^a María Mañas en nombre de Bekaert, Industrias del Ubierna, S.A., por el suministro de fibras metálicas. A Alberto Rey y Antonio Vargas de la empresa Sika SAU, por el suministro de aditivos, resinas y fibras de carbono. Un abrazo a Pepe Fortea.

A Ramón, Reme, Carmen y Segundo.

A mi mujer Conxa y a mi hijo Pau, mi familia. Gracias. Mil Gracias.

RESUMEN

En la actualidad, poco a poco, se están incorporando las estructuras híbridas en elementos a flexión en el sector de las estructuras civiles y de edificación. El bajo peso y la gran durabilidad de estas estructuras hacen viable su utilización. Las estructuras híbridas están compuestas generalmente por materiales poliméricos reforzados con fibras de vidrio o carbono (GFRP o CFRP) en forma de perfiles estructurales de cualquier tipo de sección en I, en caja, en forma de artesa, como elementos que trabajan a tracción, y el hormigón en la cabeza comprimida de la sección resistente. Es por ello que la combinación de estos materiales y sus excelentes cualidades permiten optimizar su rendimiento mecánico en dichas posiciones.

Los modos de fallo de estas estructuras presentan diversidad de criterios entre los investigadores, y es por ello que en esta Tesis Doctoral se realiza en primer lugar un estudio (Anexo I) sobre la posibilidad de diseñar una viga con un modo de fallo dúctil, trasladando la rotura a la cabeza comprimida con hormigones reforzados con fibras. Así, en este estudio se comprueba que no es posible analizar dicho modo de fallo ya que tras “blindar” todos los posibles modos de fallo de la estructura la rotura se produce por esfuerzo rasante entre el perfil de GFRP y el hormigón, sin llegar a comprobar la influencia del hormigón reforzado con fibras.

Por ello se redirige el estudio y se inicia el análisis de la adherencia del GFRP y el hormigón, analizando la influencia de una serie de tratamientos superficiales aplicados al perfil de GFRP, así como el uso de elementos de fijación mecánica.

Para ello, y sin perder de vista las aplicaciones en obra civil y edificación, y después de analizar la información científica disponible, visto que no existen ensayos normalizados para el estudio de este tipo de vigas híbridas, se plantea la necesidad de aportar una metodología de ensayo sencilla que posibilite el estudio de este fenómeno.

Es por ello que se plantea la adaptación del ensayo de *pull-out*, habitual para barras, para su aplicación a perfiles de sección rectangular. La complejidad de esta adaptación se resuelve aportando una serie de modalidades al método, siendo el grado de confinamiento del hormigón sobre el perfil de GFRP y la posibilidad de aplicar par de apriete para postesar la tornillería lo que genera las modalidades de 2C, 1CA, 1CE y 1CL. Estas modalidades a su vez se ven representadas en las formas de conexión de los perfiles de GFRP con el hormigón en obra: ala o alma del

perfil embebido en la capa de compresión, o la cara superior del ala del perfil en contacto con la capa de compresión.

En la modalidad 2C el hormigón se encuentra confinando pasivamente todas las caras del perfil de GFRP; en la modalidad 1CA el hormigón confina las dos caras principales, pero una de ellas no tiene tratamiento superficial; en la modalidad 1CE el hormigón confina pasivamente la cara del perfil que ha sido tratada superficialmente, mientras que la otra cara no está en contacto con el hormigón; y por último, en la modalidad 1CL una cara está en contacto con el hormigón y la otra está liberada de éste para tener acceso al perfil en la probeta híbrida y poder darle el par de apriete para realizar un postesado del elemento de fijación mecánica, consiguiendo así un confinamiento activo del hormigón sobre el perfil de GFRP.

Una vez clarificada la metodología del ensayo se procede a la caracterización de las distintas variables de adherencia propuestas, como son una serie de tratamientos superficiales tales como arenados, resinas y texturizados, así como combinaciones entre ellos; también se utilizan elementos de fijación mecánica fijos y con desplazamiento dotándolos de un par de apriete, unas veces solo para su fijación al perfil de GFRP y en otros casos para conseguir un confinamiento activo del hormigón sobre el perfil.

Tras la obtención de los resultados experimentales se procede a realizar una propuesta de caracterización de los parámetros de adherencia, así como a la interpretación de diversos modelos de comportamiento basados en curvas tensión adherente–deslizamiento, aportando novedades sobre el fenómeno estudiado.

RESUM

En l'actualitat, a poc a poc, s'estan incorporant les estructures híbrides en elements a flexió en el sector de les estructures civils i d'edificació. El baix pes i la gran durabilitat d'aquestes estructures fan viable la seua utilització. Les estructures híbrides estan compostes generalment per materials polimèrics reforçats amb fibres de vidre o carboni (GFRP o CFRP) en forma de perfils estructurals de qualsevol tipus de secció en I, en caixa, en forma d'artesa, com a elements que treballen a tracció, i el formigó en el cap comprimit de la secció resistent. És per açò que la unió d'aquests materials i les seues excel·lents qualitats permeten optimitzar el seu rendiment mecànic en aquestes posicions.

Les maneres de fallada d'aquestes estructures presenten diversitat de criteris entre els investigadors, és per açò que en aquesta Tesi Doctoral, en primer lloc es realitza un estudi (Annex I) per a estudiar la possibilitat de dissenyar una biga amb una manera de fallada dúctil traslladant el trencament al capdavant comprimit amb formigons reforçats amb fibra (HRF). Es comprova, en aquest estudi, que no és possible analitzar aquesta possibilitat ja que després de "blindar" totes les possibles maneres de fallada de l'estructura, el trencament arriba per esforç rasant entre el perfil de GFRP i el formigó, sense arribar a comprovar la influència del HRF.

És per açò que es redirigeix i s'inicia l'estudi en l'adherència del GFRP i el formigó, analitzant la influència d'una sèrie de tractaments superficials aplicats al perfil de GFRP així com l'ús d'elements de fixació mecànica.

Per açò, i sense perdre de vista les aplicacions en obra civil i edificació, i després d'analitzar l'informació científica disponible, vist que no existeixen assajos normalitzats per a l'estudi d'aquest tipus de bigues híbrides, es planteja la necessitat d'aportar una metodologia d'assaig senzilla que possibilita l'estudi d'aquest fenomen.

Es planteja mitjançant l'assaig de pull-out habitual per a barres, la seua aplicació en perfils de secció rectangular. La dificultat d'aquesta adaptació es resol aportant una sèrie de modalitats al mètode, sent el grau de confinament del formigó sobre el perfil de GFRP i la possibilitat d'aplicar parell d'estrenya per a postesar els caragols el que genera les modalitats de 2C, 1CA, 1CE i 1CL. Aquestes modalitats es veuen representades en les formes de connectar els perfils amb el formigó en obra: ala del perfil embegut en la capa de compressió, o la cara superior de l'ala del perfil en contacte amb la capa de compressió.

En la modalitat 2C el formigó es troba confinant passivament totes les cares del perfil de GFRP, en la modalitat 1CA el formigó confina les dues cares principals, però una d'elles no té tractament superficial, en la modalitat 1CE el formigó confina pasivament la cara del perfil que està tractada superficialment, mentre que l'altra cara no està en contacte amb el formigó, i finalment a la modalitat 1CL una cara està en contacte amb el formigó i l'altra està alliberada d'aquest per a tenir accés al perfil en la proveta híbrida i poder donar-li el parell d'estrenya per a realitzar un postesat de l'element de fixació mecànica, aconseguint així un confinament actiu del formigó sobre el perfil de GFRP.

Una vegada aclarida la metodologia de l'assaig es procedeix a la caracterització de les diferents variables d'adherència proposades, com són una sèrie de tractaments superficials tals com arenats, resines i texturitzats, així com combinacions entre ells; també s'utilitzen elements de fixació mecànica fixos i amb desplaçaments aplicant-los un parell d'estrenya, unes vegades solament per a la seua fixació al perfil de GFRP i en altres casos per a aconseguir un confinament actiu del formigó sobre el perfil.

Després de l'obtenció dels resultats experimentals es procedeix a realitzar unes propostes de caracterització dels paràmetres d'adherència així com la interpretació de diversos models de comportament de les corbes tensió adherent–lliscament, aportant novetats a la comunitat científica.

ABSTRACT

At present, hybrid structures in flexural elements are being gradually incorporated in the field of civil and building structures. The low weight and high durability of these structures make use viable. Hybrid structures are usually composed of polymeric materials reinforced with glass or carbon fibers (GFRP or CFRP) in structural shapes of any type of section, in I, in box, trough-shaped, as elements working in tension, and the concrete in the compressed head of the resistant section. Due to this, the union of these materials and their excellent qualities allow for optimizing their mechanical performance in these positions.

The failure modes of these structures have different opinions (points of view) among researchers. Therefore, this thesis focuses first of all on the possibility of designing a beam with ductile failure mode that moves the break to the compressed head by fiber reinforced concrete (Appendix I). It is found in this study that it is not possible to analyze this option because after "shielding" all possible failure modes of the structure the break occurs by the grazing effort between GFRP and concrete, without checking the influence of HRF.

For this reason, the study is redirected and focused on the bond between GFRP and concrete by analyzing the influence of a series of surface treatments applied to the GFRP profile and the use of mechanical fasteners.

To do this without losing sight of applications in civil engineering and construction, and after analyzing the scientific information available, given that there are no standard tests of this type of hybrid beams trials, the need to provide a simple testing methodology arises to enable the study of this phenomenon.

That is why the adaptation of the pull-out test, usually for bars, is presented for rectangular section profiles. The complexity of this adaptation is solved by providing a number of modalities to the approach depending on the degree of confinement of the concrete over GFRP profile and the possibility of applying torque to the prestressed bolts, finally generating patterns 2C, 1CA, 1CE and 1CL. These patterns in turn are represented in the forms of connecting profiles with "in situ" concrete: flange profile embedded in the compression layer, or the top of the flange profile in contact with the compression layer.

In the modality 2C, the concrete is passively confining all faces of the GFRP profile; in the form 1CA, the concrete confines the two main faces of

elements but one of them does not have surface treatment; in the form 1CE, one side of the profile is confined with surface treatment and the other one is not in contact with the concrete; and finally, in 1CL one side is in contact with the concrete and the other one is liberated from this to access profile and give torque to conduct a post-tensioning of the mechanical fastener, thus achieving an active confinement of concrete over GFRP profile.

Once clarified trial methodology, it is proceed to the characterization of the different proposed bond variables like a series of surface treatments such as sandblasting, and textured resins and a combination of both. Also fixed and moveable mechanical fastening elements are used providing them with a torque, sometimes only for fixing the profile GFRP and in other cases to achieve an active confinement of the concrete on the profile.

After the results, a proposal for characterizing the bond parameters is made and a variety of behavioral models based on bond stress-slip curves are analyzed, bringing innovations to the scientific community.

ÍNDICE

Agradecimientos	I
Resumen	VI
Resum	VIII
Abstract	X
Índice	XII
Listado de Figuras	XX
Listado de Tablas	XXXII
Listado de Símbolos	XXXVIII
1.- CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1.- Introducción	3
1.2.- Planteamiento del problema	5
1.3.- Objetivos	7
1.3.1.- Objetivo general	7
1.3.2.- Objetivos específicos	7
1.4.- Estructura y contenido de la Tesis	8
2.- CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE	11
2.1.- Introducción	13
2.2.- Descripción de los sistemas híbridos	14
2.2.1- Sistema híbrido	14
2.2.2- Componentes del sistema híbrido	14
2.2.2.1.- Hormigón	14
2.2.2.2.- GFRP, polímero reforzado con fibras	15
2.2.2.3.- Unión	21
2.2.3.- Producción de sistemas híbridos	25
2.2.3.1.- Hormigón	25
2.2.3.2.- FRP, polímero reforzado con fibras de vidrio	26

2.2.4.- Comportamiento estructural	28
2.2.5.- Modos de fallo	33
2.2.5.1.- Generalidades	33
2.2.5.2.- Cortante en el alma	33
2.2.5.3.- Cortante en el adhesivo	34
2.2.5.4.- Cortante en el hormigón	34
2.2.5.5.- Fallo de adherencia FRP-hormigón	34
2.2.5.6.- Pandeo en el alma	38
2.2.5.7.- Aplastamiento del hormigón	39
2.2.5.8.- Inestabilidad lateral	41
2.2.5.9.- Flexión	41
2.2.6.- Ductilidad del sistema híbrido	42
2.2.7.- Compatibilidad de los materiales del sistema híbrido	47
2.2.8.- Resistencia al fuego	48
2.2.9.- Aplicaciones en la ingeniería civil	48
2.3.- Adherencia en la interfase FRP-hormigón	51
2.3.1.- Introducción	51
2.3.2.- Ensayos de adherencia	52
2.3.2.1.- Ensayos en modo I	52
2.3.2.2.- Ensayos en modo II	53
2.3.2.3.- Ensayos en modo III	54
2.3.3.- Parámetros que influyen en la adherencia	55
2.3.3.1.- Efecto de la configuración geométrica	55
2.3.3.2.- Influencia de la longitud adherida	56
2.3.3.3.- Efecto de la preparación de la superficie	58
2.3.3.4.- Efecto del tipo de adhesivo	61
2.3.3.5.- Efecto de la composición del hormigón	62
2.3.3.6.- Influencia del método de ensayo	62
2.3.3.7.- Influencia del módulo de deformación longitudinal del material compuesto	63
2.3.3.8.- Influencia de la relación bp-bc	64

2.3.3.9.- Influencia de la resistencia del hormigón	66
2.3.3.10.- Confinamiento	70
2.3.3.11.- Influencia de los conectores	71
2.3.4.- Relación tensión de adherencia-deslizamiento	73
2.4.- Conclusiones y resumen crítico	78
3.- CAPÍTULO III: PROGRAMA EXPERIMENTAL	81
3.1.- Introducción	83
3.2.- Planteamiento y justificación del programa experimental	84
3.3.- Fase 1 - Programa experimental	87
3.3.1.- Ensayos previos	87
3.3.1.1.- Determinación de la resistencia del hormigón y longitud de adherencia	87
3.3.1.2.- Determinación del tipo de texturizado	88
3.3.1.3.- Determinación de la sección del perfil de GFRP y el uso de hormigón reforzado con fibras	89
3.3.1.4.- Determinación del tipo de fijación mecánica, par de apriete y su recubrimiento	90
3.3.2.- Ensayos de caracterización de la adherencia	91
3.4.- Materiales	94
3.4.1.- Hormigón	94
3.4.1.1.- Dosificación del hormigón	94
3.4.1.2.- Proceso de confección del hormigón	96
3.4.1.3.- Caracterización mecánica del hormigón	97
3.4.2.- Perfil pultrusionado GFRP	99
3.4.2.1.- Polímero pultrusionado de fibra de vidrio, GFRP	99
3.4.2.2.- Caracterización mecánica del GFRP	100
3.5.- Identificación de lotes de hormigón y las probetas híbridas	101

4.- CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	107
4.1.- Introducción	109
4.2.- Método de confección de las probetas híbridas	111
4.2.1.- Definición de las probetas	106
4.2.2.- Confección de las probetas según los criterios de adherencia	112
4.2.2.1.- Modalidad 2C	112
4.2.2.2.- Modalidad 1CA	113
4.2.2.3.- Modalidad 1CE	114
4.2.2.4.- Modalidad 1CL	115
4.2.3.- Proceso de hormigonado de las probetas	116
4.3.- Desarrollo del método de ensayo	118
5.- CAPÍTULO V: METODOLOGÍA PARA LA PREPARACIÓN DE LAS INTERFASES	123
5.1.- Introducción	125
5.2.- Método de confección de probetas de GFRP	125
5.3.- Desarrollo del método de tratamiento superficial	128
5.3.1.- Patrón	129
5.3.2.- Pulido	129
5.3.3.- Resina	129
5.3.4.- Arenado	130
5.3.5.- Texturizados	131
5.3.6.- Combinados	133
5.4.- Desarrollo del método de fijaciones mecánicas	134
5.4.1.- Sin desplazamiento	134
5.4.2.- Con desplazamiento permitido	135
5.4.3.- Soluciones combinadas	136

6.- CAPÍTULO VI: RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	141
6.1.- Ensayos previos	141
6.1.1.- Introducción	141
6.1.2.- Determinación de la resistencia del hormigón y longitud de adherencia	145
6.1.3.- Análisis del tipo de texturizado	150
6.1.4.- Determinación de la sección del perfil de GFRP y el uso de hormigón reforzado con fibras (HRF)	152
6.1.5.- Determinación del tipo de fijación mecánica, par de apriete y su recubrimiento	159
6.2.- Ensayos para la caracterización de la adherencia	163
6.2.1.- Introducción	163
6.2.2.- Modelos de comportamiento	163
6.2.3.- Identificación de los parámetros adherentes	166
6.2.4.- Presentación de los resultados	168
6.2.4.1.- Contacto directo del hormigón a dos caras, 2C	171
6.2.4.2.- Contacto directo del hormigón a una cara, 1C	176
6.2.4.2.1.- Influencia de las variables de adherencia	176
6.2.4.2.2.- Influencia de la fijación mecánica sin desplazamiento	181
6.2.4.2.3.- Influencia de la fijación mecánica con desplazamiento	188
6.2.4.3.- Contacto directo del hormigón a una cara libre, 1CL. Influencia del par de apriete y postesado de la tornillería M6 con deslizamiento	193

7.- CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	199
7.1.- Conclusiones	201
7.1.1._ Conclusiones de los ensayos previos	201
7.1.2._ Conclusiones sobre la influencia de las variables de adherencia	202
7.2.- Futuras líneas de investigación	204
8.- CAPÍTULO VIII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	205
9.- ANEXO I: IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	223
A1.1.- Introducción	223
A1.2.- Hormigón de altas prestaciones, HRF+HAC+HAR	224
A1.3.- Perfiles pultrusionados	227
A1.4.- Vigas híbridas	227
A1.5.- Análisis y resultados de las vigas híbridas	233
A1.5.1.- Ensayos y análisis de la vigas híbridas	233
A1.5.1.1.- Viga híbrida HYB_HRF_0	233
A1.5.1.2.- Viga híbrida HYB_HRF_30	235
A1.5.1.3.- Viga híbrida HYB_HRF_60	239
A1.5.1.4.- Viga híbrida HYB_HRF_120	241
A1.5.1.5.- Análisis comparativo de las vigas	244
A1.6.-Conclusiones	246
10.- ANEXO II: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PULL-OUT	249
AII.1.- Introducción	251
AII.2.- Resultados de los ensayos de pull-out	253
AII.2.1- Grupo 1.- Contacto directo del hormigón dos caras, 2C	253
AII.2.2- Grupo 2.- Contacto directo del hormigón a una cara, 1C	259
SUBGRUPO 2.1.-<u>Influencia de las variables de adherencia</u>	259

SUBGRUPO 2.2.- <u>Influencia de las fijaciones mecánicas sin desplazamiento</u>	265
SUBGRUPO 2.3.- <u>Influencia de las fijaciones mecánicas con desplazamiento</u>	271
AII.2.3- GRUPO 3.- Contacto directo del hormigón a una cara libre, 1CL	286

LISTADO DE FIGURAS

Fig. 1.1 Primer puente híbrido construido en Asturias, España (2004) Acciona Infraestructuras	3
Fig. 1.2 Distribución tensional en sección transversal: sistema híbrido rendimiento	4
Fig. 1.3 Vista general y detalle del ensayo de viga híbrida con fallo en la unión. Anexo 1	6
Fig. 2.1 Características físicas de los materiales de refuerzo, www.build-on-prince.com , (2015)	19
Fig. 2.2 a Sección en I con conectores (Mutsuyoshi et al. 2010), b de una losa con conectores de FRP (Liu et al. 2010)	24
Fig. 2.3 Sección de perfil en caja con un wrapping (Chakraborty et al. 2011)	24
Fig. 2.4 Relación carga-flecha del perfil híbrido de sección en I con diferentes uniones (Mutsuyoshi et al. 2010)	25
Fig. 2.5 Esquema de elaboración y puesta en obra del hormigón	26
Fig. 2.6 Proceso de pultrusión. www.netcomposites.com , (2014)	28
Fig. 2.7 Sección típica en estructuras híbridas (Barros and Lebre 2010).	28
Fig. 2.8 a Distribución de deformaciones, b distribución de tensiones, c distribución resultante de tensiones (Barros and Lebre, 2010).	29
Fig. 2.9 a Distribución de deformaciones, b distribución de tensiones, en una sección en centro de luz en el instante de rotura CFRP (Deskovic et al., 1995).	30
Fig. 2.10 Curvas carga-flecha en ensayo rotura a 4 puntos (Deskovic et al., 1995).	31
Fig. 2.11 Gráficos de caracterización hormigón y GRFP para sistemas híbridos (Deskovic et al., 1995).	32
Fig. 2.12 Perfil en I, rotura alma por cortante (Barros and Lebre, 2010).	33
Fig. 2.13 a Modo de fallo en la interfase a con resina epoxi en mortero (Sikadur 31) y b en gel (Sikadur 32) con un arenado (Barros y Lebre, 2010).	35
Fig. 2.14 Gráfico deformación-carga de una losa híbrida (Liu et al., 2010).	36
Fig. 2.15 Gráfico posición eje neutro-carga aplicada (Liu et al., 2010).	36
Fig. 2.16 a Fallo en la interfase FRP-hormigón, b Captador LVDT medición deslizamiento (Barros and Lebre, 2010).	37
Fig. 2.17 a Gráfico carga-deslizamiento de una losa híbrida, b , carga-deformación de una losa híbrida (Barros and Lebre, 2010).	37
Fig. 2.18 Esquema del ala y alma en un perfil en I de CFRP, sin capa de compresión de hormigón (Duc et al., 2010).	38

Fig. 2.19 Gráfico carga-flecha de una viga en I de FRP sin capa de compresión de hormigón (Duc et al., 2010).	38
Fig. 2.20 Alabeo del ala comprimida tras el ensayo de la viga polimérica (Duc et al., 2010).	39
Fig. 2.21 Cortante y alabeo en el ala comprimida (Mutsuyoshi et al., 2010).	39
Fig. 2.22 Aplastamiento del hormigón por esfuerzos normales (Chakraborty et al., 2011).	40
Fig. 2.23 Aplastamiento del hormigón por esfuerzos normales (Mutsuyoshi et al., 2010).	40
Fig. 2.24 Gráfico carga-flecha, en vigas con rigidizadores (Duc et al., 2010).	41
Fig. 2.25 a Distribución deformaciones /carga en la zona alta del sistema; b secciones híbridas con envoltorio de FRP (Chakraborty et al., 2011).	43
Fig. 2.26 Ensayo a flexión a 4 puntos, Distribución carga-flecha sistema híbrido con hormigón a convencional y b hormigón de alta resistencia reforzado con fibra metálica (Chakraborty et al., 2011).	44
Fig. 2.27 Ensayo a flexión a 4 puntos, Distribución carga /flecha sistema híbrido con hormigón de alta resistencia, con distintos tipo de "wrapping", (Chakraborty et al., 2011).	45
Fig. 2.28 Ensayo a flexión a 4 puntos, distribución carga-flecha en sistema híbrido en flexión positiva y negativa (Fam y Honickman, 2010).	46
Fig. 2.29 Ensayo a flexión a 4 puntos, distribución carga-flecha en sistema híbrido GFRP-hormigón en flexión positiva (Liu et al., 2010).	47
Fig. 2.30 Pasarelas de Aberfeldy y Pontresina, a y b , respectivamente. (De Diego et al., 2008).	49
Fig. 2.31 Pasarela sobre vía férrea del AVE en Lérida, proyecto de PEDELTA	50
Fig. 2.32 Puente West Mill, Oxfordshire, UK. (De Diego et al., 2008).	50
Fig. 2.33 Pasarela peatonal en Cuenca sobre el río Júcar, 2012. (http://www.mpt.gob.es/fondosinversionlocal/castilla-la-mancha/cuenca.html).	51
Fig. 2.34 Pasarela peatonal en Madrid sobre el río Manzanares, 2012. (http://www.fomento.gob.es/AZ.BBMF.Web/documentacion/pdf/A24849.pdf)	51
Fig. 2.35 Ensayo de tracción directa, pull-off. López González, (2012).	52
Fig. 2.36 Ensayos a cortante simple (a) y doble (b), (c) encontrados en la literatura. López González, (2012).	53
Fig. 2.37 Ensayos a cortante simple doble propuesto por Nguyen et al. (2014).	53
Fig. 2.38 Ensayos en modo mixto. López González, (2012).	55

Fig. 2.39 Influencia de la longitud adherida en la resistencia de adherencia FRP-hormigón según los modelos de varios autores según Tesis Doctoral de López González (2012).	57
Fig. 2.40 Influencia de la longitud de anclaje en barras de CFRP (\varnothing 13,5mm). Achillides y Pilakoutas, (2004).	58
Fig. 2.41 Barras de FRP utilizadas con distintos tratamientos superficiales (a AL-Mahmoud et al., 2007y b , Baena PhD thesis, 2010).	61
Fig. 2.42 Efecto del módulo de elasticidad del material compuesto en la carga de despegue según Tesis Doctoral de González López (2012).	63
Fig. 2.43 Influencia del módulo de elasticidad de las barras de FRP en el comportamiento adherente. a barras de GFRP y b barras de CFRP Achillides et al., (2004).	64
Fig. 2.44 Efecto de la relación bp-bc en la resistencia de adherencia FRP-hormigón, Tesis Doctoral de López González (2012).	65
Fig. 2.45 Efecto de la relación bp-bc en la longitud efectiva de adherencia FRP-hormigón, Tesis Doctoral de López González (2012).	65
Fig. 2.46 Influencia de la resistencia del hormigón en la resistencia de adherencia FRP-hormigón, Tesis Doctoral de López González (2012).	66
Fig. 2.47 Influencia de la resistencia del hormigón en la longitud efectiva de adherencia según los modelos, Tesis Doctoral de López González (2012).	67
Fig. 2.48 Influencia de la resistencia a compresión del hormigón en la resistencia de adherencia de las barras de CFRP y CFRP corrugadas. Tepfers, (2006).	68
Fig. 2.49 Influencia de la resistencia a compresión del hormigón en tensión adherente de las barras de CFRP arenadas, texturizadas y acero corrugadas. Baena et al., (2009).	69
Fig. 2.50 Influencia de la resistencia a compresión del hormigón en la tensión adherente de las barras de CFRP texturizadas. Dávalos et al., (2008).	69
Fig. 2.51 Comportamiento de adherencia de las barras de CFRP corrugadas con confinamiento, durante el ensayo de pull-out. Malvar et al., (2004).	70
Fig. 2.52 Comportamiento de adherencia de las barras de CFRP arenadas con confinamiento, durante el ensayo de pull-out. Malvar et al., (2004).	71
Fig. 2.53 Ensayo push-out entre un perfil de GFRP y losas de compresión de hormigón. Miravete et al., (2006).	71
Fig. 2.54 Ensayo push-out entre un perfil de GFRP y losas de compresión de UHPFRC. Nguyen et al., (2014).	72
Fig. 2.55 Distintas disposiciones y tipología de tornillería en el ensayo push-out entre un perfil de GFRP y losas de compresión de UHPFRC. Nguyen et al., (2015).	72

Fig. 2.56 Modelos relación tensión de adherencia-deslizamiento. Ko et al., (2014).	74
Fig. 2.57 Modelo relación tensión–deslizamiento, laminados de FRP sin confinar. Ko et al., (2014).	76
Fig. 2.58 Modelos relación tensión–deslizamiento, laminados de FRP sin confinar, de varios investigadores, Ko et al., (2014).	77
Fig. 3.1 Relación de los distintos tipos de texturizados de GFRP, en los ensayos previos.	88
Fig. 3.2 (a) tipología tornillería TEX2 ² , TEX2 ³ , TEX2 ⁴ y (b) ubicación del recubrimiento “r” en la modalidad 1CL.	90
Fig. 3.3 Medición del escurrimiento y el T ₅₀ del hormigón.	97
Fig. 4.1 Tipologías de enlace entre el perfil de GFRP y la capa de compresión del hormigón.	109
Fig. 4.2 Imagen (a) y esquema probeta híbrida (b) , modalidad 2C.	112
Fig. 4.3 Imagen (a) y esquema probeta híbrida (b) , GFRP confinado a una cara, modalidad 1CA.	113
Fig. 4.4 Imagen (a) y esquema (b) probeta híbrida con el GFRP a una cara, sin confinamiento, 1CE.	114
Fig. 4.5 Esquema probeta híbrida (a) e imágenes (b y c) con el GFRP a una cara, 1CL	115
Fig. 4.6 Encofrados (a) y probeta preparada para hormigonar (b) .	116
Fig. 4.7 Esquema vertido hormigonado probeta tipo (a) y vertido hormigón (b) .	117
Fig. 4.8 Probeta desencofrada.	118
Fig. 4.9 Placa de acero S235 JR de 400 x 600 x 50 mm.	119
Fig. 4.10 Máquina de ensayo pull-out, ACI-440-3R-04.	120
Fig. 4.11 Sistema de medición no cargado (a) y cargado (b) .	121
Fig. 5.1 Espuma de polietileno en la zona del perfil y cinta de carroceros.	125
Fig. 5.2 Esquema de las zonas de la probeta de GFRP.	126
Fig. 5.3 Fotografía zona “C” con las dos caras tratadas, 2C, en este caso arenadas, la flecha indica caras de 5 x 50 mm no tratadas.	127
Fig. 5.4 Fotografía zona “C” y superficies sin adherencia en la zona “B” de 1CA (a) y 1CE (b) .	128
Fig. 5.5 Fotografía de la probeta tipo 1CL.	128
Fig. 5.6 Tratamiento superficial patrón.	129
Fig. 5.7 Tratamiento superficial con resina acrílica (a) y poliéster (b) .	130
Fig. 5.8 Tratamiento interfase tipo arenado.	131

Fig. 5.9 Tratamiento superficial texturizado tipo 7, vista de perfil (a) y perspectiva (b) .	131
Fig. 5.10 Tratamiento superficial texturizado tipo 3.	132
Fig. 5.11 Tratamiento superficial texturizado tipo 4.	132
Fig. 5.12 Tratamiento superficial texturizado tipo 6.	133
Fig. 5.13 Tratamiento superficial texturizado + arenado (a) y texturizado + resina (b) .	133
Fig. 5.14 Tornillería (texturizado1*) a dos caras, 1C.	134
Fig. 5.15 Tornillería sin desplazamiento (TEX1) a una cara, 1CA, perfil. La plastilina es el material de color negro.	135
Fig. 5.16 Tornillería con desplazamiento (TEX2) a una cara, 1C.	135
Fig. 5.17 Tratamiento superficial tornillería con desplazamiento + arenado (a) y con la protección antiadherente de plastilina (color negro) en la cara inversa (b) .	137
Fig. 5.18 Tratamiento superficial tornillería con desplazamiento con postesado de tornillería + arenado, primera fase (a) y segunda fase colocación del tornillo y protección antiadherente posterior en la cara inversa (b) .	138
Fig. 5.19 Envoltura de espuma de polietileno que garantiza la no adherencia del hormigón tras el corte del hormigón (a) y retirada del polietileno, limpieza y tornillería lista para colocar doble arandela y tuerca en la cara inversa (b) .	138
Fig. 5.20 Tornillería lista para el par de apriete posterior en la cara inversa.	138
Fig. 5.21 Tratamiento superficial tornillería + resina.	139
Fig. 5.22 Probetas para el confinamiento activo del hormigón con tratamiento tornillería + TEX7 (a) y combinado con arenado (b) .	140
Fig. 6.1 Curvas tensión de adherencia-deslizamiento (τ/δ), modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, patrón.	147
Fig. 6.2 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, pulido.	147
Fig. 6.3 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, acrílica.	148
Fig. 6.4 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, resina poliéster (RES).	149
Fig. 6.5 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, arenado.	149
Fig. 6.6 Curvas τ/δ , modalidad 2C de los texturizados a seleccionar.	151
Fig. 6.7 Tensiones máximas de adherencia-tratamientos superficiales, modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5mm.	153
Fig. 6.8 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, texturizado 7.	154

Fig. 6.9 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, texturizado 7+ arenado.	155
Fig. 6.10 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, texturizado 7+ resina.	156
Fig. 6.11 Tensiones de adherencia-tratamientos superficiales, modalidad 2C, sección GFRP 25 x 5 mm.	157
Fig. 6.12 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 25 x 5mm, patrón y texturizado.	158
Fig. 6.13 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 25 x 5mm, texturizado + resina.	158
Fig. 6.14 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 25 x 5mm, texturizado + arenado.	159
Fig. 6.15 Curvas τ/δ , fijación mecánica M6-8.8 con desplazamiento (tornillo en coliso), con varios tipos de remate en la tornillería*, par 8 Nm, modalidad 1CL.	160
Fig. 6.16 Curvas τ/δ , fijación mecánica M6-8.8 con desplazamiento (tornillo en coliso), con varios tipos de remate en la tornillería*, par 16 Nm, modalidad 1CL.	161
Fig. 6.17 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, comparativa POS/No POS.	162
Fig. 6.18 Modelos 1 al 4 de comportamiento tensión de adherencia-deslizamiento ensayo pull-out.	163
Fig. 6.19 Modelos 5 al 8 de comportamiento tensión de adherencia-deslizamiento ensayo pull-out.	164
Fig. 6.20 Parámetros de tensión de adherencia-deslizamiento en el ensayo de pull-out.	167
Fig. 6.21 Curvas τ/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm.	172
Fig. 6.22 Roturas interfase GFRP-hormigón, modalidad 2C, varios acabados, sección 50 x 5 mm.	173
Fig. 6.23 Curvas τ/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm.	174
Fig. 6.24 Roturas interfase GFRP-hormigón, modalidad 2C, varios acabados, sección 25 x 5 mm.	175
Fig. 6.25 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, texturizado, GFRP sección 50 x 5 mm.	176
Fig. 6.26 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, texturizado, GFRP sección 50 x 5 mm.	177
Fig. 6.27 Roturas interfase GFRP-hormigón, modalidad 1CA, varios acabados, sección 50 x 5 mm.	179
Fig. 6.28 Roturas interfase GFRP-hormigón, modalidad 1CE, varios acabados, interfase 50 x 50 mm.	180
Fig. 6.29 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, con tornillería sin desplazamiento, M4 6.6.	181
Fig. 6.30 Roturas interfase GFRP-hormigón, modalidad 1CA, con tornillería sin desplazamiento, M4 6.6.	182

Fig. 6.31 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, tornillería sin desplazamiento, M4 6.6.	182
Fig. 6.32 Roturas interfase GFRP-hormigón, modalidad 1CE, tornillería sin desplazamiento, M4 6.6.	184
Fig. 6.33 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, tornillería sin desplazamiento M6 8.8.	185
Fig. 6.34 Rotura probeta híbrida TEX1-2+AR, modalidad 1CA, tornillería sin desplazamiento M6 8.8.	186
Fig. 6.35 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, tornillería sin desplazamiento M6 8.8 + texturizado 7+ combinaciones.	187
Fig. 6.36 Rotura probetas híbridas TEX1-2+texturizado 7+combinaciones, modalidad 1CA, tornillería sin desplazamiento M6 8.8.	188
Fig. 6.37 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, con tornillería con desplazamiento M4 6.6.	189
Fig. 6.38 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, tornillería con desplazamiento M4 6.6.	189
Fig. 6.39 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, tornillería con desplazamiento M6 8.8.	191
Fig. 6.40 Rotura probetas híbridas TEX2-2 + combinaciones, modalidad 1CA, tornillería con desplazamiento M6 8.8.	192
Fig. 6.41 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento, patrón, M6 8.8, par 8 y 16 Nm.	193
Fig. 6.42 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento M6 8.8, par 8 Nm.	195
Fig. 6.43 Rotura probetas híbridas TEX2-2+ combinaciones, modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento M6 8.8, par 8 Nm.	196
Fig. 6.44 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento M6 8.8, par 16 Nm.	197
Fig. 6.45 Rotura probetas híbridas TEX2-2+ combinaciones, modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento M6 8.8, par 16 Nm.	198
Fig. A1.1 Curva tensión-deformación en compresión de los distintos HRF a 28 días.	226
Fig. A1.2 Curvas tensión-deformación de los HRF tras la rotura a flexión en tres puntos a 28 días.	226
Fig. A1.3 4 Vigas de 2 UPN de GFRP pultrusionados unidos a tope, sin capa de compresión.	228
Fig. A1.4: Sección del perfil tipo utilizado en la viga híbrida. Ubicación de las bandas extensométricas y LVDT. Cotas en mm.	231
Fig. A1.5 Alzado, planta y sección de la viga híbrida. Ubicación de las bandas extensométricas y LVDT. Cotas en mm.	232
Fig. A1.6 Viga híbrida HYB_HRF_0 patrón, ensayo a flexión a 4 puntos.	233

Fig. A1.7 Curvas fuerzas-deformación (galgas) de la viga híbrida ALB_HYB_HRF_0 patrón, en centro de luz.	234
Fig. A1.8 Situación de los LVDT, en las vigas híbridas.	234
Fig. A1.9 Curvas fuerza-desplazamiento de la viga híbrida HYB_HRF_0 patrón, en centro de luz.	235
Fig. A1.10 Rotura a flexión 4 puntos de la viga híbrida HYB_HRF_0 patrón.	235
Fig. A1.11 Esquema interfase GFRP-hormigón.	236
Fig. A1.12 Detalle de la interfase más débil resina epoxi-hormigón.	236
Fig. A1.13 Curvas fuerza-deformación de la viga híbrida HYB_HRF_30, en centro de luz.	237
Fig. A1.14 Curvas fuerza-desplazamiento (LVDT) de la viga híbrida HYB_HRF_30, en centro de luz.	237
Fig. A1.15 Rotura a rasante en el ensayo a flexión 4 puntos de la viga híbrida HYB_HRF_30.	238
Fig. A1.16 Detalle de la Rotura a rasante en el ensayo a flexión 4 puntos de la viga híbrida HYB_HRF_30.	239
Fig. A1.17 Viga híbrida HYB_HRF_60, ensayo a flexión a 4 puntos.	239
Fig. A1.18 Curvas fuerza-deformación (galgas) de la viga híbrida HYB_HRF_60, centro de luz.	240
Fig. A1.19 Curvas fuerza-desplazamiento (LVDT) de la viga híbrida HYB_HRF_60, en centro de luz.	240
Fig. A1.20 Rotura a flexión 4 puntos de la viga híbrida HYB_HRF_60.	241
Fig. A1.21 Rotura de los conectores en la viga híbrida HYB_HRF_60.	241
Fig. A1.22 Viga híbrida HYB_HRF_120, ensayo a flexión a 4 puntos.	242
Fig. A1.23 Curvas fuerza-deformación (galgas) de la viga híbrida HYB_HRF_120, en centro de luz.	243
Fig. A1.24 Curvas fuerza-desplazamiento (LVDT) de la viga híbrida HYB_HRF_120, en centro de luz.	243
Fig. A1.25 Rotura a flexión a 4 puntos de la viga híbrida HYB_HRF_120.	244
Fig. A1.26 Rotura a flexión a 4 puntos de la viga híbrida HYB_HRF_120.	244
Fig. A1.27 Curvas carga-flecha en ensayo a flexión a 4 puntos de las viga híbridas.	245
Fig. A1.28 Recuperación de la flecha tras descarga de la viga después de ensayo a flexión a 4 puntos de las viga híbridas.	246

Fig. AII.1 Curvas t/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	253
Fig. AII.2 Curvas t/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	254
Fig. AII.3 Curvas t/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	255
Fig. AII.4 Curvas t/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm, rotura 1.	256
Fig. AII.5 Curvas t/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm, rotura 2.	257
Fig. AII.6 Curvas t/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm, rotura 3.	258
Fig. AII.7 Curvas t/δ , modalidad 1CA, una cara, confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	259
Fig. AII.8 Curvas t/δ , modalidad 1CA, una cara, confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	260
Fig. AII.9 Curvas t/δ , modalidad 1CA, una cara, confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	261
Fig. AII.10 Curvas t/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	262
Fig. AII.11 Curvas t/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	263
Fig. AII.12 Curvas t/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	264
Fig. AII.13 Curvas t/δ , modalidad 1CE, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	265
Fig. AII.14 Curvas t/δ , modalidad 1CE, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	266
Fig. AII.15 Curvas t/δ , modalidad 1CE, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	267
Fig. AII.16 Curvas t/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	268
Fig. AII.17 Curvas t/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	269
Fig. AII.18 Curvas t/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	270
Fig. AII.19 Curvas t/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	271
Fig. AII.20 Curvas t/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	272
Fig. AII.21 Curvas t/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	273

Fig. AII.22 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	274
Fig. AII.23 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	275
Fig. AII.24 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Coliso con tornillería M4 6.y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	276
Fig. AII.25 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	277
Fig. AII.26 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	278
Fig. AII.27 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	279
Fig. AII.28 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	280
Fig. AII.29 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	281
Fig. AII.30 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	282
Fig. AII.31 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	283
Fig. AII.32 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	284
Fig. AII.33 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	285
Fig. AII.34 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 Postesado 8 y 16 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, roturas 1, 2 y 3.	286
Fig. AII.35 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 8 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 1.	287
Fig. AII.36 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 8 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 2.	288
Fig. AII.37 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 8 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 3.	289

- Fig. AII.38** Curvas τ/δ , modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 16 Nm, 290
GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 1.
- Fig. AII.39** Curvas τ/δ , modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 16 Nm, 291
GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 2.
- Fig. AII.40** Curvas τ/δ , modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 16 Nm, 292
GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 3.

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1 Características físicas de los materiales compuestos. Miravete et al., 2007.	15
Tabla 2.2 Tipos de resinas en función de la temperatura de trabajo. Miravete et al., 2007.	16
Tabla 2.3 Características físicas de los materiales compuestos. Miravete et al., 2007.	18
Tabla 2.4 Características físicas de los tipos fibras de vidrio. Miravete et al., 2007.	19
Tabla 2.5 Composición química de la fibra de vidrio tipo E. Miravete et al., 2007.	20
Tabla 2.6 Tipología de vigas en función del material y su forma de procesado (Chakraborty et al., 2011).	44
Tabla. 3.1 Relación de ensayos previos para la selección de f_c y L_{adh} .	87
Tabla 3.2 Relación de ensayos previos para la selección del tipo de texturizado.	89
Tabla 3.3 Relación de ensayos previos para la selección de HRF y sección GFRP.	89
Tabla 3.4 Relación de ensayos previos para la selección de tornillería, par de apriete y recubrimiento.	91
Tabla 3.5 Programa experimental pull-out, variables de adherencia, grupo 1.	91
Tabla 3.6 Programa experimental pull-out, variables de adherencia, subgrupo 2.1.	92
Tabla 3.7 Programa experimental pull-out, variables de adherencia, subgrupo 2.2.	93
Tabla 3.8 Programa experimental pull-out, variables de adherencia, subgrupo 2.3.	93
Tabla 3.9 Programa experimental pull-out, variables de adherencia, grupo 3.	94
Tabla 3.10 Dosificaciones de los hormigones del programa experimental.	95
Tabla 3.11 Características mecánicas de los lotes de hormigón.	98
Tabla 3.12 Propiedades físico-químicas de la fibra de vidrio tipo E. (Mukherjee, 2007).	99
Tabla 3.13 Caract. mecánicas de los perfiles pultrusionados de GFRP. Nioglas (2014).	100
Tabla 3.14 Características mecánicas a tracción de las probetas de GFRP.	100
Tabla 3.15 Identificación 1 de lotes para las probetas híbridas en ensayo de pull-out.	102
Tabla 3.16 Identificación 2 de lotes para las probetas híbridas en ensayo de pull-out.	103
Tabla 3.17 Identificación 3 de lotes para las probetas híbridas en ensayo de pull-out.	104
Tabla 3.18 Identificación 4 de lotes para las probetas híbridas en ensayo de pull-out.	105
Tabla. 6.1 Códigos y nomenclaturas de probeta de los ensayos previos para la selección de f_c y L_{adh} .	146

Tabla 6.2 Códigos y nomenclaturas de las probetas en los ensayos previos para la selección de la sección del perfil de GFRP y el uso de HRF.	153
Tabla 6.3 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm.	173
Tabla 6.4 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm.	175
Tabla 6.5 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CA, varios acabados y texturizados, GFRP interfase 50 x 50 mm.	178
Tabla 6.6 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CE, texturizado, GFRP interfase 50 x 50 mm.	178
Tabla 6.7 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CA, tornillería TEX1 M4-6.6 sin desplazamiento, GFRP interfase 50 x 50 mm.	183
Tabla 6.8 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CE, tornillería TEX1 M4-6.6 sin desplazamiento, GFRP interfase 50 x 50 mm.	184
Tabla 6.9 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CA, tornillería sin desplazamiento M6 8.8.	186
Tabla 6.10 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CA, (TEX1-2) tornillería sin desplazamiento M6 8.8 + texturizado 7+ combinaciones.	187
Tabla 6.11 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CA, tornillería con desplazamiento M4 6.6.	190
Tabla 6.12 Parámetros de caracterización de la adherencia, Modalidad 1CE, tornillería con desplazamiento M4 6.6.	190
Tabla 6.13 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CA, tornillería con desplazamiento M6 8.8.	192
Tabla 6.14 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento, patrón M6 8.8, par 8 y 16 Nm.	194
Tabla 6.15 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento M6 8.8, postesado 8 Nm.	195
Tabla 6.16 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento M6 8.8, postesado 16 Nm.	198
Tabla A1.1 Dosificación del hormigón en función de la cantidad de fibras de refuerzo en kg/m ³ .	224
Tabla A1.2 Propiedades mecánicas del HRF-80 /0/30/60/120 Kg/m ³ .	225
Tabla A1.3 Propiedades mecánicas de los laminados de GFRP, datos Fibrotec, S.L.	227
Tabla A1.4 Sensores/parámetros de caracterización de vigas híbridas GFRP+HRF.	229
Tabla A1.5 Tipología de vigas híbridas GFRP+HRF.	230
Tabla A1.6 Características de vigas híbridas pultrusionadas y vigas pultrusionadas.	246

Tabla AII.1 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	253
Tabla AII.2 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	254
Tabla AII.3 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	255
Tabla AII.4 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm, rotura 1.	256
Tabla AII.5 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm, rotura 2.	257
Tabla AII.6 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm, rotura 3.	258
Tabla AII.7 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	259
Tabla AII.8 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	260
Tabla AII.9 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	261
Tabla AII.10 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	262
Tabla AII.11 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	263
Tabla AII.12 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	264
Tabla AII.13 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	265
Tabla AII.14 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	266

Tabla AII.15 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad ICE, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	267
Tabla AII.16 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad ICE, una cara, sin confinamiento hormigón. Tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	268
Tabla AII.17 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad ICE, una cara, sin confinamiento hormigón. Tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	269
Tabla AII.18 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad ICE, una cara, sin confinamiento hormigón. Tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	270
Tabla AII.19 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad ICA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	271
Tabla AII.20 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad ICA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	272
Tabla AII.21 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad ICA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	273
Tabla AII.22 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad ICE, una cara, sin confinamiento hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	274
Tabla AII.23 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad ICE, una cara, sin confinamiento hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	275
Tabla AII.24 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad ICE, una cara, sin confinamiento hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	276
Tabla AII.25 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad ICA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	277
Tabla AII.26 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad ICA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	278

Tabla AII.27 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	279
Tabla AII.28 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	280
Tabla AII.29 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	281
Tabla AII.30 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	282
Tabla AII.31 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.	283
Tabla AII.32 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.	284
Tabla AII.33 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.	285
Tabla AII.34 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 Postesado 8 y 16 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, roturas 1, 2 y 3.	286
Tabla AII.35 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 8 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 1.	287
Tabla AII.36 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 8 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 2.	288
Tabla AII.37 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 8 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 3.	289

Tabla AII.38 *Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 16 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 1.* 290

Tabla AII.39 *Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 16 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 2.* 291

Tabla AII.40 *Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 16 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 3.* 292

NOTACIÓN

b_c	Ancho bloque de hormigón
b_p	Ancho lámina del laminado FRP
CFRP	Carbon Fiber Reinforced polymer. Polímero reforzado con fibras de carbono
ELS	Estados Límite de Servicio
ELU	Estados Límite de Rotura
f_c	Resistencia del hormigón en MPa
f_{ck}	Resistencia característica del hormigón a 28 días en MPa
f_{ctm}	Resistencia media del hormigón a tracción en MPa
FRP	Fiber Reinforced Polymer. Polímero reforzado con fibras
G_f	Energía de fractura en Julios
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer. Polímero reforzado con fibras de vidrio
δ	Deslizamiento en mm
$\delta_{\tau \text{ máx}}$	Deslizamiento en tensión tangencial máxima en MPa
$\delta_{\tau \text{ pico}}$	Deslizamiento para la tensión pico en mm
τ_{despegue}	Tensión tangencial para un deslizamiento de 0.01 mm
$\tau_{\text{máx}}$	Tensión tangencial máxima en MPa
τ_{pico}	Tensión pico en MPa
$\tau_{\text{post-pico}}$	Tensión post-pico en MPa
τ_{residual}	Tensión tangencial residual en MPa

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

CAPÍTULO I.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.- INTRODUCCIÓN

El empleo de materiales compuestos avanzados ha proliferado notablemente en el sector de la ingeniería civil a lo largo de los últimos años. Las principales características y ventajas que aportan estos materiales suelen estar relacionadas con la ligereza del peso, alta resistencia mecánica, durabilidad y neutralidad electromagnética. Varios sistemas estructurales innovadores que combinan hormigón con materiales compuestos avanzados han demostrado ser una solución viable y eficiente en comparación con los sistemas convencionales.

Existen importantes aplicaciones de los materiales compuestos en ingeniería estructural. Entre las más recientes se incluyen las que combinan materiales poliméricos, desempeñando la función de alma, junto con una capa de hormigón comprimido en una misma sección.

Un ejemplo claro de ello es el Puente de Carretera en la Autovía del Cantábrico (tramo Vergarozadas - Soto del Barco), cuya estructura híbrida consiste en vigas de fibra de carbono de tipo artesa que se complementa con capa de compresión de hormigón (véase la Figura 1.1).



Fig. 1.1 Primer puente híbrido construido en España (2004). Acciona Infraestructuras.

La fabricación de materiales compuestos mediante procesos automatizados puede proporcionar hoy en día componentes de alta calidad a un precio bastante razonable. Uno de tales procesos es la pultrusión, que consiste en que las fibras pasen mediante tracción a través de una matriz en la que se inyecta una resina polimérica que confiere, tras un proceso de curado, las cualidades de refuerzo y estabilidad dimensional deseadas.

Las estructuras de polímero reforzado con fibras de vidrio (GFRP) pultrusionados son muy eficientes para su utilización como vigas estructurales (Ashby, 1991), y son, de hecho, comúnmente utilizados en aplicaciones estructurales de pultrusionado de perfiles de diferentes secciones. Sin embargo, poseen algunas desventajas:

- 1.- El ala de compresión es más débil que el ala de tracción, debido a que el GFRP posee una resistencia a compresión del orden de la mitad de su resistencia a tracción, lo que suele derivar en colapso debido a fenómenos locales de pandeo (Banks y Rhodes, 1983; Holmes y Just, 1983).
- 2.- El colapso suele ser catastrófico, sin previo aviso, debido a que el GFRP presenta un comportamiento marcadamente elástico-lineal con una rotura frágil.
- 3.- El diseño suele estar regido por la rigidez (el módulo de elasticidad del GFRP se sitúa en torno a 50 GPa), resultando en ocasiones el uso excesivo de material compuesto para satisfacer ciertos requisitos de deformación en estados límite de servicio.

En vista de lo expuesto, es posible realizar un diseño más eficiente de este tipo de secciones, del siguiente modo: las compresiones en la sección deben ser soportadas por un material con resistencia a compresión suficientemente alta, como es el caso del hormigón, material que al mismo tiempo aporta un aumento de rigidez a un coste bajo.

Así, se contempla que el ala inferior y el alma del perfil recojan las tracciones de la sección, mientras que la capa de hormigón puesta en el ala superior del perfil soporte las compresiones (véase la Figura 1.2).

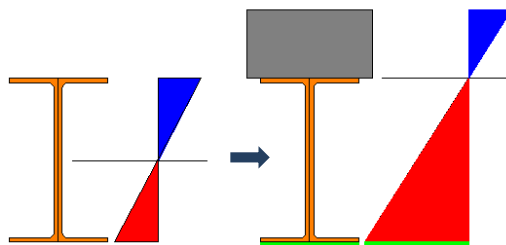


Fig. 1.2 Distribución tensional en la sección transversal de un sistema híbrido.

Esta concepción de sección compuesta, unida a que ambos materiales tienen una durabilidad excelente, supone que el mantenimiento sería

mínimo frente al caso de estructuras tradicionales como las de acero o de hormigón armado. Es por ello que el ahorro económico a lo largo de la vida útil de la estructura puede ser importante.

1.2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El sistema híbrido puede fallar en cualquiera de los elementos que intervienen: por alguno de los componentes adheridos, por el adhesivo o por la interfase. Si lo hace en la interfase el fallo se produce exclusivamente por una preparación incorrecta de las superficies a unir, para un bajo nivel de carga. La rotura del adhesivo es indeseable y, en su caso, es debida a una mala elección del adhesivo ya que se cuenta en la actualidad con una extensa variedad de adhesivos de alta calidad. El último modo de fallo se da en los componentes adheridos, bien en el hormigón o en el FRP, resultando un fallo catastrófico debido a la fragilidad de ambos materiales.

Desde el punto de vista de fallo mecánico, de los componentes adheridos existen una serie de modos de fallo que se pueden clasificar en:

- El pandeo y cizalla en el alma, (Barros y Lebre, 2010; Duc et al., 2010; Mutsuyoshi et al., 2010).
- Flexión, (Fam y Honickman, 2010).
- Inestabilidad lateral, (Deskovic et al., 1995; Duc et al., 2010; Chakraborty et al., 2011).
- Fractura frágil del hormigón, (Mutsuyoshi et al., 2010; Chakraborty et al., 2011; Deskovic et al., 1995).

Se han analizado modos de fallo como el cortante en el adhesivo (Duc et al., 2010; Mutsuyoshi et al., 2010), el cortante en el hormigón, (Mutsuyoshi et al., 2010) y el fallo de adherencia hormigón-FRP (Barros y Lebre, 2010; Liu et al., 2010).

Varios ensayos caracterizados por diversos autores (Barros y Lebre, 2010; Liu et al., 2010; Fam y Honickman, 2010) muestran que la principal causa del fracaso es la falta de adherencia entre hormigón y FRP, a pesar de su insistencia en que no es el modo de fallo habitual o relevante en estas estructuras híbridas.

Para que esta estructura híbrida obtenga su máximo rendimiento, la unión entre ambos materiales debe ser perfecta. El concepto estructural en las

vigas híbridas implica la adherencia total para deslizamientos inferiores a 1 mm, según los estudios de Barros y Lebre (2010) y Fam y Honickman (2010) en los que las estructuras híbridas analizadas alcanzan el máximo rendimiento mecánico entre 1 y 4 mm de deslizamiento. Sin embargo, la pérdida de adherencia causa el deslizamiento FRP-hormigón impidiendo alcanzar su capacidad plena de carga, siendo la rotura frágil.

Es por ello que para centrar el problema se planteó un estudio experimental inicial (Anexo I) que consta de cuatro vigas híbridas, que se ensayan a flexión. Se realiza un diseño de vigas híbridas donde todos los modos de fallo conocidos estén diseñados para evitar su rotura. El resultado del estudio indica que la adherencia entre el hormigón y el FRP es un modo de fallo que puede producirse con rotura frágil, tal y como se aprecia en la Figura 1.3, siendo el resto de modos de fallo fácilmente solucionables.



Fig. 1.3 Vista general y detalle del ensayo de viga híbrida con fallo en la unión. Anexo 1.

En consecuencia, en la presente Tesis Doctoral se lleva a cabo un estudio experimental de la adherencia entre el GFRP y el hormigón. Se pretende garantizar, en este sistema híbrido de perfiles pultrusionados de GFRP-hormigón, la transferencia de forma adecuada de los esfuerzos de cizalla y arrancamiento entre ambos materiales a través de su interfase.

Un mejor conocimiento y aportaciones a la mejora de esta unión entre ambos materiales harán viable el máximo aprovechamiento del concepto de estos novedosos sistemas híbridos.

Es por ello que se hace necesario utilizar métodos de ensayos menos costosos, y que agilicen dicho estudio. Se plantea la adaptación del ensayo de *pull-out* tradicional para estudiar estos fenómenos de cizalla y arrancamiento, así como la posibilidad de establecer un procedimiento

adecuado a tal fin, donde de una forma clara y sencilla se puedan aplicar distintos tipos de tratamientos superficiales y/o uniones mecánicas entre los materiales, de modo que este ensayo sea representativo de cara a estudiar las estructuras híbridas.

1.3.- OBJETIVOS

1.3.1.- OBJETIVOS GENERALES

Los objetivos generales de la presente Tesis Doctoral son:

1.- Establecer una metodología de ensayo que permita caracterizar el comportamiento adherente de los sistemas híbridos de perfiles pultrusionados de GFRP-hormigón. Dada la naturaleza de la problemática a tratar se pretende que el método de ensayo ofrezca la posibilidad de analizar diferentes tratamientos superficiales y mecánicos en un contexto de sencillez operativa y con un coste reducido.

Para ello se toma como punto de partida la tipología de ensayo de arrancamiento (*pull-out*) que, como principal resultado, proporciona información sobre las tensiones adherentes (τ) y deslizamientos (δ) producidos entre los materiales ensayados.

2.- Analizar el comportamiento adherente. Los resultados de los ensayos realizados durante el proceso de definición del método propuesto, junto con una campaña de verificación de su viabilidad, servirán de base para avanzar en el estudio de la tensión adherente (τ) y el deslizamiento (δ), entre el GFRP y el hormigón, mediante la tipología de ensayo *pull-out*, considerando distintos tipos de uniones.

1.3.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.- Adecuar el método tradicional de *pull-out* para barras de FRP o acero, a las probetas tipo de GFRP de sección rectangular.

2.- Establecer los criterios y bases del proceso de preparación de las interfases mediante una serie de tratamientos superficiales y uniones mecánicas.

3.- Adecuar y verificar la metodología de ensayo de las propuestas para los distintos tipos de enlace en las vigas híbridas.

- 4.- Analizar la relación entre la tensión tangencial y el deslizamiento, en la interfase GFRP-hormigón, mediante ensayos de *pull-out*.
- 5.- Estudiar la influencia de las fijaciones mecánicas, con y sin desplazamiento.
- 6.- Estudiar la influencia del mecanismo del confinamiento activo del hormigón, postesando la tornillería.
- 7.- Estudiar la influencia de los tratamientos superficiales y mecánicos en la adherencia del GFRP-hormigón.
- 8.- Confirmar la repetitividad, tanto de la metodología de ensayo como de las variables de mejora de adherencia.

1.4.- ESTRUCTURA Y CONTENIDO DE LA TESIS

La estructura de la presente Tesis Doctoral está reflejada en ocho capítulos y dos anexos:

En el **capítulo I** se muestra la **introducción**, planteamiento del problema y cuáles son los **objetivos** y la estructura de la Tesis.

En el **capítulo II**, en un primer bloque está referenciado el **estado del arte** en torno a las estructuras híbridas y sus modos de fallo, para poder entender el problema que después se estudiará: la adherencia entre el hormigón y el GFRP en las vigas híbridas. Después, en un segundo bloque se muestra el estado de la técnica con respecto a la adherencia en perfiles rectangulares de GFRP. Por otro lado, se presenta información sobre barras de GFRP y las variables de adherencia que se pretenden estudiar.

En el **capítulo III** se desarrolla el **plan experimental**, en dos grandes bloques: uno que conduce a seleccionar una serie de parámetros (longitud de adherencia, tipo de hormigón, sección de GFRP) con unos ensayos previos, para posteriormente en el segundo bloque poder estudiar las variables de adherencia, en las diferentes tipologías de probetas a analizar.

En el **capítulo IV** se muestra cómo se **preparan las superficies**, tanto las interfases entre el perfil de GFRP y el hormigón, para mejorar la adherencia

en la interfase, como las superficies que no van a estar en contacto directo con el hormigón.

En el **capítulo V** se describe la **metodología experimental**. Se establece un único **tipo de ensayo**, el de **pull-out**, distinguiendo cuatro modalidades.

En el **capítulo VI** se presentan los resultados, el análisis y la discusión de los mismos, tanto de los ensayos previos como de los ensayos realizados para caracterizar la adherencia.

En el **capítulo VII** se presentan las conclusiones y futuras líneas de investigación.

En el **capítulo VIII** se referencia la bibliografía.

Finalmente se presentan dos anexos:

El **anexo I**, presenta los resultados de la identificación del problema de adherencia en las vigas híbridas.

El **anexo II** presenta los resultados de *pull-out*, incluyendo gráficas y Tablas con la información relativa a las curvas tensión de adherencia-deslizamiento de todos los ensayos realizados, con sus correspondientes repeticiones.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO II.- ESTADO DEL ARTE

2.1.- INTRODUCCIÓN

Un sistema híbrido resulta de la integración de dos o más materiales, de origen orgánico e inorgánico, en una misma sección resistente con el fin de aprovechar de forma adecuada y complementaria las distintas cualidades de dichos materiales (Elmadhdy et al., 2008; Deskovic, 1993; Deskovic et al., 1991; Deskovic et al., 1995).

Es de reciente interés la aplicación de materiales o estructuras híbridas, en los campos de la ingeniería aeronáutica y la ingeniería naval, ya que se aprovechan las altas capacidades mecánicas de los materiales y el bajo peso resultante al combinarlos, si bien es cierto que en el sector de la ingeniería civil se han realizado pocas estructuras siendo éste un campo muy prometedor.

Hasta el momento, en la ingeniería civil, el uso de estructuras híbridas está focalizado hacia el campo de la rehabilitación y el refuerzo, en el que la aplicación de polímeros reforzados con fibra (FRP) se combinan reforzando la estructura de hormigón armado para mejorar el comportamiento a flexión y cortante, además de mejorar el confinamiento del hormigón en esta línea de investigación nombrar algunos autores (Oller, 2005; Marí et al., 2011; Ferrerira et al., 2013; Escrig et al., 2015).

En estos últimos años, la configuración ingenieril toma un giro, de modo que no se pretende reforzar el hormigón utilizando compuestos poliméricos, sino todo lo contrario, es el hormigón el que refuerza al composite polimérico, fundamentalmente para dotar a la estructura híbrida de mejoras mecánicas, aumentar la rigidez del material y dotar de mayor durabilidad al material.

Estos materiales compuestos, están formados de fibras continuas de vidrio, aramida, o carbono embebidas en una matriz de resina polimérica como poliéster, epoxi o viniléster. En estos compuestos, las fibras se encuentran en gran volumen en las direcciones de gran esfuerzo. Las propiedades de interés ofrecidas por estos materiales son las altas resistencias a tracción, bajo peso, nula tendencia a la corrosión, alta resistencia a la fatiga y neutralidad electromagnética (Zhao et al., 2010).

2.2.- DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS HÍBRIDOS

2.2.1.- SISTEMA HÍBRIDO

El sistema híbrido es la confección por separado de sus componentes para su posterior unión; se establecen tres formas:

- Realizar en primer lugar el material reforzado con fibra polimérica (FRP). Una vez confeccionado, se procede a elaborar un encofrado recuperable en la zona de compresión de la sección híbrida para poder verter el hormigón en su estado fresco, para posteriormente utilizar el sistema de unión deseado, como resinas resistentes a la humedad, tornillería, conectores o uniones mixtas.
- Realizar el FRP en primer lugar; posteriormente, y sin usar ningún tipo de encofrado, se colocan prelosas de hormigón prefabricado en la capa de compresión, para posteriormente unir ambos materiales con resinas, tornillería o uniones mixtas.
- Utilizar la técnica del enrollamiento (*wrapping*), donde perfil de FRP y capa de compresión de hormigón son envueltos con un laminado de CFRP, independientemente si se utiliza el primer sistema o el segundo descrito con anterioridad.

2.2.2.- COMPONENTES DEL SISTEMA HÍBRIDO

2.2.2.1.- HORMIGÓN

Los hormigones que se utilizan para el sistema híbrido, son tanto los hormigones convencionales usados hasta el momento, como los hormigones de alta resistencia (HAR), hormigones autocompactantes (HAC) y los hormigones reforzados con fibras (HRF). Depende del elemento estructural que se diseñe se puede utilizar el hormigón que mejores prestaciones tenga para su uso particular.

También se puede utilizar el hormigón de ultra alta resistencia denominado "UHPC", que posee una gran capacidad mecánica a compresión, tracción y flexión. Es por ello que se reduce la sección de la capa de compresión minimizando el peso de la estructura híbrida.

Los materiales que se utilizan serán acordes con las características físicas y de durabilidad exigibles al material. Los materiales son cemento, agua, arena, grava, fillers, adiciones, aditivos y fibras de acero, en su caso.

2.2.2.2.- GFRP, POLÍMERO REFORZADO CON FIBRAS DE VIDRIO

Este sistema artificial está formado por dos o más constituyentes de diferente composición, no miscibles, donde coexisten dos constituyentes básicos, matriz y refuerzo, y un tercero originado de la interacción entre los dos primeros, la interfase.

La matriz es el constituyente continuo del material, mantiene el refuerzo en su sitio y lo protege de las agresiones exteriores. Transfiere la sollicitación mecánica aplicada a la interfase. En materiales con direcciones preferentes, sus propiedades mecánicas condicionan las propiedades mecánicas de aquellas direcciones no preferentes. Limita la temperatura de trabajo del material compuesto. Se utilizan como matrices tanto metales como polímeros o cerámicas, dando lugar a tres grandes familias de materiales compuestos en función de la naturaleza de la matriz. Este trabajo solo trata de matrices poliméricas. La Tabla 2.1 muestra las características comparadas de tres de las resinas más utilizadas.

Los materiales compuestos de matriz polimérica utilizados en la presente Tesis Doctoral, se caracterizan por sus buenas propiedades elásticas y resistentes específicas, como consecuencia de su baja densidad. Presentan una baja conductividad térmica y eléctrica junto con una buena resistencia química. En las Tablas 2.1 y 2.2 se observan las características físicas de los materiales compuestos.

Tabla 2.1 Características físicas de los materiales compuestos. (Miravete et al., 2007).

Material	R. Específica	R. Tracción_MPa	E_MPa	Coef. Expansión_10 ⁻⁶ /°C
Poliéster	1,28	45-90	2,5-4,0	100-110
Viniléster	1,07	90	4	80
Epoxi	1,03	90-110	3,5	45-65

Tabla 2.2 Tipos de resinas en función de la temperatura de trabajo (Miravete et al., 2007).

Temperaturas			
Bajas	Medias	Medias - Altas	Altas
			Bismaleimida
Poliéster	Viniléster	Fenólica	Poliimida
	Epoxi		Esteres cianato
			Polieteramida

La incorporación de refuerzos de carácter cerámico, tales como fibra de vidrio o de carbono, o incluso poliméricas (KEVLAR o polietileno) permite incrementos de las propiedades mecánicas globales sin un incremento importante de la densidad media del material.

El refuerzo es el constituyente discontinuo del material. Su misión principal es mejorar o complementar las propiedades de la matriz en determinadas direcciones prefijadas o de forma aleatoria.

Los refuerzos se clasifican en función de su geometría: partículas, monofilamentos, fibra corta y fibra larga. Destacan, por sus propiedades, las fibras cerámicas (fibras de carbono, de vidrio, boro, carburo de silicio, alúmina, nitruros...) y las fibras poliméricas (fibras de aramida, polietileno...). En el seno de un material compuesto pueden coexistir varios tipos de refuerzo que aporten distintas características al material final.

El efecto sinérgico es producto de la combinación de matriz y refuerzo. El factor clave para la aparición de este efecto es la existencia de una interfase matriz-refuerzo con unas propiedades físicas propias. Dado que la interfase es la responsable de los procesos de transferencia de carga mecánica y de aportar continuidad al material, la respuesta del material ante sollicitaciones externas se verá fuertemente condicionada por la naturaleza de ésta.

La anisotropía del material, además de ir dirigida a la optimización y aprovechamiento de las propiedades de la matriz y refuerzo en aquellas direcciones que más interese, a través del diseño de las orientaciones relativas entre capas, se puede inducir la aparición de momentos flectores, torsores, etc., ante la presencia de esfuerzos de otra naturaleza.

El control de las propiedades de la interfase, refuerzo y matriz, y el control de la orientación y distribución del refuerzo, requieren de procesos de fabricación complejos y costosos, lo que reduce su competitividad económica. Su uso se ha limitado a aplicaciones en las que el peso final del material es un factor clave o donde el coste del material no sea un impedimento como es el caso de vehículos y embarcaciones de alto rendimiento: F1, embarcaciones de la copa América y aeronáutica.

Resinas de poliéster:

Constituye una de las familias más importantes de las resinas termoestables utilizadas en los materiales compuestos como matriz y constituirá la base de los productos utilizados en este trabajo.

El curado de una resina de poliéster está afectado por el uso de iniciadores químicos y aceleradores así como por aplicación de calor o exposición a la radiación. En el curado a temperatura ambiente, el acelerador en un pequeño porcentaje, es añadido a la resina, pre-acelerada, ya que así se evitan posibles accidentes que podrían ocurrir si el acelerador y el iniciador se mezclarán directamente, pues reaccionan de forma explosiva.

En la práctica, la resina de poliéster se obtiene por policondensación del anhídrido maleico, anhídrido ftálico y propilenglicol. El polímero obtenido es disuelto en estireno. Para el suministro a los usuarios, la mezcla se estabiliza con inhibidores (hidro equinona).

El endurecimiento de las resinas de poliéster se puede provocar según la temperatura: a temperatura ambiente, con la ayuda de un acelerador y a temperatura elevada 90 °C sin acelerador.

Las resinas de endurecimiento a temperatura ambiente son un sistema versátil que puede ser adaptado a muchos procesos y a especificaciones de prestaciones finales.

La polimerización conduce al endurecimiento y se realiza sin eliminación de productos secundarios y sin necesidad de presiones ni temperaturas elevadas.

Los principales tipos de resinas de poliéster son, la ortoftálica, que es una resina de uso general y la isoftálica, que tiene propiedades de resistencia superiores al desgaste y a los agentes químicos.

El uso de cargas a modo de filler se realiza para abaratar costes de materia prima en la matriz y mejorar la trabajabilidad del material

compuesto al pasar por la matriz que define la forma del producto final en la pultrusionadora.

Fibra de vidrio:

Es el tipo de refuerzo más utilizado actualmente en la fabricación de materiales compuestos. Esto se debe a su gran disponibilidad, sus buenas características mecánicas y su bajo coste. La Figura 2.1 y la Tabla 2.3 muestran su respuesta mecánica en comparación con otras fibras normalmente utilizadas para estos fines, y otros materiales. Entre las fibras de vidrio, el vidrio E (Eléctrico) representa casi la totalidad del vidrio textil utilizado en materiales compuestos, más del 90% de los refuerzos, de uso general y buenas propiedades eléctricas. La primera aplicación de este tipo fue el aislamiento de conductores eléctricos sometidos a altas temperaturas. La Figura 2.4 muestra sus características comparadas con las de otras tipologías.

Tabla 2.3 Características físicas de los materiales compuestos (Miravete et al., 2007).

Material	E_T GPa	σ_T GPa	ρ g/cm ³	E_T/ρ (10 ⁹ ·N·m)/kg	σ_T/ρ (10 ⁹ ·N·m)/kg
Fibras					
E-glass	72	3.5	2.54	29	1.38
S-glass	86	4.6	2.48	35	1.85
Carbono de alto módulo	390	2.1	1.90	205	1.10
Carbono de alta resistencia	240	2.9	1.77	136	1.64
Kevlar-49	130	2.8	1.45	87	1.87
Kevlar-29	60	2.8	1.44	42	1.80
Boro	385	2.8	2.63	146	1.1
Spectra-1000	117	2.6	0.97	120	2.8
Materiales convencionales					
Acero	210	0.34-2.1	7.8	27	0.043-0.27
Aleaciones de aluminio	70	0.14-0.62	2.7	26	0.052-0.23
Vidrio	70	0.7-2.1	2.5	28	0.28-0.84
Tungsteno	350	1.1-4.1	19.3	18	0.057-0.21
Berilio	300	0.7	1.4	164	0.38

E_T : módulo de tracción; σ_T : tensión de tracción; ρ : densidad;

E_T/ρ : módulo específico; σ_T/ρ : tensión específica

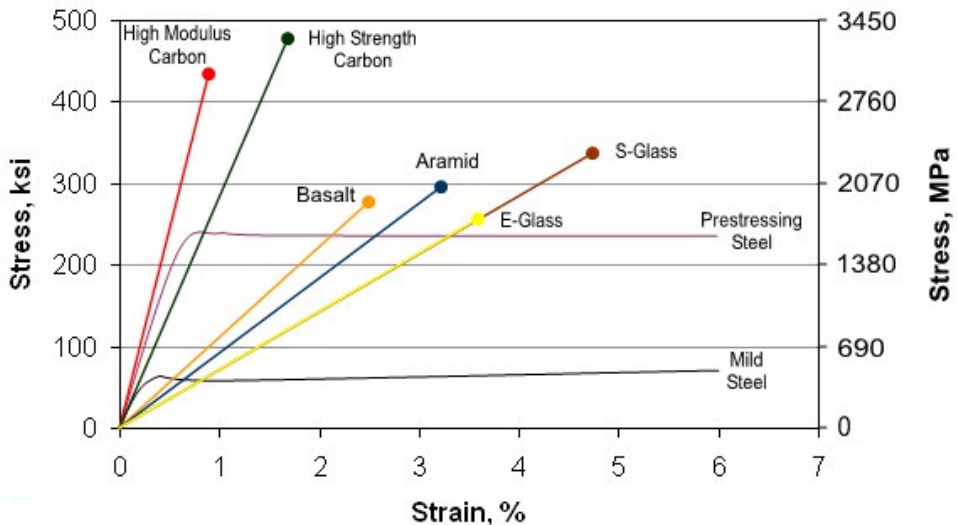


Fig. 2.1 Características físicas de los materiales de refuerzo, www.build-on-prince.com, (2015).

Tabla 2.4 Características físicas de los tipos fibras de vidrio (Miravete et al., 2007).

Tipo	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de hilo (micras)	5-13	10-20	10	10
Densidad (kg/m ³)	2500	2540	2480	2590
Módulo Elasticidad (GPa)	69	72	86	85
Resistencia atracción (GPa)	3,1	3,5	4,6	3,4-4,4
Módulo específico	28	28	34	33
Coef. Expansión Térmica 10 ⁻⁶ /°K	8,6	5	5,1	5

La fibra de vidrio está formada fundamentalmente por sílice, que se asocia a diversos óxidos (alúmina, alcalinos) y se obtiene por fusión de la mezcla de estas materias, pasando por la hilera y sometiéndose a una operación de estirado. En la Tabla 2.5, se presenta la composición química de la fibra de vidrio tipo E.

Tabla 2.5 Composición química de la fibra de vidrio tipo E (Miravete et al., 2007).

Componente	Cantidad %
SiO ₂	53-56
Al ₂ O ₃	14-15
CaO	17-22
MgO	1
Na ₂ /K ₂ O	0,8
Fe ₂ O ₃	0,3
B ₂ O ₃	6-8

Las principales características de la fibra de vidrio son:

- Alta adherencia fibra-matriz, gracias a los recubrimientos apropiados para la mayoría de las matrices orgánicas.
- Resistencia mecánica, siendo su resistencia específica (tracción/densidad) superior a la del acero.
- Características eléctricas, es aislante eléctrico incluso en espesores reducidos. Tiene buena permeabilidad dieléctrica y es permeable a las ondas electromagnéticas.
- Incombustibilidad, es un material mineral, la fibra de vidrio es incombustible por naturaleza. No propaga la llama ni origina con el calor humos ni toxicidad.
- Estabilidad dimensional, poco sensible a las variaciones de temperatura e higrometría, tiene un bajo coeficiente de dilatación.
- Compatibilidad con las materias orgánicas. Su aptitud de recibir diferentes ensimajes creando un puente de unión entre el vidrio y la matriz le confieren la posibilidad de asociarse a numerosas resinas sintéticas, así como a ciertas matrices minerales, tales como el yeso y el cemento.
- Imputrescibilidad, no sufre ninguna alteración. Es insensible a la acción de los roedores y de los insectos.

- Débil conductividad térmica. La utilización de los materiales compuestos en la construcción permite suprimir los puentes térmicos, dando lugar a un considerable ahorro de energía.

Las presentaciones de la fibra de vidrio a escala industrial se relacionan con su uso:

- La facilidad de manipulación y colocación.
- Regularidad del gramaje y espesor.
- Continuidad del refuerzo.
- Facilidad de impregnación.

2.2.2.3.- UNIÓN

La unión de los materiales que constituyen el sistema híbrido puede realizarse de cuatro formas distintas: uniones químicas, uniones mecánicas, uniones por confinamiento y uniones mixtas o combinadas.

En las **uniones químicas**, el uso de adhesivos es una de las aplicaciones más importantes en la industria. Al utilizar los adhesivos no se modifican las propiedades de los sustratos ni de los componentes adheridos. Se trata de un material capaz de mantener unidos dos materiales sólidos, proporcionando la fuerza de atracción física necesaria entre las dos superficies. El material al cual se adhiere el adhesivo se denomina sustrato o adherente.

Los adhesivos ofrecen altas prestaciones gracias al conjunto de interacciones físicas y químicas en la interfase adhesivo/adherente y en ocasiones superiores a las de otras soluciones para el ensamblaje y el sellado con las ventajas en cuanto a ahorro de costes.

Las uniones adhesivas presentan las siguientes ventajas con respecto a otros métodos de ensamblaje de materiales, distribución uniforme de tensiones, rigidización de las uniones, no se produce distorsión del sustrato, permiten la unión económica de distintos materiales, uniones selladas, aislamiento, reducción del número de componentes, mejora del aspecto del producto, compatibilidad del producto, uniones híbridas, se evitan la concentración de tensiones.

Los adhesivos son puentes entre las superficies de los sustratos, tanto si son del mismo como si son de distinto material. El mecanismo de unión depende de la fuerza de unión del adhesivo al sustrato o adhesión y de la fuerza interna del adhesivo o cohesión.

Se diseña normalmente las formulaciones adhesivas para lograr que las fuerzas adhesivas sean siempre superiores a las cohesivas. De este modo, conociendo las propiedades mecánicas del adhesivo se puede evaluar y, por tanto predecir, el comportamiento mecánico de una unión adhesiva (Giner y Albelda, 2001).

La naturaleza y la magnitud de las tensiones que se esperan durante el servicio del ensamblaje deben conocerse antes de decidir el tipo de adhesivo que se debe emplear.

Los esfuerzos mecánicos actúan sobre los conjuntos ensamblados como esfuerzos de tracción, compresión, flexión, torsión y cortadura, provocando así las tensiones. Aun así, las tensiones no aparecen únicamente como consecuencia directa de transmitir fuerzas o energías, sino que también se pueden dar por la aparición de fenómenos secundarios que acompañan a los cambios de temperatura.

Esquemáticamente, se puede hablar de los siguientes tipos de solicitaciones sobre las uniones adhesivas: esfuerzos normales de tracción y de compresión, esfuerzos de cortadura o cizalla, esfuerzos de desgarro y esfuerzos de pelado.

Para conseguir uniones adheridas correctas hay que plantear durante la etapa de diseño un trazado que evite en lo posible esfuerzos que no sean de tracción o de cortadura en las uniones adhesivas. Un paso extremadamente importante durante el proceso de diseño de la junta adhesiva es establecer los requisitos de la aplicación. Propiedades como la resistencia a cortadura, la resistencia a impacto, la pérdida de resistencia por envejecimiento térmico, las tolerancias de montaje (holguras), la resistencia a la humedad, a nieblas salinas y a disolventes, los tiempos de manipulación requeridos y los límites aceptables para cualquiera de tales pruebas son ejemplos de características que deben ser especificadas.

Tanto el diseño como la elección del adhesivo deben acomodarse a la aplicación, evitando en la medida de lo posible juntas adhesivas sobredimensionadas, que suelen encarecer de forma desproporcionada e innecesaria los costes de montaje. Los factores geométricos que se consideran en primer lugar son la anchura de la adhesión, la longitud de solapamiento y los espesores de adhesivo y sustratos. La resistencia a

cortadura es directamente proporcional a la anchura de solapamiento. Sin embargo, la relación entre longitud de solapamiento y resistencia a cizalla no es lineal, aunque se produce un incremento. Esto es debido a que las tensiones se acumulan en los extremos de la zona de solapamiento.

La longitud y la anchura no son las únicas variables geométricas que influyen en la resistencia de la adhesión. La carga a partir de la cual un sustrato comenzará a deformarse plásticamente depende de su rigidez y grosor. Sucede con frecuencia que la resistencia de adhesión de dos piezas delgadas supera el límite elástico y la resistencia última de los sustratos.

Consideraciones en el diseño:

- Utilizar siempre la mayor área posible, respetando las limitaciones de costo de la aplicación.
- Alinear correctamente las uniones de modo que las tensiones puedan ser absorbidas en la dirección de mayor resistencia de la unión.
- Maximizar esfuerzos de cortadura y minimizar esfuerzos de pelado y de desgarramiento.
- Diseñar sus ensamblajes de modo que se minimicen las operaciones de ensamblaje con adhesivo.
- Hay que analizar todas las posibles sollicitaciones (particularmente las de pelado y desgarramiento) que puedan aparecer durante el ensamblaje o las operaciones de manipulación, así como las que se puedan producir durante el funcionamiento de la pieza.
- Evitar partes con curvaturas complejas.

Las **uniones mecánicas**, se realizan a través de tornillería (Fam y Honickman, 2010) o mediante conectores (Mutsuyoshi et al., 2010; Liu et al., 2010). Esta unión en los sistemas híbridos proporciona concentración de tensiones en el hormigón y en el FRP genera disminución de la tensión pero no hay concentración de tensiones ya que los FRP no tienen redistribución tensional debido generalmente a la orientación de las fibras (Fam y Honickman, 2010) (véase Figura 2.2).

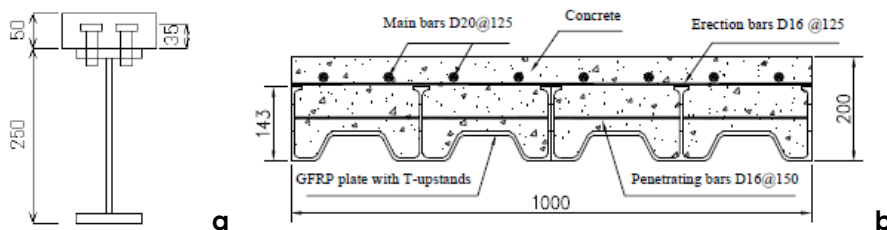


Fig. 2.2 **a** Sección en I con conectores (Mutsuyoshi et al., 2010), **b** de una losa con conectores de FRP (Liu et al., 2010).

Las **uniones por confinamiento** se realizan por medio de una técnica denominada "*Filament Winding*" que consiste en un enrollamiento de la sección híbrida de FRP y hormigón, con el fin de evitar la falta de unión entre ambos materiales. Las secciones tipo caja son las más adecuadas para realizar esta técnica de enrollamiento (envoltura) que confina al bloque de hormigón y que le garantiza la unión con el FRP, tal y como se aprecia en la Figura 2.3.

En los casos donde la dirección predominante de las fibras es la longitudinal el enrollamiento se produce a 45 ° o a 90° o los dos casos en una o varias capas proporcionando una mejora a cortante en el alma de la sección, además de mejorar la adherencia entre hormigón y FRP. También supone una mejora en la capacidad mecánica última de las secciones del sistema híbrido, discriminando una serie de modos de fallo que proporcionan roturas frágiles para reestructurar su modo de rotura en dúctil.

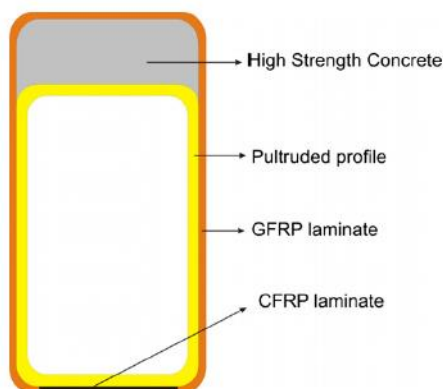


Fig. 2.3 Sección de perfil en caja con un wrapping (Chakrabortty et al., 2011).

Las **uniones mixtas** son las que corresponden a cualquier combinación de las anteriores [Liu et al., 2010; Fam y Honickman, 2010]. La combinación de distintos tipos de unión, con respecto al sistema de control resulta en una mejora sustancial. La utilización de uniones atornilladas frente a los conectores es mejor rigidizando la pieza y confiriéndole un aumento en la capacidad última de la sección. Cuando además se utiliza la combinación de sistemas mecánicos con adhesivos el aumento de rigidez de la sección y su capacidad última a rotura es muy notable, también el modo de fallo es menos frágil (Mutsuyoshi et al., 2010), (véase la Figura 2.4).

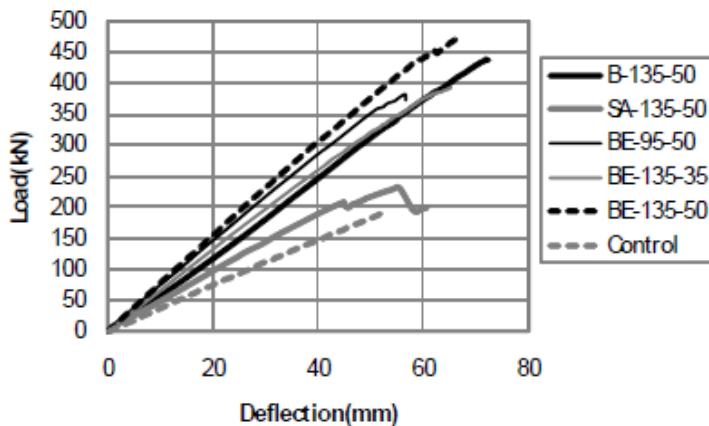


Fig. 2.4 Relación carga-flecha del perfil híbrido de sección en I con diferentes uniones (Mutsuyoshi et al. 2010). Nota: **BE**: tornillería + adhesivo epoxi, **SA** conectores sin epoxi; **B** tornillos sin epoxi.

2.2.3.- PRODUCCIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS

2.2.3.1.- HORMIGÓN

La producción de hormigón es sencilla pero compleja a su vez, ya que se pueden elaborar hormigones a la carta y es ahí donde la complejidad se hace patente.

En la Figura 2.5 se presenta un esquema genérico de las fases de producción de cualquier tipo de hormigón bien sean convencionales, HAR, HAC y los HRF, que se utilizan en los sistemas híbridos.

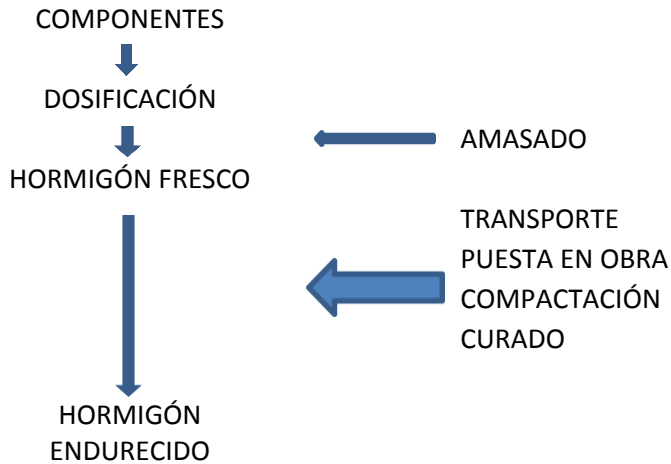


Fig. 2.5 Esquema de elaboración y puesta en obra del hormigón.

2.2.3.2.- FRP, POLÍMERO REFORZADO CON FIBRAS

Las propiedades del compuesto, además del proceso de fabricación, dependerán de la cantidad de refuerzo. A mayor fracción en volumen de fibras, mayores serán las propiedades mecánicas del compuesto resultante.

En la práctica existen unos límites que garantiza que las fibras son cubiertas totalmente por la resina para que el refuerzo sea eficaz. Generalmente, en un proceso manual, ampliamente usado en la industria de construcción naval, el límite para la fracción de volumen de fibra es aproximadamente del 30 - 40%. La industria aeroespacial emplea procesos de fabricación más sofisticados, que permiten obtener materiales con fracciones en volumen de fibra alrededor del 70%, este es el caso de los perfiles utilizados en la presente Tesis Doctoral.

Procesos de molde abierto

Pultrusión

Las fibras se extraen de una madeja a través de un baño de resina y luego a través de una matriz calentada. La matriz completa la impregnación de la fibra, controla el contenido de resina y cura el material en su forma final

a medida que pasa a través del troquel. Este perfil de curado es cortado a medida. También se pueden introducir telas en la matriz para proporcionar direcciones de fibra que no sea a 0 °. Aunque la pultrusión es un proceso continuo, produciendo un perfil de sección transversal constante, una variante conocida como “*pullforming*” permite alguna variación que se introduce en la sección transversal. El proceso de tira de los materiales a través de la matriz para la impregnación, y posteriormente abrazaderas en el material en un molde para el curado. Esto hace el proceso no continuo, pero con capacidad de pequeños cambios en la sección transversal (véase la Figura 2.6).

Tipos de Materiales:

- Resinas: Generalmente epoxi, poliéster, viniléster y fenólica.
- Fibras: Cualquier tipo.
- Núcleos: Generalmente no se utiliza.

Ventajas principales:

- Esta puede ser una manera muy rápida, y por lo tanto económica, de impregnación y curado de materiales.
- El contenido de resina puede ser controlado con precisión. Los costes de fibra se reducen al mínimo ya que la mayoría se toma de una madeja. Las propiedades estructurales de los laminados puede ser muy buenas ya que los perfiles tienen fibras muy rectas, largas y altas fracciones de volumen de fibra.
- La zona de impregnación de la resina se puede encerrar lo que limita las emisiones de volátiles.

Las desventajas principales:

Limitado a secciones transversales constantes o casi constantes y los costos de calefacción de matriz pueden ser altos.

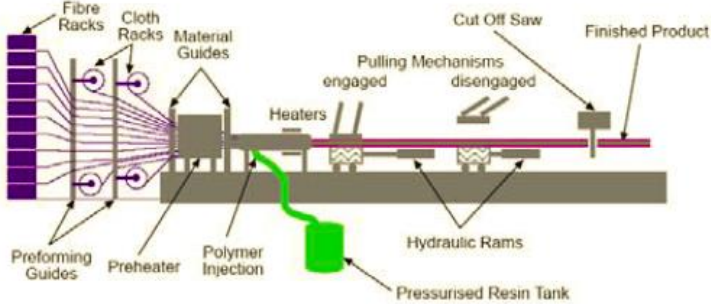


Fig. 2.6 Proceso de pultrusión, www.netcomposites.com, (2014).

2.2.4.- COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL SISTEMA HÍBRIDO

El comportamiento a flexión de las estructuras de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP), pultrusionados o no, de sección de viga en caja (véase la Figura 2.7), en I o tipo H, para paredes delgadas, las secciones de tipo caja son muy eficientes para vigas (Ashhy 1991), aunque las tipo I son, de hecho, comúnmente utilizados en aplicaciones estructurales de pultrusionado de perfiles.

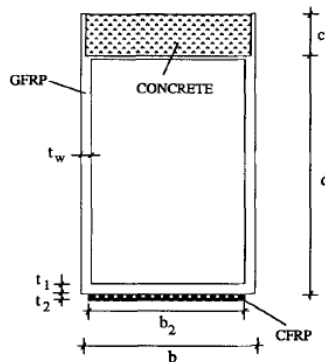


Fig. 2.7 Sección típica en estructuras híbridas (Barros y Lebre, 2010).

El comportamiento estructural de estas secciones, se define a continuación:

1.- El ala de compresión es más débil que el ala de tracción, porque el FRP tiene una resistencia a la compresión, alrededor de la mitad de su resistencia a la tracción y debido a fenómenos locales de pandeo (Banks y Rhodes 1983; Holmes y Just 1983).

2.- La rotura suele ser frágil, sin previo aviso, debido a los materiales compuestos que son elásticos lineales, no poseen ductilidad.

3.- El diseño suele estar condicionado por la rigidez (relativamente baja de GFRP), resultando en la necesidad de un uso excesivo de material compuesto para satisfacer ciertos requisitos de deformación en estados límites de servicio.

En vista de lo expuesto es viable realizar un diseño más eficiente de secciones compuestas, realizando las siguientes consideraciones:

En primer lugar, la tensiones de compresión en la sección deben ser llevadas a un material con suficiente resistencia a la compresión y de bajo coste, como es el hormigón que permita incorporar suficiente masa para así aumentar la rigidez a mínimo coste, y por lo tanto el ala comprimida de FRP podría ser minimizada o eliminada, sustituyéndose así pues con una capa de hormigón. El alma y ala inferior serán del material compuesto de FRP, para mejorar sus características mecánicas a tracción (Deskovic et al., 1995; Mutsuyoshi et al., 2010) (véase la Figura 2.8).

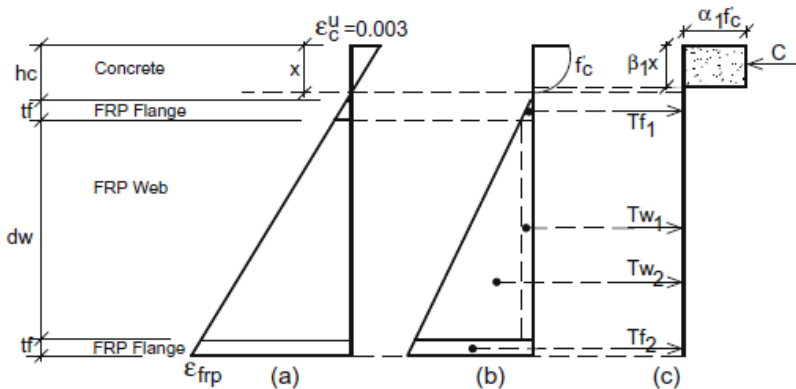


Fig. 2.8 (a) Distribución de deformaciones, (b) distribución de tensiones, (c) distribución resultante de tensiones (Barros y Lebre, 2010).

En segundo lugar, para evitar que el fallo frágil del GFRP llegue a producirse, se puede utilizar un elemento ligero a añadir a la zona de tracción de la sección, de manera que sea el primer elemento a fallar,

dando así algún tipo de advertencia de un colapso inminente (pseudoductilidad) (véase la Figura 2.9).

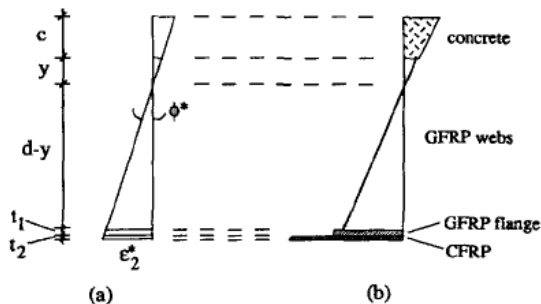


Fig. 2.9 (a) Distribución de deformaciones, (b) distribución de tensiones, en una sección en centro de luz en el instante de rotura CFRP (Deskovic et al., 1995).

Esta lámina de CFRP de alta rigidez se une al sistema mediante una delgada capa de resina epoxi. El uso de este material también mejorará el comportamiento a la fluencia y la fatiga, dado que el CFRP prácticamente está libre de fluencia y tiene una excelente respuesta a cargas de fatiga.

Es importantísimo para garantizar este sistema híbrido hormigón-FRP, transferir los esfuerzos de cizalla y arrancamiento entre ambos materiales a través de su interfase. Esto es posible gracias a una buena adherencia entre el FRP y el hormigón, que se puede lograr utilizando adhesivos o proporcionando uniones mecánicas a la superficie, o incluso, por una combinación de ambos. Un mejor conocimiento y aportaciones a la mejora de esta unión entre ambos materiales hacen viable el máximo aprovechamiento del concepto de estos sistemas híbridos (véase la Figura 2.10).

Estos nuevos sistemas híbridos están compuestos por una losa superior de hormigón reforzado con fibra metálica (HRFM) colocado sobre un perfil estructural de polímero reforzado con fibra (FRP), buscando un comportamiento dúctil del sistema. Este comportamiento dúctil se consigue gracias al comportamiento del hormigón en la cabeza de compresión, o bien reforzando el elemento en el ala traccionada con una lámina de FML, o una combinación de ambos sistemas.

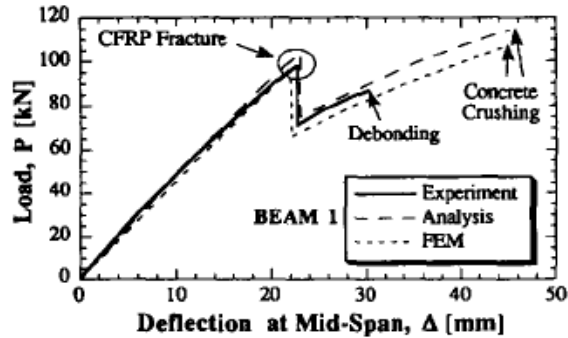


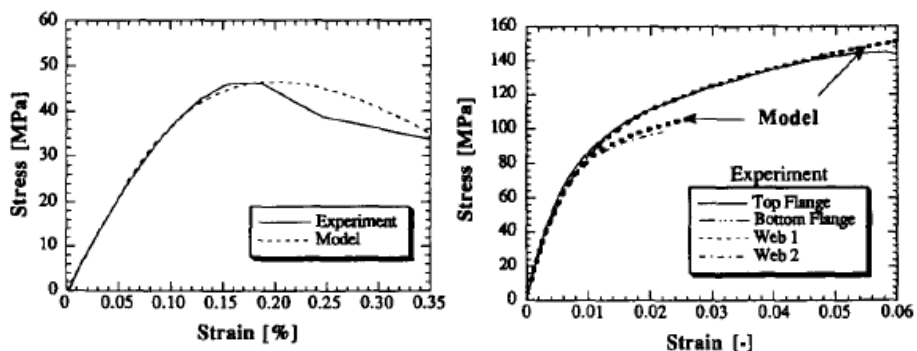
Fig. 2.10 Curvas carga-flecha en ensayo rotura a 4 puntos (Deskovic et al., 1995).

El hormigón de altas prestaciones es utilizado para mejorar la rigidez de la viga y aumentar la resistencia mecánica del FRP, minimizando la necesidad de un uso excesivo de material compuesto para satisfacer ciertos requisitos de deformación en estados límites de servicio, puesto que es relativamente costoso, (Chen y El-Hacha 2010). Además, el hormigón de ultra alta resistencia (UHPC) tiene la ventaja de tener alta durabilidad; además, este tipo de hormigón posee baja alcalinidad, por ello la degradación de la resina o polímero en este medio será mínima.

Los **criterios de cálculo** de estas estructuras híbridas sometidas a flexión, son los siguientes:

- En primer lugar se realiza la selección de los materiales y las variables geométricas de la sección (d , t_w , c , b , f_1 y t_2) en función de las propiedades de los materiales, cumpliendo con los requisitos mecánicos al mínimo coste.
- Las restricciones de cálculo son fundamentalmente debidas a las limitaciones de resistencia a flexión y al cortante, que la sección estructural debe soportar, y a las limitaciones impuestas por la rigidez, en las que un desplazamiento máximo debe ser admitido por los estados límites de servicio (ELS).
 - La sección híbrida elegida no ofrece una resistencia a cortante mayor que la de una sección geoméricamente similar sección de GFRP similar sin el hormigón.
 - Las almas de la sección deben soportar principalmente los esfuerzos de cortante, en caso contrario sobrevendrá la rotura frágil.

- Antes de alcanzar la rotura frágil del sistema híbrido, en la zona frágil comprimida, si se ha optado por colocar una lámina de CFRP de poca sección con el fin de que rompa antes para poder tener un preaviso de rotura (la ya comentada pseudoductilidad) se debe verificar.
 - La carga que produce la rotura de la lámina de CFRP es una fracción alta de la carga de rotura de la estructura híbrida, pero que éste mantiene capacidad suficiente adicional.
- En tercer lugar se debe calcular el momento último, por el criterio de compatibilidad de deformaciones, equilibrio de fuerzas y las leyes constitutivas del material, teniendo en cuenta que el GFRP tiene un comportamiento elástico lineal y asumiendo el comportamiento del hormigón elástico no lineal (véase la Figura 2.11).



- En un sistema de este tipo se debe además comprobar que la inestabilidad lateral, no se produce y por último tener suficiente rigidez a flexión y cortante.

La rentabilidad del sistema híbrido radica en la gran resistencia mecánica, alta rigidez, y bajo peso.

2.2.5.- MODOS DE FALLO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL HÍBRIDO

2.2.5.1.- GENERALIDADES

El sistema estructural híbrido puede fallar en tres zonas fundamentalmente: por alguno de sus componentes adheridos, por el adhesivo o por la interfase. En la interfase el fallo se produce a un bajo nivel de carga, es por ello que se debe exclusivamente a una preparación incorrecta de las superficies a unir; la rotura del adhesivo es indeseable y es debida a una mala elección del adhesivo ya que se cuenta en la actualidad con una extensa variedad de adhesivos de alta calidad. El último modo de fallo es en los componentes adheridos bien el hormigón o el FRP.

Existen desde el punto de vista mecánico una serie de modos de fallo que se pueden clasificar por orden de importancia, como el pandeo y el cortante en el alma, la flexión, la inestabilidad lateral y la rotura del hormigón son los más relevantes. Y los que por su facilidad de resolución del problema no son relevantes según numerosos investigadores, como el cortante en el adhesivo, el cortante en el hormigón y el fallo de adherencia FRP-hormigón; pero no por ello dejan de tener importancia en el sistema híbrido.

2.2.5.2.- CORTANTE EN EL ALMA

El cortante debe ser soportado por el alma del FRP en función de la caracterización del material y el espesor del alma (véase la Figura 2.12).



Fig. 2.12 Perfil en I, rotura alma por cortante (Barros y Lebre, 2010).

En cuanto a la caracterización del material, la dirección de las fibras a 45° perpendicular al esfuerzo que origina el cortante, así como el número de capas de material compuesto hace posible la mayor resistencia frente a esfuerzos importantes de cortante, ya que se consigue confinar la fisura y evitar el avance de ésta. Las direcciones de fibra para un mismo volumen en dirección longitudinal no presentan módulos elevados a cortante, de hecho con una menor fracción de fibras distribuidas de forma aleatoria presentan prácticamente el mismo módulo de cortante (Duc et al., 2010).

2.2.5.3.- CORTANTE EN EL ADHESIVO

Los adhesivos que actualmente se encuentran en el mercado tienen una resistencia a cortante muy buena, para evitar la rotura del material. Es importante emplear espesores de capa inferiores a 2 mm (Giner y Albelda, 2001).

2.2.5.4.- CORTANTE EN EL HORMIGÓN

Este tipo de fallo no suele suceder para espesor de hormigón razonables (Boremann y Faber, 2004), se puede considerar que con capas de compresión de 40 mm con hormigones de resistencia moderada 25 MPa no sucederá. Estos hormigones no están reforzados con fibras, el comportamiento que tengamos con HRF hormigones en cuanto a cortante estará mejorado ya que las fibras conferirán una mejora resistente al cortante en el hormigón.

2.2.5.5.- FALLO DE ADHERENCIA FRP-HORMIGÓN

La unión debe ser perfecta, pues en caso contrario no se obtendrán las capacidades resistentes del sistema híbrido. En general, como se ha expuesto en el apartado 2.2.2.3 del presente capítulo, se pueden utilizar cuatro sistemas para unir los materiales: la unión química con resinas, la unión mecánica con conectores o tornillería o una unión mixta combinando las dos anteriores.

En el caso de la unión química, la elección del adhesivo es importante ya que la resistencia de este al corte, el esfuerzo rasante así como resistencia a la humedad serán factores clave para su elección. El hormigón se encuentra en estado fresco tras el vertido sobre la superficie del FRP, el adhesivo debe ser tolerante o insensible a la humedad, de no ser así los enlaces químicos no serán fuertes, al mismo tiempo que el adhesivo aumentará su volumen por la absorción de agua y no será efectivo.

Es fácil evitar este modo de fallo ya que la mayoría de adhesivos epóxicos que se encuentran en el mercado son muy cohesivos. La capacidad de adherencia en el FRP es alta si la superficie está limpia es muy raro que se produzca el fallo, es por ello que la rotura se traslada a la interfase entre el adhesivo y el hormigón (Barros y Lebre, 2010), (véase la Figura 2.13).



Fig. 2.13 Modo de fallo en la interfase **(a)** con resina epoxi en mortero (Sikadur 31) y **(b)** en gel (Sikadur 32) con un arenado (Barros y Lebre, 2010).

Para solucionar este fallo también de una forma sencilla se debe limpiar la superficie del hormigón, cepillarla para dotar de rugosidad superficial y mejorar el agarre. Además realizar un arenado sobre la superficie también aumenta la rugosidad. La rotura en la interface tras el arrancamiento superficial del hormigón, también es posible evitarlo utilizando un hormigón de mejores capacidades mecánicas.

Cuando existe un fallo de adherencia FRP-hormigón es apreciable una caída de la capacidad resistente en la estructura híbrida, ello conlleva a que el sistema que se ha diseñado deja de comportarse adecuadamente pasando zonas de deformaciones de tracción a estar comprimidas, ello supone que el eje neutro está bajando y forzando a que las compresiones que eran asumidos por el hormigón las tenga que soportar el perfil de FRP, con la consideración de que éste no trabaja bien a compresión y se pueden dar efectos de pandeo local, con ello la rotura llegue antes (véase la Figura 2.14 y 2.15) (Liu et al., 2010).

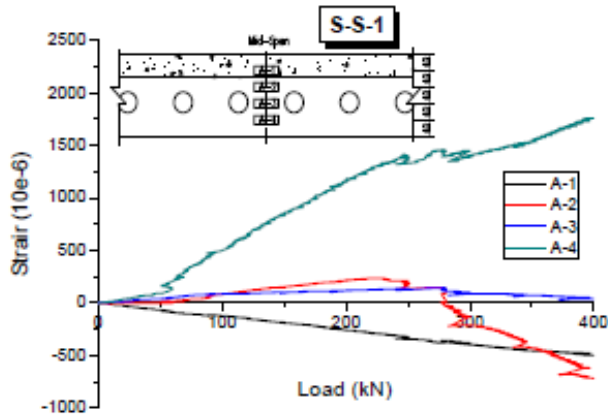


Fig. 2.14 Gráfico deformación-carga de una losa híbrida (Liu et al., 2010).

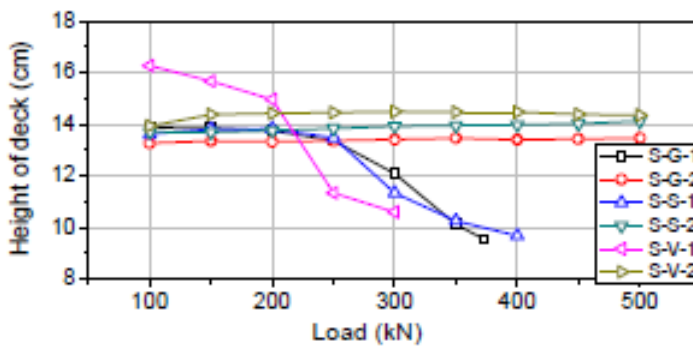


Fig. 2.15 Gráfico posición eje neutro-carga aplicada (Liu et al., 2010).

En los fallos de adherencia, debido al esfuerzo rasante, se produce un deslizamiento parcial en los extremos de la estructura, pueden producir también de laminación entre ambos materiales FRP y hormigón (véase la Figura 2.16 a y b).

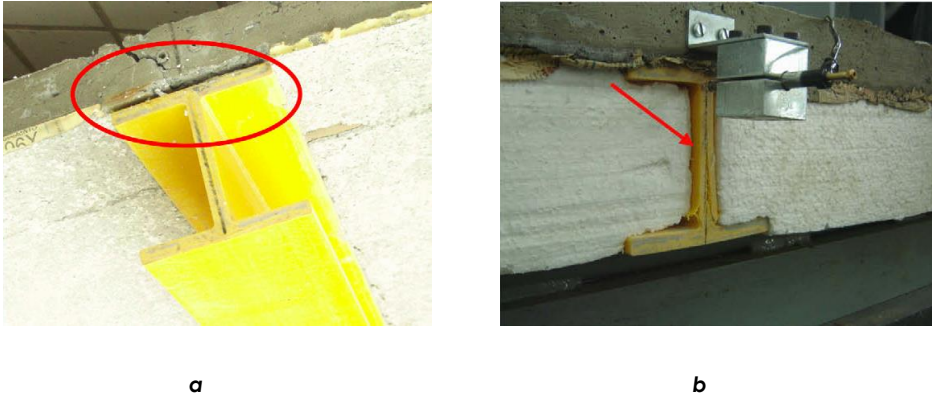


Fig. 2.16 (a) Fallo en la interfase FRP-hormigón, (b) Captador LVDT medición deslizamiento (Barros and Lebre, 2010).

Como se aprecia en la Figura 2.17 a y b, un estado tensional elevado puede iniciar un cambio en la situación del eje neutro importante incluso al desolidarizarse los dos componentes del sistema. Es por ello que zonas del material que previamente trabajaban a compresión pasen a trabajar a tracción o viceversa.

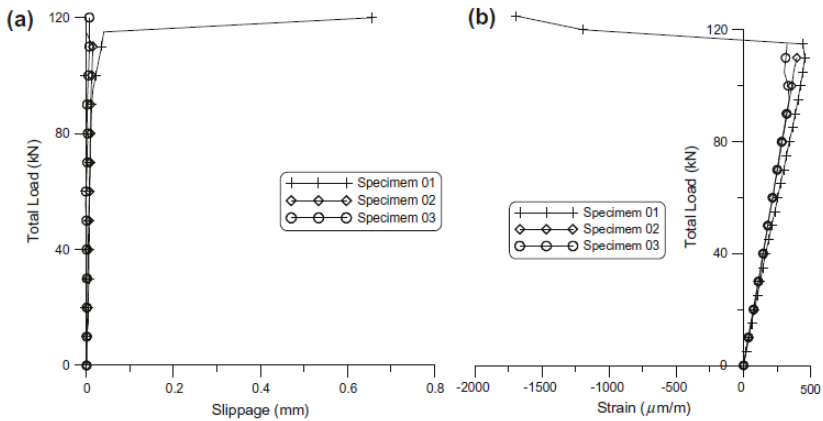


Fig. 16. Graphics for the three slab specimens: (a) Total Load vs. Slippage (average value) and (b) Total Load vs. Strain at the interface (average value).

Fig. 2.17 (a) Gráfico carga-deslizamiento de una losa híbrida, (b), carga-deformación de una losa híbrida (Barros y Lebre, 2010).

2.2.5.6.- PANDEO EN EL ALMA

El pandeo del alma se produce por las tensiones de compresión en la cabeza comprimida del elemento a flexión, produciendo fallos locales tanto en el ala como el alma del perfil (véase la Figura 2.19). Como se aprecia en la Figura 2.18 el esfuerzo de compresión inicia una tensión interlaminar de tracción que tiende a separar las láminas con las que este ejecutado el material compuesto.

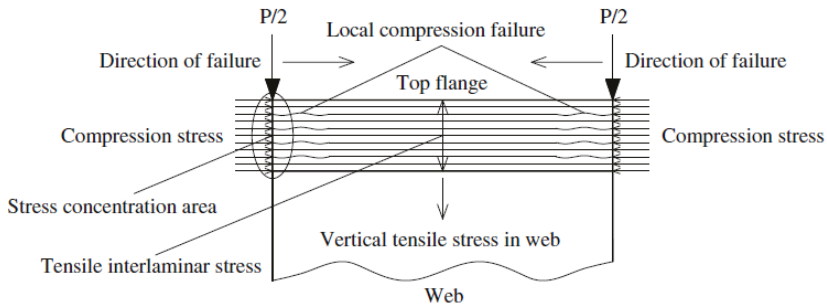


Fig. 2.18 Esquema del ala y alma en un perfil en I de CFRP, sin capa de compresión de hormigón (Duc et al., 2010).

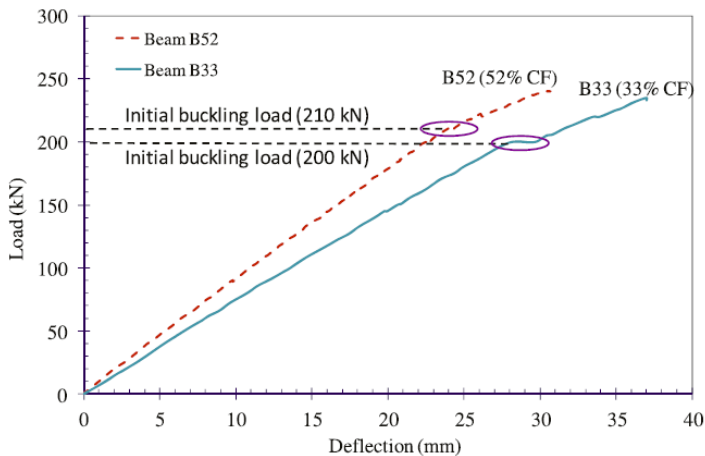


Fig. 2.19 Gráfico carga-flecha de una viga en I de FRP sin capa de compresión de hormigón (Duc et al., 2010).

En la Figura 2.20 se observa tras el ensayo a flexión de una viga polimérica como se produce el alabeo y pandeo de la cabeza comprimida. El estado

de carga será inferior al modelo utilizado en la viga híbrida con una capa de compresión de hormigón. Esta capa de hormigón retrasa la aparición del fallo y lo hace a cargas mucho más elevadas.

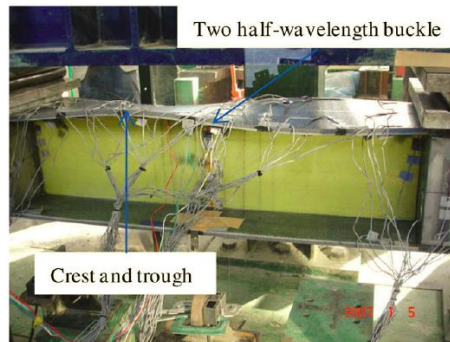


Fig. 2.20 Alabeo del ala comprimida tras el ensayo de la viga polimérica (Duc et al., 2010).

El conjunto perfil y capa de compresión hace que desaparezcan en gran medida los fallos por pandeo del alma y ala comprimida del perfil. Si el hormigón es muy resistente y la adherencia en la interfase presenta algún defecto, pueden sobrevenir los fallos por rasante y que estos deriven en pandeos en el ala, tal y como se aprecia en la Figura 2.21.



Fig. 2.21 Cortante y alabeo en el ala comprimida (Mutsuyoshi et al., 2010).

2.2.5.7.- APLASTAMIENTO DEL HORMIGÓN

El aplastamiento en el hormigón puede ser debido la concentración de carga producida en el punto de aplicación o por el esfuerzo normal de compresión en el ensayo de flexión (véase la Figura 2.22).



Fig. 2.22 Aplastamiento del hormigón por esfuerzos normales (Chakraborty *et al.*, 2011).

Es importante trasladar el modo de fallo a la cabeza de compresión, siendo preferible este modo de fallo a la fragilidad del laminado de FRP. Este comportamiento típicamente frágil del hormigón puede ser cambiado añadiéndole fibras metálicas ya que el comportamiento del HRF tiende a ser dúctil. Existen numerosos estudios del HRF, donde el retraso de la aparición de las fisuras y la resistencia residual post-fisuración son evidentes y mejoran el comportamiento del hormigón no solo en ELS y en ELU; la combinación de HRF y FRP en sistemas de estructuras híbridas no ha sido muy estudiada. Las fibras evitarían en cierta medida el aplastamiento del hormigón en el caso de la concentración de tensiones en el punto de aplicación de la carga ya que de cierta forma estarían ayudando al que ese esfuerzo puntual se reparta por todo el volumen del hormigón disipando de forma eficiente el estado tensional.

Este modo de fallo puede verse reducido o subsanado con la calidad del hormigón a medida que el hormigón es más resistente este modo de fallo disminuye. En cuanto a la geometría de la pieza formada por el hormigón puede variar ya que con más canto es más complejo que se de este fallo. En la Figura 2.23, se observa dicho modo de fallo.



Fig. 2.23 Aplastamiento del hormigón por esfuerzos normales (Mutsuyoshi *et al.*, 2010).

2.2.5.8.- INESTABILIDAD LATERAL

Por lo general, los perfiles pultrusionados de sección en caja tienen una elevada resistencia al pandeo lateral. No obstante, para satisfacer los requisitos de diseño y evitar la inestabilidad lateral, la relación existente entre la altura ($c+h$) y la anchura del sistema híbrido (b), debe limitarse a un determinado valor que depende de la tipología de la sección (Deskovic et al., 1995; Duc et al., 2010; Chakraborty et al., 2011). Para secciones híbridas con espesor de pared delgada el valor de k es alrededor de 3 (Deskovic et al., 1995).

En algunos casos, para evitar la inestabilidad lateral se recurre a elementos rigidizadores, tal y como se aprecia en la Figura 2.24 para el caso de secciones en I (Duc et al., 2010), donde este problema es mayor que en las secciones tipo caja.

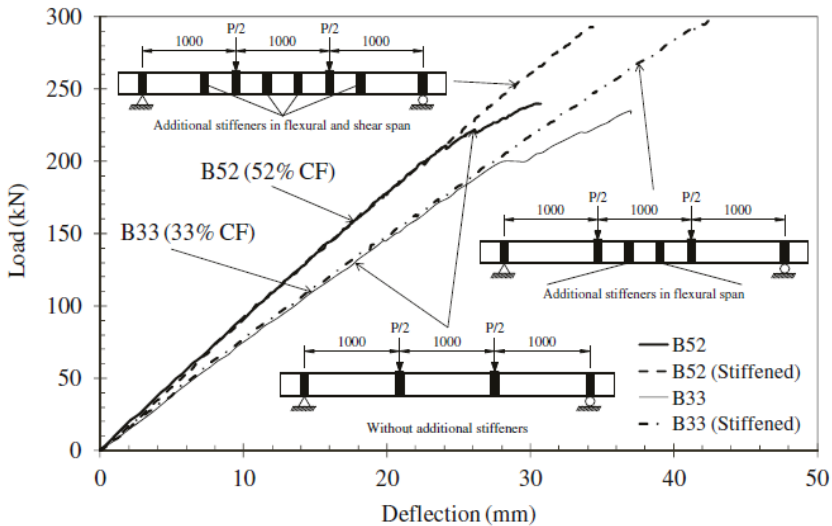


Fig. 2.24 Gráfico carga-flecha, en vigas con rigidizadores (Duc et al., 2010).

2.2.5.9.- FLEXIÓN

El modo de fallo por flexión puede suceder en flexión positiva o negativa. La mayoría de estructuras híbridas se realizan para estructuras isostáticas donde las vigas se encuentran biapoyadas, pero también nos podemos

encontrar con estructuras híbridas en continuidad en los vanos con cierto hiperestatismo.

En aquellos casos mayoritarios donde la viga se encuentra simplemente biapoyada, se induce la rotura en dos fases claramente diferenciadas, la primera fase se calcula una lámina de fibra de carbono cuya sección es mínima con el fin de que rompa con un estado de carga referido a un momento flector inferior al de rotura de la viga. De este modo se produce un preaviso tras la rotura del CFRP, después del fallo inicial se produce una redistribución del momento en el resto del material del ala inferior del GRFP.

En la segunda fase el GFRP, sigue redistribuyendo y soportando el estado de cargas por toda la sección llevando la rotura a la zona comprimida, donde el hormigón debido a la deformación soportada deja de comportarse en el campo elástico lineal y pasa al campo no lineal, donde se producirá la rotura. Esta rotura es menos drástica y catastrófica que la rotura del polímero, a pesar que el hormigón sigue siendo un material frágil.

La modificación del comportamiento del hormigón es un componente importante a estudiar, ya que no hay suficientes estudios en la actualidad sobre el comportamiento de la estructura híbrida con hormigones reforzados con fibras metálicas. Existen numerosos estudios del comportamiento de los hormigones reforzados con fibras metálicas, pero en la actualidad se están estudiando en los sistemas híbridos.

2.2.6.- DUCTILIDAD DEL SISTEMA HÍBRIDO

Los materiales que se están utilizando son frágiles, tanto resinas, fibras o como el propio hormigón. Es por ello que se utiliza el criterio de la pseudoductilidad para diferenciarlo del clásico de ductilidad, donde las deformaciones plásticas a carga constante, como es el caso del acero. En este caso el concepto de pseudoductilidad consiste en realizar un preaviso mucho antes de que rompa el material, para ello se dota al sistema híbrido de un material habitualmente CFRP, que con una mínima área se predice su rotura antes que las demás fibras de GFRP (Elmahdy et al., 2008; Deskovic et al., 1995; Mutsuyoshi, et al., 2010).

La ductilidad puede ser definida en estos sistemas híbridos como la proporción de la curvatura al fallo en relación a la curvatura al fallo del laminado de fibra de carbón (Deskovic et al., 1995).

Otra posibilidad de conferir ductilidad al sistema híbrido es a través del modo de fallo del hormigón, este criterio debe ser estudiado con reservas ya que el hormigón convencional tiene un modo de fallo catastrófico. Pueden estudiarse comportamientos del hormigón que posean una tendencia al fallo con comportamientos dúctiles, para ello se debe confinar el hormigón mediante encamisados o mediante fibras, aunque están estas últimas todavía en fase de estudio dentro del concepto del sistema híbrido.

En los sistemas híbridos, al aplicarles la carga máxima, la fibra superior registra una tensión de compresión cuya deformación unitaria es del 0,0033. Aunque esta deformación se registra en el contorno, la compatibilidad de deformaciones indica que en la fibra superior de hormigón está dentro de este valor. Sin embargo, el confinamiento introducido no es suficiente como para proporcionar ductilidad importante para el hormigón (véase la Figura 2.25).

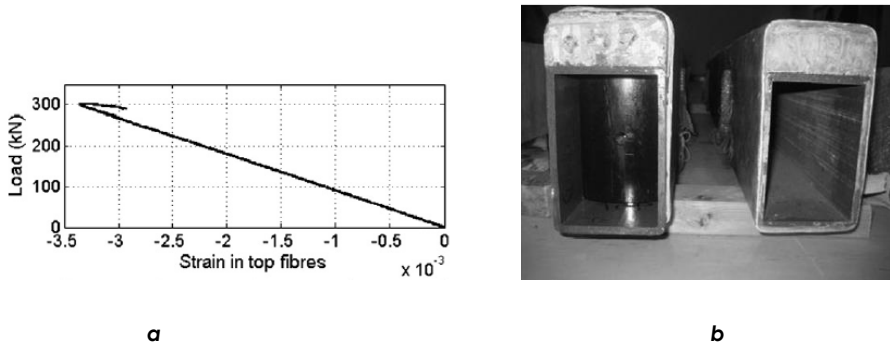


Fig. 2.25 (a) Distribución deformaciones /carga en la zona alta del sistema; **(b)** secciones híbridas con envoltorio de FRP (Chakraborty et al., 2011).

Otro modo de dotar al sistema híbrido de ductilidad ante el fallo, consiste en utilizar dos tipos de materiales en la capa de compresión, un hormigón convencional con un espesor determinado de capa comprimida y el hormigón de alta resistencia HAR reforzado con fibra de acero HRF con espesores mínimos (Chakraborty et al., 2011) (véanse Figuras 3.26 a y b).

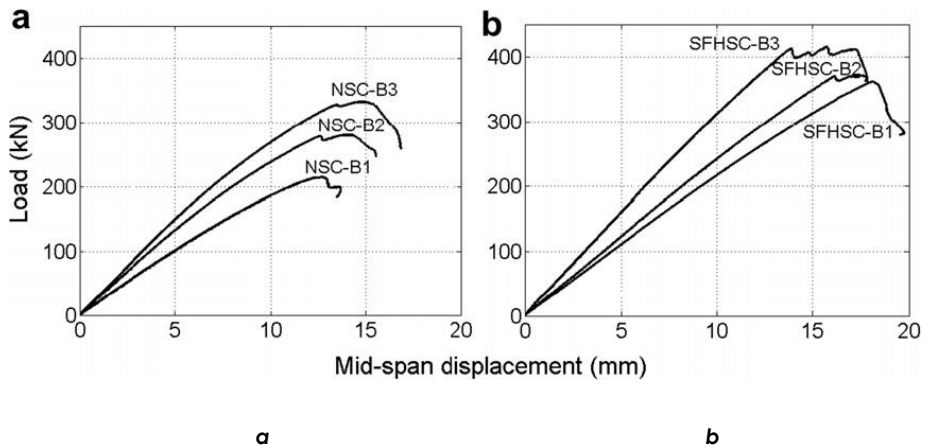


Fig. 2.26 Ensayo a flexión a 4 puntos, Distribución carga-flecha sistema híbrido con hormigón (a) convencional y (b) hormigón de alta resistencia reforzado con fibra metálica (Chakraborty et al., 2011).

En el estudio del comportamiento a flexión, realizado por Chakraborty et al., (2011), se observan comportamientos de los sistemas híbridos muy distintos en función de la composición de su sección y el modo en que han sido fabricadas (véase la Tabla 2.6).

Tabla 2.6 Tipología de vigas en función del material y su forma de procesado (Chakraborty et al., 2011).

VIGA	HAR	Wrapping a +45º	Wrapping 90º	Wrapping +45º	LÁMINA CFRP
UBICACIÓN	COMPRESIÓN	ENVOLTURA	ENVOLTURA	ENVOLTURA	TRACCIÓN
HSB_B1	SI	SI	SI	NO	NO
HSB_B2	SI	SI	NO	NO	SI
HSB_B3	SI	SI	SI	SI	SI

El comportamiento que se puede observar en la Figura 2.27, donde se muestra la relación entre la carga y la flecha en un ensayo a flexión en cuatro puntos de un sistema híbrido, se encuentran indicios claros de deformación bajo carga prácticamente constante, constatando un comportamiento dúctil, para la viga HSB_B1. Este indicador no se encuentra en las vigas HSC_B2 y HSC_B3, teniendo un comportamiento frágil ante el fallo (es un hormigón de alta resistencia), acuciado en mayor medida en la viga HSC_B3. Es muy probable que a medida que el sistema

(influenciado por la resistencia del hormigón) es más rígido y resistente, la tendencia hacia al fracaso frágil sea mayor en contraposición a una resistencia moderada y menos rígida, que dota al sistema de una rotura dúctil. Todo ello debe ser estudiado pues no está suficientemente demostrado (véase la Figura 2.27).

Surgen pues muchas dudas e incógnitas: la lámina de carbono proporciona rigidez y un preaviso a la rotura "pseudoductilidad", mientras que el "wrapping" proporciona ductilidad ante el fallo según la dirección del laminado y el número de capas. ¿Puede la combinación de lámina de CRFP y "wrapping" proporcionar una mejora en la ductilidad del sistema? ¿Es posible diseñar y fabricar una viga híbrida de FRP-hormigón con una rigidez adecuada y lograr lo más buscado, el comportamiento dúctil tan necesario para estructuras de ingeniería civil?

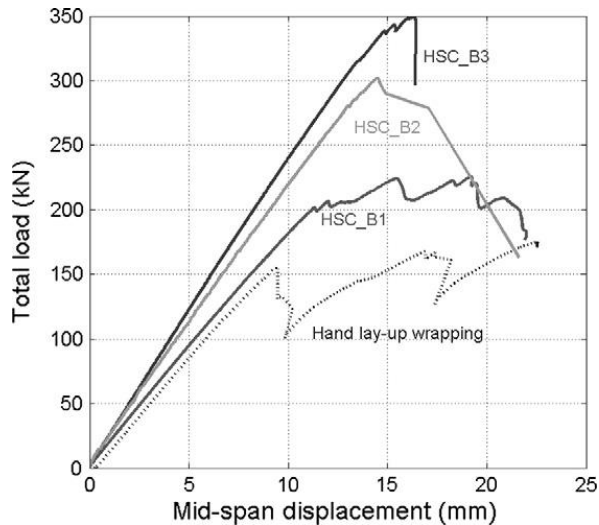


Fig. 2.27 Ensayo a flexión a 4 puntos, Distribución carga /flecha sistema híbrido con hormigón de alta resistencia, con distintos tipo de "wrapping", (Chakraborty et al., 2011).

El *wrapping* no sólo eliminar el riesgo del fallo prematuro como resultado de la pérdida de adherencia de bloque de hormigón al perfil FRP, también mejora la rigidez y la capacidad de carga de las vigas, con la posibilidad de rotura dúctil.

El uso del hormigón de alta resistencia tiene muchas ventajas, tales como aumento de la rigidez y la capacidad de carga. Por sí solo sin embargo, se encontró ser frágil y los resultados indican un modo de fallo frágil en la viga.

En ciertos caso la unión combinada donde el adhesivo y los conectores o tornillería de acero hacen que tras la rotura del sistema híbrido tenga un comportamiento dúctil, frente al resto, tal y como se aprecia en la Figura 2.28 (Fam y Honickman, 2010).

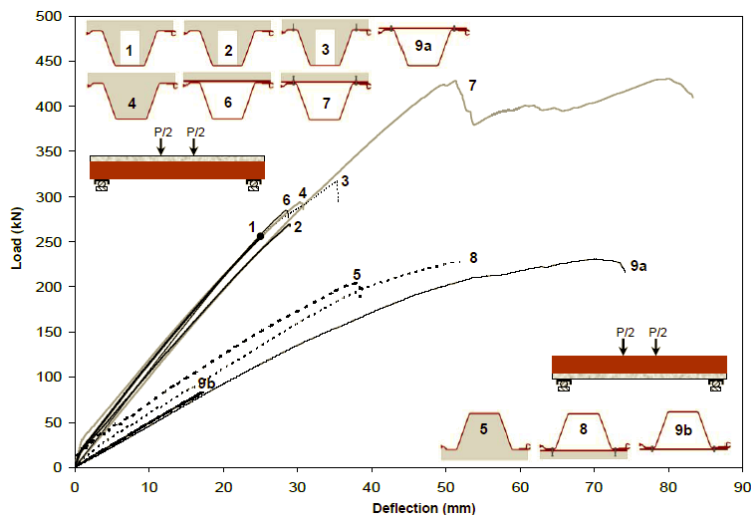


Fig. 2.28 Ensayo a flexión a 4 puntos, distribución carga-flecha en sistema híbrido en flexión positiva y negativa (Fam y Honickman, 2010).

En el caso en que la geometría del sistema híbrido es una losa donde predomina el canto del hormigón y el GFRP actúa como lámina inferior, para mejorar la adhesión mecánica, según el estudio realizado por Liu et al., (2010) tal y como se aprecia en la Figura 2.29, los especímenes numerados con el tipo 1 con la superficie lisa en la interfase GFRP-hormigón tienen un comportamiento a rotura dúctil, frente al resto con la interfase arenada que ganan resistencia última y rigidez pero el modo de fallo es frágil (véase el tipo 2, Figura 2.29).

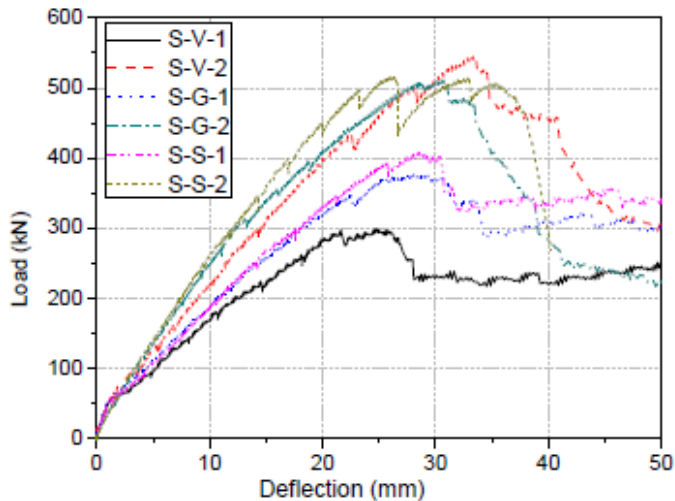


Fig. 2.29 Ensayo a flexión a 4 puntos, distribución carga-flecha en sistema híbrido GFRP-hormigón en flexión positiva (Liu et al., 2010).

2.2.7.- COMPATIBILIDAD DE LOS MATERIALES DEL SISTEMA HÍBRIDO

Las disoluciones alcalinas pueden provocar una degradación severa, fundamentalmente sobre la fibra de vidrio (Yilmaz, 1992), aunque también sobre la matriz de resina y sobre la interfase, incluso para disoluciones con concentraciones bajas (Karbhari y Zhang, 2003; Salvador et al., 2005; Sahuquillo et al, 2008).

El efecto del tiempo de degradación en la evolución de las propiedades mecánicas permite diferenciar dos fases en el comportamiento mecánico de los FRP. En primer lugar el deterioro producido es mayor produciéndose una merma importante en las propiedades mecánicas en periodos cortos de exposición.

A medida que el tiempo transcurrido es mayor, las propiedades mecánicas tienden a estabilizar sus pérdidas con el tiempo de exposición, con carácter neutro o alcalino (Sahuquillo, 2012).

En la ingeniería civil los perfiles de GFRP cada vez son más usados, y se van a encontrar en general en contacto al hormigón, con lo que este ambiente presenta especial interés por las aplicaciones que se derivan en este campo, de ahí que se planteen estudios con la solución de la hidratación del hormigón, para lo que se emplea una solución simulada con NaOH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , con un PH de 12-13.5 (Chin et al., 1999; Micelli y Nanni, 2004; Chen et al., 2006, Mukherjee y Arwika, 2007; Won et al., 2008; Sultania et al., 2010) y por tanto con soluciones de pH elevado en el entorno del 13.5.

En aquellos casos que se coloca una capa de resina epoxi entre ambos materiales para unirlos, estos tienen una barrera química compatible.

2.2.8.- RESISTENCIA AL FUEGO

En general la resistencia al fuego depende del tipo de resina de la matriz con la que se realice el material compuesto, las resinas fenólicas, poliimidas, ésteres de cianato y la polieteramida, aguantan temperaturas más elevadas. Por lo general temperaturas superiores a los 150 °C pueden empezar a perder propiedades mecánicas, en relación con el acero y el hormigón es el menor resistente al fuego.

El comportamiento no es bueno, y por ello se recomienda en aplicaciones en edificación o ingeniería civil que los polímeros se protejan con morteros ignífugos para dotarlos de la resistencia al fuego necesario.

Es estos últimos años se están desarrollando compuestos basados en fósforo gracias a su alta eficacia y baja toxicidad o combinaciones con derivados de nitrógeno, halógenos o cargas inorgánicas retardantes de la llama como las nanoarcillas, nanotubos de carbono). También la adición de pequeñas cantidades minerales como las zeolitas, arcillas naturales o los boratos de zinc en cantidades inferiores al 1%, actuando como sistemas intumescentes (Bourbigot et al., 1996; Bourbigot y Le Bras, 1996; Samyn et al., 2007).

2.2.9.- APLICACIONES EN LA INGENIERÍA CIVIL

El primer puente híbrido que ha incorporado una concepción adaptada al material se construyó en el año 2000 en Estados Unidos (King's Stormwater

Channel Bridge). Es un puente de dos vanos con 20,1 m de longitud y 13 m de anchura.

Las primeras pasarelas construidas en los años 80 en Estados Unidos y Canadá (perfiles pultrusionados de Strongwell y Creative Pultrusion), tienen una luz máxima de 25 m.

La primera pasarela *all-composite* en Europa es la de Aberfeldy, Escocia, en 1992, (véase la Figura 2.30.a). En esta todos los componentes son de FRP (pilonos, cables, vigas, tablero). Muchas de las uniones son adhesivas, sólo para las conexiones entre los cables y las vigas transversales se usaron uniones mecánicas.

En la pasarela de Kolding Dinamarca (1997), en cambio, se usaron sólo uniones mecánicas. A finales de 1997 se construyó también la de Pontresina, en Suiza, formada por dos vanos, en uno de los cuales se usaron uniones atornilladas y en el otro adhesivas (véase la Figura 2.30.b).



a



b

Fig. 2.30 Pasarelas de Aberfeldy y Pontresina, a y b, respectivamente, (De Diego et al., 2008).

En España una de las primeras actuaciones es la pasarela sobre la vía férrea del AVE como se muestra en la Figura 2.31. Un hito en torres es la Torre pultrusionada de la Universidad Politécnica de Valencia de 40 m de altura (2005). En cuanto a puentes, en 1982 se construyó el primer puente de carretera en el mundo, en China (Miyun Bridge), que tiene una luz de 20,7 m.



Fig. 2.31 Pasarela sobre vía férrea del AVE en Lérida, PEDELTA.

En 1994 se construyó un puente levadizo (Bonds Mill Lift) utilizando un sistema modular. El primero que se construyó en Estados Unidos fue el No-Name Creek Bridge, en 1996. En el año 2002 se construyó en Oxfordshire un puente prototipo (West Mill Bridge). El tablero está formado por perfiles de fibra de vidrio y las vigas son perfiles estándar de fibra de vidrio reforzados con fibra de carbono (véase la Figura 2.32). Todas las uniones son adhesivas.

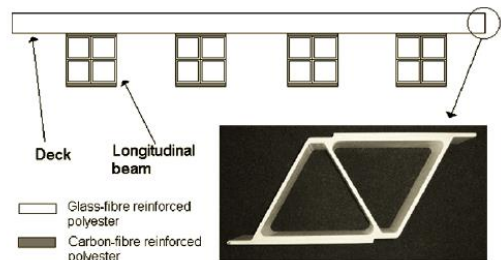


Fig. 2.32 Puente West Mill Oxfordshire, UK, (De Diego et al., 2008).

En España existen trabajos que forman parte del proyecto “Puentes híbridos de materiales compuestos y hormigón para carretera”, de referencia BIA2004-03404, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (véanse las Figuras 2.33 y 2.34).



Fig. 2.33 Pasarela peatonal en Cuenca sobre el río Júcar, 2012
(<http://www.mpt.gob.es/fondosinversionlocal/castilla-la-mancha/cuenca.html>).



Fig. 2.34 Pasarela peatonal en Madrid sobre el río Manzanares, 2012.
(<http://www.fomento.gob.es/AZ.BBMF.Web/documentacion/pdf/A24849.pdf>)

2.3.- ADHERENCIA EN LA INTERFASE FRP-HORMIGÓN

2.3.1.- INTRODUCCIÓN

Es habitual la utilización de materiales compuestos para el refuerzo de estructuras de hormigón. A lo largo de estos años se ha estudiado y avanzado mucho en este campo. En el caso que nos ocupa, es el perfil de GFRP el que está complementado en su capa de compresión por el hormigón, formando vigas híbridas. Estos casos no son tan habituales y todavía hay mucho trabajo pendiente de estudio.

La literatura científica al respecto es escasa al respecto. No obstante en elementos de tipo barra, hay un amplio estudio en la literatura científica. El comportamiento de la interfase FRP-hormigón es muy importante, en el caso de los refuerzos para hormigón estructural, suele presentar un punto débil al producirse el despegue del refuerzo, condicionando la capacidad del refuerzo en vigas a cortante o a flexión.

Existen métodos de ensayo para el estudio del comportamiento adherente entre el FRP y el hormigón, y modelos para calcular su capacidad resistente. Las tensiones en la interfase son de carácter tangencial y normales derivadas de las acciones transversales aplicadas a las vigas.

A continuación se presenta el estado de la técnica de la adherencia existente entre el FRP y el hormigón. La presentación será en primer lugar sobre la descripción de los métodos de ensayo para ver la relación entre la adherencia y el deslizamiento, en segundo lugar los parámetros que influyen en la adherencia y en tercer lugar se presentan los modelos de adherencia formulados por la comunidad científica.

2.3.2.- ENSAYOS DE ADHERENCIA

En general hay tres modos de ensayo: El modo I, donde solo se producen tensiones normales; el modo II, donde solo hay tensiones tangenciales; y el modo III o mixto, donde hay tensiones normales y tangenciales.

2.3.2.1.- ENSAYOS EN MODO I

Es el ensayo de *pull-off*, este ensayo de adherencia FRP-hormigón viene recogido por la norma ASTM D7522 proporcionando las pertinentes especificaciones. También la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE-E545-2000) detalla el procedimiento de ensayo (véase la Figura 2.35).

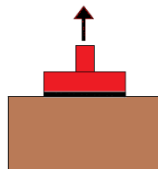


Fig. 2.35 Ensayo de tracción directa, *pull-off*. López González, (2012).

2.3.2.2.- ENSAYOS EN MODO II

Este ensayo es el más utilizado. Puede ser de cortante simple o doble, tal y como se aprecia en la Figura 2.36. Los autores Toutanji et al., (2007), Lu et al., (2005) han realizado trabajos referentes a los modelos de resistencia de adherencia. Los estudios relacionados con los modelos de tensiones de adherencia-deslizamiento, se han encontrado los autores tales como Neubauer y Rostasy, (1991); Nakaba et al., (2001); Saboia et al., (2003); Monti et al., (2003); Lu et al., (2005).

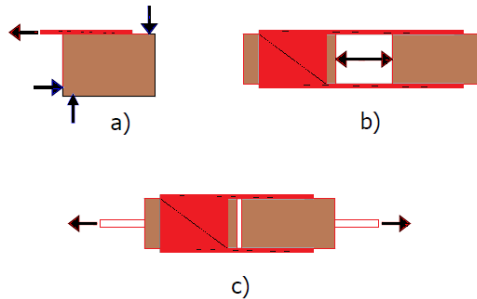


Fig. 2.36 Ensayos a cortante simple (a) y doble (b), (c) encontrados en la literatura. López González, (2012).

Otros autores como Nguyen et al. (2014), Barros y Lebre, (2010) proponen ensayos similares de doble corte tal y como se aprecia en la Figura 2.37.



Fig. 2.37 Ensayos a cortante doble propuesto por Nguyen et al., (2014).

Cortante simple

El método de ensayo de cortante simple mostrado en la Figura 2.36.a consiste en aplicar una fuerza de tracción al laminado FRP, utilizado en la caracterización de la adherencia. Taljsten, (1996); Chajes et al., (1996); Bizindavyi et al. (1999), Xu et al., (2001); Xiao et al., (2004); Sharma et al.,

(2006); Yao et al., (2005); Ferracuti et al., (2007); Toutanji et al., (2007) y Mazzotti et al., (2009) entre los trabajos más destacados.

Cortante doble

En el ensayo de corte doble (véase la Figura 2.36.b y c) se ejerce tracción en dos laminados adheridos en caras opuestas del bloque de hormigón, también es utilizado en la medición de la adherencia, pero no existen muchos trabajos por la dificultad en su ejecución. Khalifa et al., (1998); Nakaba et al., (2001); De Lorenzis et al., (2001); Xiao et al., (2004); Foster et al., (2005); Leung et al., (2006); Cao et al., (2007) y Toutanji et al., (2007), son los trabajos más destacados. La JSCE-E543-2000 recoge recomendaciones para este tipo de ensayos.

Foster et al., (2005) propusieron un ensayo de cortante doble para estudiar la relación entre la tensión y el deslizamiento.

Cao et al., (2007) realizan una serie de ensayos de cortante doble, de modo que el modo de fallo sea a una sola cara. Las variables de estudio son: el tipo de refuerzo, la longitud de adherencia y la resistencia del hormigón variable de resistencia convencional y alta (23 a 70 MPa), con el fin de obtener la relación tensión-deslizamiento. La mayoría de ensayos tuvieron un modo de fallo por despegue. Las curvas tensión –deslizamiento son bilineales, en la rama ascendente existe una no linealidad y una descendente lineal. Si bien la tensión máxima de adherencia está influenciada por la capacidad mecánica del hormigón, pero no tanto en el deslizamiento.

2.3.2.3.- ENSAYOS EN MODO III

Son ensayos tipo viga, donde se generan tensiones normales y tangenciales en la interfase.

Katz (2007) con vigas entalladas (véase la Figura 2.38.a) estudió la relación entre la adherencia FRP y el hormigón. Wan et al., (2004), aplicando al laminado una fuerza vertical, estando el bloque de hormigón sujeto a una superficie con una inclinación variable, esta variante del modo mixto permite estudiar diferentes posiciones entre los modos I y II (véase la Figura 2.38.c).

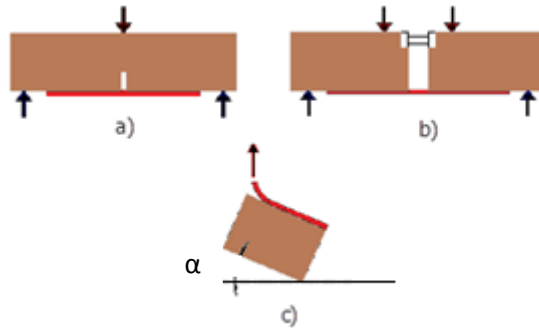


Fig 2.38 Ensayos en modo mixto. López González, (2012).

Otro modelo parecido al ensayo *beam-test* (véase la Figura 2.38.b), para caracterizar la adherencia FRP-hormigón, fue utilizado por Horiguchi y Saeki, 1997 y Perera et al., 2004. Silva y Biscaia, (2008) utilizaron una configuración similar para comprobar en ambientes agresivos a degradación de la unión. En este tipo de ensayo para que el modo de fallo aparezca en una de las piezas, se coloca un refuerzo de tejidos en forma de “U” para sujetar el laminado del extremo opuesto.

Guo et al., (2005) utilizaron una variante del ensayo *beam-test*, siendo las variables estudiadas la resistencia del hormigón y la longitud adherida de GFRP. En su estudio comprueban como la tensión máxima de adherencia aumenta al aumentar la resistencia del hormigón, en cuanto a la longitud adherida no aprecian influencia.

2.3.3.- PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA ADHERENCIA

2.3.3.1.- EFECTO DE LA CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA

En las láminas de FRP de refuerzo, la relación del ancho del refuerzo con el ancho del bloque de hormigón (b_p - b_c respectivamente) afecta al comportamiento de la interfase FRP-hormigón. La carga última disminuye al aumentar esta relación (Chen et al., 2001; Yao et al., 2005).

Yao J., et al. (2005) estudia la altura libre del bloque de hormigón (h_c) en la cara próxima al extremo traccionado en ensayos de cortante simple, utilizó dos alturas libres con una diferencia de 115 mm entre los dos casos, comprueba que existe un aumento del 10% para la altura libre mayor. En los ensayos para valores intermedios, obtiene una alta dispersión de sus

resultados, no siendo concluyentes. Si pudo comprobar la influencia en la distribución de las tensiones.

En cuanto a las barras de FRP, el diámetro influye, a mayor diámetro menor es la resistencia de adherencia. Es por ello que en ACI 318R-95, determina un factor de tamaño de refuerzo en su fórmula de la longitud de adherencia.

Cuando una barra trabaja en tracción sin ningún tipo de anclaje solo por adherencia de sus paredes con el hormigón, hay un diferencial tensional entre el núcleo y la superficie, debido a la limitada rigidez de cizallamiento axial. Esto resulta en una distribución no uniforme de tensiones normales a través de la sección transversal de la barra.

Cuando el diámetro de la barra aumenta, la diferencia entre tensión máxima y la media aumenta y por lo tanto la resistencia final de la adherencia de la barra disminuye. En aquellos materiales con poca rigidez a cortante como es el GFRP el efecto es mayor que en las barras de acero. Esto es debido en las barras de FRP, del valor a cortante de la resina que actúa como matriz en toda su longitud (Achillides, 1998; Achillides y Pilakoutas, 2004; Tepfers, 2006).

2.3.3.2.- EFECTO DE LA LONGITUD ADHERIDA

En cuanto a las láminas de refuerzo se ha encontrado en la literatura que la existencia de una longitud efectiva de adherencia está asociada a la carga máxima; aquellas longitudes superiores a la longitud efectiva de adherencia no van a suponer aumento en la carga última (Chen et al., 2001; Xu et al., 2001; Yao et al., 2005).

Al disponer una menor longitud adherida que la longitud efectiva, la resistencia de adherencia entre el hormigón y el FRP disminuye, tal y como muestra el autor de la Figura 2.39 López González (2012) sus estudios.

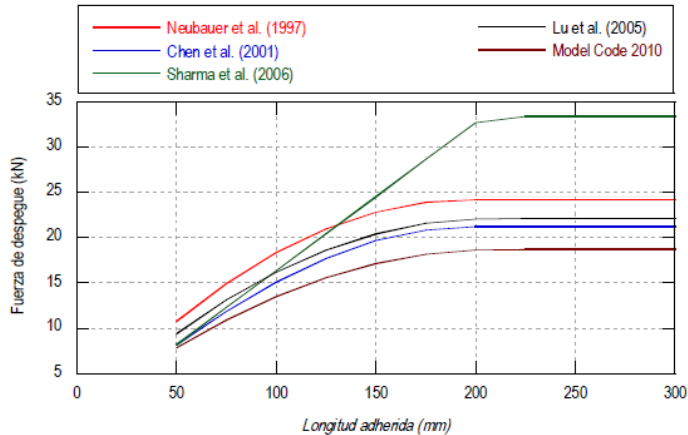


Fig. 2.39 Influencia de la longitud adherida en la resistencia de adherencia FRP-hormigón según los modelos de varios autores según Tesis Doctoral de López González (2012).

Los modelos presentan resultados similares en el cálculo de la longitud efectiva de adherencia para $f_c = 25$ MPa, y el valor, para los datos del ejemplo, está en torno a 210 mm. Por esta razón, en el gráfico de la Figura 2.38, todos los modelos estudiados llegan a la resistencia máxima de adherencia para una longitud adherida cercana a dicho valor, aunque los valores de la fuerza de despegue difieren significativamente en función del modelo utilizado, según la Tesis Doctoral realizada por López González (2012).

En las barras de FRP, la adherencia entre barras de acero y hormigón se estudia con longitudes de adherencia cortas, normalmente 5 veces el diámetro. En el caso de barras de FRP, las diferencias son más grandes entre los extremos cargados y descargados, debido a la no linealidad en distribución de fuerzas de adherencia frente a las barras de acero.

Es por ello que en barras de FRP las longitudes de adherencia sean mayores para que la influencia de la distribución no lineal sea mayor, como se confirma en Achillides, (1998); Benmokrane et al., (1996); Achillides y Pilakoutas, (2004); Cosenza et al., (2002); Al-Zahrani et al., (1999); Benmokrane et al., (2000).

Chaallal y Benmokrane (1993) comprueban en su estudio que la fuerza de adherencia en barras de GFRP tienen un valor promedio de 13 MPa, siendo alrededor de 19 MPa en las barras de acero corrugadas. Con longitudes de anclaje de 10 a 20 veces el diámetro de la barra de refuerzo de GFRP se alcanza la resistencia de rotura de las barras.

El incremento de la longitud de anclaje disminuye la tensión adherente máxima (véase la Figura 2.40) (Achillides y Pilakoutas, 2004; Nanni et al., 1995), produce un aumento de la fuerza y un incremento de la rigidez adherente inicial durante el ensayo de *pull-out* (Benmokrane et al., 2000). Este fenómeno se observa en barras de acero debido una distribución no uniforme de la tensión adherente a lo largo de la longitud de la barra. El incremento de la tensión adherente al disminuir la longitud de anclaje es mayor en barras de menor diámetro que en barras de mayor diámetro.

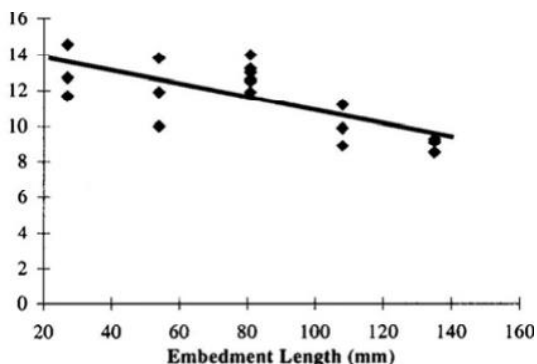


Fig. 2.40 Influencia de la longitud de anclaje en barras de CFRP (\varnothing 13,5mm).
Achillides y Pilakoutas, (2004).

2.3.3.3.- EFECTO DE LA PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE

En las láminas de FRP de refuerzo, la influencia en la preparación de la superficie del hormigón, es importante en la adherencia FRP-hormigón, Toutanji y Ortiz, (2001) trataron la superficie de las probetas con agua a presión y chorro de arena, siendo estas ensayadas a cortante doble. La preparación con agua, genera una mayor rugosidad aumentando la resistencia de adherencia un 50% frente al chorreado de arena.

Katz Amnon (2007), analizó la influencia de superficies deterioradas en vigas entalladas en la adherencia con CFRP y GFRP, forzando el modo de fallo en un extremo tras reforzar el anclaje con forma de «U» en el extremo opuesto de la pieza.

La probeta presenta tres tipos de hormigón con distintas capacidades mecánicas, el refuerzo de FRP está en contacto con el hormigón más débil (14 MPa), el modo de fallo sobrevino en la capa de hormigón de menor resistencia, pero en los caso con piezas donde solo existe un tipo de hormigón el fallo se producía en la interfase adhesivo-hormigón.

Yalim et al., (2008) estudiaron la influencia de la rugosidad de la superficie en vigas en T reforzadas con laminados y ensayos de cortante doble, con diferentes configuraciones de anclaje en forma de "U" que es el sistema más habitual. Según los autores el nivel de rugosidad de la superficie de hormigón no tiene influencia en el comportamiento global ni en el modo de fallo (despegue o rotura del refuerzo) independientemente de la configuración de anclaje. Se ha encontrado numerosos autores que difieren de estas conclusiones.

En cuanto a las barras de FRP, Kanakubo et al., (1993) utilizaron barras con diferentes deformaciones superficiales. Se emplean diferentes tratamientos superficiales en el estudio realizado por Makitani et al., (1993), quienes han estudiado el comportamiento tras realizar pruebas de adherencia con diferentes tipos de barras corrugadas y lijadas, fabricadas en carbono, aramida y fibras de vidrio embebidas en una matriz resina epoxi. El lijado abre el poro del material aumentando la superficie específica de contacto a la vez que aumenta el enlace químico, aumentando de la resistencia de adhesión.

Según Makitani et al., (1993), el recubrimiento de arena en las barras permite una buena de adherencia inicial, pero la interfase entre los granos de arena y barras se separaron bruscamente, con un fallo de la unión frágil, se confirma también este fenómeno en la presente Tesis Doctoral.

En las mismas condiciones de ensayo la tensión media adherencia fue mayor en barras de acero que en barras de GFRP. El deslizamiento de las barras fue mayor para las barras de GFRP que para las barras de acero. Las barras de GFRP en espiral, la adherencia y fricción influyen mayoritariamente en la adherencia.

La transferencia de carga entre el refuerzo FRP y el hormigón se estudió experimentalmente por Nanni et al., (1995). Se realizan ensayos de *pull-out*, con superficie lisa y rugosa en las barras, con longitudes de empotramiento diferentes. También se utilizaron tres tipos de configuración de fibra-resina: vidrio-viniléster, carbono-viniléster y carbono-epoxi. Los resultados mostraron que la resistencia de las barras lisas fue muy baja.

Las barras rugosas de fibra de vidrio y carbono con la matriz de viniléster desarrollaron tensiones promedio de adherencia de 13 y 14 MPa, respectivamente, mientras que las barras rugosas carbono y matriz epoxidica desarrollaron resistencias de unión de 23 MPa. Las barras de acero se caracterizaron por tener un tensión de adherencia entre 15 y 20 MPa. Todas las barras mecanizadas fallaron por cizallamiento de los resaltes seguido de deslizamiento, lo que indica que el modo de fallo fue

debido a por la fuerza y la acción mecánica de las deformaciones sobre la superficie de la barra en lugar de adherencia y fricción. La resina de la matriz controla la resistencia de la unión. La altura de las deformaciones de las barras no fue significativa en la resistencia de la adherencia y el modo de fallo.

La disposición y los materiales de ensayo utilizados en Nanni et al. (1995), se usaron en Al-Zahrani et al. (1999). Las barras estudiadas estaban mecanizadas y envueltas, se estudiaron con diferentes longitudes, resaltes y diferentes anchuras y alturas.

Las barras de FRP mecanizadas con deformaciones asimétricas se concluyó que tenían curvas tensión-deslizamiento de cizalla comparables. Las probetas con la misma anchura pequeña en el resalte presentan un modo de fallo de rotura por rasante del resalte. La longitud y altura de empotramiento de los resaltes no tuvo efecto sobre el modo de fallo debido a la poca anchura del resalte donde el material rompe por rasante. El aumento de la anchura de patilla de 3,8 a 8,9 mm cambia el modo de fallo rompiendo por rasante el hormigón, al ganar sección el FRP frente al esfuerzo de corte.

En el modo de fallo para las barras de FRP con envoltura helicoidal, la resistencia más alta es durante el deslizamiento ofrecido por la envoltura residual, es un mecanismo de adherencia de fricción.

La resistencia de la adherencia en el caso de barras mecanizadas, es la resina de la matriz el factor más importante. Las barras de FRP mecanizadas, tienen más resistencia al corte que las barras de FRP envueltas.

Las barras de GFRP arenadas descienden rápidamente después de alcanzar el esfuerzo máximo de adherencia, mientras que las barras GFRP con envoltura helicoidal y recubrimiento de arena tienen una reducción gradual de la tensión de adherencia.

En la Figura 2.41, se muestra diferentes tratamientos superficiales y mecanizados, para realizar ensayos de *pull-out*, los mecanizados de la superficie crean salientes en la barra con configuraciones diferentes, con diferentes tipos de arenado de diferentes tamaños de grano (AL-Mahmoud, F., et al, 2007; Baena PhD thesis, 2010).



Fig. 2.41 Barras de FRP utilizadas con distintos tratamientos superficiales (**a** AL-Mahmoud et al., 2007y **b**, Baena PhD thesis, 2010).

La tensión adherente máxima de las barras de CFRP depende del tipo de tratamiento o geometría superficial y de la resistencia de la matriz polimérica. En las barras de CFRP corrugadas la tensión adherente máxima desarrollada es similar a la producida por las barras de acero corrugado, del orden de 18 MPa. La tensión adherente máxima en las barras de CFRP arenadas y texturizadas es del orden de 1,5 a 2 veces menor a la desarrollada por las barras de CFRP y acero corrugado (Tesis Doctoral de Calvet V. 2014).

En la Tesis realizada por Almerich A., (2010) de sus ensayos de adherencia con distintos diámetros de barras de GFRP arenadas se desprenden tensiones de adherencia mayores a medida que se aumenta el diámetro de la barra, (τ medias de 9.67 MPa).

2.3.3.4.- EFECTO DEL TIPO DE ADHESIVO

Los tipos de adhesivos comúnmente utilizados en el refuerzo de estructuras de hormigón con materiales compuestos son epoxi y viniléster. Gao et al. , (2003), mediante ensayos de doble voladizo asimétrico, estudiaron el efecto del caucho como aditivo del adhesivo en proporciones de 10% y 20% en el comportamiento de la interfaz FRP-Hormigón. Encontró un aumento en la tenacidad de fractura entre 2.2% y 9% para el adhesivo epoxi, respectivamente, y 28% y 53% para el adhesivo viniléster. Los investigadores atribuyen este fenómeno al hecho de que el caucho induce una mejor penetración del adhesivo en el hormigón de 20% a 25% mayor en comparación con los adhesivos sin adición.

La mayoría de adhesivos utilizados se recomienda que tengan espesores pequeños con el fin de minimizar su rotura ya que el modo de fallo es muy frágil (Giner y Albelda, 2001).

En los caso de refuerzo de FRP en estructuras de hormigón, se puede utilizar cualquier tipo de resina que sea resistente puesto que el soporte se

encuentra en un estado sólido. En el caso de las estructuras híbridas que se analizan la unión entre el FRP y el hormigón presentan una interfase húmeda en la que el hormigón en estado fresco es vertido en la estructura. Es por ello que se hace necesario utilizar adhesivos que en presencia de agua o humedad puedan polimerizar y endurecer adecuadamente. La misma resina epoxi tan habitual en los refuerzos no puede ser utilizada ya que los mecanismos de polimerización habituales hacen que no endurezca en presencia de humedad elevada. La resina de poliéster que se ha utilizado en la presente Tesis Doctoral como elemento de adherencia entre el GFRP-hormigón tiene una alta capacidad adherente en presencia de humedad, ya que todas las probetas híbridas se fabrican con hormigón en estado fresco.

2.3.3.5.- EFECTO DE LA COMPOSICIÓN DEL HORMIGÓN

Es un tema poco estudiado en referencia a la adherencia FRP-hormigón se refiere como refuerzo externo. La resistencia de adherencia aumenta con el contenido de árido grueso.

Seara-Paz et al. (2014) realizaron un estudio sobre el comportamiento adherente del hormigón reciclado con distintos porcentajes de árido reciclado y natural. La adherencia se ve disminuida con el incremento del porcentaje del árido reciclado usado. De los resultados del estudio experimental de *pull-out*, se desarrolló una modificación (se introduce un nuevo término que incluye el porcentaje de sustitución de árido reciclado) en la expresión para la capacidad adherente máxima. A medida que se aumentó la cantidad de árido reciclado la capacidad mecánica a compresión disminuye del mismo modo que la capacidad adherente. La capacidad adherente fue menor que en un hormigón convencional.

Yin y Wu (2003), estudiaron el comportamiento de vigas de hormigón reforzado con fibras de metal en diferentes proporciones, la carga que originaba la fisuración no cambiaba, pero la carga a la que se producía el despegue del refuerzo y la carga última era mayor a medida que aumentaba el contenido de fibras. En el caso de utilizar un alto contenido en fibras (1%) el modo de fallo pasa de ser por despegue a romper por el refuerzo. El refuerzo llegaba hasta los apoyos y el despegue se iniciaba por una grieta diagonal, que no se manifestó al tener 1% de fibras el hormigón. El cambio en el modo de fallo también es indicado por Li et al., (2008), quienes utilizaron además de fibras metálicas, fibras de polipropileno.

2.3.3.6.- INFLUENCIA DEL MÉTODO DE ENSAYO

Las tensiones en la interfaz FRP-hormigón están influenciadas por el método de ensayo. Un estudio llevado a cabo por Chen et al. (2001) que consistió

en modelos de elementos finitos de ensayos de corte doble, corte simple y *beam-test* modificado, muestra que la tensión de adherencia conseguida por el método *beam-test* es superior a la de los ensayos de corte simple y corte doble. Existe una leve diferencia entre corte simple y corte doble. El estudio no tiene soporte experimental.

Horiguchi y Saeki (1997), realizan una campaña experimental mediante ensayos de tracción directa, cortante doble y *beam-test*, siendo el de tracción directa el que daba mayor resistencia de adherencia.

2.3.3.7.- INFLUENCIA DEL MÓDULO DE DEFORMACIÓN LONGITUDINAL DEL MATERIAL COMPUESTO

En cuanto a las láminas de FRP, en los modelos para el cálculo de la resistencia de adherencia interviene el módulo de deformación longitudinal del material FRP (E_p) como una variable o en la longitud efectiva (véase la Figura 2.42). A medida que aumentamos la rigidez la lámina la fuerza de despegue aumenta.

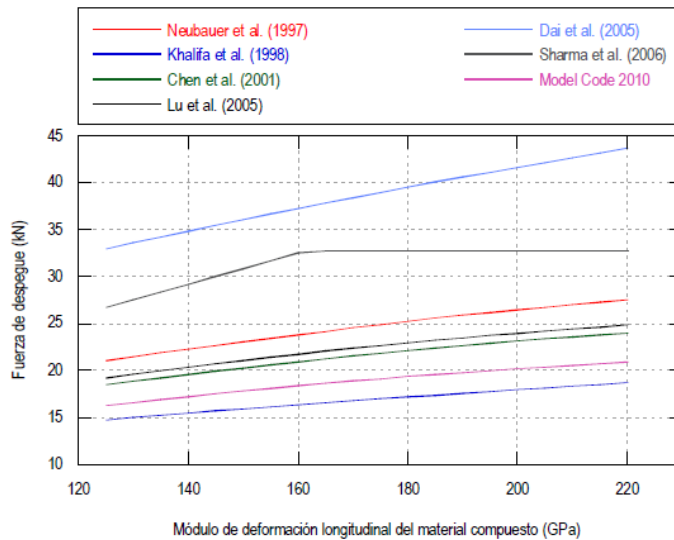


Fig. 2.42 Efecto del módulo de elasticidad del material compuesto en la carga de despegue según Tesis Doctoral de González López (2012).

En cuanto a las barras de FRP, el módulo elástico en el caso de CFRP únicamente influye en el comportamiento adherente cuyo mecanismo adherente se desarrolle por acuñamiento mecánico. Las barras con mayor

módulo elástico, presentan menores deslizamientos para una misma tensión adherente, frente a las barras con menor módulo (Achillides 1998, 2004; Aiello et al., 2007).

Kanakubo et al. (1993), en el estudio realizado sobre barras corrugadas de CFRP y GFRP, con E_p 108 GPa y 44,1 GPa, respectivamente, no aprecian variación significativa en la tensión adherente máxima (7,80 MPa y 7,37 MPa respectivamente). Hay que tener en cuenta que el modo de fallo en estos ensayos de *pull-out* descentrado, es por *splitting*, no alcanzándose probablemente las tensiones de adherencia máximas, es por ello que no influya en este caso el módulo de elasticidad del material compuesto.

Aiello et al. (2007), se observa que para una misma tipología de geometría superficial de las barras de FRP (CFRP y GFRP) con hélice adherida y arenadas, que las barras con mayor módulo elástico, desarrollan una mayor tensión adherente a un menor deslizamiento.

Tal y como se aprecia en la Figura 2.43, Achillides et al. (2004) también observa que a mayor módulo de elasticidad mayores son las tensiones de adherencia con menores deslizamientos.

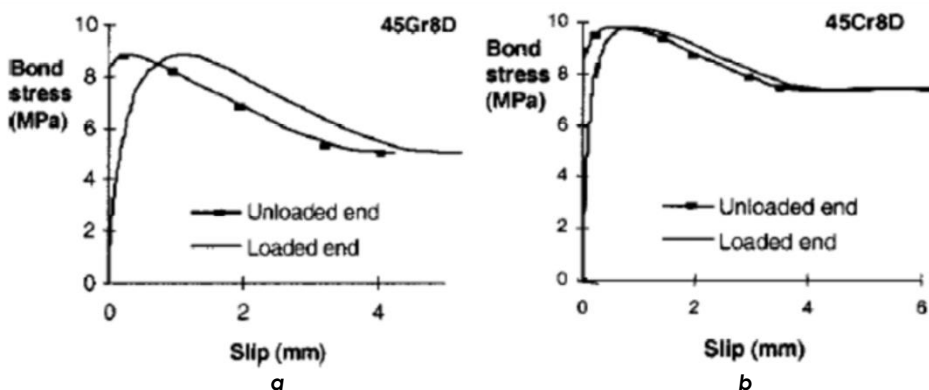


Fig. 2.43 Influencia del módulo de elasticidad de las barras de FRP en el comportamiento adherente. **a** barras de GFRP y **b** barras de CFRP Achillides et al., (2004).

2.3.3.8.- INFLUENCIA DE LA RELACIÓN BP-BC

La relación entre el ancho del laminado de FRP y el ancho del bloque de hormigón (b_p - b_c) tiene influencia en la longitud efectiva y resistencia de adherencia, tal y como se aprecia en las Figuras 2.44 y 2.45.

En función de dicha relación y a media que aumenta la fuerza de despegue disminuye según la mayoría de investigadores.

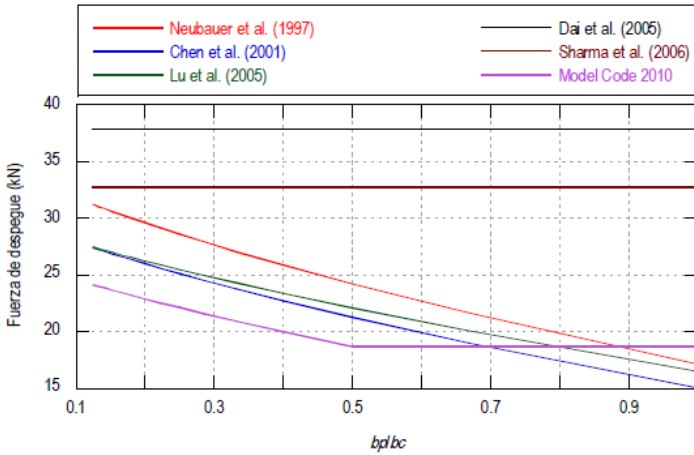


Fig. 2.44 Efecto de la relación bp/bc en la resistencia de adherencia FRP-hormigón, Tesis Doctoral de López González (2012).

Salvo en los cálculos realizados para el código modelo la longitud efectiva de adherencia no varía en función de la relación bp/bc .

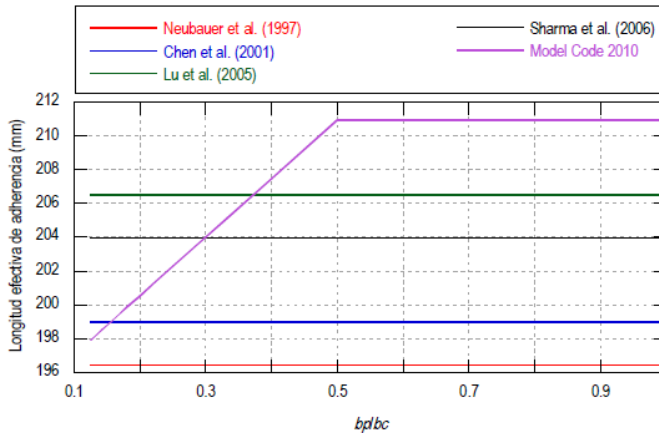


Fig. 2.45 Efecto de la relación bp/bc en la longitud efectiva de adherencia FRP-hormigón, Tesis Doctoral de López González (2012).

2.3.3.9.- INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

En el caso de las láminas FRP de refuerzo, el autor López González (2012) en su Tesis Doctoral analiza la influencia de la resistencia a compresión del hormigón. En algunos modelos interviene la resistencia a tracción obtenida del ensayo brasileño sin embargo, para poder llevar a cabo la comparación, la resistencia a tracción se ha calculado a partir de la de compresión mediante la conocida relación $f_{ctm} = 0.3f_c^{2/3}$ para resistencias inferiores o iguales a 50 MPa y $f_{ctm} = 0.58f_c^{1/2}$ para el caso contrario.

Los datos son los siguientes: $b_c = 100$ mm, $b_p = 50$ mm, $t_p = 1.2$ mm, $E_p = 165$ GPa, $l_b = 200$ mm. En las figuras 2.46 y 2.47 se representan los resultados del análisis realizado aplicando diferentes modelos de cálculo de la fuerza despegue y de la longitud efectiva de adherencia.

A medida que aumenta f_{ck} la fuerza de despegue aumenta, tal y como se aprecia en la Figura 2.46.

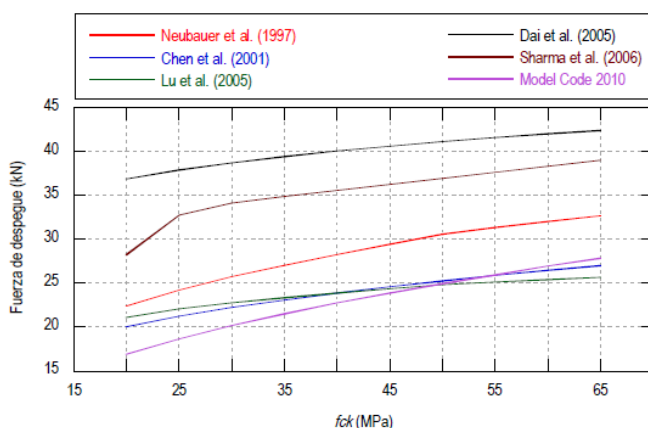


Fig. 2.46 Influencia de la resistencia del hormigón en la resistencia de adherencia FRP-hormigón, Tesis Doctoral de López González (2012).

Como se observa en la Figura 2.47 la longitud efectiva de adherencia disminuye a medida que aumenta f_{ck} .

Las curvas de la Figura 2.47 muestran que todos los modelos presentan resultados similares de la longitud efectiva de adherencia para hormigones inferiores a 25 MPa. En cambio, para hormigones de resistencia superior, la diferencia entre los modelos aumenta conforme aumenta la resistencia del hormigón.

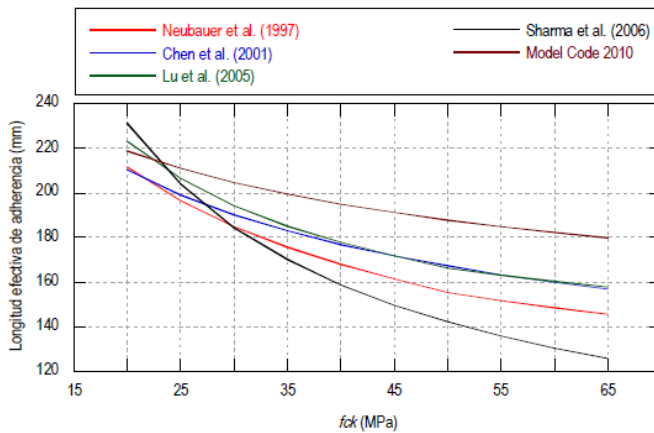


Figura 2.47 Influencia de la resistencia del hormigón en la longitud efectiva de adherencia según los modelos, Tesis Doctoral de López González (2012).

En cuanto a lo que se refiere respecto de las barras de FRP:

La resistencia del hormigón es importante para controlar el fallo de adherencia por *splitting*. Cuando las tensiones de deformación a la tracción exceden la resistencia a la tracción del hormigón circundante, aparece el fenómeno de *splitting*, que ocurre generalmente a una menor carga que el modo de fallo. Como consecuencia el fallo por *splitting*, la tensión de adherencia en la barra se pierde bruscamente no pudiendo estudiar más allá de este fenómeno ninguna relación tensional y los deslizamientos.

ACI 318R-95 y Eurocode 2, recoge indirectamente en sus ecuaciones de anclaje de longitud, la capacidad resistente del hormigón.

En hormigones de 30 MPa el fallo se produjo en la superficie de la barra, apareciendo el fenómeno de *peeling* en su capa superficial. Para resistencias del hormigón menores de 15 MPa el hormigón fue aplastado frente a las deformaciones de barras y la resistencia de la unión dependía de la resistencia al cortante del hormigón. El mecanismo de arrancamiento de las barras de FRP es distinto a las de las barras de acero corrugadas, cuyo comportamiento de adherencia interviene fundamentalmente la capacidad mecánica de la matriz de hormigón (Achillides, 1998; Achillides y Pilakoutas, 2004).

Chaallal y Benmokrane (1993) se utilizaron hormigones de alta resistencia y convencional. Mediante el ensayo de *pull-out* tres diámetros de barra fueron probados (13, 16 y 19 mm) con longitudes de empotramiento de 5 o 10 veces el diámetro de la barra. La resistencia de la unión de las barras de FRP no dependía de la resistencia del hormigón de la misma manera como el acero.

Según Nanni et al. (1995) para hormigones desde 43 a 66 MPa, el modo de fallo no varía y no se encontró una influencia significativa en la resistencia de adherencia.

La resistencia del hormigón y la resistencia a cortante de la barra determinan fundamentalmente el modo de rotura de adherencia de las barras de CFRP corrugadas, deformadas y con tratamiento superficial durante el ensayo de *pull-out*, (Achillides y Pilakoutas, 2004; Dávalos et al., 2008; Baena et al., 2009; Tepfers, 2006).

En los ensayos realizados por Tepfers (2006), tal y como se aprecia en la Figura 2.48 muestra el efecto de la resistencia a compresión del hormigón sobre la adherencia en barras de CFRP corrugadas. En hormigones con resistencia a compresión mayor a 30 MPa, la tensión adherente en barras de CFRP corrugadas o deformadas no depende totalmente de la resistencia a compresión del hormigón, depende fundamentalmente de la resistencia a cortante de la barra. En aquellos casos donde la capacidad mecánica del hormigón disminuya (menor a 20 MPa), el modo de rotura se produce aplastándose el hormigón enfrente de las corrugas de la barra, disminuyendo la tensión adherente frente a hormigones de mayor resistencia.

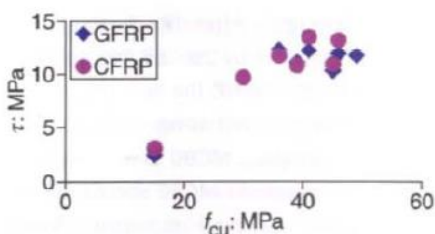


Fig. 2.48 Influencia de la resistencia a compresión del hormigón en la resistencia de adherencia de las barras de CFRP y CFRP corrugadas. Tepfers, (2006).

Los estudios realizados por Baena et al. (2009), tal y como se muestra en la Figura 2.49.a, muestra la relación entre la tensión adherente de barras de

CFRP arenadas (R1), texturizadas (R3) y acero corrugadas (R7) utilizando hormigones de $f_{c1}=28$ y $f_{c2}=52$ MPa.

En la Figura 2.49.b, se muestra la relación entre la tensión máxima adherente en ambos hormigones ($\tau_{\max.C2}/\tau_{\max.C1}$). Para las barras de CFRP arenadas se incrementó 1.5 veces la tensión adherente en hormigón con resistencia superior en el caso de diámetros 10,65 y 13,43 mm (n° 3 y n° 4, respectivamente). Las barras de CFRP texturizadas de diámetro 9,50 mm (n° 3) no presentan influencia la resistencia del hormigón, con barras de diámetro 12,53 mm (n° 4) si muestra un apreciable incremento de la tensión adherente. Esto puede deberse a defectos en la superficie de la barra de CFRP texturizada, ya que otros investigadores con el mismo tipo de barras texturizadas alcanzan valores superiores a 20 MPa en hormigones de 45 MPa (Davalos et al., 2008).

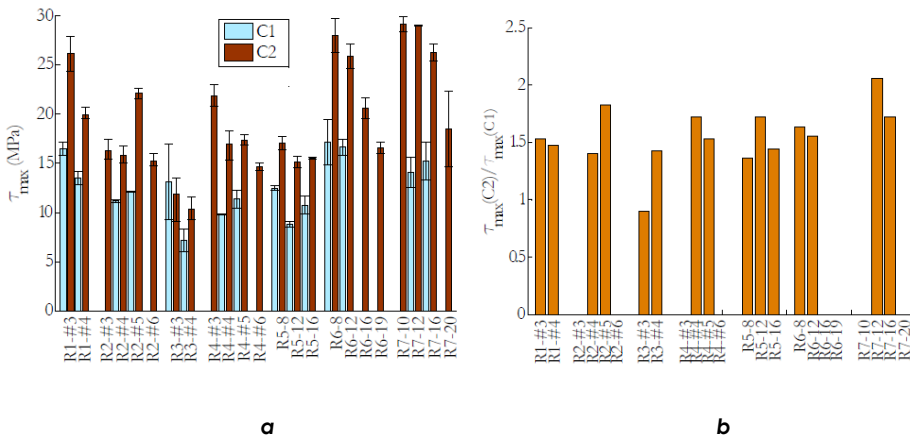


Fig. 2.49 Influencia de la resistencia a compresión del hormigón en tensión adherente de las barras de CFRP arenadas, texturizadas y acero corrugadas. Baena et al., (2009).

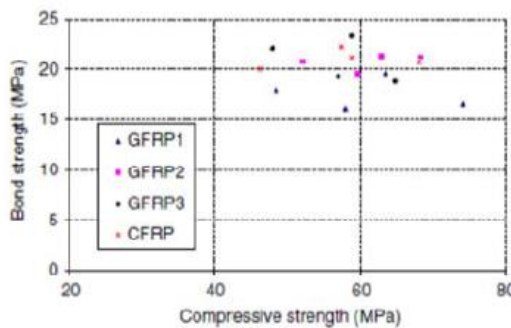


Fig. 2.50 Influencia de la resistencia a compresión del hormigón en la tensión adherente de las barras de CFRP texturizadas. Dávalos et al., (2008).

En la Figura 2.50, obtenida del estudio realizado por Dávalos et al. (2008) se observa que a partir de 45 MPa la tensión adherente se incrementa muy levemente.

2.3.3.10.- CONFINAMIENTO

La presión de confinamiento sobre las barras de CFRP presenta una menor influencia que en las barras de acero, al tener una resistencia a cortante menor la presión de confinamiento se disipa en la superficie de la barra (Achillides, 1998).

Malvar et al. (2004), en su estudio sobre la influencia de la presión de confinamiento en barras de CFRP corrugadas, y arenadas, mediante el ensayo de *pull-out* con confinamiento alcanzan tensiones de confinamiento de 3,5 a 24 MPa. Las barras de CFRP corrugadas en presencia de tensiones de confinamiento durante el ensayo de *pull-out*, presentan un comportamiento de adherencia similar a las barras de acero corrugadas, puesto que su tensión de adherencia a un nivel de confinamiento máximo se incrementa 2,5 veces respecto de la tensión adherente inicial (véase la Figura 2.51).

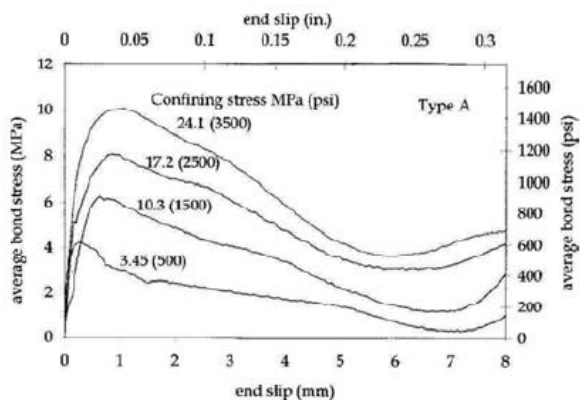


Fig. 2.51 Comportamiento de adherencia de las barras de CFRP corrugadas con confinamiento, durante el ensayo de pull-out. Malvar et al., (2004).

No sucede así con las barras de CFRP arenadas debido a la pequeña altura de las deformaciones de la superficie de la barra, las cuales no producen el confinamiento necesario contra el hormigón para aumentar la tensión de adherencia (véase la Figura 2.52).

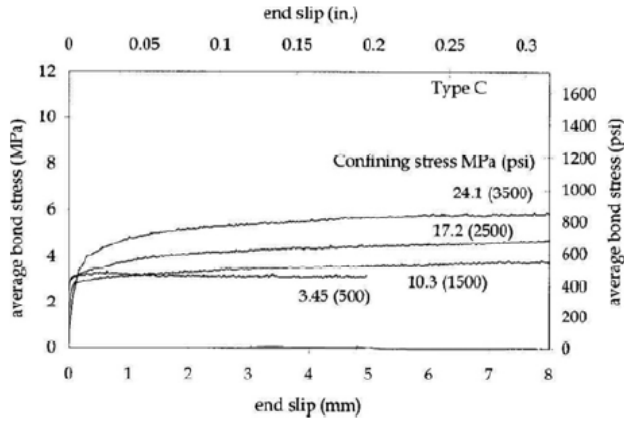


Fig. 2.52 Comportamiento de adherencia de las barras de CFRP arenadas con confinamiento, durante el ensayo de pull-out. Malvar et al., (2004).

2.3.3.11.- INFLUENCIA DE LOS CONECTORES

Miravete et al. (2006) realizaron un estudio experimental de conectores de vidrio AR para puentes de materiales compuestos, para determinar los conectores más idóneos en el paso superior de la Autovía del Cantábrico en España. Tal y como se muestra en la Figura 2.53 los conectores son perfiles tipo IP combinados en algunos casos con resina, se observa que a pequeños desplazamientos es independiente el tipo de conector con o sin resina según los autores.

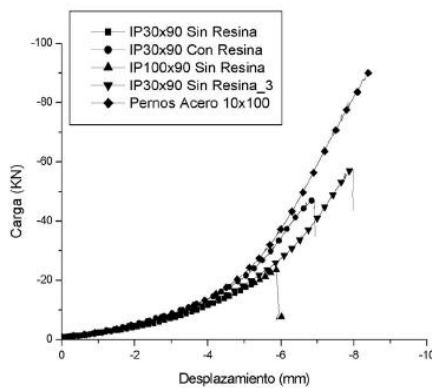


Fig. 2.53 Ensayo push-out entre un perfil de GFRP y losas de compresión de hormigón. Miravete et al., (2006).

Nguyen et al. (2014) realizaron un estudio con diversos tipos de conectores, entre un perfil de GFRP y unas losas de compresión de hormigón de muy alta resistencia reforzado con fibras metálicas (UHPFRC). La metodología de ensayo empleada es el *push-out*, podría ser una variante del *pul-out* adaptado a estos sistemas (véase la figura 2.54). Este tipo de ensayo es una consecuencia de la falta de un ensayo normalizado para este tipo de casos.



Fig. 2.54 Ensayo *push-out* entre un perfil de GFRP y losas de compresión de UHPFRC. Nguyen et al., (2014)

En el estudio utilizó diferentes tipologías de tornillería: recta e inclinada con el mismo diámetro, de acero y de GFRP, incluso con distintas posiciones. Todo ello con el fin de garantizar la máxima conexión entre el perfil de GFRP y la capa de compresión en estructuras híbridas (véase Figura 2.55).

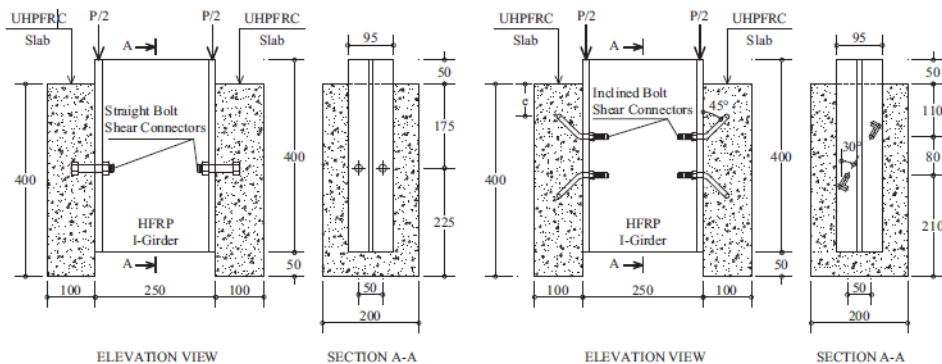


Fig. 2.55 Distintas disposiciones y tipología de tornillería en el ensayo *push-out* entre un perfil de GFRP y losas de compresión de UHPFRC. Nguyen et al., (2015)

Entre sus conclusiones destaca que si la relación entre la profundidad embebida del tornillo respecto del diámetro es mayor 2.4, los conectores tienen un comportamiento dúctil entre el GFRP y el hormigón, en las probetas con tornillería y sin unión adhesiva. En cuanto a las probetas con unión adhesiva y tornillería, en primer lugar la unión adhesiva falla para posteriormente deformar o romper la tornillería; en estos casos después de la rotura del adhesivo es la tornillería la que dota a la unión de una capacidad de reserva elevada. Los conectores inclinados dan una respuesta más dúctil al enlace que los rectos, esto se debe a que la inclinación del conector permite que se doblen y deslicen en el interior del hormigón con mayor facilidad. Destaca además la necesidad de seguir investigando en este campo con el fin de conferir la mayor ductilidad posible a las conexiones.

2.3.4.- RELACIÓN TENSIÓN DE ADHERENCIA-DESLIZAMIENTO

En el caso de las tensiones en la interfaz FRP-hormigón, existen numerosos modelos propuestos por la comunidad de investigadores, entre los que destacan los de Neubauer y Rostasy, (1999); Nakaba et al., (2001); Monti et al., (2003); Savoia et al., (2003); Dai y Ueda, (2003), Dai et al., (2005); Lu et al., (2005); Guo et al., (2005); Mohamed et al., (2008). Todos los modelos se caracterizan por una rama ascendente hasta alcanzar la tensión máxima asociada a un deslizamiento δ_0 , seguida de una rama de ablandamiento (atribuido a la microfisuración del hormigón) hasta que la tensión es nula para un deslizamiento δ_u .

La gran mayoría de los modelos consideran como parámetros: la resistencia a compresión del hormigón, la rigidez axial del material FRP, la longitud de adherencia y la geometría de los adherentes. Asimismo, los ensayos cubren un amplio rango de dichos parámetros. Las propiedades mecánicas del adhesivo se encuentran en menor medida en los citados modelos.

Se han desarrollado modelos basados en medidas de deformación o curvas de carga-deslizamiento (Nakaba et al., 2001; Lu et al., 2005). La capacidad de tracción en caso de fallo de la unión, la distribución de la deformación del FRP, y las distribuciones de tensión de adherencia se pueden obtener a través de verificaciones analíticas o numéricas.

Se han propuesto una serie de modelos de tensión de adherencia-deslizamiento, tal y como sigue: (a) el tipo elástico, (b) tipo elasto-plástico, y (c) la tracción tipo de ablandamiento (tales como bilineal, o Popovics) (Nakaba et al., 2001; Brosens et al., 1999; Ko y Sato, 2007; Lorenzis et al.,

2001; Maeda et al., 1997; Popovics, 1973; Santos et al., 2003; Sato et al., 1997; Sato et al., 2001; Ueda et al., 2005; Yoshizawa et al., 2000). La Figura 2.56 muestra modelos de tensión-deslizamiento.

Según se aprecia en la Figura 2.56 el modelo tipo bilineal (Brosens y Gemert, 1997; Brosens, 2001), se divide en una rama ascendente elástica y otra rama descendente plástica, basado en datos experimentales. El esfuerzo máximo de adherencia en la rama elástica se define como τ_m , con S_t el deslizamiento correspondiente a τ_m . El fin de la rama plástica corresponde a la tensión de adherencia nula, tiene un desplazamiento S_r . El modelo tipo Popovics originó un enfoque numérico para una completa relación tensión de adherencia-deslizamiento del FRP-hormigón (Popovics, 1973). El área de la superficie que se encuentra por debajo en la curva tensión-deslizamiento, es considerada como la energía de fractura (G_f) del sistema de adherencia.

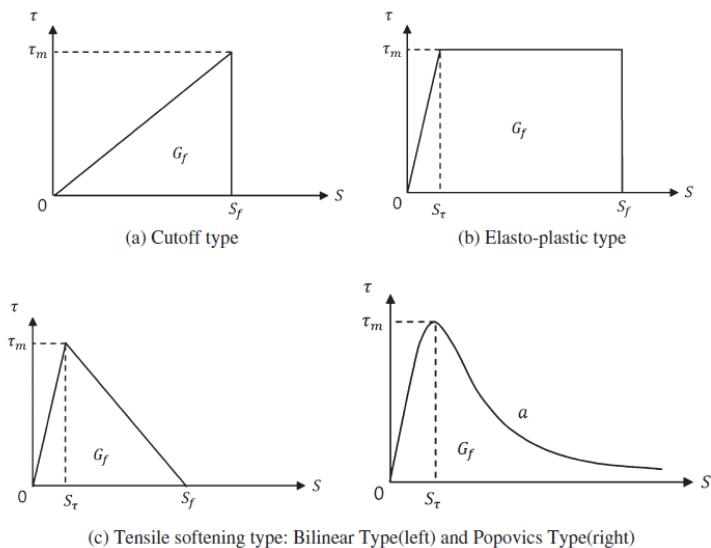


Fig. 2.56 Modelos relación tensión de adherencia-deslizamiento, Ko et al., (2014).

Las relaciones se originan a partir de los tipos mencionados de los modelos (véase la Figura 2.56), aunque la mayoría de las relaciones tienen una rama ascendente y descendente y se caracterizan generalmente por tres parámetros: máximo tensión de adherencia, deslizamiento a tensión máxima, y el deslizamiento en tensión de adherencia nula. El modelo de Neubauer y Rostasy, (1997, 1999), el que se modifica desde Holzenkämpfer, (1994), parece poco realista ya que no considera deslizamiento después máxima tensión de adherencia (véase la Figura 2.56.a, el tipo de corte),

aunque en Neubauer y Rostasy, (1997) también propusieron un modelo bilineal (véase la Figura 2.56.c). Los modelos de Lu et al. 2005 y Monti et al. (2003), que se derivan de la de Neubauer y Rostasy, (1999); Brosens y Gemert, (1999) y Brosens, (2001), consideran una tensión máxima de adherencia como una función de la resistencia del hormigón a la tracción y un factor de relación de anchura, que es un parámetro de efecto tamaño, teniendo en cuenta la influencia de la anchura de la relación FRP-hormigón Brosens y Gemert, (1999). El deslizamiento en tensión máxima en los modelos de Monti et al., (2003) y Brosens y Gemert, (1999), se consideraran las características del adhesivo además de las características del hormigón, mientras que el deslizamiento en tensión máxima en el modelo de Lu et al., (2005), está compuesto de una función de resistencia a la tracción de hormigón y el factor de relación de anchura.

La energía de fractura (G_f) y la máxima tensión de adherencia se consideran factores de deslizamiento máximo en el modelo simplificado de Lu et al., (2005) y en el modelo de Brosens y Gemert, (1999), mientras que sólo factor de relación de anchura se considera en el modelo de Monti et al., (2003).

El modelo de Savoia et al. (2003) se obtuvo por modificación del de Nakaba et al. (2001), que sólo considera resistencia a la compresión de hormigón como un parámetro de máxima tensión de adherencia, mientras que el deslizamiento en tensión máxima se decidió por un valor específico obtenido entre datos teóricos y experimentales. El modelo de Dai et al., (2005) se desarrolló desde el modelo de Dai y Ueda, (2003) que considera para la tensión máxima de adherencia, la energía de fractura interfacial y un parámetro interfacial (B), que depende del FRP y de las características adhesivas. Para el deslizamiento en tensión máxima en el modelo de Dai et al. (2005) es una función sólo del parámetro interfacial B .

El modelo de De Lorenzis et al. (2001) considera máxima tensión de adherencia como una función de solamente de la rigidez FRP. Aunque muchas pruebas experimentales se han realizado para examinar el comportamiento de adherencia de los sistemas de refuerzo FRP, no hay un modelo de deslizamiento adecuado aceptado generalmente, debido a la variedad de parámetros y una amplia gama de resultados experimentales (Guadagnini et al., 2012).

La relación de tensión-deformación bilineal se define en el FIB 2013 Código modelo, como se muestra en la Figura 2.57. Aunque el vínculo tensional puede ser calculada por las ecuaciones (1) y (2), los parámetros del modelo no se pueden obtener sin depender de los valores experimentales.

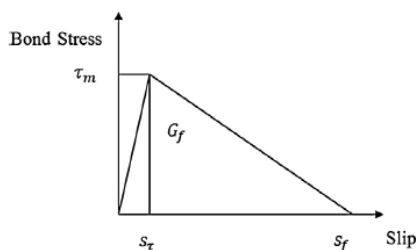


Fig. 2.57 Modelo relación tensión–deslizamiento, laminados de FRP sin confinar, Ko et al., (2014).

En el estudio de Ko et al. (2014) y en base a la base de datos experimentales, los tres parámetros del modelo básico se definen solamente dependiendo en la resistencia a la compresión de hormigón como se define en las ecuaciones (3)-(5). En consecuencia, si la resistencia a la compresión de hormigón se sabe, la tensión de adherencia y el deslizamiento se calculan en las ecuaciones (1) y (2) como un primer orden de aproximación. La exactitud de las ecuaciones (3) hasta (5) es limitada.

$$\tau = \tau_m \left(\frac{s}{s_\tau} \right) \quad \text{for } 0 \leq s \leq s_\tau \quad 1$$

$$\tau = \tau_m - \frac{\tau_m (s - s_\tau)}{(s_f - s_\tau)} \quad \text{for } s_\tau \leq s \leq s_f \quad 2$$

$$\tau_m = 0.165 f_c \quad 3$$

$$s_\tau = -0.001 f_c + 0.122 \quad 4$$

$$s_f = -0.002 f_c + 0.302 \quad 5$$

En el estudio de Ko et al. (2014), se proponen nuevas ecuaciones simplificadas, aplicable a Código Modelo FIB 2013 de adherencia bilineal, tras la realización de ensayos de adherencia de doble cortante entre laminados de FRP-hormigón. La evaluación de los modelos se realizó utilizando los resultados experimentales.

En los resultados de las pruebas de doble cizalla se observaron diferentes grados de excentricidad de carga debido a la alineación imperfecta del espécimen y la variabilidad del comportamiento de interfaz de unión en las dos caras laterales, un problema inherente de este experimento. Sin

embargo, la prueba de doble cizalla todavía se puede considerar una prueba útil y simple en comparación con otros métodos de ensayo.

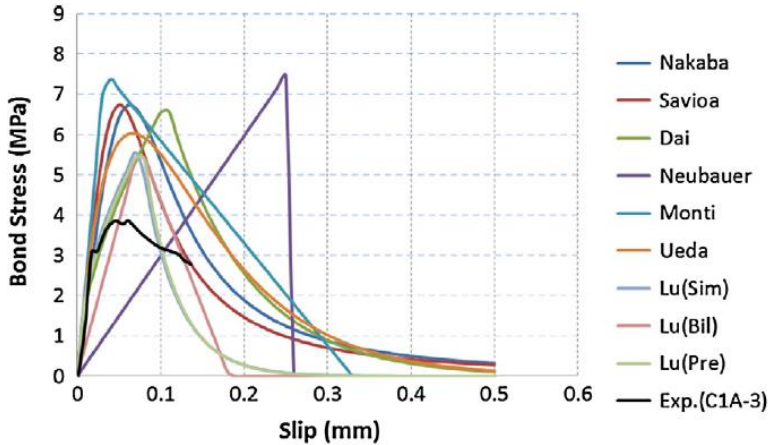


Fig. 2.58 Modelos relación tensión–deslizamiento, laminados de FRP sin confinar, de varios investigadores, Ko et al., (2014).

Se investigaron los factores que afectan el comportamiento adherencia-deslizamiento. Se concluyó que la resistencia a la compresión del hormigón, FRP rigidez y la energía de fractura son los principales factores para el modelo de adherencia- deslizamiento. Las relaciones entre estos factores y los parámetros clave que determinan el vínculo modelo de adherencia-deslizamiento, fueron evaluados en base a una base de datos experimental por diversos investigadores.

El modelo recientemente propuesto por Ko et al. (2014) tal y como se aprecia en la Figura 2.58 (curva Exp. C1A-3). Es derivado promediando los resultados de la prueba llevada a cabo por muchos investigadores y considerando sólo a resistencia a compresión del hormigón, mientras que se descuidan otros parámetros tales como la FRP rigidez. Este último se encontró que no tenía casi ninguna correlación con los datos de prueba, para la base de datos de los resultados estudiados.

El modelo fue desarrollado como un tipo bi-lineal propuesto por el Código Modelo FIB 2013, que consta de tres principales parámetros empíricos: la tensión máxima de adherencia, el deslizamiento correspondiente, y el máximo deslizamiento. La ventaja del nuevo modelo es su simplicidad de expresión y el hecho de que los tres parámetros se pueden determinar por solamente resistencia a la compresión del hormigón.

2.4.- CONCLUSIONES Y RESUMEN CRÍTICO

Una estructura híbrida se realiza mediante la adecuación de un perfil pultrusionado de material compuesto de GFRP y el hormigón en la capa de compresión, para formar elementos estructurales que trabajen a flexión.

En este sistema el hormigón recibe mayoritariamente los esfuerzos de compresión y el perfil de GFRP los de tracción y cortante. Se hace necesario entender cuáles son los modos de fallo, para conseguir que su ejecución en estructuras civiles y de edificación sea correctamente aplicada.

Numerosos investigadores han estudiado, desde el punto de vista mecánico, una serie de modos de fallo: pandeo y cizalla en el alma (Barros and Lebre, 2010; Duc et al., 2010; Mutsuyoshi et al., 2010); flexión, (Fam y Honickman, 2010); inestabilidad lateral, (Deskovic et al., 1995; Duc et al., 2010; Chakraborty et al., 2011); ductilidad y fractura del hormigón (Mutsuyoshi et al., 2010; Chakraborty et al., 2011; Deskovic et al., 1995); cortante en el adhesivo (Duc et al., 2010; Mutsuyoshi et al., 2010); cortante en el hormigón (Mutsuyoshi et al., 2010); y el fallo de adherencia FRP-hormigón (Barros y Lebre, 2010; Liu et al., 2010).

A pesar de la insistencia por parte de diversos autores en que el fallo de adherencia FRP-hormigón no es el modo de fallo habitual o relevante en estas estructuras híbridas, se ha comprobado que en algunos casos se ha presentado dicho problema.

Para analizar la distribución de las tensiones en la interfase FRP-hormigón y su comportamiento, existen numerosos modelos propuestos por la comunidad de investigadores, entre los que destacan los de Neubauer y Rostasy, (1999); Nakaba et al., (2001); Monti et al., (2003); Savoia et al., (2003); Dai y Ueda, (2003), Dai et al., (2005); Lu et al., (2005); Guo et al., (2005); Mohamed et al., (2008). Todos los modelos se caracterizan por una rama ascendente hasta alcanzar la tensión máxima, seguida de una rama descendente (atribuido a la microfisuración del hormigón) hasta que la tensión es nula.

Las investigaciones sobre en el comportamiento de la interfase entre el FRP y el hormigón está siendo llevado a cabo experimentalmente mediante diversos métodos de ensayo, incluyendo el ensayo de tracción de doble cizalla, empuje de doble cizalla, un solo ensayo de corte de tracción, y flexión (Chen et al., 2001; Chen y Teng, 2001; Serbescu et al., 2013). Aunque

se han propuesto varios métodos para examinar el comportamiento local de adherencia de los refuerzos de FRP (Yao et al., 2005), su aplicación puede dar lugar a una amplia gama de los resultados y una metodología estándar aún tiene que ser en general aceptada.

La eficacia del FRP y el alto rendimiento mecánico de las estructuras híbridas está influenciada por la adherencia entre el FRP y el hormigón. Por lo tanto, es muy importante evaluar las propiedades de los enlaces entre el FRP y el hormigón.

La relación entre la tensión de adherencia y el deslizamiento se realiza principalmente a través del análisis de los factores como: resistencia del hormigón, longitud del enlace, rigidez axial del FRP, relación anchura FRP-hormigón, resistencia y rigidez del adhesivo. Aunque mucho se ha investigado para evaluar cuantitativamente estos factores (Bilotta et al., 2011; Bizindavyi y Neale, 1993; Dehghani et al., 2012; Mazzotti et al., 2008; Takeo et al., 1997; Ueda et al., 1999; Zhao et al., 2000; Neubaer y Rostasy, 1997), sigue siendo difícil obtener conclusiones generales porque la combinación de estos factores también afecta a las características de la adherencia.

Con todo ello, en la presente Tesis Doctoral se pretende aportar un importante y extenso estudio experimental con numerosas variables, que van a complementar y dotar de un mayor conocimiento científico al respecto de la adherencia entre el FRP y el hormigón.

CAPÍTULO III

**PROGRAMA
EXPERIMENTAL**

CAPÍTULO III.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1.- INTRODUCCIÓN

Como se ha visto en el estudio del estado del arte, las variables que pueden influenciar la adherencia en la interfase entre los dos componentes de un sistema híbrido GFRP-hormigón son múltiples, los modos de rotura pueden ser muy variados y no existe un método de ensayo suficientemente consensuado para analizar todos los aspectos del problema. Es por ello que se plantea un estudio en dos fases, donde generar un **método de ensayo** adecuado y profundizar en **el conocimiento del problema** de la adherencia son los dos objetivos primordiales.

En una primera fase se establece una metodología de ensayo adecuada para el estudio de la adherencia.

Una vez establecidos los correspondientes parámetros metodológicos, se programa una segunda fase experimental, donde se analiza mediante el ensayo de *pull-out*, la influencia de las variables de adherencia propuestas.

De entre la gran cantidad de variables que pueden afectar a la adherencia en los enlaces de los sistemas híbridos, se muestran a continuación las variables objeto de estudio en la presente Tesis Doctoral:

1.- **Resistencia a compresión del hormigón:** 30/60/90 MPa

2.- **Geometría de la sección adherida:**

- Longitud: 100/50/25 mm “L_{adh}”
- Ancho: 50/25 mm
- Todos los perfiles de GFRP utilizados en la presente Tesis Doctoral tienen un espesor de 5 mm.

3.- **Hormigón convencional** (sin fibras) o **reforzado con fibras** “HRF”

4.- **Tratamiento superficial de la lámina:**

- Pultrusionado “PAT”
- Pulido “P”
- Arenado “AR”
- Texturizados “TEX”
- Combinaciones “TEX + AR”

5.- Utilización de un adhesivo

- Acrílico "ACR"
- Poliéster de éster de metacrilato "RES"

6.- Sistemas de fijación mecánica:

- Métrica del tornillo y calidad del acero:
 - Métrica 4 y grado 6.6 "M4-6.6"
 - Métrica 6 y grado 8.8 "M6-8.8"
- Tipo de perforación:
 - Circular "TEX1" tornillería sin desplazamiento
 - Coliso "TEX2" tornillería con desplazamiento
- Par de apriete:
 - 8 Nm
 - 16 Nm

7.- Confinamiento del hormigón:

- 2 Caras "2C"
- 1 Cara "1C":
 - Confinamiento pasivo "1CA"
 - Sin confinamiento "1CE"
 - Confinamiento activo "1CL"

8.- Combinaciones:

- Tratamientos superficiales con pasadores
- Tratamientos superficiales con resinas
- Tratamientos superficiales texturizados con resinas y fijación mecánica

3.2.- PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL

Las variables descritas anteriormente se estudian en dos fases:

La **primera fase ha servido para fijar los parámetros para la metodología de ensayo** (ensayos previos). Se fijan los siguientes parámetros: resistencia del hormigón, geometría de la sección adherida, tipo de texturizado, así como el adhesivo y la tipología de los elementos de fijación.

La resistencia del hormigón no se ha tratado como un parámetro para analizar su influencia sobre la adherencia, sino más bien para fijar en la metodología de ensayo cuál es más conveniente, para evitar fenómenos de *splitting*, por las elevadas tensiones que se pueden llegar a alcanzar en el ensayo de *pull-out*.

La geometría de la sección adherida, del mismo modo, es conveniente fijarla. Este parámetro ha de ser representativo de las variables de adherencia que se ensayan. Por ello no debe generar grandes tensiones de adherencia que proporcionen fenómenos de *splitting*. Este fenómeno debe evitarse para poder estudiar la relación entre la tensión de adherencia y el deslizamiento durante el ensayo.

De entre los distintos tipos de texturizados que se analizan, tan solo uno pasará a la fase dos, para acotar la variable y así poder profundizar en otros aspectos. Es novedosa la aplicación de texturizados en laminados.

Del mismo modo se fija un solo adhesivo entre los dos probados inicialmente, que debe polimerizar correctamente en un medio húmedo, ya que se hormigona "in situ", comprobándose el efecto del adhesivo frente a las probetas que no lo llevan. No se pretende encontrar cuál es la resina que mejores resultados da, ya que es un tema ampliamente estudiado en los laminados para el refuerzo de vigas de hormigón armado.

En cuanto a la elección de la tipología de los elementos de fijación se presentan tres tipos de tornillería en función de la longitud del tornillo y el tipo de anclaje (con gancho o con capucha) para así poder definir el que mejor se adapta a los objetivos de la Tesis.

Una vez fijados los parámetros en la metodología de ensayo, se procede a iniciar la segunda fase.

En la **segunda fase**, ensayos de caracterización de adherencia, se estudia la influencia de los tipos de tratamientos superficiales en las láminas pultrusionadas, la influencia del adhesivo, y cómo se comportan los sistemas de fijación mecánica y las combinaciones que se pueden utilizar entre las distintas variables.

Todo ello se aplicará en los ensayos de *pull-out*, viendo la relación entre la tensión de adherencia y el deslizamiento entre el GFRP y el hormigón, con distintos tipos de confinamiento del hormigón: activos "1CL", pasivos "1CA" y sin confinamiento "1CE". El análisis de estos tres criterios es novedoso, y puede cambiar la técnica de enlace en los sistemas híbridos.

En la segunda fase, se proponen **tres grupos** de ensayos diferenciados por el tipo de confinamiento del hormigón:

- El **grupo 1** corresponde al confinamiento pasivo del hormigón sobre el perfil de GFRP, en todas sus caras. Este sistema corresponde al tipo de enlace utilizado en las vigas híbridas, donde el ala o la parte superior del alma del perfil están embebidas en la capa de compresión de hormigón. Por ello el perfil está en contacto directo del hormigón a dos caras, "**2C**".

Se analiza la influencia de las siguientes variables de adherencia: resina (RES), arenado (AR), texturizado (TEX) y una combinación de estos (MIX).

- El **grupo 2** corresponde al caso en que el hormigón ejerce un confinamiento pasivo en una de las caras del perfil en la que se ha realizado un tratamiento superficial, mientras que en la cara opuesta puede estar confinada ("**1CA**") o no ("**1CE**"). Se programan los ensayos para comprobar los efectos en la cara tratada.

Este caso es el más habitual en los sistemas de unión híbridos, donde la capa de compresión está en contacto con la parte superior del ala del perfil de GFRP.

Las variables de adherencia son analizadas en tres subgrupos:

- **Subgrupo 2.1.-** Influencia de las variables de adherencia resina (RES), arenado (AR), texturizado (TEX) y una combinación de estos (MIX).
- **Subgrupo 2.2.-** Influencia de las fijaciones mecánicas sin desplazamiento (tornillería de acero) métrica M4 (grado 6.6) y métrica M6 (grado 8.8).
- **Subgrupo 2.3.-** Influencia de las fijaciones mecánicas con desplazamiento con métricas M4 y M6. Este sistema requiere de perforaciones en el perfil de GFRP para permitir el movimiento de la fijación mecánica, cuya aplicación es novedosa, lo que conduce a modos de fallo dúctiles en los enlaces de los sistemas híbridos.

- El **grupo 3** analiza la influencia del par de apriete y postesado de la tornillería M6 con coliso, para generar un confinamiento activo del hormigón sobre el GFRP. Para ello es necesario liberar de hormigón la zona posterior del laminado de GFRP (sistema "1CL"). No se han encontrado aportaciones por la comunidad científica a tal respecto, lo que ha motivado el estudio y análisis de este sistema de unión novedoso.

3.3.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.3.1.- FASE 1 - ENSAYOS PREVIOS

3.3.1.1.- DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN Y LONGITUD DE ADHERENCIA

En un primer paso se elabora el programa experimental (véase Tabla 3.1), con el fin de establecer cuál será la longitud de adherencia (L_{adh}) más adecuada para el ensayo así como cuál será el tipo de hormigón con el que trabajar. Hay que tener en cuenta que, en las vigas híbridas, la longitud de adherencia no es una variable ya que toda la interfase GFRP-hormigón está en contacto, pero es fundamental determinar en el ensayo dicha longitud para evitar las interferencias negativas de otros factores no deseados como el *splitting* o la rotura del perfil de GFRP, que no permitirían realizar correctamente el estudio de adherencia.

Tabla. 3.1 Relación de ensayos previos para la selección de f_c y L_{adh} .

Pull-out 1mm/min Sección_mm	MODALIDAD	L_{adh_mm}	f_c_MPa	TRATAMIENTO SUPERFICIAL				
				PAT	P	ACR	RES	AR
50 X 5 mm	2C	100	30	1	1	1	1	1
			60	1	1	1	1	1
			90	0	0	0	0	0
		50	30	1	1	1	1	1
			60	0	0	0	1	1
			90	0	0	0	1	1
	25	30	1	1	1	1	1	
		60	0	0	0	1	1	
		90	0	0	0	1	1	

En cuanto a la resistencia del hormigón, no es una variable de estudio, pero sí lo es en la metodología del ensayo, ya que se debe determinar cuál

es la tipología del hormigón más adecuada para las propuestas metodológicas y variables de adherencia. El diseño de los hormigones está establecido en el apartado 3.4.1.1 del presente capítulo.

Además se introducen una serie de tratamientos superficiales en el GFRP, que sí son variables de estudio de la mejora de la adherencia GFRP-hormigón habituales en estos sistemas híbridos, a modo de una primera toma de contacto, comprobando la adecuación del medio de unión al método 2C propuesto. Estos tratamientos consisten en las siguientes tipologías de muestras: pultrusionado patrón (PAT), pulido (P), con resina acrílica (ACR), resina de poliéster (RES) y con la superficie arenada (AR). Las distintas preparaciones de las superficies de las probetas están descritas en el apartado 5.3 del capítulo V, "Metodología para la preparación de las interfases".

3.3.1.2.-ANÁLISIS DEL TIPO TEXTURIZADO

Se ensayan una serie de texturizados en la superficie de la interfase del perfil de GFRP, tal y como se aprecia en la Tabla 3.2 y Figura 3.1. Los texturizados son mecanizados con las siguientes opciones:

- 1.- Ranuras paralelas al eje longitudinal del perfil de GFRP, TEX3.
- 2.- Ranuras con una inclinación de 45° respecto del eje longitudinal del perfil de GFRP, TEX4.
- 3.- Ranuras perpendiculares al eje longitudinal del perfil de GFRP, con resina acrílica, TEX5.
- 4.- Perforaciones, dispuestas en una matriz de 4 x 4, TEX6.
- 5.- Ranuras perpendiculares al eje longitudinal del perfil de GFRP, TEX7.



TEX3 TEX4 TEX5 y 7 TEX6

Fig. 3.1 Relación de los distintos tipos de texturizados de GFRP, en los ensayos previos.

Tabla. 3.2 Relación de ensayos previos para la selección del tipo de texturizado.

Pull-out_ 1 mm/min	VARIABLES DE ADHERENCIA					MODALIDAD	
	TEXTURIZADOS						
	TEX3	TEX4	TEX5	TEX6	TEX7		
L_{ADH} 50 mm	Sección 50 X 5 mm	2	1	1	1	1	2C

3.3.1.3.- DETERMINACIÓN DE LA SECCIÓN DEL PERFIL DE GFRP Y EL USO DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

Se analiza la incorporación al hormigón de 50 kg/m³ de fibras metálicas "Dramix" RC 80/30 BP y la disminución de la sección del perfil de GFRP a 25 x 5 mm (superficie de la cara adherente 25 x 50 mm) disminuyendo la fuerza de arranque, todo ello con el fin de evitar la rotura por *splitting* del hormigón.

Se incorporan tratamientos superficiales que mejoren la adherencia, consistentes en texturizar la superficie mediante un ranurado de 1 mm de profundidad en el perfil de GFRP en ambas caras, perpendicular a la dirección de la carga (el procedimiento está establecido en el apartado 5.3.5 del capítulo V, "Metodología para la preparación de las interfases").

Se proponen dos tipos de hormigones, uno convencional (30 MPa) y otro de alta resistencia (90 MPa), para tomar la decisión de cuál es el más adecuado para el método establecido (véase Tabla 3.3).

Tabla. 3.3 Relación de ensayos previos para la selección de HRF y sección GFRP.

Pull-out_ 1 mm/min	MODALIDAD	L_{adh_mm}	f_c_MPa	TRATAMIENTO SUPERFICIAL			
				PAT	TEX7	TEX7+RES	TEX7+AR
Sección_mm	2C	50	30	2	2	2	2
			HRF-30	2	2	2	2
			90	1	1	1	1
			HRF-90	1	1	1	1
			30	1	1	1	1
			HRF-30	1	1	1	1
25 X 5 mm			90	1	1	1	1
			HRF-90	1	1	1	1

HRF- Hormigón Reforzado con Fibras "Dramix" RC 80/30 BP, 50 kg/m³

En paralelo se incorporan tratamientos que pueden mejorar la adherencia como el arenado y la incorporación de resina de agarre. Se pretende buscar modos de rotura dúctiles (sin *splitting* o retrasándolo a niveles de deslizamiento altos) alcanzando niveles altos de carga.

3.3.1.4.- DETERMINACIÓN DEL TIPO DE FIJACIÓN MECÁNICA, PAR DE APRIETE Y SU RECUBRIMIENTO

El estudio de esta propuesta se inicia con tres parámetros en el tratamiento mecánico, realizándose un sistema de fijación mecánico con desplazamiento "TEX2", cuyas variables han sido:

- Niveles de postesado "POS": 8 y 16 Nm.
- Recubrimientos "r": 8 y 30 mm (véase Figura 3.2.b).
- Tres sistemas de anclaje de la tornillería en función de L, C y G, siendo L la longitud tornillo, C es el tipo de remate en forma de capucha o sombrero y G es el tipo de remate en forma de gancho:
 - **TEX2²**: L=40 mm y remate tipo "C" (véase Figura 3.2.a).
 - **TEX2³**: L= 90 mm y remate tipo "C" (véase Figura 3.2.a)
 - **TEX2⁴**: L= 90 mm y con gancho en el extremo final "G" (véase Figura 3.2.a).

La modalidad aplicada en el ensayo es 1CL, en la que el bloque de hormigón está confeccionado con un hueco longitudinal en una de sus caras con el fin de facilitar el par de apriete de la tornillería (véase Figura 3.2.b).



Fig. 3.2 (a) tipología tornillería TEX2², TEX2³, TEX2⁴ y **(b)** ubicación del recubrimiento "r" en la modalidad 1CL.

La Tabla 3.4 indica las combinaciones estudiadas. La tornillería M6, arandelas y tuercas son acero de calidad 8.8.

Tabla. 3.4 *Ensayos previos para la selección de tornillería, par de apriete y recubrimiento.*

Pull-out_ 1 mm/min		TRATAMIENTOS MECÁNICO			r [mm]	POS	MODALIDAD
		TEX2 ²	TEX2 ³	TEX2 ⁴			
L _{ADH} 50 mm	Sección 50 X 5 mm	1	1	1	8	8 Nm	1CL
		2	1	0	30		
		1	0	0	8	16	
		1	1	1	30	Nm	

² M6 - 8,8 L= 40 mm C ³ M6 - 8,8 L= 90 mm C ⁴ M6 - 8,8 L= 90 mm G

En estos casos los pares de apriete se realizan para que el postesado de la tornillería actúe en el hormigón ejerciendo éste un confinamiento activo sobre el perfil de GFRP. La longitud de adherencia está establecida en 50 mm y la sección de GFRP es de 50 x 5 mm.

3.3.2.- FASE 2 - ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA ADHERENCIA

Se proponen tres grupos de ensayos, que se exponen a continuación:

- **GRUPO 1.- Contacto directo hormigón a dos caras, 2C:** Influencia de las variables de adherencia resina (RES), arenado (AR), texturizado (TEX7) y una combinación de estos (MIX). En la Tabla 3.5 se muestra el programa experimental. En la modalidad 2C el hormigón confina pasivamente por ambas caras principales al perfil de GFRP.

Tabla. 3.5 *Programa experimental pull-out, variables de adherencia, grupo 1.*

L _{ADH} [mm]	f _c [MPa]	Sección [mm]	TRATAMIENTO SUPERFICIAL					MODALIDAD
			PAT	RES	AR	TEX7	TEX7+RES	
50	30	50 X 5	3	3	3	3	3	2C
		25 x 5	3	3	3	3	3	

- **GRUPO 2.- Contacto directo hormigón a una cara, 1C**, donde la variable confinamiento del hormigón es muy importante. Se programan los ensayos para comparar los estados de confinamiento pasivo del hormigón en la cara opuesta (1CA con confinamiento y 1CE sin confinamiento). Se desarrollan tres subgrupos de ensayo:
 - **SUBGRUPO 2.1.- Influencia de las variables de adherencia resina (RES), arenado (AR), texturizado (TEX7) y una combinación de estos (MIX); queda resumido el programa experimental en la Tabla 3.6.**

Tabla. 3.6 Programa experimental pull-out, variables de adherencia, subgrupo 2.1.

L _{ADH} [mm]	f _c [MPa]	Sección [mm]	TRATAMIENTO SUPERFICIAL					MODALIDAD	
			PAT	RES	AR	TEX7	TEX7+RES		TEX7+AR
50	30	50 X 5	3	3	3	3	3	3	1CA
			3	3	3	3	3	3	1CE

- **SUBGRUPO 2.2.- Influencia de las fijaciones mecánicas sin desplazamiento (tornillería) de acero métrica 4 (grado 6.6) y métrica 6 (grado 8.8), combinándolas con las variables de adherencia resina (RES), arenado (AR), texturizado (TEX7) y una combinación de estos (MIX).**

A la tornillería en este caso se le aplica un par de apriete de 4 y 8 Nm según se trate de métrica M4 y M6, respectivamente, para que el tornillo quede fijado al perfil de GFRP. Se presenta el resumen del programa experimental de esta fase en la Tabla 3.7.

Tabla. 3.7 Prog. Exp. pull-out, variables de adherencia, subgrupo 2.2.

L _{ADH} [mm]	f _c [MPa]	Sección [mm]	TRATAMIENTO SUPERFICIAL			COMBINACIONES	MODALIDAD
			TEX1*	TEX1 ¹	TEX1 ¹ +TEX7		
50	30	50 X 5	3	2	3	-	
			3	3	3	RES	1CA
			3	3	3	AR	
			3	0	0	-	
			3	0	0	RES	1CE
			3	0	0	AR	

* M4 - 6,6
L = 40 mm
PAR 4 Nm

¹ M6 - 8,8
L = 40 mm
PAR 8 Nm

- **SUBGRUPO 2.3.-** Influencia de las fijaciones mecánicas con desplazamiento con métrica M4 y M6, combinándolos con las variables de adherencia resina (RES), arenado (AR), texturizado (TEX7) y una combinación de estos (MIX).

En el caso de la tornillería M4 se le aplica un par de apriete de 4 Nm, y para la tornillería M6 el par es de 8 Nm para que el tornillo quede fijado al perfil de GFRP. De este modo el desplazamiento del tornillo por el coliso se verá afectado por las distintas presiones ejercidas por el tornillo en el perfil de GFRP, tal y como queda reflejado en el programa experimental detallado en la Tabla 3.8.

Tabla. 3.8 Prog. Exp. pull-out, variables de adherencia, subgrupo 2.3.

L _{ADH} [mm]	f _c [MPa]	Sección [mm]	TRATAMIENTO SUPERFICIAL		COMBINACIONES	MODALIDAD
			TEX2*	TEX2 ¹ +TEX7		
50	30	50 X 5	3	3	-	
			3	3	RES	1CA
			3	3	AR	
			3	3	-	
			3	3	RES	1CE
			3	3	AR	

* M4 - 6,6
L = 40 mm
PAR 4 Nm

¹ M6 - 8,8
L = 40 mm
PAR 8 Nm

- **GRUPO 3.- Influencia del par de apriete y postesado de las fijaciones mecánicas con desplazamiento, para conferir el confinamiento activo del hormigón sobre el GFRP**; se utiliza tornillería métrica M6 (grado 8.8) aplicando dos tipos de par de apriete (8 y 16 Nm), combinándolos además con las variables de adherencia resina (RES), arenado (AR), texturizado (TEX7) y una combinación de estos (MIX) (véase Tabla 3.9).

Tabla. 3.9 Programa experimental pull-out, variables de adherencia, grupo 3.

L_{ADH} [mm]	f_c [MPa]	Sección [mm]	PAR	TEX2-2 ²	COMBINACIONES	MODALIDAD
50	30	50 X 5	8 Nm	3	-	1CL
				3	RES	
				3	AR	
				3	TEX7	
				3	TEX7+RES	
				3	TEX7+AR	
			16 Nm	3	-	
				3	RES	
				3	AR	
				3	TEX7	
				3	TEX7+RES	
				3	TEX7+AR	

² El "TEX2 -2" implica la tornillería M6 - 8,8 L= 40 mm Capucha

3.4.- MATERIALES

3.4.1.- HORMIGÓN

3.4.1.1.- DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN

Se diseñan cinco tipos de hormigón para los ensayos previos y uno solo de ellos (tipo 1) se selecciona para el estudio en las variables de adherencia. Están reseñados en la Tabla 3.10. Es posible realizar los ensayos con otros tipos de hormigón, pero no es el objetivo del programa de investigación.

Tabla. 3.10 Dosificaciones de los hormigones del programa experimental.

Materiales [kg/m ³]	DOSIFICACIONES				
	1	2	3	4	5
CEM II /B-M (S-L) 42,5 R	275	275	400	600	600
Agua	180	180	180	180	180
Filler	150	150	150	0	0
Arena 0/2	430	430	300	250	250
Arena 0/4	754	754	700	700	700
Grava 4/8	610	610	610	610	610
Fluidificante_Viscocrete 3425	4,4	4,4	10	8,4	8,4
A/C	0,65	0,65	0,45	0,3	0,3
Fibras metálicas 80/30 BP	0	50	0	0	50
% Fluidificante_Viscocrete 3425	1,6	1,6	2,5	1,4	1,4
Peso	2.406	2.456	2.350	2.349	2.399
fc [MPa] teórico	30	30	60	90	90
slump flow [mm]	650	600	710	750	700

El aditivo superplastificante utilizado es un policarboxilato modificado en base acuosa (Sika ViscoCrete-3425), proporcionado por la empresa SIKA.

El cemento utilizado es CEM II/B-M (S-L) 42,5 R, proporcionado por CEMENTVAL MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, S.L.; posee un 73% de Clinker, 12% de caliza, 15 % escoria, con una Superficie Específica Blaine de 4680 (cm²/g).

Los áridos utilizados son dos arenas trituradas 0/2 y 0/4, filler, y una grava machacada 4/8, de la cantera “Los Carasoles” en Valencia.

El hormigón tipo 1 es autocompactante, con una capacidad mecánica a compresión de 30 MPa a 7 días y un escurrimiento de 650 mm; se caracteriza por la facilidad de fluir, contactar y rellenar todas las superficies de las probetas.

El alto contenido de finos y el ajuste en la dosificación del aditivo superplastificante de alto rendimiento evitan el riesgo de exudación o segregación.

3.4.1.2.- PROCESO DE CONFECCIÓN DEL HORMIGÓN

Debido a la capacidad de la amasadora de eje vertical (65 l), para cada serie de ensayos se realizaban en general dos amasadas de 45 l. Cada serie contempla, en general, 10 probetas de tipo *pull-out*, 2 cilíndricas de 100 x 200 mm y dos cúbicas de 100 mm. En cada amasada se rellenaban 5 probetas de *pull-out*, una cilíndrica y una cúbica.

El procedimiento de fabricación consistió en:

1.- Determinación de la humedad de los áridos, previamente al amasado de la mezcla, con el fin de evitar variaciones en los parámetros del hormigón debido al agua que aportan los áridos. Para ello se tomaba una muestra de arena de aproximadamente 500 gramos, que se pesaba y se introducía en estufa a 100 ± 5 °C por un período no inferior a 24h, y se determinaba la humedad. Este valor se utilizaba para corregir el agua de amasado y el pesaje de los áridos.

2.1- Se procede al amasado, vertiendo los áridos y el filler. Se amasa en seco durante 1 minuto.

2.2.- Se añade el cemento y se amasa durante 1 minuto.

2.3.- Se añade el 50% del agua y se amasa durante 2 minutos.

2.4.- Después se añade el 50% de agua restante junto con todo el aditivo superplastificante, amasándose durante 5 minutos.

2.5.- En los casos en que se incorporaban fibras metálicas, se añadieron lentamente al amasado sin formar erizos, prolongando durante 5 minutos más el amasado.

3.- Una vez amasado el hormigón se procede a caracterizar su trabajabilidad con el ensayo del escurrimiento y medición del tiempo T_{50} , según UNE –EN 12350-8 [123] (véase Figura 3.3).



Fig. 3.3 Medición del escurrimiento y el T_{50} del hormigón.

4.- Llenado de los moldes para, posteriormente, cubrirlos con una lámina de polietileno, para el curado de las probetas; una vez transcurridas 18 horas después del llenado, se desmoldean y se introducen en la cámara de curado, con una humedad ambiente del 95% a 24 °C hasta los 7 días, para su posterior ensayo mecánico a compresión.

3.4.1.3.- CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL HORMIGÓN

En los ensayos de *pull-out* se ha controlado el hormigón confeccionado por lotes. Cada lote está compuesto por 2 probetas cilíndricas de 100 x 200 mm y dos cúbicas de 100 mm. Cada día de hormigonado se realizaban dos amasadas, que formaban un mismo lote. Los resultados se encuentran en la Tabla 3.11; la designación **M** corresponde a los lotes de probetas utilizadas en los ensayos previos y la designación **E** corresponde a los lotes de probetas destinadas a ensayos de las variables de adherencia.

Tabla 3.11 Características mecánicas de los lotes de hormigón.

LOTES	Volumen l	Cúbicas 100 mm	Cilíndricas 100 x 200 mm
		f_c^{7d} [MPa]	f_c^{7d} [MPa]
M_1	30	-	89,81
M_2	30	35,51	29,90
M_3	30	90,16	78,46
M_4	30	49,71	38,13
M_5	30	92,85	79,97
M_6	45	-	26,93
M_7	45	91,01	84,17
M_8	45	32,04	29,95
M_9	45	79,37	80,41
M_10	72	38,10	35,40
M_11	42	37,31	34,75
M_12	42	90,97	80,30
E_1	90	37,83	34,61
E_2	90	36,14	34,28
E_3	90	36,23	32,28
E_4	90	36,97	33,80
E_5	90	35,02	31,96
E_6	90	39,72	35,87
E_7	90	40,37	36,98
E_8	90	48,00	43,11
E_9	90	35,46	34,21
E_10	90	44,21	39,97
E_11	90	39,25	36,05
E_12	55	46,86	42,82
E_13	90	43,03	38,11
E_14	90	36,00	34,83
E_15	55	37,15	32,54
E_16	80	39,78	37,17
E_17	60	38,65	34,73
E_18	120	39,99	35,84
E_19	90	39,64	36,54
E_20	90	38,00	35,99
E_21	90	43,29	37,29
E_22	90	35,93	32,40

3.4.2.- PERFIL PULTRUSIONADO DE GFRP

3.4.2.1.- POLÍMERO PULTRUSIONADO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO, GFRP

Se han utilizado perfiles de sección rectangular de GFRP, a base de una resina de viniléster como matriz para confeccionar los perfiles pultrusionados, reforzándolos con fibra de vidrio tipo E. Con este polímero se obtienen perfiles pultrusionados con buenas propiedades mecánicas a bajo coste.

En la tabla 3.12, se presentan las propiedades físico-químicas típicas de la fibra de vidrio tipo E (Mukherjee, 2007).

Tabla 3.12 Propiedades físico-químicas de la fibra de vidrio tipo E. (Mukherjee, 2007).

Tipo	Vidrio E	Componentes	Cantidad %
Diámetro de hilo (micras)	10-20	SiO ₂	53-56
Densidad (Kg/m ³)	2540	Al ₂ O ₃	14-15
Módulo Elasticidad (GPa)	72	CaO	17-22
Resistencia atracción (GPa)	3,5	MgO	1
Módulo específico	28	Na ₂ /K ₂ O	0,8
Coef. Expansión Térmica 10 ⁻⁶ /°K	5	Fe ₂ O ₃	0,3
		B ₂ O ₃	6-8

Se utiliza filler calizo de unas 60 micras como adición no reactiva a la resina para dotar de mayor trabajabilidad durante el procesado, puesto que da cuerpo al material, un mejor acabado superficial y color al perfil pultrusionado.

Las características mecánicas del GFRP están reflejadas en la Tabla 3.13, facilitadas por Nioglas, S.L.:

Tabla 3.13: Características mecánicas de los perfiles pultrusionados de GFRP, Nioglas (2014).

Propiedad	Siglas	MPa	NORMAS
Módulo de elasticidad	E 0°	23.000/30.000	EN 527-4
Módulo de elasticidad	E 90°	8.500	EN 527-4
Módulo de Cortante	G	3.000	ASTM D2344-84
Resistencia a Flexión, 0°		240	EN ISO 14125
Resistencia a Flexión, 90°		100	EN ISO 14125
Resistencia a Tracción, 0°		600	EN 527-4
Resistencia a Tracción, 90°		50	EN 527-4
Resistencia a Compresión, 0°		400	EN ISO 14126
Resistencia a Compresión, 90°		70	EN ISO 14126
Resistencia a Cortante		25	ASTM D2344-84

3.4.2.2.- CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL GFRP

El GFRP ha sido caracterizado mediante un control aleatorio de las piezas pultrusionadas, realizándose 5 ensayos de tracción de toda la partida (200 m) proporcionada por la empresa Nioglas, S.L. Las propiedades mecánicas a tracción se encuentran reflejadas en la Tabla 3.14 y son coherentes con el producto suministrado. Para ello se han tenido en cuenta las normas UNE-EN ISO 527-1:2012, UNE-EN ISO527-4:1997 y UNE-EN ISO 527-5:2010 para la caracterización de los perfiles.

Tabla 3.14 Características mecánicas a tracción de las probetas de GFRP.

Probeta	Sección	σ_{\max} [MPa]
GFRP_1	50 x5	595
GFRP_2	50 x5	601
GFRP_3	50 x5	603
GFRP_4	50 x5	598
GFRP_5	50 x5	607

Se referencian también en el marco normativo sobre la caracterización del material pultrusionado: UNE-EN 13706-3:2003; la UNE-EN ISO14126:2001/AC 2002 para la determinación de las propiedades de compresión en dirección paralela al plano de laminación, o UNE-EN ISO 527-3:1996/AC 2002 sobre la determinación de las propiedades a tracción en las condiciones de ensayo para películas y hojas.

3.5.- IDENTIFICACIÓN DE LOTES DE HORMIGÓN - PROBETAS HÍBRIDAS

A continuación se presenta, en las Tablas 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18, la programación de los lotes de las probetas híbridas. La anotación "M" está asociada a las probetas realizadas para los ensayos previos y la "E" al programa experimental asociado al estudio de las variables de adherencia.

El código de identificación de las probetas obedece al del comportamiento adherente. Se muestra como ejemplo el siguiente desglose: "30_50/50_TEX7_1CA_R1", f_c (MPa)_ancho / longitud (mm) del GFRP_tipo de tratamiento superficial _método ensayo_nº de rotura. Cuando se trata de hormigón reforzado con fibras, la designación comienza por "HRF".

Tabla. 3.15 Identificación 1 de lotes para las probetas híbridas en ensayo de pull-out.

LOTE	PROBETAS	LOTE	PROBETAS
M_1	30_GFRP_50/50_TEX 30_50/50_RES (ANCHOR) 30_G50/50_AR	E_1	30_50/50_PAT_1CA_R1 30_50/50_RES_1CA_R1 30_50/50_TEX7_1CA_R1 30_50/50_TEX7+RES_1CA_R1 30_50/50_TEX7+AR_1CA_R1 30_50/50_PAT_1CE_R1 30_50/50_RES_1CE_R1 30_50/50_TEX7_1CE_R1 30_50/50_TEX7+RES_1CE_R1 30_50/50_TEX7+AR_1CE_R1
M_2	100_50/50_TEX 100_50/50_RES (ANCHOR) 100_50/50_AR	E_2	30_50/50_PAT_1CA_R2 30_50/50_RES_1CA_R2 30_50/50_TEX7_1CA_R2 30_50/50_TEX7+RES_1CA_R2 30_50/50_AR_1CA_R2 30_50/50_PAT_1CE_R2 30_50/50_RES_1CE_R2 30_50/50_TEX7_1CE_R2 30_50/50_TEX7+RES_1CE_R2 30_50/50_TEX7+AR_1CE_R2
M_3	HRF-30_50/50_TEX HRF-30_50/50_RES(ANCHOR) HRF-30_50/50_AR	E_3	30_50/50_PAT_1CA_R1 30_50/50_TEX1_1CA_R1 30_50/50_TEX1+RES_1CA_R1 30_50/50_TEX1+AR_1CA_R1 30_50/50_TEX4_1CA_R1 30_50/50_TEX4+RES_1CA_R1 30_50/50_TEX4+AR_1CA_R1 30_50/50_TEX8_1CA_R1 30_50/50_TEX8+RES_1CA_R1 30_50/50_TEX8+AR_1CA_R1
M_4	HRF-100_50/50_TEX HRF-100_50/50_RES (ANCHOR) HRF-100_50/50_AR 100_50/50_TEX 100_GFRP_50/50_RES (ANCHOR) 100_50/50_AR	E_4	30_50/50_TEX1_1CE_R1 30_50/50_TEX1+RES_1CE_R1 30_50/50_TEX1+AR_1CE_R1 30_50/50_TEX1_1CA_R2 30_50/50_TEX1+RES_1CA_R2 30_50/50_TEX1+AR_1CA_R2 30_50/50_TEX1+RES_1CE_R2 30_50/50_TEX1+AR_1CE_R2 30_25/50_RES_2C_R1
M_5	30_25/50_PAT 30_25/50_TEX 30_25/50_RES(ANCHOR) 30_25/50_AR	E_5	30_50/50_TEX2_1CE_R1 30_50/50_TEX2+RES_1CE_R1 30_50/50_TEX2+AR_1CE_R1 30_50/50_TEX2_1CA_R1 30_50/50_TEX2+RES_1CA_R1 30_50/50_TEX2+AR_1CA_R1 30_50/50_TEX2_1CA_R2 30_50/50_TEX2+RES_1CA_R2 30_50/50_TEX2+AR_1CA_R2 30_50/50_RES_2C_R1 30_50/50_TEX1+4_1CA_R2 30_50/50_TEX1+7_1CA_R2 30_50/50_TEX1+8_1CA_R2
M_6	100_25/50_PAT 100_25/50_TEX 100_25/50_RES(ANCHOR) 100_25/50_AR		
M_7	30_25/50_PAT HRF-30_25/50_TEX HRF-30_25/50_RES(ANCHOR) HRF-30_25/50_AR		
M_8	HRF-100_25/50_PAT HRF-100_25/50_TEX HRF-100_25/50_RES (ANCHOR) HRF-100_25/50_AR		
M_9	30_series geometría superficial		
M_10	30_50/50_PAT 30_50/50_TEX 30_50/50_RES (ANCHOR) 30_50/50_AR		
M_11	100_50/50_PAT 100_50/50_TEX 100_50/50_RES (ANCHOR) 100_50/50_AR		

Tabla. 3.16 Identificación 2 de lotes para las probetas híbridas en ensayo de pull-out.

LOTE	PROBETAS	LOTE	PROBETAS
E_6	HRF-30_25/50_PAT_2C_R2	E_11	30_50/50_PAT_2C_R3
	HRF-30_25/50_RES_2C_R2		30_50/50_P_2C_R2
	HRF-30_25/50_TEX7_2C_R2		30_50/50_P_2C_R3
	HRF-30_25/50_TEX7+RES_2C_R2		30_50/50_SIKA50_2C_R2
	HRF-30_25/50_TEX7+AR_2C_R2		30_50/50_SIKA50_2C_R3
	HRF-30_25/50_PAT_2C_R3		30_50/50_AR_2C_R2
	HRF-30_25/50_RES_2C_R3		30_50/50_TEX4_2C_R3
	HRF-30_25/50_TEX7_2C_R3		30_50/50_TEX5_2C_R3
	HRF-30_25/50_TEX7+RES_2C_R3		30_50/50_TEX6_2C_R3
	HRF-30_25/50_TEX7+AR_2C_R3		30_50/50_TEX8_2C_R3
E_7	30_50/50_TEX2_1CE_R2	E_12	30_50/50_TEX2_1CL_P1_R1
	30_50/50_TEX2+RES_1CE_R2		30_50/50_TEX2_1CL_P1_R2
	30_50/50_TEX2+AR_1CE_R2		30_50/50_TEX2_1CL_P1_R3
	30_50/50_TEX2_1CE_R3		30_50/50_TEX2_1CL_P2_R1
	30_50/50_TEX2+RES_1CE_R3		30_50/50_TEX2_1CL_P2_R2
	30_50/50_TEX2+AR_1CE_R3		30_50/50_TEX2_1CL_P2_R3
	30_50/50_TEX2_1CA_R3		
	30_50/50_TEX2+RES_1CA_R3		
	30_50/50_TEX2+AR_1CA_R3		
	30_50/50_RES_2C_R2		
E_8	30_50/50_PAT_1CA_R3	E_13	30_50/50_AR_2C_R3
	30_50/50_RES_1CA_R3		30_25/50_AR_2C_R1
	30_50/50_TEX7_1CA_R3		30_25/50_AR_2C_R2
	30_50/50_TEX7+RES_1CA_R3		30_25/50_AR_2C_R3
	30_50/50_TEX7+AR_1CA_R3		30_50/50_AR_1CE_R1
	30_50/50_PAT_1CE_R3		30_50/50_AR_1CE_R2
	30_50/50_RES_1CE_R3		30_50/50_AR_1CE_R3
	30_50/50_TEX7_1CE_R3		30_50/50_AR_1CA_R1
	30_50/50_TEX7+RES_1CE_R3		30_50/50_AR_1CA_R2
	30_50/50_TEX7+AR_1CE_R3		30_50/50_AR_1CA_R3
E_9	30_50/50_RES_2C_R3	E_14	30_50/50_TEX2M6_8,8AP_1CL_R1
	30_50/50_TEX7_2C_R3		30_50/50_TEX2M6_8,8AP+TEX7_1CL_R1
	30_50/50_TEX7+RES_2C_R3		30_50/50_TEX2M6_8,8AP+TEX7+RES_1CL_R1
	30_50/50_TEX7+AR_2C_R3		30_50/50_TEX2M6_8,8AP+TEX7+AR_1CL_R1
	30_50/50_TEX1_1CE_R3		30_50/50_TEX1M6_8,8_1CL_R1
	30_50/50_TEX1+RES_1CE_R3		30_50/50_TEX1M6_8,8+RES_1CL_R1
	30_50/50_TEX1+AR_1CE_R3		30_50/50_TEX1M6_8,8+AR_1CL_R1
	30_50/50_TEX1_1CA_R3		30_50/50_TEX1M6_8,8+TEX7_1CL_R1
	30_50/50_TEX1+RES_1CA_R3		30_50/50_TEX1M6_8,8+TEX7+RES_1CL_R1
	30_50/50_TEX1+AR_1CA_R3		30_50/50_TEX1M6_8,8+TEX7+AR_1CL_R1
E_10	30_50/50_TEX1_2C_R2	E_15	30_50/50_TEX1M6_8,8_1CL_R2
	30_50/50_TEX1_2C_R3		30_50/50_TEX1M6_8,8+RES_1CL_R2
	30_50/50_TEX2_2C_R2		30_50/50_TEX1M6_8,8+AR_1CL_R2
	30_50/50_TEX2_2C_R3		30_50/50_TEX1M6_8,8+TEX7_1CL_R2
	30_50/50_TEX3_2C_R2		30_50/50_TEX1M6_8,8+TEX7+RES_1CL_R2
	30_50/50_TEX3_2C_R3		30_50/50_TEX1M6_8,8+TEX7+AR_1CL_R2
	30_50/50_TEX4_2C_R2		
	30_50/50_TEX5_2C_R2		
	30_50/50_TEX6_2C_R2		
	30_50/50_TEX7_2C_R2		
E_16		E_16	30_50/50_TEX2M6_8,8AP_1CL_R2
			30_50/50_TEX2M6_8,8AP+TEX7_1CL_R2
			30_50/50_TEX2M6_8,8AP+TEX7+RES_1CL_R2
			30_50/50_TEX2M6_8,8AP+TEX7+AR_1CL_R2
			30_50/50_TEX2M6_8,8AP_1CL_R3
			30_50/50_TEX2M6_8,8AP+TEX7_1CL_R3
			30_50/50_TEX2M6_8,8AP+TEX7+RES_1CL_R3
			30_50/50_TEX2M6_8,8AP+TEX7+AR_1CL_R3

Tabla. 3.17 Identificación 3 de lotes para las probetas híbridas en ensayo de pull-out.

LOTE	PROBETAS
E_17	30_50/50_TEX1M6_8,8_1CL_R3
	30_50/50_TEX1M6_8,8+RES_1CL_R3
	30_50/50_TEX1M6_8,8+AR_1CL_R3
	30_50/50_TEX1M6_8,8+TEX7_1CL_R3
	30_50/50_TEX1M6_8,8+TEX7+RES_1CL_R3
	30_50/50_TEX1M6_8,8+TEX7+AR_1CL_R3
	30_50/50_TEX2M6_8,8AP8_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M6_8,8AP8+TEX7_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M6_8,8AP8+TEX7+RES_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M6_8,8AP8+TEX7+AR_1CL_R1
E_18	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_POS8_r30_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_POS16_r30_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M690C_8,8AN_POS8_r30_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M690C_8,8AN_POS16_r30_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M690G_8,8AN_POS8_r30_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M690G_8,8AN_POS16_r30_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_POS8_r8_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_POS16_r8_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M690C_8,8AN_POS8_r8_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M690G_8,8AN_POS8_r8_1CL_R1
E_19	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_RES_POS8_r30_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_AR_POS8_r30_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7_POS8_r30_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7RES_POS8_r30_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7AR_POS8_r30_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_RES_POS16_r30_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_AR_POS16_r30_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7_POS16_r30_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7RES_POS16_r30_1CL_R1
	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7AR_POS16_r30_1CL_R1

Tabla. 3.18 Identificación 4 de lotes para las probetas híbridas en ensayo de pull-out.

LOTE	PROBETAS
E_20	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_RES_POS8_r30_1CL_R2 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_AR_POS8_r30_1CL_R2 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7_POS8_r30_1CL_R2 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7RES_POS8_r30_1CL_R2 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7AR_POS8_r30_1CL_R2 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_RES_POS16_r30_1CL_R2 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_AR_POS16_r30_1CL_R2 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7_POS16_r30_1CL_R2 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7RES_POS16_r30_1CL_R2 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7AR_POS16_r30_1CL_R2
E_21	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_POS8_r30_1CL_R1 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_POS8_r30_1CL_R2 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_POS8_r30_1CL_R3 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_POS16_r30_1CL_R1 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_POS16_r30_1CL_R2 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_POS16_r30_1CL_R3
E_22	30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_RES_POS8_r30_1CL_R3 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_AR_POS8_r30_1CL_R3 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7_POS8_r30_1CL_R3 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7RES_POS8_r30_1CL_R3 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7AR_POS8_r30_1CL_R3 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_RES_POS16_r30_1CL_R3 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_AR_POS16_r30_1CL_R3 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7_POS16_r30_1CL_R3 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7RES_POS16_r30_1CL_R3 30_50/50_TEX2M640C_8,8AN_TEX7AR_POS16_r30_1CL_R3

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

CAPÍTULO IV.- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1.- INTRODUCCIÓN

El método de ensayo utilizado es el método de arrancamiento (*pull-out*). Este es un método habitual en los ensayos para barras de acero, de fibra de vidrio o carbono, y que se ha pretendido adaptarlo a una sección de GFRP rectangular.

En un ensayo tradicional de *pull-out* una barra atraviesa un bloque de hormigón y la adherencia es permitida en una cierta longitud, manteniéndose el resto sin contacto con el hormigón.

El ensayo consiste en sujetar el bloque de hormigón sobre una placa de apoyo y aplicar una carga sobre dicha placa para provocar el arrancamiento de la barra que está sujeta por uno de sus extremos (la configuración está descrita en el apartado 4.3 de este capítulo). La adherencia se analiza a través de la curva carga – deslizamiento.

Se ha pretendido adaptar dicho ensayo a los tipos de unión entre la capa de compresión de hormigón y el perfil de GFRP en las estructuras híbridas; los tipos de unión posibles se aprecian en la Figura 4.1.

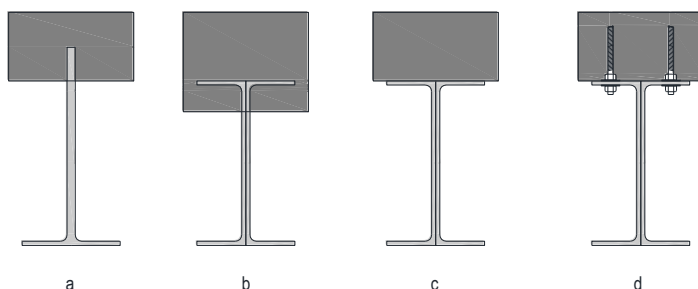


Fig. 4.1 Tipologías de enlace entre el perfil de GFRP y la capa de compresión del hormigón.

En base a la tecnología actual, existen varias tipologías básicas de unión entre perfiles de GFRP y la capa de compresión en vigas híbridas. En la Figura 4.1.a, se aprecia la primera tipología, donde se corta el ala superior del perfil y el alma se introduce dentro de la capa de compresión. En la Figura 4.1.b, se muestra la segunda tipología, que consiste en envolver toda el ala superior del perfil de GFRP con la cabeza de compresión de hormigón. En la tercera tipología, se ensasa el ala superior del perfil de

GFRP con la cabeza de compresión de hormigón, según se muestra en la Figura 4.1.c. La última opción 4.1.d incorpora la unión mecánica para evitar el despegue. Las dos primeras son las menos utilizadas, siendo la tercera y la cuarta las más estudiadas por la comunidad de investigadores en el ámbito estructural.

En esta Tesis Doctoral se establece un **único tipo de ensayo**, el de ***pull-out***, pero **con cuatro criterios o modalidades respecto de la condición de adherencia**. El primer tipo de enlace corresponde a la modalidad de adherencia que se ha denominado **“2C”** adherido a dos caras, por estar la interfase del perfil de GFRP en contacto en sus dos caras, ejerciendo además el hormigón una presión pasiva sobre la superficie del GFRP.

La realización de un ensayo de *pull-out* tradicional con preparación de la superficie del perfil a dos caras puede representar una tipología de enlace mostrado en la Figura 4.1.a y 4.1.b.

En algunos casos la preparación de la superficie o la incorporación de productos de unión puede realizarse solo por una cara (en la tipología de la Figura 4.1.b), con lo que el resto de las caras en contacto con el hormigón no garantizan la unión, pero siguen ejerciendo funciones de confinamiento. Adaptar un ensayo de *pull-out* a esta eventualidad parece sencillo, preparando la superficie sólo en una cara, y protegiendo la otra frente a la adherencia. Esta modalidad de ensayo se ha denominado **“1CA”** (adherencia a una cara con confinamiento del hormigón).

En una tipología de enlace como la de la Figura 4.1.c y 4.1.d, el hormigón no ejerce ningún confinamiento en la cara opuesta a la que está adherida. Para su análisis se ha debido adoptar dos opciones adicionales de ensayo con adherencia solo a una cara:

- Cuando no existe confinamiento del hormigón ni de otro tipo, el criterio de adherencia se ha denominado **“1CE”**.
- En el caso de que se aplique un confinamiento activo del hormigón gracias a los conectores, se ha denominado **“1CL”**.

Para la materialización de la modalidad 1CL permitiendo la estabilidad del ensayo y el apriete de los tornillos una vez endurecido el hormigón, se debió modificar la forma y proceso de fabricación de las probetas, tal y como se describe en el apartado 4.2.2.4 del presente capítulo.

El tipo de enlace mostrado en la Figura 4.1.b no es el más adecuado para optimizar el rendimiento del sistema estructural de viga híbrida, pues en

este sistema se sacrifica la ligereza del conjunto estructural en aras de una mejora estructural de las condiciones de confinamiento con respecto a los demás sistemas (Neagoe, 2014).

4.2.- MÉTODO DE CONFECCIÓN DE LAS PROBETAS HÍBRIDAS

En el presente apartado se describe en primer lugar cómo son las probetas, en segundo lugar cómo se confeccionan las probetas con los cuatro criterios o modalidades de adherencia y, en tercer lugar, el proceso de hormigonado de las probetas.

4.2.1.- DEFINICIÓN DE LAS PROBETAS

La probeta híbrida consiste en un cubo de hormigón, de 200 mm de lado, con un perfil de GFRP de 500 mm de longitud, embebido a lo largo del eje central. El perfil de GFRP sobresale en la parte superior 40 mm y en la parte inferior 260 mm. La parte embebida del perfil de GFRP en el interior del hormigón tiene una zona en contacto directo con el hormigón y otra que quedará independizada de éste, mediante una espuma de polietileno; estas dos zonas quedan identificadas en los esquemas que a continuación se muestran, en color rojo para la zona adherida y en color verde para la zona de GFRP independizada del hormigón (véase Figura 4.2).

El perfil de GFRP está en posición horizontal en el encofrado y con la base paralela a la dirección de hormigonado, favoreciendo la entrada del hormigón en el molde y la salida del aire ocluido.

4.2.2.- CONFECCIÓN DE LAS PROBETAS SEGÚN LOS CRITERIOS DE ADHERENCIA

4.2.2.1.- **MODALIDAD 2C**: la interfase del perfil de GFRP está en contacto en sus dos caras, ejerciendo el hormigón una presión pasiva sobre la superficie del GFRP, como se puede apreciar en la Figura 4.2.

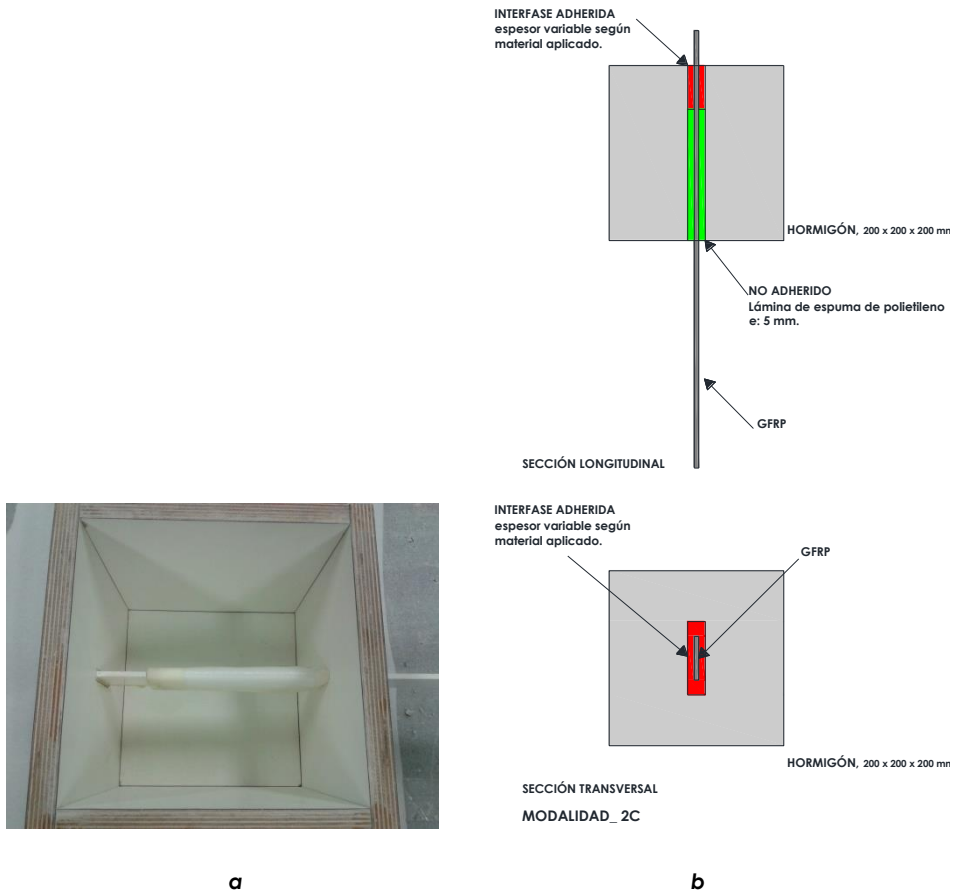


Fig. 4.2 Imagen (a) y esquema probeta híbrida (b), modalidad 2C.

4.2.2.2.- MODALIDAD 1CA, en la que solo existe una interfase del perfil de GFRP adherida al hormigón. La cara que no está adherida al hormigón se independiza mediante una capa de aceite de 0.5 mm, por lo que en dicha interfase no hay rozamiento con el hormigón pero sí existe cierto confinamiento pasivo de hormigón (véase Figura 4.3).

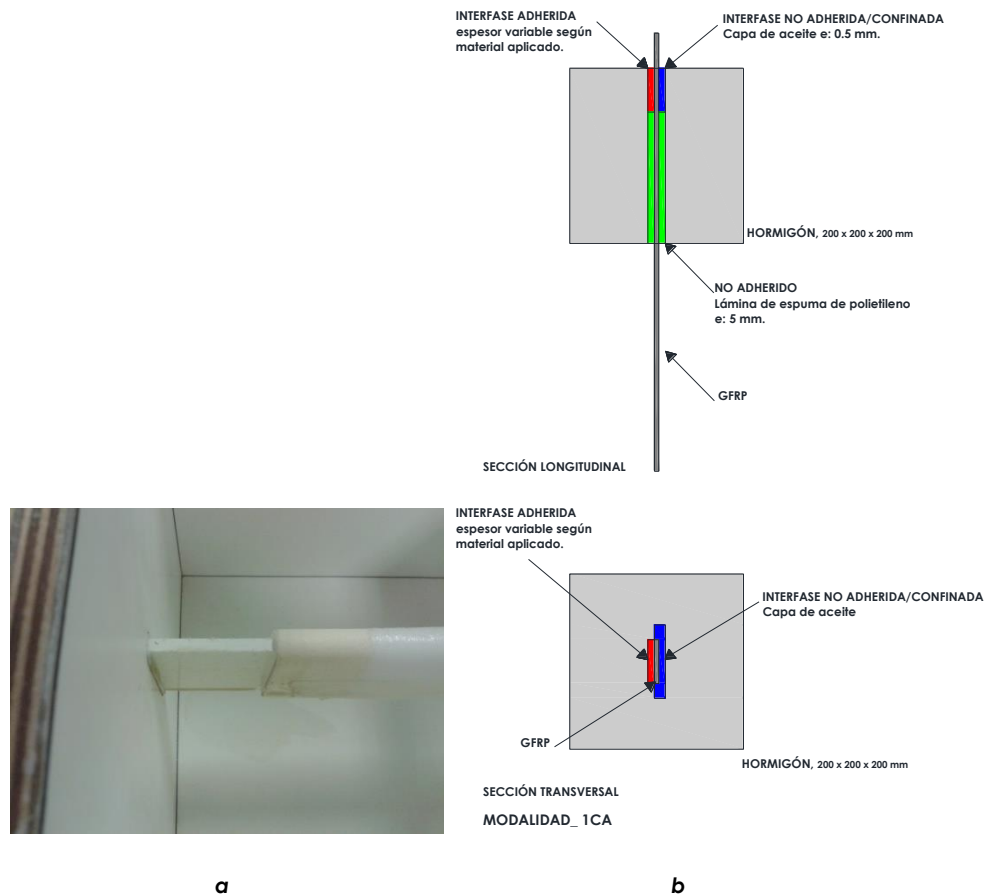


Fig. 4.3 Imagen (a) y esquema probeta híbrida (b), GFRP confinado a una cara, modalidad 1CA.

4.2.2.3.- MODALIDAD ICE, es la que se establece la no adherencia en tres de las caras del perfil de GFRP, no habiendo fricción ni confinamiento del hormigón gracias a una lámina de espuma de polietileno (representada en color verde) interpuesta entre el GFRP y el hormigón, tal y como se aprecia en la Figura 4.4.

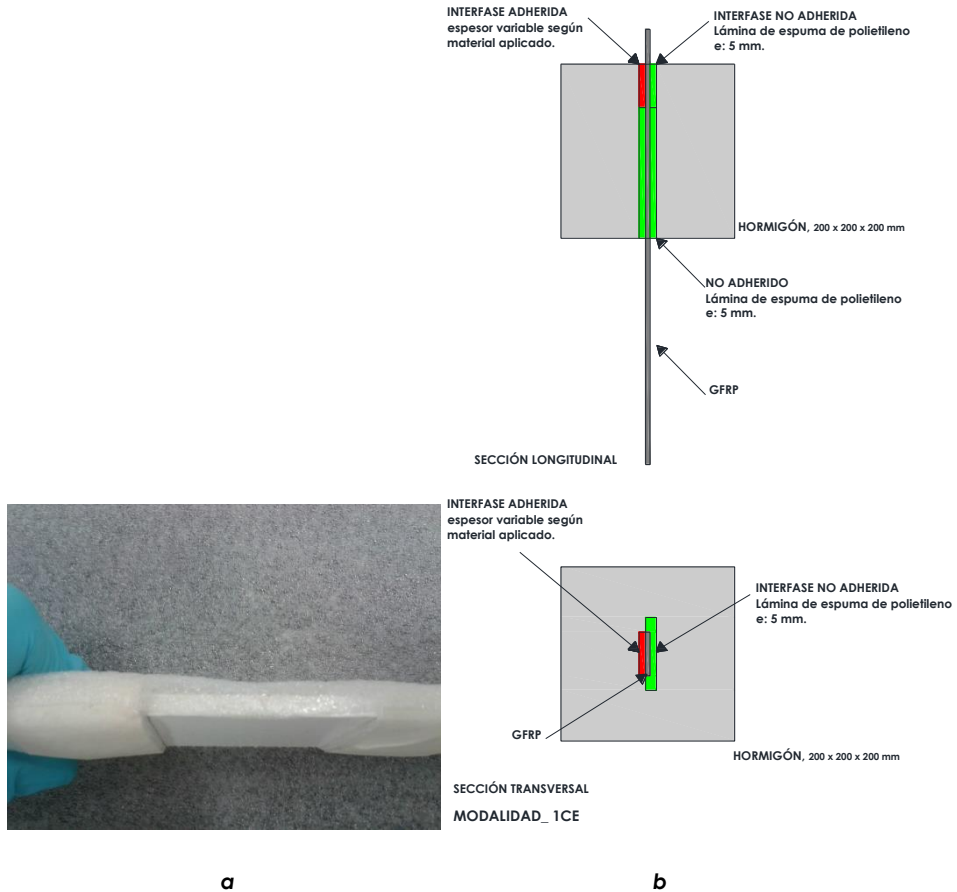


Fig. 4.4 Imagen (a) y esquema (b) probeta híbrida con el GFRP a una cara, sin confinamiento, ICE.

4.2.2.4.- MODALIDAD 1CL, diseñada para lograr el confinamiento activo del hormigón mediante el apriete de un sistema mecánico (tornillería) empleando una llave dinamométrica a los siete días después del hormigonado. Para ello es necesario practicar una abertura lateral en la probeta de *pull-out*, según se muestra en el esquema de la Figura 4.5.

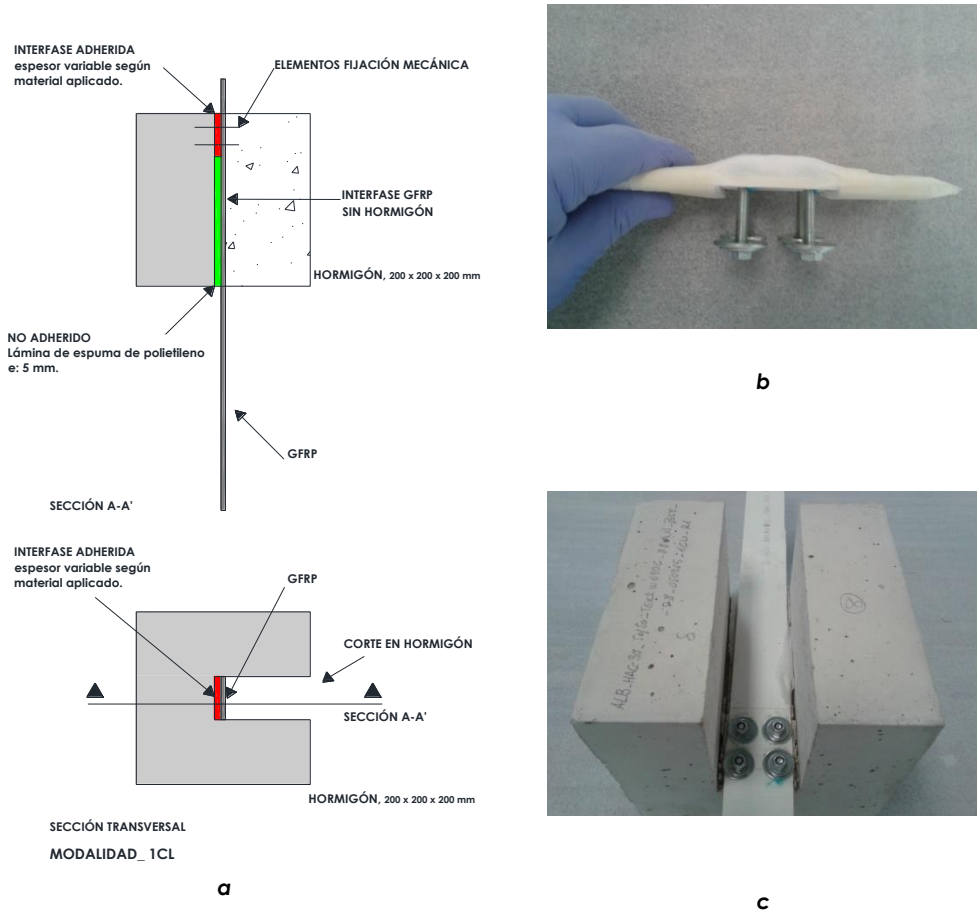


Fig. 4.5 Esquema probeta híbrida (a) e imágenes (b y c) con el GFRP a una cara, 1CL

4.2.3.- PROCESO DE HORMIGONADO DE LAS PROBETAS

Los moldes para fabricar las probetas híbridas son prismas de dimensiones interiores de 200 x 200 x 200 mm, con unos orificios para embeber las placas de GFRP horizontalmente. Están hechos de madera contrachapada de pino y recubrimiento superficial de melamina antiadherente de 20 mm de espesor total, como se aprecia en las Figuras 4.6.a y b.

La preparación de las superficies de las interfases del GFRP en contacto con el hormigón está referenciada en el capítulo V, "Metodología para la preparación de las interfases".

Los perfiles de GFRP se colocan en los moldes centrados en el eje, de tal modo que sobresalgan por las aberturas practicadas en los encofrados, tal y como se aprecia en la Figura 4.6.b. La junta entre el perfil de GFRP y el encofrado se sella con espuma de polietileno para evitar la salida de hormigón. Además, el perfil de GFRP se fija con polímero termosellable para evitar cualquier tipo de movimiento durante el proceso de hormigonado. No es necesario recubrir el interior de la superficie de los moldes con una fina capa de aceite mineral, ya que la melamina es antiadherente.



Fig. 4.6 Encofrados (a) y probeta preparada para hormigonar (b).

El vertido del hormigón se realiza en sentido vertical y por el lateral del perfil de GFRP que no tenga tratamiento superficial en los casos 1CA, 1CE y 1CL; en la modalidad 2C es indiferente. El hormigón utilizado es autocompactate, de modo que la masa irá ascendiendo según el flujo mostrado en la Figura 4.7, y no se vierte en ningún caso el hormigón directamente contra la superficie adherente. El vertido se realiza en dos capas, la primera hasta cubrir 2 cm el perfil de GFRP (véanse Figuras 4.7.a y b.) y la segunda capa hasta enrasar el molde. En el caso que se decida

vibrar el hormigón se realizará por las esquinas del encofrado sin tocar el perfil de GFRP ni el encofrado.

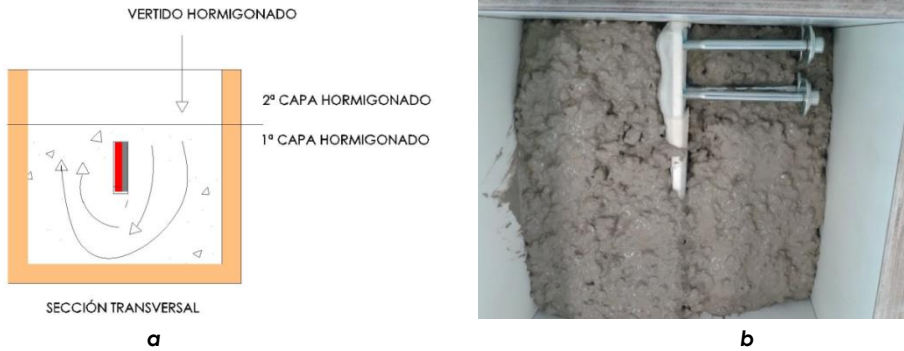


Fig. 4.7 Esquema vertido hormigonado probeta tipo (a) y vertido hormigón (b).

Después de que la capa superior está enrasada, se procede a alisar la superficie con una llana y proteger contra la evaporación mediante láminas de polietileno. La espuma de polietileno y el termosellable impiden la evaporación por las aberturas laterales del encofrado.

El hormigón autocompactate tiene 8 mm de tamaño máximo de árido. El escurrimiento está en 650 mm; la resistencia a compresión a los 7 días mínima debe ser de 30 ± 3 MPa. Se realiza un control 100 % de cada lote compuesto por 2 amasadas de 45 l. La confección del hormigón está referenciada en el apartado 3.4.1 del capítulo III "Programa experimental".

El desencofrado de las probetas se realiza transcurridas 24h desde el hormigonado, en condiciones de laboratorio con una temperatura ambiente de 23 ± 3 °C y una humedad relativa del $50 \pm 10\%$.

Después del desencofrado, las probetas quedan según se muestra en la Figura 4.8, y son trasladadas a la cámara de curado hasta los 7 días, edad a la que son ensayadas. Las muestras se analizan a una edad de 7 días.



Fig. 4.8 Probeta desencofrada.

El acondicionamiento previo de las muestras de los perfiles de GFRP está referenciado en el capítulo V, "Metodología para la preparación de las interfaces".

4.3.- DESARROLLO DEL MÉTODO DE ENSAYO

Este método de ensayo especifica los requisitos de prueba para la determinación de la adherencia entre los perfiles de GFRP y hormigón. Además, se estudia la relación entre la tensión de adherencia y los deslizamientos.

El ensayo de *pull-out* se realiza con una máquina de ensayo a tracción directa "IBERTEST" con una capacidad de carga de 700 kN. La carga máxima alcanzada en los ensayos es inferior a los 80 kN. Los ensayos se realizan con control de desplazamiento, 1 mm/minuto, sin precargas.

Para ello es necesaria una placa de carga de acero S235 JR mecanizada de 400 x 600 mm y 50 mm de espesor, con cuatro perforaciones de diámetro 22 mm y un hueco rectangular de 100 x 20 mm en el eje de la placa, con holgura suficiente para que pase el perfil de GFRP (véase Figura 4.9).



Fig. 4.9 Placa de acero S235 JR de 400 x 600 x 50 mm.

En esta placa de acero están ancladas cuatro barras de acero en los extremos, que conectan con una placa superior que descansa sobre el dintel metálico de la prensa.

La probeta es un bloque de hormigón de dimensiones 200 x 200 x 200 mm, y en su interior se encuentra el perfil de GFRP. La probeta descansa sobre la placa de acero de carga inferior, introduciendo el perfil de GFRP por la abertura de la placa, hasta la mordaza inferior, tal y como se aprecia en la Figura 4.10.

La transmisión de la carga se realiza traccionando el dintel superior de la máquina, que a su vez levanta al bloque de hormigón estando el perfil de GFRP anclado por la mordaza inferior. El dispositivo sólo transmite cargas axiales al perfil de GFRP, sin aplicar cargas de torsión o flexión.

La carga en los ensayos de *pull-out* se aplica de forma progresiva garantizando una velocidad de desplazamiento del actuador hidráulico de 1 mm/minuto.

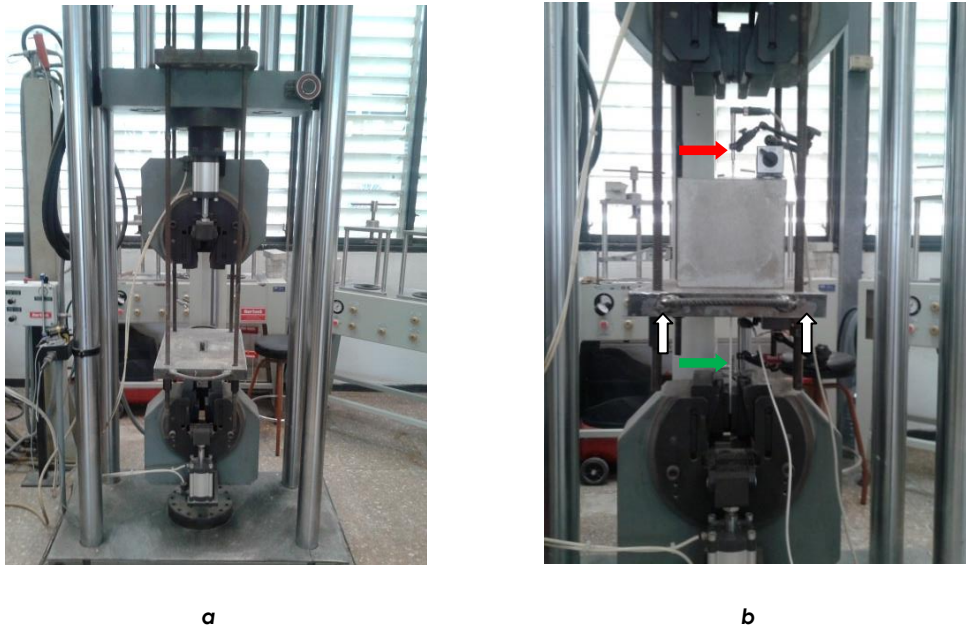


Fig. 4.10 Máquina de ensayo pull-out, ACI-440-3R-04.

La medición del deslizamiento del perfil de GFRP embebido en el hormigón se realiza con dispositivos de medición LVDT (Linear Variable Differential Transformer, transformador diferencial de variación lineal) instalados en el extremo libre superior (flecha roja Figura 4.10.b) y en el extremo cargado de las probetas (flecha verde Figura 4.10.b), con precisión de lectura de 0,001 mm.

La fijación en el extremo cargado se realiza mediante un imán en la chapa base de acero y conectado a un angular metálico fijado con resina termoendurecible al perfil de GFRP, como se observa en la Figura 4.11.b. En cuanto al captador LVDT en el extremo libre (no cargado), se adhiere una placa de acero con un polímero termoendurecible sobre la cara superior del bloque de hormigón, hasta contactar con el extremo superior del perfil de GFRP que sobresale del bloque de hormigón, como se aprecia en la Figura 4.11.a.



Fig. 4.11 Sistema de medición no cargado (a) y cargado (b).

La instrumentación utilizada consiste en un captador LVDT de 20 mm de fondo de escala posicionado en el extremo superior del perfil de GFRP (extremo no cargado). La medición del deslizamiento del perfil se realiza por toma directa de lecturas del captador LVDT ya que el perfil no sufre deformación alguna en dicho extremo, y antes de iniciarse el ensayo, el captador es posicionado para iniciar su lectura en 0."

Las gráficas se obtienen gracias al programa informático establecido por "Ibertest" para el control del pódico de ensayo y captación de datos de la instrumentación que se le acople al ensayo, estableciendo un sistema de registro automático que da lugar a las curvas fuerza-deslizamiento. Estos datos son ficheros *.CSV (lenguaje máquina) que son convertidos en ficheros *.XLS para ser procesados mediante hojas de cálculo del programa Excel, donde se relacionan las tensiones tangenciales con los deslizamientos medidos con el captador LVDT antes mencionado, a razón de 40 mediciones por segundo hasta finalizar el ensayo, que salvo rotura frágil se finaliza a los 10 mm de deslizamiento en general y a los 16 mm en el caso de empleo de tornillería con desplazamiento permitido.

La tensión tangencial τ (MPa) es calculada a partir de datos del valor de la fuerza F (N) registrada durante el ensayo y de la superficie adherente. Así, dicha tensión es el valor de la fuerza F expresada en N (Newtons) dividido por el área A (mm²) de contacto del perfil de GFRP con el hormigón.

CAPÍTULO V

METODOLOGÍA PARA LA PREPARACIÓN DE LAS INTERFASES

CAPÍTULO V.- METODOLOGÍA PARA LA PREPARACIÓN DE LAS INTERFASES

5.1.- INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestra cómo se preparan las superficies, las interfases entre el perfil de GFRP y el hormigón, para mejorar la adherencia, así como las superficies del perfil de GFRP que no van a estar en contacto directo con el hormigón.

Se establece el procedimiento de tratamiento de las probetas de GFRP en función del método de ensayo propuesto, con sus respectivas particularidades en la preparación de las probetas, 1CA, 1CE o 1CL, según lo planificado en el capítulo III, "programa experimental".

Se exponen los criterios y bases del proceso de preparación de las interfases mediante una serie de tratamientos superficiales y uniones mecánicas.

5.2.- MÉTODO DE CONFECCIÓN DE LAS PROBETAS DE GFRP

Los perfiles de GFRP que se han utilizado tienen sección rectangular y una longitud de 500 mm, con dos tipos de sección: 50 x 5 mm y 25 x 5 mm. En dichas probetas se establecen cuatro zonas A, B, C y D, tal y como se aprecia en la Figura 5.1 y que a continuación se describen:

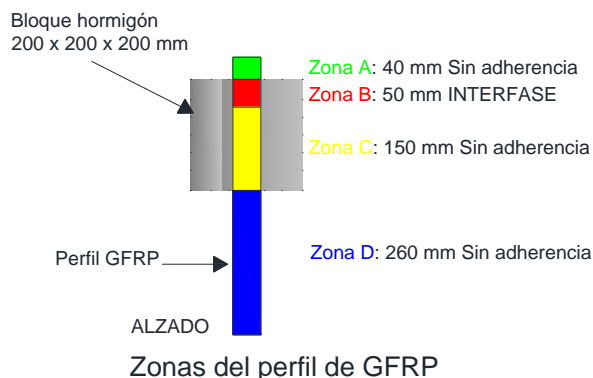


Fig. 5.1 Esquema de las zonas de la probeta de GFRP.

- La zona A, son 40 mm, que no están en contacto con el hormigón, y cuentan con una envoltura de 5 mm de espuma de polietileno fijada y sellada con cinta de carroceros (véase Figura 5.2).



Fig. 5.2 Espuma de polietileno en la zona del perfil y cinta de carroceros.

- La zona B, la interfase de 50 mm, está en contacto o no con el hormigón dependiendo de la cara de GFRP en función de la tipología de probeta a ensayar.
- La zona C, a continuación, corresponde a una longitud de 150 mm embebida en el cubo de hormigón, en la que se evita la adherencia; las cuatro caras del perfil están envueltas con 2 mm de espuma de polietileno de baja densidad, fijada y sellada con cinta de carroceros.
- La zona D, corresponde al resto del perfil, que no recibe ningún tratamiento ni protección.

En el caso del método a dos caras (2C), ambas caras principales son objeto de tratamientos superficiales de adherencia; las caras laterales del perfil de GFRP de 5 x 50 mm no se tratan, por la dificultad de tratamiento de una superficie tan pequeña, tal y como se muestra en la Figura 5.3.

La cara no adherida de la zona B puede estar tratada con aceite (1CA), o con espuma de polietileno de baja densidad (1CE), o con una cara libre (1CL). A continuación se muestra cómo es el proceso para ello.

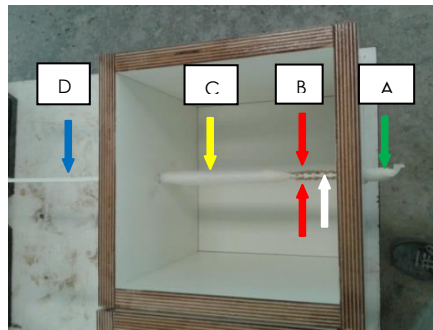


Fig. 5.3 Fotografía zonas perfil (según colores Fig.5.1) con las dos caras tratadas, 2C, en este caso arenadas (flechas rojas), la flecha de color blanco indica cara de 5 x 50 mm no tratadas.

Para conformar una probeta a una cara con aceite "1CA", se procede a la no adherencia de una cara principal del perfil de modo que el aceite evita el rozamiento pero permite que el hormigón ejerza un confinamiento pasivo en la probeta de GFRP. Solo se trata una cara en contacto con el hormigón de 50 x 50 mm; los laterales de 50 x 5 mm no se tratan, quedan tal como viene la superficie pultrusionada, ya que se comprobó que en estas caras laterales era muy compleja la colocación de aceite sin manchar la cara tratada, con el alto riesgo de anular el tratamiento superficial de mejora de adherencia. En la cara opuesta a la tratada superficialmente, también de 50 x 50 mm, se aplica una capa de 0.5 mm de aceite mineral desencofrante, como se puede apreciar en la Figura 5.4.a (flecha roja).

Para el caso de una cara con espuma "1CE", se trata una cara en contacto con el hormigón de 50 x 50 mm, de modo que en este caso el hormigón no confina el GFRP. En los laterales de 50 x 5 mm se coloca una cinta de carroceros para el cierre de los 5 mm de la espuma de polietileno que se aplica en la cara no expuesta para independizarlas del hormigón, tal y como se aprecia en la figura 5.4.b (flecha azul).



Fig. 5.4 Fotografía zona "B" y superficies sin adherencia en la zona "B" de 1CA (a) y 1CE (b).

Para la configuración de un cara libre "1CL", solo se trata una cara en contacto con el hormigón de 50 x 50 mm; en los laterales de 50 x 5 mm se coloca una cinta de carroceros para el cierre de los 2 mm de espuma de polietileno que se aplica en la cara no expuesta para independizarlas del hormigón. Posteriormente se realiza un corte con sierra de disco, eliminando la zona de hormigón, tal y como se muestra en la Figura 5.5. También se retira la espuma utilizada como elemento antiadherente.



Fig. 5.5 Fotografía de la probeta tipo 1CL.

5.3.- DESARROLLO DEL MÉTODO DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL

Se muestra el método de preparación de los tratamientos superficiales sobre la superficie de GFRP:

5.3.1.-PATRÓN

La superficie del perfil pultrusionado no se trata, se mantiene tal y como viene de fábrica; ésta es la superficie control. Se aplica disolvente para su limpieza y se deja secar 5 minutos. Las piezas están preparadas 1 hora antes de ser hormigonadas. El tratamiento patrón está ilustrado en la Figura 5.6.



Fig. 5.6 Tratamiento superficial patrón.

5.3.2.- PULIDO

A la superficie del perfil pultrusionado se le aplica un lijado suave, con el fin de abrir el poro en la superficie para que cualquier aplicación tenga mejor agarre. La lija utilizada es de grano medio 200, se aplica en sentido de la dirección de las fibras y a 90 °. Se aplica disolvente para su limpieza, antes y después del pulido y se deja secar 5 minutos. Las piezas están preparadas 1 hora antes de ser hormigonadas. Este tratamiento se realiza para todos los demás como base previa.

5.3.3.-RESINA

Se han utilizado dos tipos de resinas. La primera, acrílica líquida, se abandona y se descarta tras los ensayos previos por tener baja capacidad adherente en las condiciones de este programa de ensayo. Una vez aplicado el pulido se aplica la resina con pincel sobre la superficie de la interfase, con un espesor de 1 mm, en dos pasadas a 0 y 90 grados, finalizando 30 minutos antes del hormigonado de las piezas, tal y como se aprecia en la Figura 5.7.a.

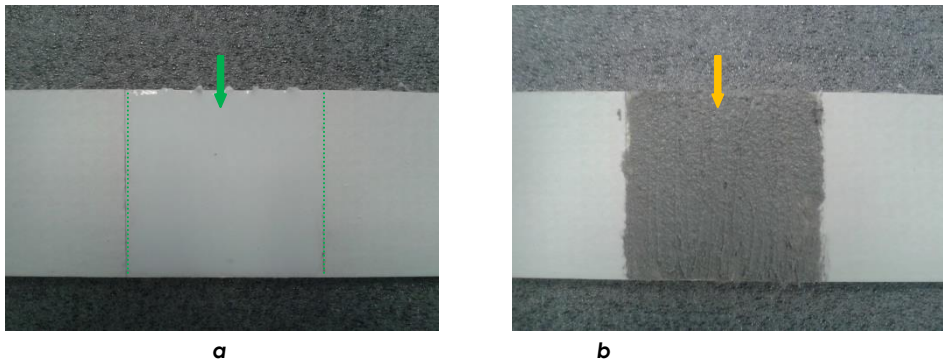


Fig. 5.7 Tratamiento superficial con resina acrílica (a) y poliéster (b).

La segunda, resina de poliéster, es con la que se realizan los ensayos de caracterización con denominación de resina (RES) para el resto de la Tesis Doctoral; es una resina de poliéster bicomponente que endurece en presencia de humedad, proporcionada por la empresa "SIKA" (AnchorFix-1). La aplicación también se realiza después del pulido, pero en este caso es diferente debido a que se trata de una pasta que requiere dosificador helicoidal que mezcla el material bicomponente antes de su aplicación; el espesor es de 2 mm y se aplica con una espátula 1 minuto antes del hormigonado, tal y como se aprecia en la Figura 5.7.b.

5.3.4.-ARENADO

Se realiza el tratamiento base de pulido. En un vaso de precipitados se preparan 100 g de resina de poliéster insaturado ortoftálico, se añade un 3% de catalizador (Peróxido de metil-etilcetona) y un 0.15% de acelerante (Octoato de cobalto) y se mezcla uniformemente durante 3 minutos. Esta resina ha sido proporcionada por la empresa "Pinturas José Antonio García, S.L."

Posteriormente se aplica una capa de 1 mm de resina líquida de poliéster insaturado ortoftálico, pre-acelerado y fixotrópico, sobre la que se procederá al espolvoreado de la superficie con 100 g de árido de sílice 1/2 mm. Se deja polimerizar a temperatura ambiente de laboratorio (20 °C), durante 12 horas. Este proceso se realiza como mínimo 12 h antes del hormigonado de las piezas híbridas. El acabado se aprecia en la Figura 5.8.



Fig. 5.8 Tratamiento interfase tipo arenado.

5.3.5.-TEXTURIZADOS

De entre los texturizados analizados en los ensayos previos, en esta fase se han utilizado cinco tipos denominados 3, 4, 5, 6 y 7, y que se describen a continuación.

El texturizado que más se ha desarrollado ha sido el tipo 7. Consiste en el ranurado del perfil, mediante corte con sierra de disco, de 4 mm de espesor y con una profundidad de 1 mm. Los cortes llevan la dirección perpendicular de las fibras, con una separación de 5 mm entre las ranuras. Posteriormente al corte se realiza el pulido con una lija de grano medio en sentido de la dirección de las fibras y a 90°, se aplica disolvente para su limpieza, antes y después del pulido, y se deja secar 5 minutos. Las probetas deben estar preparadas 1 hora antes del hormigonado, tal y como se muestran en la Figura 5.9.



Fig. 5.9 Tratamiento superficial texturizado tipo 7, vista de perfil (a) y perspectiva (b).

El texturizado tipo 3 se realiza del mismo modo que el tipo 7, con la única diferencia que el ranurado es en la dirección de las fibras, tal y como se aprecia en la Figura 5.10.

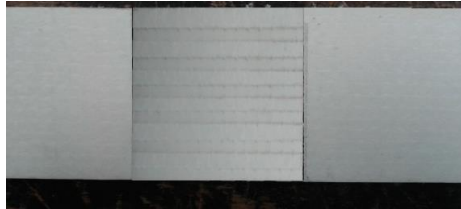


Fig. 5.10 Tratamiento superficial texturizado tipo 3.

El texturizado tipo 4, igual al tipo 7, pero con el ranurado formando un ángulo de 45° con el eje del perfil de GFRP, tal y como se aprecia en la Figura 5.11.



Fig. 5.11 Tratamiento superficial texturizado tipo 4.

El texturizado tipo 5 es idéntico al tipo 7, pero recubierto con una capa de resina acrílica de 1 mm.

El texturizado tipo 6 se realiza mediante perforaciones de diámetro 4 mm en una malla de 4 x 4, perforaciones con intereje de 10 mm entre las perforaciones y 10 mm desde el eje de la perforación hasta el contorno de la zona adherida, con el fin de que el hormigón pueda introducirse por los orificios practicados; se muestra en la Figura 5.12.

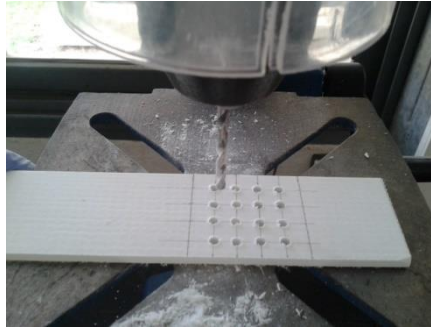


Fig. 5.12 Tratamiento superficial texturizado tipo 6.

5.3.6.-COMBINADOS

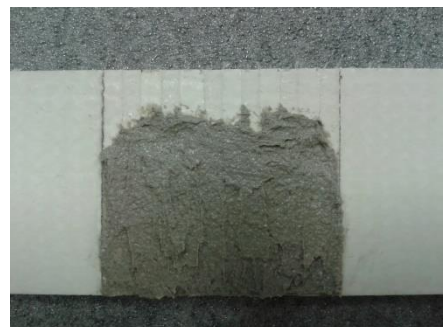
En las probetas en las que se combinan otros tratamientos con el texturizado tipo 7, seleccionado tras los ensayos previos, el proceso es el mismo que el realizado por separado: primero se texturiza y después se le aplica el arenado o la resina según la combinación deseada.

En la Figura 5.13.a, se aprecia el estado previo ya texturizado tipo 7, con la resina preparada y el árido de sílice, para posteriormente aplicar la capa de 1 mm de resina de poliéster, como base del arenado (véase el apartado 5.3.4 del presente capítulo).

El texturizado 7 y resina de poliéster (RES), se observa en la Figura 5.13.b, aplicándose en primer lugar el texturizado según el apartado 5.3.5 y la resina 1 minuto antes del hormigonado, según lo ya especificado en el apartado 5.3.3 del presente capítulo.



a



b

Fig. 5.13 Tratamiento superficial texturizado + arenado (a) y texturizado + resina (b).

5.4.-DESARROLLO DEL MÉTODO DE FIJACIONES MECÁNICAS

5.4.1.-SIN DESPLAZAMIENTO

Para la preparación de las uniones atornilladas, en primer lugar se marcan los cuatro ejes de los tornillos, que quedan posicionados dentro de la interfase de 50 x 50 mm, a 10 mm del perímetro. Los taladros se realizan de diámetro 4 o 6 mm en función de si los tornillos son de métrica 4 (M4) o métrica 6 (M6), respectivamente. Se procede después a lijar toda la interfase con una lija de grano medio, posteriormente se limpia con disolvente y se deja secar durante 5 minutos.

Se colocan los tornillos con sus correspondientes tuercas y arandelas y se procede a dar el par de apriete de 4 Nm para la métrica M4 y par 8 Nm para la métrica M6 con una llave dinamométrica. El par de apriete se realiza apretando el tornillo contra el perfil de GFRP (confinamiento pasivo del hormigón) para 1CA (véase Figura 5.14) y 1CE.



Fig. 5.14 Tornillería (texturizado 1*) a dos caras, 1C.

Para evitar el contacto de la tuerca y arandela posterior con el hormigón, se cubre con plastilina (véase Figura 5.15), junto con espuma de polietileno; posteriormente se aplica con un pincel una capa de aceite desengrasante mineral. Este procedimiento se realiza en los casos que existan fijaciones mecánicas en las modalidades 1CE y 1CL. En las modalidades 2C y 1CA se realizan las probetas de forma análoga, salvo que se prescinde de la espuma de polietileno, con el fin de que el hormigón confine al perfil.



Fig. 5.15 Tornillería sin desplazamiento (TEX1) a una cara, 1CA, perfil.
La plastilina es el material de color negro.

5.4.2.- CON DESPLAZAMIENTO PERMITIDO

Dado que se planteó la opción de analizar uniones atornilladas eliminando el efecto pasador, se realizó una preparación a base de perforaciones tipo coliso. Para ello, en las modalidades 1CA y 1CE se marcan los ejes de los cuatro tornillos a 10 mm del perímetro de la interfase. Posteriormente se traza, en el caso de utilizar tornillos M4, dos taladros más, tangentes a los anteriores hacia el interior de la interfase. Se repasan con la sierra los tres orificios hasta formar los laterales paralelos del coliso. Se colocan los tornillos con sus correspondientes arandelas y tuercas, y se procede a dar el par de apriete correspondiente con una llave dinamométrica. La posición de los tornillos es tal y como se muestra en la Figura 5.16, en la que se observa la plastilina (color oscuro) en el interior del coliso para que no se introduzca el hormigón o los tratamientos de resina o arenado en su caso, que podrían interrumpir o impedir el movimiento del tornillo en el interior del coliso.

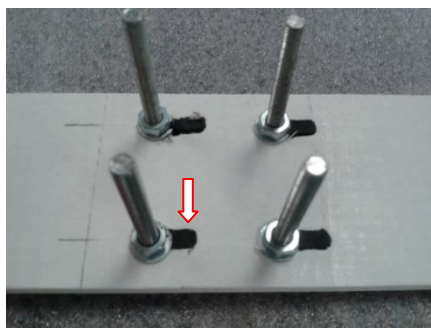


Fig. 5.16 Tornillería con desplazamiento (TEX2) a una cara, 1C.

En el caso de utilizar tornillería M6, el procedimiento es el mismo, aunque solo se realizan dos perforaciones de diámetro 6 mm por cada coliso, con su par de apriete correspondiente.

En la modalidad 1CL se utiliza la tornillería M6. En los ensayos previos las perforaciones para realizar los colisos se inician a 11 y 32 mm, en función de los dos tipos de recubrimientos de 8 y 30 mm respectivamente, del límite de la zona correspondiente a la interfase adherida, tal y como se aprecia en la Figura 5.16.

La aplicación del par de apriete presenta dos variantes: en una se realiza apretando sobre el GFRP (confinamiento pasivo del hormigón) lo que corresponde a los casos 1CA y 1CE; en la otra el tornillo arrastra al bloque de hormigón hacia la interfase de GFRP (confinamiento activo del hormigón) para la modalidad 1CL.

En los casos de confinamiento pasivo del hormigón los pares de apriete para la tornillería son 4 Nm para métrica M4 y 8 Nm para M6, para fijar el tornillo al perfil de GFRP. En los casos de confinamiento activo del hormigón solo se utiliza tornillería M6 con dos pares de apriete 8 y 16 Nm.

5.4.3.-SOLUCIONES COMBINADAS

Para el caso de soluciones combinadas:

- De tornillería con y sin desplazamiento combinadas con resinas o arenado.
- De tornillería con y sin desplazamiento combinadas con texturizados y resina o arenado.

Se procede de manera análoga a los casos anteriores, aplicando los distintos procedimientos de manera secuencial.

Tornillería fija o con desplazamiento + Arenado: (Véase Figura 5.17)

- 1.- Se realizan las perforaciones para tornillería.
- 2.- Limpieza antes y después con disolvente, secado posterior 5 minutos.
- 3.- Colocación de la tornillería, tuercas y arandelas, con el par de apriete correspondiente.

4.- Colocación de la resina de poliéster sobre la superficie de GFRP y espolvoreado de árido de sílice. Secado 12 horas.

5.- Se envuelve el GFRP con espuma de polietileno para independizar las zonas no adherentes. A la tornillería se le aplica una capa de plastilina en el coliso para independizar la zona de contacto con el hormigón de modo que el tornillo pueda desplazarse libremente en el coliso.

6.- Las probetas se introducen en el encofrado.

7.- En los casos del método 1CE, se prepara la zona B de la interfase con desencofrante aceite mineral 5 minutos antes del hormigonado.

8.- Hormigonado.

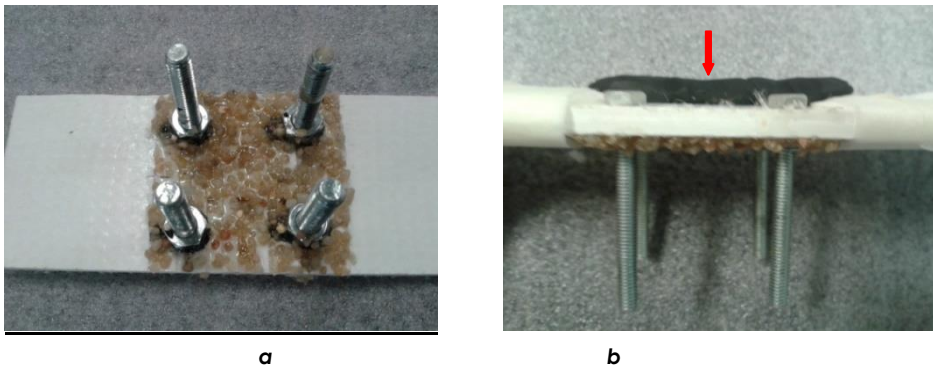


Fig. 5.17 Tratamiento superficial tornillería con desplazamiento + arenado (a) y con la protección antiadherente de plastilina (flecha roja) en la cara opuesta (b).

Solo en los casos de postesado de la tornillería (TEX2-2) para el confinamiento activo del hormigón sobre el perfil de GFRP se realizó en primer lugar el arenado (véase Figura 5.18.a), y posteriormente se colocó la plastilina en el coliso para evitar la entrada de hormigón y permitir que el tornillo se desplace. Una vez colocada la plastilina se introduce el tornillo por el hueco dejado a tal efecto en la plastilina, y en la parte posterior de la cabeza del tornillo se coloca una doble arandela y tuerca con freno para mejorar el par de apriete. Finalmente se protege con espuma de polietileno la cara opuesta (véase Figura 5.18.b). Una vez hormigonado se corta con sierra de disco a ambos lados del perfil de GFRP para poder extraer el bloque de hormigón, dando una configuración geométrica a la probeta híbrida del tipo 1CL (véase Figura 5.19.a) para, una vez retirado el polietileno, quitar las arandelas y tornillería para su limpieza (véase Figura 5.19.b). Una vez limpio se procede a su colocación final para dar el par de apriete correspondiente (véase Figura 5.20).

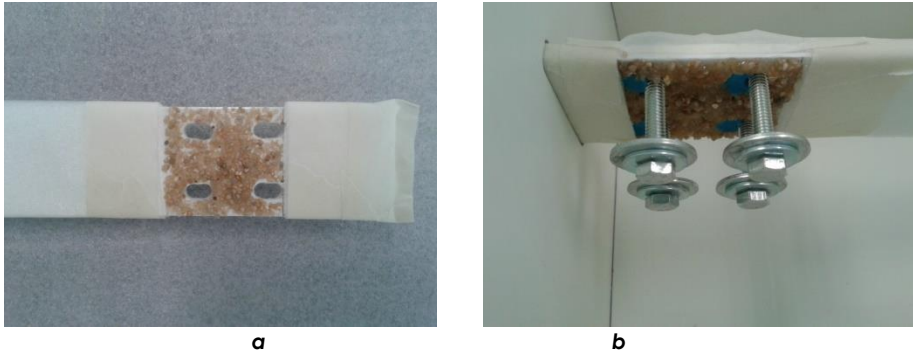


Fig. 5.18 Tratamiento superficial tornillería con desplazamiento con postesado de tornillería + arenado, primera fase (a) y segunda fase de colocación del tornillo y protección antiadherente posterior en la cara opuesta (b).



Fig. 5.19 Envoltura de espuma de polietileno (a) y retirada del polietileno, limpieza y tornillería lista para colocar doble arandela y tuerca en la cara opuesta (b).



Fig. 5.20 Tornillería lista para el par de apriete posterior en la cara opuesta.

Tornillería fija o con desplazamiento + Resina (RES): (véase Figura 5.21)

- 1.- Se realizan las perforaciones para tornillería.
- 2.- Limpieza antes y después con disolvente, secado posterior 5 minutos.
- 3.- Colocación de la tornillería, tuercas y arandelas, con el par de apriete correspondiente, salvo en el caso de la tornillería postesada aplicando su par de apriete una vez el hormigón está endurecido.
- 4.- Se envuelve el GFRP con espuma de polietileno para independizar las zonas no adherentes. A la tornillería se le aplica una capa de plastilina en el coliso para independizar la zona de contacto con el hormigón de modo que el tornillo pueda desplazarse libremente en el coliso.
- 5.- Las probetas se introducen en el encofrado.
- 6.- En los casos del método 1CE, se prepara la zona B de la interfase con desencofrante aceite mineral 5 minutos antes del hormigonado.
- 7.- Un minuto antes del hormigonado, se aplica la capa de resina de poliéster en la interfase de GFRP.
- 8.- Hormigonado.

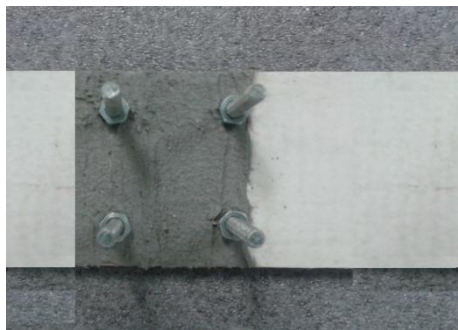


Fig. 5.21 Tratamiento superficial tornillería + resina.

Tornillería fija o con desplazamiento + Texturizado + Arenado o Resina:

El procedimiento seguido es el mismo que en el caso anterior incluyendo entre el paso dos y el tres la realización del ranurado de las piezas y su posterior limpieza con disolvente (véanse ejemplos en la Figura 5.22).

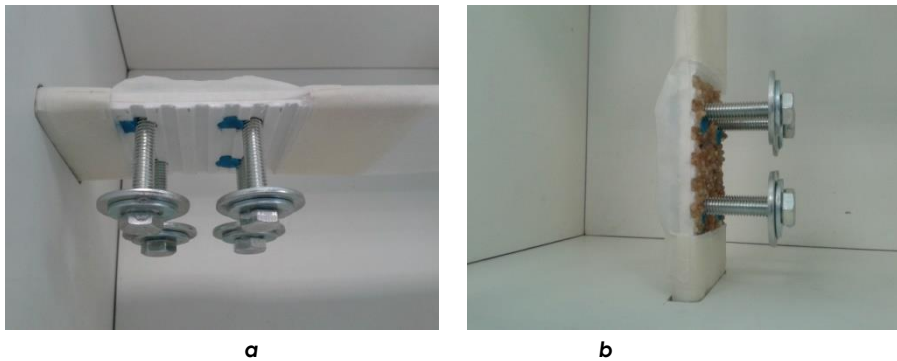


Fig. 5.22 Probetas para el confinamiento activo del hormigón con tratamiento tornillería + TEX7 (**a**) y combinado con arenado (**b**).

CAPÍTULO VI

RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO VI.- RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados y su análisis en dos grandes bloques: el primero se refiere a los ensayos previos, el segundo a los ensayos de caracterización de la adherencia.

En los ensayos previos, se presentan los resultados que han llevado a la selección de una serie de variables necesarias para poder continuar con los ensayos del segundo bloque, tal y como se muestra a continuación.

6.1.- ENSAYOS PREVIOS

6.1.1.- INTRODUCCIÓN

En esta fase, se intenta abordar la definición de los parámetros del ensayo que permitan adaptar y mejorar la metodología de ensayo propuesta para el estudio de la adherencia FRP-hormigón.

Junto con los trabajos planteados para la puesta a punto de la metodología en estos ensayos previos se selecciona las siguientes variables:

- 1.- La longitud de adherencia de la interfase del perfil de GFRP con el hormigón.
- 2.- La capacidad mecánica a compresión del hormigón.
- 3.- El tipo de texturizado en los perfiles de GFRP.
- 4.- El tipo de perfil de GFRP.
- 5.- El uso de fibras metálicas en el hormigón.
- 6.- El tipo de fijación mecánica.
- 7.- El recubrimiento de las fijaciones mecánicas.

A tal fin, se han realizado diversas tandas de ensayos, para determinar los valores más adecuados de las diversas variables, bien de forma individual o analizando parejas de parámetros para optimizar el número de ensayos a realizar.

Para facilitar la **identificación de las distintas tipologías de probetas** se establece un código en cada probeta, que se describe a continuación:

Ejemplo: 30_50/50_TEX2-M6-8.8-40C_TEX7+RES_POS8_r8_1CL

- **30** Corresponde a la resistencia del hormigón (f_c) del hormigón, con tres posibilidades 30, 60 y 90 MPa.
- **50** Es la anchura de la **sección** del perfil de **GFRP**, puede ser de 50 ó 25 mm.
- **50** Es la longitud de adherencia (L_{adh}) del perfil de GFRP; se han realizado pruebas con 25, 50 y 100 mm.
- **TEX2** Corresponde al tipo de **fijación mecánica**, puede ser TEX1 o TEX2.
 - En los casos en que aparezcan las siguientes abreviaturas (RES, AR, TEX1, TEX2, TEX7, MIX: combinaciones) están representados los **tratamientos superficiales**.
- **M6-8,8** **Métrica** de la tornillería y **grado**; se utilizan M4 (6.6) y M6 (8.8).
- **40** Corresponde a la longitud del tornillo; se ha trabajado con dos longitudes 40 y 90 mm.
- **C** Es el indicador de la tipología de remate de la tornillería: en capucha "C" y en forma de gancho "G".
- En aquellos casos en que se aplica el postesado en la tornillería, el código **TEX2-2** equivale a "**TEX2-M6-8.8-40C**".
- **TEX7+RES** Tipo de variable de adherencia combinada con resina u otras variables.

- **POS8 Postesado** de la **tornillería** se han aplicado dos tipos de par de apriete: 8 y 16 Nm.
- **r8** identifica y cuantifica el recubrimiento del tornillo; se han utilizado las siguientes dimensiones: 8 y 30 mm.
- **1CL Modalidad** de **ensayo** de *pull-out*; se utilizan 4: 2C, 1CA, 1CE, 1CL.

Del mismo modo, en las curvas τ - δ se describen a continuación los **códigos** alfanuméricos asociados en función de los distintos **comportamientos** que se han observado:

- * Indica la rotura del perfil de GFRP con deslizamientos menores que 1 mm.
- 1* Indica la rotura del perfil de GFRP con deslizamientos mayores que 4 mm.
- + Splitting, asociado a deslizamientos inferiores a 1.5 mm.
- S Modo de fallo por deslizamiento.
- S¹ Modo de fallo por deslizamiento, cuando viene acompañando de caídas y subidas bruscas en la relación τ - δ .
- S² Modo de fallo de rotura identificado en la zona descargada del perfil de GFRP en contacto con la cara superior del cubo de hormigón, a pesar de que sigue deslizando hasta finalizar el ensayo.

Los códigos se posicionan en las curvas τ - δ para indicar en qué momento se inicia el fenómeno descrito.

Los deslizamientos representados en las curvas τ - δ en las figuras del presente capítulo, corresponden al captador LVDT ubicado en el extremo no cargado del perfil de GFRP.

6.1.2.- DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN Y LONGITUD DE ADHERENCIA

En este apartado se establecen tres tipos de resistencia mecánica a compresión del hormigón: 30, 60 y 90 MPa, a la edad de 7 días. Se establece a 7 días con el fin de obtener una respuesta rápida y poder

realizar los oportunos cambios, así como para conocer el comportamiento adherente que posee a edades tempranas.




También se establecen tres longitudes de adherencia, 25, 50 y 100 mm, con el fin de seleccionar la más adecuada en función de la superficie mínima representativa para el tratamiento superficial que se le aplique. Además, se pretende comprobar si dichas longitudes permiten estudiar el deslizamiento sin problemas de *splitting*.

En la Tabla 6.1 se detallan los códigos y nomenclaturas de las probetas de los ensayos previos para la selección de f_c y L_{adh} .

Las curvas tensión de adherencia-deslizamiento (τ/δ) para el perfil de GFRP de sección 50 x 5 mm, se muestran para distintos tipos de resistencia y longitud de adherencia en las Figuras 6.1 y 6.2.

La Figura 6.1 corresponde al caso en el que la interfase del perfil de GFRP no tiene ningún tipo de tratamiento, se trata del "patrón"; el caso del tratamiento de pulido se muestra en la Figura 6.2. Tal y como se aprecia, la resistencia del hormigón no es determinante. En cambio, la longitud de adherencia, cuando disminuye, da lugar a un ligero aumento en la capacidad adherente. Todas las probetas de este grupo tienen un modo de fallo por deslizamiento, lo cual permite estudiar este comportamiento sin problemas de metodología de ensayo. La mejora de la interfase pulida frente al patrón es mínima.

Tabla. 6.1 Códigos y nomenclaturas de probeta de los ensayos previos para la selección de f_c y L_{adh} .

CÓDIGO GENERAL 30_25/100			código color	f_c _MPa	Código líneas/ L_{adh} mm
30	25	100		30	continua 100
f_c	Anchura GFRP mm	L_{adh} GFRP mm		60	discontinua 50
				90	punteada 25

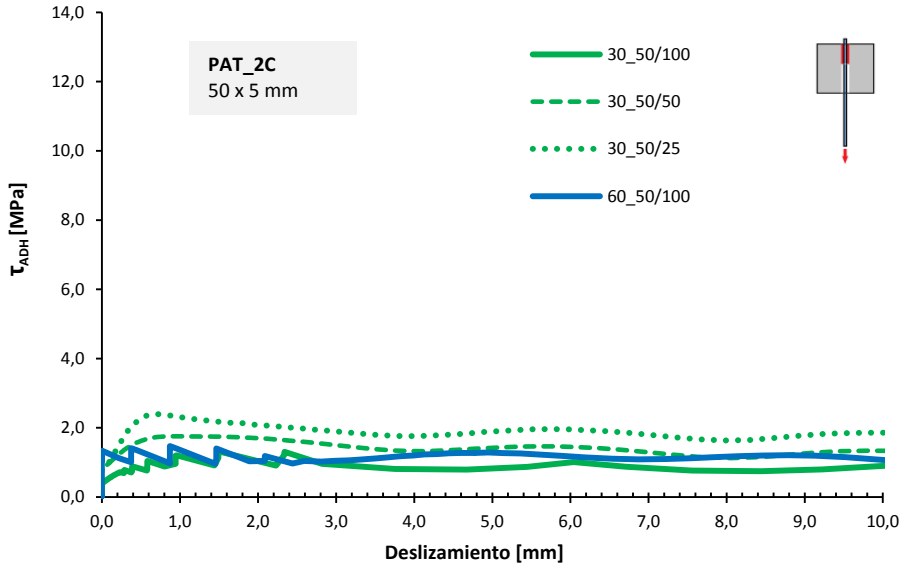


Fig. 6.1 Curvas tensión de adherencia-deslizamiento (τ/δ), modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, patrón.

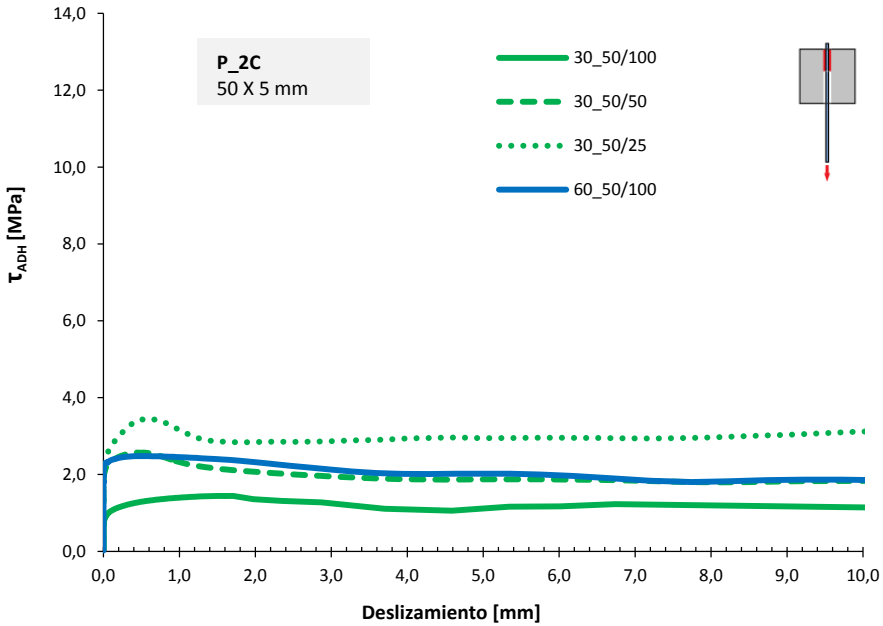


Fig. 6.2 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, pulido.

El mismo comportamiento descrito es aplicable al tratamiento superficial con resina acrílica (ACR), tal y como se observa en la Figura 6.3. No se aprecia mejora alguna en este tratamiento frente al patrón.

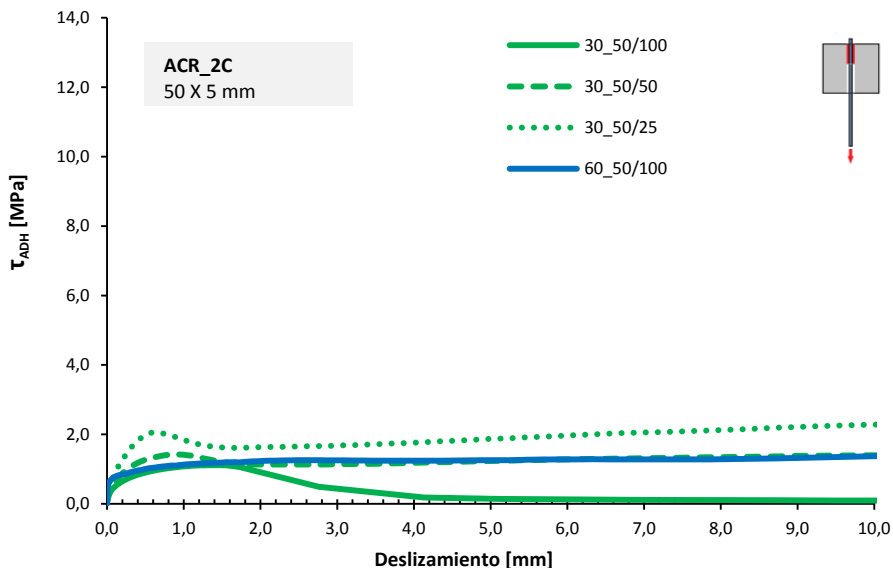


Fig. 6.3 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, acrílica.

En el caso de aplicar la resina de poliéster (véase Figura 6.4), se puede llegar a sextuplicar los valores de adherencia respecto al patrón en este caso. El modo de fallo de las probetas es siempre por *splitting* en niveles de deslizamiento relativamente cortos. Este fenómeno impide el análisis de la adherencia más allá de valores de deslizamiento pequeños (0.2 mm), con independencia de la resistencia del hormigón. El fenómeno de *splitting* es más acuciado para longitudes de adherencias mayores.

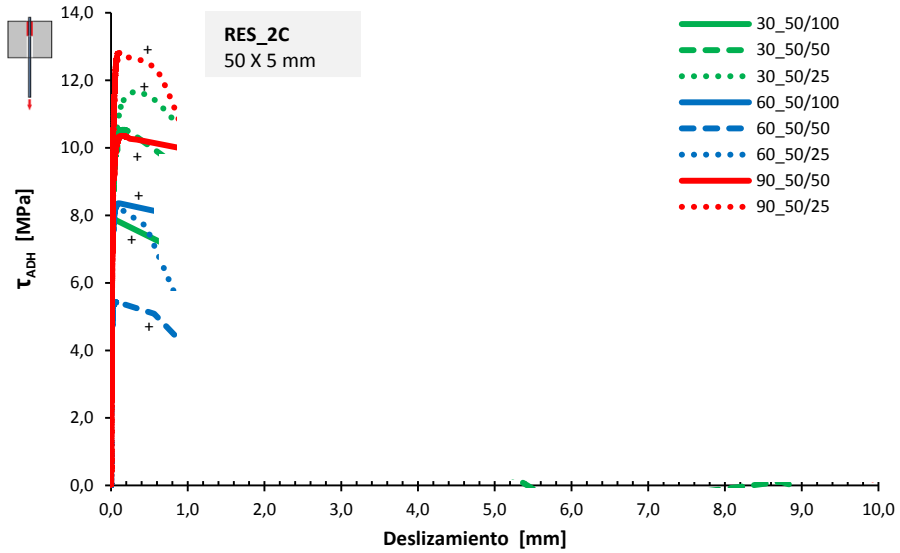


Fig. 6.4 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, resina poliéster (RES).

El tratamiento de la interfase con arenado mantiene en general un buen comportamiento, duplicando la tensión de adherencia con respecto al patrón y con independencia de la resistencia de hormigón y la longitud de adherencia. El modo de fallo es por deslizamiento salvo en dos casos (30_50/100 y 90_50/50), como se aprecia en la Figura 6.5.

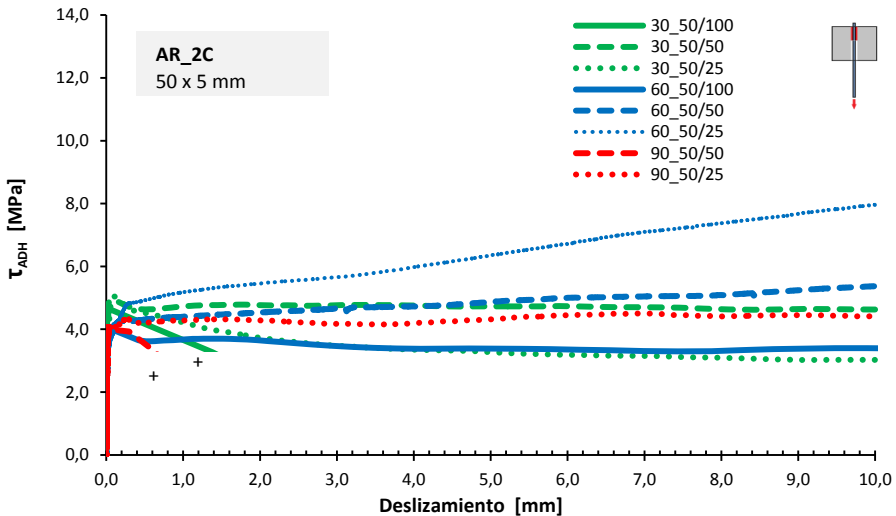


Fig. 6.5 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, arenado.

De este primer bloque de ensayos se deduce que el método tradicional de *pull-out* para barras de FRP, con las modificaciones realizadas, es adecuado a las probetas de perfil de GFRP de sección rectangular. En general cualquier longitud de adherencia sería válida para estudiar la relación adherencia/deslizamiento en la interfase GFRP-hormigón. No obstante, se decide excluir los 25 mm como longitud adherente, ya que existen dudas razonables de que una superficie de interfase de estudio de 50 x 25 mm es escasa y puede no ser representativa.

Por otra parte se excluye la longitud de adherencia de 100 mm, puesto que los valores de carga han llegado a los 60 kN en el caso del tratamiento superficial de resina, por lo que se ejerce demasiada tensión y se produce con frecuencia la rotura por *splitting* del hormigón.

En consecuencia se establece como longitud de adherencia de estudio 50 mm, puesto que son escasos los problemas de *splitting*.

El aumento de la resistencia del hormigón incrementa la capacidad adherente en las probetas patrón y pulidas.

Las roturas por *splitting* observadas y las esperables para aquellos tratamientos que *a posteriori* se utilicen y que incrementen la carga en el ensayo de *pull-out* derivando en tensiones de adherencia elevadas (10 – 12 MPa) no podrán ser analizadas en estas condiciones. Para evitar este tipo de roturas se proponen dos modos de actuación que serán analizadas en el apartado 6.1.4 del presente capítulo: una de ellas consiste en reducir la fuerza de arrancamiento mediante la disminución de la sección de GFRP a 25 x 5 mm; la otra consiste en la incorporación de fibras al hormigón.

6.1.3. -ANÁLISIS DEL TIPO TEXTURIZADO

Se muestran los cuatro tipos de texturizados que se han estudiado con respecto a una muestra patrón, tal y como se aprecia en la Figura 6.6.

El tipo de texturizado 3 arroja una rama ascendente en todo momento. La capacidad resistente se presenta a deslizamientos mayores que 5 mm. Este tipo de rotura permitiría una alta capacidad residual aunque manteniendo bajo nivel de resistencia a deslizamientos pequeños, siendo la rotura dúctil.

El comportamiento del texturizado tipo 4 presenta una rama ascendente con una resistencia al despegue y a tensión máxima elevadas. Una vez alcanzada la máxima capacidad resistente, tiene una rama descendente

moderada hasta los 3.2 mm de deslizamiento, hasta alcanzar el modo de fallo por *splitting*. La resistencia residual es baja.

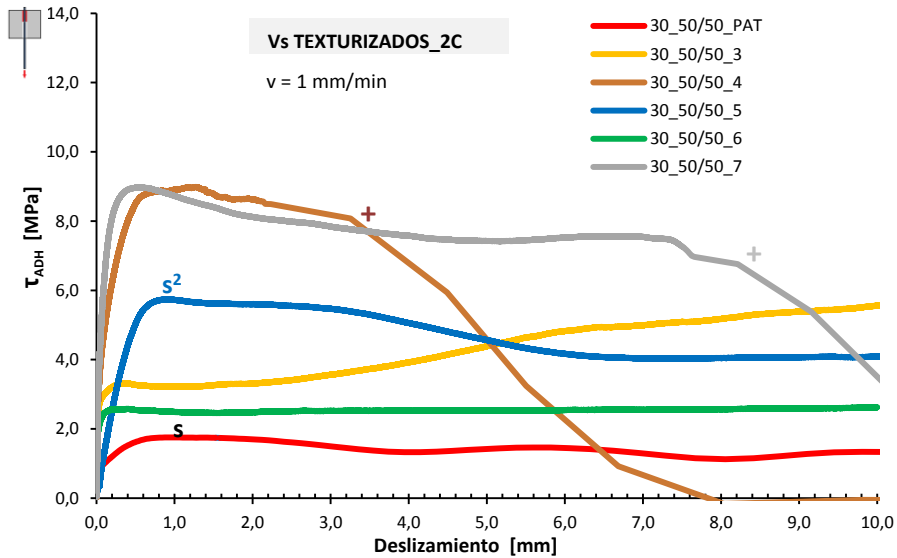


Fig. 6.6 Curvas τ/δ , modalidad 2C de los texturizados a seleccionar.

El tipo de texturizado 5, puesto que tiene una buena resistencia con un deslizamiento pequeño, posee una rama descendente moderada, siendo su modo de fallo por deslizamiento.

El comportamiento del texturizado tipo 6 es dúctil puesto que tiene una rama ascendente con una elevada pendiente. Su máxima capacidad resistente, una vez alcanzada, se mantiene prácticamente constante, siendo su modo de fallo por deslizamiento. Este tipo de texturizado presenta el inconveniente de la baja capacidad resistente frente a las demás tipologías de texturizados.

El comportamiento del texturizado 7 presenta una rama ascendente con una resistencia al despegue y a tensión máxima elevadas. Una vez alcanzada la máxima capacidad resistente, tiene una rama descendente moderada hasta los 7 mm de deslizamiento, hasta alcanzar el modo de fallo por *splitting*.

Se selecciona como referencia el texturizado tipo 7 para realizar los ensayos de *pull-out* con las otras variables de adhesión. Este tipo de

respuestas estructurales son interesantes ya que poseen una elevada capacidad resistente al despegue y elevadas tensiones tangenciales de adherencia. La rama descendente es moderada, proporcionando tensiones residuales de trabajo altas, de modo que cuando se produce el fallo ya se han alcanzado deslizamientos importantes.

Esta decisión se toma para la continuación del programa, pero no implica una clara postura a favor de un determinado tipo de texturizado. Su adecuación dependerá de la solución estructural general.

6.1.4.- DETERMINACIÓN DE LA SECCIÓN DEL PERFIL DE GFRP Y EL USO DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (HRF)

Para seleccionar qué sección del perfil de GFRP es la más adecuada para el tipo de ensayo a dos caras "2C", puesto que con secciones de 50 x 5 mm la fuerza de arrancamiento es elevada (60 – 80 kN) y da lugar modos de fallo por *splitting*. Por ello más adelante se muestran los ensayos realizados con una sección de GFRP de 25 x 5 mm, reduciendo pues la fuerza de arrancamiento y con ello el efecto de *splitting*.

Del mismo modo, con la incorporación de fibras metálicas al hormigón se realizan ensayos previos para estudiar la idoneidad de éstas respecto al retraso de la aparición del fenómeno de *splitting*, y la incorporación de sistemas de mejora de la adherencia, de acuerdo con lo expuesto en la Tabla 3.3 del capítulo III "Programa Experimental".

Los resultados se muestran en las Figuras 6.7 a 6.14. No hay diferencias mecánicas notables entre el hormigón convencional y el reforzado con fibras metálicas. No se aprecia un aumento de la capacidad mecánica adherente en hormigones de alta resistencia frente al convencional, del mismo modo que en el caso de los hormigones con fibras respecto a los que no las llevan, con algunas excepciones. Con la combinación del texturizado tipo 7 con arenado (TEX7+AR), no hay diferencias sustanciales. En la Tabla 6.2 se muestran los códigos y nomenclaturas de las probetas en los ensayos previos, para la selección del perfil de GFRP y uso de hormigón reforzado con fibra

Tabla. 6.2 Códigos y nomenclaturas de las probetas en los ensayos previos para la selección de la sección del perfil de GFRP y el uso de HRF.

Código color	f _c _MPa	Código líneas	Tratamiento superficial base	L _{adh} mm
■	30	continua	TEX7	50
		discontinua	No	
■	HRF-30	punteada	TEX7	
		continua	TEX7	
	90	discontinua	No	
		HRF-90	punteada	

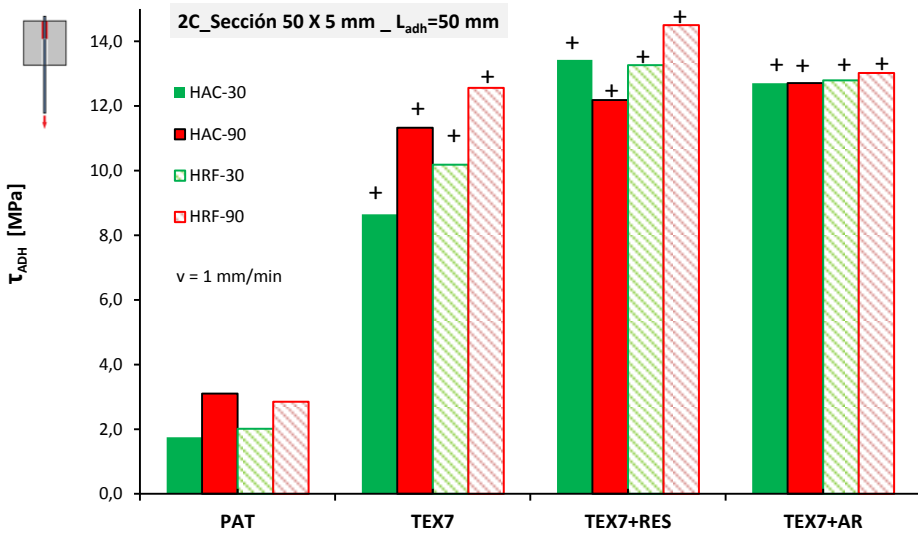


Fig. 6.7 Tensiones máximas de adherencia-tratamientos superficiales, modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5mm.

El texturizado con arenado (TEX7+AR) y el texturizado con resina (TEX7+RES) permiten alcanzar tensiones de adherencia entre 12 – 14 MPa, lo que supone un incremento del 15 % respecto del texturizado, pero no se consigue que desaparezca el fenómeno de *splitting* (véase Figura 6.7).

Las fibras introducen un ligero efecto de retardo, permitiendo un poco más de deslizamiento. Todas las probetas presentan el modo de fallo por *splitting*. El deslizamiento mejora en hormigones convencionales, en el caso del tratamiento de texturizado tipo 7, como se aprecia en la Figura 6.8.

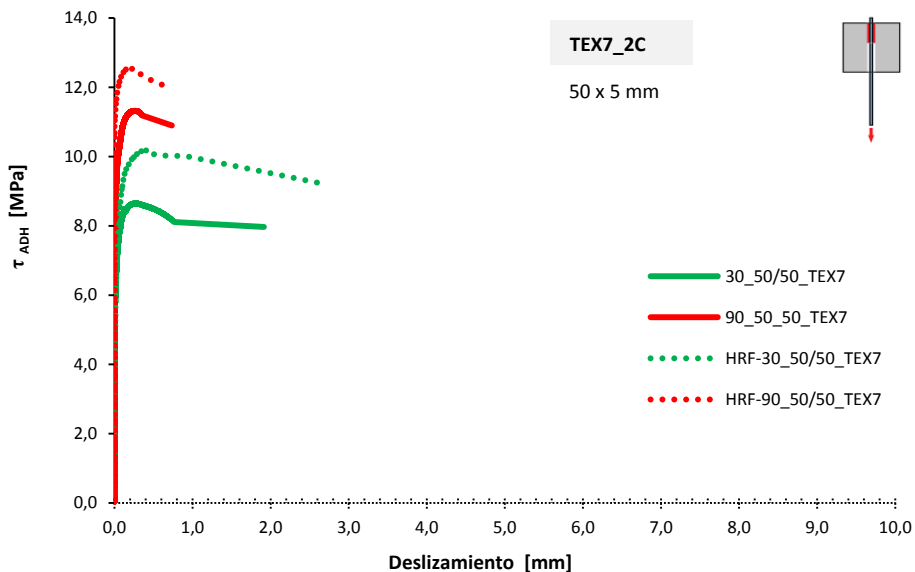


Fig. 6.8 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, texturizado 7.

Con el tratamiento de arenado a dos caras, 2C, no es significativa la mejora del deslizamiento o la adherencia, independientemente de la resistencia del hormigón o del refuerzo con fibras.

El *splitting* sigue estando de manifiesto. Se aprecia una notable mejoría en la capacidad mecánica adherente en las probetas cuya interfase está texturizada (tipo 7) en comparación con las que no poseen texturizado (No Text), tal y como se aprecia en la Figura 6.9.

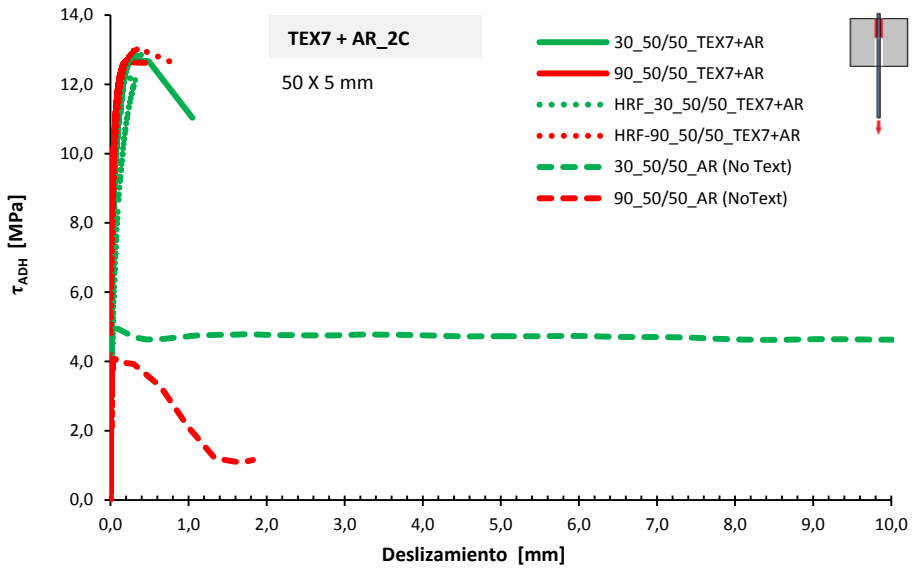


Fig. 6.9 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, texturizado 7+ arenado.

En la Figura 6.10 se aprecia el diagrama tensión de adherencia-deslizamiento de las probetas de GFRP con tratamiento superficial con texturizado 7 con resina, lo que muestra cómo el *splitting* sigue estando de manifiesto para desplazamientos inferiores a 1 mm. En estas condiciones se hace muy complicado el estudio para desplazamientos mayores, incluso en hormigones reforzados con fibras.

Los hormigones reforzados con fibras incrementan la capacidad adherente en 2 MPa (no es muy significativo). El texturizado incrementa la capacidad adherente un 10% frente a los no texturizados (No Text).

La presencia de fibras no evita la primera fisuración por *splitting*, pero permite un cierto control de la propagación de la fisura. Ello puede dar lugar a una dificultad en el análisis de resultados al no poderse garantizar un nivel de confinamiento completo y constante en todos los casos.

Como se menciona al inicio del apartado, se realizan ensayos con una disminución de la sección de la probeta de GFRP, con el fin de disminuir la fuerza de arrancamiento y en consecuencia eliminar el fenómeno de *splitting*, para así poder estudiar la relación τ/δ hasta desplazamientos del orden de 10 mm.

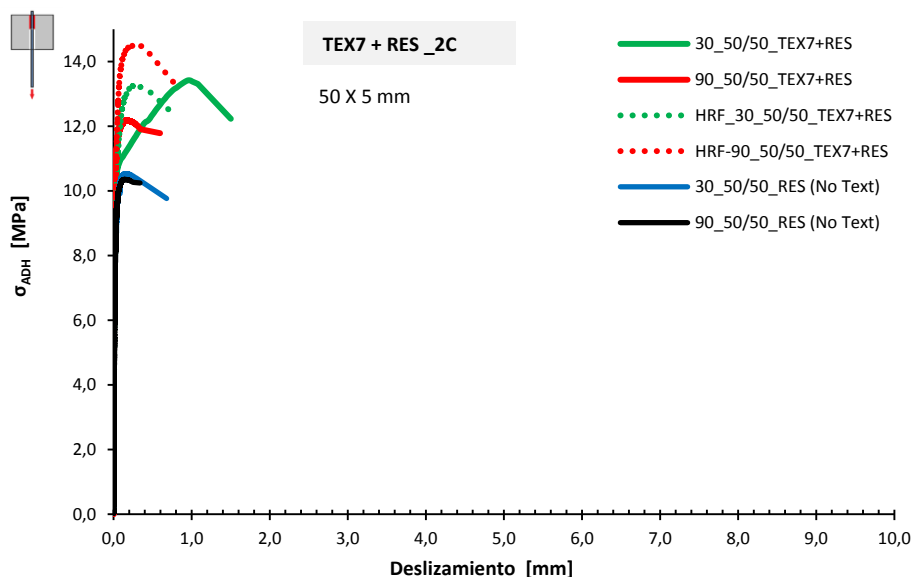


Fig. 6.10 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 50 x 5, texturizado 7+ resina.

La disminución de la sección de GFRP a 25 x 5 mm evita en gran medida el fenómeno de *splitting* en el hormigón, si bien aparecen nuevas formas de rotura para los combinados de texturizados con resinas o arenado. En este caso la superficie de contacto de la interfase es de 2 caras de 25 x 50 mm.

En la Figura 6.11 se muestra un diagrama de barras de las tensiones de adherencia en relación a los diferentes tratamientos superficiales aplicados a las probetas de GFRP.

El aumento de las capacidades mecánicas frente a las probetas patrón es evidente. La incorporación de 50 kg/m³ de fibras metálicas (Dramix RC 80/30 BP) no aumenta la tensión de adherencia en las probetas frente al hormigón convencional.

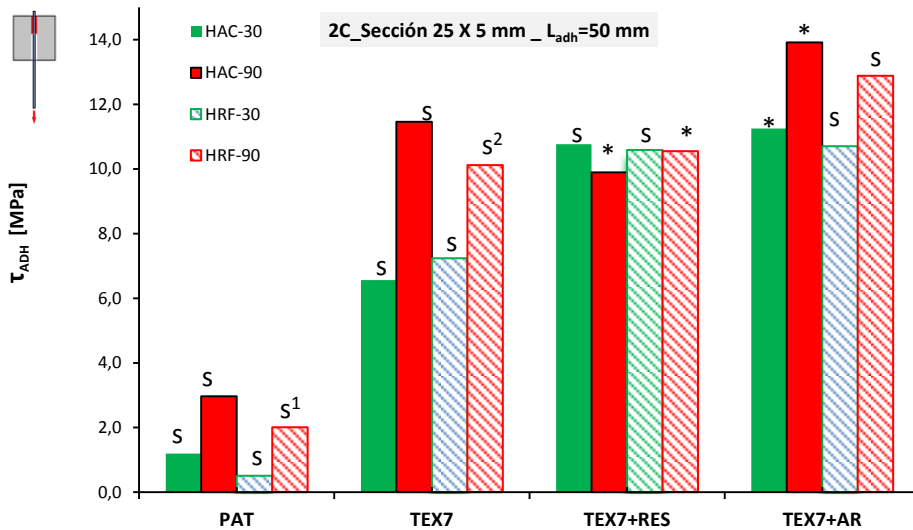


Fig. 6.11 Tensiones de adherencia-tratamientos superficiales, modalidad 2C, sección GFRP 25 x 5 mm.

En la mayoría de tratamientos superficiales el modo de fallo es por deslizamiento, pudiéndose estudiar bien la relación entre la adherencia y el deslizamiento hasta los 5 mm, como se aprecia en las Figuras 6.12, 6.13 y 6.14. Es muy importante llegar a los 5 mm de deslizamiento sin tener modos de fallo frágiles (*splitting*).

En la Figura 6.12, se muestran las respuestas de las probetas patrón frente al texturizado, constatándose un aumento de tensión adherente que con el texturizado llega a quintuplicar la del patrón. En todos los casos se aprecia claramente el deslizamiento de las probetas, independientemente del tipo de hormigón, no siendo necesario reforzarlo con fibras. Se obtienen mejores resultados de adherencia con el hormigón de mayor resistencia.

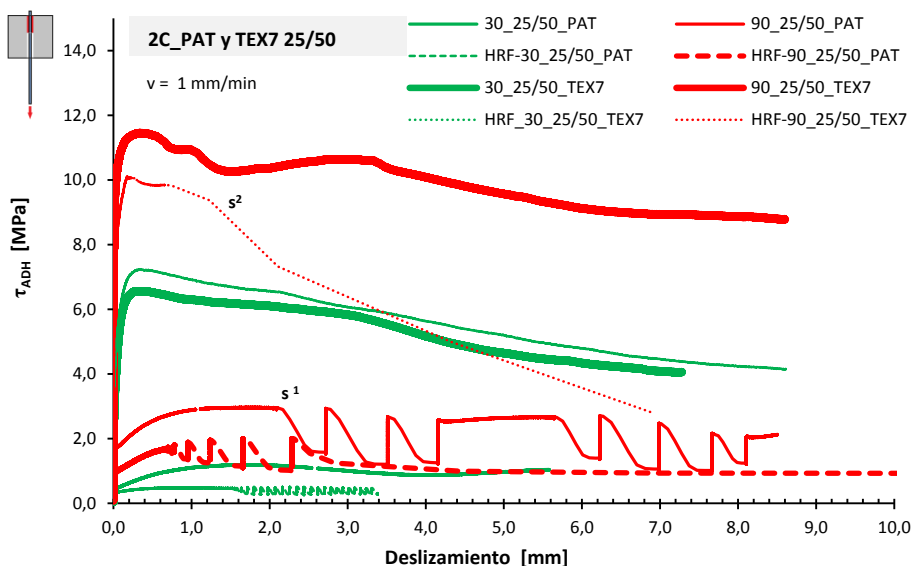


Fig. 6.12 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 25 x 5mm, patrón y texturizado.

En el caso de texturizados con resina aparecen roturas del GFRP, en la zona del texturizado, derivadas de la disminución de sección en la interfase en probetas de hormigones de alta resistencia, no sucediendo este modo de fallo con el hormigón convencional, tal y como se aprecia en la Figura 6.13.

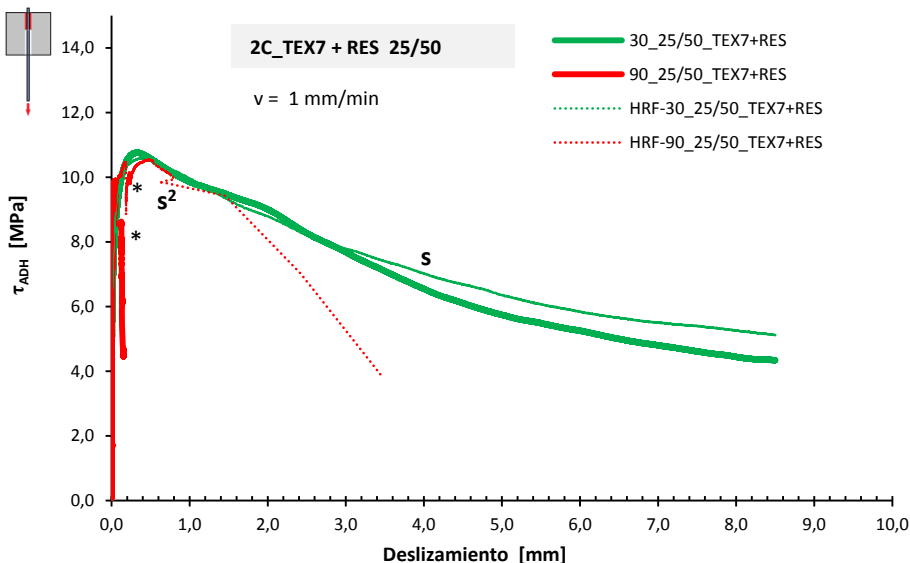


Fig. 6.13 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 25 x 5mm, texturizado + resina.

En el caso del tratamiento superficial texturizado con arenado, los hormigones sin fibras no evitan la rotura por *splitting*, como se aprecia en la figura 6.14.

Para el tratamiento a dos caras, 2C, es adecuado que la sección rectangular de GFRP sea de 25 x 5 mm, para evitar el fenómeno de *splitting*. Para este tipo de sección no es necesario utilizar hormigones reforzados con fibras ya que no existe *splitting*.

Aunque las capacidades mecánicas de adherencia aumentan ligeramente, con los hormigones de alta resistencia (HAR) se decide dejar esta variable para próximos estudios. Por lo tanto, la resistencia del hormigón será la convencional de 30 MPa en el resto de la presente Tesis Doctoral.

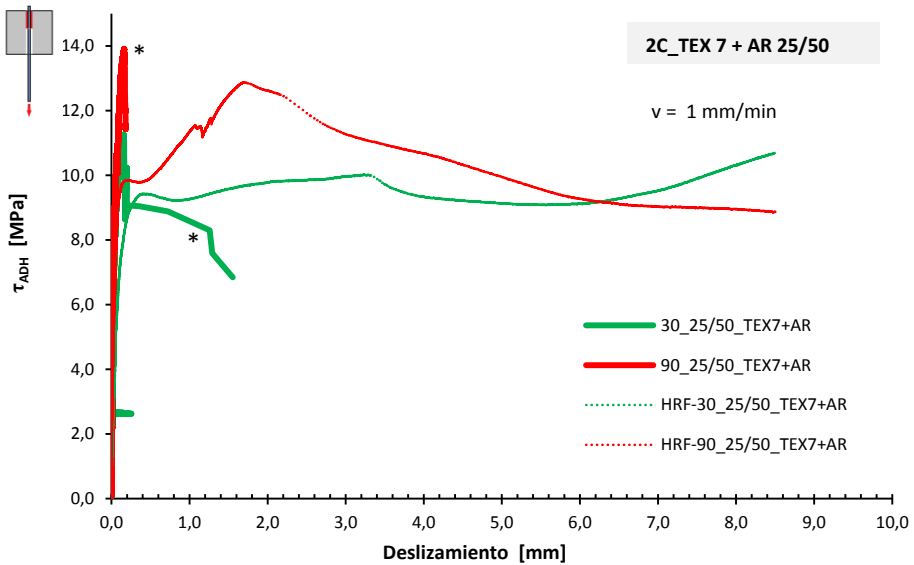


Fig. 6.14 Curvas τ/δ , modalidad 2C, sección GFRP 25 x 5mm, texturizado + arenado.

6.1.5.- DETERMINACIÓN DEL TIPO DE TORNILLERÍA, PAR DE APRIETE Y SU RECUBRIMIENTO

En previsión de los fenómenos de levantamiento de los refuerzos de GFRP se plantea controlar este riesgo mediante la utilización de tornillería. Para su incorporación se estudia el comportamiento adherente a una cara, 1C, de los laminados de GFRP. Se realizan ensayos para seleccionar la tipología de las fijaciones mecánicas (tornillería), par de apriete y recubrimientos. En

este caso la tipología de probeta es a una cara libre, con el fin de poder dar el par de apriete.

La metodología de ensayo en este caso será la indicada en el apartado 4.2.2.4 del capítulo IV (Metodología experimental) y en el apartado 5.4 del capítulo V (Metodología preparación de las interfases). De acuerdo en con lo expuesto en el programa experimental, en la Tabla 3.4 se analiza el efecto del par de apriete.

Como se aprecia en la Figura 6.15, las longitudes o tipo de remate del tornillo no modifican los valores de tensión de despegue, máxima y residual. Es por ello que en la segunda fase de los ensayos se utilizará en las probetas que lo requieran la tornillería con una longitud de 40 mm y, únicamente en los casos que se postese la tornillería, la terminación será con arandela (capucha).

El aumento de la métrica de 4 a 6 mm, junto con el grado 8.8 sí son factores determinantes en la resistencia final, llegando la rotura por desgarro del GFRP por la tornillería (véase 1* en Figura 6.16). Tener mayor recubrimiento entre la tornillería y la cara de hormigón elimina el riesgo de *splitting*, como se aprecia en la Figura 6.15.

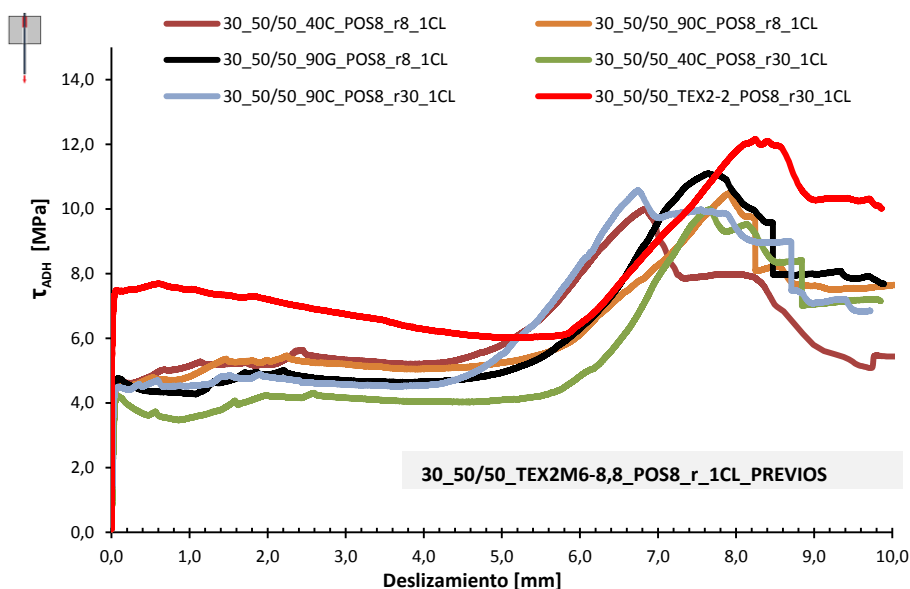


Fig. 6.15 Curvas τ/δ , fijación mecánica M6-8.8 con desplazamiento (tornillo en coliso), con varios tipos de remate en la tornillería*, par 8 Nm, modalidad 1CL.

*Nota: 40C tornillo de longitud 40 mm y remate con capucha; 90C tornillo de longitud 40 mm y remate con capucha; 90G tornillo de 90 mm de longitud y remate con gancho.

Los códigos de colores y líneas que quedan reflejados en las curvas τ - δ de las Figuras 6.15, 6.16 y 6.17 son aleatorios, no correspondiendo al criterio general mostrado en el resto del documento.

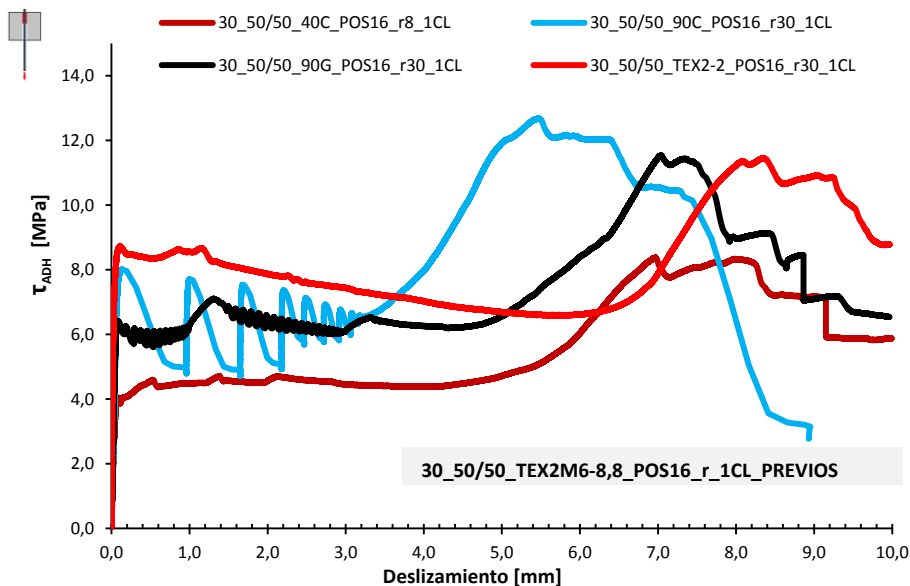


Fig. 6.16 Curvas τ/δ , fijación mecánica M6-8.8 con desplazamiento (tornillo en coliso), con varios tipos de remate en la tornillería*, par 16 Nm, modalidad 1CL.

El confinamiento que produce el empuje del tornillo en el hormigón aumenta el rozamiento en la interfase GFRP-hormigón, como se aprecia en las Figuras 6.15, 6.16 y 6.17. Aumentar el par de apriete en la tornillería implica un aumento de la tensión de adherencia inicial de 1-2 MPa, y además se aumenta la tensión de adherencia en los desplazamientos entre 1 y 5 mm (véase Figura 6.15).

Como se puede observar en la Figura 6.17, el confinamiento del hormigón mediante la tornillería permite mejorar la adherencia en el sistema de tornillería con desplazamiento permitido (curvas roja y negra), frente al sistema no confinado (gris). Así mismo se mejora el sistema tradicional de tornillería (azul), ya que confiere una rigidez mayor en su estado inicial de carga. Este dato es fundamental para una perfecta adherencia inicial.

El confinamiento es ideal para que funcione el sistema de tornillería con desplazamiento, pues la adherencia inicial es máxima con valores de 8 MPa sin apenas desplazamientos (0.1 mm). En la segunda fase del desplazamiento, entre 1 y 5 mm, la adherencia es constante mientras se desliza la tornillería por el coliso manteniendo prácticamente la tensión,

para posteriormente elevar su tensión hasta los 12 MPa (para 8 mm de deslizamiento) llegando al desgarro del perfil de GFRP, aumentando la rigidez frente a otras variables analizadas, como se aprecia en la Figura 6.17.

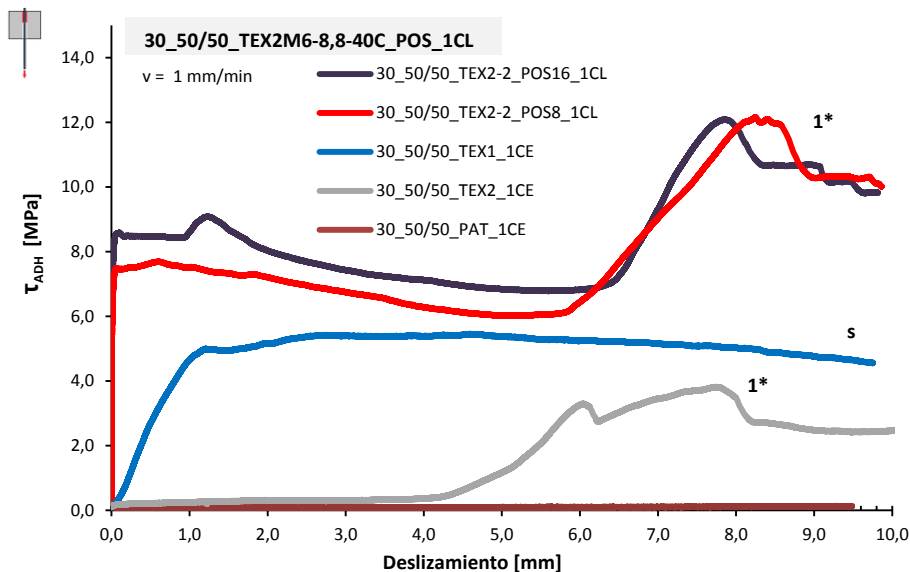


Fig. 6.17 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, comparativa POS/No POS.

Por tanto, el modelo propuesto 1CL se muestra adecuado y representa al modelo de viga híbrida que se pretende estudiar.

A modo de conclusiones de esta primera fase, y de cara a proseguir en la experimentación, se fijan los siguientes parámetros:

- Uso de un hormigón HAC-30 convencional sin fibras.
- La longitud de adherencia se fija en 50 mm.
- El texturizado de referencia será el tipo 7.
- Las secciones del perfil de GFRP, de 50 x 5 y 25 x 5 mm, confieren interfases de 50 x 50 y 25 x 50 mm, respectivamente, por cada cara.
- La tornillería con coliso y los pares de apriete de 8 y 16 Nm, con recubrimiento de 30 mm para garantizar el confinamiento activo del hormigón.

6.2.- ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA ADHERENCIA

6.2.1.- INTRODUCCIÓN

Se procede a presentar los resultados obtenidos, según se describe a continuación:

1.- En primer lugar se presentan los distintos modelos de comportamiento tensión adherente-deslizamiento que las diferentes variables inducen en el ensayo *pull-out*.

2.- Se identifican los parámetros resistentes con los que se pretende caracterizar las uniones entre el GFRP y el hormigón.

3.- Se presentan los resultados de los ensayos, para las variables estudiadas.

6.2.2.- MODELOS DE COMPORTAMIENTO

Los resultados obtenidos en los ensayos pueden clarificarse en ocho modelos de comportamiento adherencia-deslizamiento de las probetas híbridas, como se aprecia en las Figuras 6.18 y 6.19, y que a continuación se describen.

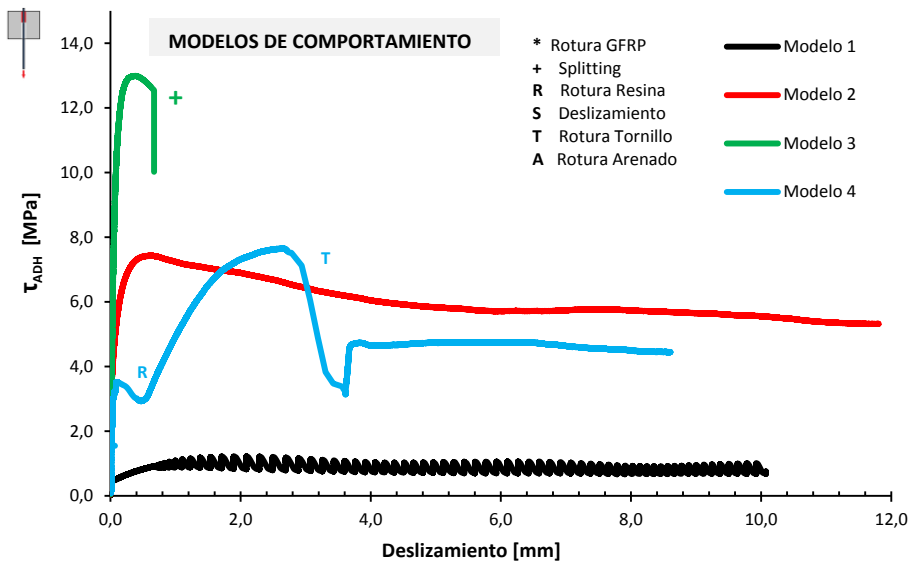


Fig. 6.18 Modelos 1 al 4 de comportamiento tensión de adherencia-deslizamiento.

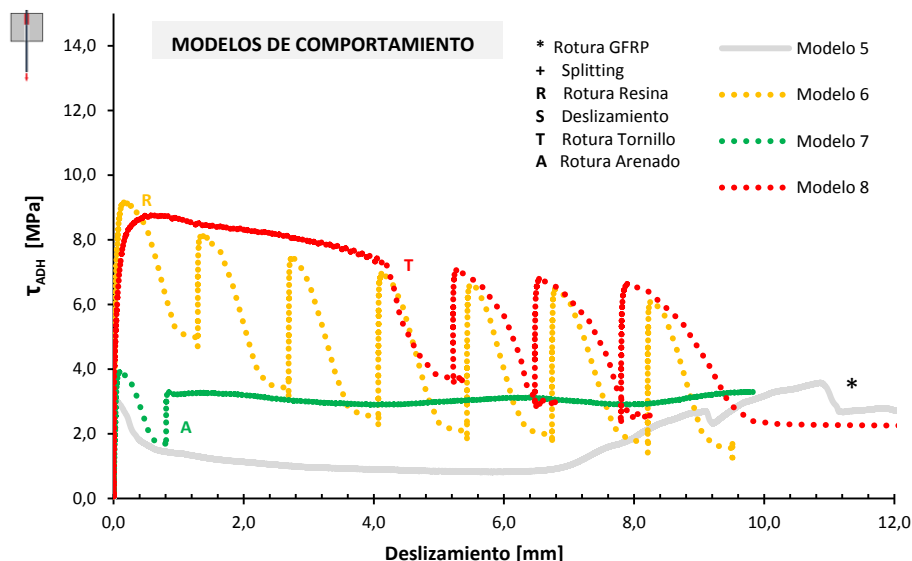


Fig. 6.19 Modelos 5 al 8 de comportamiento tensión de adherencia-deslizamiento ensayo pull-out.

El **modelo de comportamiento 1** presenta una rama ascendente inicial de elevada pendiente, con un primer tramo sin deslizamiento y un segundo tramo indicativo de valores de despegue bajos. Tras el despegue del material prosigue la rama ascendente con un incremento leve de la tensión de adherencia, hasta llegar a su valor máximo tensional, normalmente bajo. Alcanzado el valor máximo, la probeta desliza con pequeños saltos bruscos, hasta finalizar el ensayo, y su modo de fallo es por deslizamiento. Este modelo es habitual en los ensayos con las probetas patrón.

El **modelo de comportamiento 2**, típico de las probetas texturizadas por lo general aunque también depende de la modalidad de ensayo realizado, posee un valor de despegue medio tras una rama ascendente inicial de elevada pendiente, sin deslizamientos. Posteriormente sigue con una rama ascendente donde se encuentra la tensión pico, y continúa la rama ascendente hasta la tensión máxima. Después se inicia una rama descendente con pendiente moderada hasta finalizar el ensayo. Este modelo muestra una rotura dúctil y controlada.

El **modelo de comportamiento 3** se puede observar en probetas texturizadas combinadas con resina o arenado en las modalidades 2C y

1CA, posee un valor de despegue alto, posteriormente sigue con una rama ascendente donde se encuentra la tensión pico, y continúa la rama ascendente hasta la tensión máxima. A continuación se inicia una rama descendente brusca, derivada por un problema metodológico (*splitting*), por lo que no se puede evaluar la adherencia a partir de este momento. En estos casos, para poder estudiar la adherencia hasta niveles altos de deslizamiento, se debe reducir la sección del perfil de GFRP, reduciendo la superficie de contacto de la interfase.

El **modelo de comportamiento 4**, típico de probetas con tornillería fija, presenta un valor medio en el despegue seguido de una pequeña rama ascendente donde se encuentra la tensión pico. Le sigue una rama descendente de elevada pendiente con un valor post-pico menor al 5% de la tensión pico, producido generalmente por la rotura de la resina en la interfase. A continuación se observa una rama ascendente con elevada pendiente hasta llegar a la tensión máxima (no superando los 4 mm de deslizamiento), iniciando una caída brusca derivada por la rotura de los elementos mecánicos de fijación (tornillería); esta rama descendente de elevada pendiente deja un valor residual tensional un 50 % inferior al máximo. Posteriormente se aprecia un pequeño incremento de carga hasta que se estabiliza, deslizando hasta finalizar el ensayo.

En los casos donde la tornillería aplicada es la métrica M6 ésta no se rompe. Es la propia tornillería la que desgarrar el perfil de GFRP obteniendo una rama descendente moderada arrojando valores residuales cercanos a la tensión máxima. También se ha manifestado en este tipo de probetas un desconchamiento en el hormigón debido al empuje de la tornillería, por ello en la curva τ/δ se observa una vez alcanzada la tensión máxima una rama descendente más pronunciada con valores residuales más bajos; estos valores son mayores a las tensiones residuales proporcionadas por las probetas con tornillería métrica M4.

El **modelo de comportamiento 5**, típico de probetas con tornillería sin postesar con coliso, posee un valor de despegue medio. La rama ascendente finaliza con la tensión pico, que en este caso coincide con el valor de la tensión máxima, para posteriormente iniciarse la rama descendente, con pendiente pronunciada, que se estabiliza con un descenso del 50 % de la tensión pico. Tras estabilizarse, es el deslizamiento la tónica general derivada de la actuación de la tornillería desplazándose por el coliso. En el caso con la tornillería postesada los valores de adherencia aumentan considerablemente, y tras la tensión máxima la rama de descenso es suave y generalmente llega a estabilizarse.

De nuevo se inicia una rama ascendente moderada hasta alcanzar una tensión máxima, que se encuentra fuera del rango de deslizamiento aceptable (4 mm). Este tipo de tensiones a deslizamientos tan grandes no tienen sentido en el estudio de adherencia, pero garantiza una reserva resistente importante a deslizamientos elevados. Esta tensión se produce cuando el tornillo termina de deslizar por el coliso, para posteriormente fallar el material de forma brusca, generalmente por el desgarro laminar del GFRP producido por la tornillería o una microfisuración en el hormigón.

El **modelo de comportamiento 6**, típico de probetas con resina, confiere valores de despegue elevados seguidos de una tensión pico coincidiendo con la tensión máxima, con mínimos deslizamientos. Inmediatamente la rotura de la resina produce la caída de tensión brusca alrededor de un 50 % del valor máximo, seguida de variaciones bruscas en tensión /deslizamiento, derivada de la rotura parcial de la resina.

El **modelo de comportamiento 7**, típico de probetas tratadas únicamente con la superficie arenada en las modalidades 1CA y 1CE, presenta valores de despegue medios seguidos de una tensión pico coincidiendo con la tensión máxima, con mínimos deslizamientos. Inmediatamente la rotura de la resina del arenado produce la caída de tensión brusca alrededor de un 50 % del valor máximo, seguida de un importante aumento de tensión que se estabiliza por debajo del valor máximo, con un deslizamiento progresivo hasta el la finalización del ensayo.

El **modelo de comportamiento 8**, se puede observar en probetas con texturizado en la modalidad 1CA y algunas probetas con tornillería, arroja valores elevados de despegue, presenta una rama ascendente con valores pico elevados y continúa con una rama ascendente en la que se encuentra el valor máximo, con deslizamiento menores a 1 milímetro.

Le sigue una rama descendente muy suave, prácticamente horizontal, con deslizamiento entre 2 y 4 mm, hasta una caída tensional brusca debida a la rotura de la tornillería o bien, en su caso, de los resaltes del texturizado en la zona inicial, generando variaciones bruscas en la relación tensión adherente-deslizamiento.

6.2.3.- IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADHERENTES

A la vista de los distintos modelos de comportamiento observados, los parámetros utilizados para caracterizar el comportamiento adherente de las probetas híbridas son las tensiones de adherencia de despegue, pico, post-pico, máxima y la tensión residual, tal y como se aprecia en la Figura 6.20. Todas estas tensiones llevan asociados un deslizamiento. Encontrar

dichos parámetros no ha sido tarea fácil ya que no se encuentran reflejados en las publicaciones científicas como tales. Así, han sido planteados desde la perspectiva de un razonamiento lógico atendiendo a aspectos estructurales, tomando como referencia criterios establecidos en otros contextos como el diagrama tensión-deformación del acero o los ensayos de caracterización de hormigones con fibras.

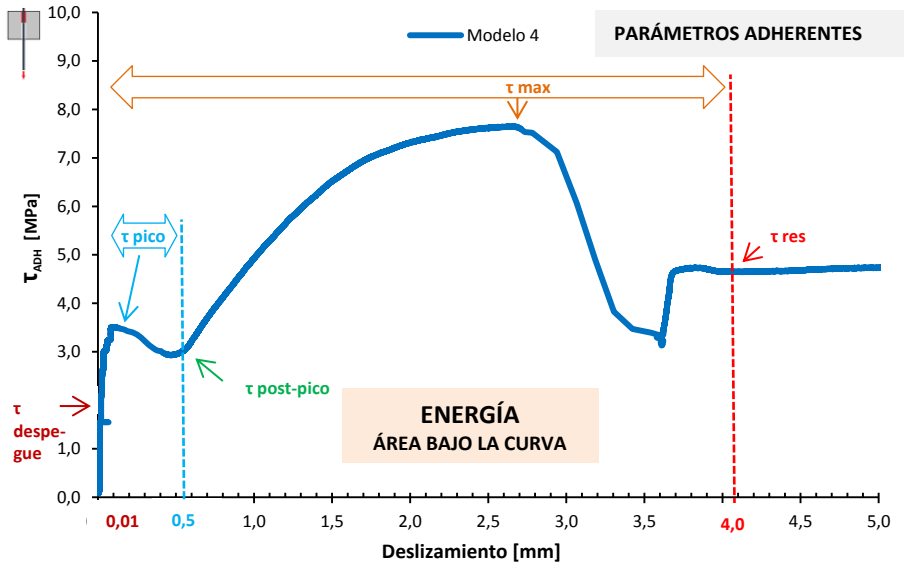


Fig. 6.20 Parámetros de tensión de adherencia-deslizamiento en el ensayo de pull-out.

La **tensión de despegue** se ha definido como la máxima tensión adherente alcanzada antes de llegar a un deslizamiento de 0.01mm, siendo este valor similar al fijado para el caso de barras de acero en ensayos de pull-out.

La **tensión pico** es la que está asociada al mayor valor tensional alcanzando hasta un deslizamiento de 0.5 mm. Este valor se da en la rama ascendente una vez producido el despegue y que oscila habitualmente entre deslizamientos de 0.3 y 0.5 mm.

La **tensión mínima post-pico**, que únicamente se encuentra en los modos de comportamiento 4, 6 y 7, es el valor mínimo de tensión que se encuentra inmediatamente después del valor pico. A partir de la tensión post-pico, se inicia otra rama ascendente hasta encontrarse con la tensión máxima.

La **tensión máxima** es el máximo valor tensional que se encuentre, asociado a un deslizamiento máximo de 4 mm. Se toma este valor,

considerando que los valores máximos de tensión adherente en ensayos de vigas híbridas se producen con unos valores de deslizamiento entre 2 y 4 mm (Fam y Honickman, 2010; Neagoe, 2014).

Finalmente, el comportamiento de las probetas con sistemas de fijación de tornillería fija y con desplazamiento admite deslizamientos mayores que 4 mm, dotando de modos de fallo dúctiles a la estructura. Es por ello que se plantea la identificación de la **tensión residual** para deslizamientos de 4 mm.

Complementariamente a los diferentes valores de tensión adherente, la **energía de rotura**, representativa de la ductilidad, se determina a partir de la curva tensión adherente-deslizamiento como el área bajo la curva hasta un valor de deslizamiento de 4 mm.

6.2.4.- PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

En las figuras representadas en este apartado se muestran las curvas τ/δ correspondientes cada una de ellas a la curva que más se aproxima a la media de las tres rotas para cada tipología de probeta. A continuación se presentan las Tablas con los datos de caracterización de la adherencia de dichas figuras, con sus valores medios y la desviación estándar de los distintos parámetros.

Las curvas tensión de adherencia-deslizamiento representadas se clasifican en **tres grupos** diferenciados por el tipo de confinamiento del hormigón:

- **GRUPO 1.- Contacto directo del hormigón a dos caras, 2C:**
Influencia de las variables de adherencia resina (RES), arenado (AR), texturizado (TEX) y una combinación de estos (MIX).
 - **1.1.-** Sección de contacto por cara: 50 x 50 mm, en alguna variable se produce un problema de *splitting*, y se procede a reducir la sección de contacto.
 - **1.2.-** Sección de contacto por cara: 25 x 50 mm.
- **GRUPO 2.- Contacto directo del hormigón a una cara, 1C,** se exponen los resultados comparando los estados de confinamiento pasivo del hormigón en la cara opuesta a la tratada superficialmente: 1CA con confinamiento y 1CE sin confinamiento.

Se desarrollan tres subgrupos de ensayo:

- **SUBGRUPO 2.1.-** Influencia de las variables de adherencia resina (RES), arenado (AR), texturizado (TEX) y una combinación de estos (MIX).

Vistos los problemas de despegue en el método 1CE, se procede en la fase 2.2 a la utilización de tornillería para evitar el despegue.

- **SUBGRUPO 2.2.-** Influencia de las fijaciones mecánicas sin desplazamiento de acero métrica M4 (grado 6.6) y métrica M6 (grado 8.8).

La tornillería M4 en los métodos 1CA y 1CE se rompe por cortante. Del mismo modo siguen produciéndose problemas de despegue en la modalidad 1CE.

La utilización de tornillería de mayor diámetro y calidad M6 y grado 8.8 puede evitar el despegue y rotura de la tornillería.

- **SUBGRUPO 2.3.-** Influencia de las fijaciones mecánicas con desplazamiento con métrica M4 y M6. Se introduce la tornillería con coliso con métrica M4 y grado 6.6, para comprobar el efecto del coliso, evitando así la rotura prematura del tornillo.

La rotura de la tornillería M4 con coliso en el caso de la modalidad 1CE se produce a deslizamientos mayores que 8 mm, dejando de constituir un problema. En la modalidad 1CA los valores tensionales son bajos y la tornillería de mayor diámetro produce la rotura y desconche del hormigón en el extremo no cargado por falta de recubrimiento.

La tornillería M6 con desplazamiento (coliso) aporta valores buenos, no obstante hay que mejorarlos, para ello en los ensayos del grupo 3 se introduce un concepto diferente descrito a continuación.

- **GRUPO 3.-** Contacto directo del hormigón a una cara libre, 1CL. Influencia del par de apriete y postesado de las fijaciones mecánicas con desplazamiento.

Hasta el momento la tornillería estaba fijada con un par de apriete al perfil de GFRP. Se aplica dos tipos de par de apriete (8 y 16 Nm) a la tornillería métrica M6 (grado 8.8) y la aportación consiste en realizar el par de apriete para que el tornillo quede postesando el hormigón, confinando éste al GFRP. Se combinan además con las variables de adherencia resina (RES), arenado (AR), texturizado (TEX7) y una combinación de estos (MIX).

Las probetas se identifican de la siguiente manera:

Ejemplo: 30_50/50_TEX2-M6-8.8_TEX7+RES_POS8_1CL_R1

- **30** Corresponde a la resistencia (f_c) del hormigón en MPa.
- **50** Es la anchura de la **sección** del perfil de **GFRP**, puede ser de 50 o 25 mm.
- **50** Es la longitud de adherencia (L_{adh}) del perfil de GFRP, se han realizado pruebas con 25 y 50 mm.
- **TEX2** Corresponde al tipo de **fijación mecánica**, puede ser TEX1 o TEX2.
 - En los casos en que aparezcan las siguientes abreviaturas (RES, AR, TEX1, TEX2, TEX7, MIX: combinaciones) están representados los **tratamientos superficiales**.
- **M6-8,8 Métrica** de la tornillería y **grado**, se utilizan M4 (6.6) y M6 (8.8).
- En aquellos casos que se aplica el postesado en la tornillería, el código **TEX2-2** equivale a "**TEX2-M6-8.8-40C**".
- **TEX7+RES** Tipo de variable de adherencia combinada con resina u otras variables.
- **POS8 Postesado** de la **tornillería** se han aplicado dos tipos de par de apriete: 8 y 16 Nm.

- **1CL Modalidad de ensayo** de *pull-out* se utilizan 4: 2C, 1CA, 1CE, 1CL.
- R1 Rotura del ensayo nº 1; se realizan tres ensayos por tipología de probeta.

Las curvas de tensión de adherencia-deslizamiento, llevan asociados un color determinado definidos a continuación:

- El color **marrón** representa la probeta **patrón** (PAT).
- El color **calabaza** representa la probeta con **resina** (RES).
- El color **azul** representa la probeta con **arenado** (AR).
- El color **rojo** representa la probeta con **TEX** (1,2 o 7), depende en el grupo de estudio en el cual se presente.
- El color **negro** representa la probeta combinada con **TEX7 +RES** y en los grupos asociados a **TEX1 o TEX2 + RES**.
- El color **verde** representa la probeta combinada con **TEX7 + AR** y en los grupos asociados a **TEX1 o TEX2 + AR**.

Las probetas en los casos que se les aplica un par 16 Nm aparecen representadas con una línea de puntos a diferencia del par 8 Nm.

6.2.4.1.- CONTACTO DIRECTO DEL HORMIGÓN A DOS CARAS, 2C

Como se observa en la Figura 6.21, cualquier tratamiento del perfil mejora el comportamiento respecto al patrón tanto en la resina (RES), arenado (AR) o texturizado (TEX7). Si bien los valores de despegue son similares, la tensión pico varía entre 6 y 9 MPa, siendo el valor más alto el correspondiente al caso de la resina (RES), siguiendo el modelo de comportamiento tipo 3.

La resina ofrece valores máximos altos, pero con un comportamiento frágil, inadecuado, siguiendo el modelo de comportamiento tipo 7.

El texturizado (TEX7) y arenado (AR) presenta valores tensionales medios. El modo de fallo es dúctil, con rotura por deslizamiento hasta el final del ensayo, siguiendo el modelo de comportamiento tipo 2.

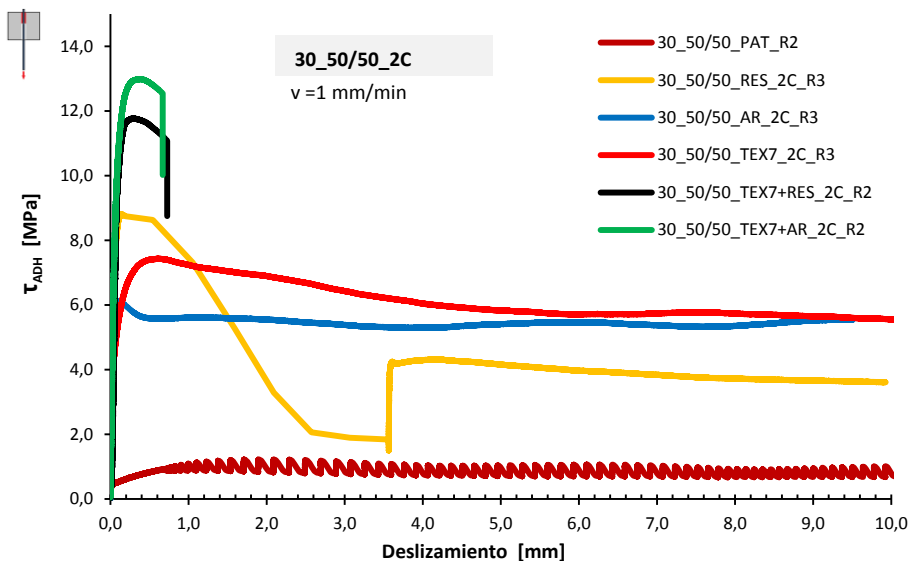


Fig. 6.21 Curvas τ/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm.

Las combinaciones de texturizado con resina y arenado aumentan considerablemente la capacidad adherente (véase Figura 6.21 y Tabla 6.3), si bien la elevada tensión hace que el hormigón se desconche por *splitting*, por lo que producido éste no se puede seguir cuantificando el comportamiento adherente ya que existe un problema metodológico. Para soslayar este problema, hay dos opciones: aumentar el recubrimiento de hormigón, dando lugar a una probeta muy pesada e inmanejable, o disminuir la superficie de la interfase en la probeta de GFRP.

Tal y como se muestra en la Figura 6.22 las probetas patrón presentan una rotura en la interfase GFRP-hormigón, y en las probetas con resina o arenadas se manifiesta el fallo en la interfase GFRP-resina o arenado. Cuando se aplica el texturizado tipo 7 el modo de fallo se produce por corte del hormigón introducido entre los resaltes del perfil y también por la rotura parcial de los resaltes del GFRP a cortante. En el texturizado tipo 7 + RES se produce una rotura combinada parcial en la interfase resina-hormigón y mayoritariamente por la interfase resina-GFRP.

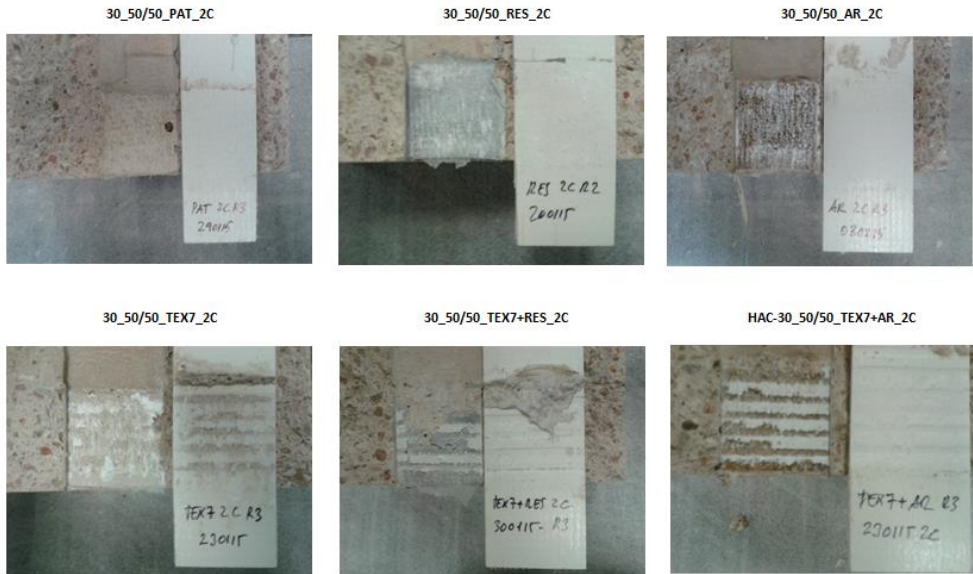


Fig. 6.22 Roturas interfase GFRP-hormigón, modalidad 2C, varios acabados, sección 50 x 5 mm.

Tabla 6.3 Parámetros de caracterización de la adherencia de la modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm.

Especímen	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_PAT_2C	0,54	1,08	0,50	1,22	1,26	1,39	1,59	0,92	20.322
30_50/50_RES_2C	3,29	9,21	0,19	1,74	3,54	9,21	0,19	5,13	140.370
30_50/50_AR_2C	Media 3,38	5,94	0,33	2,98	2,09	5,96	0,52	4,58	67.353
30_50/50_TES7_2C	4,00	8,00	0,38	7,43	0,62	8,01	0,42	5,82	118.853
30_50/50_TEX7+RES_2C	3,52	11,81	0,35	-	-	12,17	0,50	-	45.994
30_50/50_TEX7+AR_2C	3,25	11,53	0,38	-	-	11,78	0,64	-	44.128
30_50/50_PAT_2C	0,31	0,47	0,01	-	-	0,31	0,49	0,34	136
30_50/50_RES_2C	1,33	0,37	0,05	-	-	0,37	0,05	0,82	29.588
30_50/50_AR_2C	Desviación Estándar 1,37	1,22	0,15	3,73	1,46	1,21	0,47	0,82	59.886
30_50/50_TES7_2C	1,68	0,63	0,11	-	-	0,61	0,18	0,32	49.411
30_50/50_TEX7+RES_2C	3,24	0,53	0,13	-	-	1,11	0,39	-	30.459
30_50/50_TEX7+AR_2C	1,40	2,28	0,12	-	-	1,85	0,55	-	18.829

En la Figura 6.23 se muestran los modelos de comportamiento de las probetas de GFRP de 25 x 5 mm de sección e interfase 25 x 50 mm por cara en contacto con el hormigón, siendo similar para las variables arenado, texturizado y resina. Cuantitativamente las tensiones son similares salvo en el caso de la resina, que es 3 MPa mayor.

El estado tensional es similar en valores pico y máximos. Sin embargo el comportamiento es dúctil. Este comportamiento de deslizamiento hasta la finalización del ensayo es debido a los valores de fuerza empleados en el ensayo, que son del orden de la mitad que los del ensayo con probetas de sección 25 x 5 mm. El modelo de comportamiento es del tipo 2, salvo en el caso de la resina que presenta un comportamiento según el modelo tipo 7; en este caso se produce rotura frágil, si bien posteriormente se recupera la adherencia.

Las probetas texturizadas combinadas con resina y arenado alcanzan unos valores máximos similares (véase Tabla 6.4), con un modelo de comportamiento similar al modelo 2.

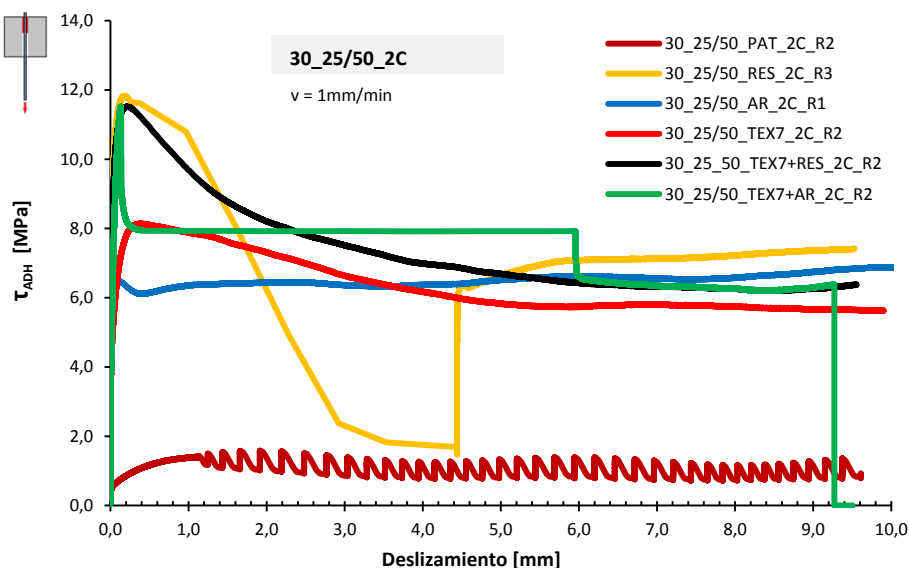


Fig. 6.23 Curvas t/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm.

El comportamiento de las probetas cuya sección del perfil es 25 x 5 mm es similar al de las probetas con sección 50 x 5 mm, con la única excepción en el texturizado con resina donde mayoritariamente la rotura se produce en la interfase resina-hormigón (véase Figura 6.24).

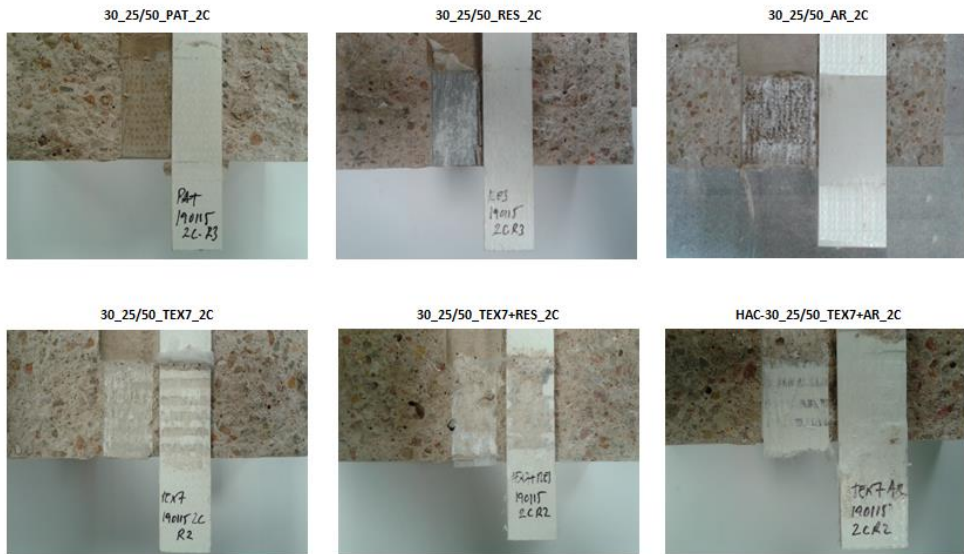


Fig. 6.24 Roturas interfase GFRP-hormigón, modalidad 2C, varios acabados, sección 25 x 5 mm.

Tabla 6.4 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm.

Espécimen	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post- pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]	
30_25/50_PAT_2C	0,42	1,03	0,50	-	-	1,40	1,61	0,87	18.351	
30_25/50_RES_2C	6,55	11,33	0,44	-	-	11,34	0,44	1,56	68.788	
30_25/50_AR_2C	Media	6,47	0,42	-	-	6,50	0,55	6,13	74.414	
30_25/50_TEX7_2C		7,79	0,37	-	-	7,79	0,37	6,28	85.567	
30_25/50_TEX7+RES_2C		11,39	0,27	-	-	11,39	0,27	6,60	105.145	
30_25/50_TEX7+AR_2C	3,93	12,33	0,27	-	-	12,33	0,27	6,30	77.379	
30_25/50_PAT_2C	Desviación Estándar	0,04	0,15	0,00	-	-	0,19	0,39	0,24	8.900
30_25/50_RES_2C		1,68	0,56	0,47	-	-	0,59	0,47	0,91	25.623
30_25/50_AR_2C		1,03	0,55	0,56	-	-	0,50	0,79	0,33	3.101
30_25/50_TEX7_2C		1,03	1,09	0,05	-	-	1,09	0,05	1,16	11.830
30_25/50_TEX7+RES_2C		1,51	0,58	0,05	-	-	0,58	0,05	0,37	2.227
30_25/50_TEX7+AR_2C		0,81	0,96	0,13	-	-	0,96	0,13	7,04	65.420

6.2.4.2.- CONTACTO DIRECTO DEL HORMIGÓN A UNA CARA, 1C

6.2.4.2.1.- SUBGRUPO 2.1.-Influencia de las variables de adherencia

El confinamiento del perfil de GFRP por el hormigón influye notablemente en el comportamiento adherente, como se aprecia en la Figura 6.25: la presión pasiva del hormigón evita el despegue prematuro del GFRP, y confiere a la estructura híbrida una mejora sustancial en todos los parámetros establecidos (véase Figura 6.25).

En la Figura 6.25 se observa la mejora sustancial entre el arenado (AR) y la resina (RES), siendo esta última a la que le corresponde una tensión máxima y de despegue mayores. Posteriormente ambas sufren un colapso prematuro, con caídas de tensión del orden del 50 % de su valor máximo antes de que se alcance un deslizamiento de 1mm; cualquier comportamiento posterior no es aceptable en estos modelos de comportamiento, 7 y 6, respectivamente, aunque siguen con un deslizamiento y tensión residual irregular hasta finalizar el ensayo.

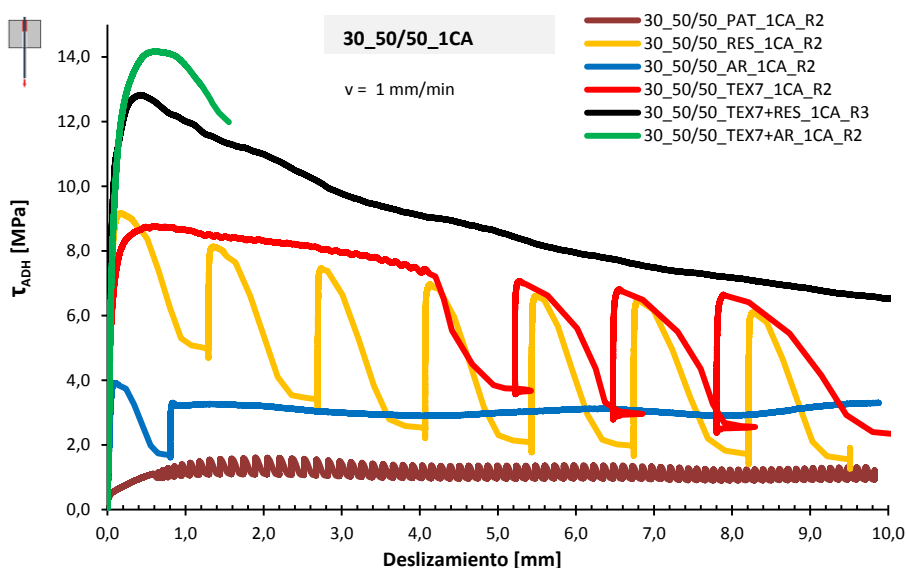


Fig. 6.25 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, texturizado, GFRP sección 50 x 5 mm.

El texturizado (TEX7) mejora el estado tensional hasta los 4 milímetros de deslizamiento, frente al arenado y la resina, y posteriormente presenta irregularidades tensionales no deseadas derivadas de la rotura de los

resaltes del mecanizado, presentando una respuesta de acuerdo con el modelo de comportamiento 8.

Las combinaciones de texturizado con resina (TEX7+RES) o arenado (TEX7+AR) consiguen aumentar en un 60% la capacidad máxima a rasante, pero el comportamiento de la combinación con arenado (modelo 3) produce una rotura por *splitting* no deseable, probablemente por el exceso de tensión en la zona. En cuanto a la combinación con la resina el fallo es dúctil, de acuerdo con el modelo de comportamiento tipo 2.

Con independencia de cualquier variable de adherencia, si no existe confinamiento se produce un despegue del perfil de GFRP y las tensiones de adherencia son mínimas, con modelos de comportamiento tipo 5, tal y como se aprecia en la Figura 6.26.

En todos estos casos es evidente que el despegue condiciona el comportamiento. El perfil de GFRP pierde adherencia con un nivel de carga bajo y poco deslizamiento y nunca se recupera.

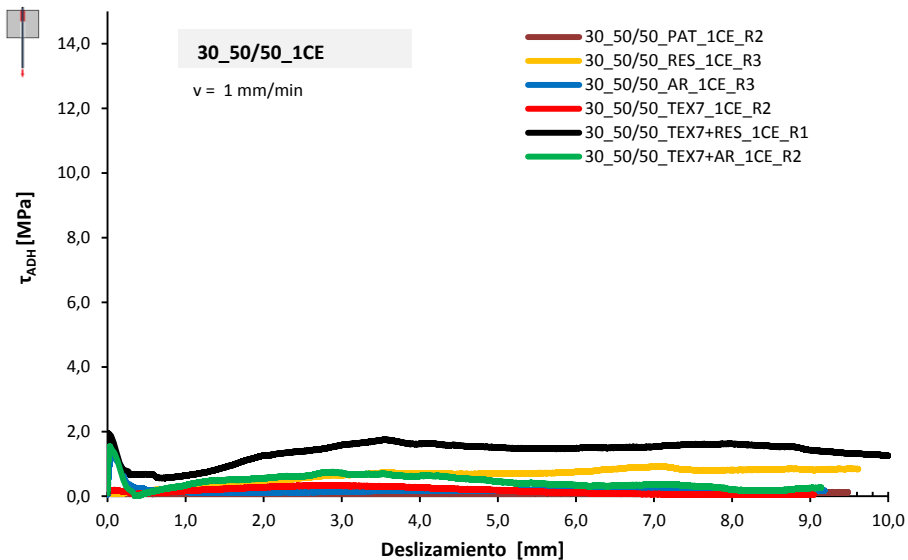


Fig. 6.26 Curvas τ/δ , modalidad ICE, texturizado, GFRP sección 50 x 5 mm.

A continuación, las Tablas 6.5 y 6.6 presentan los valores de los parámetros tensionales en los perfiles de GFRP confinados y sin confinar.

Tabla 6.5 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CA, varios acabados y texturizados, GFRP interfase 50 x 50 mm.

Espécimen	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post- pico [MPa]	δ_{τ} post- pico [mm]	τ máx [MPa]	δ_{τ} máx [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_PAT_1CA_	0,51	1,08	0,49	-	-	1,37	1,17	0,92	12.886
30_50/50_RES_1CA	2,18	9,32	0,14	-	-	9,32	0,14	2,36	69.212
30_50/50_AR_1CA	1,19	3,73	0,23	-	-	3,85	0,71	2,81	35.082
30_50/50_TEX7_1CA	2,60	8,00	0,50	-	-	8,34	0,79	5,06	85.991
30_50/50_TEX7+RES_1CA	4,79	12,25	0,45	-	-	12,28	0,50	9,19	127.717
30_50/50_TEX7+AR_1CA	2,36	14,05	0,50	-	-	14,40	0,77	-	74.512
30_50/50_PAT_1CA_	0,58	0,43	0,01	-	-	0,40	0,52	0,47	5.656
30_50/50_RES_1CA	1,20	0,95	0,09	-	-	0,95	0,09	1,00	21.638
30_50/50_AR_1CA	0,26	0,92	0,24	-	-	0,73	1,08	0,11	1.320
30_50/50_TEX7_1CA	2,05	1,75	0,00	-	-	1,38	0,28	2,52	13.734
30_50/50_TEX7+RES_1CA	2,41	1,13	0,04	-	-	1,15	0,13	1,59	13.777
30_50/50_TEX7+AR_1CA	0,81	0,66	0,00	-	-	0,69	0,11	-	45.910

Tabla 6.6 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CE, texturizado, GFRP interfase 50 x 50 mm.

Espécimen	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post- pico [MPa]	δ_{τ} post- pico [mm]	τ máx [MPa]	δ_{τ} máx [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_PAT_1CE	0,09	0,07	0,18	-	-	0,09	0,14	0,06	523
30_50/50_RES_1CE	1,85	1,89	0,17	-	-	1,89	0,17	0,76	6.500
30_50/50_AR_1CE	0,77	1,33	0,03	-	-	1,33	0,03	0,25	2.930
30_50/50_TEX7_1CE	0,35	0,44	0,21	-	-	0,55	2,17	0,25	2.313
30_50/50_TEX7+RES_1CE	1,92	1,98	0,01	-	-	1,98	0,01	0,92	7.849
30_50/50_TEX7+AR_1CE	1,15	1,88	0,18	0,26	0,38	1,92	0,90	1,14	11.130
30_50/50_PAT_1CE	0,01	0,05	0,27	-	-	0,03	0,19	0,04	310
30_50/50_RES_1CE	1,55	1,51	0,28	-	-	1,51	0,28	0,45	3.183
30_50/50_AR_1CE	0,18	0,24	0,02	-	-	0,24	0,02	0,07	1.208
30_50/50_TEX7_1CE	0,34	0,36	0,26	-	-	0,28	1,87	0,18	1.638
30_50/50_TEX7+RES_1CE	0,56	0,47	0,01	-	-	0,47	0,01	0,66	4.222
30_50/50_TEX7+AR_1CE	0,69	0,68	0,28	0,33	0,04	0,64	1,53	0,45	4.929

Tal y como se presenta en la Figura 6.27, en las roturas de las interfases de diversos acabados en el GFRP en la modalidad 1CA se observa cómo las probetas sin texturizar presentan un modo de fallo de adherencia en la interfase entre el GFRP-hormigón en el caso de la probeta patrón, y en los casos con resina y arenado la rotura se produce en la interfase GFRP-resina o arenado. Se observa que en el caso de la probeta con resina existe un 20 % de la superficie de la interfase donde la rotura se ha producido en resina- hormigón.

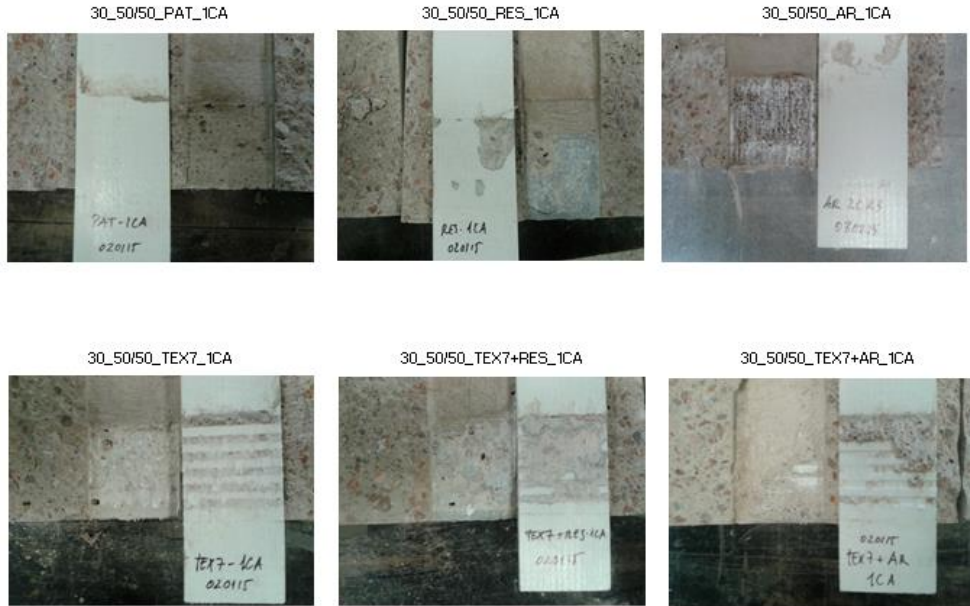


Fig. 6.27 Roturas interfase GFRP-hormigón, modalidad 1CA, varios acabados, sección 50 x 5 mm.

En los texturizados se presenta la rotura en la interfase entre el hormigón y la resina y el arenado, arrancando minoritariamente los resaltes del GFRP. En el texturizado 7, se observa cómo el hormigón se ha roto por cortante en el ranurado, permaneciendo prácticamente intactos los resaltes de GFRP; es el deslizamiento el que gobierna el modo de fallo, a diferencia de la modalidad 2C donde se cortan los resaltes de GFRP al estar mejor anclado por las dos caras de hormigón, siendo el acuñamiento mecánico el que ejerce una mayor influencia inicialmente hasta la rotura por cortante para posteriormente concluir con el rozamiento de las partes hasta finalizar el ensayo.

En la Figura 6.28 se presenta las roturas en la modalidad 1CE. Las roturas de la probeta patrón, resina y arenado presentan una rotura similar a la

modalidad 1CA, siendo la interfase GFRP-hormigón, GRFP-resina y GFRP-arenado, respectivamente, los tipos de rotura. En el caso de la probeta con resina se observa una rotura combinada en la que parte falla por rotura de la interfase resina-hormigón y otra falla por adherencia en la interfase GFRP-resina. En este caso, el 40 % falla por rotura y el 60 % falla por despegue.

En los casos donde se aplica el texturizado se observa como no hay rotura por cortante de los resaltes del GFRP con respecto a las modalidades 2C y 1CA. Esto es debido a la falta de confinamiento del hormigón en una de las caras de la probeta 1CE, siendo el esfuerzo normal predominante frente al tangencial. Así, es el despegue el que gobierna el fallo en la interfase y no el acñamiento mecánico o el rozamiento. Se aprecia en los texturizados con resina o arenado cómo la rotura es en la interfase resina-hormigón o arenado-hormigón.

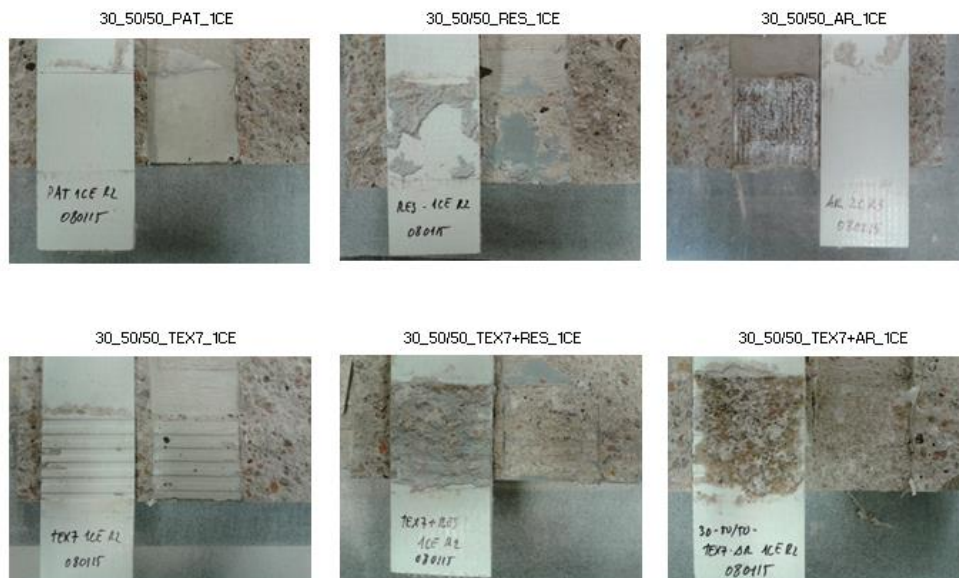


Fig. 6.28 Roturas interfase GFRP-hormigón, modalidad 1CE, varios acabados, interfase 50 x 50 mm.

6.2.4.2.2.- SUBGRUPO 2.2.- Influencia de las fijaciones mecánicas sin desplazamiento

Se utiliza tornillería de acero métrica M4 (grado 6.6) y métrica M6 (grado 8.8).

Vistos los problemas de despegue en los ensayos a una cara sin confinar, 1CE, estudiados en el anterior subgrupo 2.1, se procede a la incorporación de tornillería sin desplazamiento.

El efecto de la tornillería produce una mejora mecánica importante, con independencia del confinamiento del hormigón (véanse Figuras 6.29 y 6.31). El despegue no aparece en los ensayos, y no existen tantas diferencias en el efecto producido por el confinamiento del hormigón. No obstante se producen roturas a cortante de la tornillería al alcanzar valores máximos de tensión del orden de 6 MPa, si bien este problema se puede solucionar aumentando la calidad de la tornillería y su diámetro.

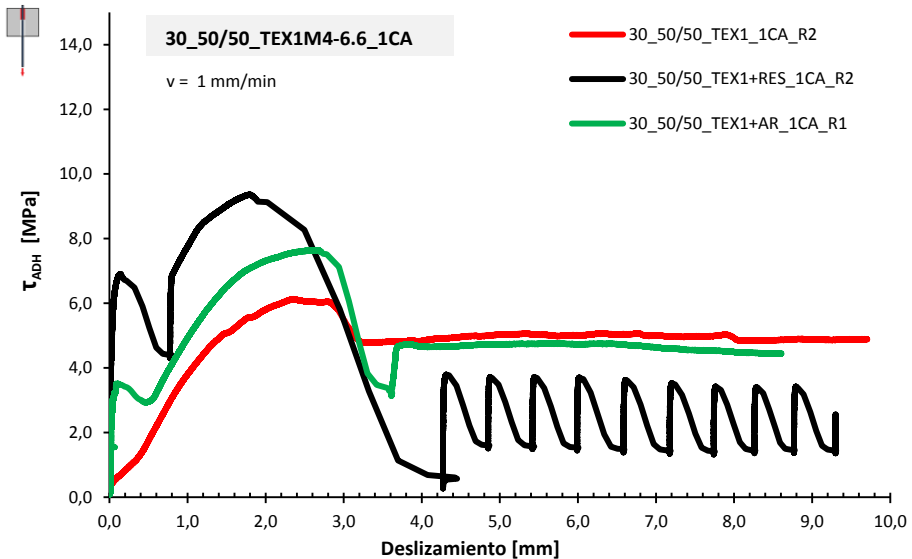


Fig. 6.29 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, con tornillería sin desplazamiento, M4 6.6.

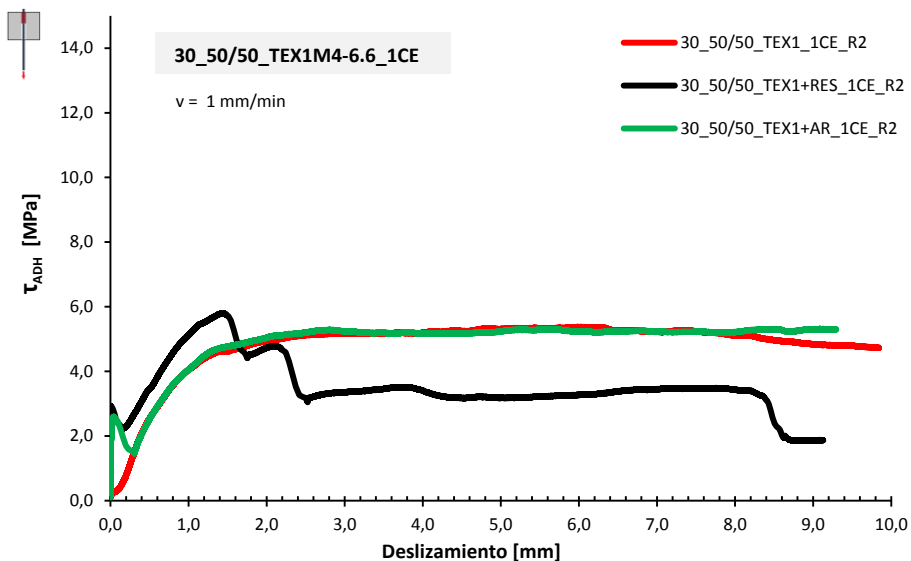


Fig. 6.30 Curvas τ/δ , modalidad ICE, tornillería sin desplazamiento, M4 6.6.

Tal y como se aprecia en la Figura 6.31, la influencia de las fijaciones mecánicas en las probetas producen un modo de fallo en la interfase GFRP-resina o GFRP-arenado. La tornillería aparece cortada tras finalizar el ensayo, lo que constituye una muestra de la importancia de aumentar la sección de la tornillería así como la calidad del acero para conseguir valores más altos. No se aprecian deformaciones en la zona de contacto de la arandela de las tuercas con el GFRP.



Fig. 6.31 Roturas interfase GFRP-hormigón, modalidad ICA, con tornillería sin desplazamiento, M4 6.6.

Los valores de tensión obtenidos son algo menores en las piezas no confinadas. Los tratamientos mixtos de tornillería y resina (TEX1+RES) o

arenado (TEX1+AR) mejoran el comportamiento, teniendo un modelo de comportamiento del tipo 4.

Tanto la combinación con la resina como con el arenado evitan el despegue prematuro y elevan la tensión pico. La combinación con arenado resulta interesante ya que tiene una tensión de despegue media pero la tensión post-pico no es preocupante, alcanzando rápidamente una rama ascendente hasta la máxima tensión alrededor de los 3 mm de deslizamiento.

Las probetas solo con tornillería fija (TEX1) son las que tienen un comportamiento mecánico con menores valores de tensión de despegue, pico y máxima, aunque con tensiones residuales aceptables (véase la Tabla 6.7).

Tabla 6.7 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CA, tornillería TEX1 M4-6.6 sin desplazamiento, GFRP interfase 50 x 50 mm.

Espécimen		τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1_1CA		0,40	2,22	0,50	-	-	6,21	2,12	4,71	55.152
30_50/50_TEX1+RES_1CA	Media	3,12	5,96	0,12	4,56	0,53	8,66	1,81	1,50	47.316
30_50/50_TEX1+AR_1CA		1,01	3,08	0,10	2,69	0,32	7,44	2,27	2,86	57.197
30_50/50_TEX1_1CA		0,19	0,50	0,00	-	-	0,42	0,34	1,79	8.444
30_50/50_TEX1+RES_1CA	Desviación Estándar	1,79	1,42	0,02	1,81	0,21	1,73	0,12	1,01	35.798
30_50/50_TEX1+AR_1CA		0,91	0,79	0,02	0,58	0,15	0,35	0,31	2,12	13.934

El modelo de comportamiento dúctil tipo 2 corresponde a la probeta tipo TEX1, pero en este caso, al tener bajos los valores de tensión de despegue y pico, indica que la interacción total de los dos materiales se pierde pronto, no mejorando la solución híbrida, como se aprecia en la Figura 6.30.

Para el caso de la tornillería fija sin desplazamiento (TEX1) en la modalidad 1CE, se observa cómo la interfase en la combinación con la resina se produce inicialmente (según se muestra en las curvas τ/δ) en la interfase GFRP-resina para posteriormente cortar la tornillería (véase Figura 6.32 flecha amarilla). En algunos casos se aprecia en la cara de la interfase no adherida cómo la tornillería, antes de ser sesgada, ha producido una deformación (véase Figura 6.32 flechas rojas) en la superficie donde se ubica la arandela, fruto del esfuerzo sometido.

Del mismo modo se aprecia cómo la tornillería llega incluso a fisurar el GFRP (véase Figura 6.32, flecha azul). En el caso de las probetas arenadas también se aprecia la rotura por cortante de la tornillería y las deformaciones en el GFRP.

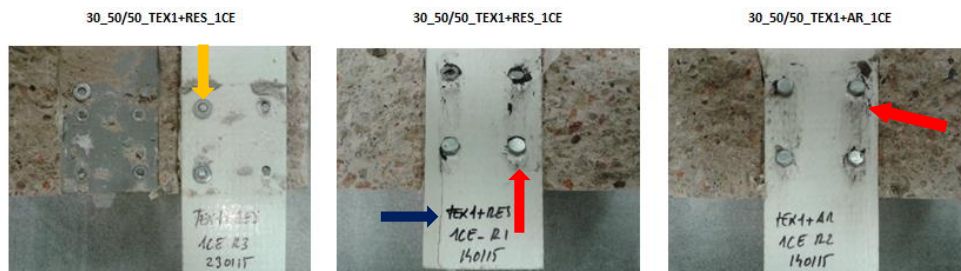


Fig. 6.32 Roturas interfase GFRP-hormigón, modalidad 1CE, tornillería sin desplazamiento, M4 6.6.

En el caso de la tornillería en las probetas a una cara con y sin confinamiento, 1CA y 1CE respectivamente, rompen por cortante y siguen produciéndose problemas de rotura frágil con deslizamientos menores que 0.5 mm con tensiones post-pico bajas, no deseables en el método 1CE, (véase Tabla 6.8).

Tabla 6.8 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CE, tornillería TEX1 M4-6.6 sin deslizamiento, GFRP interfase 50 x 50 mm.

Espécimen		τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	δ_{τ} pico [mm]	τ post- pico [MPa]	δ_{τ} post- pico [mm]	τ máx [MPa]	δ_{τ} máx [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1_1CE		0,14	2,13	0,50	-	-	4,56	3,60	4,55	37.854
30_50/50_TEX1+RES_1CE	Media	2,27	2,52	0,02	1,78	0,20	6,17	1,96	3,44	44.784
30_50/50_TEX1+AR_1CE		1,33	2,37	0,04	1,29	0,29	5,45	2,45	4,33	42.956
30_50/50_TEX1_1CE		0,04	0,85	0,00	-	-	1,29	0,33	1,27	11.113
30_50/50_TEX1+RES_1CE	Desviación Estándar	0,72	0,37	0,02	0,73	0,15	1,05	0,58	3,43	15.753
30_50/50_TEX1+AR_1CE		0,75	0,99	0,01	0,80	0,04	0,59	0,33	2,17	11.203

La incorporación de mayor métrica (M6) y mayor calidad (grado 8.8) a la tornillería fija, evita la rotura por cortante de la tornillería, pero una vez alcanzada la tensión máxima de adherencia el acero desgarra al perfil de GFRP (véase * en las Figuras 6.33 y 6.34), presentando los ensayos modos de fallo por deslizamiento, tal y como se aprecia en la Figura 6.33.

Los valores de las tensiones pico y post-pico son similares en cada espécimen, véase la Tabla 6.9.

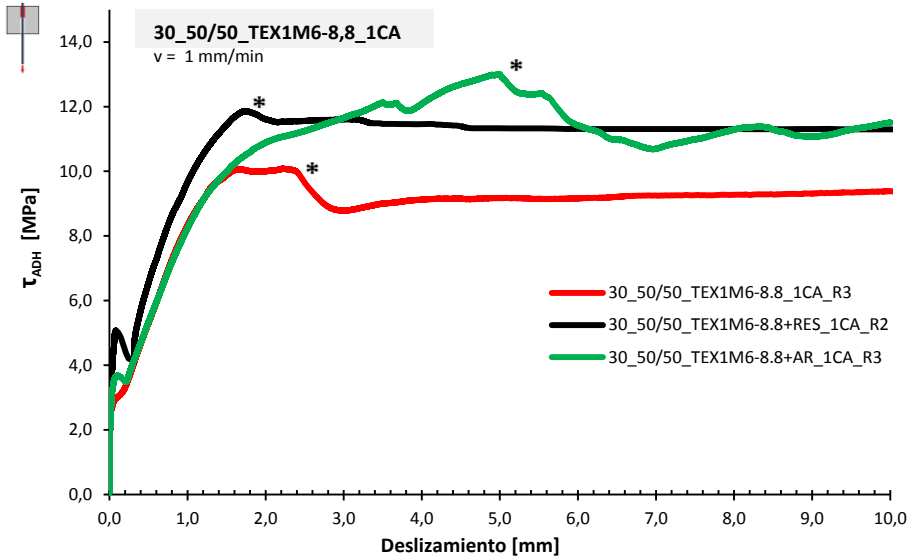


Fig. 6.33 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, tornillería sin desplazamiento M6 8.8.

En los casos donde se combina el texturizado con la tornillería sin desplazamiento en la modalidad 1CA, al aumentar las capacidades mecánicas, los valores tensionales son el doble respecto al caso de la tornillería con métrica 4 mm. Estos valores tensionales se establecen en desplazamientos pequeños (2 mm) salvo en el caso del arenado en el que se produce para desplazamientos mayores que 4 mm, tal y como se ha mostrado en las curvas τ/δ de la Figura 6.33.

Puesto que en los casos anteriores la rotura por cortante de la tornillería es evidente, cuando se aumenta el diámetro de la tornillería a 6 mm y la calidad del acero a 8.8, el modo de fallo no se produce en la tornillería sino que éste produce un desgarro en el GFRP seguido del deslizamiento del GFRP; este desgarro se manifiesta en los salientes señalizados en la Figura 6.34.

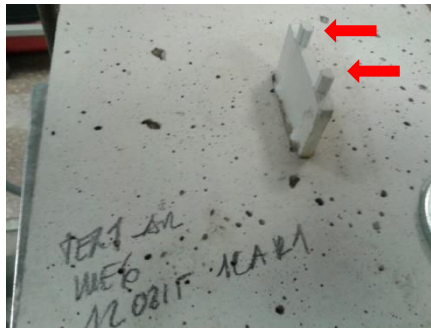


Fig. 6.34 Rotura probeta híbrida TEX1-2+AR, modalidad 1CA, tornillería sin desplazamiento M6 8.8.

Tabla 6.9 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CA, tornillería sin desplazamiento M6 8.8.

Especímen		τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post- pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1M6-8,8_1CA	Media	2,42	5,44	0,50	-	-	9,48	1,61	8,77	84.366
30_50/50_TEX1M6-8,8+RES_1CA		1,67	4,97	0,11	4,27	0,30	10,52	1,62	8,81	102.888
30_50/50_TEX1M6-8,8+AR_1CA		2,13	5,47	0,23	4,39	8,59	12,99	2,75	12,52	128.459
30_50/50_TEX1M6-8,8_1CA	Desviación Estándar	0,22	0,14	0,00	-	-	0,99	0,56	0,52	48.463
30_50/50_TEX1M6-8,8+RES_1CA		0,75	0,58	0,03	0,72	0,01	1,45	0,55	3,56	23.897
30_50/50_TEX1M6-8,8+AR_1CA		0,40	1,77	0,23	1,28	0,01	2,67	0,73	3,01	24.879

La incorporación del texturizado tipo 7 a la tornillería fija con métrica (M6) y mayor calidad (grado 8.8) mantiene los parámetros de caracterización de adherencia; únicamente hay una leve mejora en las tensiones pico.

La tensión pico aumenta aunque presenta variabilidad. No hay rotura por cortante de la tornillería pero sí la existencia del desconchado del hormigón por el empuje de la tornillería superior debido al escaso recubrimiento según se muestra en la Figura 6.36 (aproximadamente a los 2 mm de deslizamiento), presentando los ensayos modos de fallo por deslizamiento, tal y como se aprecia en la Figura 6.35. Los valores de las tensiones pico y post-pico son similares entre los especímenes (véase la Tabla 6.10).

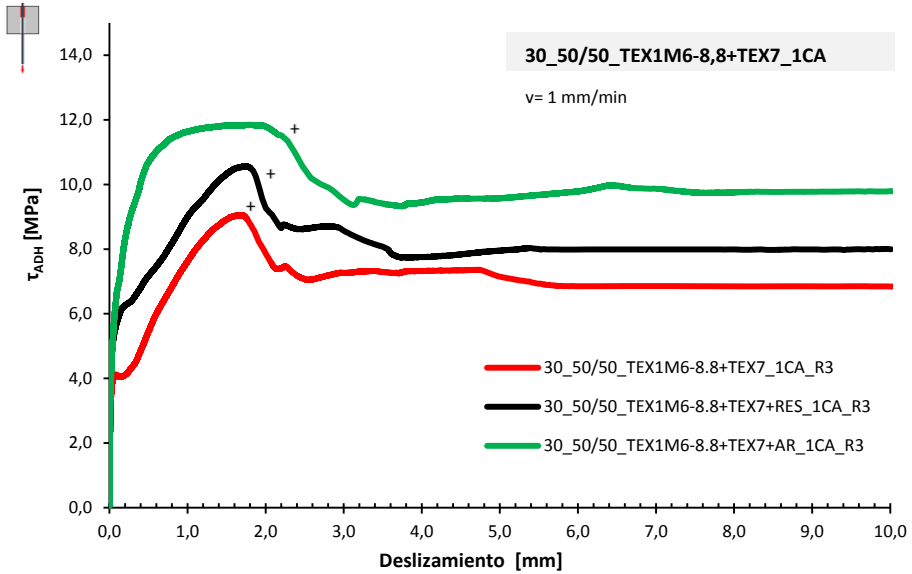


Fig. 6.35 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, tornillería sin desplazamiento M6 8.8 + texturizado 7+ combinaciones.

Tabla 6.10 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CA, (TEX1-2) tornillería sin desplazamiento M6 8.8 + texturizado 7+ combinaciones.

Espécimen		τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	δ τ pico [mm]	τ post-pico [MPa]	δ τ post-pico [mm]	τ máx [MPa]	δ τ máx [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1M6-8,8+TEX7_1CA	Media	2,58	6,44	0,50	-	-	9,31	1,40	7,94	93.732
30_50/50_TEX1M6-8,8+TEX7+RES_1CA		2,21	6,94	0,50	-	-	12,40	1,54	11,00	128.784
30_50/50_TEX1M6-8,8+TEX7+AR_1CA		2,47	9,78	0,50	-	-	10,47	1,42	9,48	110.492
30_50/50_TEX1M6-8,8+TEX7_1CA	Desviación Estándar	0,60	1,43	0,00	-	-	0,37	0,43	0,88	11.234
30_50/50_TEX1M6-8,8+TEX7+RES_1CA		0,89	0,92	0,00	-	-	2,30	0,16	3,43	29.234
30_50/50_TEX1M6-8,8+TEX7+AR_1CA		0,97	0,80	0,00	-	-	1,36	0,79	0,72	19.911

En la Figura 6.36 se muestra el modo de fallo por desconchado del hormigón por efecto de la tornillería superior con menor recubrimiento. Este modo de fallo se puede solucionar si se dota a la tornillería de mayor recubrimiento.



Fig. 6.36 Rotura probetas híbridas TEX1-2+texturizado 7+combinaciones, modalidad 1CA, tornillería sin desplazamiento M6 8.8.

6.2.4.2.3.- SUBGRUPO 2.3.- Influencia de las fijaciones mecánicas con desplazamiento

Se introduce la tornillería con desplazamiento con métrica M4 (grado 6.6) y M6 (grado 8.8) para comprobar el efecto del coliso, evitando la rotura prematura del tornillo. La tornillería se rompe una vez alcanzada la tensión más alta fuera del rango de deslizamiento utilizado como modelo de caracterización, ya que se produce a deslizamientos superiores a 8 mm en los casos 1CA y 1CE. Se muestra la influencia en las probetas a una cara con y sin confinamiento del hormigón, 1CA y 1CE, en las Figuras 6.37 y 6.38, respectivamente.

El coliso permite que la tornillería pueda desplazarse sin romperse, lo que se aprecia en las Figuras 6.37 y 6.38. El recorrido del desplazamiento es de 6 mm aproximadamente, que es justamente el espacio libre del que dispone el tornillo dentro del coliso.

El modelo de comportamiento es el tipo 5, y la influencia de la combinación de la tornillería con desplazamiento con resina o arenado confieren una tensión de despegue mayor con respecto a la tornillería con desplazamiento sin ningún tratamiento superficial (véase Tabla 6.11). Tal y como se aprecia en las Figuras 6.37 y 6.38, este comportamiento es independiente de la existencia o no de confinamiento en la probeta.

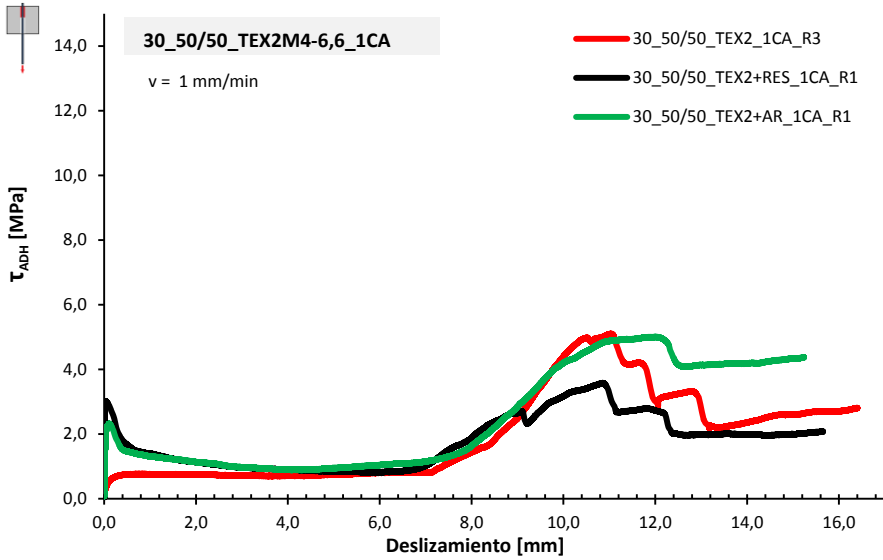


Fig. 6.37 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, con tornillería con desplazamiento M4 6.6.

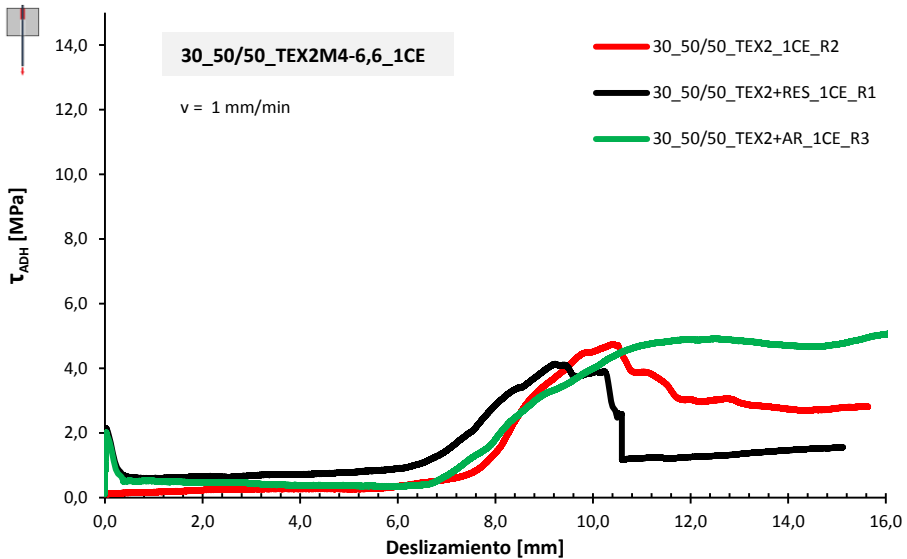


Fig. 6.38 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, tornillería con desplazamiento M4 6.6.

Tabla 6.11 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CA, tornillería con desplazamiento M4 6.6.

Espécimen		τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2_1CA		0,31	0,85	0,50	-	-	0,90	1,55	0,74	9.698
30_50/50_TEX2+RES_1CA	Media	2,04	3,51	0,07	-	-	3,51	0,07	1,34	20.996
30_50/50_TEX2+AR_1CA		1,41	2,57	0,21	-	-	2,57	0,21	1,47	20.912
30_50/50_TEX2_1CA		0,15	0,13	0,00	-	-	0,17	0,45	0,05	1.449
30_50/50_TEX2+RES_1CA	Desviación Estándar	0,71	1,50	0,06	-	-	1,50	0,06	1,05	15.952
30_50/50_TEX2+AR_1CA		0,44	0,29	0,20	-	-	0,29	0,20	0,50	5.651

Los valores bajos de despegue en las fijaciones mecánicas con desplazamiento “patrón”, se deben a que el tornillo no ejerce suficiente agarre (véase la Tabla 6.12). Los valores de tensión tan elevados, a partir de deslizamientos mayores que 8 mm (véanse Figuras 6.37 y 6.38), no son adecuados en estados límites de servicio, aunque puede que sea interesante frente a acciones sísmicas como valores residuales.

Tabla 6.12 Parámetros de caracterización de la adherencia, Modalidad 1CE, tornillería con desplazamiento M4 6.6.

Espécimen		τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2_1CE		0,11	0,15	0,34	-	-	0,27	4,00	0,27	2.079
30_50/50_TEX2+RES_1CE	Media	1,04	1,93	0,05	-	-	2,07	1,11	0,73	8.615
30_50/50_TEX2+AR_1CE		1,23	1,90	0,03	-	-	1,90	0,03	0,37	4.968
30_50/50_TEX2_1CE		0,03	0,08	0,28	-	-	0,09	0,00	0,09	739
30_50/50_TEX2+RES_1CE	Desviación Estándar	0,67	0,26	0,03	-	-	0,08	1,84	0,72	7.078
30_50/50_TEX2+AR_1CE		0,37	0,23	0,01	-	-	0,23	0,01	0,22	2.247

La Figura 6.39 muestra la relación tensión de adherencia-deslizamiento de la tornillería con desplazamiento M6 y grado 8.8, con respecto a la patrón y

combinaciones. Las combinaciones son triples, es decir, se aplica además el texturizado tipo 7, combinado con resina o arenado de las piezas.

La tensión de despegue es prácticamente del orden del doble que las de las combinaciones frente al patrón (TEX2M6-8.8). El modelo de comportamiento es del tipo 5, resultando muy interesante y adecuado.

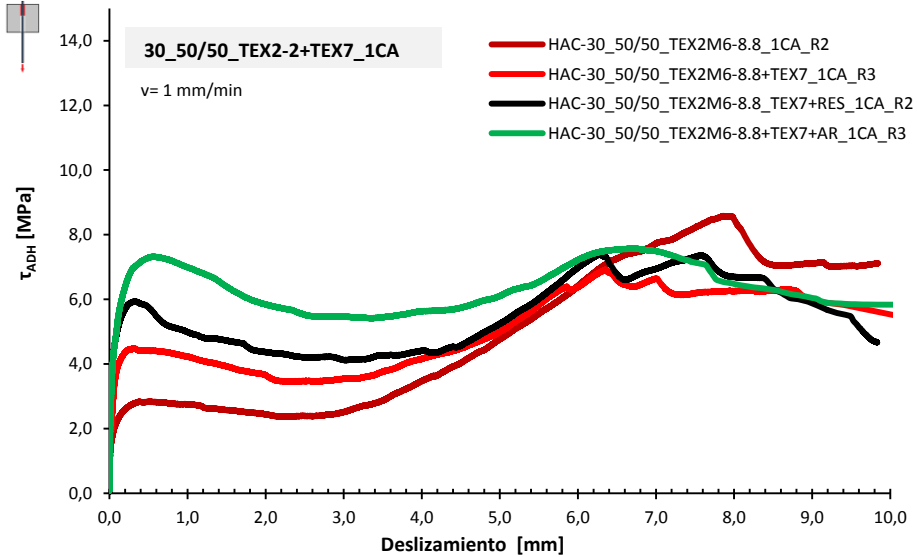


Fig. 6.39 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, tornillería con desplazamiento M6 8.8.

El motivo radica en la mejora de la tensión de despegue y la tensión pico. La tensión residual es muy elevada; en algún caso triplica y quintuplica los valores obtenidos con probetas con tornillería de menor diámetro y calidad. El deslizamiento del tornillo por el coliso es menor al tener solo 6 mm de desplazamiento, no rompe y mejora la tensión última.

La mejora del texturizado frente al patrón es casi del doble en términos de tensión. Las combinaciones con patrón + TEX7 + arenado o resina mejoran la combinación patrón + texturizado notablemente, tanto en desplazamientos inferiores a 1 milímetro como en la tensión máxima (véase la Tabla 6.13). La relación entre la tensión máxima y la residual es baja, siendo este un factor importante.

Tabla 6.13 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CA, tornillería con desplazamiento M6 8.8.

Espécimen	τ despegue [0,01 MPa]	τ pico [MPa]	$\delta \tau$ pico [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta \tau$ post-pico [mm]	τ máx [MPa]	$\delta \tau$ máx [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]	
30_50/50_TEX2M6-8,8_1CA	1,05	3,02	0,49	-	-	3,31	2,79	3,47	32.991	
30_50/50_TEX2M6-8,8+TEX7_1CA	Media	2,02	5,17	0,44	-	-	5,29	1,61	5,05	56.250
30_50/50_TEX2M6-8,8+TEX7+RES_1CA		2,57	6,32	0,32	-	-	6,32	0,32	3,90	50.076
30_50/50_TEX2M6-8,8+TEX7+AR_1CA		2,09	8,33	0,50	-	-	8,75	1,80	7,26	89.699
30_50/50_TEX2M6-8,8_1CA	Desviación Estándar	0,36	0,45	0,12	-	-	0,54	2,10	0,28	4.991
30_50/50_TEX2M6-8,8+TEX7_1CA		0,64	1,41	0,10	-	-	1,31	2,07	1,19	15.843
30_50/50_TEX2M6-8,8+TEX7+RES_1CA		0,96	0,37	0,04	-	-	0,37	0,04	0,84	8.480
30_50/50_TEX2M6-8,8+TEX7+AR_1CA		0,08	4,00	0,00	-	-	3,75	1,91	2,56	38.809

Tal y como se muestra en la Figura 6.40, no se aprecia *splitting* ni deformaciones por desgarro en el GFRP. Se produce un deslizamiento del perfil de GFRP, permitido debido al coliso que permite el desplazamiento de la tornillería sin provocar daños en la probeta híbrida y con un modo de fallo dúctil, según se aprecia en la Figuras 6.37 a 6.39, para desplazamientos inferiores a 10 mm.

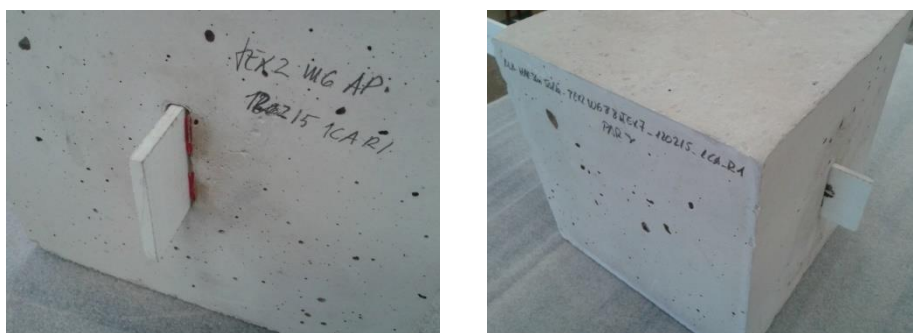


Fig. 6.40 Rotura probetas híbridas TEX2-2 + combinaciones, modalidad 1CA, tornillería con desplazamiento M6 8.8.

6.2.4.3.- CONTACTO DIRECTO DEL HORMIGÓN A UNA CARA LIBRE, 1CL

Influencia del par de apriete y postesado de las fijaciones mecánicas con desplazamiento

El confinamiento activo del hormigón sobre el GFRP se ha mostrado muy efectivo en comparación con el confinamiento pasivo. Este confinamiento, realizado mediante el postesado de la tornillería M6 (grado 8.8), se ha aplicado con dos pares de apriete distintos: 8 y 16 Nm. Como era de esperar, el par de apriete de 16 Nm induce un mayor empuje o confinamiento del hormigón sobre el perfil de GFRP, ofreciendo una mayor resistencia al deslizamiento, tal y como se manifiesta en la Figura 6.41.

Como se puede observar en la Figura 6.41, correspondiente a las probetas patrón, el modelo de comportamiento obtenido es del tipo 5, si bien este modelo está mejorado puesto que no existe tensión post-pico y la rama descendente es poco pronunciada. En consecuencia, las tensiones de despegue y máxima son similares, en tanto que la tensión residual no difiere mucho de la tensión máxima (véase la Tabla 6.14).

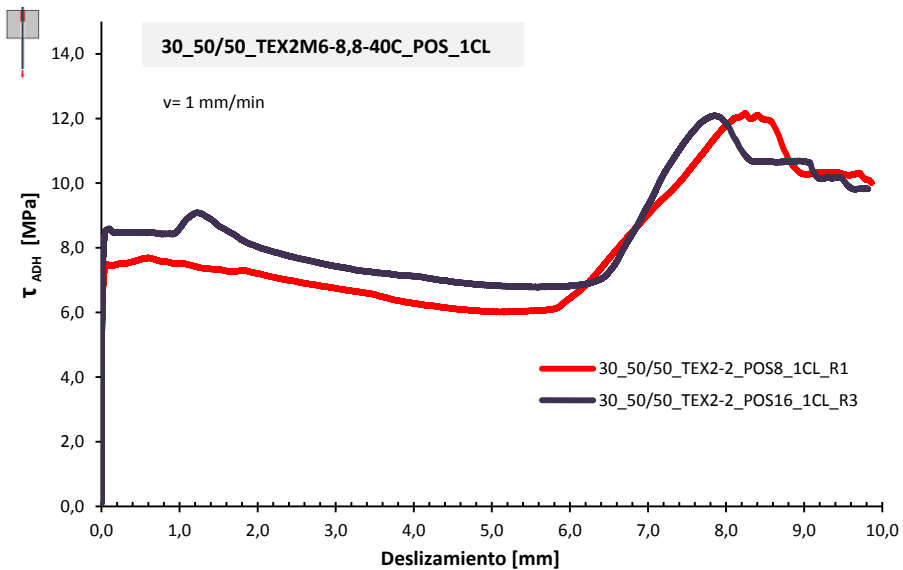


Fig. 6.41 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento, patrón, M6 8.8, par 8 y 16 Nm.

Tabla 6.14 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento, patrón M6 8.8, par 8 y 16 Nm.

Espécimen		τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post- pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2-2_POS8_1CL_R3	Media	6,30	7,86	0,22	-	-	8,09	0,96	6,86	74.765
30_50/50_TEX2-2_POS16_1CL_R3		5,06	8,91	0,13	-	-	9,09	0,51	7,34	81.586
30_50/50_TEX2-2_POS8_1CL_R3	Desviación Estándar	0,36	0,52	0,24	-	-	0,73	0,37	0,66	5.452
30_50/50_TEX2-2_POS16_1CL_R3		0,84	0,52	0,07	-	-	0,52	0,07	0,60	5.270

Como se puede observar en la Figura 6.42, la mejora es importante, pues se pasa de tensiones de despegue inferiores a 2,4 MPa (probetas con la tornillería sin postesar) a mayores que 4 MPa, en todas los tipos de variables de adherencia, salvo para la combinación con resina, que presenta un modelo de comportamiento tipo 6, no deseado por su fragilidad.

El resto presentan un modelo de comportamiento mejorado del tipo 5, donde la tensión de despegue y pico son muy altas, y, es más, no se producen a estas tensiones fallos frágiles, sino más bien al contrario: aunque inician una rama descendente, es suave dando tensiones muy elevadas entre 2 y 4 mm de deslizamiento; con deslizamientos entre 6 y 8 mm el comportamiento tensional es elevado, entre 8 y 12 MPa (véase Tabla 6.15), lo que constituye una reserva tensional importante a tener en cuenta de cara a acciones extraordinarias; las caídas de tensión a partir de los 8 mm generalmente son debidas al desgarro del GFRP por la tornillería y microfisuraciones en el hormigón.

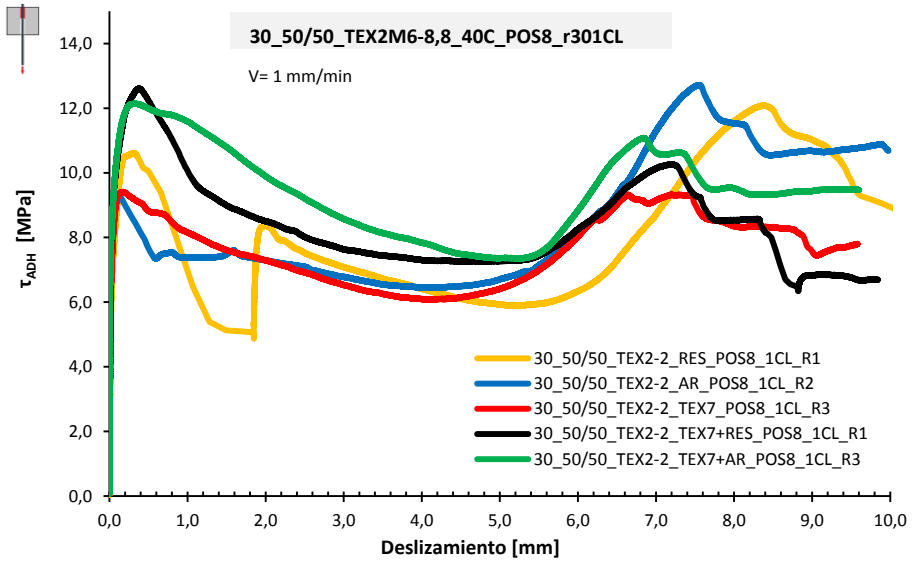


Fig. 6.42 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento M6 8.8, par 8 Nm.

Tabla 6.15 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento M6 8.8, postesado 8 Nm.

Espécimen	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	δ τ pico [mm]	τ post-pico [MPa]	δ τ post-pico [mm]	τ máx [MPa]	δ τ máx [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2-2_RES_POS8_1CL	4,39	10,52	0,24	4,17	1,74	10,52	0,24	7,19	74.854
30_50/50_TEX2-2_AR_POS8_1CL	4,12	8,84	0,13	-	-	8,84	0,13	6,77	71.916
30_50/50_TEX2-2_TEX7_POS8_1CL	5,69	9,94	0,18	-	-	9,94	0,18	7,06	80.770
30_50/50_TEX2-2_TEX7+RES_POS8_1CL	5,26	11,41	0,37	-	-	11,41	0,37	7,08	84.700
30_50/50_TEX2-2_TEX7+AR_POS8_1CL	3,65	10,17	0,25	-	-	10,17	0,25	7,71	93.142
30_50/50_TEX2-2_RES_POS8_1CL	1,07	0,97	0,07	0,60	0,44	0,97	0,07	0,84	4.408
30_50/50_TEX2-2_AR_POS8_1CL	0,80	0,54	0,04	-	-	0,54	0,04	0,53	896
30_50/50_TEX2-2_TEX7_POS8_1CL	0,74	1,47	0,03	-	-	1,47	0,03	1,20	12.319
30_50/50_TEX2-2_TEX7+RES_POS8_1CL	1,24	1,67	0,01	-	-	1,67	0,01	0,59	9.718
30_50/50_TEX2-2_TEX7+AR_POS8_1CL	2,56	3,83	0,17	-	-	3,83	0,17	0,20	9.146

En la Figura 6.43 se presentan las roturas de las probetas híbridas con métrica 6 mm y grado 8.8 con el postesado de la tornillería con un par 8 Nm con el fin de que el hormigón realice un confinamiento activo sobre el perfil de GFRP.

Dicha tornillería, emplazada en un coliso practicado en el perfil de GFRP, permite claramente el deslizamiento del perfil de GFRP en el hormigón, dotando de un modo de fallo dúctil a la estructura. Las posibles roturas por pequeñas fisuraciones en el hormigón (flechas rojas) o desgarros en el GFRP (flechas azules) se producen después de haber alcanzado las tensiones de adherencia máximas con deslizamientos superiores a los 8 mm, tal y como se puede apreciar en las curvas τ/δ de la Figura 6.42.

En los ensayos previos se utilizó un recubrimiento de 8 y 30 mm, se observa en la Figura 6.43 (superior izquierda) el recubrimiento aplicado es de 8 mm, y se produce *splitting*, todos los ensayos posteriores del tipo TEX2 se realizan con recubrimientos de 30 mm para evitar dicho fenómeno, tal y como se aprecia en el resto de imágenes de la Figura 6.43.



Fig. 6.43 Rotura probetas híbridas TEX2-2+ combinaciones, modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento M6 8.8, par 8 Nm.

Como se muestra en las Figuras 6.42 y 6.44, los valores aumentan ligeramente frente a los obtenidos con 8 Nm.

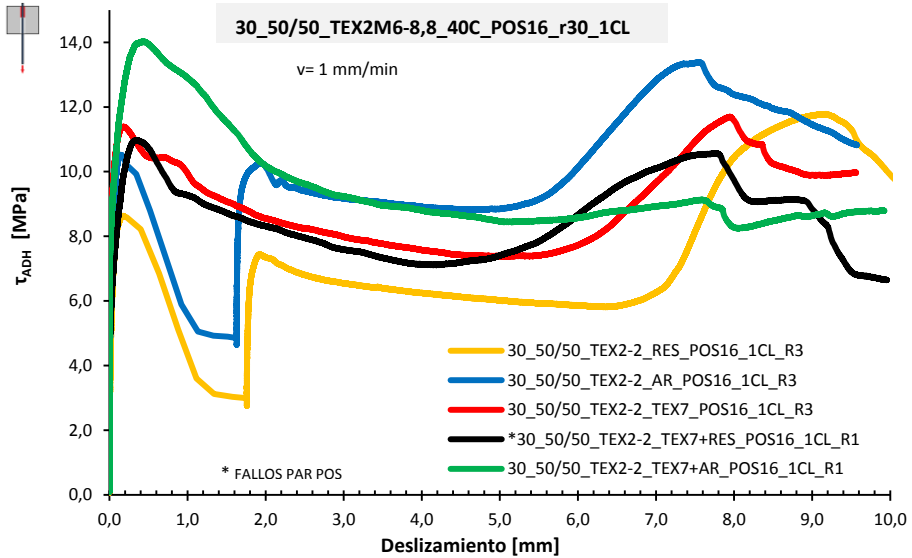


Fig. 6.44 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento M6 8.8, par 16 Nm.

Para el caso de la combinación TEX2-2_TEX7+RES se aprecia que no aumenta sus capacidades mecánicas frente al texturizado, lo que es debido a la rotura de un tornillo tras aplicar su par de apriete (véanse Figura 6.44 y Tabla 6.16).

En la Figura 6.45 se presentan las roturas de las probetas híbridas con métrica 6 mm y grado 8.8 con el postesado de la tornillería con un par 16 Nm. Se muestra cómo al tener un mayor par de apriete, la presión de las arandelas es mayor, dejando una marca más pronunciada (flecha roja en la Figura 6.45) en el perfil de GFRP frente al caso de las probetas con par 8 Nm. Los deslizamientos son los mismos pero con valores más altos de adherencia respecto a las probetas con par 8 Nm (véase Figura 6.42). Se aprecian pequeños desgarros en el GFRP (flechas azules) después de haber alcanzado las tensiones de adherencia máximas con deslizamientos superiores a los 8 mm, tal y como se puede apreciar en las curvas τ/δ de la Figura 6.44.

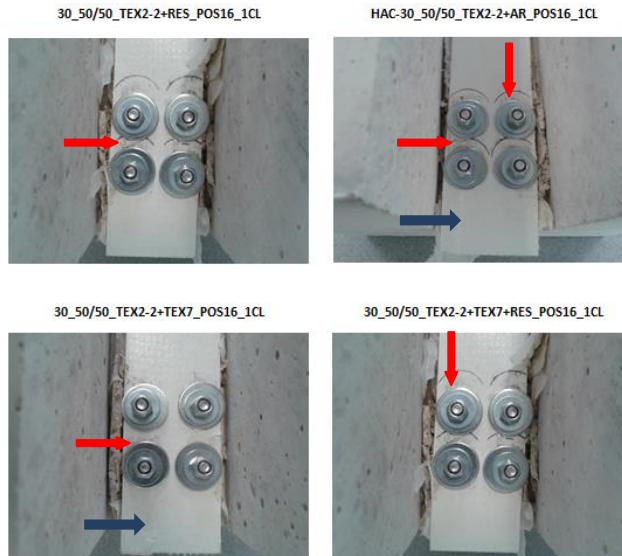


Fig. 6.45 Rotura probetas híbridas TEX2-2+ combinaciones, modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento M6 8.8, par 16 Nm.

Tabla 6.16 Parámetros de caracterización de la adherencia, modalidad 1CL, tornillería con desplazamiento M6 8.8, postesado 16 Nm.

Espécimen	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2-2_RES_POS16_1CL	4,95	11,20	0,19	3,41	2,10	11,20	0,19	6,28	71.064
30_50/50_TEX2-2_AR_POS16_1CL	6,78	10,94	0,85	4,59	1,78	10,94	0,85	8,97	86.765
30_50/50_TEX2-2_TEX7_POS16_1CL	Media 6,83	11,80	0,20	-	-	11,80	0,20	7,96	93.697
30_50/50_TEX2-2_TEX7+RES_POS16_1CL	5,13	10,05	0,32	-	-	10,05	0,32	6,55	78.238
30_50/50_TEX2-2_TEX7+AR_POS16_1CL	5,94	14,43	0,39	-	-	14,43	0,39	8,33	109.677
30_50/50_TEX2-2_RES_POS16_1CL	1,55	2,54	0,03	0,60	0,37	2,54	0,03	2,61	14.132
30_50/50_TEX2-2_AR_POS16_1CL	2,31	1,15	1,17	0,07	0,21	1,15	1,17	0,06	9.553
30_50/50_TEX2-2_TEX7_POS16_1CL	Desviación Estándar 0,76	0,88	0,02	-	-	0,88	0,02	0,73	5.801
30_50/50_TEX2-2_TEX7+RES_POS16_1CL	2,44	3,27	0,02	-	-	3,27	0,02	2,59	30.200
30_50/50_TEX2-2_TEX7+AR_POS16_1CL	1,58	1,14	0,06	-	-	1,14	0,06	0,66	5.954

CAPÍTULO VII

**CONCLUSIONES
Y FUTURAS LÍNEAS DE
INVESTIGACIÓN**

CAPÍTULO VII.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1.- CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas en la presente Tesis Doctoral se presentan estructuradas en dos puntos:

- Conclusiones obtenidas en los ensayos previos.
- Influencia de las variables de adherencia.

7.1.1.- CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS PREVIOS

1.- Se ha **adaptado el modelo de ensayo de pull-out** tradicional para barras a perfiles de GFRP de sección rectangular.

2.- Se han establecido **4 modalidades de ensayo**, en función del tipo de confinamiento del hormigón sobre el perfil de GFRP:

- **“2C”** confinamiento pasivo del hormigón en las dos caras principales del perfil de GFRP; dicha modalidad simula la tipología de enlace estructural de vigas híbridas insertando el alma de la viga de GFRP en la capa de compresión de hormigón.
- **“1CA”** confinamiento pasivo del hormigón en las dos caras principales del perfil de GFRP; en una de las caras del perfil no hay rozamiento.
- **“1CE”** confinamiento pasivo del hormigón únicamente en una de las caras principales del perfil de GFRP.
- **“1CL”** confinamiento activo del hormigón únicamente en una de las caras principales del perfil de GFRP.

3.- La influencia del **confinamiento pasivo** del hormigón se ha analizado con el establecimiento de las tipologías de las probetas 1CA y 1CE. Si el perfil de GFRP está confinado por el hormigón, el rendimiento estructural en relación con la adherencia es muy superior a cuando no lo están.

4.- La aplicación del **confinamiento activo** del hormigón en las probetas de GFRP produce un aumento considerable de la capacidad adherente.

7.1.2.- CONCLUSIONES SOBRE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE ADHERENCIA

1.- Se han obtenido 8 **modelos de comportamiento**, todos ellos influenciados por las variables de adherencia. El modelo de comportamiento ideal es el tipo 2, con altos valores para la tensión de despegue y máxima, y deslizamientos inferiores a 1 mm.

2.- Se han identificado, en las curvas tensión de adherencia-deslizamiento, los **parámetros resistentes** en función de los deslizamientos.

3.- Se ha constatado la existencia de **tres estadios de deslizamiento**: inicial (0.01 mm), intermedio (0.5 mm) y final (4 mm). Para que exista un comportamiento adecuado es necesario que la adherencia en su estadio inicial sea máxima. Es decir, que la tensión de despegue sea alta y con valores de deslizamiento bajos (0.01 mm). La tensión máxima en el estado intermedio, con un deslizamiento asociado de 0.5 mm, garantiza una unión total en la estructura híbrida. Al sobrepasar los 0.5 mm se tiene una adherencia parcial de la estructura híbrida GFRP-hormigón, por lo que no está trabajando al máximo rendimiento, aunque no ha llegado a la rotura.

4.- En cuanto a las probetas con **confinamiento pasivo** mediante contacto directo del perfil de GFRP **al hormigón a dos caras 2C**:

- Las probetas de GFRP de sección 50 x 5 mm y **25 x 5 mm** presentan las mismas tensiones adherentes. Para la metodología de ensayo existe **menor riesgo** de fisuración por **splitting** con la de menor sección.
- La utilización de **resina de poliéster** implica una **tensión** de adherencia tanto de **despegue** como **máxima muy elevadas** (8 MPa) con deslizamientos inferiores a 0.5 mm. En contraposición las **roturas son frágiles**.

- El **arenado** produce modelos de comportamiento adecuados con **tensiones de adherencia buenas** (6 MPa). El modo de fallo es por deslizamiento, ideal para conferir **ductilidad** al sistema estructural.
- El **texturizado** confiere un comportamiento similar al arenado y lo mejora en un 10 %, con un modo de fallo **dúctil**. Este proceso de confección de las probetas es más rápido y económico que la resina y el arenado.
- Las **combinaciones** del texturizado con la resina o el arenado mejoran en un 40 % las capacidades mecánicas de adherencia, pero presentan una **rotura frágil**.

5.- En relación a las probetas con perfil de GFRP en contacto directo con el **hormigón a una cara 1C**:

- Todas las variables, resina (RES), arenado (AR), texturizado (TEX) y una combinación de estos (MIX), mejoran la capacidad mecánica con respecto al patrón.
 - El tratamiento superficial con resina proporciona una mayor capacidad adherente inicial, más del doble que en el caso del tratamiento con arenado. La tensiones post-pico son inadecuadas para las estructuras híbridas, debido a que están asociadas a deslizamientos mayores que 0.5 mm.
 - El tratamiento de texturizado confiere un buen comportamiento, mejorando la respuesta respecto de los tratamientos de arenado y resina.
 - Las combinaciones de tratamientos superficiales presentan un aumento mayor al 30 % respecto al resto, proporcionando roturas dúctiles en el caso de la resina y frágiles en el caso del arenado.
 - Todos estos resultados están asociados a un confinamiento pasivo del hormigón en la modalidad 1CA, no existiendo diferencias entre las distintas variables de adherencia cuando se trabaja sin el confinamiento pasivo del hormigón en una de sus caras en la modalidad 1CE, debido al despegue prematuro de los perfiles de GFRP.
- La tornillería métrica M4 se rompe con facilidad a cortante en todas las variables para tensiones adherentes mayores que 5 MPa. Para

tensiones menores que 5 MPa no es evidente la rotura por cortante. Al aumentar la métrica a M6 y el grado a 8.8 no se produce la rotura de la tornillería por cortante, incluso con tensiones de 12 MPa.

- Las fijaciones mecánicas con desplazamiento a través del coliso permite un desplazamiento del tornillo, evitando la rotura de éste por cortante y dotando a la estructura de un modo de fallo dúctil.
- El aumento del par de apriete sobre el perfil de GFRP influye en un leve aumento de la capacidad mecánica adherente.
- El postesado de las fijaciones mecánicas sí tiene una gran influencia ya que logra que el hormigón confine activamente al perfil de GFRP. Es por ello que se triplican las tensiones de adherencia con respecto a los casos que no están confinados activamente. Este confinamiento activo permite el rozamiento sobre la interfase aumentando considerablemente la adherencia en los tres estadios inicial (0.01 mm), intermedio (0.5 mm) y final (4 mm).

7.2.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Esta Tesis Doctoral abre un amplio abanico de futuras líneas de investigación, las cuales son enumeradas a continuación:

- 1.- Estudio con distintos tipos de hormigones.
- 2.- Influencia de las fibras y sus diferentes tipologías.
- 3.- Estudio de las distintas longitudes de adherencia.
- 4.- Estudio de diferentes secciones de perfiles.
- 5.- Puesta en práctica del presente estudio en vigas híbridas a pequeña y gran escala.
- 6.- Establecimiento de leyes constitutivas de los modelos de comportamiento, analíticos y por elementos finitos.

CAPÍTULO VIII

**REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

Achillides, Z.: "Bond behaviour of FRP bars in concrete", PhD Thesis, University of Sheffield. 1998.

Achillides, Z., and Pilakoutas, K.: "Bond behaviour of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions". *ASCE, Journal of Composites for Construction*, vol. 8, nº 2 (2004), pp. 173–181.

ACI-318R-95: "*Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)*". ACI Committee 318, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, (2006).

ACI-440-3R-04: "*Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures.*" ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, (2004).

AENOR: UNE-EN ISO 527-1:2012: "Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales." Comité AEN/CTN 53.

AENOR: UNE-EN ISO 527-3:1996/AC 2002: "Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 3: Condiciones de ensayo para películas y hojas." Comité AEN/CTN 53/SC-6.

AENOR: UNE-EN ISO 527-4:1997: "Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 4: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos isotrópicos y ortotrópicos reforzados con fibras." Comité AEN/CTN 53/SC-6.

AENOR: UNE-EN ISO 527-5:2010: "Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 5: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos unidireccionales reforzados con fibras." Comité AEN/CTN 53/SC-6.

AENOR: UNE-EN ISO 13706-3:2003: "Materiales compuestos de plástico reforzado. Especificaciones para perfiles pultruidos. Parte 3: Requisitos específicos." Comité AEN/CTN 53/SC-0.

AENOR: UNE-EN ISO 14126:2001/AC 2002: "Materiales compuestos de plástico reforzado con fibras. Determinación de las propiedades de compresión en la dirección paralela al plano de laminación." Comité AEN/CTN 53/SC-0.

Aiello, A.M., Leone, M., Pecce, M.: "Bond performances of FRP rebars-reinforced concrete". *ASCE Journal Material Civil Engineering*, vol.19, nº 3 (2007), pp. 205–213.

Ashby, M. F.: "Materials and shape." *Acta Metall. Mat. United Kingdom*, vol. 39, nº0 (1991), pp. 1025-1039.

Al-Mahmoud, F., Castel, A., François, R., Tourneur, C.: "Effect of surface preconditioning on bond of carbon fibre reinforced polymer rods to concrete". *Cement & Concrete Composites*, vol. 29 (2007), pp. 677–689.

Almerich, A.: "Diseño, según los estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio". *Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, España, (2010)*.

Al-Zahrani, M., Al-Dulaijan, S., Nanni, A., Bakis, C., Boothby, T.: "Evaluation of bond using FRP rods with axisymmetric deformations". *Construction and Building Materials*, vol. 13 (1999), pp. 299-309.

ASTM D7522: *Standard Test Method for Pull-Off Strength for FRP Laminate Systems Bonded to Concrete Substrate*. American Society for Testing and Materials.

Baena, M., Torres, Ll., Turon, A., Barris, C.: "Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test". *Composites: Part B*, vol. 40 (2009), pp. 784–797.

Banks, W. M., and Rhodes, J. "The instability of composite channel sections." *Composite Struct. 2: Proc., 2nd Int. Conf. on Composite Structures*. Can. Soc. for Civ. Eng. Montreal, Canada. (1983).

Barros da S. A., Neto S., Lebre La Rovere H.: "Composite concrete/GFRP slabs for footbridge deck systems". *Composite Structures*, vol. 92 (2010), pp. 2554–2564

Benmokrane, B., Tighiouart, B., Chaallal, O.: "Bond strength and load distribution of composite GFRP reinforcing bars in concrete". *ACI Materials Journal*, vol. 93, nº 3 (1996), pp. 246–253.

Benmokrane, B., Zhang, B., Chennouf, A.: "Tensile properties and pullout behaviour of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications". *Construction and Building Materials*, vol. 14 (2000), pp. 157-170.

Bilotta, A., Ceroni, F., Di Ludovico, M., Nigro, E., Pecce, M., Manfredi, G.: "Bond efficiency of EBR and NSM FRP systems for strengthening concrete members". *Journal of Composites for Construction*, ASCE; vol. 15, nº 5 (2011), pp. 757–72.

Bizindavyi, L. and Neale, KW.: "Transfer lengths and bond strengths for composites bonded to concrete". *J. Compos. Constr.*, ASCE vol. 3, nº 4 (1999), pp. 153–60.

Boremann, R. and Faber, S.: "UHPC with steel and non-corroding high-strength polymer fibres under static and cyclic loading". University of Kassel. *In: First International Symposium of Ultra High Performance Concrete*. Kassel University, 2004

Brosens, K. and Gemert, D.: "Anchoring stresses between concrete and carbon fiber reinforced laminates. Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures". *Japan: Japan Concrete Institute*; vol. 1 (1997), pp. 271–278.

Brosens, K. and Gemert, D. : "Anchorage design for externally bonded carbon fiber-reinforced polymer laminates". *In: Proceedings of the FRPRCS-4*, SP-188, ACI; (1999). pp. 635–45.

Brosens, K.: "Anchorage of externally bonded steel plates and CFRP laminates for the strengthening of concrete elements". *Ph.D. dissertation*, Dept. of Civil Engineering, Katholieke Univ. Leuven, Belgium; (2001), pp. 98–104.

Bourbigot, S., Le Bras, M., Trémillon, J., Bréant, P., Delobel, R.: "4A Zeolitic synergistic agent in a new flame retardant intumescent formulations of polyethylenic polymers – Study of the constituent monomers". *Polym. Deg. Stab.*, vol. 54 (1996), pp. 275–283.

Bourbigot, S., Le Bras, M.: "Mineral fillers in intumescent fire retardant formulations. Criteria for the choice of a natural clay, filler for the ammonium polyphosphate/pentaerythritol". *Fire Materials*, vol. 20 (1996), pp. 39–49.

Calvet, V.: "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón". *Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València*, España, (2014).

Cao, S. Y., Chen, J. F., Pan, J. W., Sun, N.: "Measurement of bond-slip relationships of FRP-concrete interface". *Journal of Composites for Construction*, vol. 11, n° 2 (2007), pp. 149-160.

Chaallal, O. and Benmokrane, B.: "Pullout and bond of glass-fibre rods embedded in concrete and cement grout". *Materials and Structures*, vol. 26, n° 3 (1993), pp-167-175.

Chajes M. J., Finch, W. W., Januszka T. F., Thomson, T. A.: "Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete". *ACI Structural Journal*, vol. 93, n° 2 (1996), pp. 208-217.

Chakraborty, A., Khennane A., Kayali, O., Morozov, E.: "Performance of outside filament-wound hybrid FRP-concrete beams". *Composites: Part B.*, vol. 42 (2011), pp. 907-915.

Chen, D., and El-Hacha, R.: "Flexural behavior of hybrid FRP-UHPC girders under static loading." *Proceedings of 8th International Conference on Short and Medium Span Bridge*, Niagara Falls, Canada 2010.

Chen, J., Yang, Z., Holt, G.: "FRP or steel plate-to-concrete bonded joints: effect of test methods on experimental bond strength" *Steel & Composite Structures*, vol.1, n° 2 (2001), pp. 231-44.

Chen, J. and Teng, J.: "Anchorage strength models for FRP and Steel plates bonded to concrete". *Journal of Structural Engineering*, vol. 127, n° 7 (2001), pp. 784-791.

Chen, Y., Davalos, J.: "Durability prediction for GFRP reinforcing bars using short-term data of accelerated aging tests." *Journal of Composites for Construction*, vol. 10, n°4 (2006), pp. 279-286.

Chin, J. W., Nguyen, T. , Aouadi, K.: "Sorptions and Diffusion of Water, Salt Water, and Concrete Pore Solution in Composite Matrices." *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 71 (1999), pp. 483-492.

Cosenza, E., Manfredi, G., and Realfonzo, R.: "Development length of FRP straight rebars". *Composites B.*, vol. 33, n° 7 (2002), pp. 493-504.

Dai, J. and Ueda, T.: "Local bond stress slip relations for FRP sheets concrete Interfaces". In: *Proc. of 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures*. Singapore: World Scientific Publications, (2003), pp. 143-52.

Dai, J., Ueda, T., Sato Y.: "Development of the nonlinear bond stress–slip model of fiber reinforced plastics sheet—concrete interfaces with a simple method". *Journal of Composites for Construction*, vol. 9, nº 1 (2005), pp. 52-62.

Davalos, J., Chen, Y., Ray, I.: "Effect of FRP bar degradation on interface bond with high strength concrete". *Cement & Concrete Composites*, vol. 30 (2008), pp. 722-730.

De Diego, A., Gutiérrez, J., Arteaga, A., Lopez, C.: "Utilización de materiales compuestos en la construcción de nuevos puentes". *Actas del las II Jornadas de Investigación en Construcción*. ISBN: 978-84-7292-367-6 (2008), p.p. 1583-1592.

De Lorenzis, L., Miller, B., Nanni, A. : "Bond of fiber-reinforced polymer laminates to concrete". *ACI Materials Journal*, vol. 98, nº 3 (2001), pp. 256-264.

Dehghani, E., Daneshjoo, F., Aghakouchak A., Khaji N.: "A new bond–slip model for adhesive in CFRP-steel composite systems". *Engineering Structures*, vol. 34 (2012), pp. 447–454.

Deskovic, N.: "Innovative design of FRP composite members combined with concrete". PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, (1993).

Deskovic, N., Triantafillou, T., Meier, U.: "Innovative design of FRP combined with concrete: short term behavior". *Journal Structural Engineering*, ASCE vol. 121, nº 7 (1995), pp.1069–78.

Deskovic, N., Triantafillou, T., Meier, U.: "Innovative design of FRP combined with concrete: Long-term behavior." *Journal Structural Engineering*, ASCE vol. 127, nº 7 (1995), pp. 1079-1089.

Duc N., Mutsuyoshi, H., Asamoto, S., Matsui, T.: "Structural behavior of hybrid FRP composite I-beam". *Construction and Building Materials*, vol. 24, nº, (2010), pp. 956–969.

EHE-08. *Instrucción Hormigón Estructural*. Ministerio de Fomento, Madrid, España. (2008).

Elmahdy, A., El-Hacha, R., Shrive, N.: "Flexural behaviour of hybrid composite girders in bridge Construction". *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008)* 22-24 July 2008, Zurich, Switzerland.

Escrig, C., Gil, L., Bernat-Maso, E., Puigvert, F.: "Experimental and analytical study of reinforced concrete beams shear strengthened with different types of textile-reinforced mortar". *Construction and Building Materials*, vol 83 (2015), pp. 248–260

Eurocode 2: *Design of Concrete Structures-Part 1: General Rules and Rules for Buildings*, DD ENV 1992-1-1:1992. CEN (Comite European de Normalisation), Brussels. 274p. 1992.

Eurocode 2: *Design of Concrete Structures-Part 1: General Rules and Rules for Buildings*, BS EN 1992-1-1:2004. CEN (Comite European de Normalisation), Brussels. 230p. 2004.

Fam, A., Honickman, H.: "Built-up hybrid composite box girders fabricated and tested in flexure" *Engineering Structures*, vol. 32 (2010), pp.1028-1037.

Ferracuti, B., Savoia, M., Mazzotti, C.: "Interface law for FRP–concrete delamination". *Composite structures*, vol. 80, n° 4 (2007), pp. 523-531.

Ferreira, D., Oller, E., Marí, A., Bairán, J.: "Numerical Analysis of Shear Critical RC Beams Strengthened in Shear with FRP Sheets". *J. Compos. Constr.* Vol 17 (2013). DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000434. American Society of Civil Engineers.

FIB. *Fib model code for concrete structures 2010*. International federation for structural concrete, Lausanne, Ernst & Sohn, 402; 2013. ISBN 978-3-433-03061-5.

Foster, S. and Khomwan, N.: "Determination of bond stress versus slip for externally bonded FRP from standardised bond strength tests". *Bond behaviour of FRP in structures: Proceedings of the International Symposium BBFS 2005*. pp. 85-90.

Gao, B., Jang-kyo, K., Leung, K.: "Effect of rubber modifier on interlaminar fracture toughness of CFRP-concrete interface". *Composites Science and Technology*, vol. 63, n° 6 (2003), pp. 883-892.

Giner Maravilla, Eugenio y Albelda Vitoria, José:: "Análisis y diseño con materiales compuestos". Universidad Politécnica de Valencia. Editorial: Valencia, *Editorial UPV*, 2001. Ref.: 2001.4063

Guadagnini, M., Serbescu, A., Palmieri, A., Matthys, S., Bilotta, A., Nigro, E.: "Round robin test on the bond behaviour of externally bonded FRP systems to concrete". *International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, CICE 2012. 03-188.

Guo, Z., Cao, S., Sun, W., Lin, X.: "Experimental study on bond stress-slip behaviour between FRP sheets and concrete". *Bond behaviour of FRP in structures: Proceedings of the international symposium BBFS (2005)*, pp. 77-83.

Hollaway, L. (1990). *Polymers and polymer composites in construction*. Telford, London, England.

Hollaway, L.: "A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important inservice properties." *Construction and Building Materials*, vol. 24, nº 12 (2010), pp. 2419-2445.

Holmes, M. and Just, D.: "GRP in structural engineering". *Applied Science Publishers Ltd.* (1983). London, England.

Holzenkämpfer, P.: "Ingenieurmodelle des verbundes geklebter bewehrung für betonbauteile". Dissertation, TU Braunschweig; (1994).

Horiguchi, T. and Saeki, N.: Effect of test methods and quality of concrete on bond strength of CFRP sheet. *Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceedings of the Third International Symposium*, vol. 1, Sapporo, Japón, (1997), pp. 265-270.

Izumo, K., Asamizu, T., Saeki, N., Shimura, K.: "Bond behavior of aramid and carbon fiber sheet". *Concrete Research Technology*, JCI (1998), vol. 9, nº 2, pp. 1-7 .

JSCE-E545-2000, Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (Japanese Society of Civil Engineer).

JSCE-E543-2000, Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (Japanese Society of Civil Engineer).

Kanakubo, T., Yonemaru, K., Fukuyama, H., Fujisawa, M., Sonobe, Y.: "Bond performance of concrete members reinforced with FRP bars". *ACI International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures*, ACI. SP-138, September 1, 1993, Vancouver, pp.767–788.

Katz, A.: "Stress transfer between FRP laminates and concrete through deteriorated concrete surfaces". *Journal of Composites for Construction*, vol. 11, n° 4, (2007) pp. 410-418.

Karbhari, V., and Zhang, S.: "E-Glass/Vinylester Composites in Aqueous Environments – I: Experimental Results." *Applied Composite Materials*, vol. 10, n° 1 (2003), pp. 19-48.

Khalifa, A., Gold W., Nanni, A., ABDEL A.: "Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members". *Journal of Composites for Construction*, vol. 2, n° 4 (1998), pp. 195-202.

Ko, H., and Sato, Y.: "Bond stress–slip relationship between FRP sheet and concrete under cyclic load". *Journal of Composites for Construction*, vol. 11, n° 4 (2007), pp. 419–26.

Ko, H., Mathys, S., Palmieri, A., Sato, Y: "Development of a simplified bond stress–slip model for bonded FRP–concrete interfaces". *Construction and Building Materials*, vol. 68 (2014), pp. 142–157.

Leung, C., Klenke, M., Tung W., Luk H.: "Determination of nonlinear softening behavior at FRP Composite/Concrete interface". *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 132, n° 5 (2006), pp. 498-508.

Li, L., Guo, Y., Liu, F.: "Test analysis for FRC beams strengthened with externally bonded FRP sheets". *Construction and Building Materials*, vol. 22, n° 3 (2008), pp. 315-323.

Liu, Y., He, J., Fan, H., Chen, A.: "Experimental study on flexural behaviour of hybrid GFRP/ concrete bridge deck". *CICE 2010 - The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering* September, (2010), Beijing, China, pp. 27-29.

Lorenzis, L., Miller, B., Nanni, A.: "Bond of fiber-reinforced polymer fibers to concrete". *ACI Materials Journal*, vol. 98, n° 3 (2001), pp. 256–64.

Lu, X., Teng, J., Ye L., Jiang, J.: "Bond-slip models for FRP sheets/plate-to concrete interfaces". In: *Proceedings of 2nd International Conference of Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction (ACIC2004)*, Cambridge, England, (2004) pp. 152–61.

Lu, X., Teng, J., Ye L., Jiang, J.: "Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete". *Engineering Structures*, vol. 27, nº 6 (2005), pp. 920–37.

Maeda, T., Asano, Y., Sato, Y., Ueda, T., Kakuta, Y.: "A study on bond mechanism of carbon fiber sheet". In: *Proceedings of Third International Symposium of Nonmetallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, vol. 1, (1997) pp. 279–86.

Malvar, L., Cox, J., Cochran, K.: "Bond between carbon fiber reinforced polymer bars and concrete I: Experimental study". *Journal of Composites for Construction*, vol. 7, nº 2, (2003), pp. 154–163.

Marí, A., Oller, E., Bairán, J.: "Predicting the Response of FRP-Strengthened Reinforced-Concrete Flexural Members with Nonlinear Evolutive Analysis Models". *J. Compos. Constr.* Vol 15 (2011), pp. 799-809.

Mazzotti, C., Savoia, M., Ferracuti, B.: "An experimental study on delamination of FRP plates bonded to concrete". *Construction and Building Materials*, vol. 22, (2008), pp. 1409–1421.

Mazzotti, C., Savoia, M., Ferracuti, B.: "A new single-shear set-up for stable debonding of FRP–concrete joints". *Construction and Building Materials*, vol. 23, nº 4 (2009), pp. 1529-1537.

Micelli, F., and Nanni, A.: "Durability of FRP rods for concrete structures." *Construction and Building Materials*, vol. 18, nº 7 (2004), pp. 491-503.

Miravete, A., Mieres, J., Calvo, I., Ranz, D., Comino, P., Chiminelli, A., Cuartero, J., Tolosana, N.: "Estudio experimental de conectores de vidrio AR para puentes de materiales compuestos". *Materiales de Construcción*, vol. 56 nº 282 (2006), pp. 77-82.

Miravete, A., Larrodé, E., Castejón, L., Clemente, M.A., Lizaranzu, J., Cuartero, J., Revuelta, D., Millán, C., Gómez, V., Calvo, J., Tolosan, N., Peralta J.L.: "Materiales Compuestos" Tomo I. Ed. Reverté, S.A. ISBN 13: 978-84-921349-8-4. ISBN 10: 84-921349-8-4. (2007).

Mohamed, A., Oehlers, D., Griffith, M., Seracino, R.: "Interfacial stress transfer of near surface-mounted FRP-to-concrete joints". *Engineering Structures*, vol. 30, nº 7 (2008), pp. 1861-1868.

Monti, M., Renzelli, M., Luciani, P.: "FRP adhesion in uncracked and cracked concrete zones". In: *Proc. of 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures*. Singapore: World Scientific Publications, (2003), pp. 183-92.

Mukherjee, A. and Arwikar, S.: "Performance of externally bonded GFRP sheets on concrete in tropical environments. Part II: Microstructural tests." *Composite Structures*, vol. 81, nº 1 (2007), pp. 33-40.

Mutsuyoshi, H., Shiroki, K., Duc, N., Ishihama, T.: "2Composite Behavior of a Pultruded Hybrid CFRP-GFRP Beam with UFC Deck". CICE 2010 - *The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, September, Beijing, China, (2010), pp. 27-29.

Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta, T., Yoshizawa, H.: "Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete". *ACI Structural Journal*, vol. 98, nº 3 (2001), pp. 359-367.

Nanni, A., Bakis, E., Boothby, E.: "Test Methods for FRP-Concrete Systems Subjected to Mechanical Loads: State of the Art Review". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 14 (1995), pp. 524-588.

Neagoe, A.: "Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación". Capítulo 9. 1ª edición © 2014 *Omnia Science (Omnia Publisher SL)*, www.omniascience.com, ISBN: 978-84-941872-9-2.

Neubauer, U., and Rostasy, S.: "Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP-plates". *Proceedings of The Seventh International Conference on Structural Faults and Repair*, Edinburgh, Scotland, vol. 2 (1997), pp. 109-118.

Neubauer, U., Rostasy, S.: "Bond failure of concrete fiber reinforced polymer plates at inclined cracks-experiments and fracture mechanics model". In: *Proc. of 4th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, SP-188. Farmington Hills (MI): ACI, (1999), pp. 369-382.

Nguyen, H., Mutsuyoshi, H., Zatar, W.: "Push-out tests for shear connections between UHPFRC slabs and FRP girder". *Composite Structures*, vol. 118 (2014), pp. 528-547

Nguyen, H., Mutsuyoshi, H., Zatar, W.: "Hybrid FRP-UHPFRC composite giders: Part1-Experimental and numerical approach". *Composite Structures*, vol. 125 (2015), pp. 631-652

Oller, E.: "Peeling failure in beams strengthened by plate bonding. A design proposal". *PhD thesis*, Universitat Politècnica de Catalunya, (2005).

Perera, R., Recuero, A., Diego, A., López, C.: "Adherence analysis of fiber-reinforced polymer strengthened RC beams". *Computers & Structures*, vol. 82, nº 23-26 (2004), pp. 1865-1873.

Popovics, S.: "A numerical approach to complete stress-strain curve of concrete". *Cement and Concrete Reserarch*, vol. 3 (1973), pp. 583-99.

Sahuquillo, O., Salvador, M., Segovia, F., Benavente, R., Sanz, C.: "Respuesta frente a la degradación por inmersión en soluciones acuosas de materiales compuestos termoestables reforzados con fibra de vidrio." X Congreso Nacional de Materiales San Sebastián, vol. II (2008), pp. 751-754.

Sahuquillo Navarro, Oscar: "Estudio de la degradación de materiales compuestos base poliéster reforzados con fibra de vidrio en medios neutros y alcalinos". Tesis UPV 3783. DOI:10.4995/Thesis/10251/15191, (2012).

Salvador, M. D., Amigó, V., Sahuquillo, O., Antolinos, C., Segovia, F., Vicente, A., Sanz, C.: "Análisis de la degradación de materiales reforzados con fibra de vidrio de matriz polimérica en medios básicos". *Materiales Compuestos*, Valencia, (2005), pp. 89-96.

Santo, A., Bittencourt, T., Gettu, R.: "Experimental analysis of interface between CFRP and concrete using cylindrical specimens". In: *Proceedings of FRPRCS-6*, Singapore, July, (2003), pp. 173-82.

Sato, Y., Kimura, K., Kobatake, Y.: "Bond behaviors between CFRP sheet and concrete". *Journal Structural Construction Engineering*, AIJ, nº 500 (1997), pp. 75-82.

Sato, Y., Asano, Y., Ueda, T.: "Fundamental study on bond mechanism of carbón fiber sheet". *Concrete library international*, JSCE, vol. 37, (2001), pp. 97-115.

Savioa, M., Farracuti, B., Mazzotti, D.: "Non-linear bond-slip law for FRP concrete interface". In: *Proc. of 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures*. Singapore: World Scientific Publications, (2003), pp. 163-72.

Sharma, S., Mohamed, A., Goldar D., Sikdar P.: "Plate-concrete interfacial bond strength of FRP and metallic plated concrete specimens". *Composites: Part B: Engineering*, vol. 37, nº 1 (2006), pp. 54-63.

Seara-Paz, S., González-Fonteboda, B., Eiras-López, J., Herrador, M.: "Bond behavior between steel reinforcement and recycled concrete". *Materials and Structures*, vol. 47 (2014), pp. 323-334.

Serbescu, A., Guadagnini, M., Pilakoutas, K.: "Standardised double-shear test for determining bond of FRP to concrete and corresponding model development". *Composites: Part B*, vol. 55 (2013), pp. 277-97.

Silva, M., and Biscaia, H.: "Degradation of bond between FRP and RC beams". *Composite Structures*, vol. 85, nº 2 (2008), pp. 164-174.

Sultania, M., Yadaw, S., et al.: "Laminates based on vinyl ester resin and glass fabric: A study on the thermal, mechanical and morphological characteristics". *Materials Science and Engineering: A* 527(18-19), (2010), pp. 4560- 4570.

Takeo, K., Matsushita, H., Makizumi, T., Nagashima, G.: "Bond characteristics of CFRP sheets in the CFRP bonding technique". *In: Proc. of Japan Concrete Institute*, vol. 19, nº 2 (1997), pp. 1599-1604.

Taljsten, B.: "Strengthening of concrete prisms using the plate-bonding technique". *International Journal of Fracture*, vol. 82, nº 3 (1996), pp. 253-266.

Tepfers, R.: "Bond clause proposal for FRP-bars/rods in concrete based on CEB/FIP Model Code 90. Part 1: design bond stress for FRP reinforcing bars". *Structural Concrete*, vol. 7, nº 2 (2006), pp. 47-55.

Toutanji, H., Saxena, P., Zhao, L., Ooi, T.: "Prediction of interfacial bond failure of FRP-concrete Surface". *Journal of Composites for Construction*, vol. 11, nº 4 (2007), pp. 427-436.

Toutanji, H. and Ortiz, G.: "The effect of surface preparation on the bond interface between FRP sheets and concrete members". *Composite Structures*, vol. 53, nº 4 (2001), pp. 457-462.

Ueda, T., Sato, Y., Asano, Y.: "Experimental study on bond strength of continuous carbon fiber sheet". *In: Proc. of 4th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, SP-188, Farmington Hills (MI), ACI, (1999), pp. 407-416.

Ueda, T., and Dai, J.: "Interface bond between FRP sheets and concrete substrates: properties, numerical modeling and roles in member behaviour". *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 7, nº 1 (2005), pp. 27–43.

Wan, B., Sutton, M., Petrou, M., Harries, K., Ning, U.: "Investigation of bond between fiber reinforced polymer and concrete undergoing global mixed mode I/II loading". *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, vol. 130, nº 12 (2004), pp. 1467-1475.

Won, J., Lee, S., et al.: "The effect of exposure to alkaline solution and water on the strength-porosity relationship of GFRP rebar." *Composites Part B: Engineering*, vol. 39, nº 5 (2008), pp. 764-772.

Xiao, J., Li, H., Zha Q.: "Experimental study on bond behavior between FRP and concrete". *Construction and Building Materials*, vol. 18, nº 10 (2004), pp. 745-752.

Xu, F., Guan, J., Chen, Y.: "Bond strength between CFRP sheets and concrete". *FRP Composites in Civil Engineering, vols. I and II, proceedings*, (2001), pp. 357-364.

Yalim, B., Kalayci, A., Mirmiran, A.: "Performance of FRP strengthened RC beams with different concrete surface profiles". *Journal of Composites for Construction*, vol. 12, nº 6 (2008), pp. 626-634.

Yao, J., Teng, J., Chen J.: "Experimental study on FRP-to concrete bonded joints". *Composites part B: Engineering*, vol. 36, nº 2 (2005), pp. 99- 113.

Yilmaz, V.: "Chemical attack on alkali-resistant glass fibres in a hydrating cement matrix: characterization of corrosion products." *Journal of Non - crystalline Solids*, vol. 151, nº 3 (1992), pp. 236.

Yin, J., and Wu, Z.: "Structural performances of short steel-fiber reinforced concrete beams with externally bonded FRP sheets". *Construction and building materials*, vol. 17, nº 6-7 (2003), pp. 463-470.

Yoshizawa, H., Wu, Z., Yuan, H., Kanakubo, T.: "Study on FRP–concrete interface bond performance". *Trans. JSCE 2000*, nº 662/V-49, pp. 105–119.

Zhao, H., Zhang, Y., Zhao, M.: "Research on the bond performance between CFRP plate and concrete". *In: Proc of 1st Conference on FRP–Concrete Structures of China*, (2000), pp. 247–253.

ANEXO I

IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

ANEXO I.- IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

AI.1.- INTRODUCCIÓN

El objetivo es el estudio del comportamiento a flexión (rotura a 4 puntos) de vigas híbridas, realizadas con perfiles pultrusionados de GFRP con una capa de compresión de hormigón reforzado con fibras metálicas. Se pretende reforzar todos los posibles modos de fallo, cortante en el GFRP, rotura por flexión en el GFRP, aplastamiento en los apoyos tanto de hormigón como GFRP en la entrada en carga, rotura por cortante en los apoyos de carga en el hormigón, esfuerzos rasantes entre ambos materiales, y analizar el comportamiento de la incorporación de las fibras metálicas en la capa comprimida. En algún momento, el perfil híbrido tendrá que mostrar su parte más débil, lo que permitirá identificar el problema en estos sistemas estructurales planteados.

La combinación de estos dos tipos de materiales tan dispares en cuanto a su comportamiento estructural hace que se ubiquen en una sección estructural donde mejor se comporten, esto es, el hormigón en la zona comprimida y el GFRP en la zona traccionada.

El modo de fallo por problemas de pandeo en la zona comprimida del GRFP está solucionado con la incorporación de la capa de compresión de hormigón. En esta nueva composición de viga, ésta puede romper por compresión (aplastamiento de la capa de compresión) o por tracción (en el ala del perfil de GFRP). Los GRFP son materiales cuyo comportamiento en rotura es frágil, comportamiento no deseable en estructuras de ingeniería civil y de edificación. Por ello el programa experimental se basa en el diseño de una viga híbrida donde la rotura se produce en la capa comprimida, absorbida por el hormigón, evitando los demás modos de fallo. Esto lleva a la confección de una viga híbrida formada por dos UPN-120.36.3 de 1920 mm de longitud, unidos por las almas para formar un IPE con resinas de poliéster y tornillería, del mismo modo que la unión de la capa de compresión con el perfil GRFP. "Blindados" los modos de fallo no deseables, se procede al estudio de la influencia de los hormigones reforzados con fibras de acero, ya que las fibras confieren, en el modo de fallo de aplastamiento por compresión del hormigón, ductilidad a la rotura de la sección y, en consecuencia, de la viga híbrida.

AI.2.- HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES, HRF+HAC+HAR

Se confecciona un hormigón de alto rendimiento, reforzado con fibras metálicas y con propiedades reológicas de autocompactabilidad. Para ello se utilizan los materiales seleccionados: agua, cemento, arena 0/2, arena 0/4, grava 6/12, fibras Dramix 60/30BP, fibras Drámix OL 13/0.16 y aditivo superfluidificante Sika Viscocrete®-20 HE; no se utilizan fillers ya que las arenas y el alto contenido de cemento portan un alto contenido en finos al material.

La programación consiste en la dosificación de una matriz estable para un hormigón de alta resistencia (HAR) de 80 MPa, a 28 días, con 750 mm de escurrimiento como amasada patrón; a esta amasada patrón se le incorporan cantidades de fibras metálicas de 30 kg/m³, 60 kg/m³ y 120 kg/m³, respectivamente, estableciendo así tres tipologías de hormigón reforzado con fibras (HRF), un nivel básico, uno medio y otro de alto rendimiento, respectivamente (véase la Tabla A1.1).

Tabla A1.1 Dosificación del hormigón en función de la cantidad de fibras de refuerzo en kg/m³.

Dosificación Kg/m ³	Dr= g/cm ³	HRF_0	HRF_30	HRF_60	HRF_120
CEM	3,1	500	500	500	500
H ₂ O	1	195	195	195	195
ARENA 0/2	2,6	507,5	507,5	507,5	507,5
ARENA 0/4	2,6	507,5	507,5	507,5	507,5
GRAVA 6/12	2,6	650	650	650	650
Sika Viscocrete 20HE 1%	1,09	5	5	5	5
Dramix OL 13/0,16_40%	7,8	0	12,00	24,00	48,00
Dramix 80/30 BP_60%	7,8	0	18,00	36,00	72,00
%Grava	-	0,39	0,39	0,39	0,39
Volumen lt	-	1001	1001	1001	1001
Peso Matriz Kg/m ³	-	2360	2360	2360	2360
A/C		0,40	0,40	0,40	0,40

Desde el punto de vista de la reología, el hormigón autocompactante evita el proceso de vibrado y presenta una gran trabajabilidad en la colocación en el molde.

La confección de una matriz de alta resistencia implica una deformación unitaria en rotura de 0.025, menor que en el caso de un hormigón de resistencia convencional (0.035). A pesar de ello, es adecuado realizar la matriz de alta resistencia para que el anclaje de las fibras sea muy bueno, lo que permite el empleo de dosificaciones altas de fibras (véase la Tabla A1.2).

Tabla A1.2 Propiedades mecánicas del HRF-80 /0/30/60/120 kg/m³.

MPa	HRF_0	HRF_30	HRF_60	HRF_120
F_c cilíndrica	73,77	77,65	79,69	82,76
F_c cubica	89,35	87,11	95,17	102,55
E_c	37070	39177	39195	39104
F_{c,flex}	5,40	10,00	11,45	16,49
F_{c,flex} Matriz	5,40	6,36	6,36	8,00
F_{I,COMD} 0,05	5,40	6,36	6,36	8,00
F_{c,flex} F1 CMOD 0,5 mm	1,60	8,00	9,90	16,00
F_{c,flex} F2 CMOD 1,5mm	1,50	9,90	11,38	16,00
F_{c,flex} F3 CMOD 2,5 mm	0,50	9,50	10,50	15,03
F_{c,flex} F4 CMOD 3,5 mm	0,00	9,00	9,50	13,50
T50 _ segundos	3	5,67	*	*
slump-flow _mm	700	717	*	*

* la masa rigidiza rápidamente, no es viable realizar el escurrimiento, debido a las altas temperaturas en el laboratorio.

Los ensayos que se realizan para la caracterización del HRF son los de compresión simple, flexión en tres puntos con entalla y tracción indirecta con el ensayo brasileño.

Estos hormigones son caracterizados, obteniendo datos reológicos cuantitativos en su estado fresco y de sus capacidades mecánicas, tal y como se resumen en la Tabla A1.2 y en las Figuras A1.1 y A1. 2, a 28 días de edad de curado en cámara húmeda.

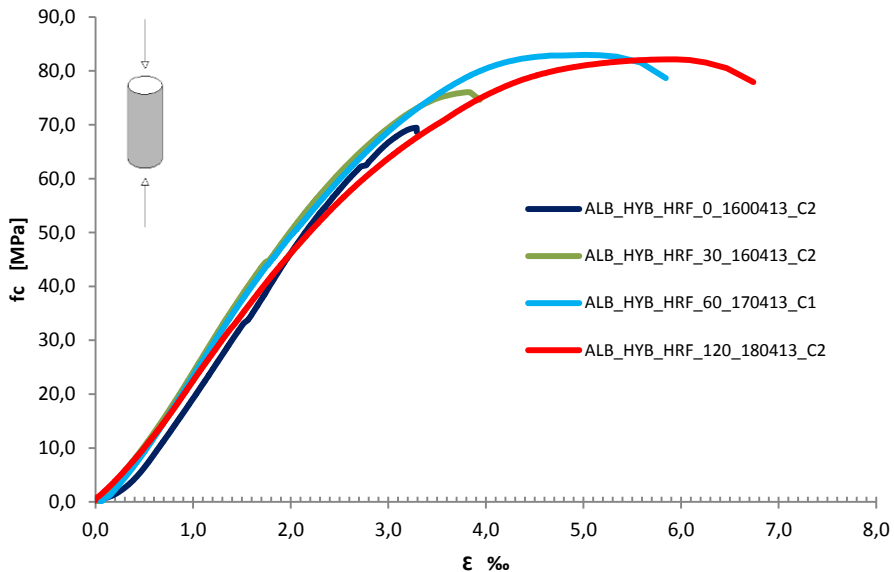


Figura A1.1 Curva tensión-deformación en compresión de los distintos HRF a 28 días.

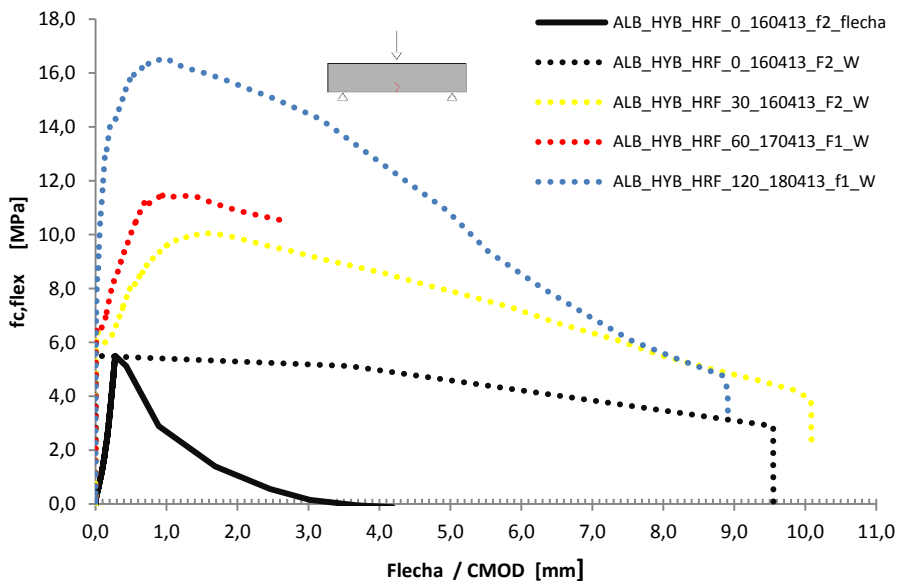


Figura A1.2 Curvas tensión-deformación de los HRF ensayo a flexión en tres puntos a 28 días.

En cuanto a las propiedades reológicas del hormigón en estado fresco, los ensayos a realizar son los del "slump flow" o escurrimiento y la medición del tiempo T_{50} , el ensayo del embudo en V; el ensayo de la caja L-Box y el anillo japonés no se realizan, ya que en el tipo de elemento estructural a

hormigonar no existen armaduras y los conectores no entorpecen el hormigonado ya que se encuentran en posición I según EHE-08.

AI.3.- PERFILES PULTRUSIONADOS

Los perfiles pultrusionados han sido fabricados por la empresa “Fibrotec, S.L.” con las condiciones expuestas en la Tabla A1.3. Las características del material GFRP y de los perfiles UPN no varían de unos casos a otros, ya que no se pretende estudiar la influencia del perfil pultrusionado de GFRP, sino estudiar la influencia de las fibras dentro del hormigón.

Tabla A1.3 Propiedades mecánicas de los laminados de GFRP, datos Fibrotec, S.L.

Propiedad	Siglas	MPa	NORMAS
Módulo de elasticidad	E 0°	23.000/30.000	EN 527-4
Módulo de elasticidad	E 90°	8.500	EN 527-4
Módulo de Cortante	G	3.000	ASTM D2344-84
Módulo de Poisson	$\nu_{0^{\circ}, 90^{\circ}}$	0,23	
Módulo de Poisson	$\nu_{90^{\circ}, 0^{\circ}}$	0,09	
Resistencia a Flexión, 0°		240	EN ISO 14125
Resistencia a Flexión, 90°		100	EN ISO 14125
Resistencia a Tracción, 0°		240	EN 527-4
Resistencia a Tracción, 90°		50	EN 527-4
Resistencia a Compresión, 0°		240	EN ISO 14126
Resistencia a Compresión, 90°		70	EN ISO 14126
Resistencia a Cortante		25	ASTM D2344-84

AI.4.- VIGAS HÍBRIDAS

Se fabrican 4 vigas híbridas, mediante 2 UPN de GFRP unidos a tope en el alma mediante una resina de poliéster insaturado ortoftálico, además de reforzarlo mediante tornillería de métrica 4 mm, según se aprecia en la disposición de la Figura A1.3. Aunque se han barajado diversos tipos de combinaciones de perfiles, la disposición geométrica utilizada corresponde a un perfil tipo I.



Fig. A1.3 4 Vigas de 2 UPN de GFRP pultrusionados unidos a tope, sin capa de compresión.

La sección tipo en I, aunque no presenta la mejor inercia en el eje x, no es necesario que sea dotada de más área en la zona traccionada ya que el GFRP posee una alta capacidad mecánica; por ello no será la zona de fallo de la viga. El modo de fallo se producirá en la zona comprimida en la capa de compresión del hormigón, pero para ello se deben “blindar” y reforzar aquellas zonas donde se pueden producir otros fallos.

La sección tipo en I, presenta las siguientes ventajas:

- 1.- Al poseer doble alma tiene un mejor comportamiento a cortante; además, la viga será más rígida, mejorando así la baja rigidez aportada por el material GFRP.
- 2.- Mejor comportamiento de la viga frente a las cargas puntuales, ya que están centradas en el alma, y no presenta el típico problema de la viga cajón, en la que pueden alabearse o aplastarse las alas y producirse el fallo por cargas puntuales en la viga.
- 3.- La unión química y mecánica de los dos perfiles es muy sencilla y eficaz, frente a la sección tipo cajón, ya que posee menos superficie de contacto en sus alas.
- 4.- La aplicación en obra es más fácil, pues unir mecánicamente vigas en I en su alma es más sencillo que unir vigas de sección tipo cajón, extrapolándose al modo de unión de viguetas transversales de un entrevigado de una estructura.

En cuanto a la posibilidad de alabeo de las alas y torsión del ala y alma, se colocarán unos rigidizadores pultrusionados de GFRP del tipo U-50.25.4, en los puntos de aplicación de las cargas y los apoyos.

La base de todo sistema híbrido es que la unión debe ser perfecta. Estas estructuras están compuestas por dos materiales distintos, que potencian la capacidad estructural del sistema, siendo fundamental que los dos materiales experimenten deformaciones conjuntas, por lo que su unión debe ser perfecta. Esta unión se realiza por medios mecánicos y químicos; esto es, se colocan conectores de métrica 4 grado 6.6, y una resina epoxi (Sikadur-31 CF) en el ala superior del perfil de GRFP, con el fin de garantizar al máximo la unión entre el GRFP, y el HRF.

Se protege esta zona evitando el modo de fallo por cizalladura entre los dos materiales. Del mismo modo, se refuerza la unión de las almas con resina de poliéster insaturado ortoftálico y tornillería métrica 4 grado 6.6, forzando a la sección a alcanzar sus límites estructurales, pudiendo estudiar la influencia del HRF.

El conjunto de resultados que se pretenden obtener se muestran de modo esquemático en la Tabla A1.4:

Tabla A1.4 Sensores/parámetros de caracterización de vigas híbridas GFRP+HRF.

GRÁFICAS caracterización:	SENSORES DESPLAZAMIENTO
1.- Gráfico fuerza-flecha	LVDT 3
2.- Posición eje neutro-estado de carga	SG1,SG2, SG3,SG4, SG5, SG6, SG7 SG, SG8, SG9
3.- Gráfico flecha-posición viga	LVDT 2, LVDT 3, LVDT 4
4.- Gráfico deformación-fuerza	LVDT3, SG1,SG2, SG3,SG4, SG5, SG6, SG7 SG, SG8, SG9
6.- Gráfico fuerza-deslizamiento	LVDT 1, SG2, SG3,SG4, SG5
7.- Pandeo lateral	LVDT 6

Los cuatro tipos de viga, según se muestran en la Tabla A1.5, son la HYB_HRF_0 como viga patrón, y la HYB_HRF_30, HYB_HRF_60 y HYB_HRF_120, que son las que incorporan fibras en 30, 60 y 120 kg/m³ que confinarán la cabeza de compresión de la sección forzando al hormigón a una rotura dúctil y, por tanto, al fallo del sistema híbrido de modo que no sea frágil.

Tabla A1.5 Tipología de vigas híbridas GFRP+HRF.

Material	HYB_HRF_0	HYB_HRF_30	HYB_HRF_60	HYB_HRF_120
GFRP				
Perfil tipo	2UPN-120.36.3	2UPN-120.36.3	2UPN-120.36.3	2UPN-120.36.3
Longitud [mm]	1920	1920	1920	1920
Altura [mm]	120	120	120	120
Base [mm]	72	72	72	72
Espesor alma [mm]	6	6	6	6
Espesor alas [mm]	3	3	3	3
HRF				
Perfil tipo	Rectángulo	Rectángulo	Rectángulo	Rectángulo
Base [mm]	90	90	90	90
Altura [mm]	50	50	50	50
Fibras [Kg/m ³]	0	30	60	120
UNIÓN				
Almas UPN	Poliéster + tornillería M4	Poliéster + tornillería M4	Poliéster + tornillería M4	Poliéster + tornillería M4
Alas UPN/HRF	Epoxi + tornillería M4	Epoxi + tornillería M4	Epoxi + tornillería M4	Epoxi + tornillería M4
Rigidizadores	UPN 50.25.4 GFRP	UPN 50.25.4 GFRP	UPN 50.25.4 GFRP	UPN 50.25.4 GFRP
Ensayo	Flexión cuatro puntos	Flexión cuatro puntos	Flexión cuatro puntos	Flexión cuatro puntos

En las Figuras A1.4 y A1.5 se muestra la disposición de los captadores de desplazamiento (LVDT) y las bandas extensométricas (SG), así como la geometría y disposición de la tornillería, apoyos, cargas y rigidizadores en la sección tipo y a lo largo de la viga de GFRP+HRF.

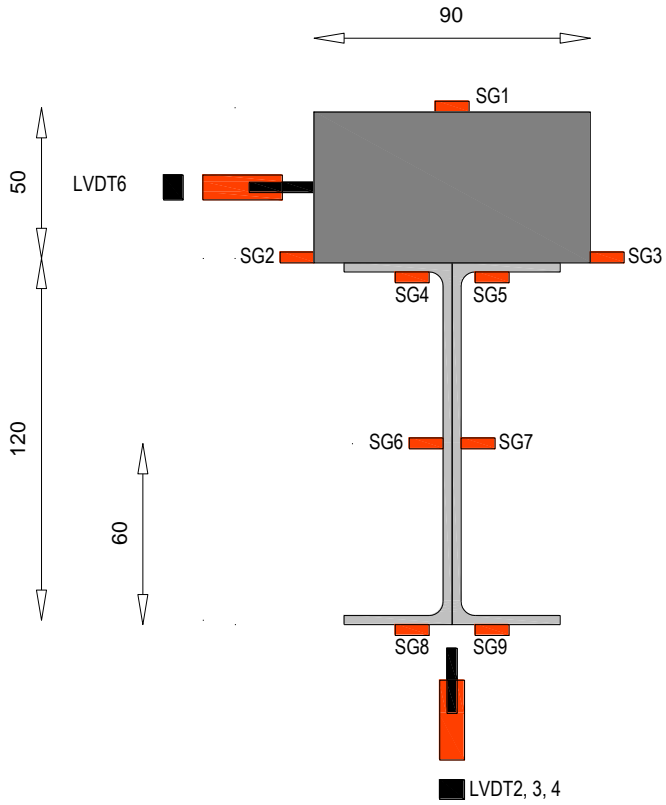


Fig. A1.4: Sección transversal de la viga híbrida.
 Ubicación de las bandas extensométricas y LVDT. Cotas en mm.
 Sin escala.

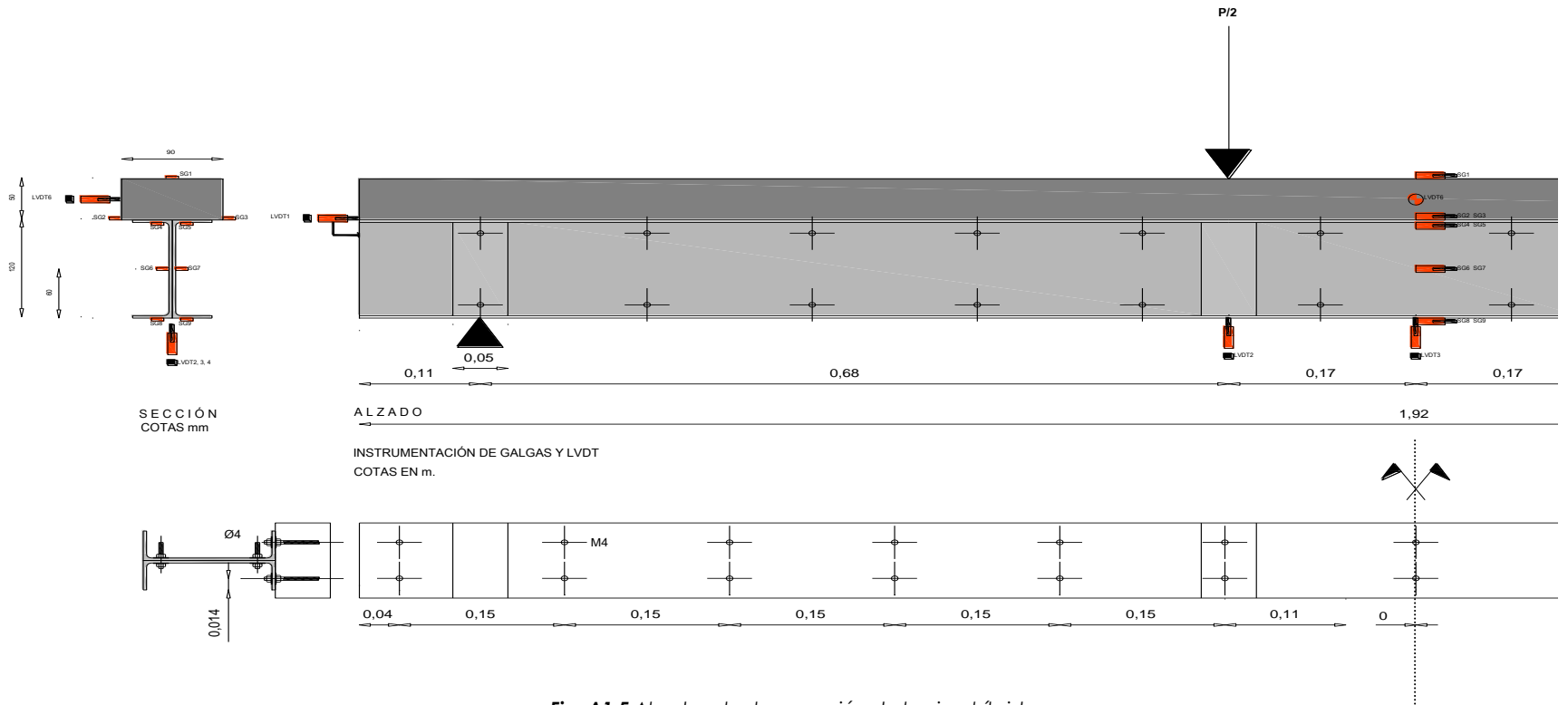


Fig. A1.5 Alzado, planta y sección de la viga híbrida.

Ubicación de las bandas extensométricas y LVDT. Cotas en mm. Sin escala.

AI.5.- ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LAS VIGAS HÍBRIDAS

AI.5.1.- ENSAYOS Y ANÁLISIS DE LA VIGAS HÍBRIDAS

Se presentan los ensayos y resultados de las distintas vigas híbridas de GFRP y HRF, analizando los casos de menor a mayor cantidad de fibras incorporadas al hormigón.

AI.5.1.1.- VIGA HIBRIDA HYB_HRF_0

Viga híbrida patrón en la que el hormigón de la capa de compresión no posee cantidad alguna de fibras metálicas. En la Figura A1.6 se observa la instrumentación y el pórtico para la rotura a flexión a cuatro puntos de la viga. La velocidad de carga es aplicada bajo deformación (flecha) constante de 0.2 mm/minuto.



Fig. A1.6 Viga híbrida HYB_HRF_0 patrón, ensayo a flexión a 4 puntos.

En la Figura A1.7 se muestran las deformaciones medidas con las bandas extensométricas. La posición del eje neutro, a 39.54 mm desde el extremo de la cabeza de compresión, determina que las bandas extensométricas números 3, 4 y 5 van a estar traccionadas y que la banda extensométrica nº 1 estará en compresión. La posición del eje neutro no varía hasta una carga de unos 93 kN, poco antes de la rotura, como se aprecia en la banda extensométrica nº 2, ubicada en la zona del eje neutro; si bien a los 40 kN empieza a estar traccionada (sube el eje neutro) y a los 93 kN pasa a estar comprimida; a partir de los 93 kN de carga el eje neutro baja un poco hasta que se produce la rotura a 99.60 kN.

La galga nº1, ubicada en la cabeza de compresión, tiene una deformación unitaria en rotura de 0,00274. La máxima deformación unitaria de tracción que experimenta el ala inferior de GFRP pultrusionada es 0.0076.

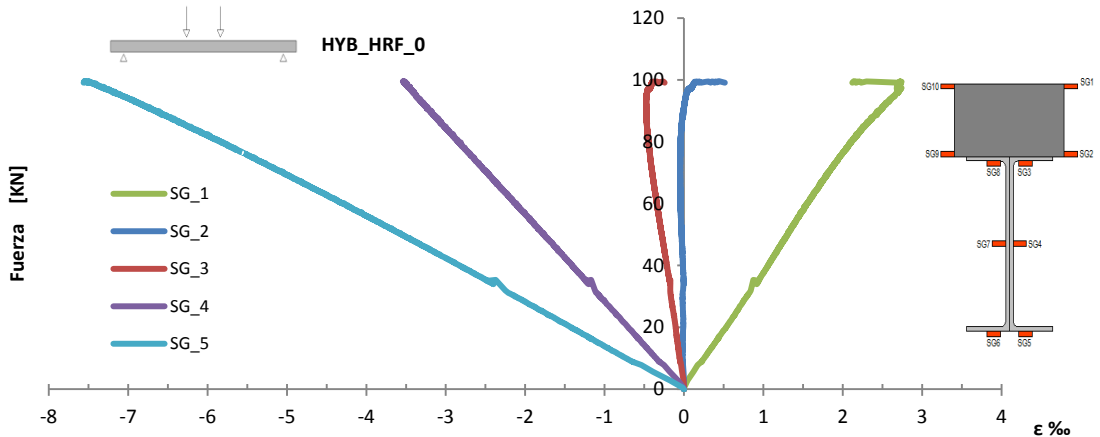


Fig. A1.7 Curvas fuerzas-deformación (galgas) de la viga híbrida ALB_HYB_HRF_0 patrón, en centro de luz.

La ubicación de los captadores LVDT es la misma para todos los ensayos a flexión en las vigas híbridas, tal y como se muestra en la Figura A1.8.

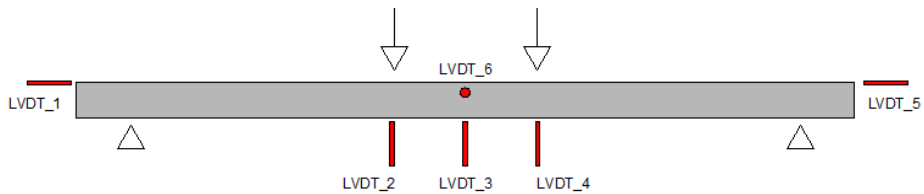


Fig. A1.8 Situación de los LVDT, en las vigas híbridas.

La Figura A1.9 muestra las curvas de fuerza en relación a la flecha en los captadores de desplazamiento LVDT nº 2, 3 y 4; los captadores LVDT nº 1 y 5 están midiendo el posible desplazamiento por esfuerzo rasante en los extremos de la viga híbrida, en la interfase hormigón y GFRP, y el LVDT nº 6 está midiendo un posible pandeo lateral producido por el esfuerzo de compresión en la capa de compresión de hormigón, que no sucede en este caso.

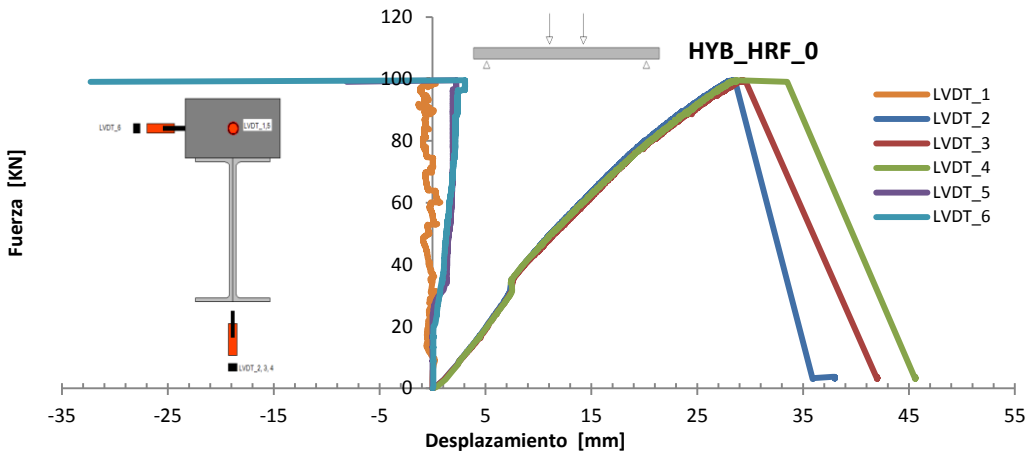


Fig. A1.9 Curvas fuerza-desplazamiento de la viga híbrida HYB_HRF_0 patrón, en centro de luz.

La rotura se produce tras alcanzar la carga de 99.60 kN, agotando la capa de compresión de hormigón en la zona entre los apoyos de las cargas, dando lugar a un estallido instantáneo que produce una rotura frágil del hormigón y, en consecuencia, de la viga híbrida (véase la Figura A1.10). Hay una importante flecha de 29.60 mm producida antes de la rotura y no hay problema en la interfase GFRP-hormigón ya que el hormigón ha quedado adherido al perfil y los conectores no se han roto. También se observa cómo tras el fallo hay un pandeo del alma del perfil de GFRP.



Fig. A1.10 Rotura a flexión 4 puntos de la viga híbrida HYB_HRF_0 patrón.

A1.5.1.2.- VIGA HIBRIDA HYB HRF 30

Viga híbrida formada en su capa de compresión por un hormigón reforzado con 30 kg/m³ de fibras metálicas. La velocidad de carga es

aplicada bajo deformación (flecha) constante de 0.2 mm/minuto, en todos los ensayos.

La carga máxima alcanzada de 65.97 kN es menor que la obtenida en la viga patrón, que alcanzó los 99.60 kN si bien se esperaba que superara la respuesta mecánica de la viga patrón, no ha sido así. La causa del fallo ha sido la rotura de la interfase entre el polímero GFRP y el hormigón de altas prestaciones. De las tres zonas existentes en la interfase (véase la Figura A1.11), el fallo está localizado en la interfase resina-hormigón, en tanto que la adherencia entre el ala del perfil de GFRP y la resina epoxi es buena, como se aprecia en la Figura A1.12.



Fig. A1.11 Esquema interfase GFRP-hormigón.



Fig. A1.12 Detalle de la interfase más débil resina epoxi-hormigón.

En la Figura A1.13 se muestran las deformaciones medidas con las bandas extensométricas, nº 4 y 5, traccionadas, y las bandas extensométricas nº 1 y 2, comprimidas. La posición del eje neutro no varía hasta una carga de unos 50 kN, como se aprecia en la banda extensométrica nº 3, ubicada en la zona del eje neutro. Si bien a los 50 kN empieza a estar comprimida (baja el eje neutro), en este momento el esfuerzo rasante inicia el fallo por adherencia, como se observa con un cambio de pendiente en el gráfico fuerza-flecha (véase la Figura A1.14) y con una rama de descenso donde

recupera la capacidad de carga (rama ascendente) debido al refuerzo de los conectores utilizados entre el perfil de GFRP y el hormigón.

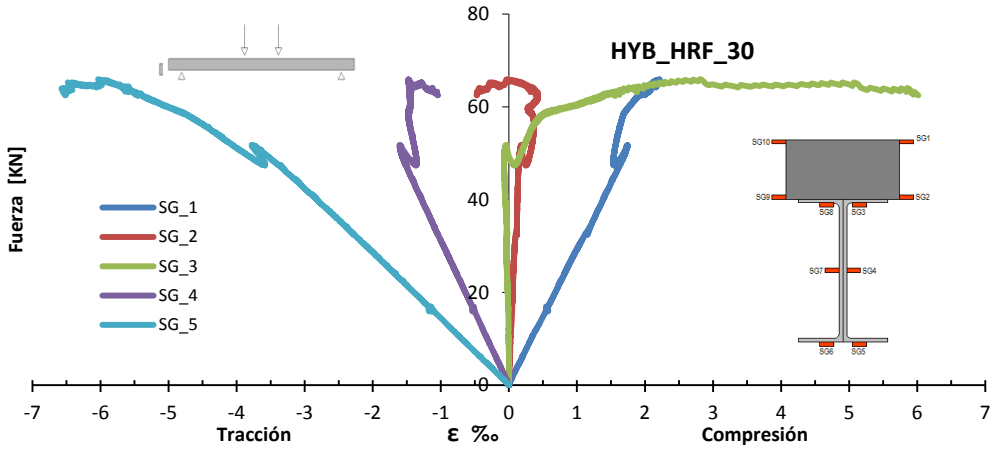


Fig. A1.13 Curvas fuerza-deformación de la viga híbrida HYB_HRF_30, en centro de luz.

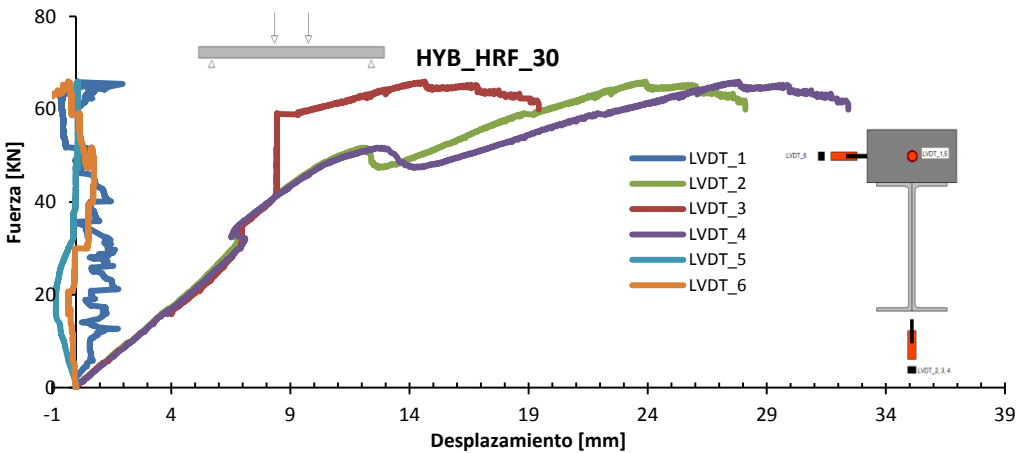


Fig. A1.14 Curvas fuerza-desplazamiento (LVDT) de la viga híbrida HYB_HRF_30, en centro de luz.

La galga nº 1, ubicada en la cabeza de compresión de HRF tiene una deformación unitaria en rotura por compresión del 0,00225. La máxima deformación unitaria de tracción que experimenta el ala inferior de GFRP pultrusionada es de 0.0065, menor que el máximo de 0.050 según caracterización del material.

La banda extensométrica nº 2, en el instante en que el rasante es más acusado, pasa a estar comprimida, lo que significa que el ala del perfil de GFRP pasa de estar trabajando a tracción a estar comprimida siendo la deformación alcanzada de 0.006. La banda extensométrica nº 2 se tracciona al estar independizado el hormigón del perfil por fallo de adherencia.

La Figura A1.14, donde se presenta la gráfica fuerza en relación a la flecha con los captadores de desplazamiento LVDT nº 2, 3 y 4, muestra los captadores de desplazamiento LVDT nº 1 y 5 que están midiendo el movimiento producido por el giro de la viga, mientras que el LVDT nº 6 está midiendo un posible pandeo lateral producido por el esfuerzo de compresión en la capa de compresión del hormigón.

En las Figuras A1.15 y A1.16, se aprecia cómo el fallo por adherencia de la resina epoxi y el hormigón es coartado por los conectores, no progresando la separación entre la capa de compresión de hormigón y el perfil de GFRP.



Fig. A1.15 Rotura a rasante en el ensayo a flexión 4 puntos de la viga híbrida HYB_HRF_30.



Fig. A1.16 Detalle de la rotura a rasante en el ensayo a flexión 4 puntos de la viga híbrida HYB_HRF_30.

A1.5.1.3.- VIGA HIBRIDA HYB HRF 60

Viga híbrida patrón con la capa de compresión con 60 kg/m^3 de fibras metálicas. En la Figura A1.17 se observa la instrumentación y el pórtico para la rotura de la viga. La velocidad de carga es aplicada bajo deformación constante de 0.2 mm/minuto .



Fig. A1.17 Viga híbrida HYB_HRF_60, ensayo a flexión a 4 puntos.

En la Figura A1.18 se muestran las deformaciones medidas con las bandas extensométricas números 2, 3, 4 y 5, traccionadas y la banda extensométrica nº 1, comprimida. La posición del eje neutro no varía hasta la rotura producida a 77.30 kN , tal y como se aprecia en las Figuras A1.18 y A1.19.

La banda extensométrica nº 1, ubicada en la cabeza de compresión, tiene una deformación unitaria en rotura del $0,00222$. La máxima deformación

unitaria de tracción que experimenta el ala inferior de GFRP pultrusionada es de 0.00597.

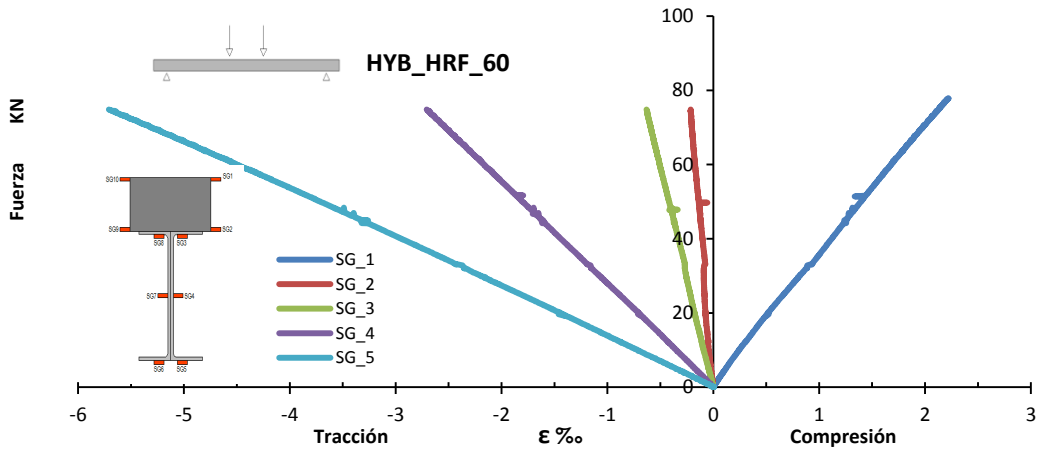


Fig. A1.18 Curvas fuerza-deformación (galgas) de la viga híbrida HYB_HRF_60, centro de luz.

La Figura A1.19, donde se presenta la gráfica fuerza en relación a la flecha, muestra que los captadores de desplazamiento LVDT n° 2, 3 y 4 registran una flecha a 18 mm, mientras que los captadores de desplazamiento LVDT n° 1 y 5 miden el deslizamiento por esfuerzo rasante en los extremos de la viga híbrida, en la interfase hormigón y GFRP, y el LVDT n° 6 registra 3 mm de pandeo lateral producido por el esfuerzo de compresión en la capa de compresión del hormigón.

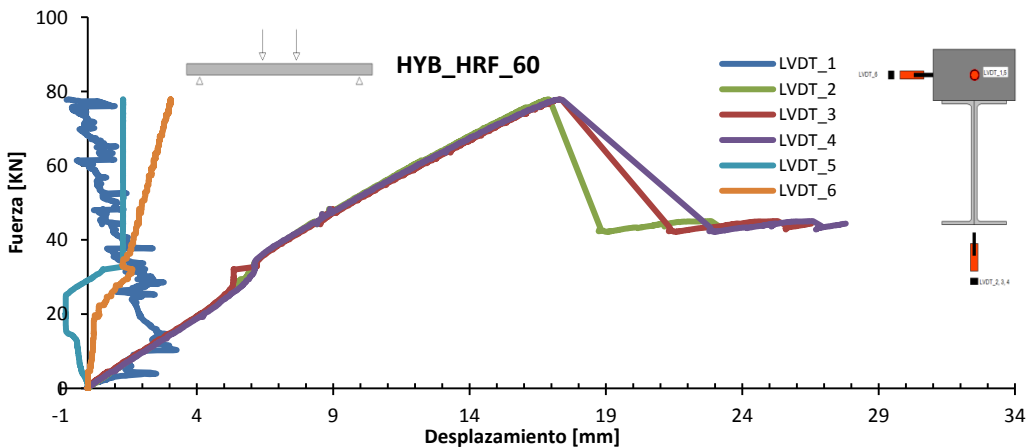


Fig. A1.19 Curvas fuerza-desplazamiento (LVDT) de la viga híbrida HYB_HRF_60, en centro de luz.

La rotura producida indica un fallo por esfuerzo rasante y pérdida de adherencia entre el perfil de GFRP y el hormigón (véase Figura A1.20), con una carga de 77.30 kN; la rotura es instantánea y frágil. Los conectores metálicos están sesgados por cortante, rotura que es de tipo frágil ya que el metal no presenta signos de estricción, tal y como se aprecia en la Figura A1.21.



Fig. A1.20 Rotura a flexión 4 puntos de la viga híbrida HYB_HRF_60.



Fig. A1.21 Rotura de los conectores en la viga híbrida HYB_HRF_60.

A1.5.1.4.- VIGA HIBRIDA HYB HRF 120

Viga híbrida con una capa de compresión de hormigón reforzado con 120 kg/m³ de fibras metálicas. En la Figura A1.22 se muestra una vista general de la viga en el pórtico de ensayo.



Fig. A1.22 Viga híbrida HYB_HRF_120, ensayo a flexión a 4 puntos.

En esta viga híbrida, al alcanzar los 23.5 kN (véase la Figura A1.23), las relaciones fuera-deformación cambian de pendiente debido a la rotura por esfuerzo rasante. Como el estado de carga es todavía bajo, los conectores siguen resistiendo el esfuerzo cortante hasta los 57.22 kN, momento en que la viga sufre una rotura frágil.

En la Figura A1.23 se muestran las deformaciones tomadas con las bandas extensométricas números 4 y 5, traccionadas y con las bandas extensométricas números 1 y 2, comprimidas. El eje neutro está en la posición de la banda extensométrica nº 3, a 50 mm de la zona superior de la capa de compresión, según los resultados experimentales, hasta la rotura por rasante a los 23.50 kN. A partir de los 23.50 kN, la banda extensométrica nº 3 empieza a estar comprimida. Al fallar la adherencia, la cara inferior del hormigón se tracciona tal como indica la banda extensométrica nº 2 para una deformación unitaria en tracción próxima a 0.003; a partir de ese instante, las medidas aportadas por dicha banda extensométrica quedan fuera de rango.

La banda extensométrica nº 1, ubicada en la cabeza de compresión, tiene una deformación unitaria en rotura del 0,00278. La máxima deformación unitaria de tracción que experimenta el ala inferior del perfil de GFRP es de 0.00759.

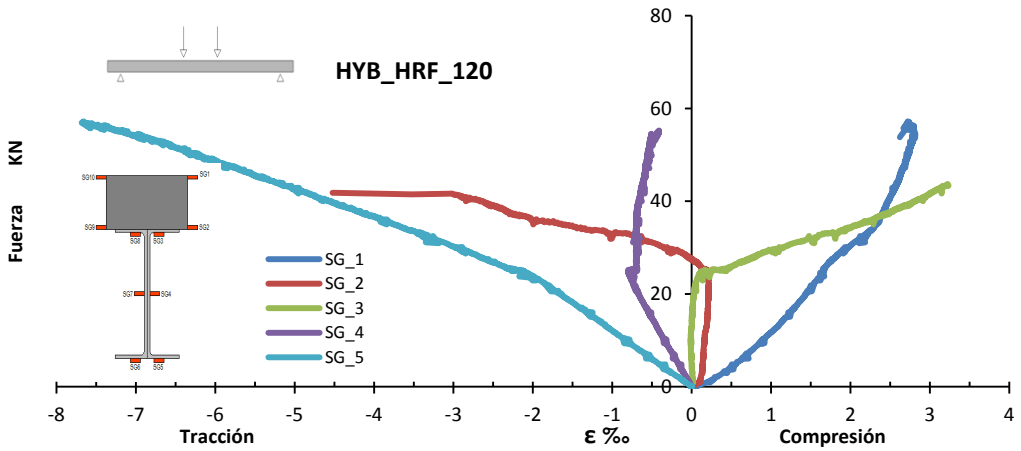


Fig. A1.23 Curvas fuerza-deformación (galgas) de la viga híbrida HYB_HRF_120, en centro de luz.

La Figura A1.24 muestra el gráfico de fuerza en relación a la flecha, donde los captadores de desplazamiento LVDT nº 2, 3 y 4 reflejan una flecha de 32-35 mm; los captadores de desplazamiento LVDT nº 1 y 5 están midiendo el desplazamiento en el extremo debido a la flexión y el esfuerzo rasante en los extremos de la viga híbrida, y el LVDT nº 6 no refleja movimiento por lo que el pandeo lateral no se produce.

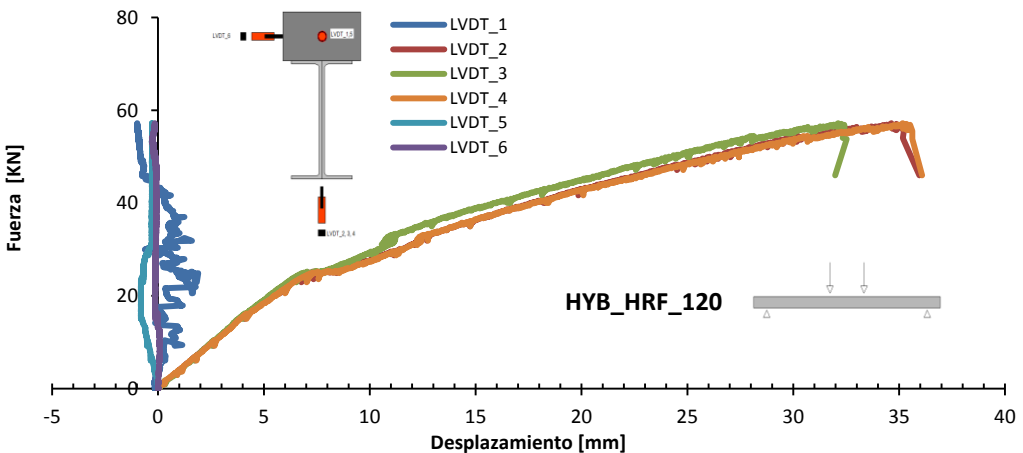


Fig. A1.24 Curvas fuerza-desplazamiento (LVDT) de la viga híbrida HYB_HRF_120, en centro de luz.

La rotura, producida con una carga de 57.22 kN, es súbita y frágil. Los conectores no están cortados, debido a la baja carga aplicada (véase la Figura A1.25).



Fig. A1.25 Rotura a flexión a 4 puntos de la viga híbrida HYB_HRF_120.

Se muestra en la Figura A1.26 la fisuración producida en el entorno del punto de aplicación de la carga.



Fig. A1.26 Rotura a flexión a 4 puntos de la viga híbrida HYB_HRF_120.

AI.5.1.5.- ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS VIGAS

En la Figura A1.27 y la Tabla A1.6 se comparan todas las vigas híbridas ensayadas.

Como era de esperar, las relaciones carga-flecha en las vigas híbridas hasta los 20 kN son muy similares, diferenciándose del caso la viga pultrusionada, donde la pendiente es menor, indicativo de la menor rigidez de ésta.

La colocación de la capa de compresión puede llegar a cuadruplicar la tenacidad, la rigidez y la resistencia última de la estructura, así como modificar el modo de rotura.

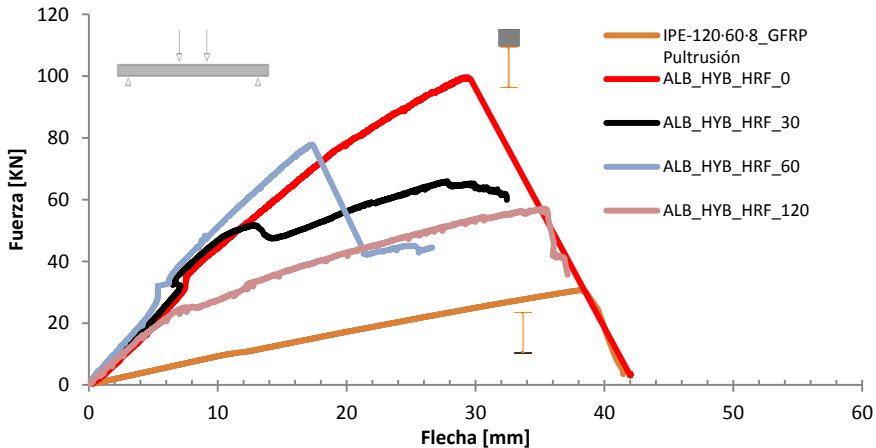


Fig. A1.27 Curvas carga-flecha en ensayo a flexión a 4 puntos de las viga híbridas.

El comportamiento de este tipo de vigas viene condicionado, según resultados experimentales, por su resistencia a flexión (99.60 kN), por la resistencia a cortante de los conectores (77.30 kN) o por su resistencia al esfuerzo rasante, variable entre 57.22 y 65.97 kN.

Es evidente en estos ensayos que la causa de la rotura se ha visto influenciada por un fallo en la adherencia del hormigón con la resina, por lo que la rotura ha sido frágil. Un comportamiento estructural interesante es el de la viga HYB_HRF_30 ya que avisa de la rotura por rasante con una rama de descenso, seguida de una rama de endurecimiento hasta llegar a la rotura, debido probablemente a que la rotura por rasante no ha sido súbita y los conectores han colaborado en la sujeción de la capa de compresión, siempre que no se alcancen los 77.30 kN.

En todas las vigas, una vez alcanzada la rotura, se procede a su descarga comprobando que la recuperación de la flecha es del 95%, debido al comportamiento elástico lineal, como se aprecia en la Figura A1.28.



Fig. A1.28 Recuperación de la flecha tras descarga después de ensayo a flexión a 4 puntos de las vigas híbridas.

Tabla A1.6 Características de vigas híbridas pultrusionadas y vigas pultrusionadas.

Tipo de viga	Sección [mm]	[kg]	Fc,flex [MPa]	Rigidez	Tipo de rotura	Causa rotura
IPE-120	120-60-8	6,50	31,00	Baja	Frágil	Aplastamiento ala GFRP en la aplicación de la carga.
HYB_HRF_0	120-72	32,83	99,60	Alta	Frágil	Agotamiento cabeza compresión
HYB_HRF_30	120-72	32,53	65,97	Media	Frágil	*Rasante. Fallo adherencia HRF-resina
HYB_HRF_60	120-72	33,58	77,30	Alta	Frágil	*Rasante. Fallo adherencia HRF-resina
HYB_HRF_120	120-72	34,05	57,22	Baja	Frágil	*Rasante. Fallo adherencia HRF-resina

Nota: *rotura tornillería

A1.6.-CONCLUSIONES

Después de los ensayos realizados, es evidente que el punto más débil en las vigas híbridas sometidas a flexión en los casos que se han analizado, es la conexión entre ambos materiales (perfil de GFRP y hormigón comprimido), pues el esfuerzo rasante ha provocado el modo de fallo frágil.

Este comportamiento es inaceptable en estructuras de ingeniería civil y edificación y pone de manifiesto que, si bien numerosos autores (Duc et al., 2010; Mutsuyoshi et al., 2010; Fam y Honickman, 2010; Deskovic et al., 1995; Chakraborty et al., 2011) indican que el problema es fácilmente predecible y solventable, en estos casos estudiados, como se ha podido comprobar, no lo es.

Por otro lado, algunos autores (Barros y Lebre, 2010; Liu et al., 2010; Chen y El-Hacha, 2010) sí analizan el modo de fallo de adherencia hormigón-FRP, con métodos no convencionales. Es por ello que se debe seguir trabajando en este campo para mejorar el diseño de la unión entre estos dos materiales y realizar propuestas de ensayo sencillas a tal efecto.

ANEXO II

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE *PULL-OUT*

ROTURAS: R1, R2 y R3

ANEXO II.- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PULL-OUT

AII.1.- INTRODUCCIÓN

En el presente anexo se muestran los resultados de todos los ensayos de *pull-out* para la caracterización de la adherencia.

Las probetas se identifican de la siguiente manera:

Ejemplo: 30_50/50_TEX2-M6-8.8_TEX7+RES_POS8_1CL_R1

- **30** Corresponde a la resistencia a compresión (f_c) del hormigón en MPa.
- **50** Es la anchura de la **sección** del perfil de **GFRP**, puede ser de 50 ó 25 mm.
- **50** Es la longitud de adherencia (L_{adh}) del perfil de GFRP; se han realizado pruebas con 25 y 50 mm.
- **TEX2** Corresponde al tipo de **fijación mecánica**, puede ser TEX1 o TEX2.
 - En los casos en que aparezcan las siguientes abreviaturas (RES, AR, TEX1, TEX2, TEX7, MIX=combinaciones) están representados los **tratamientos superficiales**.
- **M6-8,8 Métrica** de la tornillería y **grado**, se utilizan M4 (6.6) y M6 (8.8).
- En aquellos casos en que se aplica el postesado en la tornillería, el código **TEX2-2** equivale a "**TEX2-M6-8.8-40C**".
- **TEX7+RES** Tipo de variable de adherencia combinada con resina u otras variables.
- **POS8 Postesado** de la **tornillería**; se han aplicado dos tipos de par de apriete: 8 y 16 Nm.

- **1CL Modalidad** de ensayo de *pull-out*; se utilizan 4: 2C, 1CA, 1CE, 1CL.
- R1 Resultado del ensayo; se realizan tres ensayos por tipología de probeta.

Las curvas de tensión de adherencia-deslizamiento, llevan asociados un color determinado definidos a continuación:

- El color **marrón** representa la probeta **patrón** (PAT).
- El color **calabaza** representa la probeta con **resina** (RES).
- El color **azul** representa la probeta con **arenado** (AR).
- El color **rojo** representa la probeta con **TEX** (1,2 ó 7), dependiendo del grupo de estudio en el cual se presente.
- El color **negro** representa la probeta combinada con **TEX7 +RES** y en los grupos asociados a **TEX1 o TEX2 + RES**.
- El color **verde** representa la probeta combinada con **TEX7 + AR** y en los grupos asociados a **TEX1 o TEX2 + AR**.
- Las probetas que se les aplica un par 16 Nm aparecen representadas con una línea de puntos, a diferencia del par 8 Nm.

La presentación de resultados sigue el mismo orden que en el Capítulo VI "Resultados, análisis y discusión":

- Grupo 1 contacto directo del hormigón a dos caras (2C).
- Grupo 2 contacto directo del hormigón a una cara (1C).
- Grupo 3 contacto directo del hormigón a una cara libre (1CL).

AII.2.- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PULL-OUT

AII.2.1- GRUPO 1.- CONTACTO DIRECTO DEL HORMIGÓN A DOS CARAS, 2C

Influencia de las variables de adherencia resina (RES), arenado (AR), texturizado (TEX) y una combinación de estos (MIX).

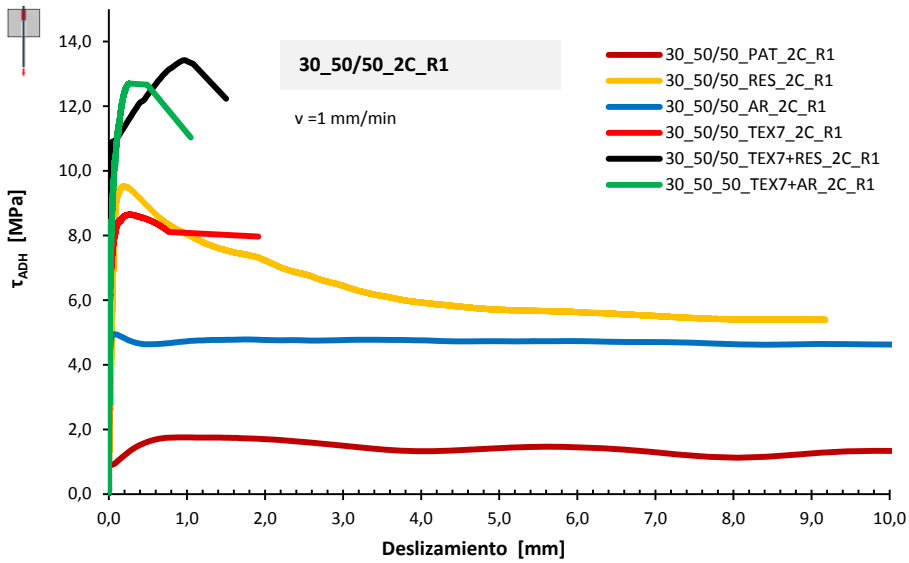


Fig. AII.1 Curvas τ/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Tabla AII.1 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_PAT_2C_R1	1	0,90	1,63	0,50	-	-	1,75	1,02	1,32	20.165
30_50/50_RES_2C_R1	2	1,88	9,52	0,18	-	-	9,52	0,18	5,92	160.816
30_50/50_AR_2C_R1	3	4,15	4,95	0,28	-	-	4,95	0,28	4,75	3.156
30_50/50_TEX7_2C_R1	3	5,93	8,65	0,28	-	-	8,65	0,28	-	61.801
30_50/50_TEX7+RES_2C_R1	3	6,88	12,36	0,50	-	-	13,42	0,95	-	16.817
30_50/50_TEX7+AR_2C_R1	3	4,77	12,70	0,26	-	-	12,70	0,26	-	25.055

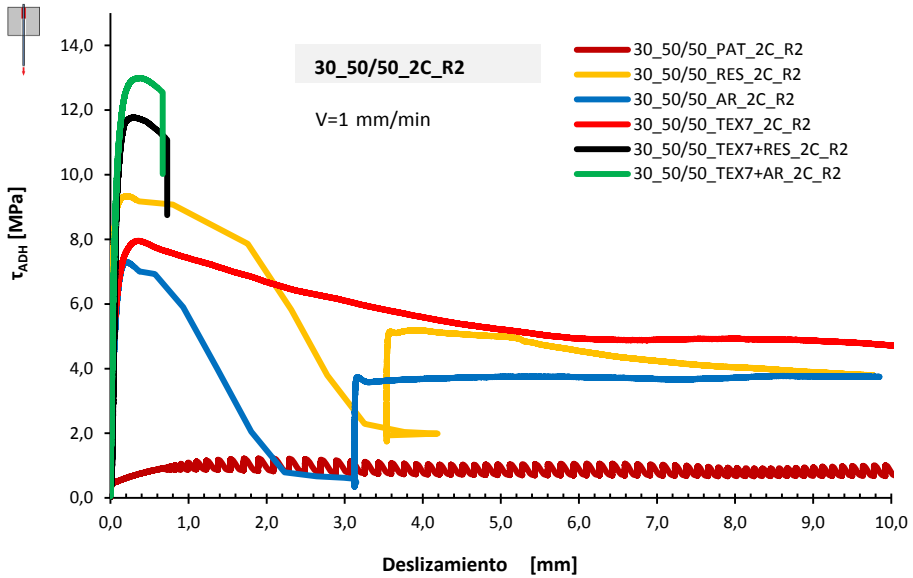


Fig. AII.2 Curvas τ/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Tabla AII.2 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_PAT_2C_R2	1	0,37	0,82	0,50	1,22	1,90	1,22	1,90	0,75	20.410
30_50/50_RES_2C_R2	7	4,52	9,32	0,25	1,74	3,54	9,32	0,25	5,18	153.851
30_50/50_AR_2C_R2	7	1,80	7,30	0,21	0,34	3,13	7,30	0,21	3,68	77.194
30_50/50_TEX7_2C_R2	2	2,87	7,96	0,37	-	-	7,96	0,37	5,59	146.903
30_50/50_TEX7+RES_2C_R2	3	0,42	11,77	0,28	-	-	11,77	0,28	-	43.575
30_50/50_TEX7+AR_2C_R2	3	2,01	12,99	0,39	-	-	12,99	0,39	-	44.627

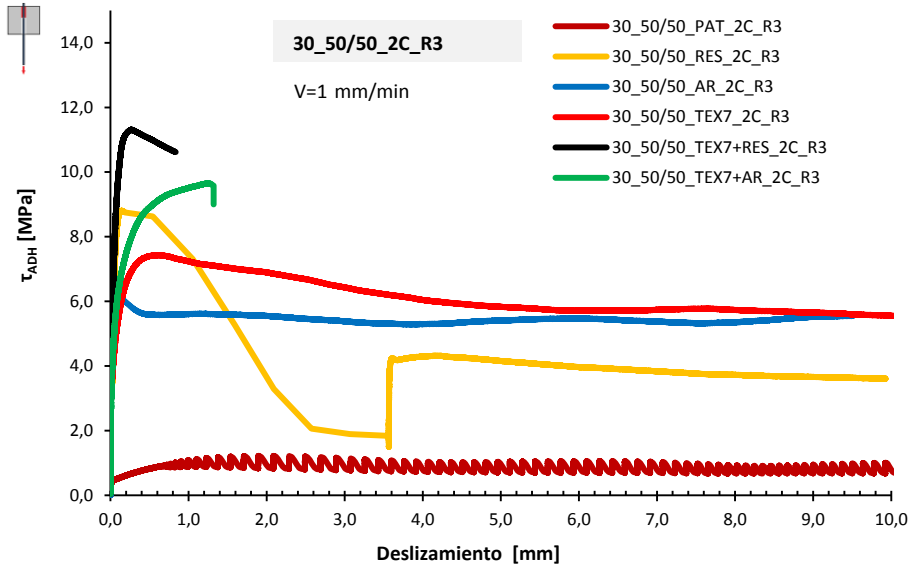


Fig. AII.3 Curvas τ/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Tabla AII.3 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 2C, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Espécimen		τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post- pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_PAT_2C_R3	1	0,35	0,80	0,49	1,19	1,89	1,20	1,85	0,70	20.390
30_50/50_RES_2C_R3	7	3,47	8,80	0,15	-	-	8,80	0,15	4,29	106.442
30_50/50_AR_2C_R3	2	4,19	5,56	0,50	5,62	1,06	5,62	1,06	5,30	121.708
30_50/50_TEX7_2C_R3	2	3,19	7,40	0,50	7,43	0,62	7,43	0,62	6,04	147.856
30_50/50_TEX7+RES_2C_R3	3	3,26	11,31	0,26	-	-	11,31	0,26	-	77.590
30_50/50_TEX7+AR_2C_R3	3	2,98	8,90	0,50	-	-	9,65	1,27	-	62.703

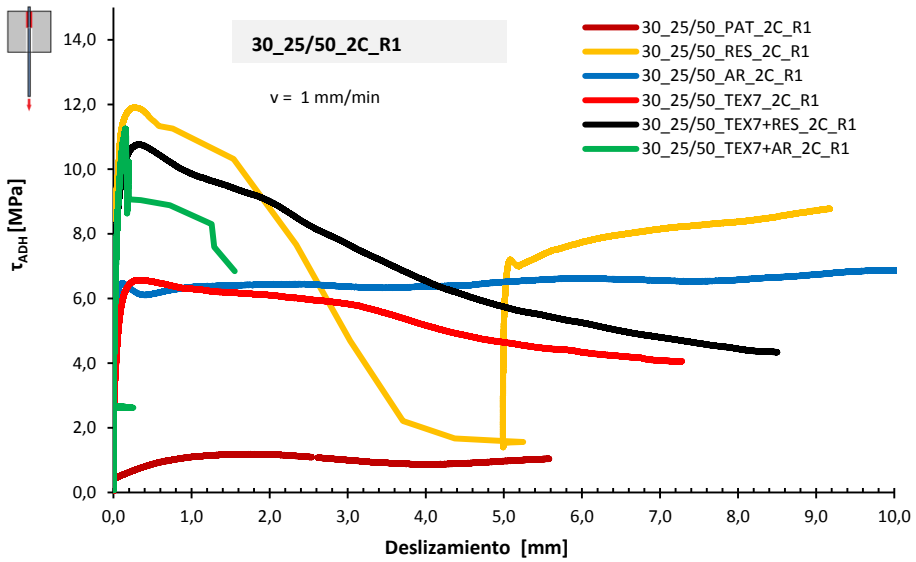


Fig. AII.4 Curvas τ/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm, rotura 1.

Tabla AII.4 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm, rotura 1.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_25/50_PAT_2C_R1	1	0,43	0,87	0,50	-	-	1,19	1,54	0,87	28569
30_25/50_RES_2C_R1	7	4,61	11,91	0,26	-	-	11,96	0,26	2,20	95.104
30_25/50_AR_2C_R1	2	4,40	6,47	0,10	6,10	0,40	6,47	0,10	6,38	76.500
30_25/50_TEX7_2C_R1	2	2,92	6,56	0,32	-	-	6,56	0,32	5,17	73.378
30_25/50_TEX7+RES_2C_R1	2	5,97	10,76	0,31	-	-	10,76	0,31	6,55	107.697
30_25/50_TEX7+AR_2C_R1	3	4,59	11,24	0,16	-	-	11,24	0,16	-	86.485

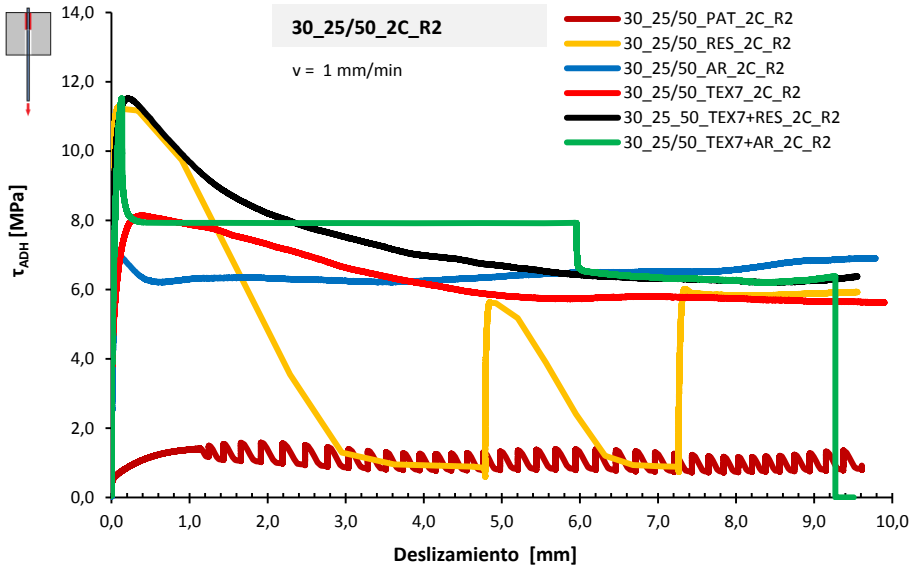


Fig. AII.5 Curvas τ/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm, rotura 2.

Tabla AII.5 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm, rotura 2.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_25/50_PAT_2C_R2	1	0,46	1,17	0,50	-	-	1,49	1,25	1,11	14.192
30_25/50_RES_2C_R2	4	7,43	11,28	0,09	0,59	4,78	11,28	0,09	0,91	67.341
30_25/50_AR_2C_R2	2	2,80	7,02	0,09	-	-	7,02	0,09	6,26	75.891
30_25/50_TEX7_2C_R2	2	4,01	8,15	0,38	-	-	8,15	0,38	6,18	86.320
30_25/50_TEX7+RES_2C_R2	2	6,33	11,52	0,21	-	-	11,52	0,21	6,99	104.149
30_25/50_TEX7+AR_2C_R2	2	4,18	12,73	0,24	-	-	12,73	0,24	1,32	7.883

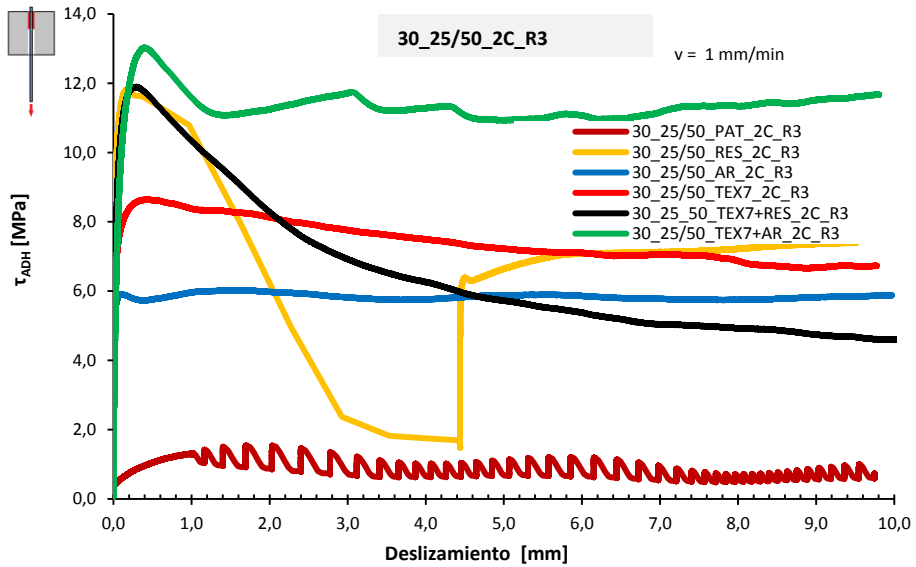


Fig. AII.6 Curvas τ/δ , modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm, rotura 3.

Tabla AII.6 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 2C, GFRP interfase 25 x 50 mm, rotura 3.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_25/50_PAT_2C_R3	1	0,38	1,05	0,50	-	-	1,53	2,03	0,64	12.292
30_25/50_RES_2C_R3	4	7,60	10,79	0,97	-	-	10,79	0,97	-	43.919
30_25/50_AR_2C_R3	2	4,72	5,91	1,06	-	-	6,02	1,47	5,76	70.851
30_25/50_TEX7_2C_R3	2	4,98	8,65	0,42	-	-	8,65	0,42	7,49	97.002
30_25/50_TEX7+RES_2C_R3	2	3,56	11,90	0,29	-	-	11,90	0,29	6,25	103.590
30_25/50_TEX7+AR_2C_R3	2	3,02	13,02	0,41	-	-	13,02	0,41	11,28	137.768

AII.2.2- GRUPO 2.- CONTACTO DIRECTO DEL HORMIGÓN A UNA CARA, 1C

Se exponen los resultados comparando las modalidades 1CA con confinamiento y 1CE sin confinamiento.

SUBGRUPO 2.1.-Influencia de las variables de adherencia resina (RES), arenado (AR), texturizado (TEX) y una combinación de estos (MIX).

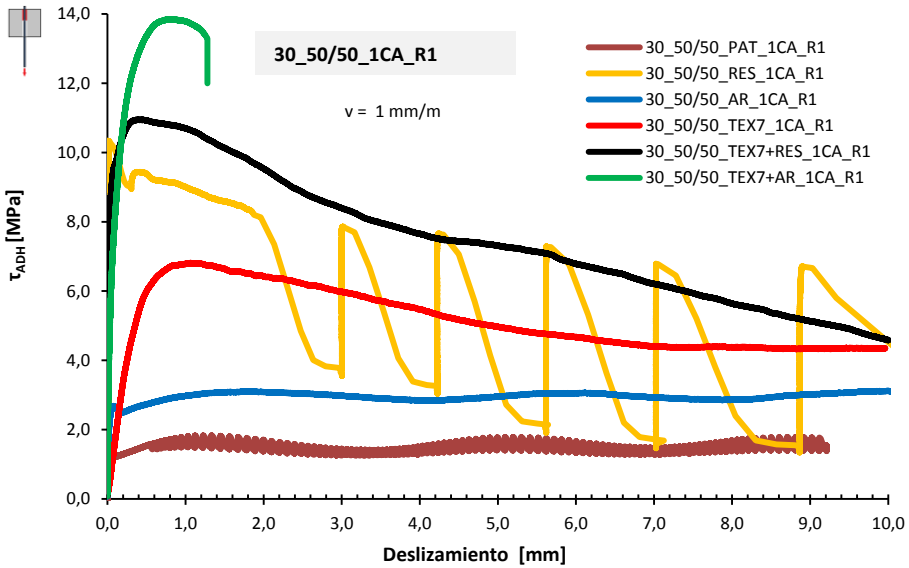


Fig. AII.7 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Tabla AII.7 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_PAT_1CA_R1	1	1,16	1,53	0,50	-	-	1,83	1,33	1,36	17.820
30_50/50_RES_1CA_R1	6	0,95	10,34	0,05	-	-	10,34	0,05	3,28	90.515
30_50/50_AR_1CA_R1	2	1,47	2,73	0,50	-	-	3,09	1,96	2,85	35.151
30_50/50_TEX7_1CA_R1	2	0,24	6,00	0,50	-	-	6,80	1,05	5,47	70.996
30_50/50_TEX7+RES_1CA_R1	2	7,36	10,95	0,42	-	-	10,95	0,42	7,65	113.104
30_50/50_TEX7+AR_1CA_R1	3	2,94	13,37	0,50	-	-	13,86	0,84	-	47.834

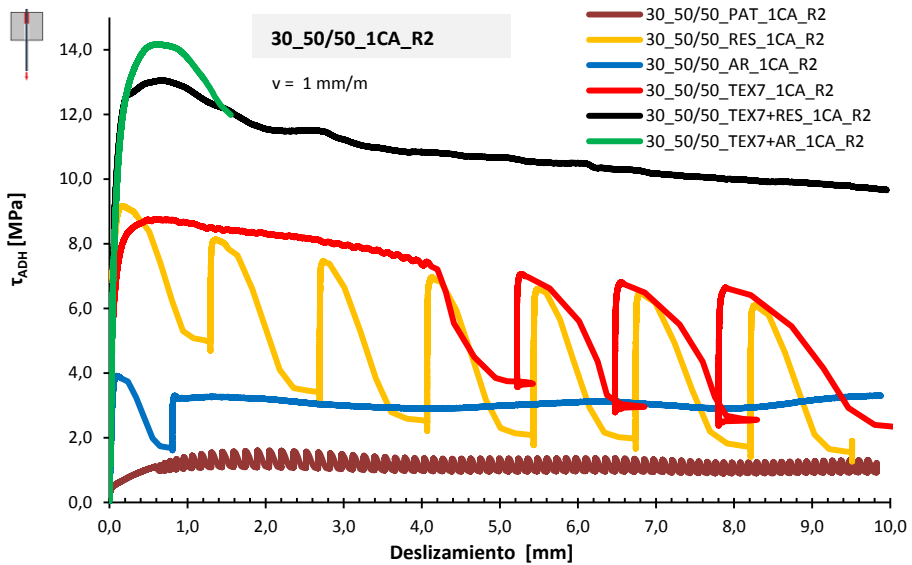


Fig. AII.8 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Tabla AII.8 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_PAT_1CA_R2	1	0,33	1,04	0,50	-	-	1,11	0,59	0,98	14.124
30_50/50_RES_1CA_R2	6	2,25	9,16	0,17	-	-	9,16	0,17	2,50	69.869
30_50/50_AR_1CA_R2	7	1,13	3,92	0,10	-	-	3,92	0,10	2,89	36.366
30_50/50_TEX7_1CA_R2	8	3,95	8,75	0,50	-	-	8,74	0,49	7,35	97.959
30_50/50_TEX7+RES_1CA_R2	2	2,57	12,98	0,50	-	-	13,06	0,65	10,83	140.468
30_50/50_TEX7+AR_1CA_R2	3	1,44	14,10	0,50	-	-	14,16	0,65	-	127.524

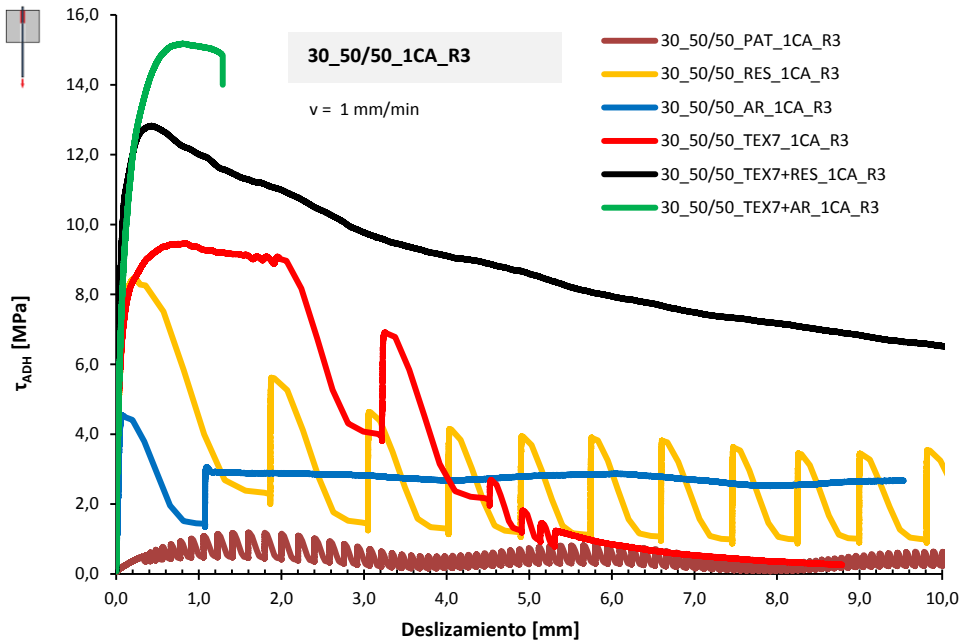


Fig. AII.9 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Tabla AII.9 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_PAT_1CA_R3	1	0,05	0,67	0,48	-	-	1,18	1,60	0,42	6.714
30_50/50_RES_1CA_R3	6	3,34	8,45	0,22	2,00	1,87	8,45	0,22	1,29	47.253
30_50/50_AR_1CA_R3	7	0,97	4,54	0,08	1,35	1,08	4,54	0,08	2,68	33.728
30_50/50_TEX7_1CA_R3	8	3,61	9,25	0,50	-	-	9,47	0,84	2,37	89.018
30_50/50_TEX7+RES_1CA_R3	2	4,43	12,82	0,44	-	-	12,82	0,44	9,09	129.579
30_50/50_TEX7+AR_1CA_R3	3	2,70	14,69	0,50	-	-	15,18	0,84	-	48.177

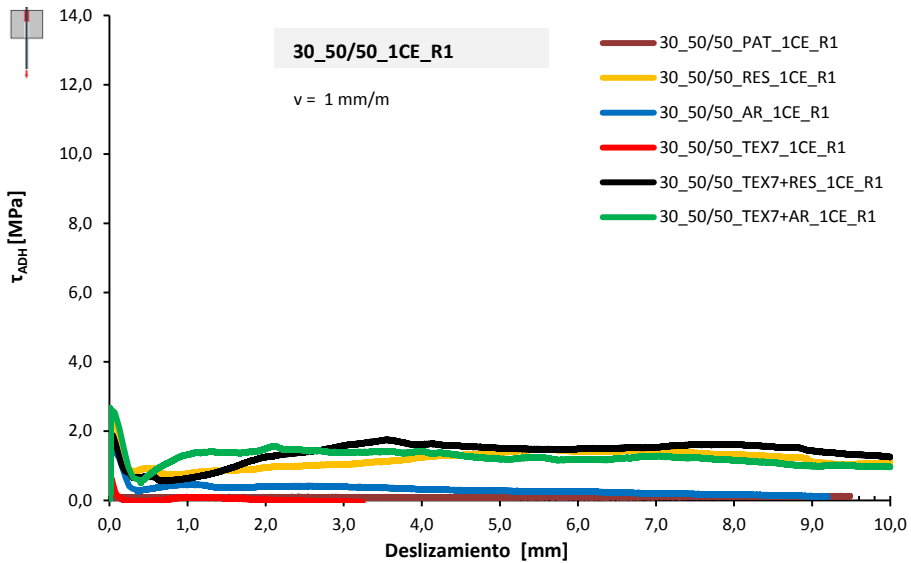


Fig. AII.10 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Tabla AII.10 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_PAT_1CE_R1	1	0,10	0,09	0,03	-	-	0,10	0,03	0,08	460
30_50/50_RES_1CE_R1	4	2,46	2,46	0,01	0,79	0,34	2,46	0,01	1,24	10.167
30_50/50_AR_1CE_R1	5	0,98	1,61	0,02	-	-	1,61	0,02	0,32	4.291
30_50/50_TEX7_1CE_R1	5	0,75	0,86	0,01	-	-	0,86	0,01	0,05	618
30_50/50_TEX7+RES_1CE_R1	5	1,95	1,95	0,01	-	-	1,95	0,01	1,62	11.979
30_50/50_TEX7+AR_1CE_R1	7	1,84	2,66	0,01	0,49	0,40	2,66	0,01	1,41	13.594

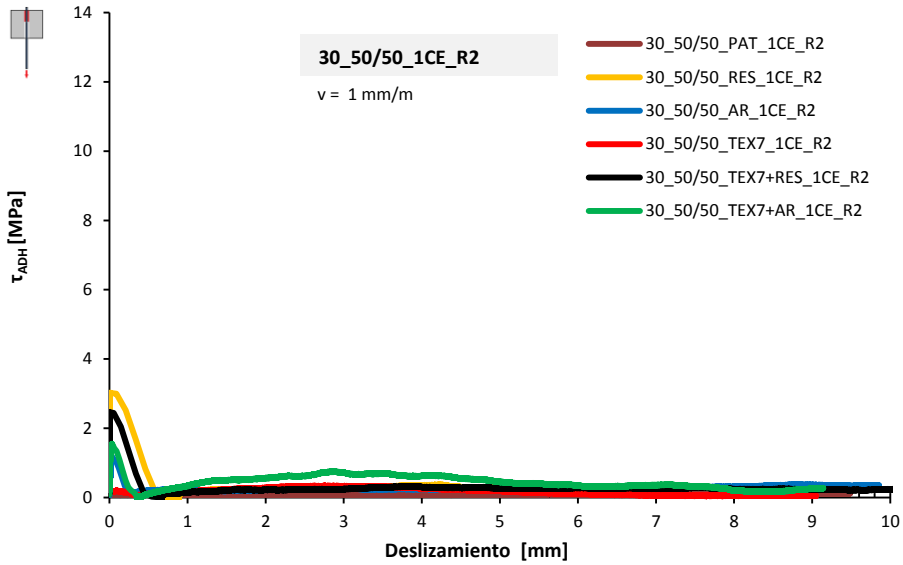


Fig. All.11 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Tabla All.11 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_PAT_1CE_R2	1	0,10	0,11	0,03	-	-	0,11	0,03	0,09	860
30_50/50_RES_1CE_R2	5	3,00	3,03	0,01	-	-	3,03	0,01	0,34	4.888
30_50/50_AR_1CE_R2	5	0,68	1,16	0,03	-	-	1,16	0,03	0,24	2.512
30_50/50_TEX7_1CE_R2	2	0,18	0,20	0,11	-	-	0,33	3,31	0,28	2.434
30_50/50_TEX7+RES_1CE_R2	5	2,46	2,46	0,01	-	-	2,46	0,01	0,30	3.540
30_50/50_TEX7+AR_1CE_R2	7	1,16	1,55	0,03	0,03	0,35	1,55	0,03	0,62	5.454

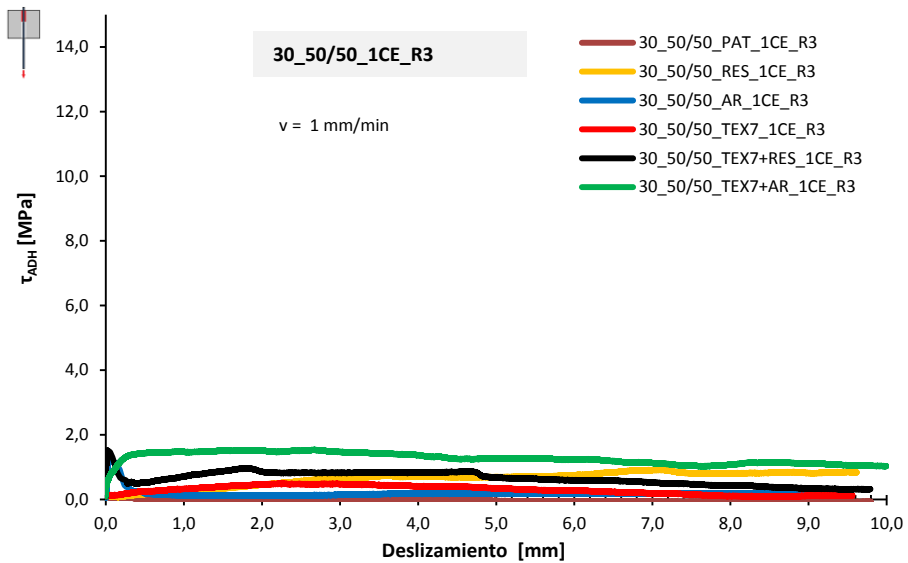


Fig. All.12 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Tabla All.12 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_PAT_1CE_R3	1	0,08	0,02	0,50	-	-	0,05	0,36	0,02	250
30_50/50_RES_1CE_R3	5	0,09	0,18	0,50	-	-	0,18	0,50	0,70	4.445
30_50/50_AR_1CE_R3	5	0,65	1,22	0,05	-	-	1,22	0,05	0,18	1.986
30_50/50_TEX7_1CE_R3	2	0,13	0,26	0,50	-	-	0,46	3,19	0,41	3.888
30_50/50_TEX7+RES_1CE_R3	4	1,35	1,52	0,02	0,48	0,28	1,52	0,02	0,83	8.028
30_50/50_TEX7+AR_1CE_R3	2	0,46	1,43	0,50	-	-	1,54	2,67	1,38	14.341

SUBGRUPO 2.2.- Influencia de las fijaciones mecánicas sin desplazamiento de acero métrica 4 (grado 6.6) y métrica 6 (grado 8.8).

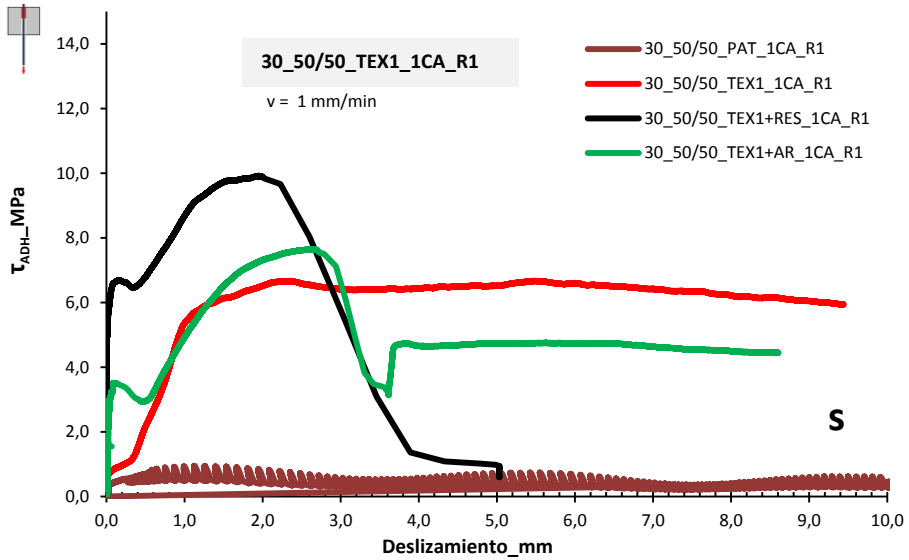


Fig. AII.13 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Tabla AII.13 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1_1CA_R1	2	0,62	2,16	0,50	-	-	6,66	2,27	6,43	64.378
30_50/50_TEX1+RES_1CA_R1	4	4,97	6,65	0,12	6,45	0,35	9,92	1,94	1,20	7.548
30_50/50_TEX1+AR_1CA_R1	4	0,14	3,51	0,11	2,95	0,50	7,65	2,62	3,14	44.298

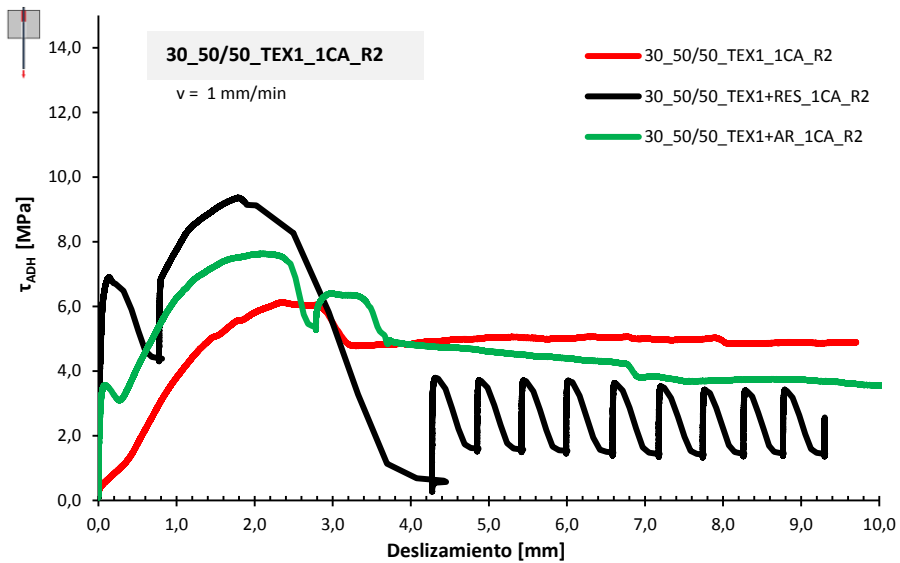


Fig. AII.14 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Tabla AII.14 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1_1CA_R2	2	0,33	1,75	0,50	-	-	6,13	2,35	4,84	53.269
30_50/50_TEX1+RES_1CA_R2	4	3,01	6,90	0,14	4,40	0,76	9,37	1,79	0,68	76.965
30_50/50_TEX1+AR_1CA_R2	4	1,95	3,57	0,08	3,08	0,27	7,63	2,12	4,83	71.975

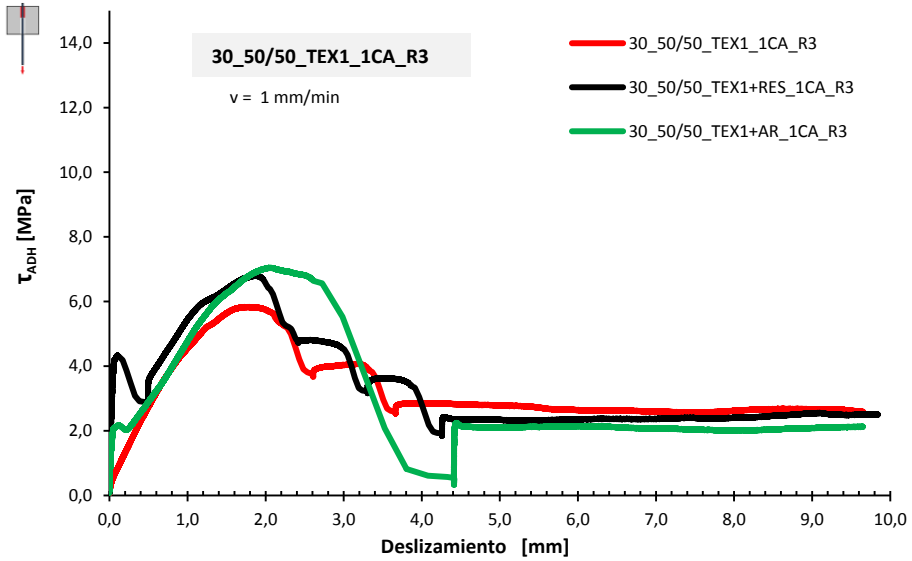


Fig. AII.15 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Tabla AII.15 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Texturizados y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1_1CA_R3	8	0,26	2,75	0,50	-	-	5,83	1,74	2,85	47.808
30_50/50_TEX1+RES_1CA_R3	4	1,39	4,32	0,10	2,84	0,50	6,69	1,70	2,63	57.435
30_50/50_TEX1+AR_1CA_R3	4	0,93	2,17	0,12	2,03	0,21	7,04	2,06	0,61	55.317

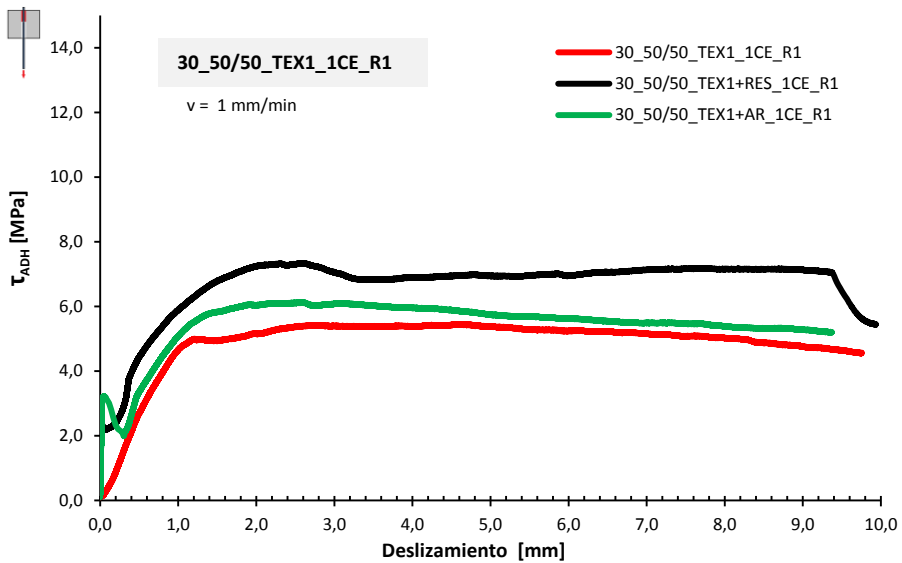


Fig. All.16 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Tabla All.16 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1_1CE_R1	2	0,13	2,69	0,50	-	-	5,40	3,25	5,37	45.486
30_50/50_TEX1+RES_1CE_R1	4	2,39	2,39	0,01	2,19	0,09	7,35	2,58	6,89	62.433
30_50/50_TEX1+AR_1CE_R1	4	1,51	3,22	0,05	1,99	0,31	6,11	2,42	5,96	53.298

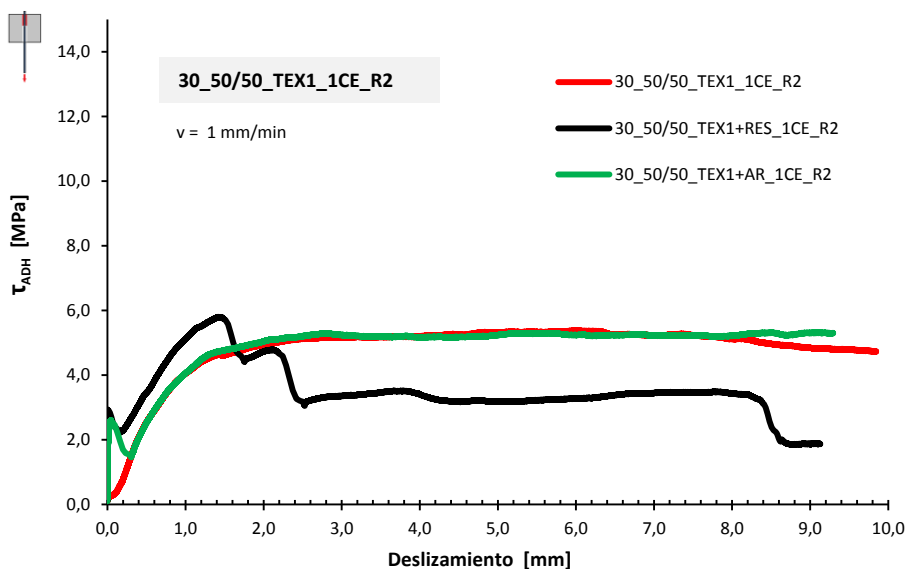


Fig. All.17 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Tabla All.17 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1_1CE_R2	2	0,18	2,54	0,50	-	-	5,20	3,65	5,19	42.972
30_50/50_TEX1+RES_1CE_R2	4	2,93	2,93	0,01	2,21	0,15	5,80	1,45	3,40	39.775
30_50/50_TEX1+AR_1CE_R2	4	1,97	2,60	0,04	1,46	0,31	5,29	2,80	5,17	44.515

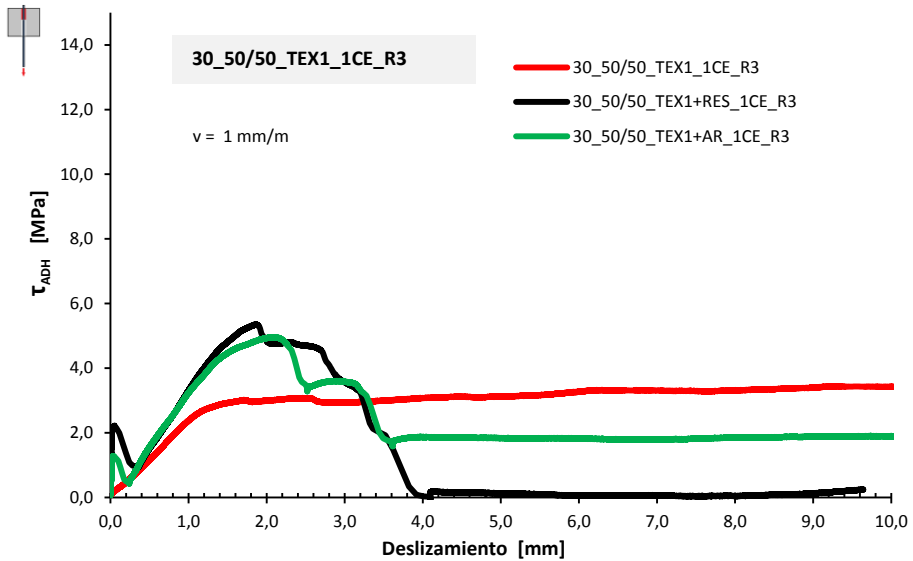


Fig. AII.18 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Tabla AII.18 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1_1CE_R3	2	0,10	1,15	0,50	-	-	3,07	3,91	3,08	25.104
30_50/50_TEX1+RES_1CE_R3	4	1,50	2,23	0,05	0,94	0,36	5,35	1,85	0,03	32.145
30_50/50_TEX1+AR_1CE_R3	4	0,50	1,28	0,03	0,42	0,24	4,96	2,14	1,87	31.055

SUBGRUPO 2.3.- Influencia de las fijaciones mecánicas con desplazamiento con M4 y M6. Se introduce la tornillería con coliso con M4 y grado 6.6, para comprobar el efecto del coliso evitando la rotura prematura del tornillo.

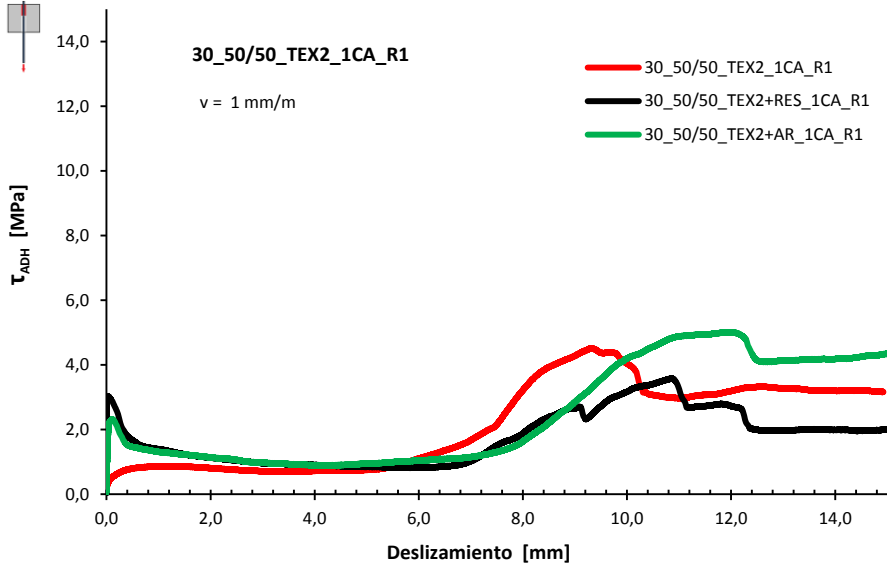


Fig. AII.19 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Tabla AII.19 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2_1CA_R1	2	0,25	0,80	0,50	-	-	0,86	1,26	0,72	9.097
30_50/50_TEX2+RES_1CA_R1	5	2,84	3,02	0,03	-	-	3,02	0,03	0,90	15.469
30_50/50_TEX2+AR_1CA_R1	5	0,92	2,32	0,11	-	-	2,32	0,11	0,89	14.445

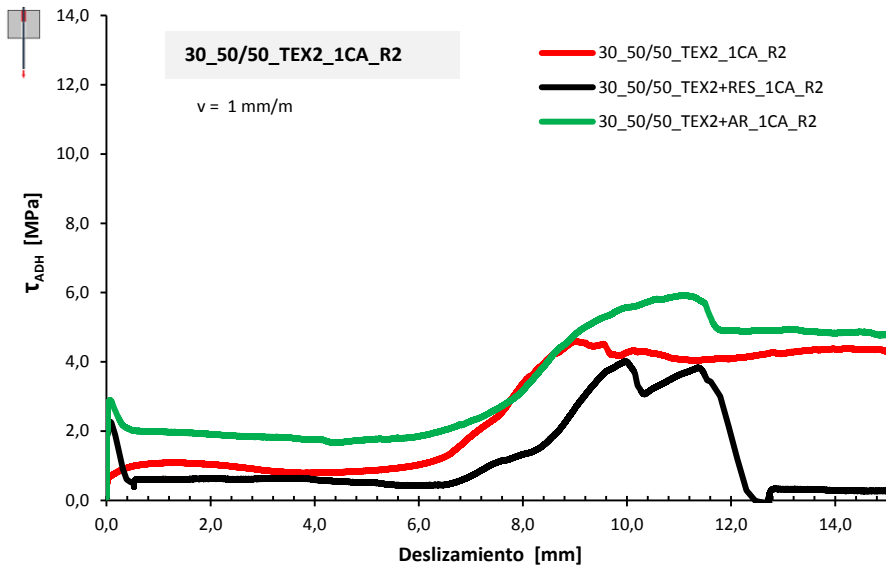


Fig. AII.20 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Tabla AII.20 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2_1CA_R2	2	0,48	0,99	0,50	-	-	1,09	1,33	0,80	11.351
30_50/50_TEX2+RES_1CA_R2	5	1,77	2,32	0,02	-	-	2,32	0,02	0,59	8.543
30_50/50_TEX2+AR_1CA_R2	5	1,77	2,89	0,06	-	-	2,89	0,06	1,75	23.390

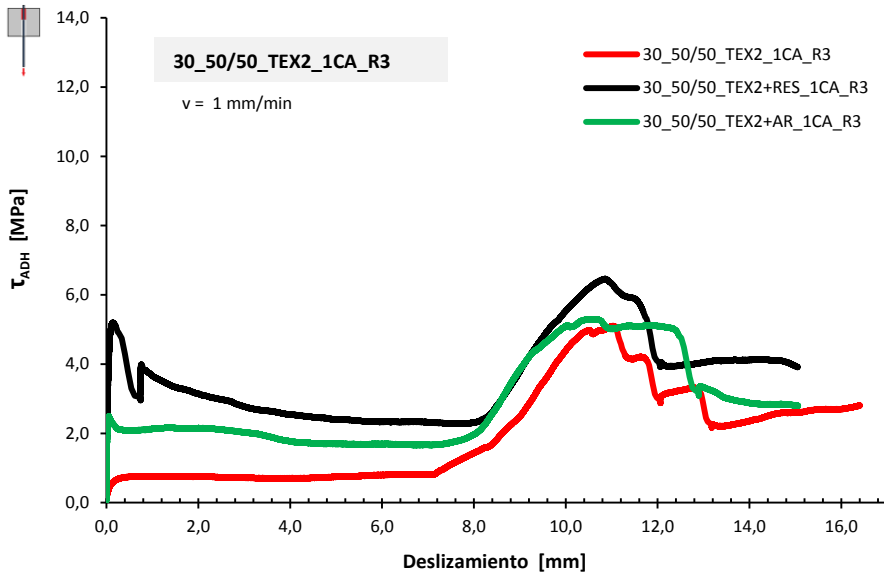


Fig. AII.21 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Tabla AII.21 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2_1CA_R3	5	0,21	0,75	0,50	-	-	0,76	2,07	0,71	8.646
30_50/50_TEX2+RES_1CA_R3	7	1,50	5,20	0,14	2,97	0,74	5,20	0,14	2,54	38.976
30_50/50_TEX2+AR_1CA_R3	7	1,54	2,49	0,44	2,11	0,26	2,49	0,44	1,78	24.901

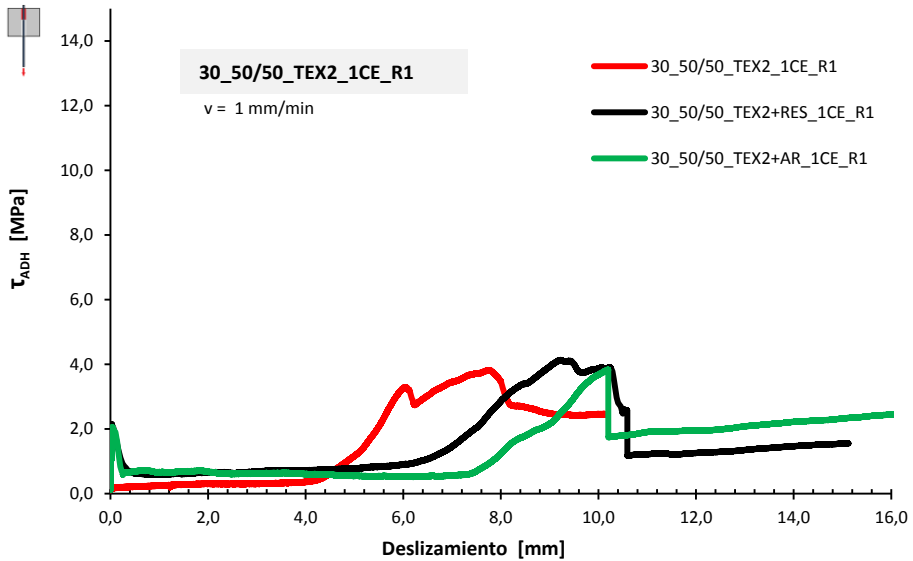


Fig. AII.22 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Tabla AII.22 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2_1CE_R1	1	0,13	0,23	0,50	-	-	0,36	4,00	0,36	2.779
30_50/50_TEX2+RES_1CE_R1	5	1,81	2,15	0,02	-	-	2,15	0,02	0,72	7.163
30_50/50_TEX2+AR_1CE_R1	5	0,89	2,05	0,04	-	-	2,05	0,04	0,59	7.037

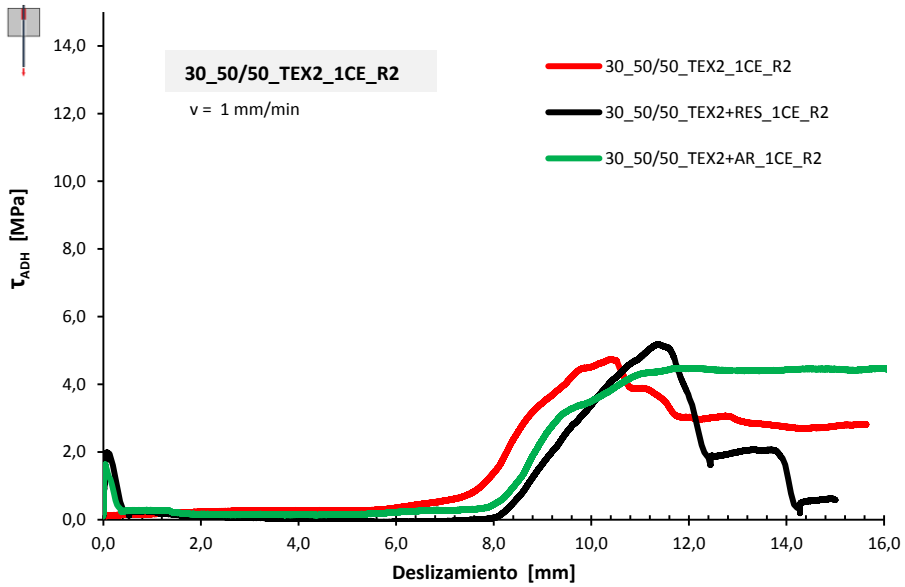


Fig. AII.23 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Tabla AII.23 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2_1CE_R2	1	0,12	0,15	0,50	-	-	0,27	4,00	0,27	2.152
30_50/50_TEX2+RES_1CE_R2	5	0,64	1,99	0,08	-	-	1,99	0,08	0,02	2.376
30_50/50_TEX2+AR_1CE_R2	5	1,19	1,63	0,04	-	-	1,63	0,04	0,15	2.578

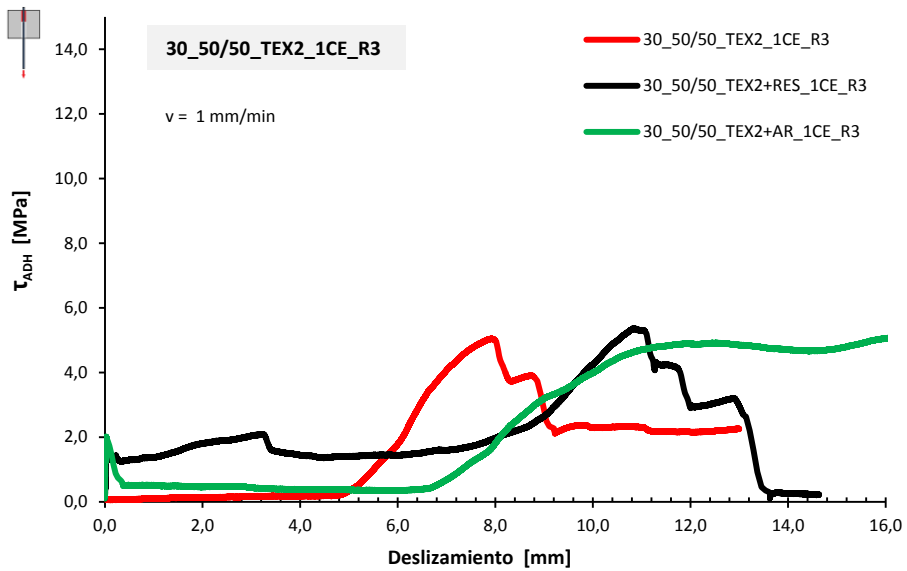


Fig. AII.24 Curvas τ/δ , modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Coliso con tornillería M4 6.y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Tabla AII.24 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CE, una cara, sin confinamiento hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2_1CE_R3	5	0,08	0,08	0,01	-	-	0,18	4,00	0,18	1.306
30_50/50_TEX2+RES_1CE_R3	4	0,67	1,64	0,04	1,29	0,12	2,08	3,23	1,45	16.307
30_50/50_TEX2+AR_1CE_R3	5	1,62	2,02	0,03	-	-	2,02	0,03	0,38	5.290

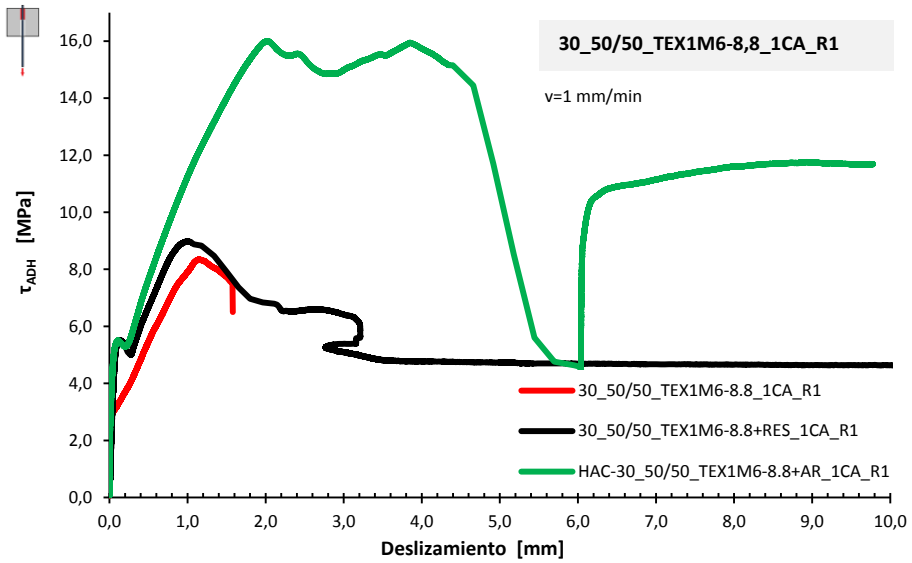


Fig. AII.25 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Tabla AII.25 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1M6-8.8_1CA_R1	3	2,58	5,44	0,50	-	-	8,34	1,15	-	29.894
30_50/50_TEX1M6-8.8+RES_1CA_R1	4	0,81	5,50	0,15	5,06	0,29	8,98	1,01	4,77	77.361
30_50/50_TEX1M6-8.8+AR_1CA_R1	4	2,50	5,51	0,11	5,29	0,19	15,99	2,02	15,73	157.143

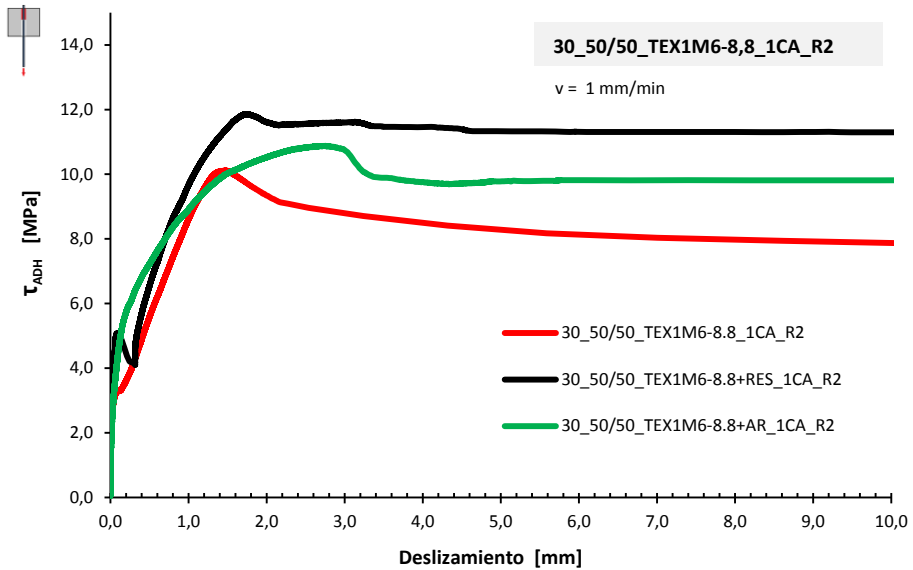


Fig. AII.26 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Tabla AII.26 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1M6-8,8_1CA_R2	2	2,17	5,58	0,50	-	-	10,01	1,45	8,40	122.706
30_50/50_TEX1M6-8,8+RES_1CA_R2	4	2,15	5,06	0,08	4,10	0,32	11,86	1,76	11,46	124.726
30_50/50_TEX1M6-8,8+AR_1CA_R2	2	1,70	7,22	0,50	-	-	10,87	2,75	9,76	112.740

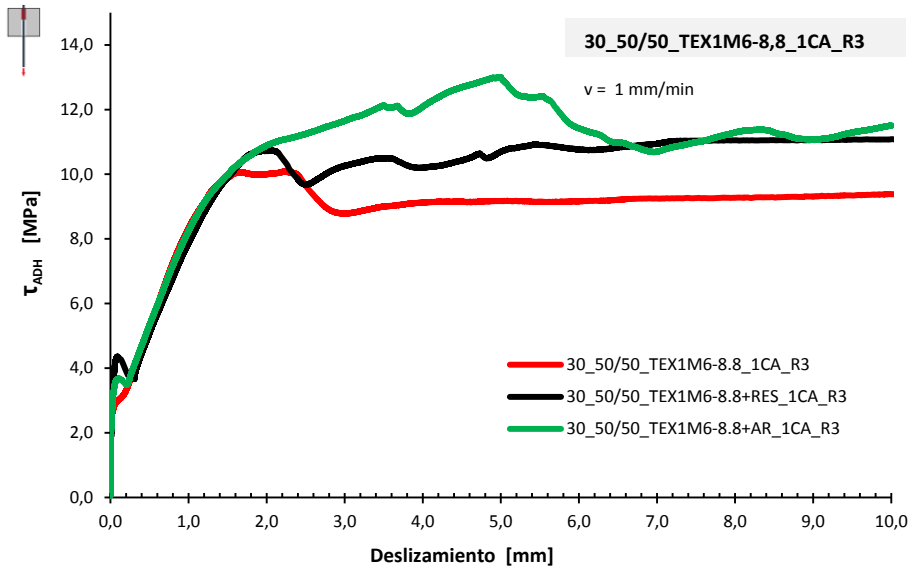


Fig. AII.27 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Tabla AII.27 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1M6-8,8_1CA_R3	2	2,52	5,31	0,50	-	-	10,08	2,23	9,13	100.498
30_50/50_TEX1M6-8,8+RES_1CA_R3	4	2,05	4,36	0,09	3,66	0,31	10,73	2,09	10,21	106.578
30_50/50_TEX1M6-8,8+AR_1CA_R3	4	2,19	3,68	0,10	3,48	0,21	12,12	3,48	12,08	115.494

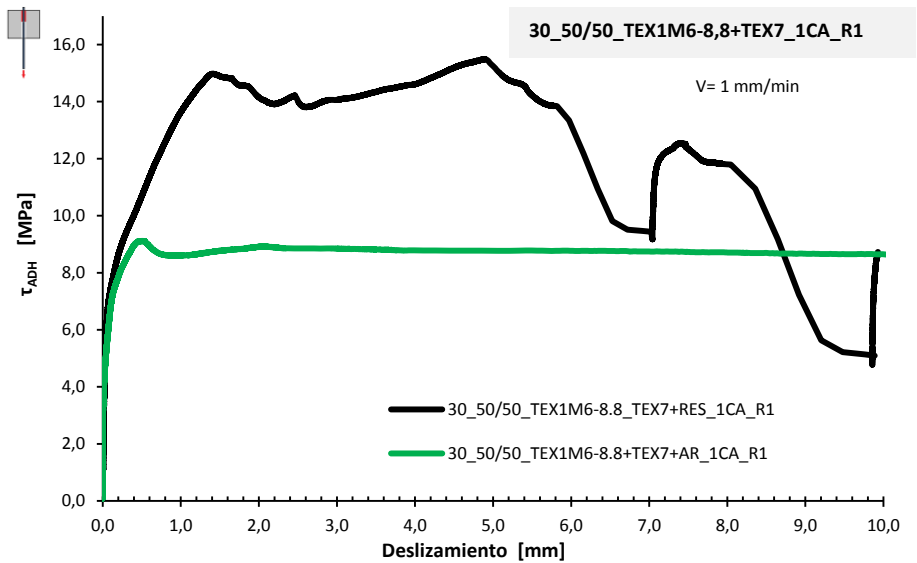


Fig. AII.28 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Tabla AII.28 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1M6-8.8+TEX7_1CA_R1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30_50/50_TEX1M6-8.8+TEX7+RES_1CA_R1	8	1,30	5,93	0,50	-	-	14,98	1,40	14,60	159.764
30_50/50_TEX1M6-8.8+TEX7+AR_1CA_R1	2	3,17	9,11	0,50	-	-	9,12	0,51	8,79	87.781

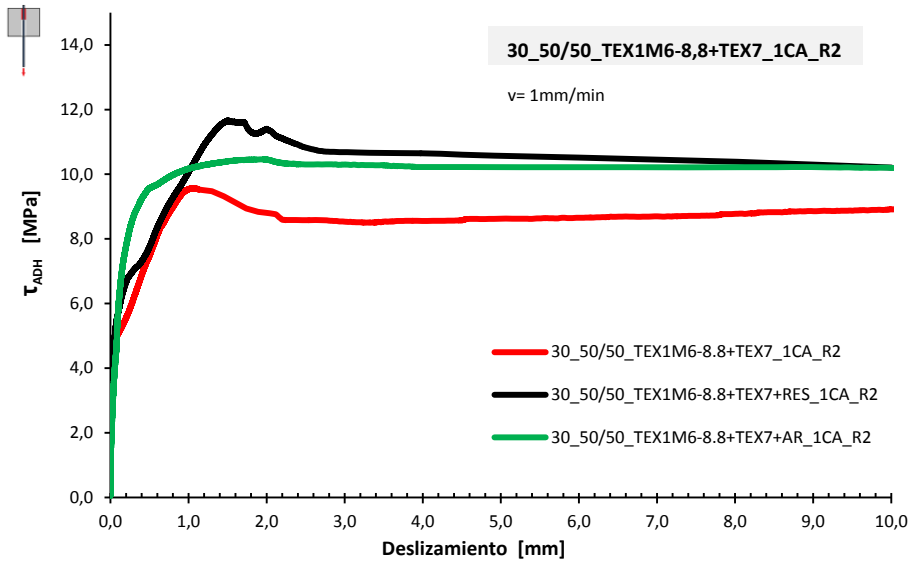


Fig. AII.29 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Tabla AII.29 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1M6-8.8+TEX7_1CA_R2	8	3,00	7,45	0,50	-	-	9,57	1,09	8,56	101.675
30_50/50_TEX1M6-8.8+TEX7+RES_1CA_R2	8	2,27	7,73	0,50	-	-	11,66	1,50	10,65	124.907
30_50/50_TEX1M6-8.8+TEX7+AR_1CA_R2	8	1,36	9,56	0,50	-	-	10,46	1,83	10,22	118.749

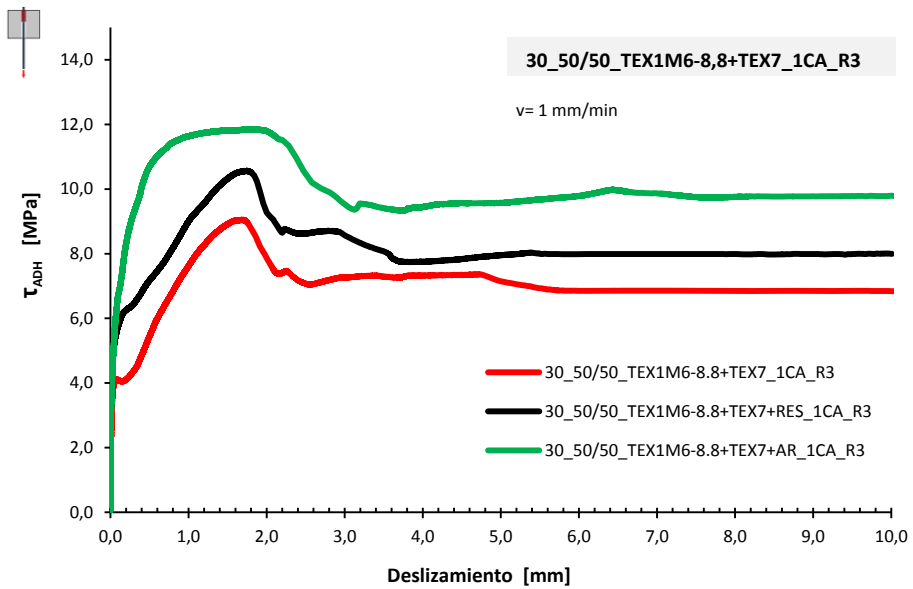


Fig. AII.30 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Tabla AII.30 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	$\tau_{\text{máx}}$ [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ_{residual} [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX1M6-8,8+TEX7_1CA_R3	8	2,15	5,43	0,50	-	-	9,05	1,70	7,32	85.788
30_50/50_TEX1M6-8,8+TEX7+RES_1CA_R3	8	3,07	7,16	0,50	-	-	10,56	1,72	7,76	101.682
30_50/50_TEX1M6-8,8+TEX7+AR_1CA_R3	8	2,89	10,67	0,50	-	-	11,84	1,92	9,44	124.946

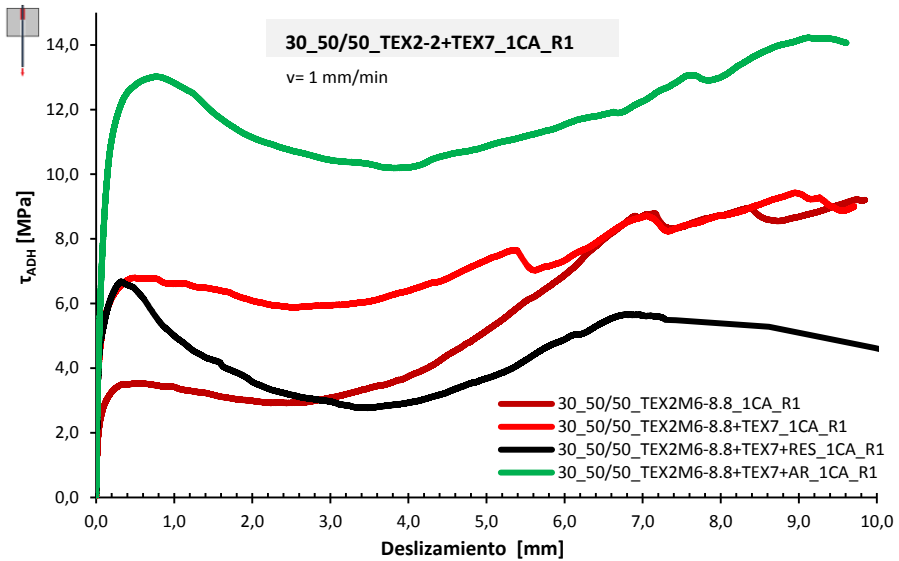


Fig. AII.31 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Tabla AII.31 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 1.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2-2_1CA_R1	5	1,14	3,53	0,61	-	-	3,75	4,00	3,75	38.477
30_50/50_TEX2-2+TEX7_1CA_R1	5	2,20	6,80	0,50	-	-	6,80	0,50	6,40	74.514
30_50/50_TEX2-2+TEX7+RES_1CA_R1	5	1,71	6,67	0,33	-	-	6,67	0,33	2,93	40.311
30_50/50_TEX2-2+TEX7+AR_1CA_R1	5	2,02	12,75	0,50	-	-	13,01	0,82	10,21	134.133

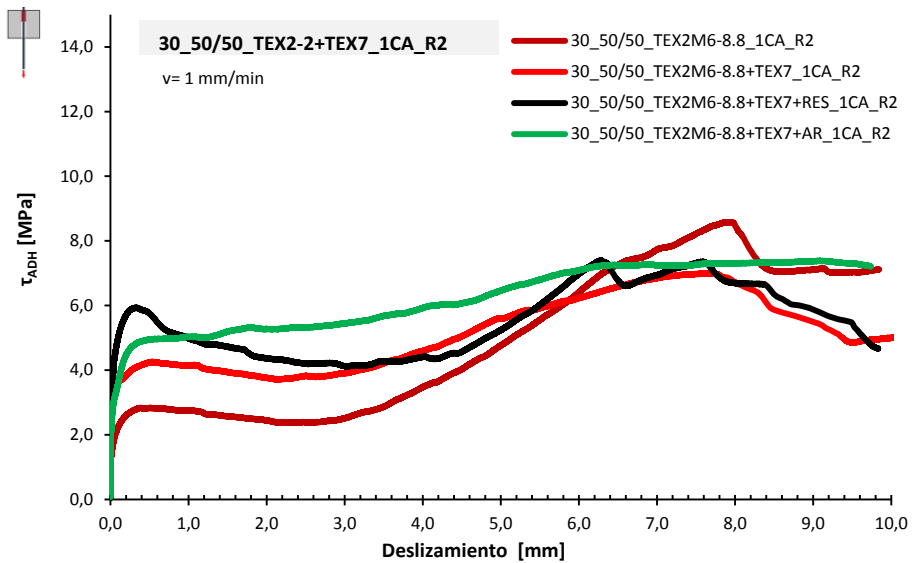


Fig. AII.32 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Tabla AII.32 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 2.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2-2_1CA_R2	5	1,36	2,83	0,50	-	-	3,47	4,00	3,47	31.774
30_50/50_TEX2-2+TEX7_1CA_R2	5	2,56	4,24	0,50	-	-	4,59	4,00	4,59	48.023
30_50/50_TEX2-2+TEX7+RES_1CA_R2	5	2,39	5,94	0,34	-	-	5,94	0,34	4,41	55.585
30_50/50_TEX2-2+TEX7+AR_1CA_R2	2	2,17	4,96	0,50	-	-	5,93	4,00	5,93	62.445

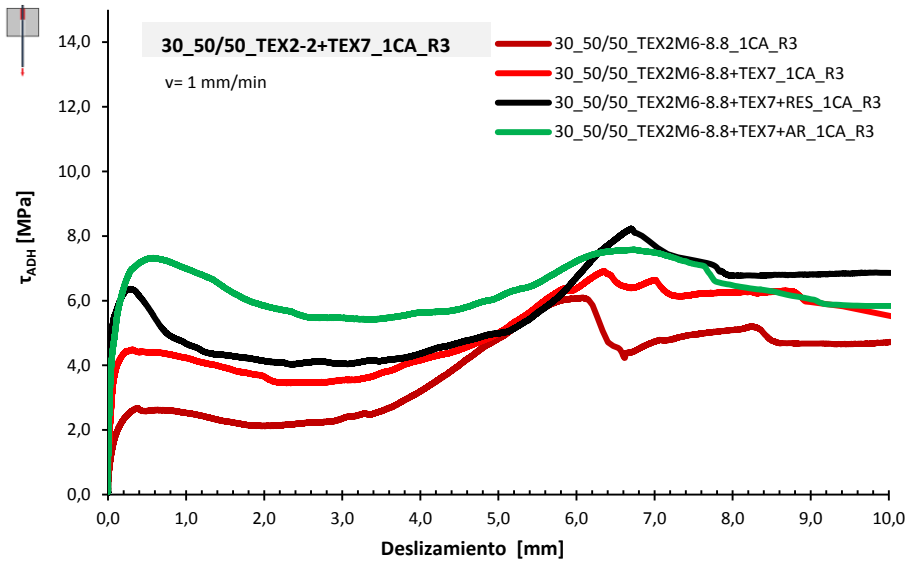


Fig. AII.33 Curvas τ/δ , modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Tabla AII.33 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CA, una cara, con confinamiento pasivo hormigón. Coliso con tornillería M6 8.8 + texturizado y combinaciones, GFRP interfase 50 x 50 mm, rotura 3.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2-2_1CA_R3	5	0,65	2,70	0,37	-	-	2,70	0,37	3,20	28.721
30_50/50_TEX2-2+TEX7_1CA_R3	5	1,31	4,48	0,33	-	-	4,48	0,33	4,16	46.213
30_50/50_TEX2-2+TEX7+RES_1CA_R3	5	3,61	6,36	0,27	-	-	6,36	0,27	4,36	54.331
30_50/50_TEX2-2+TEX7+AR_1CA_R3	5	2,09	7,29	0,50	-	-	7,32	0,58	5,64	72.518

AII.2.3- GRUPO 3.- CONTACTO DIRECTO DEL HORMIGÓN A UNA CARA LIBRE, 1CL

Influencia del par de apriete y postesado de las fijaciones mecánicas con desplazamiento.

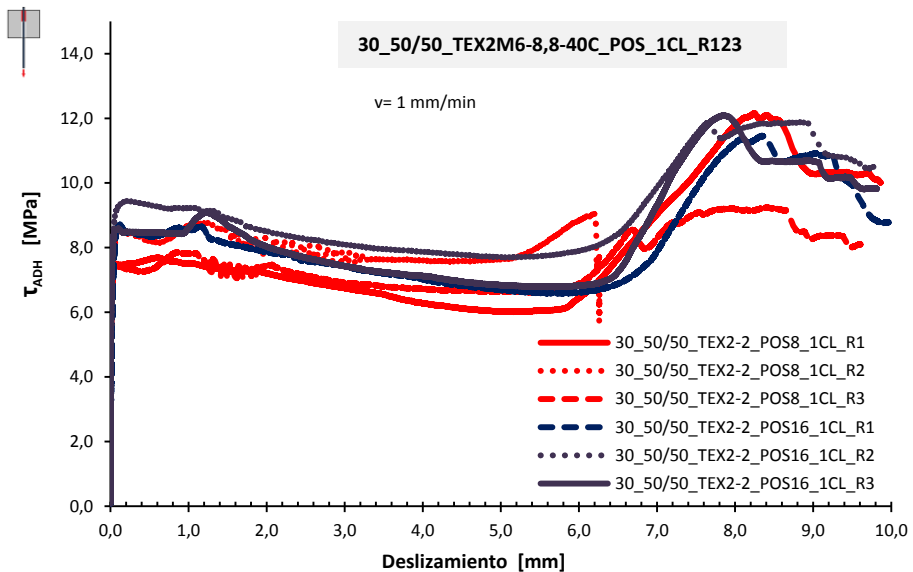


Fig. AII.34 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 Postesado 8 y 16 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, roturas 1, 2 y 3. Los colores y tipos de línea son aleatorios en este caso.

Tabla AII.34 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 Postesado 8 y 16 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, roturas 1, 2 y 3.

Probeta	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2-2_POS8_1CL_R1	2	5,84	7,64	0,5	-	-	7,69	0,595	6,28	71021
30_50/50_TEX2-2_POS8_1CL_R2	2	5,84	8,53	0,107	-	-	8,77	1,23	7,59	80695
30_50/50_TEX2-2_POS8_1CL_R3	2	7,22	7,42	0,054	-	-	7,82	1,057	6,72	72579
30_50/50_TEX2-2_POS16_1CL_R1	2	3,76	8,72	0,103	-	-	8,72	0,103	7,022	78544
30_50/50_TEX2-2_POS16_1CL_R2	2	4,95	9,45	0,205	-	-	9,45	0,205	7,87	85997
30_50/50_TEX2-2_POS16_1CL_R3	2	6,456	8,56	0,069	-	-	9,088	1,226	7,12	80216

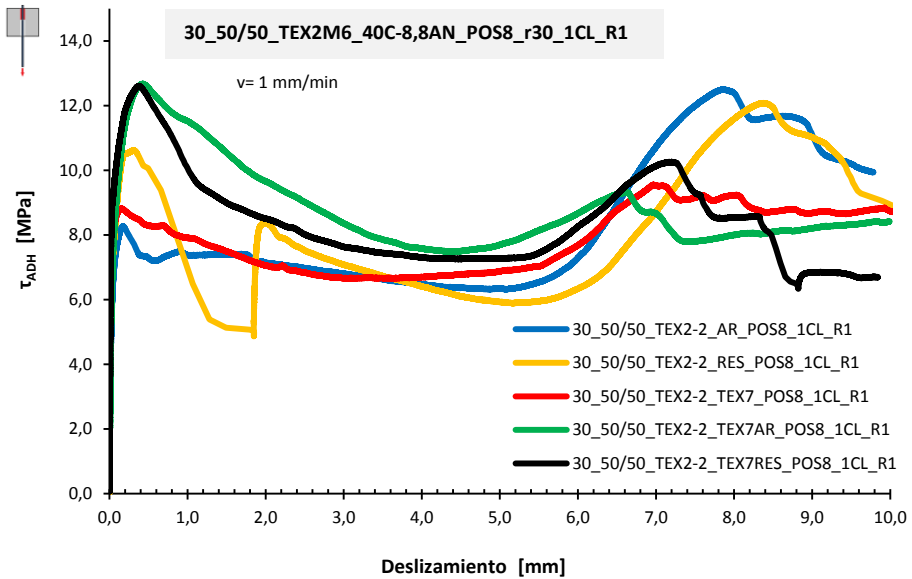


Fig. AII.35 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 8 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 1.

Tabla AII.35 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 8 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 1.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	δ τ pico [mm]	τ post-pico [MPa]	δ τ post-pico [mm]	τ máx [MPa]	δ τ máx [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2-2_RES_POS8_1CL_R1	7	3,58	10,62	0,32	4,86	1,85	10,62	0,32	6,41	73.630
30_50/50_TEX2-2_AR_POS8_1CL_R1	5	3,30	8,27	0,18	-	-	8,27	0,18	6,47	70.899
30_50/50_TEX2-2_TEX7_POS8_1CL_R1	5	5,74	8,81	0,17	-	-	8,81	0,17	6,69	73.296
30_50/50_TEX2-2_TEX7+RES_POS8_1CL_R1	5	4,92	12,61	0,37	-	-	12,61	0,37	7,30	89.951
30_50/50_TEX2-2_TEX7+AR_POS8_1CL_R1	5	2,48	12,60	0,37	-	-	12,60	0,38	7,57	97.328

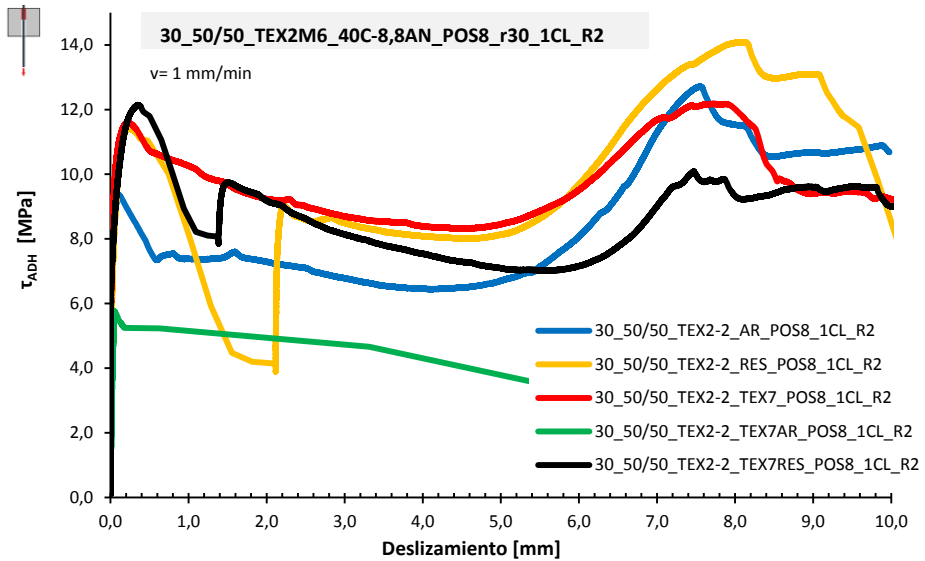


Fig. AII.36 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 8 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 2.

Tabla AII.36 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 8 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 2.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2-2_RES_POS8_1CL_R2	7	5,60	11,44	0,23	3,89	2,11	11,44	0,23	8,07	79.745
30_50/50_TEX2-2_AR_POS8_1CL_R2	5	4,89	9,35	0,10	-	-	9,35	0,10	6,46	72.588
30_50/50_TEX2-2_TEX7_POS8_1CL_R2	5	6,41	11,60	0,21	-	-	11,60	0,21	8,39	94.988
30_50/50_TEX2-2_TEX7+RES_POS8_1CL_R2	7	6,64	12,12	0,38	7,85	1,38	12,12	0,38	7,53	90.664
30_50/50_TEX2-2_TEX7+AR_POS8_1CL_R2	3	1,88	5,75	0,05	-	-	5,75	0,05	-	82.652

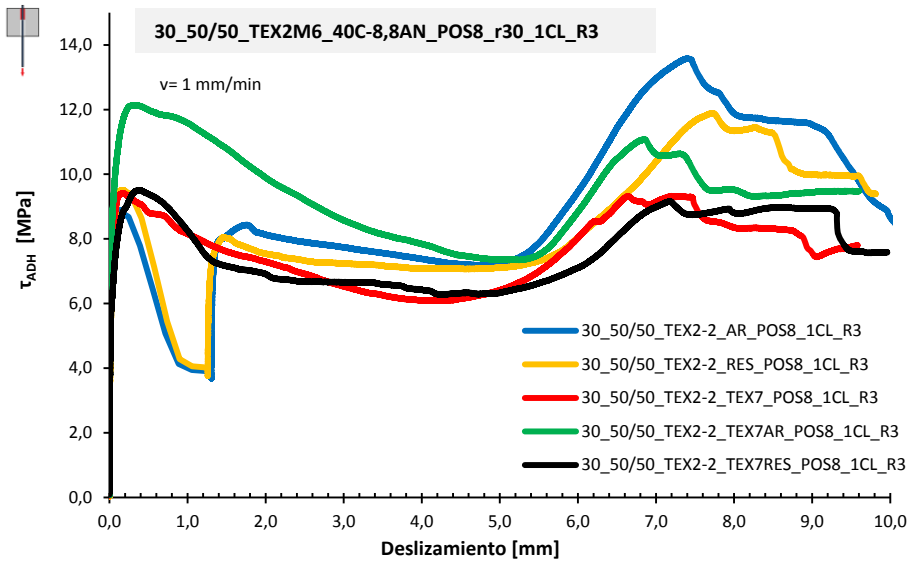


Fig. AII.37 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 8 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 3.

Tabla AII.37 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 8 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 3.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2-2_RES_POS8_1CL_R3	7	3,98	9,51	0,17	3,76	1,26	9,51	0,17	7,09	71.188
30_50/50_TEX2-2_AR_POS8_1CL_R3	7	4,16	8,89	0,12	3,69	1,31	8,89	0,12	7,38	72.260
30_50/50_TEX2-2_TEX7_POS8_1CL_R3	5	4,93	9,41	0,16	-	-	9,41	0,16	6,09	74.025
30_50/50_TEX2-2_TEX7+RES_POS8_1CL_R3	5	4,23	9,50	0,37	-	-	9,50	0,37	6,42	73.486
30_50/50_TEX2-2_TEX7+AR_POS8_1CL_R3	5	6,59	12,15	0,32	-	-	12,15	0,32	7,85	99.447

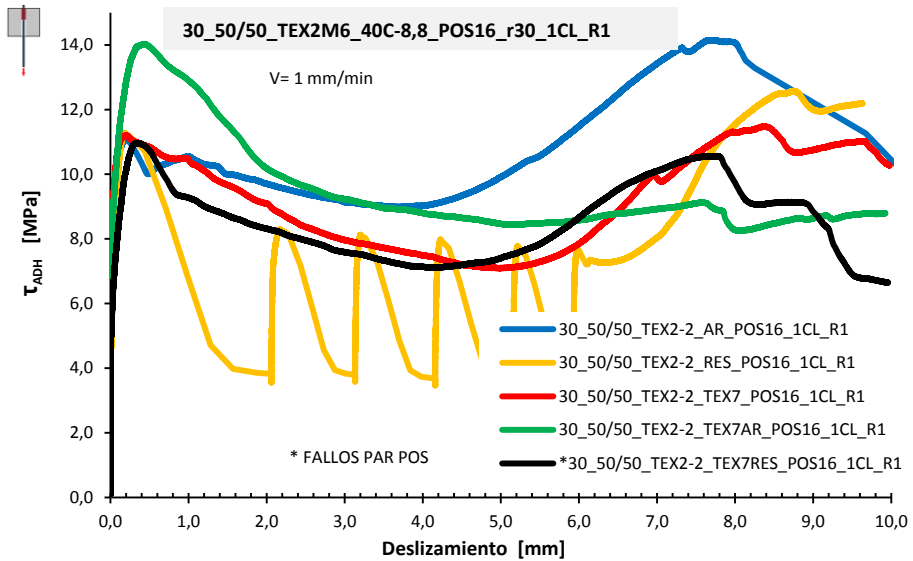


Fig. AII.38 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 16 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 1.

Tabla AII.38 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 16 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 1.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2-2_RES_POS16_1CL_R1	6	4,62	11,27	0,18	3,56	2,06	11,27	0,18	3,70	64.813
30_50/50_TEX2-2_AR_POS16_1CL_R1	5	5,45	11,09	0,21	-	-	11,09	0,21	9,03	97.259
30_50/50_TEX2-2_TEX7_POS16_1CL_R1	5	7,30	11,21	0,21	-	-	11,21	0,21	7,50	91.429
30_50/50_TEX2-2_TEX7+RES_POS16_1CL_R1	5	4,99	10,97	0,35	-	-	10,97	0,35	7,14	84.619
30_50/50_TEX2-2_TEX7+AR_POS16_1CL_R1	5	7,62	14,02	0,44	-	-	14,02	0,44	8,80	108.217

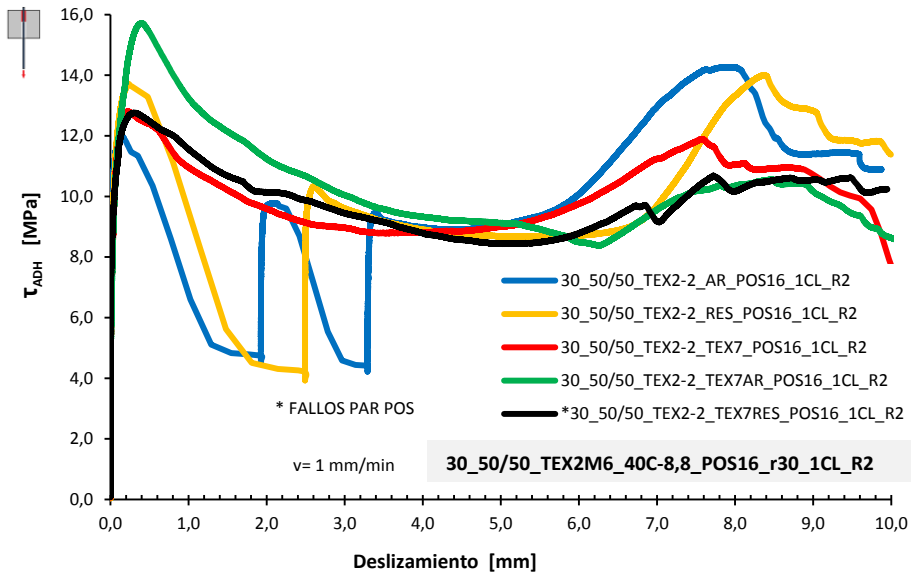


Fig. AII.39 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 16 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 2.

Tabla AII.39 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 16 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 2.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ pico}}$ [mm]	τ post-pico [MPa]	$\delta_{\tau \text{ post-pico}}$ [mm]	τ máx [MPa]	$\delta_{\tau \text{ máx}}$ [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2-2_RES_POS16_1CL_R2	7	6,64	13,71	0,23	3,93	2,49	13,71	0,23	8,91	87.244
30_50/50_TEX2-2_AR_POS16_1CL_R2	7	9,44	12,01	0,13	4,54	1,93	12,01	0,13	8,97	78.573
30_50/50_TEX2-2_TEX7_POS16_1CL_R2	5	5,95	12,81	0,22	-	-	12,81	0,22	8,81	100.289
30_50/50_TEX2-2_TEX7+RES_POS16_1CL_R2	5	7,64	12,76	0,30	-	-	12,76	0,30	8,79	104.738
30_50/50_TEX2-2_TEX7+AR_POS16_1CL_R2	5	5,71	15,71	0,41	-	-	15,71	0,41	9,32	116.226

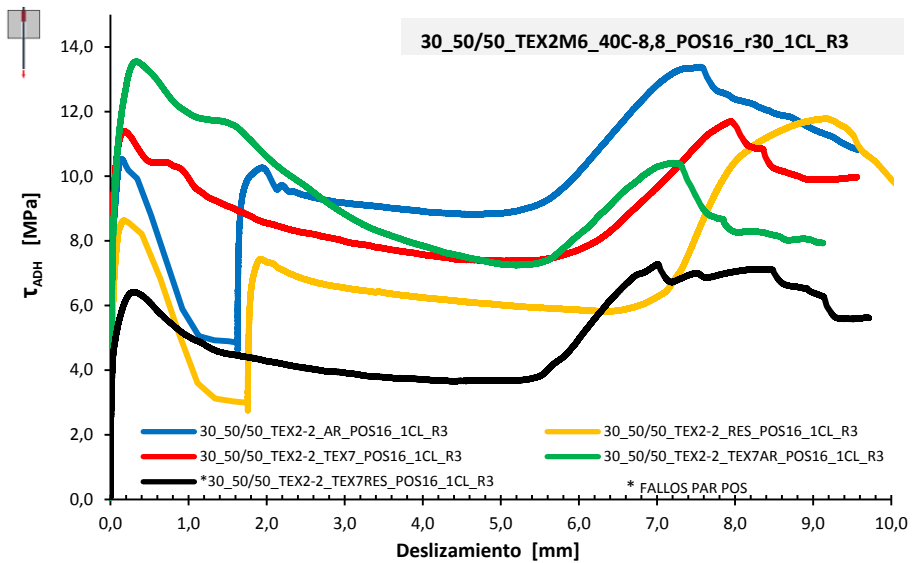


Fig. AII.40 Curvas τ/δ , modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 16 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 3.

Tabla AII.40 Parámetros de caracterización de la adherencia modalidad 1CL, una cara libre, con confinamiento activo hormigón. Coliso con tornillería M4 6.6 + texturizado y combinaciones. Postesado 16 Nm, GFRP interfase 50 x 50 mm, recubrimiento 30 mm, rotura 3.

Espécimen	Modelo	τ despegue [0,01 mm]	τ pico [MPa]	δ τ pico [mm]	τ post-pico [MPa]	δ τ post-pico [mm]	τ máx [MPa]	δ τ máx [mm]	τ residual [MPa]	Energía [Julios]
30_50/50_TEX2-2_RES_POS16_1CL_R3	7	3,60	8,63	0,17	2,75	1,76	8,63	0,17	6,24	61.135
30_50/50_TEX2-2_AR_POS16_1CL_R3	7	5,44	9,73	2,20	4,64	1,63	9,73	2,20	8,91	84.462
30_50/50_TEX2-2_TEX7_POS16_1CL_R3	5	7,24	11,39	0,17	-	-	11,39	0,17	7,58	89.373
30_50/50_TEX2-2_TEX7+RES_POS16_1CL_R3	5	2,77	6,42	0,32	-	-	6,42	0,32	3,72	45.358
30_50/50_TEX2-2_TEX7+AR_POS16_1CL_R3	5	4,49	13,55	0,33	-	-	13,55	0,33	7,86	104.589