



L'ÚS DE MATERIALS COMPOSTOS EN EL REFORÇ INTERN D'ESTRUCTURES DE FORMIGÓ

INTRODUCCIÓ

El manteniment i reparació d'estructures de formigó armat a causa del seu deteriorament ocasiona problemes de servei i importants costos als quals cal dedicar especial atenció. Aquesta situació es produeix principalment en estructures sotmeses a ambients agressius, com els marins o amb alta humitat, en els quals les barres d'acer emprades com a reforç estructural es veuen afectades per la corrosió. La problemàtica creada per aquests tipus de patologies ha provocat l'adopció d'especificacions més estrictes en els codis de disseny per tal de millorar la durabilitat de les estructures de formigó.

L'ús de materials compostos de matriu polimèrica (des d'ara FRP, *Fibre Reinforced Polymer*) apareix com una solució efectiva als problemes de corrosió que poden presentar les estructures de formigó armades amb acer, així com altres problemàtiques que poden sorgir com a conseqüència de l'acció de camps electromagnètics. Els FRP aporten solucions tant per al reforç intern de les estructures de formigó com per al reforç extern d'estructures ja existents.

Malgrat que darrerament han aparegut els primers codis de disseny per a estructures armades amb FRP [1, 2, 3], encara hi ha una important manca de normalització i uniformització en aquest camp. Això provoca l'existència d'una gran varietat de característiques tant mecàniques com resistents dels materials disponibles, així com una manca d'uniformitat en l'establiment del comportament estructural del formigó armat o reforçat amb FRP.

En aquest sentit, a la Universitat de Girona s'està desenvolupant un estudi numèric i experimental d'elements armats amb FRP, sotmesos a tracció i flexió. L'objectiu principal ha estat contrastar els models actuals de comportament de formigó armat amb acer amb el comportament experimental de formigó armat amb FRP, tenint en compte les diferències entre els materials, de manera que es puguin proposar eines pràctiques de disseny i comprovació d'aquests elements.

FIBRE REINFORCED POLYMERS (FRP).

CARACTERÍSTIQUES MECÀNIQUES I RESISTENTS

Els FRP són materials compostos de fibres sintètiques o orgàniques d'elevada resistència en una matriu polimèrica. Les fibres són els constituents que aporten la rigidesa i capacitat resistent i acostumen a ser elements llargs i continus que ocupen entre el 20 i el 75% del volum del compost. Les seves propietats depenen del material utilitzat, i són molt superiors a les de les resines. La matriu del compost està formada generalment per resines que tenen com a principal funció la de transmetre els esforços entre fibres, mantenir-les en la seva orientació i donar protecció al conjunt. Les resines més utilitzades són les epoxis, per les seves propietats adherents i la seva resistència a la corrosió, però també s'empren resines de polièster o vinilèster i en alguns casos termoplàstiques.

Generalment, els FRP es classifiquen en tres grans grups segons el material de la fibra: de fibra de vidre (GFRP), de fibra de carboni (CFRP) i de fibra d'aramida (AFRP). El primer grup (GFRP) presenta una bona relació entre les propietats mecàniques i el preu, malgrat que necessita protecció per a medis alcalins. Els CFRP són els materials amb prestacions més elevades dels presentats, i també els més cars, mentre que els AFRP es troben en una situació intermèdia pel que fa a les seves prestacions.

En general, les barres de FRP presenten com a característiques mecàniques un mòdul elàstic baix en relació amb l'acer i una resistència a tracció elevada, tal com es mostra a la *Taula 1*, a la pàgina següent.

Aquestes particularitats afavoreixen que les estructures de formigó armades amb barres de FRP tinguin deformacions i obertures de fissura més elevades que les armades amb acer. Per aquest motiu en aquestes estructures adquireix major importància l'estudi del comportament en servei. D'altra banda, cal destacar que els FRP presenten un comportament tensió – deformació lineal fins a ruptura, el límit elàstic

Característiques	GFRP	CFRP	AFRP	Acer
Densitat (kg/m ³)	1.25+2.10	1.50+1.60	1.25+1.40	7.90
Coef. dilatació long. ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) α_L	6+10	-9+0	-6+-2	11.7
Coef. dilatació transv. ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) α_T	21+23	74+104	60+80	11.7
Límit elàstic (MPa)	-	-	-	400+500
Resistència a tracció (MPa)	480+1600	600+3690	1720+2540	550
Mòdul elàstic (GPa)	35+60	120+580	41+125	200
Allargament límit elàstic (%)	-	-	-	0.2+0.25
Allargament en ruptura (%)	1.2+3.1	0.5+1.7	1.9+4.4	15+20

Taula 1: Característiques mecàniques dels FRP

coincideix amb la resistència última, i no hi ha un comportament dúctil del reforç, tal com succeeix amb acer.

Els FRP tenen altres peculiaritats que cal tenir en compte a l'hora d'usar-los en estructures de formigó, com el fenomen de ruptura per tensions mantingudes (*creep rupture*), pel qual una barra de FRP sotmesa a un esforç constant inferior a la seva resistència nominal de tracció amb càrrega instantània pot fallar de manera fràgil al cap d'un cert temps. Això obliga a limitar les tensions ocasionades per la fracció de càrregues permanents.

ESTUDI EXPERIMENTAL DESENVOLUPAT A LA UNIVERSITAT DE GIRONA

La Universitat de Girona està portant a terme un estudi d'elements de formigó reforçats amb barres de FRP. La investigació es basa en la selecció i caracterització de barres de FRP de diferents materials i acabats superficials disponibles comercialment (*Figura 1*), i en el plantejament d'una campanya d'assaigs experimentals d'adherència, de tracció directa i de flexió sobre elements de formigó armats amb barres de FRP.

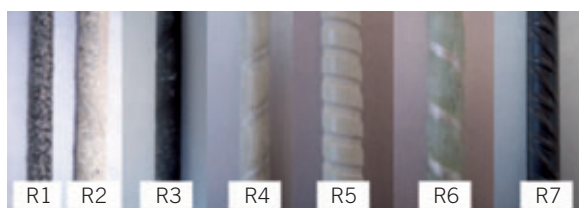


Figura 1. Acabat superficial i característiques de les barres estudiades.

Un dels objectius principals d'aquest primer estudi és l'anàlisi de la transmissió d'esforços entre les barres i el formigó circumdant, incidint principalment en la col·laboració del formigó traccionat entre fissures (*tension-stiffening*) i en les deformacions produïdes a nivell de peça. En la *Figura 2* es pot observar un assaig a tracció directa d'un element de formigó de 170 · 170 · 1300 mm armat amb una barra de FRP.



Figura 2. Assaig de tensió directa.

Per tal de caracteritzar l'adherència entre les diferents tipologies de barres de FRP i el formigó, s'ha realitzat una campanya experimental d'assaigs de *pull-out* sobre cubs de formigó. Els tests de *pull-out* s'han portat a terme sobre cubs de formigó de 200 · 200 · 200 mm, tal com es mostra a la *Figura 3*, i s'ha enregistrat la tensió mitjana d'adherència de la barra, deguda a la força amb què s'estira, enfront del lliscament de la barra.

En la campanya experimental s'ha observat que el fet que hi hagi diferents formats de barres amb diferències en les fibres, resines o acabats superficials dona respostes que depenen de les variacions en aquests paràmetres, cosa que no passa en les barres d'acer. Com a conseqüència de la diferència de mòdul d'elasticitat dels FRP comparats amb

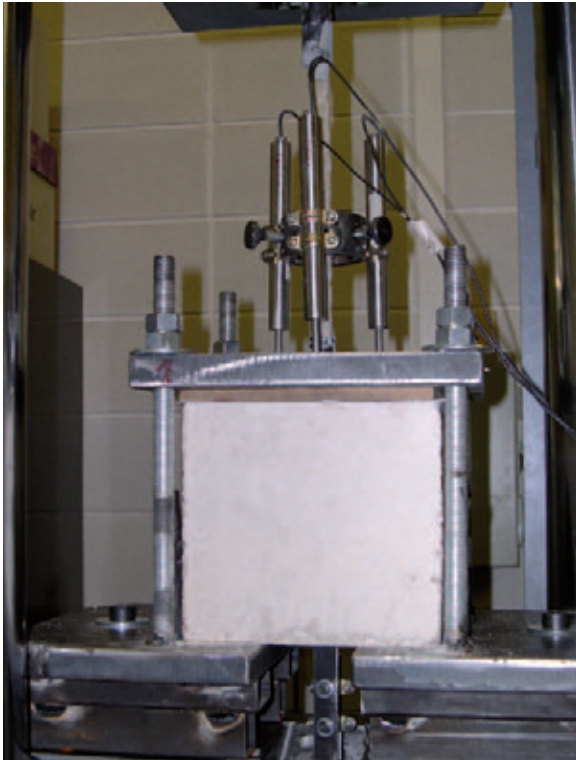
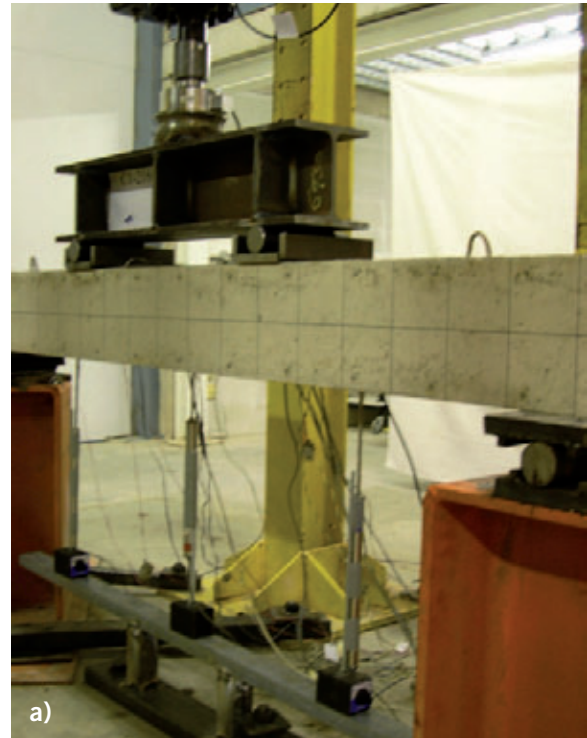


Figura 3. Muntatge de l'assaig de *pull-out*.

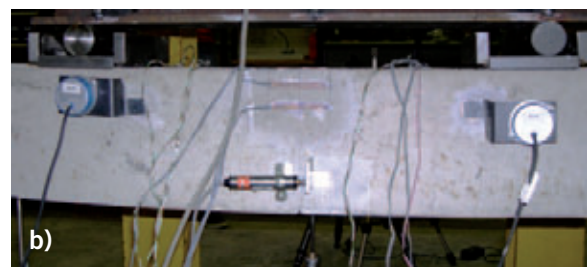
l'acer, la rigidesa inicial de les corbes d'adherència és menor que la de l'acer, i aquesta és la diferència més important en el cas dels GFRP. D'altra banda, els diferents acabats superficials considerats a l'estudi activen diversos mecanismes de transferència, que a la vegada també depenen del formigó utilitzat. Finalment, es destaca que hi ha una dispersió important de les dades experimentals que remarca la necessitat de millora dels controls de qualitat dels processos de producció de les barres.

Paral·lelament, s'han realitzat assaigs a flexió de bigues de 140 · 190 · 1.800 mm armades amb diferents quanties d'armadura de GFRP (Figures 4) per estudiar el comportament en servei d'aquest tipus d'elements i comparar-lo amb les prediccions teòriques dels codis de disseny.

L'estudi realitzat indica que les bigues armades amb barres de FRP presenten fletxes i amplades de fissura superiors a



a)



b)

Figures 4. Assaig de bigues armades amb barres de GFRP: a) Disposició general; b) Detall d'instrumentació.

les esperades per a l'acer, principalment a causa del menor mòdul d'elasticitat de les barres. No obstant això, els codis de disseny actuals per a acer, com l'Eurocodi 2 (2004) [3], o per a FRP, com l'ACI 440.1R-06 [2], semblen predir amb suficient aproximació el comportament de bigues armades amb FRP a la zona de càrrega de servei, tal com s'observa a la Figura 5, que presenta una corba càrrega-fletxa per un dels casos assajats.

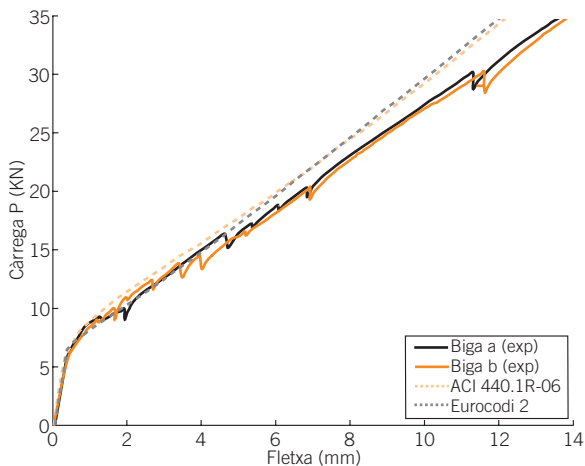


Figura 5. Relació càrrega – fletxa fins a la càrrega de servei per a bigues armades amb GFRP.

Actualment, el grup de recerca AMADE de la Universitat de Girona està treballant en l'estudi del comportament a llarg termini dels mateixos elements. S'ha previst una campanya experimental basada en assaigs de tracció directa i assaigs de flexió, similars als executats en assaigs instantanis, per tal d'estudiar els efectes diferents causats per la fluència i la retracció en aquest tipus d'elements. Paral·lelament es realitzaran estudis numèrics i analítics del comportament a llarg termini.

REALITZACIONS PRÀCTIQUES AMB FORMIGONS ARMATS AMB BARRES DE FRP

Malgrat que els materials compostos són encara relativament nous en la construcció i que molts tècnics i empreses no estan familiaritzats amb les seves propietats i característiques, els FRP han trobat ja aplicacions específiques on presenten avantatges respecte d'altres opcions. Els casos en què l'estructura es troba exposada a problemes de corrosió constitueixen una aplicació clara, com és el cas de ponts, vials, etc. (Figura 6 a), o també en el cas on es combinen possibles alteracions electromagnètiques amb aplicació de sals per al desglaç (Figura 6 b).



Figura 6a. Armadura de tauler de pont (EUA).



Figura 6b. Armadura de paviment en peatge (França).

Un altre exemple d'aplicació d'aquest material el trobem en la utilització de barres de GFRP en les pantalles de formigó armat en la construcció de vies soterrades que han de ser foradades posteriorment per tuneladores, cosa que resulta molt més senzilla de fer que amb armadures d'acer (*soft eyes*) com el cas de Figura 7.

CONCLUSIONS

La utilització de barres de FRP com a armadures d'estructures de formigó armat es presenta com una alternativa a



Figura 7. Reforç de la paret diafragma que serà foradada per la màquina tuneladora (Línia de metro, Amsterdam).

la utilització d'armadures d'acer en determinats casos en què les especials circumstàncies a què hagi d'estar sotmesa l'estructura ho aconsellin. Així, les utilitzacions més representatives han estat les d'estructures sotmeses a ambients agressius, a l'acció de camps electromagnètics, o pantalles que han de ser foradades per tuneladores.

La diferència de característiques d'aquests materials respecte de les barres d'acer han motivat diferents estudis a nivell internacional per validar o modificar les metodologies de càlcul emprades per al formigó armat convencional. A causa de la menor rigidesa de les barres respecte de l'acer, són d'esperar majors deformacions.

El grup de recerca AMADE de la Universitat de Girona està portant a terme un estudi numèric i experimental sobre el comportament en servei d'aquest tipus d'estructures. La primera part s'ha centrat en l'estudi de l'adherència i del com-

portament a tracció i flexió amb càrregues instantànies. En la segona part s'estudiarà el comportament diferit. Les conclusions provisionals obtingudes fins al moment posen de manifest la manca d'uniformitat en el comportament entre barres de diferents formats, confirmen la major deformabilitat i a la vegada mostren l'aptitud per al càlcul de les expressions proposades en diferents codis de disseny que poden ser emprats.

AGRAÏMENTS

Al CECAM per la seva col·laboració en la caracterització de materials i en la discussió de resultats. Al Ministerio de Educación y Ciencia pel finançament obtingut en els projectes BIA 2004-05253 i BIA 2007- 60222.

REFERÈNCIES

- [1] FIB. *FRP reinforcement in RC structures*, Federation Internationale du Beton, Task Group 9.3. Lausanne, Switzerland, setembre 2007. 147 p.
- [2] ACI 440.1R-06 (2006), *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars* (ACI 440.1R-06), American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 45 p.
- [3] CEN 2004. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings* (EN 1992-1-1:2004). Comité Européen de Normalisation, Brussels, 225 p.

LLUÍS TORRES LLINÀS
CRISTINA BARRIS PEÑA

Grup de recerca en Anàlisi i Materials Avançats
per al Disseny Estructural (AMADE)
Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona