

# La fibra de carboni (CFRP): preguntes freqüents

La CFRP és una bona solució per resoldre problemes de reforç estructural que, amb un bon disseny i aplicació, esdevé rendible

Josep Baquer / Imatges de l'autor



Reforç amb fibres de carboni a la reforma de la Biblioteca Montserrat Roig, candidatura seleccionada als Premis Catalunya Construcció 2018 en la categoria de Rehabilitació Funcional

Com podrà veure el lector, l'esquema bàsic d'aquest article recorda un conegut programa de televisió a Catalunya: *Preguntes Freqüents*, en aquest cas, preguntes freqüents sobre la fibra de carboni emprada per a reforçar elements estructurals de formigó armat. Això em permetrà de ser molt esquemàtic en la redacció, cosa que al meu entendre, en pot facilitar la lectura.

## ■ Questions prèvies

### D'on li ve el nom?

Normalment i per simplificar es fan servir les sigles de les paraules angleses corresponents a Fiber Reinforced Polymer. D'aquestes fibres n'hi ha de tres tipus, de vidre (Glass), d'aramida (Aramide) o de carboni (Carbon). Segons el tipus de què es tracti, s'hi afegeix la lletra cor-

responent al davant de FRP. En el nostre cas, ens centrem en els reforços fets amb CFRP.

La GFRP normalment es presenta en teixits i malles, i la AFRP en plaques i teixits: és la que es fa servir per exemple per les armilles antiimpacte o antibala.

### Per què la CFRP?



El primer que salta a la vista és la facilitat d'execució d'aquesta mena de reforços que normalment no requereixen res més que la preparació adequada del suport (net, raspallat, llis, ben pla, ben sec), la descàrrega al màxim de l'element estructural i la seva superfície tributària per tal que la deformació en el moment de fer el reforç sigui la mínima possible, cosa que després ajudarà l'entrada en càrrega de la fibra optimitzant-ne la seva eficàcia. Per això, abans de procedir a fer el reforç, cal tendir a què l'estructura només se suporti ella mateixa i el mínim de càrregues mortes possibles.

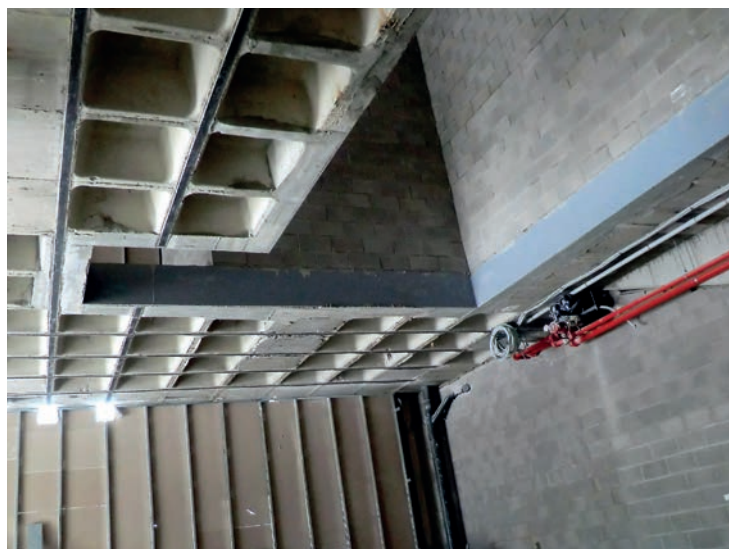
Per les operacions necessàries, normalment amb molt pocs elements auxiliars n'hi ha prou: bastides o plataformes elevadores, etc. Em refereixo sobretot al cas de l'edificació. Pel que fa a l'obra civil tipus ponts i preses, de vegades aquests elements *auxiliars* poden requerir una complexitat notable.

L'aplicació d'aquests reforços no comporten increments apreciables de secció, atès que es fa amb elements molt prim, de poc gruix, sovint d'entre 1 i 2 mm. I finalment, perquè un cop aplicat el reforç, al cap de molt poc temps ja està en condició d'entrar en servei.

És veritat que es tracta d'un producte *car* atesa la seva composició química i el procés de fabricació, però sovint, si es valora el conjunt de l'actuació respecte a d'altres possibles més *invasives* i d'execució més perllongada en temps, el resultat acostuma a ser favorable.

## ■ Plantejament del reforç

### Què cal conèixer?



En qualsevol cas, sigui el plantejament de reforçar un forjat unidireccional o reticular, o una llosa o un pòrtic de formigó o uns pilars, cal conèixer bé la realitat del *suport* de què es tracta. Per tant, la qualitat del formigó (resistència característica:  $F_{ck}$ ) i de les barres de l'armat (límit elàstic:  $f_y$ ), la disposició de l'armat i per descomptat la geometria de la secció i del desenvolupament de l'estructura en estudi.

Això és possible? La veritat és que no sempre, però en tot cas, cal investigar-ho per tal de poder treballar amb dades el més fiables possibles. Si es disposa del projecte amb què es va executar l'obra se'ns facilitarà la feina, tot i que caldrà comprovar que la realitat s'hi correspongui, perquè com sabem molt bé, anys enrere no es feien projectes *as built* i una cosa era allò que s'havia projectat i una de molt diferent la que s'havia executat.

Si no se'n coneix el projecte, cal investigar l'element o elements que es vulguin reforçar per poder saber amb la major exactitud possible com són en realitat: caldrà extreure provetes de formigó i si és possible també d'acer d'alguna barra més accessòria que ens permeti conèixer-ne la qualitat. Actualment, tenim detectors de metalls a l'abast que ens permeten localitzar la posició de les armadures i fins i tot el diàmetre. Hem de tenir clar, que el càlcul del reforç s'ha de fer a partir d'aquestes dades i evidentment, a partir de les noves sol·licituds requerides de càrrega.



## Quins són els pitjors enemics?

### • La temperatura excessiva

De fet hem de parlar de dos *enemics* principals: el primer és la temperatura. Per què? Per una raó molt senzilla: el reforç de fibra s'ha d'adherir al suport de formigó mitjançant resines epoxídiques que hauran de fer-se càrrec de l'esforç rasant entre ambdós elements i de les traccions que s'originin atès que la fibra i el formigó han de treballar completament units com si fossin una mateixa peça. Però resulta que les resines a partir dels 45°C perden les seves qualitats i deixen de ser eficaces malgrat que la fibra de carboni segueixi en condicions de donar les mateixes prestacions. Tant en edificació com en obra pública aquest és un tema cabdal. Els reforços en elements estructural a l'aire lliure poden estar sotmesos a salts tèrmics molt importants i per descomptat superar amb escreix els 45°C en zones d'insolació. I en el cas de l'edificació, hem de pensar sobretot en la situació accidental d'incendi. No és possible aïllar tèrmicament de forma raonable, una fibra de carboni en casos en què les temperatures s'enfilen ràpidament a més de 700°C. És per aquesta raó, que no s'ha de poder comptar amb aquest tipus de reforços en cas d'incendi.

Aleshores què? Fàcil: en estudiar el reforç s'ha de comprovar que el moment últim de la secció tal com està armada abans de ser reforçada ( $M_u$ ) és capaç de suportar les sol·licitacions corresponents en cas accidental d'incendi, tenint en compte els coeficients corresponents. Què vol dir això? Que així com quan es calcula el reforç (i l'estructura) es considera el límit últim amb coeficients molt elevats que afecten (majoren) la sobrecàrrega d'ús (1.45) les càrregues mortes (1.35) i el pes propi (1.35); i també els materials (minoren la seva capacitat) en el cas del formigó 1.5 i l'acer 1.15; normalment en situació accidental d'incendi, aquests coeficients es redueixen a la unitat, perquè del que es tracta és d'assegurar que l'estructura aguantí només el temps previst de 30, 60, 90 o 120 minuts, temps que requereix l'evacuació de l'immoble. Tot això es calcula tot aplicant les fórmules "normals" d'equilibri de la secció que ara no venen al cas.

### • El vandalisme



L'altre *enemic* dels reforços de fibra de carboni, és el vandalisme. És tan fàcil serrar, tallar o perforar un teixit o un laminat de CFRP que sense cap *mala intenció* però sí per ignorància, es pot malmetre el reforç només pel fet d'haver-hi clavats algun suport per a instal·lacions o per a complements arquitectònics. Per això convé documentar d'alguna manera que aquests elements no es poden ni tocar, ni fer-hi perforacions ni minvar-ne la secció de cap manera.

### Què cal verificar?

A banda de tots els temes que tenen a veure amb la traçabilitat del producte, la correcció del transport i estoc en obra, etc, cal ser molt curós a l'hora de preparar el suport i a l'hora d'aplicar el producte. Ara bé, un cop ja col·locat, cal verificar la seva adherència al formigó. Normalment es fan uns assaig d'extracció normalitzats amb *laminat màrtir* del mateix material situat en un element igual al realment reforçat, i fet al mateix temps i amb la mateixa resina. Evidentment, si falla l'adherència, el reforç és inútil.

## ■ Reforç a tallant

### Com funciona?

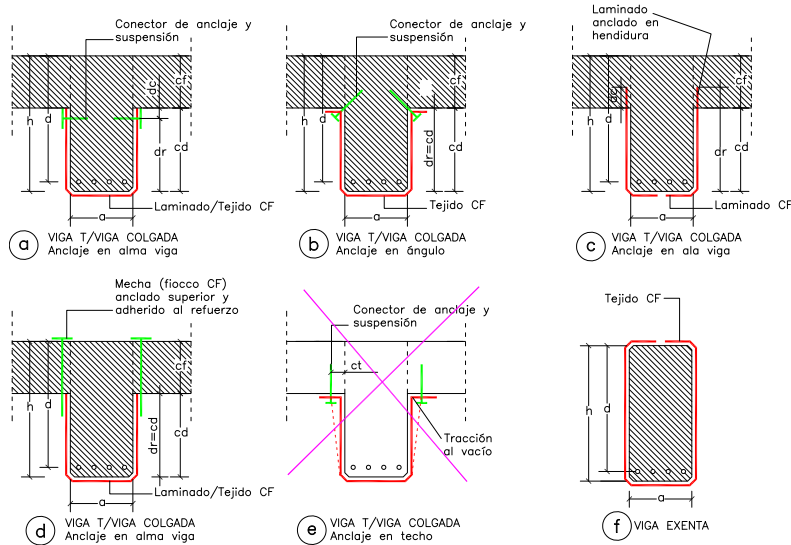


Figura 01. Font: *La fibra de carboni en refuerzo de estructuras de hormigón*. Institut d'Estudis Estructurals (ACE)

Funciona d'acord amb la teoria clàssica de les *bieles* amb què es dimensionen els estreps de les bigues de formigó (en aquest tema no m'hi aturo: tots sabem de què va), però adherint laminats o teixits de CFRP a la pell de la biga. Per què els estreps tenen un desenvolupament de rectangle? Per tal que les barres verticals, que són les que treballen per absorbir les traccions dels esforços tallants, restin ancorades als dos extrems, a dalt i a baix. Ací rau el quid de la qüestió. És possible fer això amb la fibra? Tal i com es pot veure a la figura 01 sí que és possible. Per la part de sota de la biga, cap problema. Per la part de dalt, ja és una altra cosa. El que sí sabem és que només serà eficaç la longitud

de fibra (sigui teixit o laminat) adherida als laterals de la biga a reforçar, en la mida que estigui ancorada als seus extrems.

En el cas d'una secció exempta es pot embolicar tota la secció sense problema, però en el cas de bigues despenjades, s'han de buscar solucions per ancorar la part de dalt. Crec que la figura és suficientment eloqüent i no cal que m'allargui en explicacions. El que em sembla important és tenir el criteri clar per tal de no fer despeses de fibra inútils i enganyoses.

El tema dels tallants s'està investigant molt, precisament per aquesta raó: perquè l'adherència lateral no sembla suficient per manca de longitud d'ancoratge, o senzillament, perquè cal reproduir d'alguna manera un "estrep" tancat. És evident per tant, que no es pot reforçar una secció de llosa o de biga plana amb CFRP, almenys de moment.



### Quan és possible?

Tot i que sembli que el primer que calgui a l'hora de plantejar un reforç, sigui mirar com donar resposta als nous requeriments de càrrega pel que fa a la flexió, de fet el que primer que cal comprovar és el tema de les sol·licitacions tallants. Per què? Perquè si hi ha problema de tallants per manca de secció o d'armat i això no es pot resoldre d'una manera lògica, no cal seguir plantejant el reforç a flexió, almenys amb CFRP.

Per descomptat i prèviament, si es tracta de reforçar una llosa de formigó, caldrà comprovar que la llosa amb el gruix que té i els armats que hi col·laboren, estigui en condicions de donar resposta a la compressió obliqua

per a l'estat de càrregues i nous requeriments i per tant que no tinguin problemes de punxonament. Això només es podria resoldre a base d'eixamplar la base del capitell atès que no es pot modificar el gruix de la llosa.

Per poder reforçar a tallants una secció de formigó cal que hi hagi biga o nervi que es *despenchi* perquè caldrà actuar a les cares i al fons d'aquest element. Si el que ens estem plantejant és de reforçar una llosa de formigó o una biga plana, això no és possible com deia més amunt. No és possible amb la CFRP. Per tant el que caldrà comprovar d'entrada és si l'element en qüestió tal com està armat, és capaç de suportar els nous requeriments.

### Quina és la millor alternativa?

En el cas que sigui possible, la solució més viable és la d'emprar teixit CFRP degudament ancorat mitjançant *fioccos* que transmetin les traccions corresponents a la cara superior de la biga. Això es pot veure a la figura 01d. Aquesta solució comporta de fer una perforacions amb broca de diàmetre raonable que permetin el pas dels *fioccos*.



Els *fioccos* (mot italià) venen a ser uns blens de fibra de fibra de carboni com si fossin una corda de diversos caps de cordill. N'hi de diverses seccions. Es poden adherir a les teles o al formigó amb resines. El secret està en poder-los pretesar suficientment al col·locar-los per tal que puguin entrar en càrrega i tenir una tensió suficient d'entrada.

Aquesta solució també es pot fer amb laminats sempre i quan ja estiguin plegats convenientment de fàbrica. Algun fabricant els pot subministrar ja plegats en angle i tallats a mida, de manera que en obra ja tenen forma en

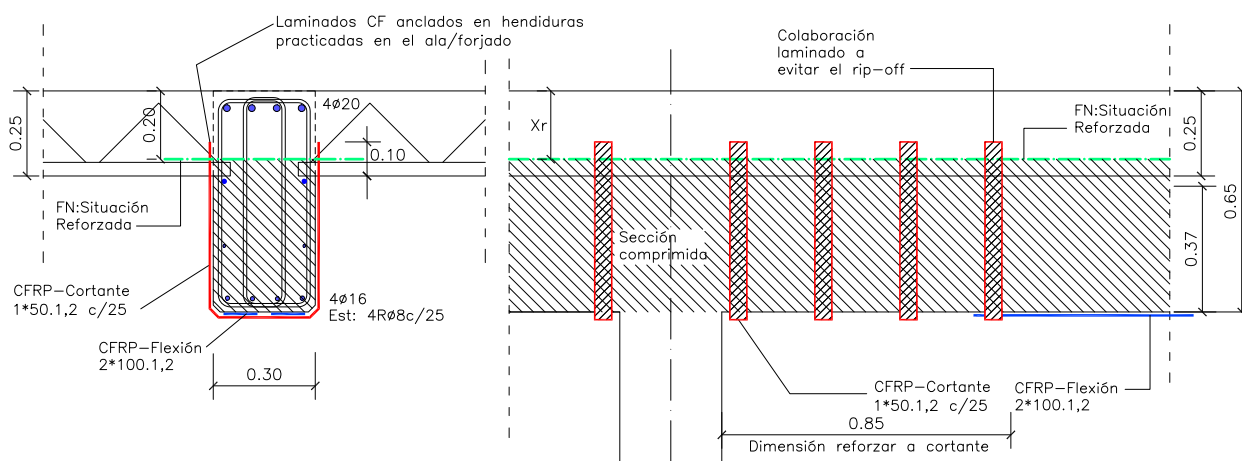
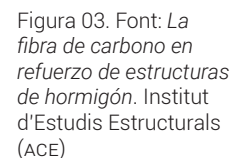


Figura 02. Font: *La fibra de carbono en refuerzo de estructuras de hormigón*. Institut d'Estudis Estructurals (ACE)



L'INFORMATIU DEL CAATEEB  
Desembre 2018



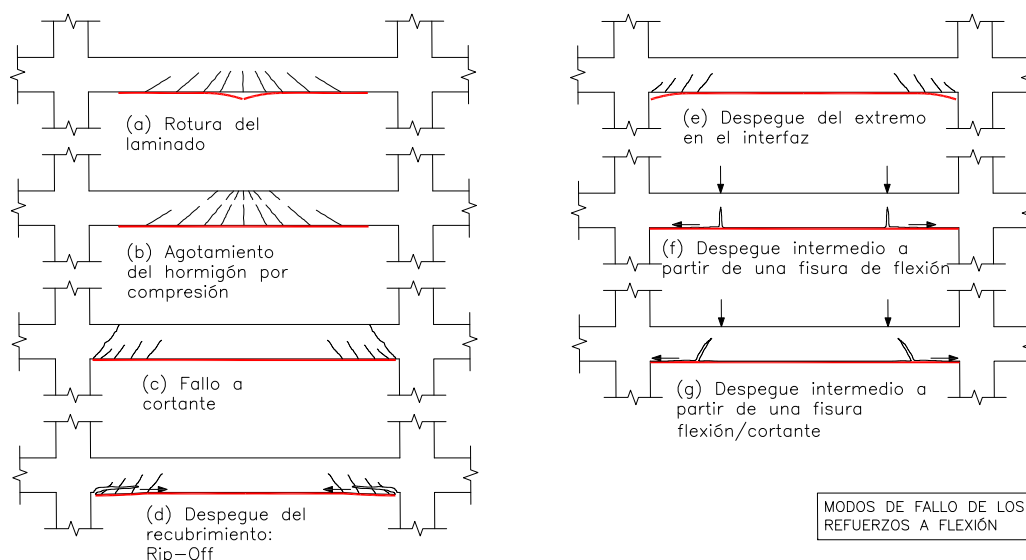


Figura 04. Font: *La fibra de carbono en refuerzo de estructuras de hormigón*. Institut d'Estudis Estructurals (ACE)

No pretenc entrar en temes de càlcul, que ara no venen al cas, però sí dir que tot plegat es va resolent amb les clàssiques equacions d'equilibri del formigó armat, afegint-hi l'hoste invitat que és la fibra de carboni. A la figura 03 també s'hi pot veure el plantejament de les equacions d'equilibri.

#### Què passa amb la RF?

Com dèiem més amunt la temperatura excessiva afecta la resina epoxídica que uneix la fibra amb el suport de formigó. A 45°C es considera que la resina deixa de treballar i per tant la fibra es desprèn del formigó. Atès que en cas d'incendi no hi ha manera d'aconseguir una protecció adient i proporcionada per salvar l'immens salt tèrmic, s'ha de menystenir la col·laboració de la CFRP: la secció de formigó haurà de treballar ella tota sola. Com dèiem més amunt, cal verificar la suficiència del Moment Últim ( $M_u$ ) de la secció per a fer-se càrrec de les sol·licituds en situació accidental d'incendi.

#### Quin és el tema més delicat?

Referint-nos al càlcul (deixo de banda temes del bon fer constructiu) probablement el tema més delicat és el de l'ancoratge del reforç: on comença i fins on ha d'arribar. Hi ha molts estudis i experimentació al respecte i en conseqüència, diverses teories fetes a partir d'assaigs recollides en fórmules empíriques.

#### Quines són les causes habituals de fallida del reforç CFRP?

Això es pot veure a la figura 04. Crec que no cal comentar tots els casos. Només vull remarcar el més habitual que és el conegut com a *rip-off* que es produeix a la zona d'ancoratge del laminat pel fet que la tracció provoca una tensió rasant a la part més feble del formigó, que és la que està en contacte amb l'armat intern a tracció, tot provocant el despreniment del formigó de recobriment. Per què passa això? Perquè la longitud d'ancoratge és insuficient. En el cas del gràfic es veu que el laminat arriba a cara de pilar però malgrat tenir tota la llarga-

da possible no en té prou. Com s'hauria d'haver resolt aquest cas? Estrebant transversalment el laminat amb laminats en U, o bé amb ancoratges metàl·lics perforant el laminat. Aquesta solució comportaria el reforç del laminat amb altres laminats collats amb resina i amb les fibres transversals. Alguns fabricants, subministren laminats de diverses capes longitudinals/transversals per poder resoldre aquests casos quan s'escau.

Evidentment, i a partir de les fórmules empíriques més versemblants, s'ha de calcular aquesta longitud d'ancoratge per assegurar l'eficàcia del reforç.

### ■ Reforç a compressió

#### Per què cal reforçar un pilar?



Ens podem trobar en el cas que un cop formigonat, les provetes a laboratori hagin donat resultats inferiors als requerits, o bé que es preveu fer una reforma i l'element hagi de suportar més càrrega i noves sol·licituds. Abans de pensar solucions a base d'*empresillats* metàl·lics o de recrescuts amb nou armat i nou formigonat que comportarien un increment de la secció, val la pena

estudiar la possibilitat de resoldre el tema amb teixit de fibra de carboni que com sabem, treballa molt bé a tracció i només a tracció.

### Com funciona?

Funciona com el faixat dels nostres castellers que ceneix amb certa tensió el seu cos per afermar la columna vertebral i la musculatura pertinent. Què fa la faixa? Permetre amb seguretat incrementar la capacitat de càrrega que haurà de suportar el casteller o casteller: més ben dit, les seves columnes vertebrals i la seva musculatura.

Recordo la teoria clàssica de compressió. Si considerem un element qualsevol prismàtic, de secció rectangular o quadrada o circular o el·líptica i d'una determinada longitud, en el moment que el comprimim en sentit longitudinal, s'escurça ni que sigui una mica. Però per poder-se escurçar, s'ha de poder eixamplar en sentit transversal. Hi ha per tant una llei de proporció, per a cada material, entre el decrement de longitud i l'increment de secció transversal en ser sotmès a una càrrega de compressió. Aquesta relació ve condicionada per un coeficient conegut com de *Poisson*. Dit d'una altra manera: en comprimir en sentit longitudinal un element, s'activa el coeficient de Poisson.

Què passa si jo constrenyo transversalment la secció amb algun element adequat? Que per aconseguir la mateixa deformació transversal hauré de fer molta més força en sentit longitudinal. De fet, aquesta és una de les funcions de l'estrebat intern d'un pilar de formigó: els estreps *confinen, constrenyen el formigó*. Doncs bé: podem aconseguir el mateix efecte amb un embenat extern del pilar fet amb fibra de carboni.

### Té importància el tipus de secció?

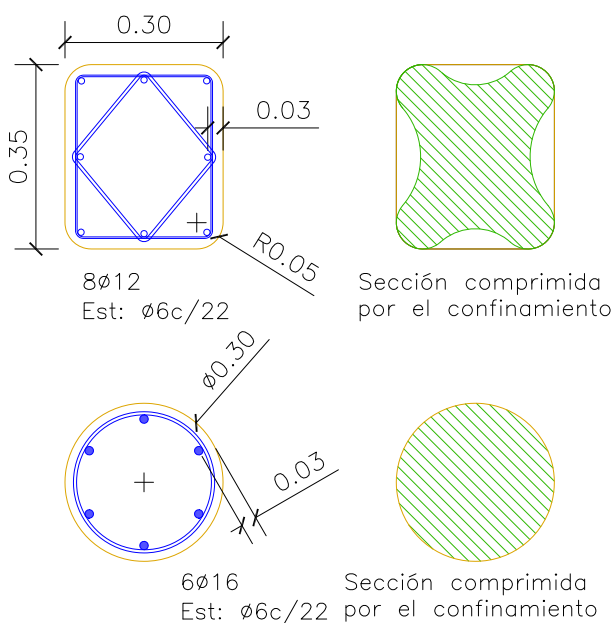


Figura 05. Font: *La fibra de carbono en refuerzo de estructuras de hormigón*. Institut d'Estudis Estructurals (ACE)

Aquí cal fixar-se en la figura 05. Efectivament, el tipus de secció té molta importància. Quina seria la secció ideal de cara a optimitzar l'aplicació de l'embenat amb fibra? Sens dubte la secció circular, perquè el coeficient de Poisson s'activa radialment a tota la secció generant una tracció uniforme (tangencial) a la secció del teixit que s'apliqui.

En segon lloc, la secció quadrada i en tercer lloc la secció rectangular. Ara bé, tenint en compte que les tensions es concentren en els vèrtexs, si són angles rectes *vius* teòricament la tensió és infinita, i en la mesura que els anem arrodonint cada cop més l'efecte Poisson es va distribuint en una secció més gran i per tant, l'embenat és més eficaç.

En el cas de seccions rectangulars, a mesura que la relació entre longitud de cares augmenta, va minvant l'eficàcia del possible reforç amb fibra. Evidentment, tot això es calcula, però ara no vull entrar en càlculs, però sí insistir que en el cas de les seccions rectangulars o quadrades, l'entrada de la dada del radi de curvatura és essencial.

Què ens trobem en molts casos de pilars fets cap als anys seixanta (i de vegades també en l'actualitat) en què no es controlava massa el recobriment? Que l'armat no està centrat a la secció del pilar i aleshores no es poden arrodonir prèviament amb el mateix radi de curvatura les quatre arestes. De vegades es pot resoldre el problema fent un recrescut sense armar de la secció amb formigó/morter autoanivellant que permeti optimitzar la forma de la secció.

### Què es pot aconseguir?

Com deia més amunt l'únic que podem aconseguir és un increment de la capacitat de treball del formigó a causa del seu confinament. En el cas més favorable de pilars de secció circular, podem arribar a un 25% d'increment de la resistència del formigó, en el cas de pilars de secció quadrada fins a un 20% i en el cas de pilars rectangulars, depèn de la relació entre la cara llarga i curta: potser un 10% o un 15%. Tot això s'ha de calcular, evidentment. Ara bé, un cop aconseguit aquest augment, ja es pot avaluar el pilar reforçat en funció dels nous requeriments. Suposem que és un pilar circular dels anys seixanta de formigó  $F_{ck} = 17.5 \text{ N/mm}^2$ , que un cop *faixat* amb CFRP la seva resistència s'ha incrementat en un 25%, doncs seria com si aquest pilar hagués estat fet amb formigó  $F_{ck} = 22 \text{ N/mm}^2$ .

Ara he de plantejar un tema més discutit, sobre la resistència real del formigó. Si ens consta que el projecte i l'obra es va fer amb un determinat tipus de formigó i que per tant en coneixem la resistència característica, això no vol dir que la resistència real del pilar en qüestió sigui la característica. Efectivament, podria ser inferior però també podria ser superior. Per què? Perquè l'envel·liment del formigó en pot millorar la seva capacitat de

treball a compressió, i perquè moltes vegades a obra, per assegurar el tret, o per avançar la data de desencofrat, es demanava un formigó de resistència característica superior a la prevista a projecte. Per això és molt convenient abans de projectar un reforç amb CFRP, extraure provetes i fer assaigs que permetin fixar la resistència d'origen, perquè aquesta serà la que realment s'incrementarà amb el *fai-xat* de CFRP.

### ■ Una guia pràctica

L'any 2014, l'Institut d'Estudis Estructurals (IEE) de l'Associació de Consultors d'Estructures (ACE), amb la participació de quatre empreses associades a l'ACE com a socis protectors (ASF, MAPEI, PROPAMSA-BETEC, SIKA) van redactar una guia entesa com a *llibre blanc* titulada *La fibra de carboni en refuerzo de estructuras de hormigón*. Jo mateix vaig ser el coordinador de l'equip de redacció. Per cert, les figures d'aquest article estan tretes de la *guia*.

### ■ Per què una guia?

La raó és senzilla. Perquè no hi ha una normativa oficial sobre aquest producte, la qual cosa genera problemes alhora de justificar-ne l'ús, tant de cara a l'Administració com a les asseguradores.

Per altra banda, cada empresa fabricant de fibra i de resines, tenia els seus criteris de càlcul, de disseny i de col·locació, com a resultat de la seva pròpia experiència i a partir de la investigació de la pròpia empresa o feta a diverses universitats. Va ser a Construmat del 2011, quan l'ACE es va reunir amb els representants de les quatre empreses esmentades per fer la proposta de redactar una guia per unificar criteris tant de cara al disseny com al càlcul dels reforços amb fibra de carboni. Una guia que pogués ser referent tècnic solvent.

### ■ Quin és el contingut?

La guia té dues parts: la primera és la *guia de disseny* en

què s'hi recull tot el que cal saber referent als materials, el disseny control i posada en obra. Aquesta primera part interessa a tots els tècnics que hagin d'emprar la CFRP: projectistes, contractistes i caps d'obra, direcció d'obra, control de qualitat, etc.

La segona part és la *guia de càlcul*. S'hi desenvolupa el procés de forma pedagògica i fàcil de seguir per qual-sevol tècnic amb un coneixement bàsic de càlcul estructural. Es fa tot a partir d'un exemple concret que a mesura que avança l'explicació, es va concretant en l'entrada de dades i resultats de càlcul. Està pensada per aquells tècnics que hagin de dissenyar i calcular el reforç, però també està recomanada per a tots els qui es vulguin aproximar a saber com funciona la CFRP i el perquè de tot plegat.

### ■ A tall de conclusió

L'exposició que he anat fent pretén donar resposta a moltes preguntes que alguns tècnics m'han fet d'ençà que vàrem publicar la guia, a les obres que he fet aplicant aquesta solució, en trobades més informals o en jornades tècniques en què la vàrem presentar: a la UPC, a ARPHO Sevilla, al Torroja de Madrid, etc.

A l'ACE estem preparant un programa de càlcul de reforç de pòrtics de formigó. Esperem que aviat el puguem presentar i posar-lo a disposició dels tècnics interessats. Mentrestant, però, disposem de fulls de càlcul excel, de fàcil utilització, que estan a disposició de tots els qui hi estiguin interessats.

Penso que la CFRP és una solució molt bona per a resoldre problemes de reforç estructural i que, amb un bon disseny i aplicació, esdevé rendible malgrat que el cost dels productes, a primera vista pugui semblar excessiu. ■

**L'autor:** Josep Baquer és arquitecte tècnic col·legiat núm 3.540 i vice-president de l'Associació de Consultors d'Estructures (ACE).

Amb un bon disseny i aplicació, la CFRP esdevé rendible malgrat que el cost dels productes, a primera vista pugui semblar excessiu

