

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Estudi experimental de fissuració de les bigues de formigó reforçades amb materials compostos FRP amb la tècnica NSM

Resum del Treball Final de Grau

Alumne: Anam Noureen

Tutor: Cristina Barris Peña

Departament: EMCI

Àrea: MMCTE

Convocatòria: Setembre 2019

1. INTRODUCCIÓ

El present treball consisteix en la realització d'un estudi experimental de la fissuració de bigues de formigó armades amb acer i reforçades amb materials compostos, en anglès *Fibre Reinforced Polymer (FRP)*, mitjançant la tècnica de reforç inserit en el recobriment, en anglès *Near Surface Mounted (NSM)*.

En el camp de construcció, l'ús dels materials compostos (FRP) amb la tècnica NSM és un dels mètodes més emprats per a millorar la capacitat resistent d'elements de formigó armat ja existents. D'aquesta forma, es pot aplicar una càrrega final superior a l'obtinguda en elements no reforçats i a més es pot reduir l'amplada de les fissures i la fletxa esperades, ja que s'augmenta la rigidesa de la biga. Els principals motius per aplicar materials compostos com a reforç d'elements de formigó armat són que presenten millor resistència als ambient corrosius, baix pes i alta resistència en comparació amb l'acer.



Figura 1: Inserció del material compost en element de formigó.

L'interès de conèixer l'amplada de fissura ve donat pel requeriment de l'estat límit de fissuració exposat en la normativa vigent (EHE-08, *instrucció de formigó armat*), on estan establerts els valors màxims de les amplades de fissures.

En el present treball, l'amplada de la fissura es mesura amb el mètode de correlació d'imatges digitals (DIC). És un mètode òptic que permet obtenir una mesura de desplaçaments i deformacions d'una determinada superfície sense estar en contacte amb la superfície d'estudi mitjançant la correlació de les imatges adquirides. Mitjançant unes càmeres digitals, es graven imatges d'una superfície determinada (Regió d'interès, ROI) de manera consecutiva durant l'assaig, que després s'analitzen per determinar la deformació i desplaçaments superficial.

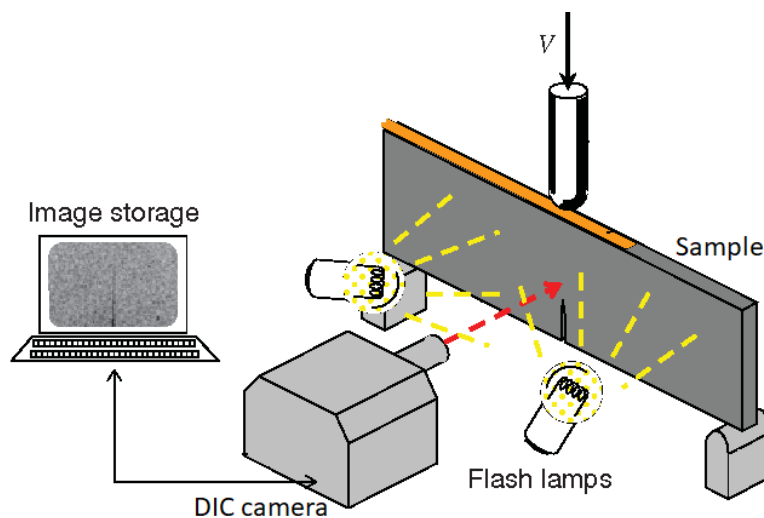


Figura 2: Principi del mètode de DIC.

2. FISSURACIÓ EN ESTRUCTURES DE FORMIGÓ ARMAT REFORÇAT AMB FRP

El formigó armat, en anglès *Reinforced concrete (RC)*, és un dels materials més utilitzats en camp de la construcció estructural. En les estructures de formigó armat sol ser inevitable l'aparició de fissures, però cal que siguin compatibles amb les exigències marcades en la normativa vigent (EHE-08). Actualment hi ha altres materials que poden ajudar al formigó armat per tal d'evitar aquests problemes, com per exemple els materials compostos (FRP) que ajuden a disminuir l'amplada de fissura.

Els compostos de polímer reforçat amb fibra (FRP), són materials compostos fabricats a partir d'una matriu polimèrica que es reforça amb una fibra, que resulta en millors propietats que els components individuals utilitzats sols.

Per a l'aplicació dels materials FRP com a reforç estructural del formigó, actualment s'han establert dues tècniques principals: reforç adherit externament (EBR) i reforç inserit al recobriment (NSM). L'ús dels materials compostos (FRP) com a reforç en estructures de formigó armades (ja sigui amb la tècnica EBR o NSM) proporciona una fissuració més distribuïda, és a dir, més nombre de fissures però d'amplada menor (més estretes).

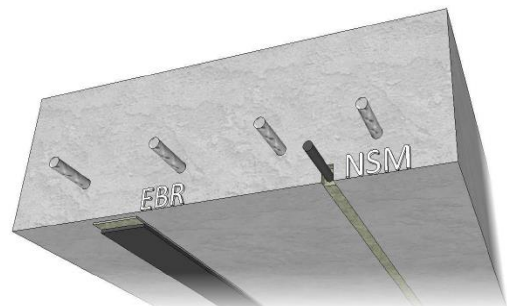


Figura 3: Tècniques d'aplicació del reforç FRP en RC.

Actualment no es disposa d'una formulació clara per poder comprovar si l'amplada de l'esquerda s'assembla amb l'amplada teòrica, però, en present estudi, es busca verificar que l'amplada de la fissura és menor en element reforçat amb NSM FRP en comparació amb un element no reforçat.

3. CAMPANYA EXPERIMENTAL

Totes les bigues assajades tenen les mateixes mides externes (2400x140180) mm i tenen la mateixa configuració pel reforç intern de les armadures longitudinals i les armadures transversals d'acer. En canvi, totes les bigues presenten una diferència en el reforç d'FRP, bé sigui la quantitat, distribució o el tipus d'FRP. A continuació s'adjunta una taula del resum de les variables de cada espècimen.

Espècimens	Armadura a flexió	Armadura a tallant	Tipus FRP	Quantia FRP	Núm lamine FRP
R	2 ϕ 10 i 2 ϕ 6	1e ϕ 8c/100	-	-	0
S1	2 ϕ 10 i 2 ϕ 6	1e ϕ 8c/100	S & P	1,4 x 10	1
S2	2 ϕ 10 i 2 ϕ 6	1e ϕ 8c/100	S & P	1,4 x 10	2
S3	2 ϕ 10 i 2 ϕ 6	1e ϕ 8c/100	S & P	2,8 x 10	2
S4	2 ϕ 10 i 2 ϕ 6	1e ϕ 8c/100	S & P	2 x 1,4 x 10 + 2,8 x 10	3
S5	2 ϕ 10 i 2 ϕ 6	1e ϕ 8c/100	SIKA	3 x 10	1
S6	2 ϕ 10 i 2 ϕ 6	1e ϕ 8c/100	SIKA	3 x 10	2
S7	2 ϕ 10 i 2 ϕ 6	1e ϕ 8c/100	SIKA	3 x 10	3

Taula 1: Resum de les variables de cada espècimen.

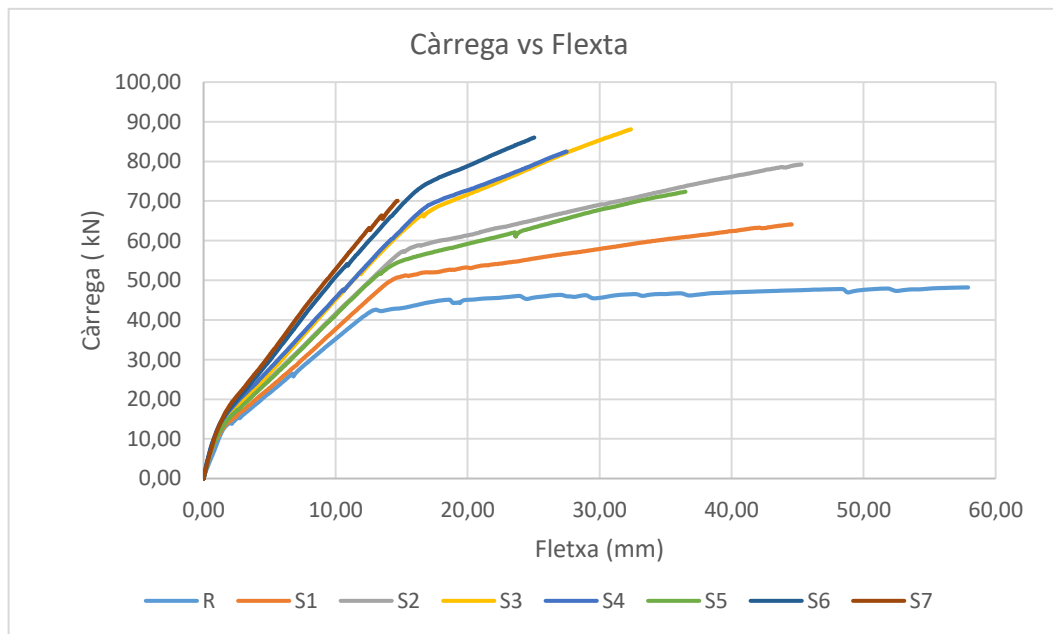
Els espècimens s'assagen a quatre punts per obtenir la zona de flexió pura, és a dir, zona on tallant sigui nul, de manera que s'obtingués les fissures rectes sense cap influència d'esforços tallants.

Abans de dissenyar el programa experimental s'ha fet l'anàlisi de la secció fissurada, en anglès *Cracked section analysis* (CSA), de manera que s'han obtingut la càrrega última de cada espècimen i el seu mode de falla. La CSA serveix per avaluar teòricament el comportament de flexió dels espècimens assumint que hi ha una secció totalment fissurada. També, cal dir que el mode de falla per debonding (ruptura de desenganxament de FRP amb formigó) no es pot preveure amb aquesta anàlisi, ja que s'està assumint adherència perfecta entre materials.

4. ANÀLISI DELS RESULTATS EXPERIMENTALS

A partir de les dades experimentals s'han obtingut la càrrega de fissuració, càrrega última i la instants de càrrega de servei per poder calcular l'amplada de fissura. A més s'ha pogut comprovar que la càrrega en servei és inferior a la càrrega de plastificació.

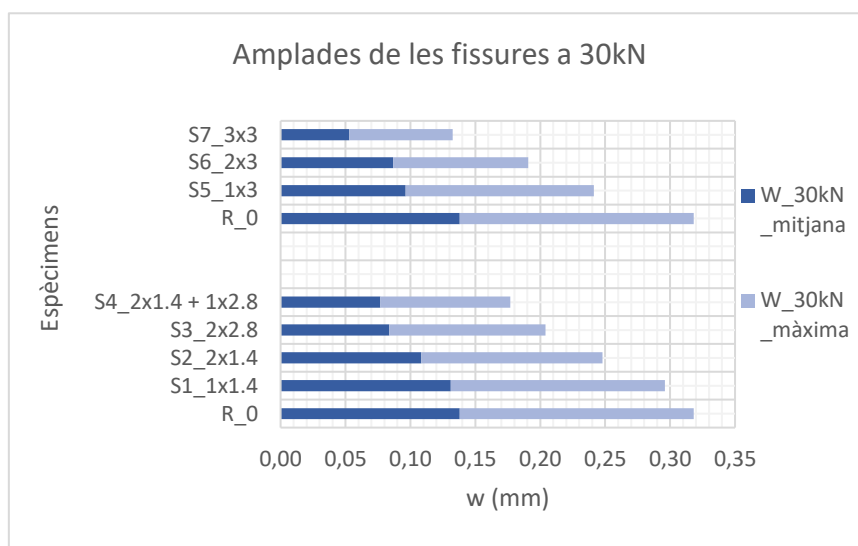
En el gràfic següent, es pot observar que tots els espècimens amb reforç tenen una càrrega última major a la càrrega última del espècimen sense reforç. Cal dir, però, que gairebé tots els espècimens van patir un ruptura prematura, per debonding.



Gràfica 1: Càrrega - fletxa experimental de tots els espècimens.

A més, s'observa que els espècimens S3 i S4 es comporten de la mateixa manera malgrat les càrregues últimes són diferents, ja que tenen la mateixa quantia de reforç FRP, i pel mateix raonament, els espècimens S2 i S5 també comporten de manera semblant. L'única diferència és la distribució del FRP, l'efecte del qual no es veu molt rellevant en cas de càrrega-fletxa.

Els resultats de fissuració, en el treball, mostren les amplades de fissures en dos instants diferents, la primera en l'instant de servei del espècimen de referència (R) i la segona en la instant de servei propi de cada espècimen. La gràfica següent mostra els resultats de les amplades de fissures mitjanes i màximes a l'instant de servei de R que és a càrrega de 30kN (P_{s1}).

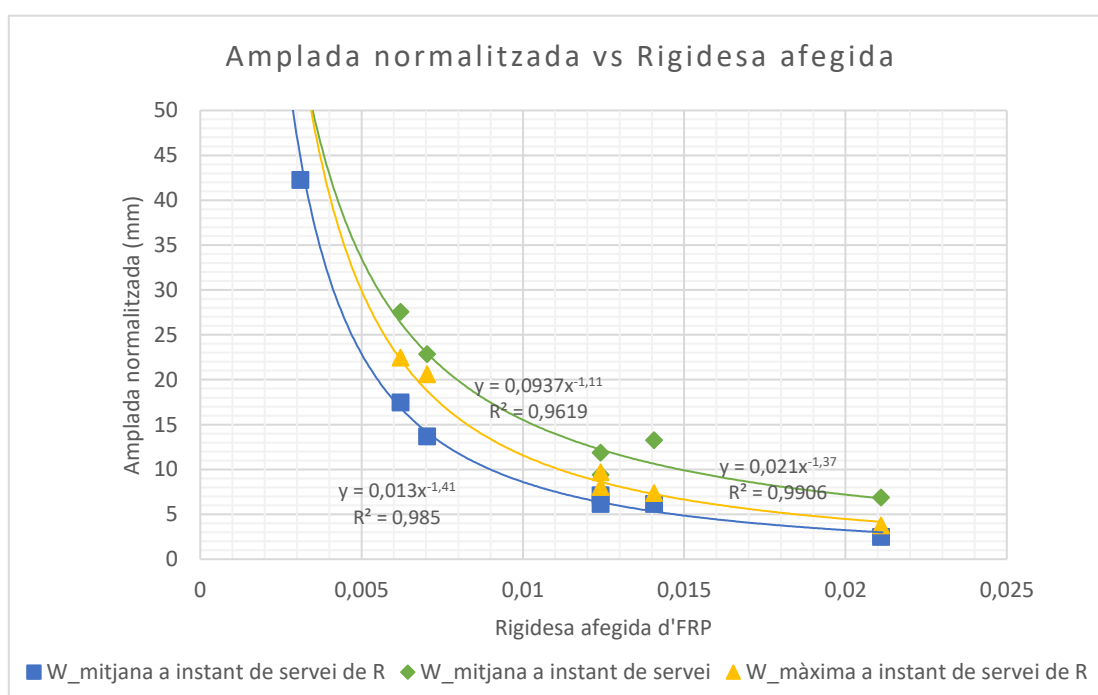


Gràfica 2: Amplada de fissura a 30kN pels espècimens.

La gràfica justifica l'efectivitat de FRP NSM en RC per de estat límit de fissuració observant que les amplades de fissures tan mitjanes com les màximes en els espècimens reforçats són menors que l'espècimen sense reforç. També s'observa l'efecte d'incrementar la rigidesa afegida a la secció en l'estat de fissuració. A part d'això, els espècimens S3 i S4, malgrat que tenen la mateixa quantitat de FRP, tenen l'amplada de fissura lleugerament diferent. L'única diferència en el disseny de aquests dos espècimens és la distribució del material FRP.

En el treball, el primer paràmetre estudiat és $n \cdot \rho_f$ que representa de la rigidesa de la quantitat de reforç afegida, essent n la relació entre el mòdul d'elasticitat de l'FRP i el formigó i ρ_f la quantia d'FRP. Es veu que com més elevat és el factor de la rigidesa afegida, menor és l'amplada de la fissura, tant la fissura mitjana com la màxima.

El segon paràmetre en funció del qual s'analitzen els resultats és el rati de l'amplada normalitzada.



Gràfica 3: Amplada de la fissura en funció de la rigidesa normalitzada.

En la gràfica s'observa que com més rígida s'afegeix a la secció, menys ampla serà la fissura i també es pot analitzar amb quina proporció l'amplada de la fissura es disminueix independentment de l'instant estudiat i a més es disminueixen de manera potencial.

El tercer paràmetre que es desitja estudiar és la distància entre regates. En aquest cas, només es consideren els espècimens que tenen dos o més regates. I l'últim paràmetre que s'estudia és p_f^2/A_f , i s'espera una millor adherència amb l'augment d'aquest paràmetre, i en a conseqüència les amplades de fissura haurien de ser menors.

Es comparen entre ells només els espècimens que tenen més o menys la mateixa quantitat del FRP. La finalitat d'estudiar aquests dos paràmetres és demostrar que apart de quantitat de material compost FRP, la distància entre regates o més ben dit la distribució del FRP i el factor p_f^2/A_f també afecta d'alguna manera en estat de fissuració.

5. CONCLUSIONS

Un cop finalitzat el treball, es pot afirmar que s'han pogut complir tots els objectius plantejats prèviament en aquest. En primer lloc, es pretenia estudiar l'estat de fissuració de bigues de formigó reforçades amb materials compostos mitjançant un estudi experimental de vuit bigues. En segon lloc, es volia analitzar el sistema DIC i emprar les rutines creades en Matlab per calcular l'amplada de la fissura.

Primerament, es pot afirmar que els materials compostos aplicats amb la tècnica NSM en elements de formigó armat tenen un efecte de "cosit" en les amplades de fissures. El factor més important en el valor de l'amplada de fissura és la rigidesa afegida d'FRP en la secció, fent que disminueixi l'amplada de fissura de manera potencial, però també s'ha pogut observar que la distribució del reforç també influeix en l'amplada de fissura de manera positiva. Però no s'ha pogut observar una relació clara del perímetre exposat al quadrat dividit per l'àrea del FRP amb la fissuració en els espècimens. En quant al tipus del material, SIKADUR té un elevat mòdul de Young, per tant, presenta una rigidesa superior i com a conseqüència menys amplada de la fissura respecte S & P per a la mateixa quantitat de material.

Segon, s'han validat les rutines d'usuari prèviament generades, mitjançant la comparació del valors de les amplades de fissures obtingues emprant les rutines de matlab amb el valor calculat manualment amb VIC. Per altra banda, també s'ha fet la comparació amb el valor calculat teòricament de l'amplada de fissura del espècimen R. Aquestes dues comprovacions justifiquen la fiabilitat del mètode de mesurar les amplades de fissura amb el sistema DIC emprant les rutines de matlab.

Finalment, s'ha observat la càrrega última i el mode de ruptura de cada espècimen. Els espècimens reforçats amb FRP van fallar a una càrrega superior respecte l'espècimen no reforçat, per tant, es pot concloure que el material compost FRP NSM fa augmentar la càrrega última real suportada. Per altra banda, també s'ha observat que els espècimens assajats en el laboratori segueixen el mateix comportament que s'havia determinat prèviament amb la rutina de CSA.