

Treball final de màster

Estudi: Màster en Enginyeria Industrial

Títol: Modelització numèrica de la unió amb ciment de làmines de polímer reforçat amb carboni (CFRP) de formigó armat (RC) amb reforç inserit al recobriment (NSM)

Document: Resum

Alumne: Antoni Jordi Carpintero Pérez

Tutora: Dra. Cristina Barris Peña

Departament: Enginyeria mecànica i de la construcció industrial

Àrea: Enginyeria de la construcció

Tutora: Dra. Laura Carreras Blasco

Departament: Enginyeria mecànica i de la construcció industrial

Àrea: Enginyeria de la construcció

Convocatòria (mes/any): Juny 2022

RESUM

En les darreres dècades s'han desenvolupat estratègies de reforç d'estructures de formigó armat per tal de fer front al deteriorament de les estructures existents (tant en l'edificació com en l'enginyeria civil en general) a causa de l'envelliment, a agents mediambientals o a canvis del seu ús, generant-ne la degradació, falta de manteniment i disseny o construccions inicials escassos. Els materials més estudiats i utilitzats per tal d'augmentar la durabilitat d'aquestes estructures són els materials compostos de matriu polimèrica amb fibra contínua (en anglès, *Fibre Reinforced Polymers*, FRP). Els FRP presenten unes excel·lents propietats mecàniques, elevada ràtio rigidesa/pes i resistència/pes, a més de presentar unes bones propietats en ambients corrosius. Els FRP estan disponibles en varies formes: laminats, barres, o teixits, entre altres. Aquests materials s'enganxen a la capa traccionada de la secció de formigó armat, augmentant així la rigidesa i resistència de la secció.

L'adhesiu és l'element que uneix l'element estructural principal amb l'element de reforç on el formigó i el FRP, respectivament, són els actors principals d'actuació. L'objectiu de l'adhesiu és permetre que ambdós treballin conjuntament a partir de la transferència d'esforços tallants entre la superfície del formigó i el compost, de forma que l'últim pugui desenvolupar el treball de reforç estructural. El material més utilitzat per realitzar dita funció és la resina epoxi, donat que presenta una excel·lent propietat d'adhesió. Aquests adhesius termoestables tenen l'inconvenient de ser eficients principalment a temperatures inferiors a la temperatura de transició vítria (T_g) de cada polímer, essent aquesta la seva temperatura de servei límit (entre 50 – 80 °C per adhesius epoxis curat en fred). És per aquesta raó que s'estan estudiant adhesius cimentosos per tal d'augmentar la temperatura de servei. Altres avantatges que presenten els adhesius cimentosos en-vers als de matriu polimèrica són la facilitat de muntatge en la part inferior de les bigues, cost del material, minimitzar el risc dels treballadors per toxicitat i alhora el seu impacte ambiental.

El coneixement del comportament adherent entre el formigó i l'FRP resulta clau per poder obtenir prediccions fiables del seu comportament global per a sol·licitacions a flexió, tallant i confinament, maximitzant així els avantatges de la tècnica. Alhora, desenvolupar un model numèric on poder introduir aquestes lleis locals i veure com reproduïxen el comportament global per, en un treball futur, poder predir el comportament de la unió en una estructura qualsevol.

Per tal d'estudiar-ne el comportament adherent de la unió entre el formigó i el reforç compost, se sol realitzar assaigs d'adherència (en anglès, *Pull-out Test*) tal com s'observa en la Figura 1. Aquest assaig consisteix a adherir el reforç en una longitud coneguda en una de les superfícies del formigó, i a continuació aplicar una força d'extracció en la làmina del FRP.

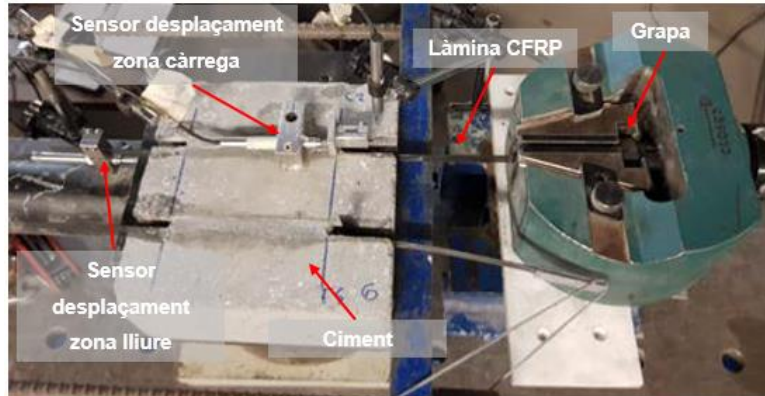


Figura 1. Configuració de l'assaig d'adherència per NSM

En el present s'ha desenvolupat un model analític i numèric del comportament adherent d'una unió de formigó-NSM FRP de carboni amb adhesiu cimentós obtingut comercialment. Aquest model es va ajustar als resultats experimentals d'una campanya experimental d'adherència que es va realitzar a la Universitat de Minho (Portugal). A la campanya realitzada, es van emprar 2 variacions en la superfície del reforç (sorres adherides en l'FRP), i 2 en l'adhesiu, amb un total de 4 tipus d'espècimens, assajant 3 provetes per a cada configuració per tal d'aconseguir-ne la mitjana. Val a dir que el resultat de l'assaig d'adherència fou l'extracció de l'FRP sense cap partícula de l'adhesiu, i sense trencament de cap dels tres elements implicats (CFRP, adhesiu i formigó). Aquest detall ha permès conèixer la interfície d'adherència que determina el comportament global.

A partir de les característiques experimentals dels materials, la configuració de l'assaig i els resultats experimentals, s'ha procedit a l'obtenció d'una llei local d'adherència-lliscament de la unió, utilitzant el programari Matlab®. Aquesta llei s'ha obtingut a partir de la resolució de l'equació diferencial de segon ordre que governa el sistema adherent,

$$\frac{d^2 s}{dx^2} = \tau(s) \cdot \frac{L_{per}}{E_f \cdot A_f}, \quad (1)$$

a partir d'un procediment iteratiu basat en un model de diferències finites, prèviament desenvolupat pel grup de recerca AMADE de la UdG. Aquest procediment, a diferència d'altres formulacions, permet modificar i resoldre diferents models de lleis locals.

En el present projecte s'han ajustat els resultats experimentals de les 4 diferents configuracions amb tres lleis locals d'adherència diferents: bilineal (B-L), no lineal (N-L) i no lineal modificada (N-LM). Aquestes lleis tenen diferents coeficients associats els quals s'han parametritzat en el codi realitzat per tal d'obtenir-ne els valors que defineixen el comportament més ajustat als resultats de cada assaig a partir de calcular-ne la distància entre la corba experimental i la cobra ajustada, i escollint-ne la combinació dels coeficients amb el resultat de distància mínim.

En la Taula 1 es mostra les lleis emprades amb els coeficients associats a cada llei, on τ_{max} és la tensió tallant màxima de la unió, s_m i s_f és el valor del lliscament on assolim la tensió tallant màxima i el lliscament màxim abans del despreniment, respectivament. D'altra banda, α , α' i s_1 són coeficients d'ajustatge la corba numèrica.

Taula 1. Lleis d'adherència-lliscament utilitzats

Model	Equació	Coefficient	Núm. equació
2. Bilinear	$\tau(s) = \begin{cases} \tau_{max} \cdot \frac{s}{s_m}, & 0 \leq s \leq s_m \\ \tau_{max} \cdot \frac{(s_f - s)}{(s_f - s_m)}, & s_m < s \leq s_f \\ 0, & s > s_f \end{cases}$	τ_{max} s_m s_f	(2)
3. Model no lineal	$\tau(s) = \begin{cases} \tau_{max} \cdot \left(\frac{s}{s_m}\right)^\alpha, & 0 \leq s \leq s_m \\ \tau_{max} \cdot \left(\frac{s}{s_m}\right)^{-\alpha'}, & s > s_m \end{cases}$	τ_{max} s_m α α'	(3)
4. Model no lineal modificada	$\tau(s) = \begin{cases} \tau_{max} \cdot \left(\frac{s}{s_m}\right)^\alpha, & 0 \leq s \leq s_m \\ \tau_{max} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{s - s_m}{s_1}\right)^{\alpha'}}, & s > s_m \end{cases}$	τ_{max} s_m α α' s_1	(4)

D'aquesta manera es pretén ajustar el comportament global de l'assaig a partir d'una llei local. En la Figura 2 es mostra el resultat obtingut per a un assaig concret, amb les diferents lleis aplicades. Per la llei bilineal, el recorregut pel càlcul de la distància ha sigut fins a un valor de lliscament situat dues vegades al lliscament on la tau és màxima.

D'altra banda, per les lleis no lineals s'ha calculat la distància per tota la corba. Un cop ajustat els 4 espècimens s'ha observat que el comportament de la llei bilineal s'ajusta al resultat experimental en els trams inicials i postpic, però no en el tram final, també anomenat de fricció. Tanmateix, les dues lleis no lineals s'han ajustat adequadament a la corba de l'assaig.

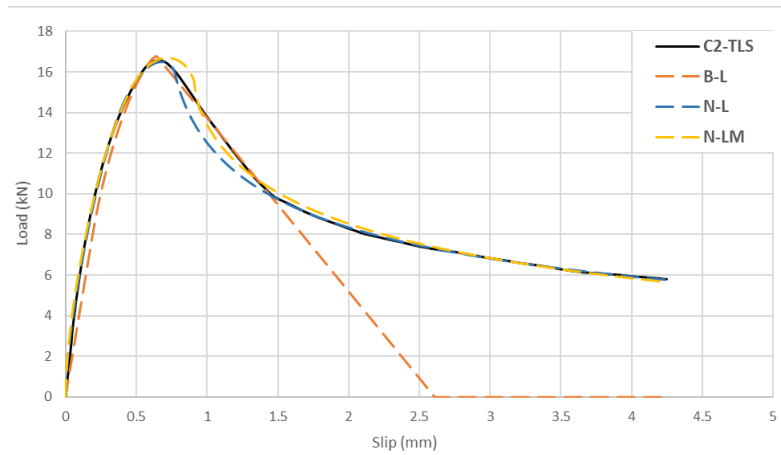


Figura 2. Comparativa entre els diferents resultats experimentals i la resposta analítica de cada una de les lleis d'adherència – lliscament utilitzada. Assaig experimental (negre continu). B-L: llei bilineal (taronja discontinu). N-L: llei no lineal (blau discontinu). N-LM: llei no lineal modificada (groc discontinu)

Un cop ajustada la llei local a partir del programa basat en diferències finites, s'ha definit un model d'element finits (FEM) amb el programari Abaqus® en el que es pretenia reproduir el comportament de la unió de forma numèrica per tal de comparar-ne la resposta amb l'obtinguda experimental i analítica definida anteriorment. S'ha simplificat el model aplicant condicions de simetria (Figura 3) per tal de reduir-ne el cost computacional associat a reduir-ne el nombre d'elements del mallat.

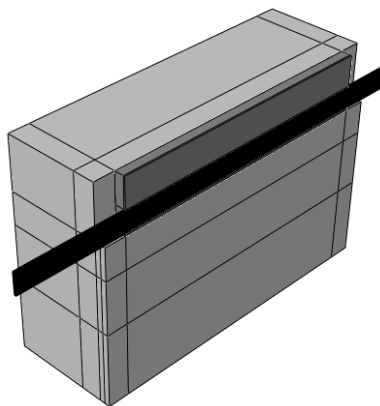


Figura 3 Representació del model tridimensional simplificat: FRP (negre), adhesiu (gris fosc) i formigó (gris clar)

S'ha definit la interfície entre el FRP i l'adhesiu com a element cohesiu per tal de modelar l'assaig d'adherència el més semblant al resultat obtingut en l'experiment. Per implementar la interfície d'aquest element cohesiu, s'implementa l'evolució del dany de la resposta segons la llei local d'adherència – lliscament aplicada. En la Figura 4 es mostra de color blau la llei local no lineal (“*Bond-slip law*”) i de color vermell l'evolució del dany. El tram inicial en el qual el dany és zero és per la implementació de la zona elàstica inicial, la qual es considera que no hi ha dany permanent.

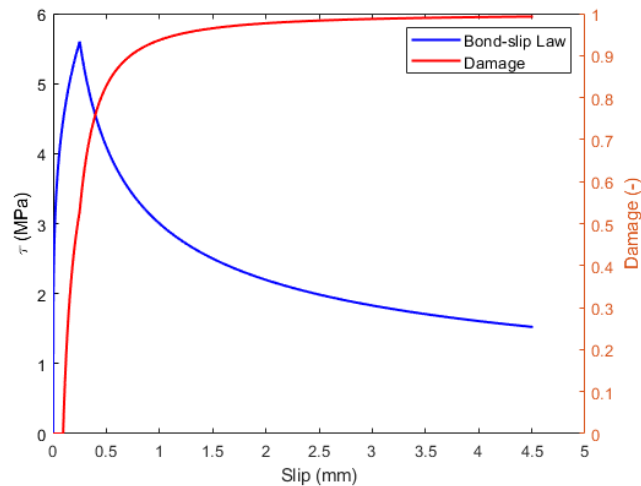


Figura 4. Exemple de l'evolució del dany per una llei d'adherència obtinguda analíticament

Aquesta evolució del dany s'implementa en el programari del model per elements finits i es compara amb el resultat analític per realitzar la seva validació (Figura 5), en el qual s'observa una lleugera diferència entre els dos models, possiblement degut a la distribució no uniforme de les tensions al llarg de la interfase generada en el model numèric, a diferència del model analític que es considera una tensió tallant constant al llarg de la secció transversal.

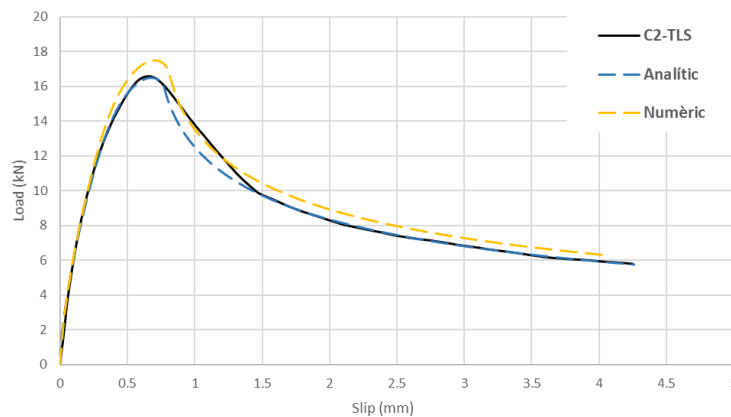


Figura 5. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal