

  
Universitat de Girona  
**Escola Politècnica Superior**

## Treball final de grau

**Estudi:** GETI

**Títol:** ESTUDI PARAMÈTRIC DE LA DEGRADACIÓ DE LA LLEI ADHERÈNCIA-LLISCAMENT EN LA RESPOSTA ADHERENT DE LA UNIÓ FORMIGÓ-FRP

**Document:** Resum

**Alumne:** Aniol Castells Coll

**Tutor:** Cristina Barris Peña

**Departament:** Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

**Àrea:** Enginyeria de la Construcció i de Mecànica dels Medis Continus i Teoria d'Estructures

**Convocatòria (mes/any):** Juny/2022

El present treball s'emmarca dins del camp de l'enginyeria civil, en particular dins de les estructures de formigó. El formigó, concretament el formigó armat, és un material molt utilitzat en la construcció i edificació a causa de les seves característiques úniques: econòmic, resistent i modelable. Ara bé, un dels principals problemes és la corrosió de l'acer, que conforma l'armadura del formigó, causant una disminució en les propietats mecàniques d'aquest. A conseqüència d'aquesta problemàtica neixen els materials compostos de matriu polimètrica i fibra contínua (en anglès Fiber Reinforced Polymer, FRP).

Els FRP són uns materials molt adequats per reforçar estructures existents del formigó armat, ja que les seves propietats mecàniques són molt superiors a les de l'acer. No obstant això, sovint aquestes estructures pateixen un desenganxament prematur de l'FRP abans d'arribar a la seva càrrega màxima. És per això que resulta fonamental el coneixement del comportament adherent de la unió formigó-FRP, que sovint es realitza mitjançant una resina tipus epòxid. Per tal d'estudiar el comportament adherent de la unió s'ha desenvolupat una eina numèrica per poder-ne determinar l'evolució en condicions instantànies com en condicions de càrrega sostinguda en règims lineals. Aquesta eina, però, es troba en un estat preliminar i necessita ser contrastada i avaluada. Així doncs, l'objectiu principal d'aquest treball consisteix a estudiar la resposta del comportament adherent sota càrrega sostinguda, o també anomenat a llarg termini, avaluant diferents factors i també desenvolupament un model per règims de comportament no-lineal.

Primer de tot, s'han exposat les principals característiques mecàniques i físiques dels materials que intervenen en l'estudi: formigó, acer i FRP. El formigó és un material molt modelable i amb gran resistència als esforços a compressió que està format per: ciment, sorra, aigua, grava o pedra i additius. Tanmateix, no té una bona resistència a tensions tallants, a flexió o a torsió i per solucionar-ho s'arma el formigó. L'armadura del formigó armat consisteix en barres d'acer que són recobertes per la mescla del formigó. L'acer és en un aliatge de ferro i carboni i l'utilitzat per aquest cas s'anomena acer corrugat. Les seves principals característiques són la ductilitat i unes propietats mecàniques elevades, que conjuntament amb la semblança de les propietats tèrmiques a les del formigó el fan un material ideal per reforçar-lo. Tot i això, un desavantatge major és la corrosió que pateix l'acer en ambients humits deteriorant les seves propietats mecàniques. Per solucionar aquest problema, s'empren altres materials per reforçar les estructures de formigó, com els FRP. Els FRP estan conformats per una matriu de resina i per unes fibres de carboni, vidre, armadía o basalt. Les fibres són els elements de reforç que donen rigidesa i resistència al material, mentre que la matriu protegeix les fibres i assegura que es mantinguin alineades per permetre una bona distribució de càrregues entre aquestes. La vida útil dels FRP és de 50 anys. Hi ha dues tècniques d'unió: EBR i NSM, sent la última la tècnica estudiada en el treball.

A continuació, s'ha explicat com es modelitza el comportament adherent tant en càrrega instantània com sostinguda. La modelització ja havia estat estudiada en múltiples articles i treballs. En ambdós casos intervé l'equació de govern que depèn de la llei local d'adherència-lliscament. Aquesta llei pot ser caracteritzada de diverses maneres, però per aquest treball i basant-se en estudis ja fets s'escull el model bilineal. L'equació de govern s'extreu de realitzar l'equilibri de forces tant per la unió del formigó amb l'FRP com per només l'FRP. A partir d'aquí i juntament amb les propietats dels materials en règim elàstic s'arriba a l'equació final. Aquesta no es pot resoldre sense abans haver definit la llei local que consisteix en dues equacions que en funció del lliscament existent entre l'FRP i el formigó es pot trobar la tensió tallant. Una equació correspon a la branca elàstica, que és ascendent, i l'altra a la branca plàstica, que és descendent.

Tanmateix, pel comportament a llarg termini, la llei local d'adherència-lliscament modelitzada per càrrega instantània pateix una degradació. Aquesta degradació afecta la part elàstica, disminuint el seu pendent i, per tant, la seva resistència, i a la tensió màxima que pot aguantar la unió, disminuint el seu valor. Això acaba comportant l'existència d'una tercera branca, que correspon a un comportament on per un rang de lliscament la tensió correspon a la màxima.

Un cop explicat el model emparat, s'ha exposat la metodologia de resolució, extreta d'un estudi ja fet. Aquesta consisteix en la utilització d'una rutina de Matlab on es resol de forma numèrica l'equació de govern, ja que es tracta d'una equació diferencial. El funcionament de la rutina es basa en la divisió de la longitud adherida de la unió FRP-formigó en petits increments, de manera que es defineix la posició de tots els punts en els quals s'avaluaran les equacions d'equilibri. Es comença per l'extrem carregat i es va avançant cap a l'extrem lliure calculant per cada punt estudiat el lliscament i la càrrega transmesa tenint en compte la degradació de la llei d'adherència-lliscament. La condició principal per trobar la solució és que a l'extrem lliure la deformació unitària de l'FRP ha d'estar per sota una tolerància simulant que el seu valor és pràcticament zero. En cas de no trobar la solució s'incrementa el valor del lliscament inicial i es torna a fer tots els càlculs per cada posició de la longitud adherida. Aquest funcionament és per un temps determinat i que en ser incrementat s'aplica la degradació en la llei local d'adherència-lliscament, ja que depèn del temps. El valor de la càrrega aplicada s'obté en dur a terme un càlcul previ de la rutina per càrrega instantània. Aquesta es diferencia respecte la de llarg termini pel fet que s'incrementa la càrrega en lloc del lliscament en cas de no solució i no pateix cap degradació a la llei local, per així trobar la càrrega màxima que suporta la unió i a la qual se li aplica un tant per cent per acabar tenint la càrrega aplicada.

En tercer lloc, s'ha dut a terme l'estudi paramètric on les variables que han sigut estudiades són la longitud adherida i el percentatge de càrrega aplicat. En aquest estudi s'ha pogut observar com ambdós paràmetres tenen una influència directa en el comportament adherent. En el cas de la

longitud adherida amb càrrega aplicada fixa, en augmentar la longitud disminueix el lliscament a l'extrem carregat i també al llarg d'aquesta. En canvi, el temps de trencament, que és el temps que tarda la unió a patir la ruptura, és major per longituds més grans. Pel que fa al percentatge de càrrega amb longitud adherida fixa, en incrementar-ne el valor el lliscament a l'extrem carregat i al llarg de la longitud pateix un augment, però disminueix el temps de trencament.

A través de l'estudi s'ha observat que existeix una relació directa d'aquests dos paràmetres amb el comportament adherent, no obstant això també s'ha vist que existeix una correlació entre els dos. Aquesta correlació s'ha trobat mitjançant l'estudi paramètric de les dues variables combinades per aconseguir obtenir un temps de trencament mínim de 50 anys. Així doncs, la relació obtinguda és de forma lineal amb una correlació perfecta obtenint una equació que per les característiques de l'assaig i per longituds adherides entre 150 mm i 300 mm es pot obtenir el valor màxim de la càrrega aplicada per arribar a la vida útil de 50 anys per a una longitud adherida fixada o viceversa en cas de fixar la càrrega aplicada.

En últim lloc, s'ha fet una proposta per modelitzar el comportament no-lineal, que succeeix en casos on la càrrega és major al 30% de la càrrega màxima que pot suportar la unió. S'han realitzat tres propostes de model descobrint en la tercera el millor ajustament lògic. La primera i segona proposta consisteix en degradar només el pendent de la branca ascendent de la llei local d'adherència-lliscament. Per aconseguir el comportament no-lineal, la degradació a part de dependre del temps també ho ha de fer de la càrrega suportada per cada posició de la longitud adherent. En el primer cas no s'ha obtingut cap diferència respecte al model lineal que també se li aplica només la degradació de la branca ascendent i sense la de la tensió tallant màxima. En canvi, amb la segona proposta s'han notat diferències però amb temps de trencament irrealistes i amb un comportament estrany.

L'última i tercera proposta ha sigut la que millor resultats ha aconseguit, ja que els temps de trencament i el lliscament a l'extrem tenia certa lògica. Aquest model consisteix en degradar en funció del temps i de la càrrega suportada la branca ascendent i la tensió tallant màxima. En les tres propostes, quan la càrrega suportada és un 30% o menys de la màxima suportada el comportament canvia a partir d'aquella posició de no-lineal a lineal.

Per concloure, s'ha observat l'existència d'una relació forta entre el comportament adherent i la llargada adherida i el percentatge de càrrega. Aquestes dues relacions van lligades a l'augment o disminució de l'àrea per sota la corba de la llei d'adherència-lliscament que correspon a l'energia de fractura. També s'ha provat que existeix, pel cas estudiat, una relació directa entre la longitud adherida i la càrrega aplicada per un temps de trencament de 50 anys. Aquesta relació ha de ser provada i contrastada en altres casos per confirmar la seva veridicitat quedant a expenses d'estudis futurs. Com

també queda pendent de ser estudiat, en aquest cas de forma experimental, el comportament no-lineal per conèixer si el model no-lineal proposat és correcte o no.

Finalment, s'ha demostrat una gran relació entre l'energia de fractura i la resposta del comportament adherent a llarg termini, ja que canvis mínims en aquesta per un cert rang de longitud o percentatges de càrrega, es tradueixen en canvis enormes en el temps de ruptura. Com a conseqüència, neix una necessitat de continuar estudiant i desenvolupant models de la llei local d'adherència-lliscament amb la major exactitud possible respecte la realitat, per tal d'obtenir una precisió elevada en la predicció del temps de trencament.