

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: Memòria i Annexos

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

AGRAÏMENTS

Primerament, voldria expressar el meu sentit agraïment a la Dra. Cristina Barris, tutora i mentora del present treball de final de màster per l'aprenentatge, assessorament i guiatge durant el desenvolupament del projecte; a la Dra. Laura Carreras per la seva dedicació i compromís per tal d'assolir-ne l'objectiu; i al grup AMADE (*Analysis and Advanced Materials for Structural Design*) per facilitar-me el programari informàtic necessari, i l'oportunitat de continuar el meu creixement professional.

També m'agradaria agrair al Departament d'Enginyeria Civil de la Universitat de Minho (Portugal), en particular a en Reza Mohammadi, PhD-Candidate, com a mentor durant la meva estada, i al Dr. Joaquim Barros per la possibilitat de treballar en el grup.

ÍNDIX

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Glossari | 1 |
| 2 | Proposta | 3 |
| 2.1 | Origen del projecte | 3 |
| 2.2 | Motivació | 3 |
| 2.3 | Requeriments previs..... | 4 |
| 3 | Introducció | 5 |
| 3.1 | Antecedents | 5 |
| 3.2 | Objecte..... | 6 |
| 3.3 | Abast | 6 |
| 4 | Estat de l'art | 7 |
| 4.1 | Reforç d'estructures de formigó armat amb materials compostos: materials i tècniques 7 | |
| 4.1.1 | Formigó armat (RC)..... | 7 |
| 4.1.2 | Materials compostos de fibra contínua i matriu polimèrica (FRP)..... | 8 |
| 4.1.3 | Adhesius estructurals | 12 |
| 4.1.4 | Tècniques de reforç d'estructures de formigó armat amb FRP | 13 |
| 4.2 | Comportament adherent de la unió formigó – NSM FRP | 16 |
| 4.2.1 | Mecanisme i modes de falla | 16 |
| 4.2.2 | Assaig d'adherència | 19 |
| 4.3 | Modelització analítica i numèrica de la unió per NSM | 20 |
| 4.3.1 | Models analítics teòrics | 20 |
| 4.3.2 | Model numèric de l'adhesiu a partir del mètode per elements finits | 25 |
| 5 | Metodologia | 28 |
| 5.1 | Resultat assajos experimentals | 28 |
| 5.2 | Proposta de model analític | 31 |
| 5.2.1 | Llei local teòrica d'adherència-lliscament..... | 31 |
| 5.2.2 | Modelització analítica del comportament instantani | 34 |
| 5.2.3 | Llei d'adherència – lliscament utilitzada | 39 |

| | | |
|-----------|-------------------------------------------------------|-----------|
| 5.3 | Proposta model numèric..... | 40 |
| 5.3.1 | Model d'element finits..... | 40 |
| 5.3.2 | Determinació dels paràmetres que afecten al CZM | 44 |
| 6 | Resultats i discussió..... | 49 |
| 6.1 | Model analític | 49 |
| 6.2 | Model numèric..... | 53 |
| 7 | Resum del pressupost..... | 63 |
| 8 | Conclusions | 64 |
| 8.1 | Perspectives de futur | 66 |
| 9 | Relació documents | 67 |
| 10 | Bibliografia | 68 |
| | Annex A: Pressupost..... | 73 |

LLISTAT DE FIGURES

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.1. Exemples d'armadures deformades amb diferents configuracions [2] | 7 |
| Figura 4.2. Diagrama tensió-deformació per diferents FRP unidireccionals i l'acer. CFRP = carboni FRP, SFRP = acer FRP, AFRP = aramida, BFRP = basalt, GFRP = vidre [1] | 8 |
| Figura 4.3. Aplicació del reforç d'un pilar de formigó armat amb CFRP [1] | 14 |
| Figura 4.4. Diferents formes de la ranura i del FRP pel reforç amb NSM [5] | 15 |
| Figura 4.5. Modes de falla per adherència principals en bigues de formigó armat treballant a flexió amb reforç de FRP per la tècnica NSM [17] | 17 |
| Figura 4.6. Modes de falla a nivell local per la tècnica del reforç d'una barra rectangular per NSM [17] .. | 18 |
| Figura 4.7. Classificació dels assajos d'adherència. (a) - (d): Direct Pull-out Test (DPT). (e) i (f): Beam Pull-out Test (BPT) [16] | 19 |
| Figura 4.8. Representació del comportament bilineal per la llei local d'adherència entre el FRP i el formigó. Adaptat de [18] | 21 |
| Figura 4.9. Diferents models existents de la llei adherència-lliscament [23] | 22 |
| Figura 4.10. Aplicacions típiques de la modelització d'elements cohesius en Abaqus®: a) Prova típica de la separació de dos materials pel model basat en continuu; b) Despreniment al llarg d'una interfase; c) Aplicació típica per juntes [30] | 27 |
| Figura 5.1. Configuració de l'assaig d'adherència per NSM [31] | 28 |
| Figura 5.2. Representació esquemàtica de la posició dels materials i les condicions de contorn. Cotes en mm | 30 |
| Figura 5.3. Força - lliscament en l'extrem carregat pels diferents assaigs | 31 |
| Figura 5.4. a) Equilibri de tensions entre el formigó i el FRP. b) Equilibri de forces en la interfase FRP-adhesiu [34] | 32 |
| Figura 5.5. Paràmetres implicats en la resolució del mètode analític [28] | 34 |
| Figura 5.6. Esquema de la discretització en el FRP [34] | 35 |
| Figura 5.7. Diagrama de flux de la modelització numèrica per calcular el comportament instantani de la unió | 37 |
| Figura 5.8. Comparativa entre el resultat experimental i analític per la llei bilineal | 38 |
| Figura 5.9. Representació del model tridimensional. Esquerra: Complert. Dreta: Simplificat simètricament | 41 |
| Figura 5.10. Representació del mallat i de les condicions de contorn aplicades | 41 |
| Figura 5.11. Interfície de la zona cohesiva i la interfície entre el formigó i l'adhesiu | 42 |
| Figura 5.12. Definició de la condició de contorn per restringir el pla de simetria | 42 |
| Figura 5.13. Posició de les arestes definides en el model per la lectura del desplaçament del FRP i de l'adhesiu. Esquerra: model complert. Dreta: detall | 43 |
| Figura 5.14. Resposta de tracció – separació per superfícies cohesives. Font: modificada [30] | 45 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figura 5.15. Representació esquemàtica e l'obtenció de la rigidesa inicial: a) per la llei bilineal (Font: pròpia); b) per la llei no lineal (Font: adaptada [36])</i> | 47 |
| <i>Figura 5.16. Exemple de l'evolució del dany per una llei d'adherència obtinguda analíticament</i> | 48 |
| <i>Figura 6.1. Comparativa entre els diferents resultats experimentals i la resposta analítica de cada llei d'adherència – lliscament utilitzada. Assaigs experimentals (negre continu). B-L: llei bilineal (taronja discontinu). N-L: llei no lineal (blau discontinu). N-LM: llei no lineal modificada (groc discontinu)</i> | 50 |
| <i>Figura 6.2. Representació de la corba força-lliscament i dels punts on es mostrarà el dany, i l'evolució del dany per l'exemple representat</i> | 54 |
| <i>Figura 6.3. Vista en alçat de la superfície cohesiva de l'adhesiu, on es mostra l'evolució del dany en elements finits. a) situació inicial sense càrrega; b) 50% de la força màxima; c) força màxima</i> | 55 |
| <i>Figura 6.4. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "FS-TLS" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei bilineal</i> | 57 |
| <i>Figura 6.5. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "FS-TLS" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal</i> | 58 |
| <i>Figura 6.6. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "FS-TLS" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal modificada</i> | 58 |
| <i>Figura 6.7. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "C2-TLS" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei bilineal</i> | 59 |
| <i>Figura 6.8. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "C2-TLS" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal</i> | 59 |
| <i>Figura 6.9. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "C2-TLS" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal modificada</i> | 59 |
| <i>Figura 6.10. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "FS-TL" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei bilineal</i> | 60 |
| <i>Figura 6.11. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "FS-TL" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal</i> | 60 |
| <i>Figura 6.12. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "FS-TL" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal modificada</i> | 61 |
| <i>Figura 6.13. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "C2-TL" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei bilineal</i> | 61 |
| <i>Figura 6.14. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "C2-TL" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal</i> | 62 |
| <i>Figura 6.15. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "C2-TL" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal modificada</i> | 62 |

LLISTAT DE TAULES

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Taula 4.1. Valors característics de les fibres [1]</i> | <i>9</i> |
| <i>Taula 4.2. Resum de les propietats més significatives de les matrius polimèriques [2]</i> | <i>11</i> |
| <i>Taula 4.3. Propietats mecàniques dels adhesius cimentosos</i> | <i>13</i> |
| <i>Taula 4.4. Equacions dels principals models utilitzats per la llei d'adherència-lliscament per NSM. Font de les figures: Pròpia</i> | <i>23</i> |
| <i>Taula 5.1. Resum dels detalls dels assaigs [31]</i> | <i>29</i> |
| <i>Taula 5.2. Propietats mecàniques dels materials utilitzats en l'assaig Pull-out</i> | <i>29</i> |
| <i>Taula 5.3. Resultats de l'assaig d'adherència [31]</i> | <i>30</i> |
| <i>Taula 5.4. Lleis d'adherència-lliscament utilitzats.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Taula 5.5. Propietats dels materials utilitzats pel model numèric.....</i> | <i>44</i> |
| <i>Taula 6.1. Resum dels coeficients obtinguts en la resolució analítica</i> | <i>51</i> |
| <i>Taula 6.2. Resum de la mitjana, valor màxim, mínim i la coeficient de variació per a cada model</i> | <i>52</i> |
| <i>Taula 6.3. Resum de la mitjana de la força i la tensió tallant obtinguda en assaig d'adherència amb resines epoxis.....</i> | <i>53</i> |
| <i>Taula 6.4. Resum dels valors màxims obtinguts en el model analític, subíndex "m", i valors considerant comportament lineal, subíndex "0"</i> | <i>53</i> |
| <i>Taula 6.5. Comparativa dels valors de força màxima i lliscament en aquest punt entre les dades experimentals, i el resultat analític i numèric.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Taula 6.6. Error relatiu de la força màxima obtinguda entre el model analític i numèric.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Taula 7.1. Resum del pressupost per capítols.....</i> | <i>63</i> |

1 GLOSSARI

A continuació es mostren els acrònims i símbols utilitzats en present document:

Acrònims:

| | |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AFRP: | Polímer reforçat amb fibres d'aramida (<i>Aramid Fibre Reinforcement Polymer</i>) |
| AR: | Resistència alcalina (<i>Alkali Resistant</i>) |
| BFRP: | Polímer reforçat amb fibres de basalt (<i>Basalt Fibre Reinforcement Polymer</i>) |
| BPT: | Assaig d'adherència d'una biga (<i>Beam Pull-out Test</i>) |
| CFRP: | Polímer reforçat amb fibres de carboni (<i>Carbon Fibre Reinforcement Polymer</i>) |
| CSDMG: | Degradació escalar de la rigidesa per superfícies cohesives (<i>Scalar stiffness degradation for cohesive surfaces</i>) |
| CZM: | Model de la zona cohesiva (<i>Cohesive Zone Model</i>) |
| DPT: | Assaig d'adherència directa (<i>Direct Pull-out Test</i>) |
| EAR: | Reforç aplicat externament (<i>Externally Applied Reinforcement</i>) |
| EBR: | Reforç adherit externament (<i>Externally Bonded Reinforcement</i>) |
| FEA: | Anàlisi d'elements finits (<i>Finite Element Analysis</i>) |
| FEM: | Mètode d'elements finits (<i>Finite Element Method</i>) |
| FRP: | Polímer reforçat amb fibres (<i>Fibre Reinforcement Polymer</i>) |
| GFRP: | Polímer reforçat amb fibres de vidre (<i>Glass Fibre Reinforcement Polymer</i>) |
| MAPE: | Erros absolut en percentatge mitjà (<i>Mean Absolute Percentatge Error</i>) |
| MSE: | Error mínims quadrats (<i>Mean Square Error</i>) |
| NSM: | Reforç inserit al recobrint (<i>Near-Surface Mounted</i>) |
| PA: | Poliàmida (<i>Polyamide</i>) |
| RC: | Formigó armat (<i>Reinforced Concrete</i>) |
| SFRP: | Polímer reforçat amb fibres d'acer (<i>Steel Fibre Reinforcement Polymer</i>) |
| T_g : | Temperatura de transició vítria dels polímers termoestables |

Símbols:

| | |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| A_c | Àrea transversal del ciment |
| A_f | Àrea transversal del FRP |
| dx | Longitud infinitesimal |
| E_c | Mòdul de Young del ciment |
| E_f | Mòdul de Young del FRP |
| E_L | Mòdul de Young en sentit longitudinal |
| $F_{f,max}$ | Força màxima obtinguda de la unió FRP-formigó en la configuració "Pull-out" |
| G_f | Energia de fractura |
| L_b | Longitud d'adherència entre el FRP i RC |
| L_{per} | Perímetre de la zona adherida entre el FRP i l'adhesiu |
| P | Càrrega / Força |
| s | Lliscament |
| s_f | Lliscament previ al despreniment de la unió |
| s_m | Lliscament associat a la tensió tallant màxima |
| t_f | Espessor del FRP |
| u_c | Desplaçament del formigó |
| u_f | Desplaçament del FRP |
| w_f | Amplada del FRP |
| α, α', s_1 | Coefficients de forma dels models per la llei d'adherència – lliscament. |
| δ_{max} | Lliscament màxim |
| ε_c | Deformació unitària del ciment |
| ε_f | Deformació unitària del FRP |
| ε_{max} | Deformació unitària en $F_{f,max}$ |
| σ_c | Tensió del ciment |
| σ_f | Tensió del FRP |
| $\tau(s)$ | Llei local d'adherència – lliscament |
| τ_m | Tensió tallant màxima |
| ν | Coefficient de Poisson |

2 PROPOSTA

2.1 Origen del projecte

El present projecte neix de la necessitat de millorar la durabilitat d'estructures de formigó armat a partir del reforç amb materials compostos avançats, com pot ser la fibra de carboni, donada la seva lleugeresa i altes propietats mecàniques específiques. La unió entre aquests materials implicats afecta directament en el rendiment del conjunt. La més utilitzada actualment és amb base polimèrica, sovint una resina epoxi, amb l'inconvenient de la davallada en les propietats mecàniques amb l'augment de la temperatura. És per això de la importància d'obtenir nous materials que mostrin un bon comportament d'adherència amb condicions adverses.

Aquest projecte s'ha començat a desenvolupar a la Universitat de Minho (Portugal) de forma principalment experimental per estudiar-ne un material cimentós com a adhesiu del reforç del formigó armat amb polímer reforçat amb fibres de carboni (CFRP) a partir de la tècnica NSM (reforç inserit al recobriment), i investigar-ne l'habilitat de l'adhesiu per transferir les tensions del reforç cap al formigó. Dita part experimental es realitza a partir d'assaigs d'adherència, o "*Pull-out*". D'altra banda, des de la Universitat de Girona es pretén aconseguir un model analític i numèric fiable. S'exposen els detalls en el document.

2.2 Motivació

La motivació del present projecte és aplicar lleis locals adherència – lliscament per poder fer una predicció més acurada de les estructures reforçades independent de la seva configuració de càrrega o geometria. Les lleis permeten desenvolupar un model analític que descriu el comportament interfacial de la unió, i així validar-les amb les dades experimentals existents sobre els assaigs d'adherència. 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, dur a terme un model numèric, a partir del model per elements finits (FEM), 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.

2.3 Requeriments previs

Es parteix dels resultats experimentals d'una campanya d'assaigs d'adherència tipus "*Pull-out*" de provetes de formigó en les que s'hi ha adherit laminats de material compost amb un adhesiu cimentós, on s'ha realitzats a la Universitat de Minho (Portugal), qui ha facilitat les dades experimentals per tal d'ajustar el model analític i numèric. La part experimental s'engloba dins un programa PhD en la mateixa Universitat pel candidat Reza Mohammadi, supervisada pel Dr. Joaquim Barros.

3 INTRODUCCIÓ

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) degut a l'envelliment, agents mediambientals o canvi del seu ús, generant-ne la degradació, disseny o construccions inicials escassos, falta de manteniment i terratrèmols [1]. Els materials més utilitzats per augmentar la durabilitat de les estructures han sigut els materials polimèrics reforçats amb fibres (FRP), degut a les seves excel·lents propietats mecàniques, elevada ràtio rigidesa/pes i resistència/pes, a més de presentar 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, augmentat així la rigidesa i resistència de la secció.

3.1 Antecedents

La resistència, rigidesa i durabilitat de les estructures del formigó armat es poden millorar d'una manera efectiva mitjançant el reforç amb tires, teixits i/o barres de polímer reforçat amb fibres de carboni (en anglès Carbon Fibre Reinforced Polymer, CFRP). Aquest es pot aplicar com a reforç extern (Externally Bonded Reinforcement, EBR) o el reforç inserit al recobriment (Near-Surface Mounted, NSM). L'adhesiu emprat per unir aquests dos elements té un paper molt rellevant en la definició de les propietats del conjunt, essent la resina epoxi un dels més utilitzats. El gran inconvenient d'aquest adhesiu és la davallada en les seves propietats mecàniques a l'estar sotmès a altes temperatures. És per això que han sorgit altres materials, com els ciments, per combatre'ls. Aquests materials, no obstant això, són més rígids i fràgils que les epoxis, i això pot afectar a la unió formigó-CFRP.

Tant el grup de recerca AMADE com a la Universitat de Minho han treballat amb adhesius polimèrics (epoxi) obtenint el comportament constitutiu de la unió descrit mitjançant la llei local de tensió d'adherència – desplaçament relatiu, o lliscament, a partir de resultats experimentals. Malgrat això, aquesta última ha començat a desenvolupar i estudiar els adhesius cimentosos, però des d'un punt de vista principalment experimental.

3.2 Objecte

L'objecte del treball és estudiar el comportament adherent de la unió formigó-NSM CFRP en el cas d'utilitzar un ciment com adhesiu. A partir d'uns assaigs experimentals realitzats per la U. Minho, es realitzarà la seva modelització numèrica per tal de predir analíticament el seu comportament i obtenir-ne una caracterització. El primer objectiu és l'ajust d'una llei d'adherència local que reproduïxi adequadament aquest comportament.

3.3 Abast

Partint dels resultats experimentals realitzats a la Universitat de Minho, es durà a terme l'ajust per mínims quadrats d'una llei local teòrica d'adherència-lliscament de la unió formigó-NSM CFRP amb ciment a partir del programari Matlab®. Aquest ajust es compararà amb els resultats experimentals d'una campanya d'assajos "*Pull-out*" (força – lliscament). Seguidament, es realitzarà un model d'elements finits de la unió (programari Abaqus®), tenint en compte la llei prèviament ajustada. El model es validarà amb els resultats experimentals. Finalment, es compararà la llei adherència-lliscament obtinguda amb les existents per altres tipus d'adhesius. També s'abordarà una anàlisi de la viabilitat econòmica del producte.

4 ESTAT DE L'ART

El present capítol mostra un resum de l'estat de l'art del reforç de les estructures de formigó armat amb materials compostos com una solució eficient en la funció de reforçar estructures ja existents.

4.1 Reforç d'estructures de formigó armat amb materials compostos: materials i tècniques

4.1.1 Formigó armat (RC)

El formigó és un material compost bàsicament constituït per la mescla, en proporcions convenientes, d'aigua, ciment i àrids. Els primers dos elements interactuen entre ells químicament endurent el material i adherint els àrids al seu conjunt [2]. Aquest element té una resistència a compressió molt superior a la de tracció, per tant, un element estructural sotmès a esforços de flexió necessita un material que suporti aquestes tensions. L'acer és el material més utilitzat per tal de reforçar al formigó a partir de barres corrugades (Figura 4.1), que es defineixen com a armadures. El formigó armat s'obté abocant el formigó, en estat pastós, en un motlle metàl·lic o de fusta en el que s'han situat les armadures prèviament segons els requeriments de càlcul. La combinació d'aquests materials, formigó i armadura, permet treballar a l'estructura conjuntament absorbint les tensions a compressió i a tracció, respectivament. Altres propietats que fan d'aquest material el més usat per estructures d'enginyeria civil són l'alta resistència a la temperatura i corrosió, alta durabilitat i baix cost.



Figura 4.1. Exemples d'armadures deformades amb diferents configuracions [2]

Tot i que les estructures han sigut dissenyades per donar una llarga vida útil, els agents externs com les condicions ambientals, les activitats sísmiques o les

modificacions en les necessitats de càrregues poden requerir rehabilitació i esforç de l'estructura.

4.1.2 Materials compostos de fibra contínua i matriu polimèrica (FRP)

Les raons per les quals els materials compostos han sigut una solució creixent durant els darrers anys són deguts a propietats intrínseques d'aquests, com per exemple, immunitat a la corrosió, alta resistència, lleugeresa entre d'altres ([1], [3], [4]). Gràcies a les seves excel·lents propietats, actualment els materials compostos de fibra contínua i matriu polimèrica (FRP) són àmpliament utilitzats en diferents sectors, com l'aeroespacial, naval, automobilístic, civil, entre d'altres. Això és perquè aquest component presenta unes altes propietats mecàniques permetent augmentar la capacitat de l'estructura amb una lleugeresa superior a altres elements estructurals emprats com a reforç, com l'acer ($\frac{1}{4}$ respecte a l'acer) [1].

En la Figura 4.2 es pot observar la comparativa del diagrama tensió-deformació entre diferents FRP, segons el material de la fibra, i l'acer. Aquest diagrama indica el comportament tensió-deformació dels diferents FRP existents, segons el material emprat en la fibra, havent-hi una gran varietat en el seu comportament mecànic: el mòdul d'elasticitat és, en general, més baix que el de l'acer, sobretot per les fibres de vidre (GFRP) i de basalt (BFRP). S'observa també que els FRP tenen un comportament lineal fins a la ruptura. La deformació de fluència de l'acer és molt inferior a la ruptura dels FRP. D'altra banda, l'acer estructural no es mou gaire d'aquest rang a diferència dels FRP que depenen de cada fabricant. En general, els materials reforçats amb fibres són materials amb comportament elàstic lineal sense avís previ de la fallada al contrari de l'acer, per exemple, que és capaç de deformar-se i plastificar abans de la imminent fallada.

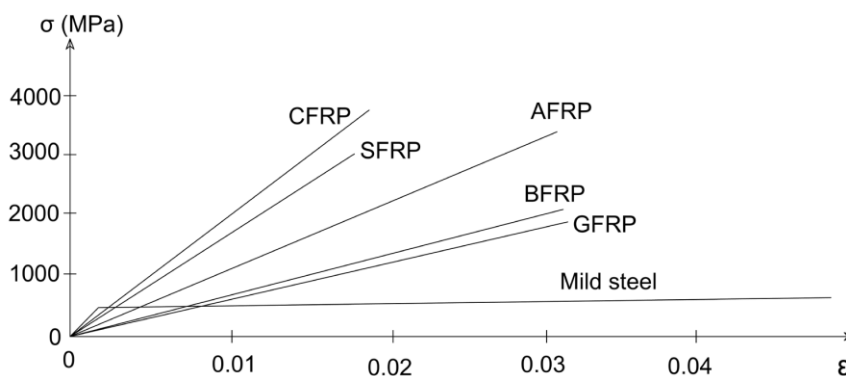


Figura 4.2. Diagrama tensió-deformació per diferents FRP unidireccionals i l'acer. CFRP = carboni FRP, SFRP = acer FRP, AFRP = aràmida, BFRP = basalt, GFRP = vidre [1]

A més, altres propietats d'aquests materials són: immunitat a la corrosió, en termes d'instal·lació, es redueixen costos associats, ja que la seva lleugeresa permet que sigui més fàcil, molt alta resistència a tracció (tant en comportament estàtic com fatiga), la rigidesa es pot ajustar als requeriments de disseny, alta capacitat de deformació i il·limitades possibilitats de mida, geometria i dimensions. No obstant això, hi ha un seguit de desavantatges associats als FRPs que cal considerar: el cost del material per massa és significativament superior en la majoria de casos, tot i que considerant el seu muntatge continua essent el producte més rendible. I finalment, la resistència a altes temperatures (entre 60-70°C) el situa en una mala situació en-vers als altres elements, ja que provoca una degradació prematura de les seves propietats mecàniques ([1], [4]–[6]).

Els dos constituents principals dels FRP són: la fibra, que proporciona la rigidesa, i la matriu, que transfereix els esforços entre les fibres les protegeix dels agents externs. A continuació s'expliquen els principals materials utilitzats i les seves característiques.

4.1.2.1 Fibra

En el material compost, la fibra és el component que proporciona resistència i rigidesa en forma contínua o discontinua, i unidireccional o multidireccional. Les fibres més utilitzades per reforç del formigó armat són les de carboni, vidre, aramida i basalt (propietats més significatives Taula 4.1), les quals tenen un comportament lineal elàstic creixent fins la fallida, sense haver-se apreciat una deformació considerable, com en el cas de l'acer. Aquest últim es pot usar en format de fibra com a material compost, però la seva alta densitat i la possibilitat de corrosió el defineixen com uns desavantatges a considerar.

Taula 4.1. Valors característics de les fibres [1]

| Material | Mòdul elàstic (GPa) | Límit elàstic (MPa) | Deformació unitària (%) |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| <i>Carboni</i> | | | |
| - Alta resistència | 215 – 235 | 3500 – 4800 | 1.4 – 2.0 |
| - Ultra alta resistència | 215 – 235 | 4800 – 6000 | 2.0 – 2.3 |
| - Alt mòdul elàstic | 350 – 500 | 2500 – 3100 | 0.5 – 0.9 |
| - Ultra alt mòdul elàstic | 500 – 700 | 2100 – 2400 | 0.2 – 0.4 |
| <i>Vidre</i> | | | |
| - E | 70 | 1900 – 3000 | 3.0 – 4.5 |

| Material | Mòdul elàstic (GPa) | Límit elàstic (MPa) | Deformació unitària (%) |
|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| - S | 85 – 90 | 3500 – 4800 | 4.5 – 5.5 |
| <i>Aramida</i> | | | |
| - Baix mòdul elàstic | 70 – 80 | 3500 – 4100 | 4.3 – 5.0 |
| - Alt mòdul elàstic | 115 – 130 | 3500 – 4000 | 2.5 – 3.5 |
| Basalt | 80 – 90 | 2500 – 3200 | 3.0 – 3.5 |
| Acer | 185 | 3070 | 1.7 |

Les fibres de carboni s'obtenen escalfant brea de petroli o carbó refinat sense presència d'oxigen, eliminant els àtoms que no són de carboni i obtenint-ne una cadena llarga entrecreuada d'àtoms de l'element. Aquesta fibra és àmpliament utilitzada per reforçar el formigó, ja que presenta una alta resistència a tracció, rigidesa, resistència a la fatiga i resistència a la corrosió. Inconvenients d'aquestes són la conductivitat elèctrica que, en estar en contacte amb l'acer, pot crear corrosió galvànica, i el seu cost, essent la fibra més cara ([1]–[3], [5], [7]).

Les fibres de vidre són les fibres més emprades per produir FRP, sobretot quan aquestes s'utilitzen com a reforç intern d'estructures de formigó armat (en substitució de les barres d'acer). Estan fabricades a partir de filaments de vidre obtinguts en un procés de fusió i emmotllat. Els principals avantatges d'aquesta fibra són el baix cost de producció, alta resistència a tracció, bona resistència química i bones propietats com aïllants. En contra, la resistència a la fatiga i rigidesa són inferiors, i presenten una major fragilitat que el carboni. Es classifiquen en tres tipologies principals: vidre-E, vidre-S i vidre-AR (*Alkali Resistant*) ([1]–[3], [7]).

Les fibres d'aramida (o fibres Kevlar), com també que les altres fibres, tenen una estructura anisotròpica proporcionant una alta resistència i mòdul elàstic en la direcció longitudinal de la fibra. Estan formades per cadenes llargues de poliamida (PA) sintètica. Presenten bona resistència a la temperatura i lleugeresa comparant-les amb els dos elements anteriors, una resistència a tracció relativament superior però un mòdul elàstic inferior respecte a la fibra de carboni. A diferència dels altres tipus de FRP, la fibra Kevlar té una menor resistència a compressió i cisallament ([1]–[3], [7]).

Les fibres de basalt són fetes d'un mineral d'origen volcànic, que representa un silicat pel seu origen químic. Aquesta fibra s'obté a partir de triturar el basalt i escalfar-lo fins a la fusió, d'un mètode semblant a la producció de fibra de vidre, però amb menys energia. Les propietats mecàniques són comparables a la fibra de vidre, oferint una

solució econòmica excel·lent com a alternativa a altres fibres resistents a altes temperatures. Per contra, els principals desavantatges d'aquestes són la dificultat del procés d'escalfament pel control de qualitat de les fibres, i la limitació d'estudis presents en la utilització de la fibra ([1], [3], [7]).

4.1.2.2 Matriu

La funció principal de la matriu és transferir els esforços a les fibres proporcionant uniformitat en la distribució de càrregues en tensions tallants entre les diferents capes, i alhora protegir les fibres de les condicions mediambientals, danys físics i agents químics. La matriu pot ser de materials ceràmics, metàl·lics i polimèrics, sent aquestes últimes les més utilitzades. Les característiques de la matriu polimèrica són el baix requeriment de pressió i temperatura durant el processat, la baixa densitat, fent reduir el pes del conjunt i millorant les propietats mecàniques específiques. Algunes de les aplicacions d'aquest material són en el sector aeroespacial, automobilístic, esportiu, entre d'altres ([1]–[3]).

Les matrius polimèriques més usades es defineixen àmpliament en la categoria de termoestables i les termoplàstiques, essent les primeres les més utilitzades en el sector estructural. En la Taula 4.2 s'observa la comparativa essencial entre aquestes [2].

Taula 4.2. Resum de les propietats més significatives de les matrius polimèriques [2]

| Matriu | Avantatges | Inconvenients |
|--------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Termoestable | Baixa viscositat i temperatura durant processat | Fràgil |
| | Excel·lent estabilitat tèrmica un cop ha polimeritzat | Afectació a temperatures superiors a la de transició vítria (T_g) |
| | Químicament resistent | No reciclable |
| | Estabilitat tèrmica | No post conformat |
| Termoplàstic | Reciclable | Elevada viscositat a l'estat fos |
| | Fàcil de reparar mitjançant soldadura i unió per solvent | Ha d'escalfar-se per sobre del punt de fusió pel processat |
| | Post conformat | |
| | Tenaç | |

Els polímers termoestables s'obtenen a partir d'una reacció química d'enduriment iniciat per algun agent extern, catalitzador, es barregen i comencen una reacció

irreversible. Tenen una gran estabilitat tèrmica i una major resistència química, tot i que, un cop curat, no poden tornar a estar en estat líquid de nou. En el cas que s'escalfi fins una certa temperatura (T_g) les seves propietats decauen dràsticament ([3], [7]).

Els més utilitzats són l'epoxi, el polièster i el vinil èster. El primer és l'opció més cara, però presenta una excel·lent propietat d'adhesió, baixa contracció durant el curat i bona resistència química. Els dos restants tenen característiques de rendiment similars, tot i que el vinil èster té una major resistència a tracció i a la corrosió [3].

4.1.3 Adhesius estructurals

L'adhesiu és l'element que uneix l'element estructural principal amb l'element de reforç. En el cas del present document, el formigó armat 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 per adhesius estructurals és la resina epoxi, donat que presenta una excel·lent propietat d'adhesió ([1], [3]). Tal com s'ha exposat en l'apartat 4.1.2.2, els adhesius termoestables tenen l'inconvenient de ser eficients 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 curats en fred [1]).

En el cas del reforç d'estructures existents, el mètode d'aplicació de l'adhesiu i la seva viscositat està condicionat per la tipologia de reforç i les condicions de l'estructura: per exemple, omplir les ranures en zones de moment negatives (zona superior de la biga) es pot abocar directament amb una resina de baixa viscositat. Pels altres casos cal una epoxi més viscosa per evitar que gotegi, s'afegeixen components (com sorres) [5].

És per aquesta raó que s'estan estudiant adhesius cimentosos per tal d'augmentar la temperatura de servei ([6], [8]–[14]). La matriu cimentosa és combinada amb altres elements: aglutinants (“*silica fume*”, “*metakaolin*”), additius (polímers) o àrids fins, és la més utilitzada en els materials inorgànics amb un gran rendiment amb les fibres, típicament en forma de teixit. Aquesta resina presenta una resistència a tallant superior, consistència adequada pel muntatge en zones de moment positiu, cost inferior del

material, es minimitza el risc pels treballadors i alhora el seu impacte ambiental, baixa contracció, baixa fluència i bona treballabilitat ([1], [5]).

Les propietats mecàniques principals d'aquests materials obtinguts en la bibliografia es poden observar en la Taula 4.3. Aquestes varien en funció de la composició de l'adhesiu.

Taula 4.3. Propietats mecàniques dels adhesius cimentosos

| Tensió a compressió (MPa) | Límit elàstic (MPa) | Mòdul elàstic (GPa) | Ref. |
|---------------------------|---------------------|---------------------|------|
| 68,5 – 86 | 5,2 – 6,2 | 24 – 25 | [6] |

4.1.4 Tècniques de reforç d'estructures de formigó armat amb FRP

El reforç d'elements estructurals de RC amb materials compostos permet augmentar la capacitat portant de l'estructura durant la seva vida útil de servei, essent una solució òptima per reparació i rehabilitació d'edificis i infraestructures civils. L'optimització dels detalls de construcció del reforç, models del comportament de l'adherència entre el reforç i el ciment, i mètodes de disseny fiables per les càrregues a flexió i tallant han fet augmentar l'estudi de les dues tècniques utilitzades actualment: reforç adherit externament (EBR: *Externally Bonded Reinforcement*) i reforç inserit al recobriments (NSM: *Near-Surface Mounted*).

La primera tècnica (EBR) consisteix a adherir el FRP, sigui en forma de plaques o làmines (unidireccional o teixit) sobre la superfície del formigó. Aquesta capa del formigó requereix un tractament per millorar el rendiment de la unió, sent l'epoxi l'adhesiu més utilitzat. D'altra banda, el FRP més emprat és el carboni (CFRP), seguit del vidre i l'aramida utilitzats en situacions més específiques.

El mètode d'aplicació depèn de l'estat inicial del FRP. En general, es poden dividir en dos grups: curat in-situ sobre la superfície del formigó, o prefabricat (o "precurat"). El primer usualment s'usa per al reforç d'element en una o més direccions, com pilars o bigues. Pel que fa al prefabricat s'adhereix en làmines prèviament tractades amb un adhesiu en la superfície.

L'EBR és la tècnica més estudiada, i alhora, àmpliament emprada en aplicacions pràctiques, ja que es disposen de molts resultats experimentals verificant diversos

aspectes de la unió per la realització de models teòrics i formulació que verifiquen els assajos realitzats [15]. A més, la simplicitat d'instal·lació i adaptabilitat en diferents circumstàncies, per exemple, confinant un pilar (Figura 4.3).



Figura 4.3. Aplicació del reforç d'un pilar de formigó armat amb CFRP [1]

Tot i ser una tècnica altament estudiada i utilitzada com a reforç en l'enginyeria civil, el principal mode de falla dels elements a flexió és el despreniment sobtat, essent una falla molt fràgil, i alhora poc recomanable en termes de seguretat, ja que amb aquesta falla no s'arriba a la capacitat màxima del reforç, requerint elements o mecanismes d'ancoratge ([1], [3], [16]). Altres desavantatges d'aquesta tècnica són l'exposició contra agents externs: condicions mediambientals o vandalisme, fent disminuir les propietats d'adhesió, i l'estètica del conjunt.

D'altra banda, la tècnica NSM s'ha començat a estudiar amb més detall els darrers vint anys [3]. El procediment del mètode consisteix a realitzar una ranura sobre la superfície de formigó desitjada amb una profunditat menor a la del recobriment de l'armadura [1]. Un cop la superfície de la ranura està adequada als requeriments, s'hi afegeix l'adhesiu estimat i, mentre aquest encara no ha solidificat, s'introdueix el FRP.

En la Figura 4.4 es pot observar les diferents geometries d'FRP utilitzades per al mètode NSM, sigui per làmines rectangulars o quadrades, o barres circulars. Aquest ventall de possibilitats ofereixen varietat d'avantatges i opcions per a cada aplicació. Per exemple, les barres quadrades maximitzen l'àrea de la secció de la barra per una mida

determinada ranura quadrada; d'altra banda, hi ha més disponibilitat de barres circulars i es poden ancorar fàcilment en operacions de pretesat; i les tires rectangulars maximitzen la relació entre l'àrea de la superfície i l'àrea de la secció per un volum donat, per tant, minimitzant el risc de desprendiment [5]. Tanmateix, les barres es poden fabricar amb una varietat de textures superficials afectant significativament al comportament d'adherència com a reforç NSM, augmentant al voltant d'un 34% la càrrega màxima per una superfície tractada respecte a una sense tractament [3].

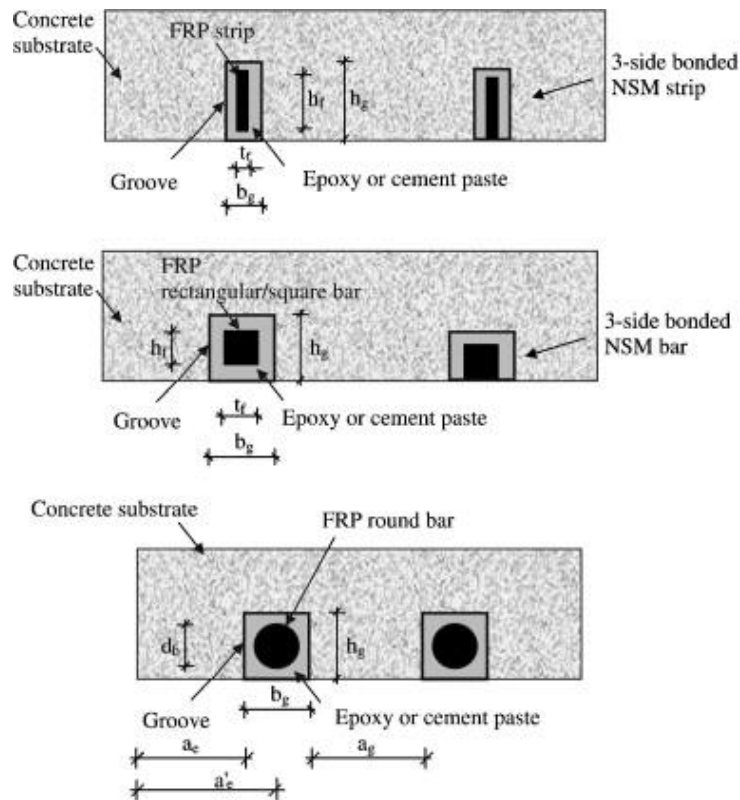


Figura 4.4. Diferents formes de la ranura i del FRP pel reforç amb NSM [5]

Diversos estudis ([1], [3]–[5], [17], [18]) d'aquesta darrera tècnica ha permès obtenir una comparativa dels avantatges del NSM respecte al reforç adherit externament:

- El treball d'instal·lació del reforç requerit pot reduir-se, ja que no és necessari modificar la superfície, exceptuant el ranurat, per exemple, treure el guix, modificar les irregularitats de la superfície.
- El reforç és menys propens a desprendre's de l'estructura, ja que l'àrea d'adhesió és superior, permetent una major eficiència en el reforç.
- Les barres en NSM són més fàcil d'ancorar en membres adjacents, o per treballar amb reforços pretesats.

- Les barres estan protegides, és a dir, no estan exposades a la intempèrie de possibles impactes accidentals, incendis o vandalisme.
- L'estètica de l'estructura roman pràcticament inalterada.
- Malgrat que els laminats utilitzats per NSM són de dimensions més petites, la relació perímetre/àrea de l'adhesiu és major que en el cas d'EBR, millorant l'eficiència del material, ja que la superfície en contacte amb el formigó fa que el FRP sigui menys propens a desprendre's.

4.2 Comportament adherent de la unió formigó – NSM FRP

Els darrers anys ha augmentat l'interès de la tècnica NSM amb FRPs com a reforç estructural d'estructures de formigó. 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.

Una gran nombre de paràmetres afecten el comportament local d'adherència-lliscament dels sistemes NSM: propietats mecàniques dels materials, propietats superficials del reforç de FRP i la ranura, i dimensió d'aquesta última, geometria del sistema de reforç (barres i làmines). A més, la força o càrrega màxima d'adherència està relacionada amb el tipus de falla ([5], [17]).

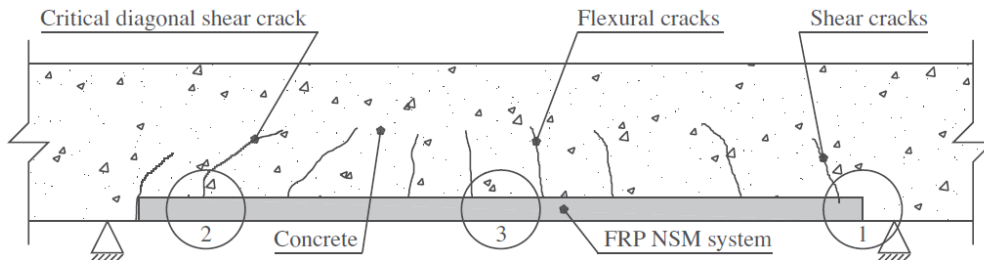
4.2.1 Mecanisme i modes de falla

La identificació i control dels modes de falla, tant a nivell estructural com a nivell local, són necessaris per conèixer què ha sigut el causant de l'estructura, i poder adequar el disseny estructural. Pel reforç amb FRP del formigó armat a flexió o tallant amb la tècnica NSM existeixen sis modes de falla combinant diferents estats de tensió els quals hi participen els trets materials del sistema: formigó, armadura (o acer) i FRP.

Per al cas d'un element treballant a flexió, si el sistema està dissenyat correctament, els modes de falles desitjats són el I) trencament per compressió del formigó després de la plastificació de l'acer, II) plastificació de l'acer i posterior trencament a tracció del FRP i III) plastificació de l'acer i despreniment ("*Debonding*") del FRP [17].

En la Figura 4.5 s'exposen els diferents modes de falla deguts al despreniment ("*debonding*") de l'FRP per a bigues de formigó armat treballant a flexió i reforçades amb

NSM FRP. En aquesta s'indica les zones característiques on pot succeir el despreniment. El primer, despreniment al final de la unió (“*end debonding*”), està associat amb la concentració de tensions properes als recolzaments, degut a una combinació de tensió normal i tensió tallant, el qual s'inicia a partir d'una fissura del formigó i provoca el desenganxament de l'FRP, propagant el despreniment des de l'extrem de reforç cap al centre d'aquest ([1], [17], [19]).



1 – End debonding; 2 – Debonding caused by diagonal shear cracks; 3 – Debonding caused by flexural cracks

Figura 4.5. Modes de falla per adherència principals en bigues de formigó armat treballant a flexió amb reforç de FRP per la tècnica NSM [17]

Un altre mode de falla és el despreniment de l'FRP entre fissures (“*Intermediate Crack Debonding*”) a causa d'un increment de força en l'FRP entre fissures superior al que pot resistir. Com a resultat hi ha una alta concentració de tensions interfacials locals entre el reforç i el formigó propers a la fissura. Quan augmenta la càrrega fins a arribar a valors crítics, s'inicia la fissura i es propaga fins a l'extrem de la biga [20].

La falla per separació del recobriment del formigó (“*Concrete Cover Separation*”) és el principal mode de falla prematura de les bigues reforçades amb NSM. El mode de falla implica una fissura a l'alçada del reforç intern d'acer que es propaga de forma horitzontal pel formigó. Es considera una falla prematura degut a la desunió que es pot classificar en termes generals: associats amb altes tensions interfacials propers als extrems, i aquelles induïdes per una fissura per flexió o tallant ([21], [22]).

En el cas de falles a nivell local, paral·lelament al nivell estructural, s'ha estudiat per diversos investigadors, segons [1], identificant els diferents tipus de falles principalment per la longitud d'adherència, la superfície d'unió i el factor de forma, k , que varia en funció del reforç utilitzat (barra circular, quadrada o rectangular). Aquests modes de falla a nivell local poden succeir en qualsevol dels tres materials implicats (formigó, FRP i adhesiu) i les interfases existents (FRP/adhesiu i adhesiu/formigó). La Figura 4.6

presenta aquests modes de falla en el cas d'una barra rectangular. A continuació s'exposarà una breu descripció dels diferents modes de falla considerant que la càrrega es transfereix des del FRP cap al formigó, essent la interfície FRP/adhesiu la primera zona crítica.

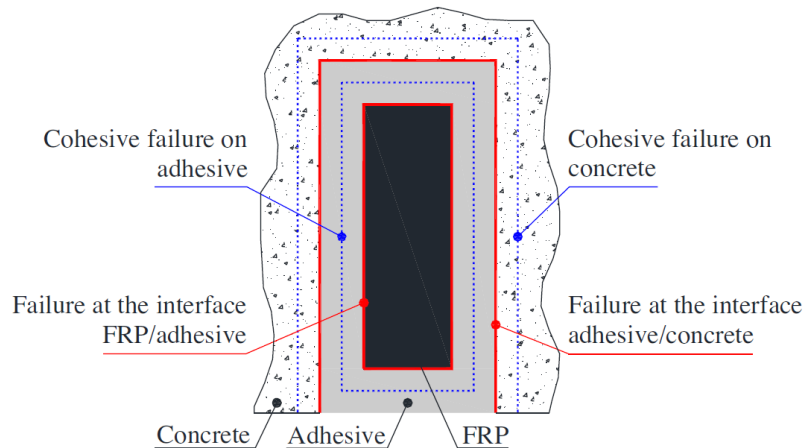


Figura 4.6. Modes de falla a nivell local per la tècnica del reforç d'una barra rectangular per NSM [17]

La interfície d'unió entre el FRP i l'adhesiu pot ser degut a la mala adherència entre les seves superfícies, sovint causada per la longitud d'unió entre aquests, pel mecanisme d'unió o per la cara llisa del FRP. Aquest últim se sol combatre aplicant un canvi superficial en el reforç.

L'altra falla en la interfase és entre l'adhesiu i el formigó, també causat per una manca d'adhesió entre els dos elements. De la mateixa manera que el seu predecessor, el grau de confinament transversal i de les propietats mecàniques de l'adhesiu (principalment la tensió d'adherència) són els causants d'aquestes falles. Modificar la superfície de formigó en l'interior de la ranura pot millorar la transferència de la càrrega i, per tant, el treball realitzat pel conjunt.

El trencament de l'adhesiu es produeix quan l'esforç tallant aplicat en l'assaig és superior a la resistència del mateix essent un trencament molt fràgil, on el formigó queda inalterat en la interfície. Aquest mode només s'ha observat en tècniques NSM utilitzant barres rectangulars amb tractament superficial del reforç. D'altra banda, el mode de falla per trencament del formigó succeeix quan la tensió normal i tallant transferida del reforç cap al formigó és superior a la que aquest pot suportar.

En últim lloc i no menys important, el trencament del FRP quan aquest arriba a la seva tensió a tracció màxima abans del trencament de l'adhesiu. Aquest sol produir-se amb barres rectangulars, ja que la té menys àrea de secció transversal i major relació perímetre/àrea. Tot i ser una ruptura fràgil, és el mode de falla més desitjat, ja que el FRP arriba a la seva resistència a tracció ([1], [3], [5], [17], [19]).

4.2.2 Assaig d'adherència

El comportament adherent de la unió entre el formigó i el reforç de material compost per la tècnica NSM s'ha estudiat experimentalment mitjançant assajos d'adhesió. Aquests assajos s'han realitzat amb diferents configuracions per analitzar en detall el despreniment del FRP. Dites configuracions (Figura 4.7) poden agrupar-se en assajos d'adherència directa (DPT: "Direct Pull-out Test") i assajos d'adherència en bigues (BPT: "Beam Pull-out Test"). En ambdós casos, al llarg de l'assaig es mesura la força per extreure el reforç, i el lliscament o desplaçament relatiu del FRP respecte al formigó. Aquesta relació entre la força i lliscament permet definir la llei local d'adherència-lliscament, la qual s'utilitza per caracteritzar la unió. La geometria i dimensions del bloc de formigó poden variar segons qui faci l'assaig, essent típicament cúbica, prismàtica o en forma de C, tot i que el prismàtic és el més emprat.

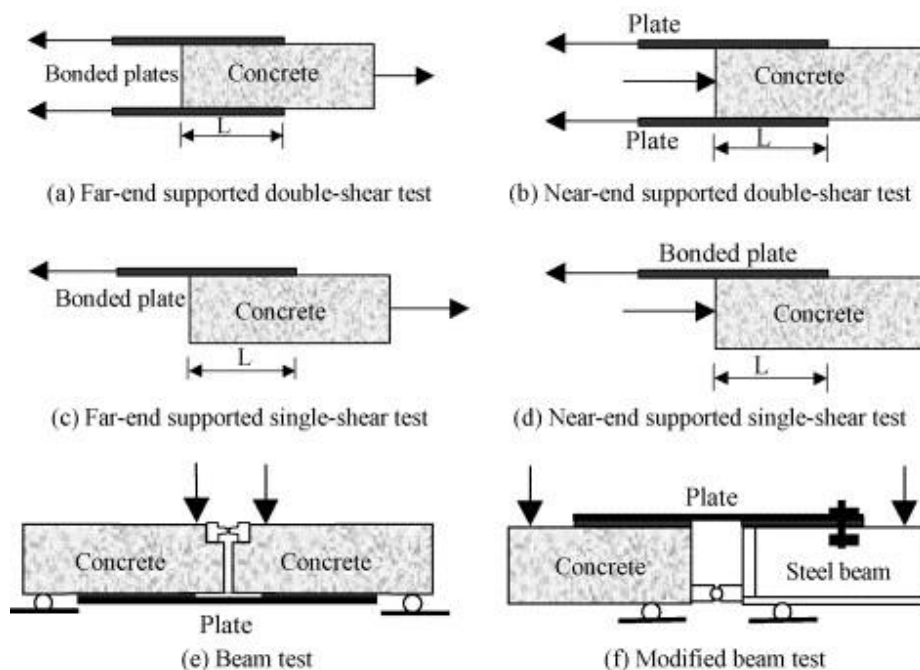


Figura 4.7. Classificació dels assajos d'adherència. (a) - (d): Direct Pull-out Test (DPT). (e) i (f): Beam Pull-out Test (BPT) [16]

L'assaig més simple (Figura 4.7 (c) i (d)) consisteix a adherir el reforç en una longitud (L) coneguda en una de les superfícies del formigó, i a continuació aplicar una

força en el FRP, immobilitzant el bloc de formigó, o al revés. És l'assaig més utilitzat pels investigadors degut a la seva senzillesa i simplicitat, ja que només utilitza una cara del formigó i fa que el control del procediment sigui més senzill pel fet que l'àrea d'assaig està més localitzada. En contra, la càrrega s'aplica excèntricament al centre de gravetat del conjunt causant un intent de rotació del conjunt.

Per evitar aquest inconvenient, es va dissenyar la configuració d'assaig doble (Figura 4.7 (a) i (b)), adherint dues provetes en les cares oposades del bloc de formigó per tal de generar una simetria de càrrega. No obstant això, aquest assaig és més difícil de controlar degut a les imperfeccions existents en les superfícies, les quals poden provocar asimetries irremeiables.

Finalment, l'assaig de bigues (BPT) (Figura 4.7 (e) i (f)) es realitza connectant dos blocs prismàtics de formigó mitjançant una frontissa en la zona de compressió, i s'adhereix el reforç en la zona traccionada. El reforç queda ancorat a un dels blocs, i a l'altre s'adhereix, mesurant-ne el desplaçament. Comparant amb els assaigs DPT, aquest requereix blocs de formigó més grans per estudiar longituds d'adherència superiors, fent que sigui una configuració més costosa ([3], [16], [17]).

4.3 Modelització analítica i numèrica de la unió per NSM

4.3.1 Models analítics teòrics

La unió entre formigó armat i el reforç és pròpiament tridimensional tot i que, degut a la seva complexitat i amb la finalitat de desenvolupar formulacions analítiques vàlides, es tracta com un problema uniaxial. S'obté el model a partir de l'equació diferencial que governa el comportament d'adherència entre els elements implicats. Aquesta equació es basa en el comportament local d'adherència-lliscament, relacionant la unió i el lliscament en cada punt al llarg de la longitud d'enllaç. Dita equació es dedueix en capítols posteriors.

La llei local d'adherència entre el reforç i el formigó, també anomenada llei d'adherència-lliscament o llei en la interfase, es defineix com la relació de la tensió tallant de la unió amb el lliscament relatiu entre el FRP i el formigó. La llei simplificada és àmpliament acceptada ([1], [4], [5]) i definida com un sistema bilineal composta per tres etapes o fases: zona elàstica, zona d'estovament i zona de despreniment tal com s'observa en la Figura 4.8. Aquest model simplificat no té en compte la fricció

desenvolupada posterior al pic en la interfase entre els elements participants, és a dir, formigó, adhesiu i FRP.

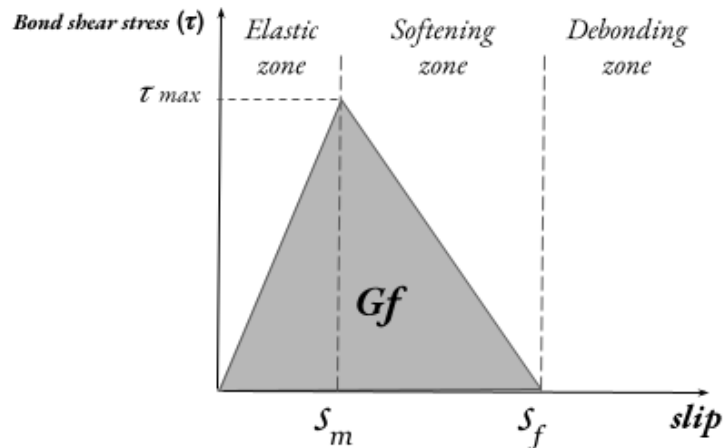


Figura 4.8. Representació del comportament bilineal per la llei local d'adherència entre el FRP i el formigó. Adaptat de [18]

La primera etapa es defineix com un augment lineal de la tensió tallant fins a obtenir-ne el valor màxim (τ_{max}) amb el lliscament associat (s_m). Un cop superat aquest punt, la unió comença a deteriorar-se, entrant en la zona d'estovament, on l'esforç tallant disminueix linealment amb el lliscament. Finalment, l'esforç tallant és nul, arribant al valor de lliscament previ al desprendiment (s_f).

La primera fase d'augment lineal és la fase elàstica, ja que, teòricament, si traiem la càrrega, es retornaria a un lliscament inicial, és a dir, zero. Per tant, un cop arribat a la zona de "softening", el dany és permanent i, per tant ja no es tornaria a un lliscament zero. Cal esmentar que l'àrea sota la corba tensió tallant – lliscament és l'energia de fractura (G_f) associada a la interfase de la llei d'adherència [5].

Diferents investigadors han proposat lleis d'adherència-lliscament de diferents formes i etapes, tal com es pot observar en la Figura 4.9.

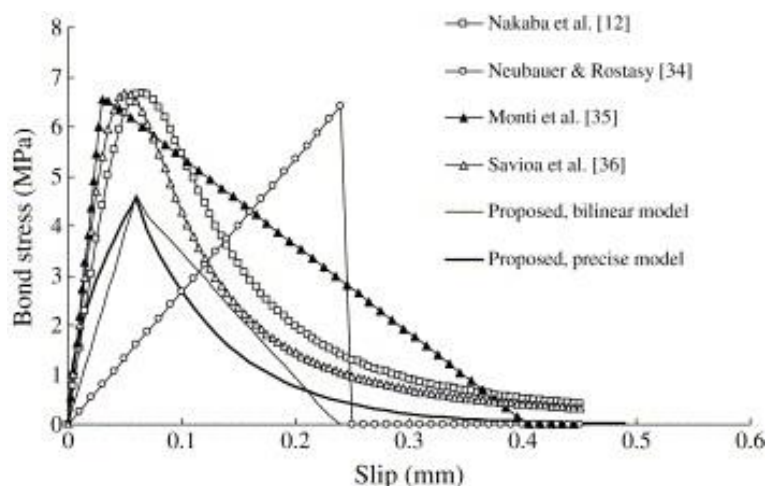
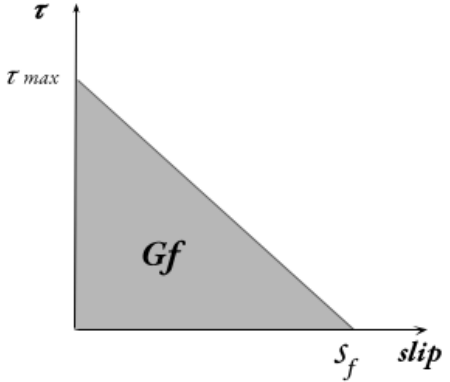
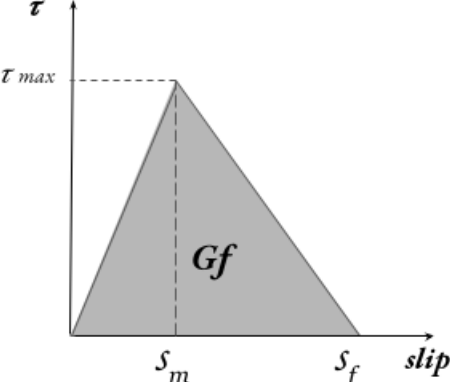


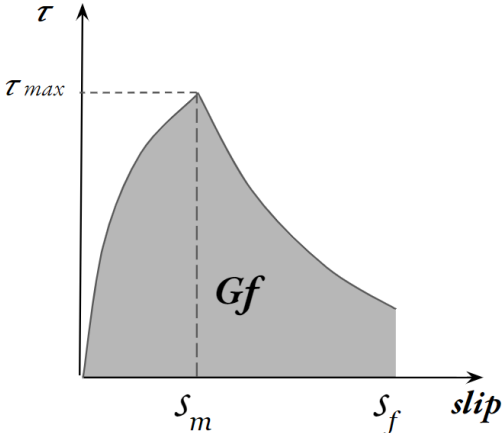
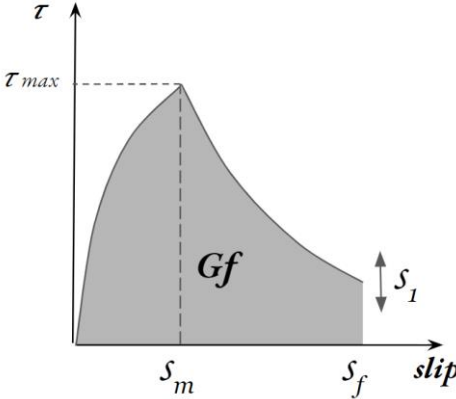
Figura 4.9. Diferents models existents de la llei d'adherència-lliscament [23]

Una gran varietat de paràmetres afecten la llei local teòrica, entre els quals hi ha les propietats mecàniques dels materials, les característiques de la ranura i l'acabat superficial d'aquesta i el FRP, la forma del reforç [1].

En la Taula 4.4 es proposen els principals models de la llei d'adherència-lliscament ("Bond – Slip Model") per la tècnica NSM, on τ_{max} és la tensió tallant màxima de la unió, s_m i s_f és el valor del lliscament on obtenim la tensió tallant màxima i el lliscament màxim abans del despenjament, respectivament.

Taula 4.4. Equacions dels principals models utilitzats per la llei d'adherència-lliscament per NSM. Font de les figures: Pròpia

| Model | Equació | Paràmetres | Número equació | Referència |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------|-------------------|
| <p>1. Linear Descending (LD)</p>  | $\tau(s) = \begin{cases} \tau_{max} \cdot \frac{(s_f - s)}{s_f}, & 0 \leq s \leq s_f \\ 0, & s > s_f \end{cases}$ | τ_{max} s_f | (1) | ([24], [25]) |
| <p>2. Bilinear (BL)</p>  | $\tau(s) = \begin{cases} \tau_{max} \cdot \frac{s}{s_m}, & 0 \leq s \leq s_m \\ \tau_{max} \cdot \frac{(s_f - s)}{(s_f - s_m)}, & s_m < s \leq s_f \\ 0, & s > s_f \end{cases}$ | τ_{max} s_m s_f | (2) | ([1], [26], [27]) |

| Model | Equació | Paràmetres | Número equació | Referència |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------|
| <p>3. Model no lineal</p>  | $\tau(s) = \begin{cases} \tau_{max} \cdot \left(\frac{s}{s_m}\right)^\alpha, & 0 \leq s \leq s_m \\ \tau_{max} \cdot \left(\frac{s}{s_m}\right)^{\alpha'}, & s > s_m \end{cases}$ | τ_{max} s_m α α' | (3) | ([1], [28]) |
| <p>4. Model no lineal modificada</p>  | $\tau(s) = \begin{cases} \tau_{max} \cdot \left(\frac{s}{s_m}\right)^\alpha, & 0 \leq s \leq s_m \\ \tau_{max} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{s - s_m}{s_1}\right)^{\alpha'}}, & s > s_m \end{cases}$ | τ_{max} s_m α α' s_1 | (4) | [29] |

D'altra banda, α i α' per [28] són coeficients d'ajustatge la corba numèrica amb la de l'assaig experimental. El valor del paràmetre α , per l'equació (3) i (4), varia en un rang entre 0 i 1. En ambdues equacions, la branca de creixement són iguals i es pot observar que el pendent inicial tendeix cap a infinit, fet que s'aproxima a l'assaig experimental de la unió. En el cas del paràmetre α' varia el rang de valors: per l'equació (3) el seu valor ha de ser negatiu, i per l'equació (4), semblant al coeficient alfa anterior, el rang és entre 0 i 1. Finalment, el coeficient s_1 de l'equació (4) és un altre paràmetre que modifica la "cua" de la corba.

Reprenent els models de la Taula 4.4, el primer model és el més senzill i simplificat, el qual es menysprea la primera etapa considerant la unió rígida i, per tant, sense lliscament (model 1). El model 2 és el mateix que el model de mostra (Figura 4.8). El model 3 i el model 4 són, a diferència dels dos primers, no lineals per tal d'ajustar-se més a un assaig experimental, el qual mostra un creixement exponencial, on el pendent en el punt inicial és molt elevat, i una disminució gradual de la tensió posterior al punt màxim ([4], [5]). Aquest tram inicial sovint es pot considerar com un comportament lineal i elàstic (s_0, τ_0). El tram final dels models es defineix l'etapa final com una zona de deteriorament de l'adhesiu tal que s'activa el mecanisme de fricció del sistema.

4.3.2 Model numèric de l'adhesiu a partir del mètode per elements finits

Amb l'objectiu de comprendre millor els fenòmens observats en els assajos experimentals per tal d'ampliar als estudis en casos en els quals no s'hagin realitzat campanyes experimentals, s'utilitza la modelització numèrica a partir del mètode dels elements finits (FEM: "*Finite Element Method*"). Aquest permet simular la resposta d'estructures, components i materials quan estan sotmesos a càrregues puntuals. L'eina és àmpliament utilitzada en diferents àmbits donat el seu potencial de càlcul.

Per realitzar una simulació numèrica amb precisió cal definir adequadament els materials emprats (formigó, adhesiu i FRP), així com les interfases existents (formigó/adhesiu i adhesiu/FRP). Els models constitutius, és a dir, les expressions matemàtiques que representen la relació tensió – deformació d'un material, ja són existents en la literatura, i s'han d'especificar per ajustar-se al seu comportament intrínsec per tal de simular el comportament quasi fràgil del formigó i l'adhesiu, i el comportament elàstic del FRP. D'altra banda, el model constitutiu de les interfases s'han de definir per tal de verificar model numèric.

4.3.2.1 Model d'elements finits

La simulació numèrica utilitzada es realitzarà amb el programari Abaqus®, a partir del modelat amb elements cohesius, ja que són útils per modelar adhesius o interfases unides, obtenint una resposta constitutiva dels elements. Per tant, aquests elements s'usen per unir components. Aquest model consisteix en:

- escollir el tipus d'element cohesiu apropiat entre els següents elements inclosos en la llibreria, com són els elements d'anàlisi bidimensionals, tridimensionals i axisimètrics;
- afegir els elements cohesius en el model d'elements finits, connectant-los a altres elements i resoldre els problemes o dubtes a l'hora de modelar amb aquest tipus d'elements cohesius, com per exemple, connexió dels elements, discretització de les zones cohesives, o definició del contacte entre els components;
- definir la geometria inicial d'aquests elements; i
- definir el comportament constitutiu mecànic [30].

El manual del programari Abaqus® [30], defineix tres tipologies d'aplicacions típiques per elements cohesius basats en la hipòtesi sobre els estats de tensió i deformació apropiats per cada àrea d'aplicació. La primera tipologia (Figura 4.10 – a) és un model basat en continu, per elements connectats per un adhesiu amb un gruix finit i, generalment, és més flexible que els materials adherits. La segona tipologia (Figura 4.10 – b) és un model basat en separació per tracció de la interfase, on l'adhesiu intermedi és molt prim, podent-se considerar un gruix nul. En l'aplicació de la càrrega, l'inici i propagació del dany generen una falla en la interfase. I per últim, el modelatge de juntes (Figura 4.10 – c) el qual no existeixen restriccions laterals sobre la capa cohesiva, per tant, són lliures d'expandir-se en la direcció lateral sense tensions.

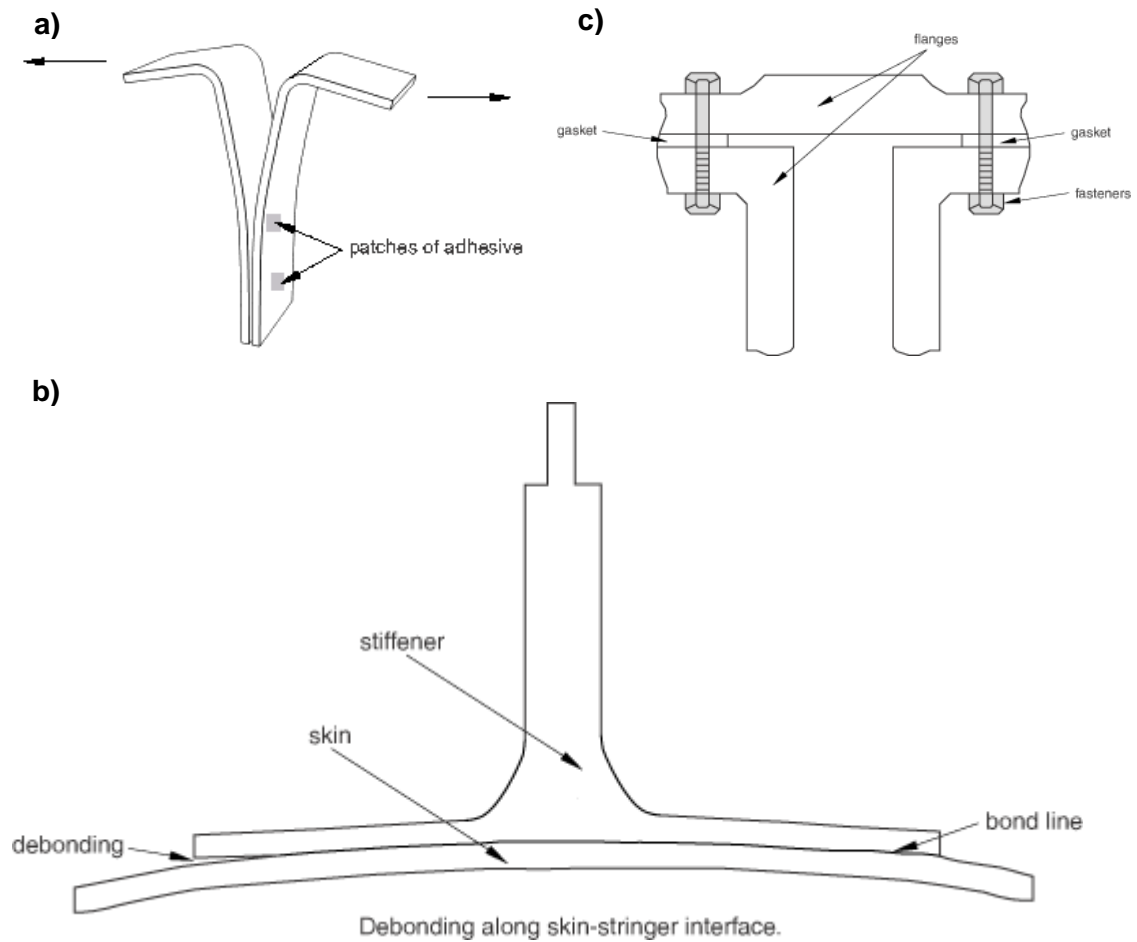


Figura 4.10. Aplicacions típiques de la modelització d'elements cohesius en Abaqus®: a) Prova típica de la separació de dos materials pel model basat en continuu; b) Despreniment al llarg d'una interfase; c) Aplicació típica per juntes [30]

5 METODOLOGIA

En el present capítol es procedeix a definir els materials i equips utilitzats en el transcurs del projecte, alhora com definir el mètode emprat per la modelització analítica, i la modelització numèrica.

5.1 Resultat assajos experimentals

Tal com s'ha definit en l'abast del projecte, no s'ha realitzat cap mena d'assaig experimental, sinó que s'han obtingut les dades de l'assaig *Pull-out* per l'estudi de la unió formigó – FRP per NSM a la Universitat de Minho. Aquest assaig permet avaluar el comportament d'adherència – lliscament de la unió. La configuració (Figura 5.1) de la prova i les característiques es definiran a continuació.

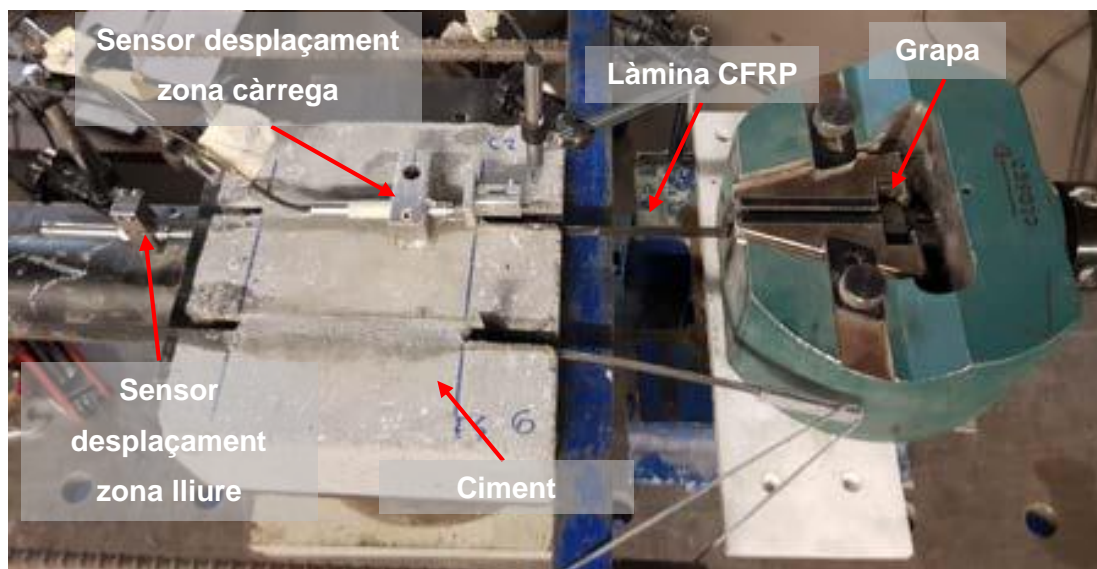


Figura 5.1. Configuració de l'assaig d'adherència per NSM [31]

Les provetes de formigó són blocs de $200 \times 100 \text{ mm}^2$ i de longitud 200 mm de classe C25/C30 d'acord amb l'Eurocodi 2. Se situen dues ranures en la zona superior del bloc per tal de facilitar el muntatge de l'adhesiu i el reforç, i per reutilitzar els blocs de formigó. Les dimensions de les ranures són de 20 mm de profunditat per 10 mm de gruix al llarg de tota la longitud.

La composició de l'adhesiu cimentós per la present campanya fou obtinguda d'una empresa comercial (SMT). Està compost per ciments resistents als sulfats àrids seleccionats de fins a 2 mm, i additius. La resistència mitjana a compressió i a flexió és de 35,6 MPa i 7,5 MPa, respectivament.

La làmina de fibra de carboni és de dimensions $1.4 \times 10 \text{ mm}^2$, fabricat per S&P Carbon [32], amb un mòdul elàstic de 170 GPa, la resistència a tracció de 2.050 MPa, i acabat superficial llis, el que provoca una adherència mínima entre el laminat i l'adhesiu cimentós. Per tal de millorar-ne la rugositat, es va realitzar dos tipus d'acabats superficials amb sorres: una de mida màxima de la partícula de fins a 0,20 mm, anomenat "*Carga2*", i l'altre d'entre 0,60 – 0,85 mm, anomenat "*Fine Sand*". Dites partícules es van adherir a la superfície del CFRP amb una resina epoxi S&M 55, amb un temps de curat de 8 dies i una temperatura de transició vítria de 53,5 °C [33].

Es van dur a terme un seguit d'experiments per a cada configuració, tal com es mostra en la Taula 5.1, on "N/A" és l'espècimen sense tractament, "*Fine Sand*" i "*Carga2*" són els laminats amb els diferents acabats superficials definits anteriorment. Pel que fa al pretractament definit com "Laminat i substrat", és un tractament amb la mateixa sorra realitzat també en l'adhesiu cimentós.

Taula 5.1. Resum dels detalls dels assaigs [31]

| Etiqueta | Tractament del laminat | Pretractament de l'adhesiu | Número d'assaigs |
|----------|------------------------|----------------------------|------------------|
| P-NT | N/A | N/A | 1 |
| FS-TLS | <i>Fine Sand</i> | <i>Fine Sand</i> | 3 |
| C2-TLS | <i>Carga2</i> | <i>Carga2</i> | 3 |
| FS-TL | <i>Fine Sand</i> | N/A | 3 |
| C2-TL | <i>Carga2</i> | N/A | 3 |

Donat que el present projecte pretén modelar el comportament adherent d'aquest assaig, les propietats mecàniques requerides es recullen en la Taula 5.2, considerant que cadascuna de les parts treballa en la zona elàstica.

Taula 5.2. Propietats mecàniques dels materials utilitzats en l'assaig Pull-out

| Material | Mòdul elàstic (GPa) | ν |
|------------------|---------------------|-------|
| CFRP | 170 | 0,2 |
| Formigó | 25 | 0,3 |
| Adhesiu cimentós | 40 | 0,3 |

Tot i que el bloc presenta dues ranures, només es realitza l'assaig d'un laminat. És per això que es considera un bloc simplificat amb un sol reforç en els següents apartats. Dita configuració de l'assaig es mostra en la Figura 5.2 amb les dimensions

del formigó representades. D'aquest destacar la posició del FRP i la longitud adherida ($L_b = 125$ mm). Els assaigs s'han realitzat utilitzant una màquina universal de 50 kN, controlant el desplaçament en l'actuador del servo hidràulic, aplicant una velocitat de $2\mu\text{m/s}$, enregistrant la força aplicada. Tanmateix, es registra el lliscament entre el FRP i el formigó en la zona carregada ("Load-end") i la zona lliure ("Free-end").

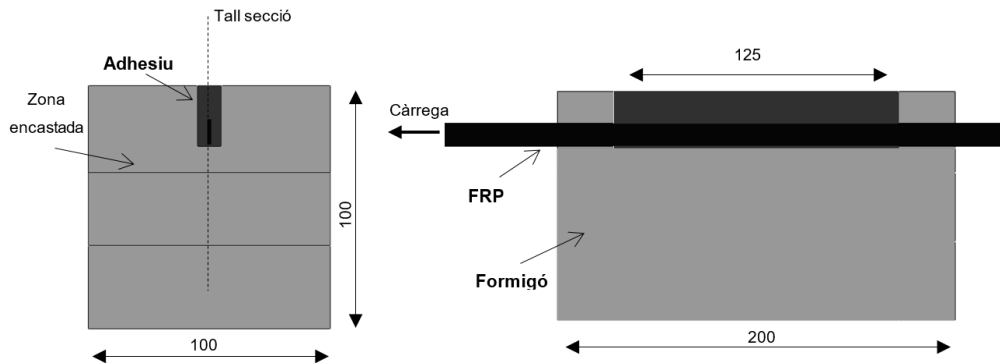


Figura 5.2. Representació esquemàtica de la posició dels materials i les condicions de contorn. Cotes en mm

Part de la informació per la realització del present treball s'ha obtingut de l'article [31], complementada per l'autor d'aquest. En la Taula 5.3 s'enumeren els valors de la força màxima assolida de cada assaig, el lliscament en l'extrem carregat i l'extrem lliure en l'instant on la càrrega és màxima, i la mitjana de la força màxima. Cada sèrie està definida per l'etiqueta segons els detalls de cadascuna, tal com s'han definit anteriorment (Taula 5.1).

Taula 5.3. Resultats de l'assaig d'adherència [31]

| Etiqueta | Força màxima de l'assaig [kN] | Lliscament en l'extrem carregat per la força màxima [mm] | Lliscament en l'extrem carregat no per la força màxima [mm] | Mitjana de la força màxima de l'assaig [kN] |
|----------|-------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| P-NT | 1,44 | 0,06 | 0,01 | 1,44 |
| | 12,64 | 0,53 | 0,04 | |
| FS-TLS | 13,64 | 0,44 | 0,07 | 13,53 |
| | 14,32 | 0,57 | 0,37 | |
| C2-TLS | 10,98 | 0,47 | 0,10 | 13,73 |
| | 13,61 | 0,54 | 0,07 | |
| FS-TL | 16,62 | 0,76 | 0,11 | 14,01 |
| | 10,99 | 0,52 | 0,09 | |
| | 14,72 | 0,43 | 0,10 | |
| | 16,32 | 0,61 | 0,05 | |

| Etiqueta | Força màxima de l'assaig [kN] | Lliscament en l'extrem carregat per la força màxima [mm] | Lliscament en l'extrem carregat no per la força màxima [mm] | Mitjana de la força màxima de l'assaig [kN] |
|----------|-------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| | 14,06 | 0,56 | 0,03 | |
| C2-TL | 17,64 | 0,68 | 0,14 | 16,90 |
| | 19,01 | 0,73 | 0,24 | |

En la Figura 5.3 es pot observar la corba força-lliscament de la mitjana de cada assaig. En aquests, l'extracció del laminat va ser net, sense partícules de sorra adherida en la capa superficial, i tampoc sense trencament en cap dels tres elements (CFRP, adhesiu i formigó).

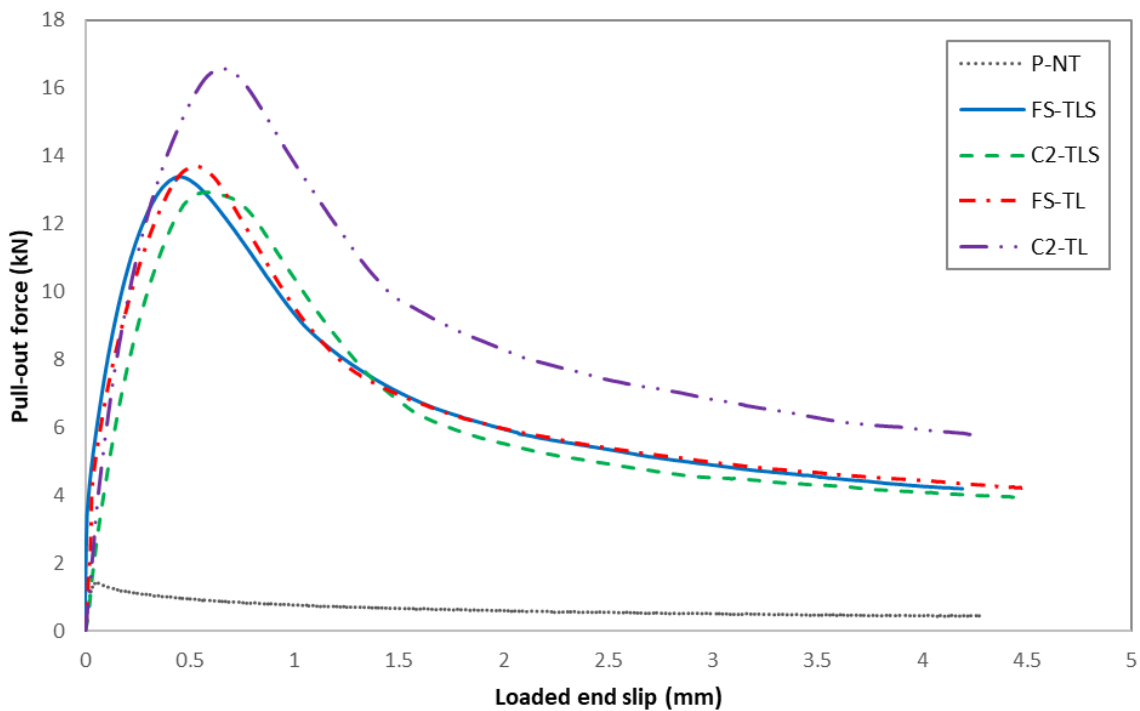


Figura 5.3. Força - lliscament en l'extrem carregat pels diferents assaigs

5.2 Proposta de model analític

5.2.1 Llei local teòrica d'adherència-lliscament

Previ a definir la llei d'adherència-lliscament, es mostrarà l'equació que governa el sistema.

L'equilibri de tensions en una longitud infinitesimal dx entre el FRP i el formigó es mostra en la Figura 5.4 (a), i l'equilibri de forces en la interfase entre el FRP i l'adhesiu en la Figura 5.4 (b). A partir d'aquest equilibri s'obté l'equació (5) i (6).

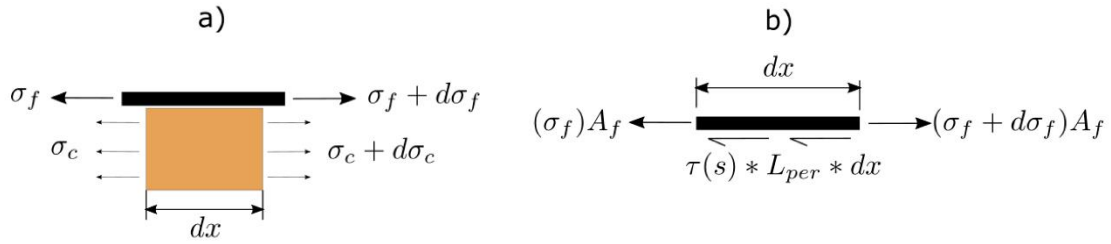


Figura 5.4. a) Equilibri de tensions entre el formigó i el FRP. b) Equilibri de forces en la interfase FRP-adhesiu [34]

$$A_f \cdot d\sigma_f + A_c \cdot d\sigma_c = 0, \quad (5)$$

$$A_f \cdot d\sigma_f - \tau(s) \cdot L_{per} \cdot dx = 0, \quad (6)$$

ordenant els termes:

$$\frac{d\sigma_f}{dx} - \frac{\tau(s) \cdot L_{per}}{A_f} = 0, \quad (6).a$$

on σ_f i σ_c és la tensió del FRP i del formigó, respectivament, A_f és l'àrea transversal del FRP calculada com el producte de la seva espessor (t_f) per l'amplada (w_f), A_c és l'àrea transversal del formigó, $\tau(s)$ és la llei local d'adherència-lliscament, i L_{per} és el perímetre del reforç ([34], [35]). Si sumem l'equació (5) i (6) es pot obtenir la següent expressió:

$$\frac{d\sigma_c}{dx} + \frac{\tau(s) \cdot L_{per}}{A_c} = 0. \quad (7)$$

D'altra banda, el lliscament es pot definir com el desplaçament relatiu entre el FRP i el ciment,

$$s = u_f - u_c, \quad (8)$$

on s és el lliscament, u_f i u_c és el desplaçament del FRP i del formigó, respectivament. Considerant el comportament lineal del reforç i del formigó, es pot considerar que

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c}, \quad (10)$$

on ε_f i ε_c és la deformació unitària, i E_f i E_c és el mòdul de Young del FRP i del formigó, respectivament. Per definició, la deformació unitària es pot definir com

$$\varepsilon_f = \frac{du_f}{dx}, \quad (11)$$

$$\varepsilon_c = \frac{du_c}{dx}. \quad (12)$$

Per tant, la derivada del lliscament per una posició infinitesimal i l'equació constitutiva dels elements, respectivament, se n'obtenen les següents expressions:

$$\frac{ds}{dx} = \varepsilon_f - \varepsilon_c = \frac{\sigma_f}{E_f} - \frac{\sigma_c}{E_c}, \quad (13)$$

$$\frac{d^2s}{dx^2} = \frac{1}{E_f} \cdot \frac{d\sigma_f}{dx} - \frac{1}{E_c} \frac{d\sigma_c}{dx} \quad (14)$$

Si substituïm les equacions (6).a i (7) en l'equació (14), s'obté l'equació diferencial que governa el comportament d'adherència-lliscament:

$$\frac{d^2s}{dx^2} = \tau(s) \cdot L_{per} \cdot \left(\frac{1}{E_f \cdot A_f} - \frac{1}{E_c \cdot A_c} \right), \quad (15)$$

Negligint el terme del formigó, ja que es considera molt inferior al del reforç [1], [28], [34], l'equació simplificada és:

$$\frac{d^2s}{dx^2} = \tau(s) \cdot \frac{L_{per}}{E_f \cdot A_f}, \quad (16)$$

Un cop definit l'equació diferencial que governa el comportament d'adherència-lliscament, es mostrarà la formulació de diversos models estudiats per la bibliografia de la llei d'unió per la interfase entre el FRP i el formigó ($\tau - s$). Aquesta és la relació entre l'esforç tallant de la unió respecte al lliscament entre el FRP i formigó.

5.2.2 Modelització analítica del comportament instantani

S’ha implementat un procediment numèric per tal de resoldre l’equació diferencial exposada en l’apartat anterior, i obtenir-ne el comportament instantani de la unió amb el programari Matlab®. El procediment resol l’equació diferencial governant del sistema (eq. (15)) a partir d’un procediment iteratiu basat en un model de diferències finites, i permet modificar-ne els diferents models de lleis adherència – lliscament.

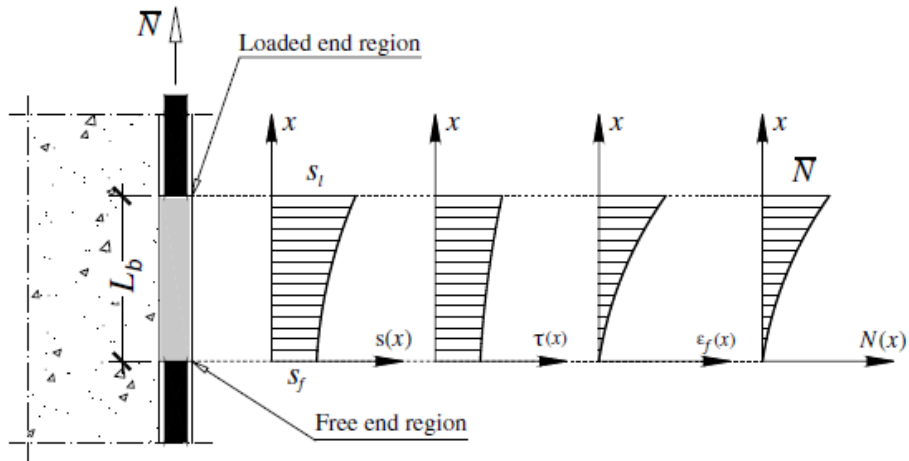


Figura 5.5. Paràmetres implicats en la resolució del mètode analític [28]

En la Figura 5.5 es representa l’adherència del reforç de formigó amb FRP per una longitud d’ancoratge conegut (L_b) per un assaig concret. Alhora mostra la distribució dels paràmetres implicats al llarg d’aquesta longitud. Aquests paràmetres són: el lliscament (s), la tensió tallant (τ), la deformació unitària de l’FRP (ϵ_f) i la força capturada durant l’assaig (N). La zona on s’aplica la força es defineix com la zona d’aplicació de la càrrega. D’altra banda, l’extrem oposat es defineix com extrem lliure.

Cadascun dels models de la llei d’adherència-lliscament, tal com s’ha observat en la Taula 4.4, té diferents coeficients associats que ajusten la llei al comportament experimental. D’aquest s’obtenen les corbes càrrega – lliscament i tensió tallant – lliscament. Al llarg de la longitud d’unió, els valors als extrems d’aquests són:

$$x = 0 \rightarrow \begin{cases} s = s_f \\ P = 0 \\ \epsilon_f = 0 \end{cases} ; \quad x = L_b \rightarrow \begin{cases} s = s_l \\ P = \bar{P} \\ \epsilon_f = \bar{P}/(E_f \cdot A_f) \end{cases} \quad (17)$$

on s_f i s_l són el lliscament a l’extrem lliure i a l’extrem carregat, respectivament. \bar{P} representa la força obtinguda per cada iteració.

Tal com s'ha explicat anteriorment, es resol a partir del mètode de les diferències finites, discretitzant la longitud adherida en n increments uniformes de longitud $\Delta x = L_b/n$. L'increment està delimitat per $n + 1$ punts, on la posició està definida per $x_i = i \cdot \Delta x$ ($i = 0, 1, \dots, n$). El procediment es basa en una metodologia d'incrementar el lliscament, pretenent simular l'assaig experimental sota una càrrega situada a l'extrem. S'inicia per la zona carregada (punt 0) fins a la zona lliure (punt n) de la Figura 5.6. En cada tram discretitzat es calcula el lliscament i la força transmesa pel FRP entre els trams adjacents. Per un valor de lliscament en la zona carregada, es realitza un procés iteratiu en el qual $P(j, 1)$ és el valor inferior de la zona carregada per una iteració j . La força obtinguda s'utilitza per calcular la corresponent deformació unitària del FRP (ε_f) i del formigó (ε_c), i la tensió tallant utilitzant la llei local desitjada. L'equació per una iteració j , la càrrega en el punt i , es calcula utilitzant l'equació

$$P(j, i) = P(j, i - 1) - \tau(j, i - 1) \cdot L_{per} \cdot \Delta x \quad (18)$$

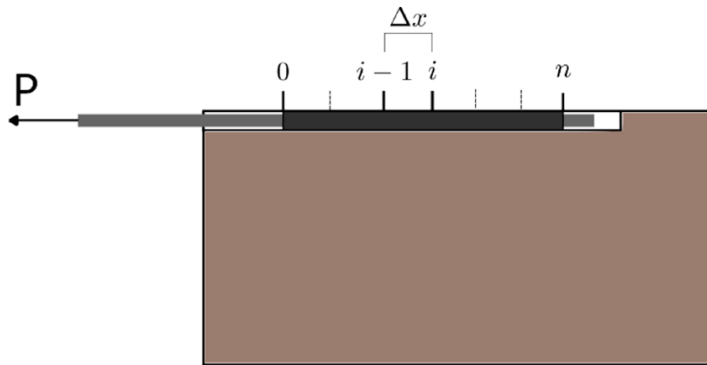


Figura 5.6. Esquema de la discretització en el FRP [34]

Per cada càrrega obtinguda a partir de l'equació (18), s'obté la deformació unitària del formigó i del FRP, posteriorment és possible obtenir el perfil del lliscament amb l'expressió

$$s(j, i) = s(j, i - 1) - (\varepsilon_f - \varepsilon_c) \cdot \Delta x . \quad (19)$$

Amb l'objectiu d'obtenir una deformació unitària del FRP pròxima a zero en l'extrem lliure ($\varepsilon_f(j, n) \approx 0$), s'apliquen increments de la càrrega P en l'extrem carregat fins a assolir el resultat dins de la tolerància desitjada. Un cop obtingut el valor desitjat, es registra la càrrega corresponent i es repeteix el procediment per un nou valor de lliscament en l'extrem carregat, expressat com $s(j + 1, 1)$. I es torna a realitzar el mateix procediment iteratiu. El primer procediment finalitza quan s'han obtingut tots els punts

de la corba càrrega – lliscament. A continuació es procedeix al següent procediment: en funció de la llei d'adherència – lliscament utilitzada, el nombre de paràmetres varia

Per tant, el procediment seguit en el codi és:

1. Es defineix la llei local utilitzada amb el rang de paràmetres utilitzats per a cada coeficient.
2. S'inicia el procés amb els primers valors parametritzats segons la llei estimada.
3. Es defineix el lliscament i la força en el punt més proper a la càrrega.
4. Es calcula el perfil de força al llarg de FRP en la zona adherida utilitzant la llei adherència – lliscament desitjada.
5. Alhora, es calcula la deformació unitària del FRP i del formigó.
6. Al final de la iteració, és a dir, a l'extrem de la zona adherida i on no hi ha càrrega aplicada, es compara amb un valor de tolerància desitjat pròxim a zero (inferior l'1%). Si l'elongació en l'extrem final està dins aquesta tolerància, la iteració finalitza i el lliscament en la zona carregada augmenta per obtenir una nova combinació de valors càrrega – lliscament. En cas que no s'assoleixi el valor, modifiquem la càrrega aplicada fins a complir-ne la condició.
7. El procediment finalitza fins a haver recorregut tots els valors de lliscament obtinguts experimentalment.

En la Figura 5.7 es pot observar el diagrama de flux de la metodologia de càlcul emprada de l'algorisme per tal d'aconseguir-ne la resposta instantània de la unió.

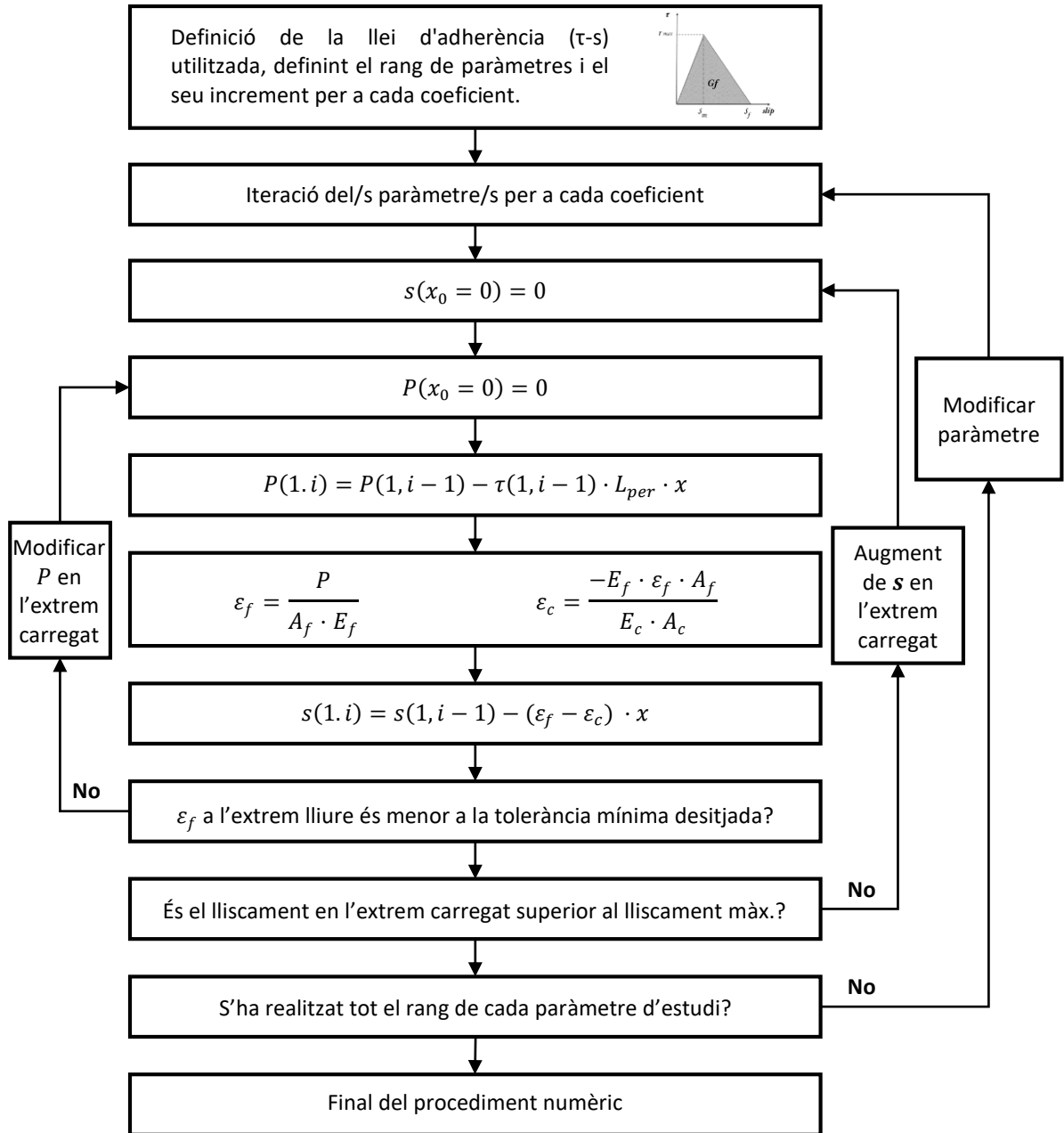


Figura 5.7. Diagrama de flux de la modelització numèrica per calcular el comportament instantani de la unió

Un cop obtingut els valors per a totes les combinacions, es procedeix a iniciar el segon bloc. En aquest és calcular l'error entre el resultat analític i l'experimental per mínims quadrats. D'aquí es determina el valor d'error mínim com el resultat òptim, a partir de la següent expressió:

$$\text{Òptim}_{MSE} = \min \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (P_{a,i} - P_e)^2 \right), \quad (20)$$

on n és la discretització de la longitud adherida, $P_{a,i}$ la força obtinguda analíticament, i P_e és la força experimental. Aquest mètode és l'error per mínims quadrats a partir del mètode MSE (en anglès, *Mean Square Error*). Tot i que, per tal de quantificar aquest error en percentatge es fa ús de l'error absolut en percentatge mitjà (MAPE: *Mean Absolute Percentatge Error*), tal com es defineix en la següent expressió:

$$Error_{MAPE} (\%) = \left(\frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|P_e - P_{a,i}|}{P_e} \right), \quad (21)$$

Val a dir que, per raons de la gran diferència en la llei bilineal amb el resultat obtingut, el valor de n no s'aplica en la totalitat de la longitud adherida, tal com s'observa en la Figura 5.8, on el tram de fricció en aquesta llei és inexistent, com s'ha explicat anteriorment.

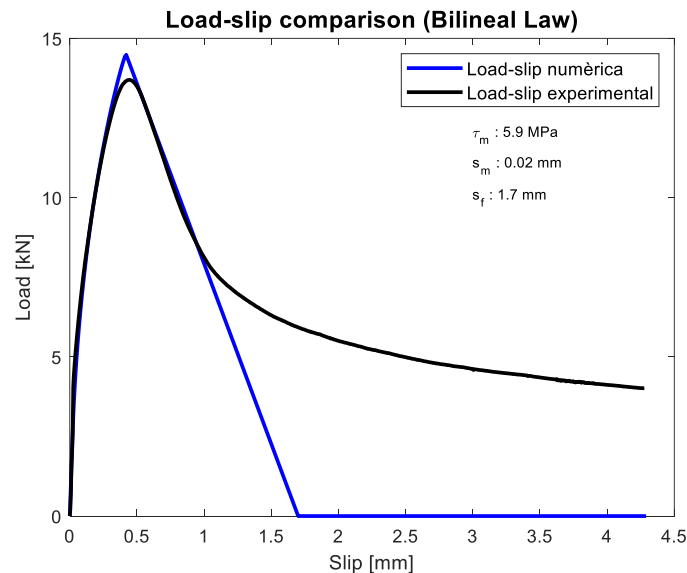


Figura 5.8. Comparativa entre el resultat experimental i analític per la llei bilineal

En el cas particular d'aquest model, per obtenir el valor òptim s'ha optat per buscar la posició on s'obté el valor màxim, i es considera el punt central de la comparativa, per tant, la comparativa continuarà fins al punt situat dues vegades el punt màxim. Per tal de donar valors a l'exemple de la Figura 5.8, la força màxima es troba en la coordenada 43, obtenint una discretització de n valors fins a 86.

Finalment, es calcula l'error associat entre la diferència d'àrees per tal de quantificar la diferència entre aquests. Aquesta s'obté a partir de la funció de Matlab®

“Trapz”, la qual realitza una integració numèrica a partir de mètode trapezoïdal. L'expressió utilitzada es descriu a continuació:

$$Error (\%) = \frac{|Àrea_{exp} - Àrea_{analítica}|}{Àrea_{exp}} \cdot 100 \quad (22)$$

De la mateixa manera que s'ha reduït les iteracions en la llei bilineal pel càlcul de la l'error, cal dir que pel càlcul de l'àrea s'ha optat per la mateixa metodologia.

5.2.3 Llei d'adherència – lliscament utilitzada

Al transcurs del present projecte, es va iniciar la resolució del sistema per la llei bilineal a partir del mètode de diferències finites, tal com s'ha exposat anteriorment, donada la senzillesa a l'hora d'implementar la llei. En aquest procés inicial, es va desenvolupar un codi de Matlab® on només parametrizava 1 coeficient de 3 existents per aquesta llei (tals coeficients són: τ_m , s_m i s_f). Per tant, es fixaven dos valors i el tercer s'aplicava un rang de valors estimats. D'aquesta resolució s'obtenia l'òptim del coeficient parametriztat.

Aquest procés permetia tenir un resultat aproximat, però es basava en un assaig de prova i error, amb la necessitat de generar nombres aleatoris fins a trobar una combinació òptima. Això requeria un temps elevat, ja que requeria la participació activa de l'usuari per modificar els valors. És per això que el següent pas fou augmentar els coeficients a parametritzar, fins a poder parametritzar la totalitat dels coeficients. D'aquesta manera, introduint el rang de valors desitjat, i el pas entre aquest, el codi permet aconseguir el valor òptim de cada coeficient.

La metodologia emprada és començar per un rang de valors possibles, sovint amb l'ajuda de la bibliografia o amb els valors dels resultats experimentals, per tal de definir els intervals, i amb un pas vast (sovint 0,1) entre aquests valors assolint-ne un primer resultat aproximat. El mateix codi mostra la resposta força-lliscament obtinguda analíticament i la de l'assaig, per tal de comparar-les visualment. Això permet veure si el rang de valors introduït inicialment és el correcte. En el cas que s'hagi ajustat bé, es procedeix a reduir el rang i el pas per tal d'obtenir més detall de la resposta.

En el present projecte, les lleis utilitzades pel model analític són: la llei bilineal amb 3 coeficients (τ_{max} , s_m i s_f) de l'equació (2); la llei no lineal amb 4 coeficients (τ_{max} , s_m ,

α i α') de l'equació (3); i la llei no lineal modificada amb 5 coeficients (τ_{max} , s_m , α , α' i s_1) de l'equació (4). Recordar i fer esmena en la diferència entre els coeficients α' de les dues lleis no lineals, ja que en el cas de la primera els valors són negatius, a diferència de la llei modificada, que els valors són superiors a zero. Cal dir que el fet d'afegir paràmetres, el codi amplia la dimensió de la matriu "Força" fins a $m + 1$ dimensions, sent m el nombre de coeficients; és a dir, per la primera llei on hi ha 3 coeficients, la matriu "Força" tindrà una dimensió de 4. En la Taula 5.4 s'exposen de nou les equacions emprades. Es testejarà el codi, i s'obtidran els coeficients òptims per a cada assaig.

Taula 5.4. Lleis d'adherència-lliscament utilitzats

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

5.3 Proposta model numèric

5.3.1 Model d'element finits

En primer lloc, s'ha creat un conjunt tridimensional amb el programari Abaqus® per tal de validar els resultats analítics a partir d'un model tridimensional d'elements finits. Donada la simetria respecte a l'eix vertical, s'ha optat per simplificar el model (Figura 5.9), i així reduir el cost computacional associat al reduir-ne el nombre d'elements del mallat.

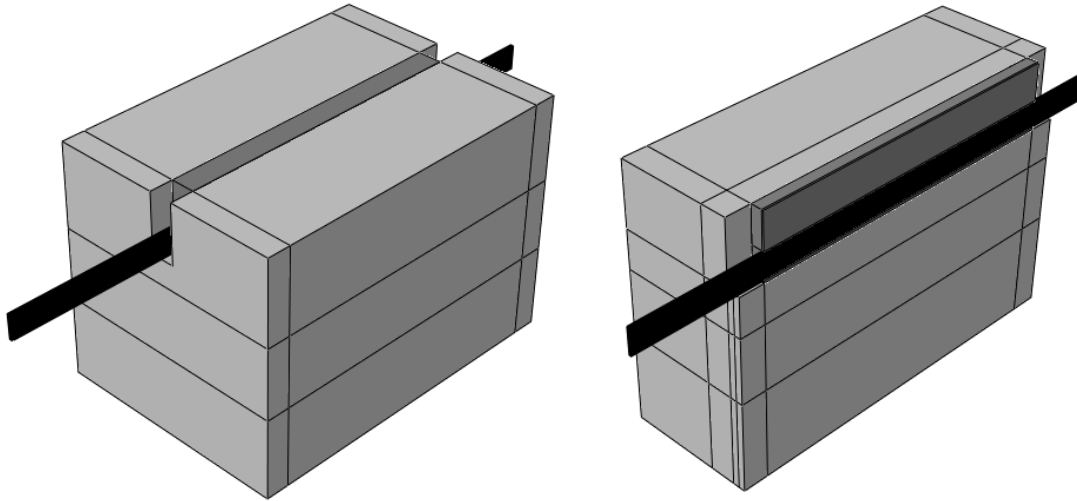


Figura 5.9. Representació del model tridimensional. Esquerra: Complet. Dreta: Simplificat simètricament

Pel que fa al mallat i les condicions de contorn aplicades es poden observar en la Figura 5.10. La mida del mallat s'ha considerat d'un mil·límetre per l'FRP i per l'adhesiu en la totalitat dels elements i, per altra banda, s'ha optat per dividir el volum del formigó i aplicar un mallat més vast (la mida és de 5 unitats) en la zona que no està en contacte amb l'adhesiu per reduir el cost computacional en la resolució del model. Es manté la relació 1:5 que proposa el programari [30].

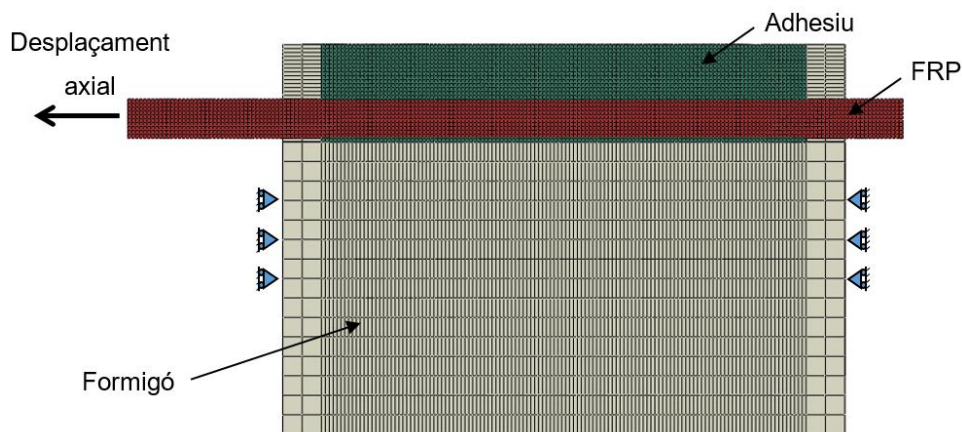


Figura 5.10. Representació del mallat i de les condicions de contorn aplicades

Això s'ha determinat així, ja que en la interfície entre el reforç i l'adhesiu es modela la zona cohesiva (CZM: "Cohesive Zone Model") per tal de modelar l'assaig d'adherència el més semblant al resultat obtingut en l'experiment. En la Figura 5.11 es mostra el detall de la interfície entre el FRP i l'adhesiu, ressaltant-la amb un color negre. Tal com s'ha explicat anteriorment, els diferents assaigs van tenir com a resultat l'extracció del reforç sense obtenir cap partícula de l'adhesiu. Els dominis dels tres elements del conjunt s'han discretitzat utilitzant elements hexaèdrics de vuit nodes amb integració reduïda (C3D8R)

[30]. L'altra interfície de contacte existent (formigó – adhesiu), s'ha modelat la restricció del tipus "Tie" en les seves respectives superfícies, ja que aquesta limita el moviment relatiu entre les dues superfícies.

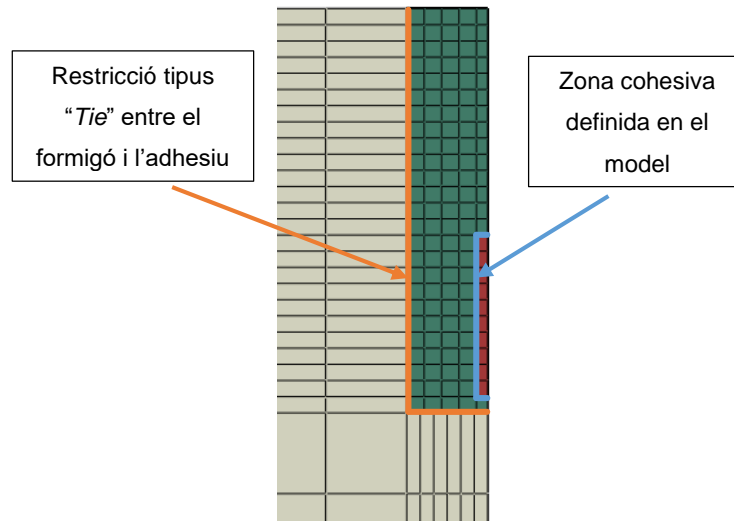


Figura 5.11. Interfície de la zona cohesiva i la interfície entre el formigó i l'adhesiu

Les condicions de contorn del sistema consisteix a aplicar un desplaçament axial en la superfície transversal del FRP (en sentit d'extracció) simulant l'extrem posterior a la zona de la mordassa, fins a un valor de 4 mm. Es bloqueja els nusos del formigó que estan en contacte amb el suport, tal com es van realitzar en l'assaig real. D'altra banda, el fet de fer el model simplificat simètric, es bloqueja en l'eix perpendicular al pla de simetria (Figura 5.12).

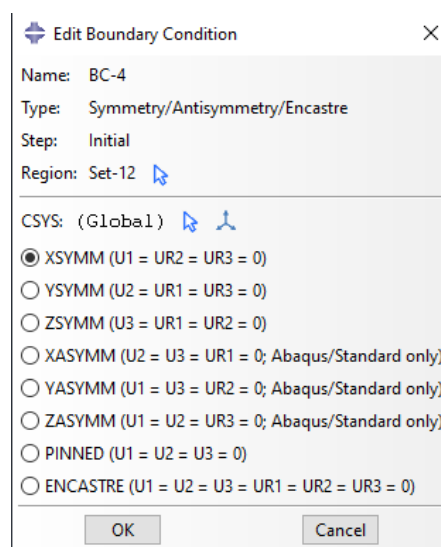


Figura 5.12. Definició de la condició de contorn per restringir el pla de simetria

Un cop definides les condicions de contorn, es procedeix a definir les arestes, superfícies o geometries que proporcionaran els resultats desitjats. El primer és la superfície transversal del CFRP en l'extrem carregat per tal d'adquirir força resultant aplicada en l'assaig. Per tal d'adquirir aquest valor s'haurà de sumar la força per cadascun dels nodes de la superfície. El següent és el desplaçament en les arestes, tant del CFRP com de l'adhesiu, que estan en contacte entre ells en l'extrem carregat per tal d'obtenir el lliscament de l'assaig. En ambdós casos es realitzarà una mitjana dels valors assolits per a cada instant de l'assaig (Figura 5.13). Finalment, s'obté la variable associada al dany en una superfície cohesiva (CSDMG: "Scalar stiffness degradation for cohesive surfaces") per tal d'observar l'evolució del dany, anat d'un valor 0 (no danyat) fins a 1 (completament danyat). Aquest últim permet verificar que la zona cohesiva pateix dany en la simulació.

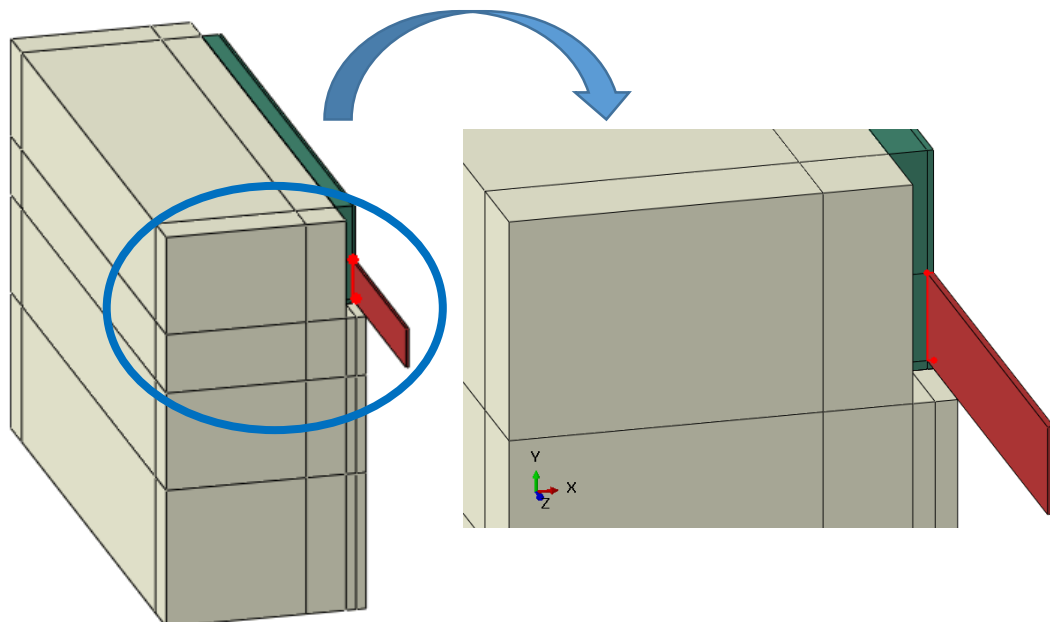


Figura 5.13. Posició de les arestes definides en el model per la lectura del desplaçament del FRP i de l'adhesiu. Esquerra: model complet. Dreta: detall

El comportament mecànic dels elements: formigó, reforç de FRP i l'adhesiu se suposen elàstics lineals isotròpics per tal de simplificar el model, tot i la condició ortotròpic que defineixen els materials compostos amb aquesta configuració. Les propietats dels materials en el model s'enumeren en la Taula 5.5, on E_L i ν , és la rigidesa i el coeficient de Poisson, respectivament.

Taula 5.5. Propietats dels materials utilitzats pel model numèric

| Material | E_L (GPa) | ν |
|------------------|-------------|-------|
| CFRP | 170 | 0,2 |
| Ciment | 25 | 0,3 |
| Adhesiu cimentós | 40 | 0,3 |

En els següents apartats es definiran les propietats definides i emprades per les superfícies cohesives del model.

5.3.2 Determinació dels paràmetres que afecten al CZM

En el present treball es proposa modelar el comportament entre la unió del FRP i de l'adhesiu com un model de zona cohesiva. Per tal de reproduir la resposta no lineal de l'estructura a causa de la separació entre ambdues capes es proposa una interfície cohesiva. Aquest es defineix com una superfície de contacte entre els dos elements i, a posteriori, s'afegeixen les propietats d'aquest contacte. A continuació s'exposa dues metodologies utilitzades en el transcurs del treball. La primera, fent ús de l'eina d'Abaqus® a l'hora de definir les propietats d'aquesta interacció a partir d'introduir paràmetres del seu comportament. La segona, especificant l'evolució del dany al llarg del lliscament. Aquestes es descriuran en els següents apartats.

Els paràmetres introduïts en el programari són: i) "*Cohesive Behavior*": on es defineix la rigidesa del comportament de tracció-separació, essent la rigidesa inicial de l'element cohesiu; ii) "*Damage*": on s'introdueix la iniciació del dany a partir de la màxima tensió nominal axial, tallant del tipus 1 i tallant del tipus 2, i l'evolució del dany. En aquest es pot implementar a partir del desplaçament o energia, i la forma de l'estovament, sigui lineal, exponencial o en forma de taula.

El model de separació disponible en el programari Abaqus® [30] assumeix la resposta inicial lineal i elàstica seguit de la iniciació i evolució del dany. Primerament, "*Cohesive Behavior*" per definir-ne la rigidesa de l'element cohesiu en la zona d'iniciació del dany; seguit per definir el dany ("*Damage*") per descriure'n l'evolució del dany (Figura 5.14).

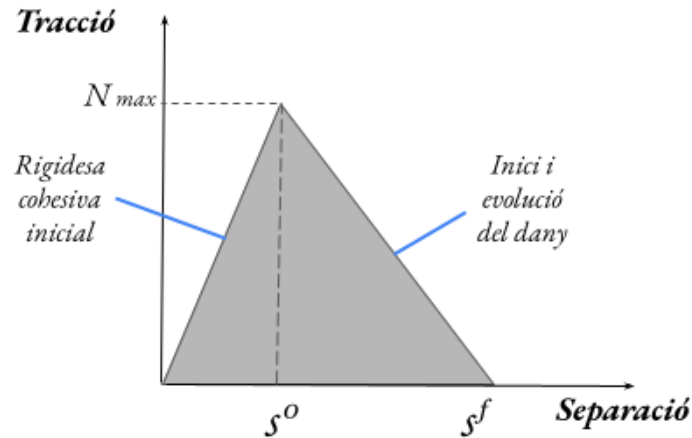


Figura 5.14. Resposta de tracció – separació per superfícies cohesives. Font: modificada [30]

Per resoldre el model numèric s'utilitzarà el programari a partir de definir el comportament de la superfície cohesiva a partir d'implementar l'evolució del dany. Cal dir que, un cop definit correctament el model: materials i propietats mecàniques, interacció entre aquests, i les condicions de contorn, el mateix programari Abaqus® permet definir l'evolució del dany de la interfície cohesiva amb diferents metodologies, com per exemple, definir l'inici del dany a partir del criteri de màxima tensió o el criteri de màxima separació, o per definir l'evolució del dany a partir del desplaçament o l'energia, o definir la branca “softening” per un model lineal, exponencial o entrant dades en forma de taula de l'evolució del dany amb el desplaçament associat. Aquest mètode de prova i error no es considera vàlid un cop obtingut un model analític previ.

Per tal de tenir coneixement del procés, s'ha optat per aquest últim, descrivint l'evolució del dany. A continuació s'exposarà la metodologia emprada.

5.3.2.1 Definició de la interfície a partir de l'evolució del dany

El mètode utilitzat en el present projecte per tal de definir el comportament de la superfície cohesiva és a partir d'implementar l'evolució del dany [36]. El model de la zona cohesiva (CZM) està disponible per elements finits en el programari Abaqus® a partir de la llei associada tracció – separació, tal com s'ha exposat anteriorment (Figura 5.14) i es representa amb l'expressió:

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = (1 - D)[K] \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix}, \quad (23)$$

on t_n , t_s i t_t corresponent la tensió normal de separació (el mode n representa la separació directa, o obertura), i les tensions tallants en dos modes diferents (el mode s

representa el tallant fora del pla, el mode t representa el tallant en el pla), respectivament. Les δ_n , δ_s i δ_t corresponen la separació (desplaçament) associats a cada respectiu mode. I per últim, el paràmetre D és la variable escalar el dany (dany isotròpic) de la superfície cohesiva, i el vector $[K]$ és la rigidesa del cohesiu.

Expressat matricialment, la llei es pot definir com:

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = (1 - D) \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix}, \quad (24)$$

Pel comportament adherent de la interfície, es considera que el mode dominant és el tallant en el pla, simplificant el model i assumint el mateix comportament constitutiu en totes les direccions, és a dir, únicament hi ha la separació tallant en el pla (δ_t). Per tant, el model es pot reescriure de forma simplificada com:

$$\tau(\delta) = (1 - D) \cdot K_T \cdot \delta, \quad (25)$$

on la tensió tallant en el pla en funció de la separació és $\tau(\delta)$, K_T és la rigidesa inicial de la interfície en el mode tallant. La variable escalar del dany (D), es pot aïllar obtenint-ne la següent expressió:

$$D(\delta) = 1 - \frac{\tau(\delta)}{K_T \delta}. \quad (26)$$

La rigidesa inicial pot variar en la forma d'obtenir-la segons la llei local d'adherència – lliscament utilitzada. En tots els casos, la rigidesa inicial es pot definir com:

$$K_T = \frac{\tau_0}{s_0}. \quad (27)$$

El cas de la llei bilineal la K_T s'obté a partir de la tensió tallant màxima ($\tau_0 = \tau_m$) obtinguda respecte al lliscament ($s_0 = s_m$) associat a aquesta tensió (Figura 5.15-a). Per les altres lleis utilitzades (llei no lineal i llei no lineal modificada), la forma inicial és semblant i, per tant, s'aplicarà el mateix criteri: es considera un tram inicial lineal per l'obtenció de la rigidesa, tal com s'observa en la Figura 5.15-b.

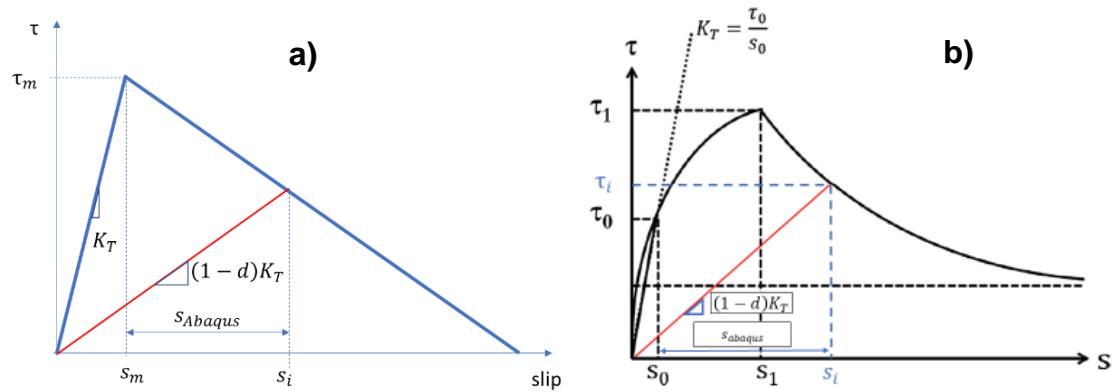


Figura 5.15. Representació esquemàtica e l'obtenció de la rigidesa inicial: a) per la llei bilineal (Font: pròpia); b) per la llei no lineal (Font: adaptada [36])

Per obtenir-ne el tram inicial lineal i elàstic de la llei local obtinguda, es considera fixar el valor de τ_0 a partir del 40% de l'esforç tallant màxim obtingut per a cada assaig. Això és a causa d'un tema merament numèric: l'alta rigidesa inicial, i definir-ne un valor inferior generava la necessitat de definir un avanç de lliscament de l'ordre inferior a les mil·lèsimes (10^{-4}). Tanmateix, l'avanç final del lliscament pel càlcul de l'evolució de la rigidesa i, per tant, l'evolució del dany és de les mil·lèsimes (10^{-3}).

En la Figura 5.15-a) es pot observar l'evolució de la rigidesa (o pendent) en funció a la separació (o desplaçament) relatiu al llarg de la llei d'adherència – lliscament. Realitzant el recorregut per tota la llei es pot obtenir l'evolució del dany respecte a la separació, per tal d'implementar-la en el codi d'Abaqus® en una taula de valors (δ_i, D_i). En la Figura 5.16 es mostra un exemple de l'evolució del dany a partir de la llei analítica no lineal, on τ_m mostrada és la tensió tallant màxima aconseguida per aquest exemple concret. Es pot observar el punt d'inici del dany, el qual comença posteriorment a la branca elàstica definida.

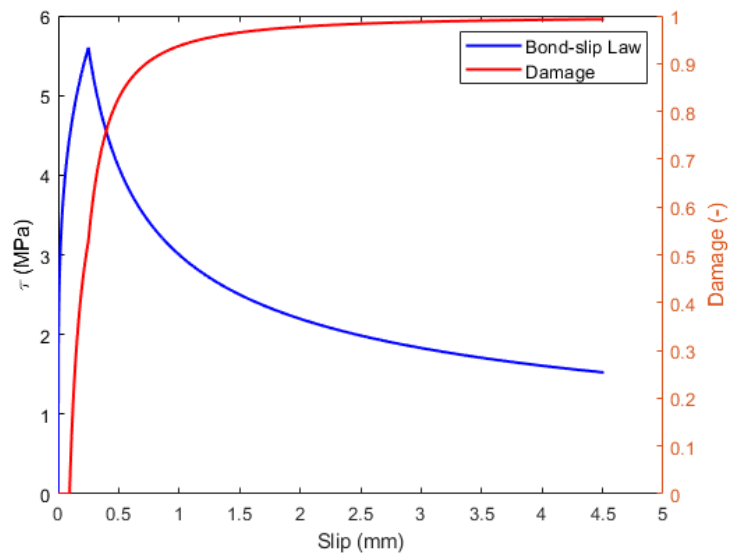


Figura 5.16. Exemple de l'evolució del dany per una llei d'adherència obtinguda analíticament

Per tal d'optimitzar el cost computacional i alhora tenir un resultat fiable, el pas definit anteriorment (10^{-3} mil·límetres de pas) serà implementat fins a un valor posterior a la tensió màxima de la llei local obtinguda. Un cop implementat i resolt el model pels diferents assaigs, es compararà el resultat numèric amb l'assaig real.

6 RESULTATS I DISCUSSIÓ

En el present capítol es resol analíticament el comportament global del sistema a partir de la llei local d'adherència – lliscament a partir de diferències finites per diferents lleis existents, i es comparen entre elles. La resolució s'obté a partir de la parametrització dels coeficients per cadascuna de les lleis conegudes, i s'obtenen els paràmetres òptims com a resultat de comparar-lo amb les dades de l'assaig experimental. D'altra banda, es realitza la resolució numèrica a partir d'elements finits un cop coneguts els coeficients del model analític. L'anàlisi analítica i numèrica de l'assaig sense tractament i pretractament queda descartat pel baix rendiment d'aquest.

6.1 Model analític

Per a cada configuració d'assaig experimental s'han comparat els resultats per diferents models de llei local d'adherència – lliscament, obtenint els coeficients de cada model.

Els gràfics de la Figura 6.1 comparen les corbes força – lliscament experimentals (línies contínues) obtingudes en l'assaig d'adherència directa per blocs de formigó reforçats amb CFRP, amb la resolució analítica (línies discontinües) per a cada model utilitzat: color taronja per la llei bilineal (B-L), color blau per la llei no lineal (N-L), i color groc per la llei no lineal modificada (N-LM). Per fer-ne un recordatori, els diferents assaigs s'etiqueten de la següent manera: es defineixen segons el tractament del reforç segons la mida màxima de la partícula, l'anomenat "*Carga2*" (C2) de fins a 0,2 mm, i l'altre d'entre 0,6 – 0,85 mm, anomenat "*Fine Sand*"(FS). D'altra banda, el pretractament realitzat en la ranura està descrit amb "*TLS*", i sense pretractament amb l'etiqueta "*TL*".

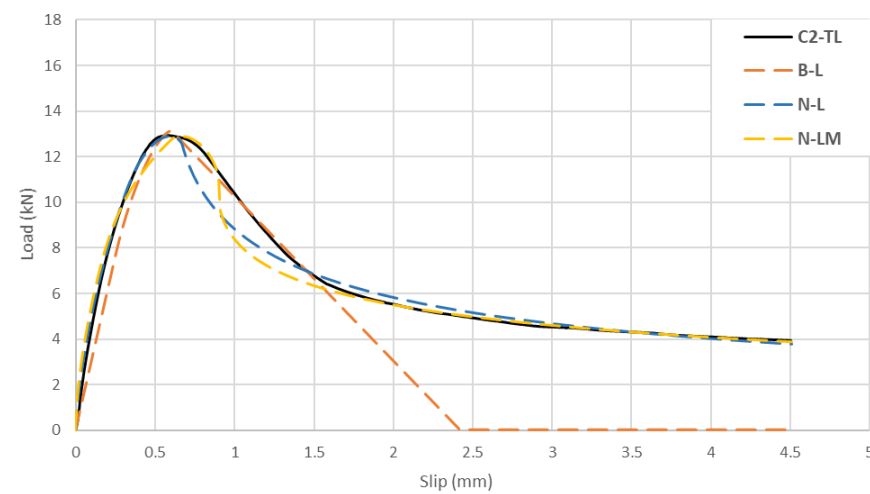
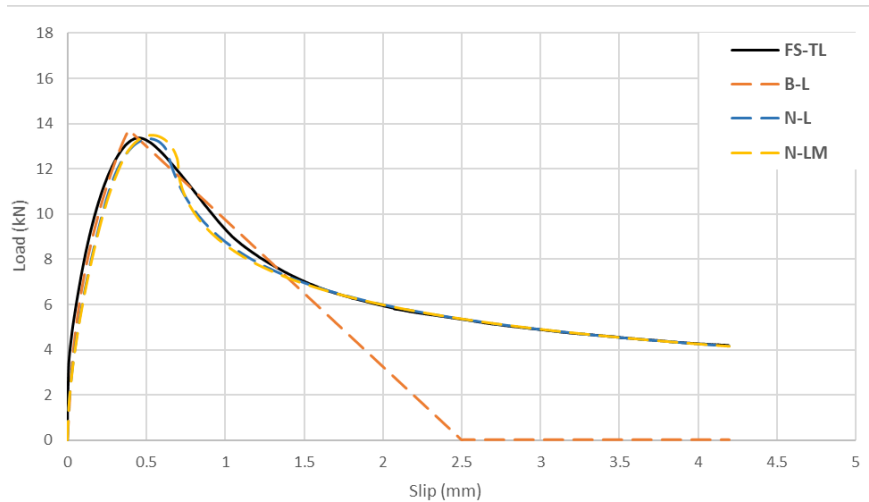
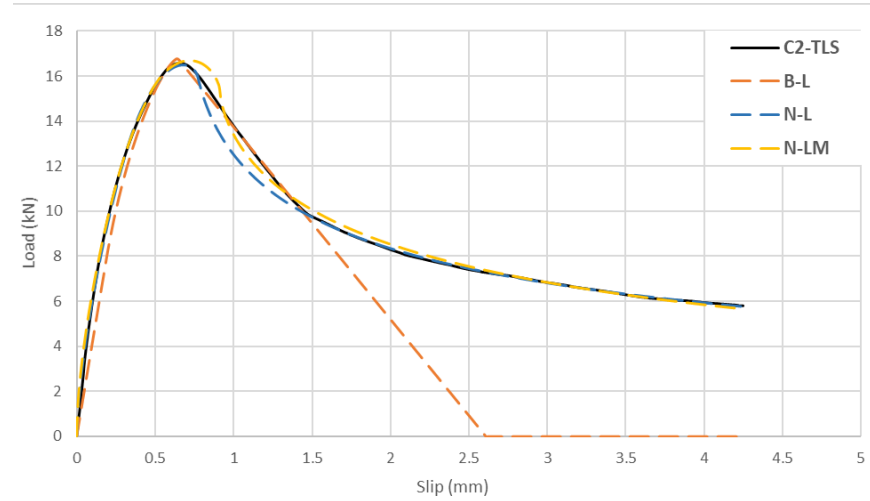
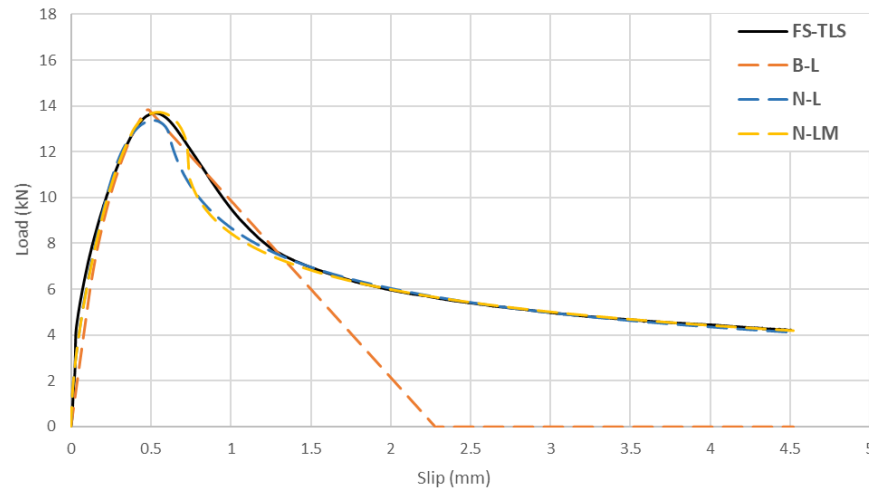


Figura 6.1. Comparativa entre els diferents resultats experimentals i la resposta analítica de cada llei d'adherència – lliscament utilitzada. Assaigs experimentals (negre continu). B-L: llei bilineal (taronja discontinu). N-L: llei no lineal (blau discontinu). N-LM: llei no lineal modificada (groc discontinu)

En la Taula 6.1 es mostra un resum dels coeficients obtinguts, on τ_m és la tensió tallant màxima, s_m és el lliscament associat a aquesta tensió tallant, s_f és el lliscament màxim previ a la fractura per la llei bilineal, α i α' són paràmetres de forma dels models no lineals, i per últim, s_1 és un coeficient de la llei no lineal modificada. En aquesta es mostra l'error obtingut pel mètode *MAPE* i, d'altra banda, es calcula la diferència d'àrees per definir l'error associat a les diferents corbes.

Taula 6.1. Resum dels coeficients obtinguts en la resolució analítica

| Etiqueta | Model | τ_m (MPa) | s_m (mm) | s_f (mm) | α (-) | α' (-) | s_1 (mm) | Error <i>MAPE</i> (%) | Error àrea (%) |
|-----------------|------------|-------------------|---------------|---------------|-----------------|------------------|---------------|-----------------------------|----------------------|
| <i>FS – TLS</i> | Bilineal | 5,5 | 0,11 | 2,28 | -- | -- | -- | 7,51 | 4,17 |
| | No lineal | 5,6 | 0,25 | -- | 0,23 | -0,45 | -- | 2,80 | 2,61 |
| | No L. Mod. | 5,9 | 0,39 | -- | 0,22 | 0,53 | 0,59 | 2,54 | 2,21 |
| <i>C2 – TLS</i> | Bilineal | 6,7 | 0,19 | 2,61 | -- | -- | -- | 5,88 | 3,12 |
| | No lineal | 7 | 0,32 | -- | 0,34 | -0,46 | -- | 2,22 | 1,02 |
| | No L. Mod. | 6,9 | 0,56 | -- | 0,23 | 0,58 | 0,92 | 2,49 | 0,21 |
| <i>FS – TL</i> | Bilineal | 5,4 | 0,04 | 2,50 | -- | -- | -- | 5,45 | 3,10 |
| | No lineal | 5,5 | 0,28 | -- | 0,19 | -0,47 | -- | 2,59 | 2,61 |
| | No L. Mod. | 5,7 | 0,36 | -- | 0,2 | 0,61 | 0,75 | 3,02 | 2,65 |
| <i>C2 – TL</i> | Bilineal | 5,2 | 0,25 | 2,42 | -- | -- | -- | 7,95 | 5,15 |
| | No lineal | 5,4 | 0,32 | -- | 0,39 | -0,51 | -- | 5,33 | 1,27 |
| | No L. Mod. | 5,3 | 0,61 | -- | 0,22 | 0,48 | 0,5 | 5,12 | 2,51 |

L'assaig definit com a *C2-TLS* ha sigut el que menys error de cadascun dels models ha tingut. La comparativa dels models analítics amb les dades experimentals mostra una resposta satisfactòria de la resposta global de sistema pels models no lineals, excepte en l'assaig *C2-TL*, el qual s'ha obtingut el pitjor model analític de tots.

El rang de valors resultants del coeficient s_m ha sigut entre (0,04 : 0,61). Aquest valor mínim s'ha assolit per una llei bilineal, la qual es podria considerar una llei lineal i descendent, ja que el lliscament on la tensió és màxima és gairebé zero.

L'error relatiu de les corbes experimentals i analítiques s'ha obtingut a partir de la diferència entre aquests, en valor absolut, respecte a la corba analítica. Els resultats de cada sèrie es consideren acceptables, obtenint-ne valors per sota del 3% en el cas de les lleis no lineals, excepte a l'última sèrie el qual s'obtenen valors superiors al 5%, on

s'observa una diferència significativa en el gràfic. D'altra banda, l'error obtingut pel mètode de l'àrea, s'obtenen resultats inferiors a 3% en totes les lleis no lineals.

Pel que fa a les lleis lineals, els resultats són lleugerament millorables, tot i que, donada la simplicitat de la llei, s'han obtingut uns bons resultats. Cal recordar que l'error obtingut per la llei bilineal ha sigut fins a al punt del càlcul de l'òptim, és a dir, fins un lliscament situat dues vegades on se situa el lliscament màxim.

En la Taula 6.2 és mostra un resum de la mitjana, valor mínim, màxim i el coeficient de variació obtinguts en la modelització analítica dels diferents coeficients per a cada model.

Taula 6.2. Resum de la mitjana, valor màxim, mínim i la coeficient de variació per a cada model

| Valors | Model | τ_m (MPa) | s_m (mm) | s_f (mm) | α (-) | α' (-) | s_1 (mm) |
|---------|------------|-------------------|---------------|---------------|-----------------|------------------|---------------|
| Mitjana | Bilineal | 5,7 | 0,15 | 2,45 | -- | -- | -- |
| | No lineal | 5,86 | 0,29 | -- | 0,29 | -0,47 | -- |
| | No L. Mod. | 5,95 | 0,48 | -- | 0,22 | 0,55 | 0,69 |
| Mínim | Bilineal | 5,2 | 0,04 | 2,28 | -- | -- | -- |
| | No lineal | 5,4 | 0,25 | -- | 0,19 | -0,51 | -- |
| | No L. Mod. | 5,3 | 0,36 | -- | 0,2 | 0,48 | 0,5 |
| Màxim | Bilineal | 6,7 | 0,25 | 2,61 | -- | -- | -- |
| | No lineal | 7 | 0,32 | -- | 0,39 | -0,45 | -- |
| | No L. Mod. | 6,9 | 0,61 | -- | 0,23 | 0,61 | 0,92 |
| COV (%) | Bilineal | 11,9 | 62,2 | 5,6 | -- | -- | -- |
| | No lineal | 12,8 | 11,6 | -- | 32,4 | 5,6 | -- |
| | No L. Mod. | 11,4 | 25,7 | -- | 5,8 | 10,4 | 26,8 |

Pel que fa a la tensió tallant màxima obtinguda, la tendència és obtenir-ne el valor més baix per una llei bilineal. D'altra banda, les dues lleis no lineals comparteixen el nombre total de valors màxims per a cada assaig: per la llei no lineal, ambdós assaigs amb la sorra C2 han obtingut el valor màxim, i per contra, els experiments amb la sorra fina (FS) s'han obtingut valors màxims per la llei no lineal modificada.

Per tal de comparar-ne valors amb l'adhesiu epoxi, més comunament utilitzat, la Taula 6.3 mostra el valor mitjà de la força màxima obtinguda durant els assaigs ($\overline{P_{u,exp}}$), de l'esforç tallant màxim ($\overline{\tau_m}$) per una llei bilineal [18], i llei no lineal [28], respectivament.

Les dades mostrades són d'assaigs *Pull-out* de blocs de formigó reforçats amb CFRP ($1,4 \times 10 \text{ mm}^2$) per la tècnica NSM amb un adhesiu epoxi.

Taula 6.3. Resum de la mitjana de la força i la tensió tallant obtinguda en assaig d'adherència amb resines epoxis

| Llei d'adherència | $\overline{P_{u,exp}}$ (kN) | $\overline{\tau_{m\grave{a}x}}$ (MPa) | Referència |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| Bilineal | 32,9 | 10,8 | [18] |
| No lineal | - | 19,81 | [28] |

Un cop modelat analíticament els diferents assaigs, les lleis d'adherència – lliscament obtingudes es poden implementar en el model numèric de la zona cohesiva descrit anteriorment en l'apartat 5.3.2.

6.2 Model numèric

S'ha implementat la resposta del model analític en el model d'elements finits per tal de verificar-lo a partir de l'evolució del dany. Pel que fa a la definició del dany, es defineix el tram inicial, en primer lloc, i a posterior l'evolució d'aquest. Pel que fa a la iniciació del dany, s'introdueix l'esforç màxim del model: tensió normal (σ [MPa]), tensió tallant tipus 1 (τ_1 [MPa]), i tensió tallant tipus 2 (τ_2 [MPa]). Per simplificar el model se suposen que tots ells tenen el mateix valor. D'altra banda, en l'evolució del dany es defineix el total de desplaçament en la zona plàstica, és a dir, després de la iniciació de la fractura, i un coeficient exponencial, ja que s'ha definit que la forma sigui aquesta.

En la Taula 6.4 es mostra el resum de resultats obtinguts de l'anàlisi analític, τ_m i s_m , essent la tensió tallant màxima i el lliscament màxim associat a aquesta tensió, respectivament, per a cada llei local utilitzada i per a cada tipus d'assaig. Tanmateix, es mostra els mateixos paràmetres assumint un comportament lineal i elàstic inicial (τ_0 i s_0) per tal de poder calcular l'evolució del dany. Recordar que pel cas de la llei bilineal, la branca ja és lineal, per tant, no cal fer-ne un tractament previ pel seu càlcul.

Taula 6.4. Resum dels valors màxims obtinguts en el model analític, subíndex "m", i valors considerant comportament lineal, subíndex "0"

| Etiqueta | Model | τ_m (MPa) | s_m (mm) | τ_0 (MPa) | s_0 (mm) |
|----------|----------------|----------------|------------|----------------|-------------------|
| | Bilineal | 5,5 | 0,11 | 5,5 | 0,11 |
| FS-TLS | No lineal | 5,6 | 0,25 | 2,2 | $4 \cdot 10^{-3}$ |
| | No lineal mod. | 5,9 | 0,39 | 2,3 | $5 \cdot 10^{-3}$ |

| Etiqueta | Model | τ_m (MPa) | s_m (mm) | τ_0 (MPa) | s_0 (mm) |
|----------|----------------|----------------|------------|----------------|---------------------|
| C2-TLS | Bilineal | 6,7 | 0,19 | 6,7 | 0,19 |
| | No lineal | 7 | 0,32 | 2,7 | $2,1 \cdot 10^{-2}$ |
| | No lineal mod. | 6,9 | 0,56 | 2,6 | $9 \cdot 10^{-3}$ |
| FS-TL | Bilineal | 5,4 | 0,04 | 5,4 | 0,04 |
| | No lineal | 5,5 | 0,28 | 1,9 | $1 \cdot 10^{-3}$ |
| | No lineal mod. | 5,7 | 0,36 | 2,2 | $3 \cdot 10^{-3}$ |
| C2-TL | Bilineal | 5,2 | 0,25 | 5,2 | 0,25 |
| | No lineal | 5,4 | 0,32 | 2,2 | $3 \cdot 10^{-2}$ |
| | No lineal mod. | 5,3 | 0,61 | 2,1 | $8 \cdot 10^{-3}$ |

Per obtenir-ne el valor del tallant en la zona lineal, s'ha realitzat a partir de fixar el pas del lliscament, i calculant-ne la tensió per aquest lliscament conegut. És per això que alguns valors no representen exactament el 40% del valor màxim, tal com s'ha descrit en la metodologia. Amb aquests valors es pot calcular-ne l'evolució del dany per a cada espècimen i llei aplicada.

Prèviament a obtenir les corbes obtingudes, cal verificar en els resultats el paràmetre *CSDMG* descrit en apartats anteriors per tal de confirmar l'evolució del dany en la superfície cohesiva definida del model. L'exemple presentat s'ha aconseguit de l'assaig amb l'etiqueta "FS-TLS", per la llei no lineal. En la Figura 6.2 es representa la corba força-lliscament amb els punts que en la Figura 6.3 s'utilitzaran per mostrar la superfície cohesiva de l'adhesiu en tres instants: a) estat inicial de l'assaig sense força aplicada; b) instant on la força és la meitat de la força màxima; c) instant on la força és màxima.

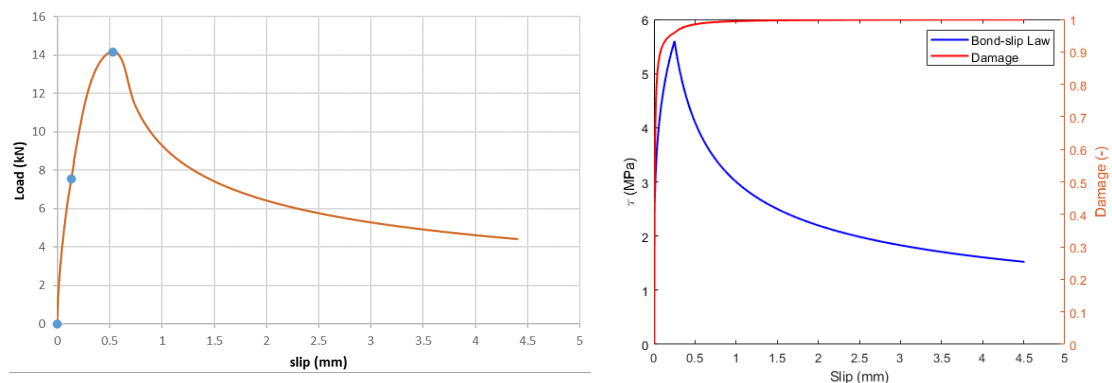


Figura 6.2. Representació de la corba força-lliscament i dels punts on es mostrarà el dany, i l'evolució del dany per l'exemple representat

De la Figura 6.3 s'obté que, per la meitat de la força màxima, gairebé el 70% de la longitud adherida ha patit dany. I a partir del pic, tota la superfície té un dany del 99,9%.

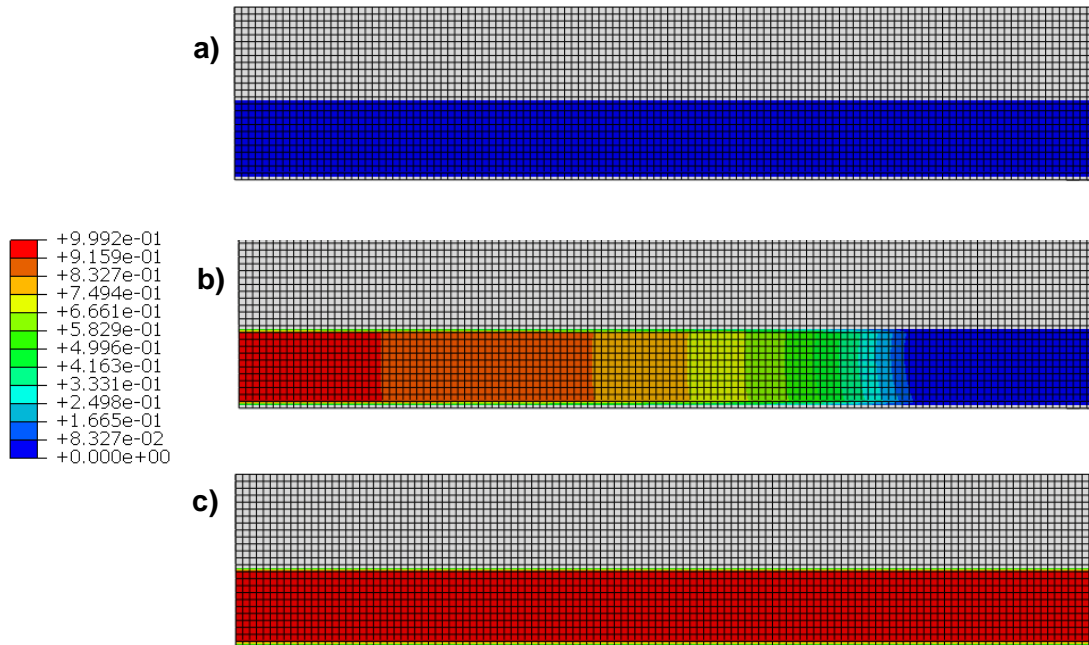


Figura 6.3. Vista en alçat de la superfície cohesiva de l'adhesiu, on es mostra l'evolució del dany en elements finits. a) situació inicial sense càrrega; b) 50% de la força màxima; c) força màxima

A continuació es mostren les comparatives dels resultats experimentals, analítics i numèrics per cadascun dels assaigs, fins a un total de 4 campanyes, i per a cada llei utilitzada en el model analític. En el conjunt de resultats obtinguts en el model numèric es pot observar una diferència significativa entre els dos models, tot i emprar la mateixa llei d'adherència per a simular el comportament de la interfície. Això pot ser degut a la distribució no uniforme de tensions al llarg de la interfase generada en el model numèric, a diferència del model analític el qual es considera una tensió tallant constant al llarg de tota la superfície.

Previ a mostrar el resultat gràfics de les corbes força-lliscament, en la Taula 6.5 es presenten els valors de força màxima i el lliscament associat a aquesta força obtinguts per cada espècimen, i la comparativa amb els valors obtinguts en la modelització analítica i numèrica.

Taula 6.5. Comparativa dels valors de força màxima i lliscament en aquest punt entre les dades experimentals, i el resultat analític i numèric

| Etiqueta | Model | Experimental | | Analític | | Numèric | |
|----------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | F_m (kN) | s_m (mm) | F_m (kN) | s_m (mm) | F_m (kN) | s_m (mm) |
| FS-TLS | Bilineal | | | 13,84 | 0,48 | 14,60 | 0,52 |
| | No lineal | 13,70 | 0,52 | 13,36 | 0,51 | 14,16 | 0,53 |
| | No lineal mod. | | | 13,71 | 0,55 | 14,51 | 0,57 |
| C2-TLS | Bilineal | | | 16,78 | 0,64 | 17,74 | 0,65 |
| | No lineal | 16,57 | 0,66 | 16,51 | 0,68 | 17,50 | 0,70 |
| | No lineal mod. | | | 16,71 | 0,72 | 17,43 | 0,74 |
| FS-TL | Bilineal | | | 13,71 | 0,39 | 14,42 | 0,44 |
| | No lineal | 13,39 | 0,45 | 13,33 | 0,52 | 14,13 | 0,53 |
| | No lineal mod. | | | 13,49 | 0,54 | 14,28 | 0,57 |
| C2-TL | Bilineal | | | 13,14 | 0,60 | 13,96 | 0,63 |
| | No lineal | 12,93 | 0,58 | 12,90 | 0,59 | 13,66 | 0,59 |
| | No lineal mod. | | | 12,90 | 0,66 | 13,67 | 0,68 |

Fixant-se en els valors màxims, els millors resultats s'observen amb les lleis no lineals dels resultats analítics. En la Taula 6.6 es calcula l'error relatiu de la força màxima numèrica del resultat analític respecte del resultat analític, a partir de la següent expressió:

$$Error (\%) = \frac{|F_{analític} - F_{numèric}|}{F_{analític}}, \quad (28)$$

En aquesta es mostra valors entre 4,31 – 6,24 %. Si es calcula el valor mitjà per a cada llei, la no lineal modificada és la que obté el millor valor (5,49%). D'altra banda, la llei no lineal és la que obté els pitjors valors (5,97%)

Taula 6.6. Error relatiu de la força màxima obtinguda entre el model analític i numèric

| Etiqueta | Model | Error analític (%) |
|----------|----------------|--------------------|
| FS-TLS | Bilineal | 5,49 |
| | No lineal | 5,99 |
| | No lineal mod. | 5,84 |
| C2-TLS | Bilineal | 5,72 |
| | No lineal | 6,00 |
| | No lineal mod. | 4,31 |

| Etiqueta | Model | Error analític (%) |
|----------|----------------|--------------------|
| FS-TL | Bilineal | 5,18 |
| | No lineal | 6,00 |
| | No lineal mod. | 5,86 |
| C2-TL | Bilineal | 6,24 |
| | No lineal | 5,89 |
| | No lineal mod. | 5,97 |

De forma global, el comportament del model numèric en el cas de la llei bilineal mostra un seguiment fidedigne en el tram elàstic inicial, fins a aproximadament el punt intermedi d'aquest, on la resposta numèrica obté valors de força superiors, fins a obtenir-ne un pic superior a l'analític. A continuació, la branca "softening" continua la tendència fins a coincidir en el punt de lliscament final (s_f). Per les lleis no lineals, s'obté un comportament semblant al llarg de la corba, però mantenint aquesta diferència amb el model analític, on s'observa reducció d'aquesta distància en l'extrem final.

Començant la comparativa per la primera etiqueta "FS-TLS", aplicant la llei bilineal (Figura 6.4), no lineal (Figura 6.5) i no lineal modificada (Figura 6.6).

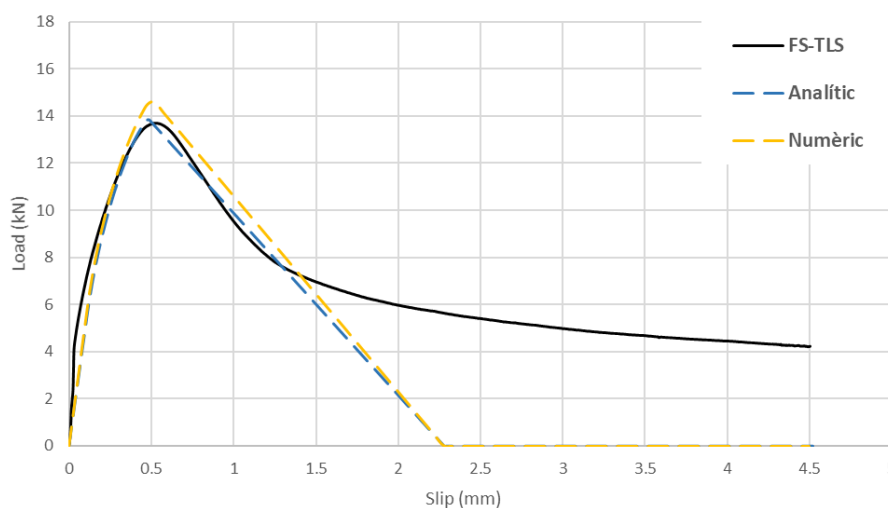


Figura 6.4. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "FS-TLS" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei bilineal

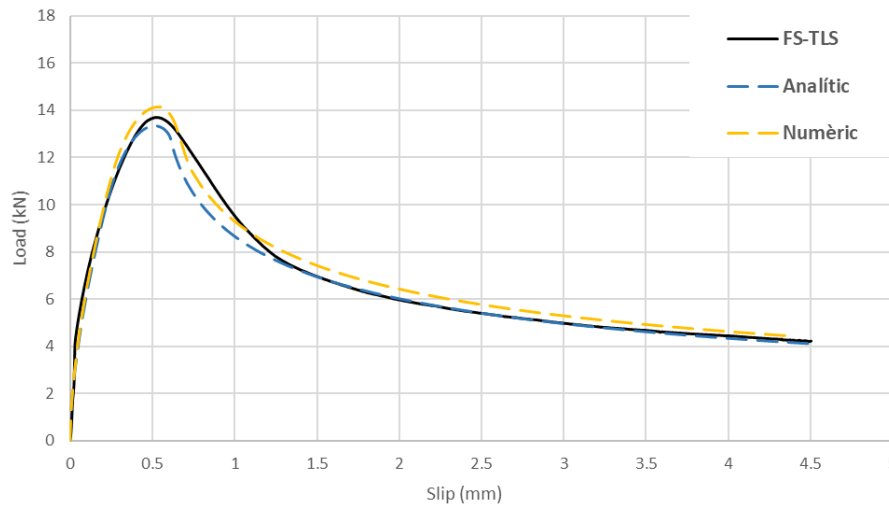


Figura 6.5. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "FS-TLS" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal

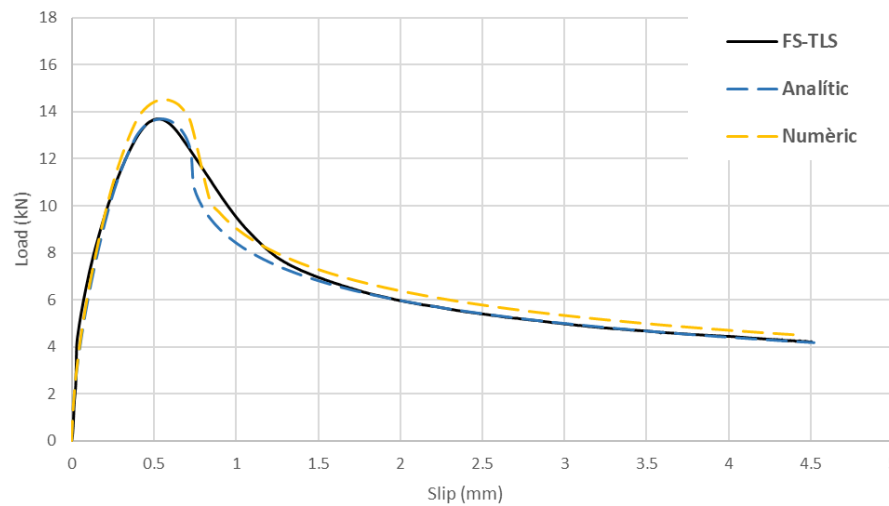


Figura 6.6. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "FS-TLS" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal modificada

Pel cas de l'assaig amb l'etiqueta "C2-TLS" es mostren en la Figura 6.7, Figura 6.8 i la Figura 6.9, per la llei bilineal, no lineal i no lineal modificada, respectivament.

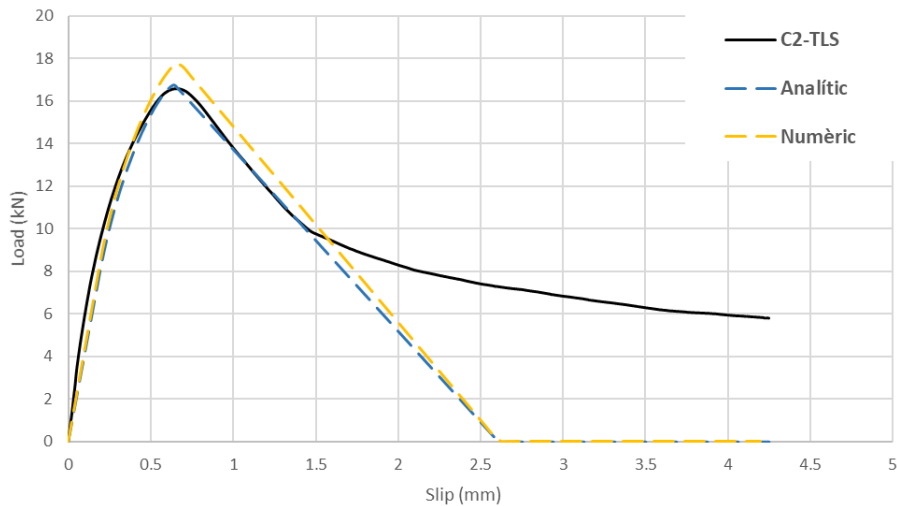


Figura 6.7. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "C2-TLS" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei bilineal

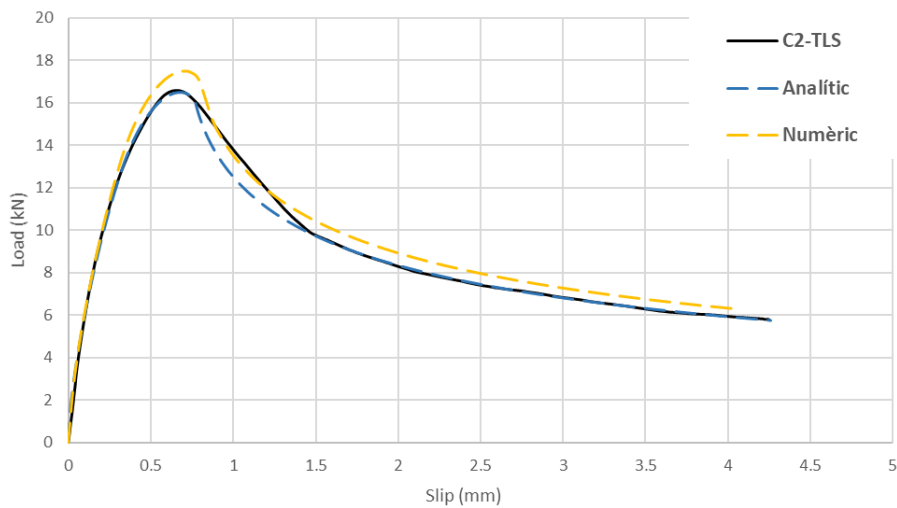


Figura 6.8. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "C2-TLS" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal

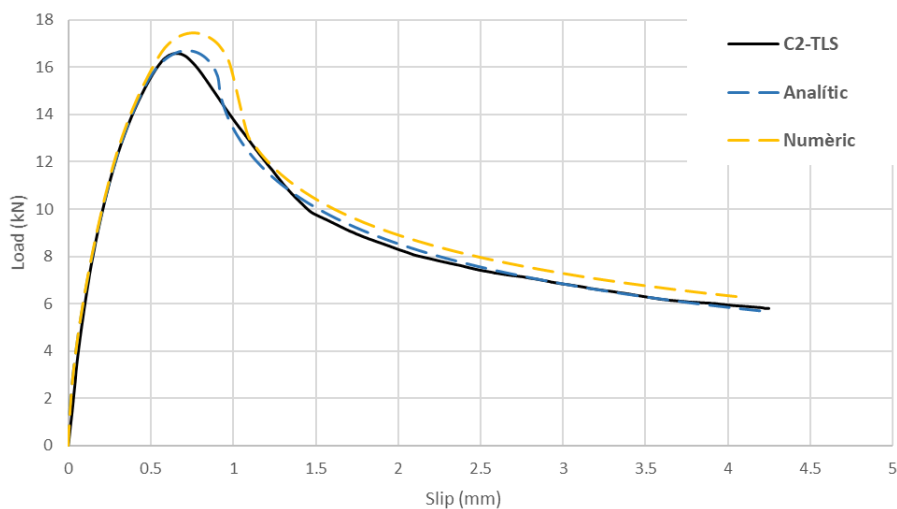


Figura 6.9. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "C2-TLS" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal modificada

Pel cas dels espècimens definits com “FS-TL”, per la llei bilineal (Figura 6.10), no lineal (Figura 6.11) i no lineal modificada (Figura 6.12).

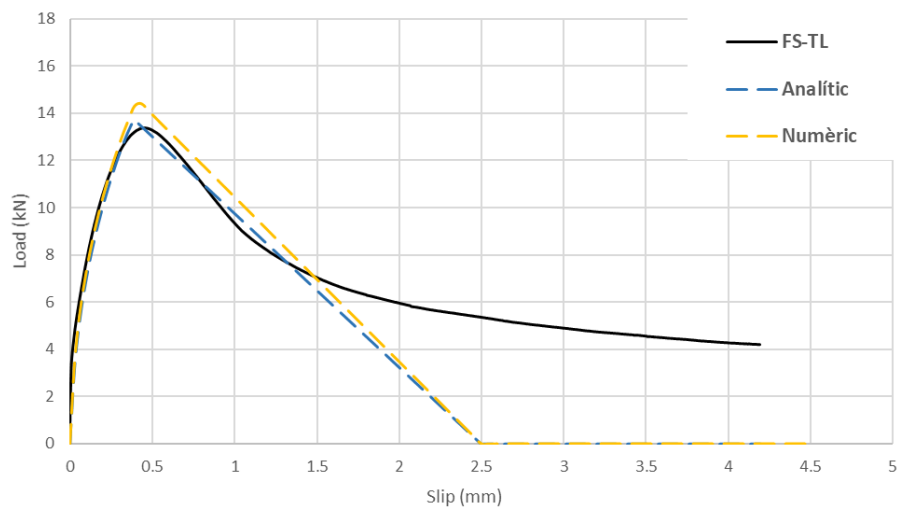


Figura 6.10. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental “FS-TL” i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei bilineal

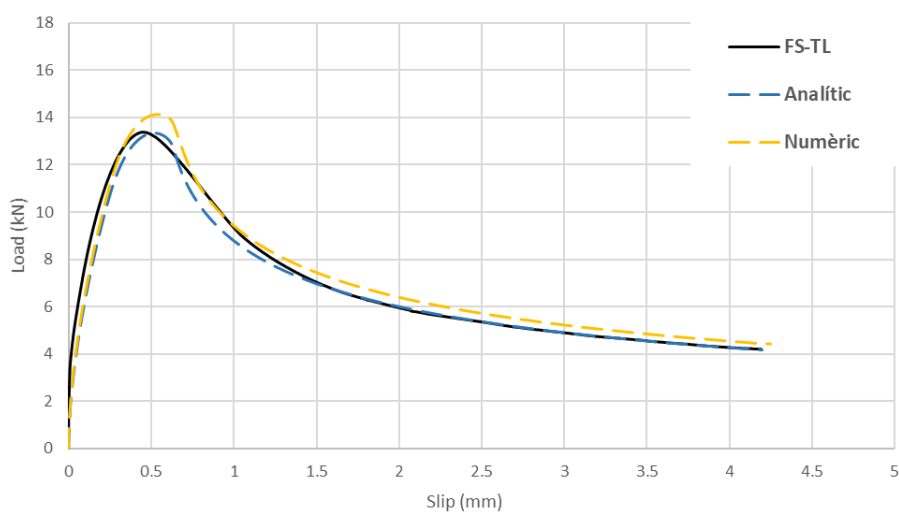


Figura 6.11. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental “FS-TL” i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal

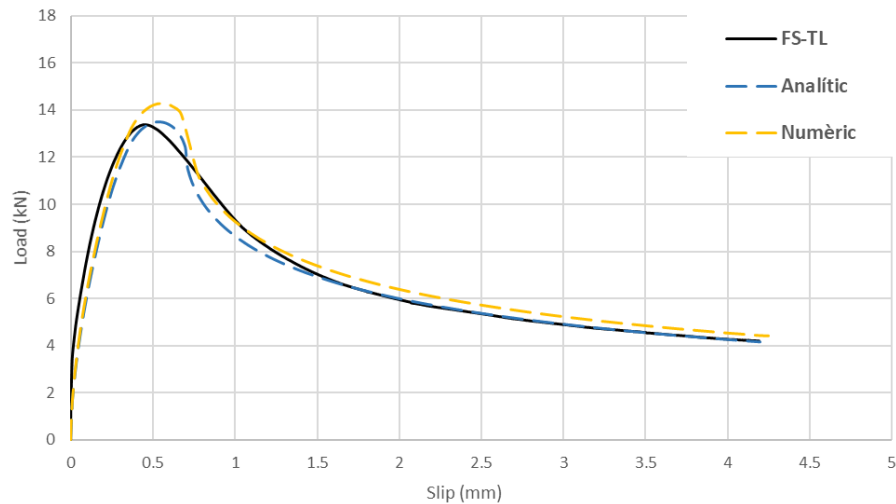


Figura 6.12. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental “FS-TL” i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal modificada

I per últim, l’etiqueta “C2-TL” amb les Figura 6.13, Figura 6.14 i Figura 6.15 per la llei bilineal, no lineal i no lineal modificada, respectivament.

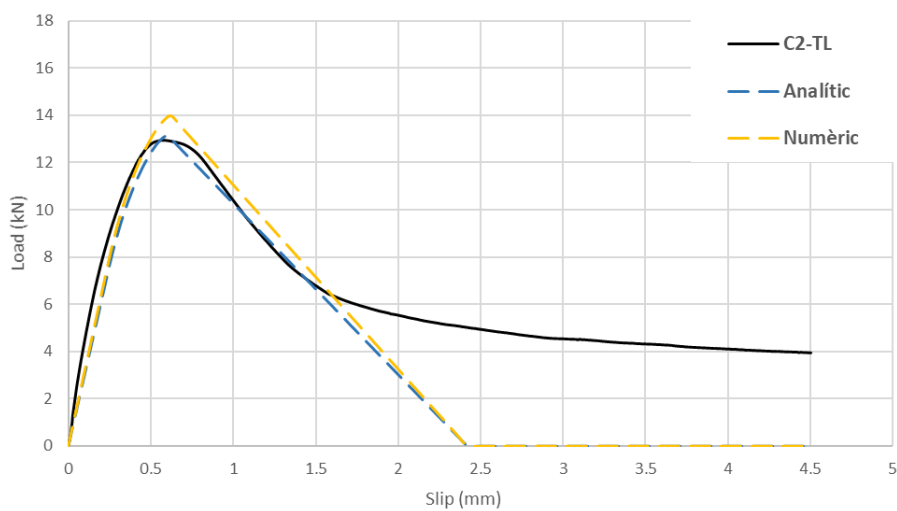


Figura 6.13. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental “C2-TL” i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei bilineal

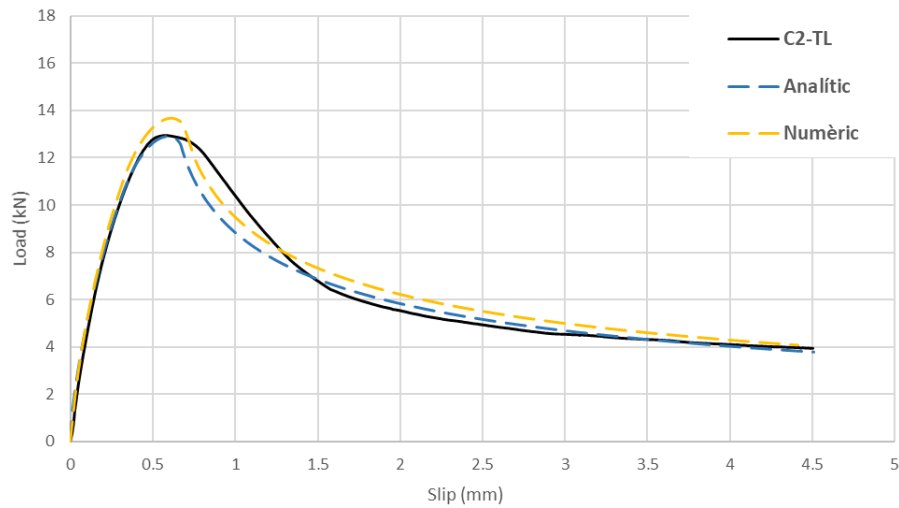


Figura 6.14. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "C2-TL" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal

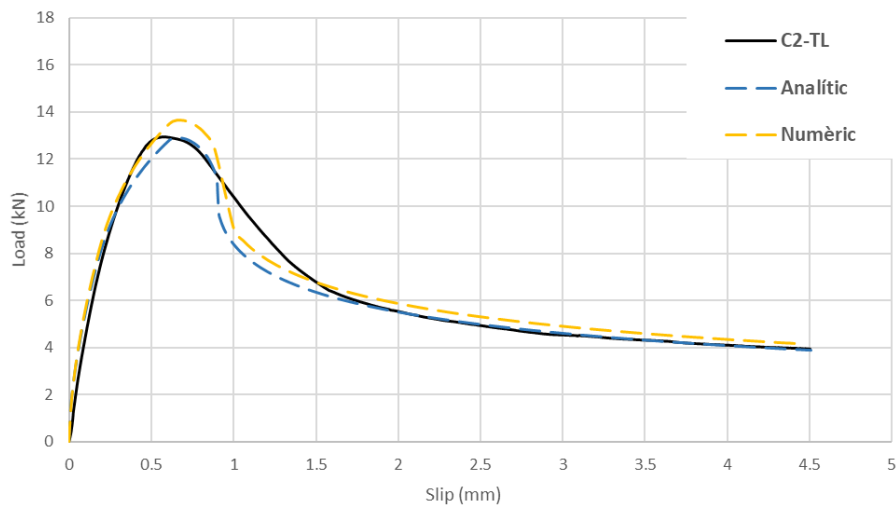


Figura 6.15. Comparativa de les corbes força-lliscament experimental "C2-TL" i analítica amb la numèrica obtinguda del model FE a partir de la llei no lineal modificada

7 RESUM DEL PRESSUPOST

El present capítol inclou la valoració econòmica estimada per la realització d'aquest treball de final de grau desglossat els costos per capítols.

Taula 7.1. Resum del pressupost per capítols

| Capítol | Descripció | Preu |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------|
| 1 | Investigació i anàlisi de la documentació tècnica | 3.000,00 € |
| 2 | Cost del programari | 892,88 € |
| 3 | Anàlisi de resultats i redacció de la memòria | 8.050,00 € |
| PRESSUPOST D'EXECUCIÓ MATERIAL | | 11.942,88 € |
| Benefici industrial (9%) | | 1.074,86 € |
| PRESSUPOST BASE SENSE IVA | | 13.017,74 € |
| IVA (21%) | | 2.733,73 € |
| TOTAL (amb IVA) | | 15.751,47 € |

El pressupost general ascendeix a la quantitat de QUINZE MIL SET-CENTS CINQUANTA-U EUROS amb QUARANTA-SET cèntims (15.751,47 €).

8 CONCLUSIONS

L'objectiu d'aquest treball ha estat proposar un model analític capaç de simular el comportament d'adherència entre el formigó i el reforç amb CFRP per la tècnica NSM utilitzant un adhesiu cimentós. S'han emprat diferents lleis locals d'adherència ($\tau - s$) per tal de reproduir les fases de la tensió d'adherència abans i després del pic, i estudiar el seu comportament global a partir de comparar aquests resultats amb assaigs experimentals a partir d'un assaig d'adherència.

De l'assaig experimental fer menció a l'adquisició de les dades experimentals per part de la Universitat de Minho, descrivint amb detall les característiques de l'assaig, a partir d'una campanya experimental de 12 espècimens. El mòdul elàstic del CFRP, formigó i de l'adhesiu cimentós és 170, 25 i 40 GPa, respectivament. La longitud adherida ha sigut de 125 mm. Els assaigs s'han desenvolupat amb una màquina universal de 50 kN, controlant el desplaçament en l'actuador del servo hidràulic, amb una velocitat de $2\mu\text{m/s}$, i s'ha enregistrat la força. Com a dada rellevant, recordar que l'assaig d'adherència en tots els espècimens va ser a partir d'extreure el CFRP "net", sense cap partícula de la sorra adherida en el pretractament.

El model analític proposat s'ha resolt per la metodologia de diferències finites amb el programari Matlab®, simplificant el comportament fenomenològic del conjunt. El mètode analític desenvolupat ha permès resoldre l'equació diferencial de segon ordre que governa el comportament d'adherència entre els dos elements. Alhora, veure la diferència entre tres lleis existents, com són la bilineal, un model senzill i de fàcil implementar per tal d'entendre el comportament de l'esforç aplicat per un adhesiu; el model no lineal recomanat pel *fib Bulletin 40* [1] essent un referent en manuals d'aplicació per reforç d'estructures de formigó en l'àmbit mundial; i per últim, el model no lineal modificat, per tal de poder ajustar més adequadament la branca final de la llei. Tots els mètodes han sigut implementats en Matlab®, parametrizant els coeficients per tal d'obtenir el resultat òptim del model analític en vers al resultat experimental.

S'ha considerat adequat utilitzar el mètode de mínims quadrats per a assolir l'objectiu del present treball, ja que el mètode de les àrees pot veure's condicionat per la forma del conjunt, i no tant per l'ajustatge de les corbes. Aquests resultats han mostrat un millor ajustatge entre l'assaig experimental i les lleis no lineals que amb la llei bilineal.

Definir el rang de cada coeficient i el pas entre aquests és un factor clau per tal d'optimitzar el temps d'execució. Un altre dels factors és la dimensió de la matriu "*Força*" que es va augmentar a mesura que s'afegeixen paràmetres, el qual s'ha pogut observar la lentitud provocada quan aquest valor augmenta: pel mateix nombre de combinacions a realitzar, la llei bilineal (3 coeficients) resol el sistema més ràpidament que el fet de resoldre'l per la llei no lineal modificada (5 coeficients). En la comparativa amb la resina epoxi, els valors característics de l'assaig amb un adhesiu cimentós és inferior al seu competidor.

Després del model analític, s'ha obtingut un model simplificat del conjunt implementat en el programari Abaqus® a partir d'elements finits, per continuar amb la modelització numèrica del conjunt. En aquest s'ha reduït el conjunt donada la simetria existent en l'assaig, per tal de reduir el cost computacional associat al mallat. També s'ha definit una superfície cohesiva definida en la interfície entre el CFRP i l'adhesiu a causa de la resposta experimental de l'assaig, on el reforç s'extreu aparentment sense cap trencament ni fissura en cap dels components. Per tal de verificar el model, es va utilitzar el programari d'elements finits definint el comportament de la superfície cohesiva i del dany a partir d'entrades ("*inputs*") d'aquest. Aquestes entrades no permetien ajustar el model a l'assaig experimental i alhora, es perd el control de l'estudi realitzat en el model analític; per això es va considerar descartar continuar el treball en aquesta direcció.

En el model numèric s'ha verificat la generació i evolució de la fractura en la superfície cohesiva definida a partir de la variable CSDMG generada pel programari Abaqus®. S'ha observat l'evolució en la superfície per diferents instants de l'assaig, on s'ha mostrat com la superfície d'adherència en el ciment està danyada més del 90% en la seva totalitat un cop s'assoleix la força màxima en l'assaig. D'altra banda en el cas d'aplicar la meitat de la càrrega màxima, aquesta superfície ha començat a experimentar dany fins gairebé el 70% de la seva longitud. Aquest model numèric permet entendre més detalladament l'evolució global de l'assaig.

El següent pas va ser un treball comparatiu entre el model analític i numèric: a partir dels valors obtinguts amb el model analític, s'ha pogut calcular l'evolució del dany al llarg de la llei d'adherència – lliscament per tal de definir-la en el model d'elements finits. El criteri per definir l'inici del dany ha sigut el 40% del tallant màxim obtingut per a les lleis no lineals, i de tot el tram inicial elàstic per la llei bilineal. En la totalitat de l'estudi

realitzat s'ha identificat una diferència considerable amb els resultats analítics, tal com s'ha enumerat en la Taula 6.6. Aquests diferències poden ser degudes a la distribució no uniforme de tensions al llarg de la interfície del model numèric. La llei que més s'ha ajustat en aquests termes ha sigut la no lineal modificada.

8.1 Perspectives de futur

En un treball d'investigació és important establir les línies de treball futures per donar continuïtat a l'esforç invertit. Per aquesta raó, es pretén mostrar el treball futur necessari que cal realitzar per tal de continuar avançant en desenvolupar la modelització analítica i numèrica del reforç amb CFRP d'estructures de formigó amb un adhesiu cimentós per la tipologia NSM.

Pel que fa al model analític, es pot considerar l'opció d'optimitzar el codi per tal de reduir-ne el cost computacional existent. Per exemple, es podria unificar el diagrama de flux del procés amb l'elecció de la combinació òptima descartant-ne casos on el tram inicial fins al pic no s'ajustin a la corba experimental. Tanmateix, elaborar la mateixa anàlisi per altres lleis conegudes i observar-ne quin aconsegueix millors resultats. D'altra banda, es podria proposar una metodologia de resolució inversa per tal que es pugui obtenir una llei d'adherència local a partir de les dades experimentals càrrega-lliscament sense pressuposar una forma determinada de llei.

Altrament, el model numèric implementat a Abaqus® ha sigut definit amb propietats bàsiques dels elements implicats, i amb una geometria simplificada per un cas concret. Per tant, es proposa la possibilitat d'introduir totes les dades en forma de codi per tal d'agilitzar els canvis necessaris, ja sigui la forma del reforç, les dimensions del formigó o la ranura, entre d'altres; i també la definició del comportament de l'element cohesiu i l'evolució del dany. Addicionalment, aconseguir ajustar la diferència obtinguda entre el model analític i el model numèric per tal de verificar el comportament adherent de la unió.

9 RELACIÓ DOCUMENTS

En el present treball de final de màster, la relació de documents és:

1. Memòria i annexos
2. Resum

10 BIBLIOGRAFIA

- [1] CEB-FIB Bulletin90, *Externally applied FRP reinforcement for concrete structures*. International Federation for Structural Concrete, 2019.
- [2] H. V. S. GangaRao, N. Taly, and P. V. Vijay, *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*. 2006.
- [3] J. Gómez, “Bond behaviour between CFRP and concrete for NSM systems under sustained loading,” Universitat de Girona, 2021.
- [4] J. S. Cruz and J. Barros, “Bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete,” *Comput. Struct.*, vol. 82, no. 17–19, pp. 1513–1521, 2004, doi: 10.1016/j.compstruc.2004.03.047.
- [5] L. De Lorenzis and J. G. Teng, “Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 38, no. 2, pp. 119–143, 2007, doi: 10.1016/j.compositesb.2006.08.003.
- [6] A. Al-Abdwais and R. Al-Mahaidi, “Modified cement-based adhesive for near-surface mounted CFRP strengthening system,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 794–800, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.147.
- [7] P. Balaguru, A. Nanni, and J. Giancaspro, *FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures*. 2009.
- [8] N. T. K. Al-Saadi, A. Mohammed, and R. Al-Mahaidi, “Performance of RC beams rehabilitated with NSM CFRP strips using innovative high-strength self-compacting cementitious adhesive (IHSSC-CA) made with graphene oxide,” *Compos. Struct.*, vol. 160, pp. 392–407, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.10.084.
- [9] A. Al-Abdwais and R. Al-Mahaidi, “Bond behaviour between NSM CFRP laminate and concrete using modified cement-based adhesive,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 127, pp. 284–292, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.142.
- [10] N. T. K. Al-Saadi and R. Al-Mahaidi, “Modelling of near-surface mounted carbon

- fibre reinforced polymer strips embedded in concrete with cement-based adhesive,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 127, pp. 383–393, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.109.
- [11] A. Al-Abdwais, R. Al-Mahaidi, and A. Al-Tamimi, “Performance of NSM CFRP strengthened concrete using modified cement-based adhesive at elevated temperature,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 132, pp. 296–302, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.136.
- [12] N. T. K. Al-Saadi, A. Mohammed, and R. Al-Mahaidi, “Fatigue performance of NSM CFRP strips embedded in concrete using innovative high-strength self-compacting cementitious adhesive (IHSSC-CA) made with graphene oxide,” *Compos. Struct.*, vol. 163, pp. 44–62, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.12.015.
- [13] G. Al-Bayati, R. Al-Mahaidi, and R. Kalfat, “Experimental investigation into the use of NSM FRP to increase the torsional resistance of RC beams using epoxy resins and cement-based adhesives,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 1153–1164, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.095.
- [14] A. Mohammed, N. T. K. Al-Saadi, and R. Al-Mahaidi, “Bond behaviour between NSM CFRP strips and concrete at high temperature using innovative high-strength self-compacting cementitious adhesive (IHSSC-CA) made with graphene oxide,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 127, pp. 872–883, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.066.
- [15] F. Ceroni, J. A. O. Barros, M. Pecce, and M. Ianniciello, “Assessment of nonlinear bond laws for near-surface-mounted systems in concrete elements,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 45, no. 1, pp. 666–681, 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.07.006.
- [16] J. Yao, J. G. Teng, and J. F. Chen, “Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 36, no. 2, pp. 99–113, 2005, doi: 10.1016/j.compositesb.2004.06.001.

- [17] M. R. F. Coelho, J. M. Sena-Cruz, and L. A. C. Neves, "A review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 93, pp. 1157–1169, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.010.
- [18] F. Ceroni, M. Pecce, A. Bilotta, and E. Nigro, "Bond behavior of FRP NSM systems in concrete elements," *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 2, pp. 99–109, 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2011.10.017.
- [19] J. G. Teng, J. F. Chen, S. T. Smith, and L. Lam, "Behaviour and strength of FRP-strengthened RC structures: A state-of-the-art review," *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.*, vol. 156, no. 1, pp. 51–62, 2003, doi: 10.1680/stbu.2003.156.1.51.
- [20] J. G. Teng, S. T. Smith, J. Yao, and J. F. Chen, "Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs," *Constr. Build. Mater.*, vol. 17, no. 6–7, pp. 447–462, 2003, doi: 10.1016/S0950-0618(03)00043-6.
- [21] D. Zhang, T. Ueda, and H. Furuuchi, "Concrete cover separation failure of overlay-strengthened reinforced concrete beams," *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 735–745, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.082.
- [22] A. A. Shukri, Z. Ibrahim, and H. Hashim, "Concrete cover separation of reinforced concrete beams strengthened with near-surface mounted method: Mechanics based design approach," *Adv. Struct. Eng.*, vol. 22, no. 7, pp. 1739–1754, 2019, doi: 10.1177/1369433218824922.
- [23] X. Z. Lu, J. G. Teng, L. P. Ye, and J. J. Jiang, "Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete," *Eng. Struct.*, vol. 27, no. 6, pp. 920–937, 2005, doi: 10.1016/j.engstruct.2005.01.014.
- [24] U. Neubauer and F. S. Rostásy, "Bond failure of concrete fiber reinforced polymer plates at inclined cracks-experiments and fracture mechanics model," *ACI Symp. Publ.*, vol. 188, 1999, doi: 10.14359/5638.
- [25] S. A. Limited, Ed., *Design handbook for RC structures retrofitted with FRP and metal plates: beams and slabs / Standards Australia*. Sydney: Standards Australia, 2008.

- [26] G. MONTI, M. RENZELLI, and P. LUCIANI, “FRP ADHESION IN UNCRACKED AND CRACKED CONCRETE ZONES,” in *Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, World Scientific Publishing Company, 2003, pp. 183–192.
- [27] R. Seracino, M. R. Raizal Saifulnaz, and D. J. Oehlers, “Generic Debonding Resistance of EB and NSM Plate-to-Concrete Joints,” *J. Compos. Constr.*, vol. 11, no. 1, pp. 62–70, 2007, doi: 10.1061/(asce)1090-0268(2007)11:1(62).
- [28] J. S. Cruz and J. Barros, “Modeling of bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete,” *Comput. Struct.*, vol. 82, no. 17–19, pp. 1513–1521, 2004, doi: 10.1016/j.compstruc.2004.03.047.
- [29] J. M. Sena Cruz, J. A. O. Barros, R. Gettu, and Á. F. M. Azevedo, “Bond Behavior of Near-Surface Mounted CFRP Laminate Strips under Monotonic and Cyclic Loading,” *J. Compos. Constr.*, vol. 10, no. 4, pp. 295–303, 2006, doi: 10.1061/(asce)1090-0268(2006)10:4(295).
- [30] Abaqus/Standard, *Manual: Cohesive section*. 2022.
- [31] R. M. Firouz, E. N. B. Pereira, and J. A. O. Barros, “Cementitious adhesives for NSM carbon laminate strengthening system with treated surfaces,” *IABSE Symp. Guimaraes 2019 Towar. a Resilient Built Environ. Risk Asset Manag. - Rep.*, pp. 353–359, 2019, doi: 10.2749/guimaraes.2019.0353.
- [32] “S&P Clever Reinforcement Company AG Headquarters.” [Online]. Available: <https://www.sp-reinforcement.eu/en-EU>.
- [33] S. R. Epoxy, “S & P Resin Epoxy 55 HP,” vol. 55, no. 1907. pp. 1–6, 2010.
- [34] J. Gómez, L. Torres, and C. Barris, “Characterization and simulation of the bond response of NSM FRP reinforcement in Concrete,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 7, 2020, doi: 10.3390/MA13071770.
- [35] H. Yuan, J. G. Teng, R. Seracino, Z. S. Wu, and J. Yao, “Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints,” *Eng. Struct.*, vol. 26, no. 5, pp. 553–565, 2004, doi: 10.1016/j.engstruct.2003.11.006.

- [36] A. Rolland, P. Argoul, K. Benzarti, M. Quiertant, S. Chataigner, and A. Khadour, “Analytical and numerical modeling of the bond behavior between FRP reinforcing bars and concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 231, p. 117160, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117160.

ANNEX A: PRESSUPOST

El present capítol inclou el pressupost estimat per la realització d'aquest treball. Es contempen les despeses associades en concepte d'investigació i el cost dels programaris utilitzats, i anàlisi de resultats i redacció de la memòria.

| CAPÍTOL 1: Investigació i anàlisi de la documentació tècnica | | | | |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------|---------------|---------------------|
| Descripció | Preu unitari | Quantitat | Unitat | Preu parcial |
| Investigació i anàlisi de la documentació | 25 €/h | 120 | h | 3.000,00 € |
| TOTAL | | | | 3.000,00 € |

| CAPÍTOL 2: Cost del programari | | | | |
|---------------------------------------|---------------------|----------------------|---------------|---------------------|
| Descripció | Preu unitari | Quantitat (*) | Unitat | Preu parcial |
| Cost programari Matlab®* | 800 €/u | 5,11 | % | 40,88 € |
| Cost programari Abaqus®* | 15.000 €/u | 5,68 | % | 852,00 € |
| TOTAL | | | | 892,88 € |

* Es considera un total de 1.760 hores anuals pel càlcul d'ús de cada programari.

| CAPÍTOL 3: Anàlisi de resultats i redacció de la memòria | | | | |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------|------------------|---------------|---------------------|
| Descripció | Preu unitari | Quantitat | Unitat | Preu parcial |
| Anàlisi analític (Matlab®) | 25 €/h | 90 | h | 2.250,00 € |
| Anàlisi numèric (Abaqus®) | 25 €/h | 100 | h | 2.500,00 € |
| Revisió de la anàlisi i la memòria | 40 €/u | 20 | u | 800,00 € |
| Redacció de la memòria | 25 €/u | 100 | u | 2.500,00 € |
| TOTAL | | | | 8.050 € |