



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

# Anàlisi del comportament de bigues de formigó armat reforçades amb FRCM vegetal sota càrregues de flexió cíclica

Autora:

Virginia Dolores Mendizábal Dinucci

Director – Codirector:

Lluís Gil Espert

Ernest Bernat Masó

Programa de doctorat:

Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Convocatòria:

Primavera 2023

TESIDOCCTORALTESIDOCCTORAL

## Agraïments

Tot i que només hi hagi un autor a aquesta tesi doctoral, aquesta no hagués estat possible sense tenir una bona xarxa de suport.

Primer de tot agrair als meus directors Lluís Gil i Ernest Bernat, qui hagués dit que aquella noia de TFG acabaria fent amb vosaltres tots els treballs de fi d'estudis, i fins i tot un doctorat? Gràcies per encoratjar-me a agafar l'oportunitat de passar aquests 3,5 anys amb vosaltres, fent recerca i aprenent sobre el món acadèmic. El bon ambient i el suport van ser una les coses que m'agraden de vosaltres i que em van fer decidir a viure aquesta experiència.

També a la Núria Salán amb la que vaig connectar més gràcies al programa M2m de la UPC, per ensenyar-me altres maneres de tenir impacte al nostre voltant.

A tots els companys del LITEM i CATMech, i especialment al Borja i Luis per la seva ajuda constant al llarg dels anys. I també als que s'anaven incorporant amb el pas del temps, Andrea, Evarist, Dani, Jordi, aquest últim any no hagués estat el mateix sense vosaltres.

No són poques les persones amb les quals no només he compartit bons moments, sinó també part de la recerca. Olga, Adrián, José, Francesco, Raúl, Borja... la recerca és més amena si tens gent amb qui compartir-la, aprenent junts.

A la meva família, la que tinc aquí a prop i a la que tinc a l'altre costat de l'oceà perquè la distància mai serà un problema per nosaltres, que ens estimem profundament.

Als meus amics! Bernat, Marta, Samya, Laura, Meli, Laia, Roser, Juli, Dídac i les meves noies de My Dance Mode, que sempre saben com treure'm un somriure.

A la UPC i al Banc Santander per donar suport a la recerca a través de les beques FPI-UPC i a l'Ajuntament de Terrassa per apostar per la recerca que es duu a terme a la ciutat amb les seves beques anuals.

Finalment, a tu lector, perquè sense tu aquestes quasi 200 pàgines perden una mica el sentit. Espero que et sembli interessant i acabis sabent una mica més que al principi.

## Resum

El Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) és un material per al reforç d'estructures que ha anat agafant protagonisme vers el Fiber-Reinforced Polymer (FRP), a causa del seu baix cost i la toxicitat menor dels seus materials. El seu comportament en tres etapes el fa interessant sobretot en situacions on les càrregues no són estàtiques.

Per aquest motiu, en els darrers anys, els investigadors han començat a caracteritzar aquest tipus de reforç i l'han aplicat a estructures, tals com l'obra de fàbrica o les estructures de formigó, sota diversos esforços. La compatibilitat de la matriu amb el substrat ha donat bons resultats en la major part d'experiments de recerca.

El repte de la societat per un món més sostenible afecta a tots els àmbits de la indústria, i en aquest en concret, als materials compostos, ha provocat que hi hagi un interès a substituir els materials sintètics per altres d'origen més natural o d'impacte ambiental més baix. Per aquest motiu, les fibres de reforç, de tant els FRP com els FRCM, van començar a substituir-se per altres d'origen natural, tot esperant que poguessin suportar les sol·licitacions a les quals les exposaven.

Fibres com el lli, el sisal o el cànem van donar bons resultats amb càrregues elevades i altres fibres com el cotó són interessants pel seu potencial de deformació i de dissipació de l'energia de deformació.

Al ser fibres d'origen natural aplicades a una matriu de morter fresc, aquestes es poden deteriorar degut a l'elevat pH del morter, de manera que es va començar a recobrir-les per protegir-les. Els recobriments més utilitzats són: la resina epoxi, de polièster o la de vinil, que no només protegeixen les fibres, sinó que també milloren les propietats mecàniques.

Avui en dia, també hi ha recerca en l'àmbit dels recobriments, utilitzant altres tipus com poden ser les resines d'arbres i arbustos, cera d'abella o solucions de chitosán.

En aquesta tesi doctoral es planteja l'aplicació de FRCM de fibres vegetals a bigues de formigó armat sotmeses a càrregues de flexió cíclica.

En primer lloc, es caracteritza mecànicament el FRCM de cotó i cànem en totes les seves etapes: Propietats del fil sense i amb recobriment, compatibilitat entre el fil i la matriu, propietats de la malla i finalment propietats del FRCM.

S'utilitzen dues resines d'origen sintètic i dues d'origen vegetal fins a arribar a seleccionar dues per a la campanya experimental de gran format.

Després de veure la baixa compatibilitat entre els fils sense recobrir i els recoberts amb resines naturals i la matriu de morter, les no tractades queden descartades i es procedeix a aprofundir en la recerca utilitzant els recobriments de resina epoxi i resina de polièster.

Es caracteritza la interacció entre el reforç de FRCM amb el substrat de formigó a través d'una adaptació de l'assaig d'adherència entre barres d'armadura i formigó que regula la normativa, determinant els diferents modes de fallada segons la fibra de la qual estigui feta la malla.

S'utilitzen bigues de 3 metres per a l'assaig a flexió. Aquestes són sotmeses a un anàlisi modal, pre i post reforç, per veure l'impacte del mateix en les freqüències naturals de la biga. S'observa que augmenta lleugerament la primera de flexió, però disminueix la primera de torsió.

Finalment, s'assagen a flexió estàtica les bigues de control, i de forma cíclica les reforçades, augmentant progressivament el desplaçament de l'actuador. Com a resultats notables, les bigues suporten càrregues més elevades i les bigues reforçades amb FRCM de cotó, absorbeixen suficient energia per evitar el trencament de l'armadura de tracció amb desplaçaments significatius.

També, es proposa un model numèric que simuli el comportament de les bigues sotmeses a aquest tipus d'esforços. Calibrant-lo amb les bigues de control i malles d'epoxi. Per validar el model es van intentar reproduir els assaigs de bigues reforçades amb polièster resultant una aproximació prou bona dels resultats que donen per bo el mètode implementat.

**Paraules clau:** FRCM, fibres vegetals, caracterització mecànica, reforç d'estructures, assaig de flexió, flexió cíclica, model numèric

## Abstract

Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) is a strengthening material that has been increasing its importance versus Fiber-Reinforced Polymer (FRP) due the lower cost and lower toxicity of its materials. The 3-stage behavior makes FRCM an interesting option when structures are subjected to non-static loads.

For this reason, researchers have been characterising this strengthening system and they have applied it to structures as masonry or reinforced concrete, under several solicitations. Its good compatibility with the substrate has been providing mainly good results in the research.

Society has raised awareness in the importance of the environment and the impact the industry has in it, affecting every industry. In strengthening of structures, it provoked an interest on the substitution of the fibers used in FRP and FRCM from synthetic to natural ones expecting to bear the loads that were applied to them.

Fibers like flax, sisal or hemp provided good results when high loads are applied, and other fibers as cotton are interesting for its potential strain and energy dissipation.

Being natural fibers applied to a fresh mortar matrix, they can be deteriorated due the elevated pH of the matrix, therefore a coating was needed. The most common ones: are epoxy resin, polyester resin or vinyl, that not only protects the fiber, but also increases its mechanical properties.

Nowadays, there is also research regarding the coatings applied to the strengthening systems, using tree's resins or beeswax.

In this doctoral thesis, it is proposed the application of vegetal fiber-FRCM to strengthen reinforced concrete beams subjected to cyclic bending loads.

First, the mechanical characterization of the hemp or cotton FRCM is performed in all the stages: uncoated/coated threads mechanical properties, compatibility between the thread and the matrix, mesh mechanical properties and finally FRCM mechanical properties.

Two synthetic and two natural resins are used in the characterization to reach two of them for the big format experimental campaign.

After seeing the low compatibility between uncoated and natural coated threads and the matrix, it was decided to continue the research with the epoxy and polyester resin as coatings.

The interaction between the strengthening system and the substrate is performed through adapting the normative that regulates the adherence between the reinforcing steel bars and the concrete, determining the failure mode according to the type of fiber of the mesh.

3 meters length reinforced concrete beams are used to perform the bending test. Before the testing, a modal analysis is performed pre and post strengthening to see the impact of the strengthening system on the natural frequencies of the beams. Increasing slightly the first bending mode, but decreasing the first torsion.

Finally, a static bending is performed to the control beams and a cyclic one for the reinforced ones. In the cyclic test, the displacement of the actuator was increased progressively. As highlights, the strengthened beams increased the maximum load they can bear and the cotton-FRCM strengthened beams absorb enough energy to avoid the traction armour failure with significant displacements.

Also, a numerical model simulation is proposed to simulate the behaviour of strengthened beams under this type of loads. It has been calibrated using the control and epoxy-coated FRCM. To validate the model, it was attempted to simulate the performance of polyester-coated FRCM strengthened beams achieving a satisfactory approximation of the results that validates the model.

**Keywords:** FRCM, vegetal fibers, mechanical characterization, strengthening of structures, bending test, cyclic bending, numerical model



# Índex de continguts

Índex de continguts.....	6
Índex de figures.....	10
Índex de taules.....	17
CAPÍTOL I. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS.....	19
1.1. Introducció.....	19
1.2. Objectius.....	22
1.3. Metodologia.....	23
1.3.1. Definició d'espècimens per cada assaig.....	24
CAPÍTOL II. ESTAT DE L'ART.....	27
2.1. Introducció.....	27
2.1.1. Estructures de formigó.....	27
2.2. Reforç d'estructures de formigó armat.....	29
2.2.1. FRP vs FRCM.....	33
2.3. Fibres naturals a materials compostos.....	36
2.4. Modificació de la superfície del reforç amb fibres.....	42
2.4.1. Recobriments naturals.....	43
2.5. Predicció de comportament de bigues de formigó armat.....	44
2.5.1. Models numèrics de FRCM sota assajos de tracció.....	44
2.5.2. Models analítics de FRCM sota assajos de tracció.....	47
2.6. Conclusions del capítol.....	57
CAPÍTOL III. CARACTERITZACIÓ DELS MATERIALS.....	59
3.1. Introducció.....	59
3.2. Definició dels materials.....	59
3.3. Assaig de tracció de fils.....	62
3.3.1. Preparació dels espècimens.....	62
3.3.2. Equipament.....	64



3.3.3. Resultats .....	65
3.3.4. Discussió .....	66
3.3.5. Conclusions.....	67
3.4. Assaig de pull-out .....	68
3.4.1. Preparació dels espècimens .....	68
3.4.2 Equipament d'assaig .....	68
3.4.3. Resultats .....	69
3.4.4. Discussió .....	71
3.4.5. Conclusions.....	71
3.5. Assaig de tracció de malles .....	72
3.5.1. Preparació dels espècimens .....	72
3.5.2. Equipament d'assaig .....	73
3.5.3. Resultats .....	74
3.5.4. Discussió .....	75
3.5.5. Conclusions.....	76
3.6. Assaig de tracció de FRCM .....	77
3.6.1. Preparació dels espècimens .....	77
3.6.2. Equipament .....	78
3.6.3. Resultats .....	79
3.6.4. Discussió .....	81
3.6.5. Conclusions.....	83
3.7. Caracterització del formigó .....	84
3.7.1. Determinació de la densitat .....	84
3.7.2. Determinació de la resistència a compressió.....	84
3.7.3. Determinació del mòdul d'elasticitat dinàmic .....	85
3.8. Conclusions del capítol.....	86
CAPÍTOL IV. ADHERÈNCIA AMB EL SUBSTRAT.....	88
4.1. Introducció .....	88





4.2. Estudis d'adherència amb el substrat .....	88
4.2.1. Assajos d'adherència <i>single-lap</i> .....	89
4.2.2. Assajos d'adherència <i>double-lap</i> .....	90
4.3. Metodologia de l'assaig .....	91
4.3.1. Preparació dels espècimens .....	92
4.3.2. Equipament d'assaig .....	93
4.3.3. Resultats .....	95
4.3.4. Discussió .....	97
4.3.5. Conclusions .....	99
4.4. Conclusions del capítol .....	99
CAPÍTOL V. FLEXIÓ CÍCLICA DE BIGUES REFORÇADES .....	100
5.1. Introducció .....	100
5.2. Geometria de les bigues .....	100
5.3. Assaig d'anàlisi modal .....	101
5.3.1. Context de l'anàlisi modal .....	101
5.3.2. Preparació dels espècimens .....	102
5.3.3. Equipament .....	105
5.3.4. Resultats .....	106
5.3.5. Discussió .....	108
5.3.6. Conclusions .....	111
5.4. Assaig de flexió cíclica .....	112
5.4.1. Equipament .....	112
5.4.2. Paràmetres a avaluar .....	113
5.4.3. Resultats .....	116
5.4.4. Discussió .....	120
5.4.5. Conclusions .....	135
5.5. Conclusions del capítol .....	136
CAPÍTOL VI. MODEL NUMÈRIC .....	138



6.1. Introducció .....	138
6.2. Models numèrics.....	138
6.2.1. Geometria de les bigues.....	139
6.2.2. Propietats dels materials.....	141
6.2.3. Contactes.....	144
6.2.4. Mallat .....	144
6.2.5. Condicions de contorn .....	145
6.2.6. Resultats de l'assaig de flexió estàtica i cíclica.....	146
6.2.7. Validació del model .....	149
6.3. Conclusions del capítol.....	151
CAPÍTOL VII. CONCLUSIONS .....	153
7.1. Introducció .....	153
7.2. Conclusions .....	153
7.2.1. Campanya de caracterització .....	153
7.2.2. Adherència al substrat .....	154
7.2.3. Bigues a flexió.....	154
7.2.4. Model numèric .....	155
7.3. Futures línies de recerca .....	156
CAPÍTOL VIII. REFERÈNCIES .....	158
ANNEXOS.....	167
A1. Càlculs de l'armadura.....	167
A1.1. Armadura longitudinal .....	168
A1.2. Armadura transversal .....	172
A1.3. Comprovació de la fissuració .....	174
A2. Corbes experimentals individuals .....	178
A2.1. Assaig de tracció de fils .....	178
A2.2. Assaig de tracció de malles .....	183
A2.3. Assaig de tracció de FRCM .....	185

A2.4. Assaig de flexió.....	187
A2.4.1. Condicions de l'assaig cíclic.....	187
A2.4.2. Gràfics moment – desplaçament de l'actuador.....	190

## Índex de figures

Figura 1. 1. Diagrama de flux.....	24
Figura 2. 1. Barca de Lambot (esquerra), Pont de formigó armat de Monier (dreta) [3] .....	28
Figura 2. 2. Teixit de fibra de carboni [5] .....	30
Figura 2. 3. Corba tensió-deformació del FRP [6].....	30
Figura 2. 4. Teixit de fibra de carboni (a), teixit de fibra de basalt (b) [8].....	32
Figura 2. 5. Corba tensió-deformació del FRCM [9] .....	32
Figura 2. 6. Càrrega última i deformació última de bigues de formigó reforçades amb FRP i FRCM [10] .....	33
Figura 2. 7. Geometria de la malla i tipus d'espècimens [11] .....	34
Figura 2. 8. Corbes càrrega-desplaçament [11] .....	34
Figura 2. 9. Comparació de l'increment de la capacitat a flexió (superior) i la rigidesa durant la fissuració (inferior) [12] .....	35
Figura 2. 10. Corbes tensió-deformació del FRCM de fibra de vidre [15].....	38
Figura 2. 11. Corbes tensió-deformació del FRCM de sisal (esquerra) i lli (dreta) [15] .	38
Figura 2. 12. Corba tensió-deformació del fibrociment [16].....	39
Figura 2. 13. Corba tensió-deformació mitjana per les fibres de sisal hornificades. [16] .....	39
Figura 2. 14. Corbes tensió-desplaçament: Lli (blau) i PBO (taronja). Longituds: 50mm (esquerra) i 100mm (dreta)[17].....	40
Figura 2. 15. Corbes tensió-deformació [18].....	40
Figura 2. 16. Cicles d'histèresi de les parets d'obra de fàbrica [19].....	41
Figura 2. 17. Fallada dels models numèrics de FRCM [19].....	47

Figura 2. 18. Comparació de les corbes tensió-deformació experimental i models analítics i numèrics [19].....	47
Figura 2. 19. Corba tensió-deformació ACK [32].....	48
Figura 2. 20. Resultats experimentals i del model ACK [32].....	51
Figura 2. 21. Comparació entre les corbes experimentals i analítiques del FRCM de cable: malla 25 mm (a), malla 50 mm (b)[28].....	52
Figura 2. 22. Comparació entre corbes experimentals i analítiques del FRCM de: malla 25 mm longitudinal (a), malla 25 mm transversal (b), malla 50 mm longitudinal (c), malla 50 mm transversal (d) [28].....	53
Figura 2. 23. Comparació entre el model ACK i l'experimental. [1].....	54
Figura 2. 24. Comportament teòric del formigó armat [39].....	56
Figura 3. 1. Fils col·locats al marc.....	63
Figura 3. 2 Aplicació de 5cm de FRP de fibra de vidre. ....	64
Figura 3. 3. Configuració de l'assaig de tracció de fils.....	64
Figura 3. 4. Corbes càrrega-estensòmetre dels fils de cotó.....	65
Figura 3. 5. Corbes càrrega-estensòmetre dels fils de cànem.....	66
Figura 3. 6. Espècimens de pull-out.....	68
Figura 3. 7. Muntatge de l'assaig a tracció (esquerra), detall de la subjecció de la base (dreta).....	69
Figura 3. 8. Corbes Càrrega-estensòmetre dels assaigs de pull-out de cànem, 20mm. 70	
Figura 3. 9. Corbes Càrrega-estensòmetre dels assaigs de pull-out de cotó, 20mm.....	70
Figura 3. 10. Corbes Càrrega-estensòmetre dels assaigs de pull-out de cànem, 30mm 70	
Figura 3. 11. Corbes Càrrega-estensòmetre dels assaigs de pull-out de cotó, 30mm... 71	
Figura 3. 12. Configuració de les malles (esquerra) i malla de cànem recoberta (dreta).....	72
Figura 3. 13. Espècimens de malla.....	73
Figura 3. 14. Configuració d'assaig de tracció de malles.....	73
Figura 3. 15. Corbes Càrrega-estensòmetre dels assaigs de pull-out de cànem, 30mm 74	
Figura 3. 16. Corbes Càrrega-estensòmetre dels assaigs de pull-out de cotó, 30mm... 75	
Figura 3. 17. Primera capa de morter.....	77

Figura 3. 18. Col·locació de la malla .....	77
Figura 3. 19. Segona capa de morter.....	77
Figura 3. 20. Espècimens de FRCM.....	78
Figura 3. 21. Configuració de l'assaig a tracció de FRCM amb Clevis Grip.....	78
Figura 3. 22. Corbes Càrrega-Extensòmetre dels FRCM de cànem.....	80
Figura 3. 23. Corba càrrega - extensòmetre dels FRCM de cotó.....	80
Figura 3. 24. Modes de fallada del FRCM.....	81
Figura 3. 25. Utilització de l'escleròmetre [48] .....	84
Figura 3. 26. Gràfic de conversió de l'escleròmetre.....	85
Figura 3. 27. Exemple d'assaig d'ultrasons.....	86
Figura 4. 1. Tipus d'assaigs d'adherència [50].....	88
Figura 4. 2. Corbes tensió - desplaçament possibles a un assaig d'adherència 'single-lap' [50].....	89
Figura 4. 3. Classificació dels modes de fallada.....	89
Figura 4. 4. Espècimen de double-lap [53] .....	91
Figura 4. 5. Geometria de l'assaig d'adherència per flexió entre l'acer de l'armadura i el formigó [55].....	92
Figura 4. 6. Geometria de les biguetes d'adherència.....	92
Figura 4. 7. Procés de reforç dels espècimens: fabricació de la malla (esquerra), reforç de les bigues (dreta) .....	93
Figura 4. 8. Distàncies entre suports i entre punts d'aplicació .....	94
Figura 4. 9. Configuració de la zona d'assaig.....	94
Figura 4. 10. Sensorització.....	94
Figura 4. 11. Corbes de càrrega - desplaçament de l'actuador de l'assaig d'adherència per flexió.....	96
Figura 4. 12. Fissuració dels diferents casos: cànem (esquerra), cotó (dreta).....	97
Figura 4. 13. Comparació de les mitjanes per a cada longitud d'adherència .....	98
Figura 4. 14. Comparació de les mitjanes per a cada fibra .....	98
Figura 5. 1. Secció de les bigues de formigó armat.....	100

Figura 5. 2. Armadures de les bigues.....	101
Figura 5. 3. Modes de vibració. ....	101
Figura 5. 4. Distribució dels punts d'impacte sobre la biga.....	102
Figura 5. 5. Malla per bigues de flexió.....	102
Figura 5. 6. Biga abans i després de la utilització del martell mecànic .....	103
Figura 5. 7. Marc col·locat a la biga .....	103
Figura 5. 8. Col·locació de la primera capa de morter i mesura.....	103
Figura 5. 9. Malla col·locada sobre la primera capa .....	104
Figura 5. 10. Malla recoberta amb la segona capa de morter i comprovació .....	104
Figura 5. 11. Biga reforçada en temps de presa i enduriment.....	104
Figura 5. 12. Fotografia de l'equipament extreta dels catàlegs.....	105
Figura 5. 13. Elements de subjecció de les bigues .....	105
Figura 5. 14. Impacte amb el martell (esquerra), coherència ideal (dreta) .....	106
Figura 5. 15. Superposició dels impactes i freqüència dels modes de vibració .....	107
Figura 5. 16. Primer mode de flexió .....	107
Figura 5. 17. Primer mode de torsió.....	107
Figura 5. 18. Test set-up .....	112
Figura 5. 19. Desplaçament de l'actuador durant l'assaig de flexió cíclica.....	113
Figura 5. 20. Corba força desplaçament per al càlcul de la tenacitat [57].....	115
Figura 5. 21. Fallada EPCO2 .....	117
Figura 5. 22. Fallada EPHE 2 .....	117
Figura 5. 23. Fallada PESCO 2 .....	118
Figura 5. 24. Fissuració biga PESHE 1. ....	118
Figura 5. 25. Força/Desplaçament - temps EPCO2.....	121
Figura 5. 26. Moment - desplaçament EPCO2.....	122
Figura 5. 27. Moment - desplaçament de l'assaig de flexió sense descàrregues .....	123
Figura 5. 28. Degradació de la rigidesa a flexió .....	124
Figura 5. 29. Degradació de la rigidesa EPCO .....	125
Figura 5. 30. Degradació de la rigidesa EPHE .....	125
Figura 5. 31. Degradació de la rigidesa PESCO .....	126
Figura 5. 32. Degradació de la rigidesa PESHE .....	126
Figura 5. 33. Degradació de la rigidesa per cicle .....	127

Figura 5. 34. Energia dissipada .....	128
Figura 5. 35. Factor d'amortiment .....	129
Figura 5. 36. Determinació del desplaçament de plastificació .....	130
Figura 5. 37. Evolució de la tenacitat.....	131
Figura 5. 38. Comparació dels paràmetres al màxim .....	132
Figura 5. 39. Comparació dels paràmetres per la ruptura .....	133
Figura 5. 40. Comparació dels desplaçaments .....	134
Figura 6. 1. Calibració i validació dels models numèrics .....	139
Figura 6. 2. Biga de formigó simulada .....	139
Figura 6. 3. Biga amb armadures.....	140
Figura 6. 4. Biga reforçada simulada .....	141
Figura 6. 5. Comportament de l'acer.....	142
Figura 6. 6. Detall de l'aresta de càrrega i plànol de simetria.....	144
Figura 6. 7. Anàlisi de convergència .....	145
Figura 6. 8. Mallat de les bigues simulades.....	145
Figura 6. 9. Càrrega i descàrrega de l'assaig cíclic.....	146
Figura 6. 10. Comparació biga de control simulada i experimental.....	146
Figura 6. 11. Biga reforçada amb malla de cotó recoberta amb epoxi simulada .....	147
Figura 6. 12. Biga reforçada amb FRCM de cànem recobert amb epoxi simulada .....	148
Figura 6. 13. Diferència de càrrega entre EPCO simulada i experimental .....	149
Figura 6. 14. Diferència de càrrega entre EPHE simulada i experimental.....	149
Figura 6. 15. Biga reforçada amb FRCM de cotó recobert amb polièster.....	150
Figura 6. 16. Biga reforçada amb FRCM de cànem recobert amb polièster .....	150
Figura 6. 17. Comparació de càrrega entre PESCO simulada i experimental.....	151
Figura 6. 18. Comparació entre PESHE simulada i experimental .....	151
Figura A1. 1. Dominis de deformació de bigues de formigó armat [67] .....	169
Figura A1. 2. Secció d'una biga de formigó armat [68] .....	169
Figura A1. 3. Distribució de càrregues.....	170
Figura A1. 4. Secció final de les bigues a flexió. ....	174

Figura A1. 5. Secció rectangular de la biga [68] .....	174
Figura A2.1. 1. Càrrega - extensòmetre del fil de cotó.....	178
Figura A2.1. 2. Càrrega - extensòmetre de EPCO.....	178
Figura A2.1. 3. Càrrega - extensòmetre de PESCO.....	178
Figura A2.1. 4. Càrrega - extensòmetre de GACO.....	179
Figura A2.1. 5. Càrrega - extensòmetre de GAUCO.....	178
Figura A2.1. 6. Càrrega - extensòmetre de COLACCO.....	179
Figura A2.1. 7. Càrrega - extensòmetre de COLTURCO.....	179
Figura A2.1. 8. Càrrega - extensòmetre de PDMSCO.....	180
Figura A2.1. 9. Càrrega - extensòmetre del fil de cànem.....	179
Figura A2.1. 10. Càrrega - extensòmetre de EPHE.....	180
Figura A2.1. 11. Càrrega - extensòmetre de PESHE.....	180
Figura A2.1. 12. Càrrega - extensòmetre de GAHE.....	181
Figura A2.1. 13. Càrrega - extensòmetre de GAUHE.....	180
Figura A2.1. 14. Càrrega - extensòmetre de COLACHE.....	181
Figura A2.1. 15. Càrrega - extensòmetre de COLTURHE.....	181
Figura A2.1. 16. Càrrega - extensòmetre de PDMSHE.....	182
Figura A2.2. 1. Càrrega - extensòmetre de la malla EPCO .....	182
Figura A2.2. 2. Càrrega - extensòmetre de la malla PESCO.....	183
Figura A2.2. 3. Càrrega - extensòmetre de la malla GACO.....	182
Figura A2.2. 4. Càrrega - extensòmetre de la malla COLTURCO.....	183
Figura A2.2. 5. Càrrega - extensòmetre de la malla EPHE.....	183
Figura A2.2. 6. Càrrega - extensòmetre de la malla PESHE.....	184
Figura A2.2. 7. Càrrega - extensòmetre de la malla GAHE.....	183
Figura A2.2. 8. Càrrega - extensòmetre de la malla COLACHE.....	184



Figura A2.3. 1. Càrrega - extensòmetre del FRCM EPCO.....	183
Figura A2.3. 2. Càrrega - extensòmetre del FRCM PESCO.....	185
Figura A2.3. 3. Càrrega - extensòmetre del FRCM GACO.....	183
Figura A2.3. 4. Càrrega - extensòmetre del FRCM COLTURCO.....	185
Figura A2.3. 5. Càrrega - extensòmetre del FRCM EPHE.....	184
Figura A2.3. 6. Càrrega - extensòmetre del FRCM PESHE.....	186
Figura A2.3. 7. Càrrega - extensòmetre del FRCM GAHE.....	184
Figura A2.3. 8. Càrrega - extensòmetre del FRCM COLACHE.....	186
Figura A2.4. 1. Aplicació de la càrrega de flexió estàtica a les bigues de control .....	187
Figura A2.4. 2. Aplicació de la càrrega de flexió cíclica a les bigues reforçades amb EPCO .....	188
Figura A2.4. 3. Aplicació de la càrrega de flexió cíclica a les bigues reforçades amb EPHE .....	188
Figura A2.4. 4. Aplicació de la càrrega de flexió cíclica a les bigues reforçades amb PESCO .....	189
Figura A2.4. 5. Aplicació de la càrrega de flexió cíclica a les bigues reforçades amb PESHE .....	189
Figura A2.4. 6. Corba moment - desplaçament de l'actuador de les bigues de control .....	190
Figura A2.4. 7. Corba moment - desplaçament de l'actuador de les bigues reforçades amb EPCO .....	191
Figura A2.4. 8. Corba moment - desplaçament de l'actuador de les bigues reforçades amb EPHE.....	191
Figura A2.4. 9. Corba moment - desplaçament de l'actuador de les bigues reforçades amb PESCO .....	192
Figura A2.4. 10. Corba moment - desplaçament de l'actuador de les bigues reforçades amb PESHE.....	192

# Índex de taules

Taula 1. 1. Relació assajos i nombre d'especímens.....	26
Taula 2. 1. Comparació entre fibres naturals i sintètiques [13] .....	36
Taula 2. 2. Comparació entre fibres naturals i sintètiques [14] .....	37
Taula 2. 3. Informació Model ACK Larrinaga [27].....	50
Taula 2. 4. Resultats model ACK Larrinaga [27].....	50
Taula 2. 5. Padalu et al. Models analítics. [28] .....	51
Taula 2. 6. Paràmetres de l'equació 2.7 [28].....	52
Taula 2. 7. Model ACK aplicat per Mercedes et al.[1] .....	54
Taula 3. 1. Propietats del morter.....	60
Taula 3. 2. Propietats dels fils donades pel fabricant.....	60
Taula 3. 3. Propietats de les resines epoxi i polièster .....	61
Taula 3. 4. Preparació dels recobriments .....	63
Taula 3. 5. Resultats de l'assaig de tracció de fils.....	65
Taula 3. 6. Resultats de l'assaig a pull-out.....	69
Taula 3. 7. Resultats de l'assaig a tracció de malles .....	74
Taula 3. 8. Resultats experimentals dels FRCM a tracció.....	79
Taula 3. 9. Pes i densitat mitjana del formigó .....	84
Taula 3. 10. Resistència a compressió per esclerometria .....	85
Taula 3. 11. Resultats de l'assaig d'ultrasons .....	86
Taula 4. 1. Resultats de l'assaig d'adherència per flexió.....	95
Taula 5. 1. Resultats de l'anàlisi modal .....	108
Taula 5. 2. Relació entre espècimens i amassades.....	109
Taula 5. 3. Valors mitjans de freqüència i amortiment pels modes de vibració de bigues no reforçades.....	109



Taula 5. 4. Valors mitjans de freqüència i amortiment post-reforç .....	110
Taula 5. 5. Dades dels materials .....	110
Taula 5. 6. Terme inclosos en l'arrel quadrada de l'equació X.....	110
Taula 5. 7. Resultats de l'assaig de flexió cíclic.....	119
Taula 5. 8. Resultats de l'assaig a flexió per cada cas .....	120
Taula 6. 1. Propietats del formigó simulat .....	141
Taula 6. 2. Propietats de l'acer simulat .....	142
Taula 6. 3. Propietats del morter simulat.....	143
Taula 6. 4. Propietats de les malles de cànem simulades .....	143
Taula 6. 5. Propietats de les malles de cotó simulades.....	143
Taula A1. 1. Geometria de bigues assajades a flexió .....	167
Taula A1. 2. Paràmetres de disseny de l'armadura .....	168
Taula A1. 3. Armadura de tracció i compressió.....	171
Taula A1. 4. Paràmetres de les equacions 9.11, 9.12 i 9.13 .....	172
Taula A1. 5. Paràmetres de les equacions 9.16 i 9.17 .....	173
Taula A1. 6. Paràmetres de les equacions 9.26 i 9.26 .....	176

# CAPÍTOL I. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

## 1.1. Introducció

El formigó és un dels materials més utilitzats als sectors de la construcció i de l'enginyeria civil mundials degut a la seva bona resposta sota càrregues de compressió. Tot i això, la seva resposta sota altres càrregues tals com tracció, flexió... és molt baixa. Per aquesta raó, és comú trobar-lo combinat amb altres materials que supleixin aquesta deficiència.

El més conegut és el formigó armat, que consisteix a l'addició de barres d'acer a la matriu de formigó. Aquestes barres són les encarregades de suportar les sol·licitacions les quals el formigó no pot fer front, creant un material compost capaç de suportar més tipus de càrregues i més elevades.

Aquest nou material, conegut i utilitzat mundialment, és molt heterogeni. Les seves propietats i durabilitat poden variar segons els materials utilitzats a la seva preparació, les condicions de presa i enduriment, i les condicions ambientals de la zona on és fabricat.

També, l'increment de fenòmens naturals, com ventades, inundacions o terratrèmols a diferents parts del món, fa que les estructures es tornin més vulnerables, especialment a països en vies de desenvolupament, on els materials, la preparació i el manteniment del formigó armat poden no ser els adequats.

Sota aquest context, la rehabilitació i conservació d'estructures es torna un punt clau per satisfer les necessitats de la societat, ja que la demolició i reconstrucció comporta elevats costos tant econòmics com ambientals.

Concretament, com a part de rehabilitació d'estructures, el reforç d'aquestes és una necessitat en creixement motivada pels requeriments que tenen els desastres naturals, els canvis d'utilització dels edificis, l'increment de les càrregues aplicades i el requeriment de satisfer tots els estàndards de seguretat. Una de les respostes ha sigut la creació de materials compostos de reforç extern, que s'apliquen sobre l'estructura ja construïda per millorar les seves propietats mecàniques.

Hi ha dos grans tipus de materials compostos per a reforç d'estructures coneguts: *Fiber-Reinforced Polymer* (FRP) i *Fiber-Reinforced Cementitious Matrix* (FRCM).

El FRP, polímer reforçat amb fibres, ha estat estudiat pel reforç d'estructures de bigues de formigó amb diferents tipus d'aplicació, camises, juntes, capes. Consisteix en una matriu polimèrica que s'aplica sobre un teixit.

El FRCM, matriu cementícia reforçada amb fibres, s'ha desenvolupat com a possible substitutiu del FRP, on un teixit amb majors obertures, es col·locat en una matriu cementícia (com pot ser el morter). És una alternativa competitiva, ja que és més sostenible i no és tan tòxic com el FRP, també és interessant degut a la seva resistència al foc i la seva permeabilitat al vapor d'aigua.

En l'actualitat, els materials compostos utilitzats al reforç d'estructures estan fent front a dos inconvenients:

- L'elevat cost, tant econòmic com ambiental, de la utilització de fibres sintètiques d'altres prestacions.
- L'elevada rigidesa dels materials compostos, que redueix la dissipació d'energia sota càrregues dinàmiques o cícliques, i provoca concentracions de tensions a les estructures. Sobretot a la majoria de construccions habitacionals del món, que són formades per formigó poc competent o obra de fàbrica.

És en aquest punt on la substitució de les fibres sintètiques per fibres naturals comença a ser interessant i estudiada. La seva biodegradabilitat, cost assumible, baix pes específic i el seu potencial de dissipació d'energia suposa una oportunitat per dotar als materials compostos de reforç d'estructures un ventall més grans d'aplicacions.

Enfocant a les fibres d'origen vegetal, la comunitat científica està estudiant tant FRP com FRCM amb fibres vegetals, primerament com a reforç d'estructures d'obra de fàbrica sota càrregues dinàmiques. La recerca en el reforç de bigues de formigó armat encara té molt a ser estudiat.

Amb el propòsit de la societat de moure's cap a solucions més sostenibles, l'interès de la comunitat científica per entendre el comportament de les estructures reforçades amb materials compostos de fibres vegetals i la necessitat de reforçar estructures sota

càrregues cícliques a cauda de la seva localització, és on aquest projecte obté la seva raó de ser.

A aquest projecte, es proposa anar més enllà en la investigació del FRCM i desenvolupar un estudi del comportament d'una biga de formigó armat que (ja ha tingut un llarg període de vida útil) reforçada amb FRCM vegetal sota flexió cíclica.

Per fer-ho, es començarà amb una campanya de caracterització dels potencials materials de reforç amb l'objectiu d'una selecció de 4 casos a estudiar, els quals es seguiran estudiant mitjançant un assaig d'adherència del material compost al substrat de formigó, i finalment amb l'assaig a flexió cíclica de les bigues.

Les fibres seleccionades, cànem i cotó, són definides pels resultats de projectes anteriors d'aquesta línia de recerca al nostre grup d'investigació, així com el recobriment de control: la resina epoxi. [1]

D'aquesta manera queden seleccionats 2 dels 4 casos a estudiar.

La variable sobre la qual s'han explorat més opcions és el recobriment de la fibra. Si bé, amb el canvi de matriu s'obté un material més sostenible, és un fet que les fibres vegetals han de ser protegides del medi alcalí del morter. Els recobriments més usats solen ser resines sintètiques, com és l'epoxi, polièster, poliamida o altres. Un dels objectius ideals seria poder recobrir les fibres amb recobriments més sostenibles. Per aquest motiu es van considerar les resines vegetals de colfònia i goma aràbiga, el PDMS que és una silicona i una resina bio-epoxi amb un 30% de contingut biològic.

A través d'assajos de tracció de fils, malles i FRCM, s'estudia l'efecte de cadascun dels factors que hi intervenen a la resposta mecànica del material compost. També es realitza un assaig de pull-out per veure la interacció entre el fil recobert amb la matriu.

Amb els resultats de la campanya de caracterització es seleccionarà el o els recobriments per a la continuació de l'estudi. (En el cas que per cada una de les fibres un recobriment diferent donés una millora en les propietats mecàniques que no es veiés reflectit a l'altra fibra).

Al capítol III es donen més detalls de la campanya de caracterització.

L'assaig d'adherència amb el substrat, consistirà en l'adaptació de l'assaig d'adherència de les barres d'acer de reforç que ve definit per la normativa UNE EN 10080:2004.

Es durà a terme amb el recobriment de control i una fibra, l'estudi de la longitud efectiva d'adherència, mentre que per als altres dos casos, s'estudiarà només un dels casos:

- Cànem recobert amb epoxi
- Cotó recobert amb epoxi
- Cànem recobert amb un altre recobriment
- Cotó recobert amb un altre recobriment

Finalment, per als mateixos casos es reforçaran les bigues de formigó armat i s'assajaran a flexió a quatre punts. El protocol d'assaig es basa en el FRMA 461 [2]. Es duen a terme dos cicles per cada desplaçament, el qual és incrementat amb un factor d'1,4 respecte al desplaçament anterior, fins a arribar a 121mm de desplaçament.

## 1.2. Objectius

L'objectiu principal és contribuir al coneixement del comportament sota càrregues cícliques de bigues de formigó armat reforçat amb FRCM vegetal, tenint en compte diversos factors que s'involucren en les seves propietats mecàniques, com la resistència a flexió, la dissipació d'energia o el factor d'amortiment entre altres.

Per dur-ho a terme, és necessari estudiar els diferents materials que componen tant la biga com el material compost de reforç amb els següents objectius específics:

1. Estudiar les propietats mecàniques i la resposta a tracció dels diferents materials que conformen el material compost de reforç.

El FRCM és un material compost que té un comportament heterogeni. Per aquest motiu, s'estudiaran cada material per separat fins a finalment assajar provetes de FRCM vegetal. Estudiant fils, amb recobriment i sense, malles, FRCM i l'assaig de pull-out per determinar l'efecte del recobriment en la interacció amb la matriu. Es seleccionaran 4 casos d'estudi, tenint en compte dues fibres i els recobriments que millor compatibilitat amb la matriu tinguin.

2. Estudiar la compatibilitat entre el material compost de reforç i la matriu de formigó.

Perquè hi hagi una bona transmissió de càrrega entre la biga i el material compost, és necessari que hi hagi una certa compatibilitat entre la matriu de reforç. Per assegurar que el reforç col·laborarà amb la biga a l'assaig de flexió, primer s'estudiarà la seva adherència.

3. Estudiar el comportament de bigues de formigó armat reforçades amb FRCM vegetal sota càrregues cícliques.

Per veure l'efecte del reforç sobre les bigues de formigó, s'assajaran dues bigues de control a flexió estàtica, i a continuació els 4 casos de bigues reforçades. S'analitzaran les dades obtingudes per veure els efectes del recobriment. També, es proposarà un model numèric amb l'objectiu de ser capaços de predir el comportament de les bigues reforçades.

### 1.3. Metodologia

La metodologia pretén introduir al lector en la presa de decisions a l'hora de la realització del projecte.

A la Figura 1 es troba el diagrama de flux.

Seguint l'ordre dels objectius principals, primer es realitza una recerca bibliogràfica i s'escullen els fils i morter que s'utilitzaran com a base i es selecciona el recobriment com a variable a decidir.

Durant la campanya de caracterització, es proven diferents combinacions de recobriment fins a assolir les 2 combinacions que es continuaran estudiant per la campanya experimental de gran format, assolint els objectius 2 i 3.

Finalment, un cop acabada l'experimentació, es duran a terme models analítics i numèrics capaços de predir el comportament de bigues de formigó armat reforçades amb aquest tipus de reforç.



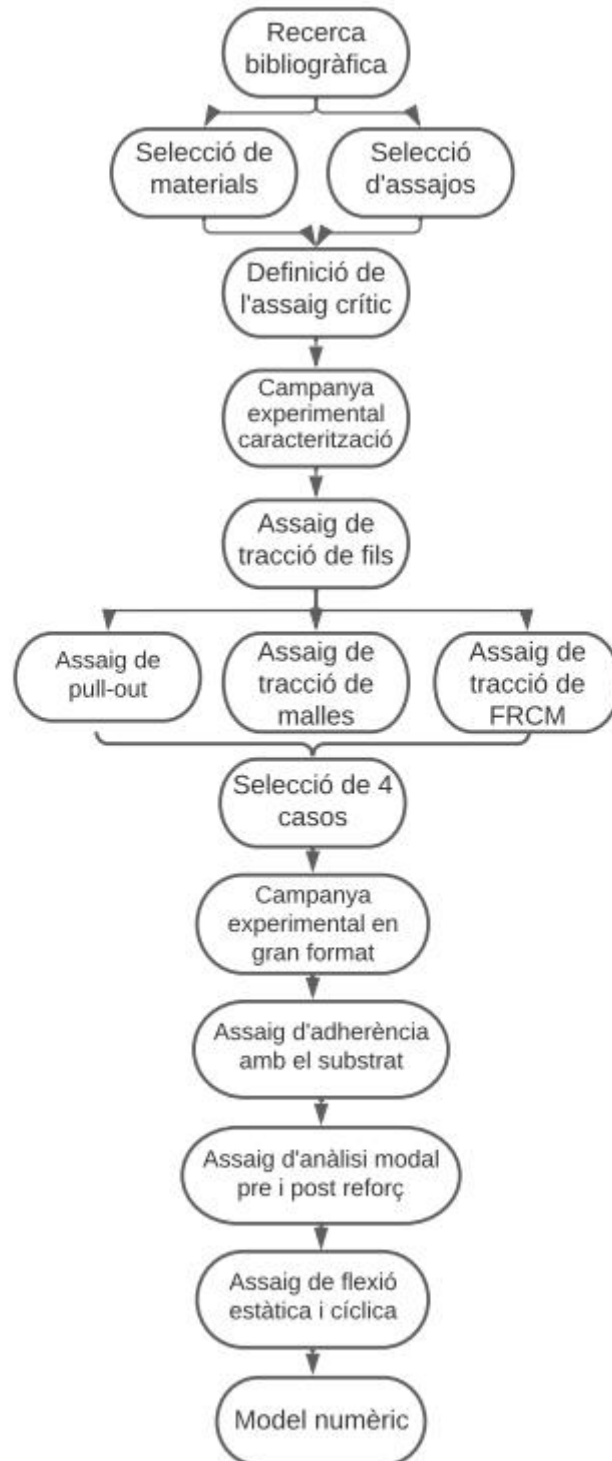


Figura 1. 1. Diagrama de flux

### 1.3.1. Definició d'espècimens per cada assaig

Un cop seleccionats els materials (es poden trobar en detall a l'apartat 3.2.2), cal detallar el procediment per la selecció dels 4 casos amb els quals es duran a terme els assajos

d'adherència amb el substrat i es reforçaran les bigues de formigó armat. Es considerarà el recobriment de control la resina epoxi, ja que és la més utilitzada en aquest sector.

Per fer-ho, l'assaig crític serà l'assaig de tracció dels fils.

Inicialment, es durà a terme un assaig de tracció de fils per determinar les propietats mecàniques dels fils.

A continuació, es recobriran els fils de cotó i cànem amb cada un dels 7 potencials recobriments, per determinar la variació de les propietats mecàniques.

L'assaig de tracció de fils recoberts proporcionarà l'efecte del recobriment sobre les propietats mecàniques dels fils. Es seleccionaran 4 recobriments. Dos sintètics i dos naturals.

Amb els 4 recobriments seleccionats es durà a terme els assaigs de pull-out amb dues alçades diferents (20 i 30mm), la tracció de les malles i la tracció dels FRCM.

Amb el conjunt de dades, i donant importància a l'assaig de tracció de FRCM es seleccionarà el recobriment escollit per reforçar les bigues d'adherència i flexió (tenint en compte que la resina epoxi és la de control).

La Taula 1.1 proporciona un resum del nombre d'assaigs duts a terme a la campanya experimental.

Taula 1. 1. Relació assajos i nombre d'espècimens

Assaig	Variables	Nombre d'assajos
Tracció de fils sense recobrir	2 tipus de fibres	6
Tracció de fils recoberts	2 tipus de fibres 8 tipus de recobriments	48
Definició dels 4 recobriments per continuar la caracterització		
Pull-out	2 tipus de fibres 2 alçades 4 tipus de recobriments	72
Tracció de malles	2 tipus de fibres 4 recobriments	36
Tracció de FRCM	2 tipus de fibra 4 recobriments	36
Definició dels dos recobriments finals		
Adherència amb el substrat	3 longituds d'adherència amb cànem i epoxi 1 longitud d'adherència amb cotó i epoxi 1 longitud d'adherència amb cotó l'altre recobriment 1 longitud d'adherència amb cànem i l'altre recobriment	18
Flexió cíclica de bigues de formigó armat	2 tipus de fibres 2 recobriments 2 bigues sense reforçar	14

D'aquesta manera queda clar el procediment dels assajos i la selecció de recobriments, així com la concreció del nombre d'assajos totals per a cada un dels assajos.

A continuació comencen els diferents capítols els quals engloben tots els passos definits al diagrama de flux de la Figura 1.1.

# CAPÍTOL II. ESTAT DE L'ART

## 2.1. Introducció

Aquest capítol pretén introduir al lector en la recerca passada i actual a l'àrea de reforç d'estructures de formigó.

En primer lloc, es presenta un resum de les estructures de formigó, la seva evolució a través dels anys i les raons darrere les noves necessitats de reforç.

Fins a arribar al desenvolupament del FRP i el FRCM com solucions, amb comparacions entre ambdós tipus.

Acabant amb la necessitat de la societat en tenir solucions més sostenibles i com les fibres vegetals són possibles substitutives de les sintètiques.

### 2.1.1. Estructures de formigó

Actualment les estructures més comunes que es troben de formigó estan formades amb ciment Portland. Aquest apareix al segle XVIII, quan Smeaton es proposà la construcció d'un far a un entorn amb condicions ambientals complicades. Va estudiar un aglutinant que permetia al formigó tenir una resistència considerable tot i ser submergit a l'aigua salada del mar, que consistia en una barreja de calç, guix, puzolana i argila. [3]

Més endavant, Vicat va desenvolupar un ciment artificial per la construcció d'un pont de formigó massís utilitzant una combinació de pedra calcària cremada i argila per obtenir el ciment. Finalment, el 1824 Aspdin va patentar la fabricació del ciment Portland, obtenint un ciment més resistent mitjançant l'ús d'una major temperatura d'escalfament.

Tot i això, una estructura no està únicament sotmesa a càrregues de compressió, sinó també a càrregues dinàmiques i variables com poden ser el vent, la neu o els terratrèmols entre altres.

A causa de la reduïda resposta del formigó sota diferents tipus de càrregues, era clar que era necessari afegir un material de reforç per desenvolupar estructures més resistents i versàtils.

Durant el segle XIX, amb el desenvolupament del formigó modern i l'acer, es va donar el desenvolupament del formigó armat. Joseph-Louis Lambot va desenvolupar el seu ferroçiment amb el qual va construir dues barques de rem( Figura 2.1). On al voltant dels 1850, obté les patents de les seves invencions. Monier, un jardiner francès, va desenvolupar caixes de formigó armat, amb les quals va arribar a construir el primer pont de formigó armat. [3]



Figura 2. 1. Barca de Lambot (esquerra), Pont de formigó armat de Monier (dreta) [3]

A partir d'aquell moment, l'ús del formigó armat al sector de la construcció es va disparar. Diverses patents i mètodes de construcció van ser desenvolupats, augmentant les aplicacions del formigó armat. Es va utilitzar en la construcció de lloses (per Coignet), per la construcció de ports (el Port de Chester per Ward) o el desenvolupament de les lleis fonamentals de la resistència aplicades al formigó armat per Hennebique, Considère, Rabut i Mesnager. [3]

El formigó armat es va consolidar com el principal material de construcció fins a l'actualitat.

Hi ha diversos tipus de formigó armat. El més comú és armat amb barres d'acer al seu interior, o l'ús combinat amb planxes perfilades d'acer. On l'acer absorbeix les càrregues que el formigó no pot suportar.

Molts estudis han desenvolupat maneres de predir, simular i elaborar estructures de formigó armat segures i resistents.

Però el formigó armat, com qualsevol altre material no té una vida útil infinita, tot i que tinguem estructures que daten de diversos segles enrere. La fatiga, un manteniment

inadequat, una pretensió inadequada o la corrosió són algunes de les raons per les quals la seva durabilitat es redueix. [4]

Degut a l'elevat cost, tant ambiental com econòmic, de la substitució d'una estructura que s'apropa al seu fi del cicle de vida, es desenvolupen el reforços per a estructures de formigó armat ja existents. Aquests permeten millorar les propietats mecàniques de l'estructura i allargar la seva vida útil.

## 2.2. Reforç d'estructures de formigó armat

En la millora, restauració, reparació, o renovació d'estructures, els materials compostos han donat grans resultats. [8] Actualment hi ha dos tipus de materials compostos de reforç d'estructures: Fiber-Reinforced Polymer (FRP) i Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM).

L'FRP és un dels materials compostos més utilitzats. Consisteix a una matriu polimèrica on una capa o varies de teixit són immerses, que s'afegeix de manera externa a una estructura existent de formigó.

La matriu polimèrica és una resina d'altres prestacions (normalment epoxy) que protegeix el teixit de les condicions ambientals externes i aglutina les capes.

El teixit normalment està format per fibres d'altres prestacions, que donen una resistència afegida a l'estructura de formigó a reforçar. Sent les fibres, materials anisotròpics, depenent de la necessitat es col·locaran les capes de manera unidireccional o bidireccional en el cas de tenir la necessitat que el material respongui a sol·licitacions en diverses direccions. Ja que les fibres donen resistència en la seva direcció longitudinal, en altres direccions poden provocar el trencament de les fibres.

En el cas del FRP, el teixit pot ser un laminat (Figura 2.2), pel fet que la resina pot penetrar entre les fibres aglutinant-les.



Figura 2. 2. Teixit de fibra de carboni [5]

Els materials compostos donen respostes com un únic material inicialment, i a mesura que la càrrega augmenta, poden o no anar transmetent la càrrega a zones concretes a mesura que les altres van arribant a la seva màxima col·laboració.

En el cas del FRP, aquest treballa com un únic material fins al seu trencament (Figura 2.3).

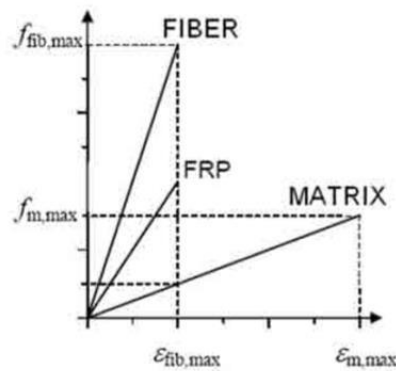


Figura 2. 3. Corba tensió-deformació del FRP [6]

El mode de fallada del FRP és fràgil, de manera que el seu comportament sota càrregues es manté a la zona de deformació elàstica. A la figura 3, es veu com la rigidesa de la fibra decreix a causa de la matriu polimèrica, però mantenint la deformació de les fibres. El resultat és un material menys rígid.

Com la necessitat a satisfer és la de reforçar estructures existents, es necessari desenvolupar materials compostos d'altres propietats mecàniques. Per aquest motiu,

l'ús de fibres sintètiques en els teixits és comú, tals com la fibra de carboni, de vidre de basalt o aramida entre altres.

També, a l'hora de considerar possibles matrius polimèriques, sent la resina epoxi la més utilitzada, també hi ha altres resines tals com les de polièster o vinil èster com matrius termoestables o la de polipropilè semicristal·lí o les de niló com a termoplàstiques. [7]

- El FRP, tot i tenir certs beneficis per ser utilitzat com a material de reforç, també presenta diversos inconvenients, tals com:
  - Cost elevat
  - Necessitat de formació dels treballadors per la seva aplicació
  - Toxicitat de les resines
  - Impossibilitat en l'aplicació de superfícies humides
  - Baixa resistència al foc
  - Incompatibilitat amb el substrat
  - Deposició contaminant.

Fa que es continuï investigant per al desenvolupament d'altres materials compostos que puguin tenir la mateixa aplicació.

El FRCM es desenvolupa com un possible substitutiu al FRP, més sostenible i econòmic, a causa de la seva matriu cementícia i l'ús de teixits més oberts. Mantenint les fibres d'altres prestacions com el material de reforç, però amb teixits més oberts reduint la quantitat de fibra, i utilitzant matrius tals com morter, que suposen menys toxicitat i més compatibilitat amb el substrat.

Altres inconvenients del FRP que resol el FRCM són:

- Baix cost dels materials.
- Formació més reduïda per als treballadors
- Matriu no tòxica
- Aplicació sobre superfícies humides o entorns de baixes temperatures.
- Resistència al foc

La geometria dels tèxtils, com ja s'ha comentat, és diferent, ja que els espais necessaris per deixar que penetri la matriu cementícia són més grans, per generar també el bloqueig mecànic (Figura 2.4).



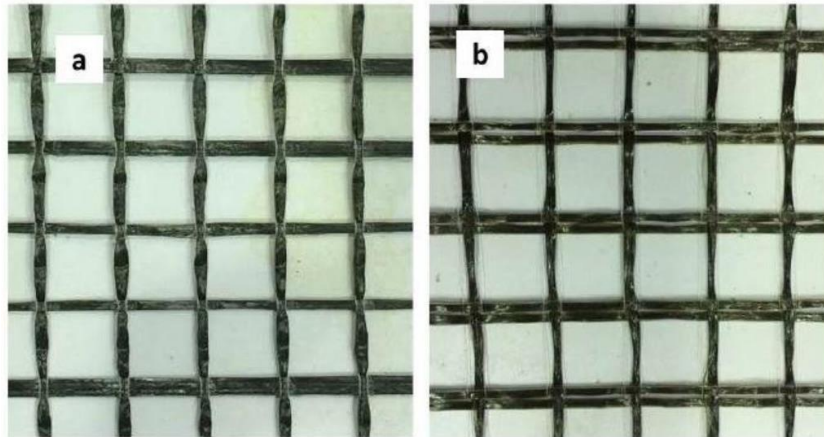


Figura 2. 4. Teixit de fibra de carboni (a), teixit de fibra de basalt (b) [8]

El FRCM també es comporta de manera diferent al FRP. Aquest consta de 3 etapes en les quals la càrrega es va distribuint entre els diferents materials que el conformen (Figura 2.5).

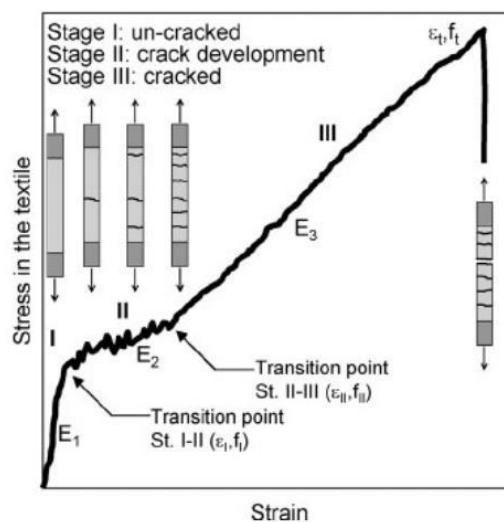


Figura 2. 5. Corba tensió-deformació del FRCM [9]

La primera etapa correspon des de l'inici de la sol·licitació fins que la matriu comença a fissurar. En aquesta etapa la matriu és la que suporta les càrregues aplicades. La segona etapa és la propagació de fissures. La matriu comença a reduir la càrrega que pot suportar i aquesta es transmet a les fibres del teixit que comencen a allargar-se, per aquest motiu no hi ha un increment significatiu de la tensió però sí de deformació. Un cop la matriu està totalment esgotada, s'arriba a la tercera etapa on les fibres són les que suporten tota la càrrega aplicada fins al seu trencament. [9]

Aquest tipus de deformació és un altre avantatge del FRCM sobre el FRP, ja que de forma visual es pot veure en quin estat es troba el material compost, i pot ser utilitzat com un senyal de la necessitat de tornar a reforçar l'estructura.

### 2.2.1. FRP vs FRCM

Molts estudis s'han dedicat a comparar l'aplicació de FRP o FRCM com a reforços per diverses estructures, i per diferents sol·licitacions com poden ser a tallant o flexió i amb diferents condicions ambiental com pot ser a altes temperatures.

L'any 2014, Baggio et al. Va comparar l'efecte de l'ús de FRP i FRCM com a reforç per a esforços de tallant per a estructures de formigó. Va utilitzar dos tipus de geometria de reforç, un reforç en U parcial o total. [10]

A través d'un assaig de flexió a 4 punts, utilitzant un actuador de 500kN de rang, es comparen les càrregues màximes a les quals arriben les diferents bigues reforçades.

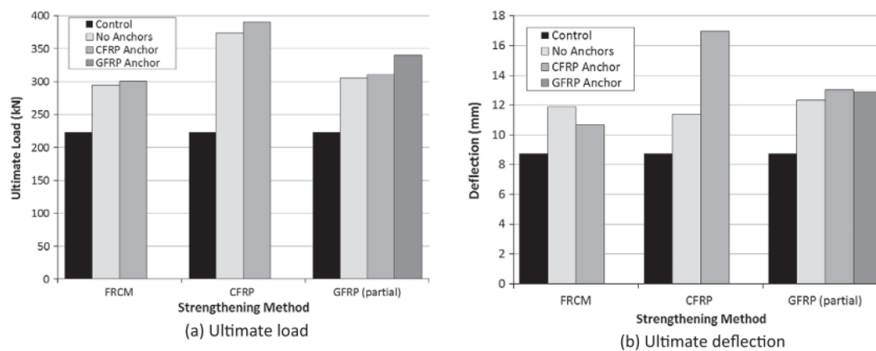


Figura 2. 6. Càrrega última i deformació última de bigues de formigó reforçades amb FRP i FRCM [10]

A la Figura 2.6 es mostra que tots els materials proporcionen resultats que es mantenen en el mateix ordre de magnitud, fent possible que l'FRCM sigui comparable al FRP.

En tots els casos, l'aplicació d'un reforç provoca un augment de la càrrega última superior al 30% i un augment de la deformació superior al 20%. Això és degut al fet que els reforços absorbeixen inicialment les càrregues de tracció i fins que aquest no s'esgota no comença a esgotar el substrat de formigó armat.

Tetta et al. va comparar l'efecte en tallant, dels diferents sistemes de reforç augmentant també el nombre de capes de teixit utilitzades a cada un d'ells, a través d'un assaig de flexió a 3 punts. [11]

Les diferents geometries utilitzades es veuen a la figura 7. S'utilitzen 3 tipus: adherència lateral, adherència en U i envoltament complet. El nombre de vapes varia en funció del tipus de geometria i de reforç (Figura 2.7).

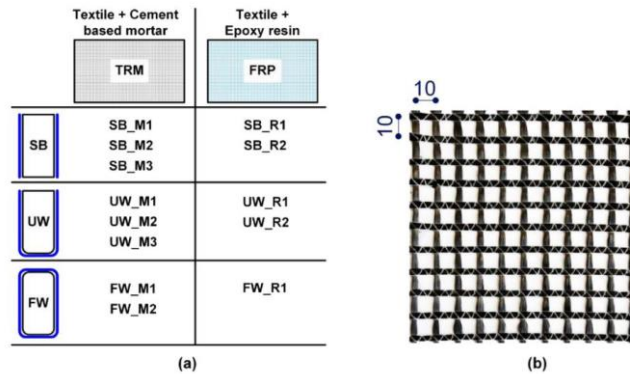


Figura 2. 7. Geometria de la malla i tipus d'espècimens [11]

Els resultats es troben exposats a la Figura 2.8. Com més capes de teixit són utilitzades, més elevada és la càrrega màxima que suporten els espècimens. També és interessant que per a obtenir un resultat similar, és necessari afegir una capa extra al TRM de la que es compara al FRP. Com que es les fibres de reforç són menors, amb l'addició de la nova capa s'aconsegueix que tingui més resistència gràcies a un bloqueig mecànic més gran. Per una altra banda, el TRM assoleix un desplaçament més elevat que el FRP gràcies al seu comportament per etapes.

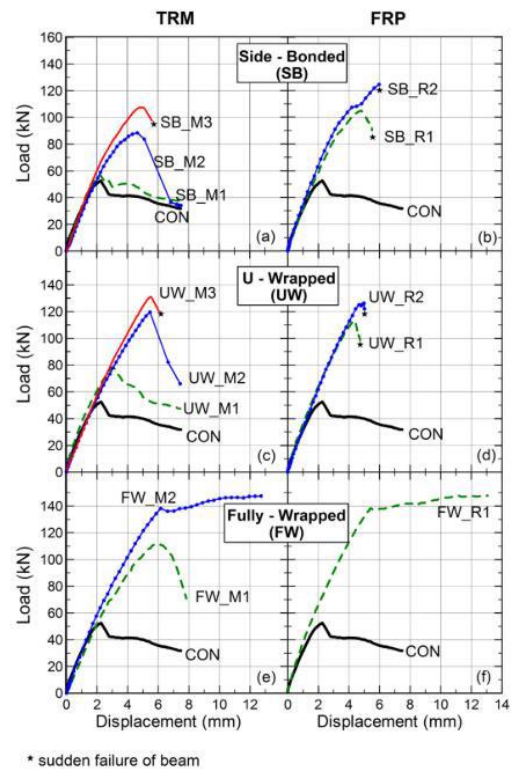


Figura 2. 8. Corbes càrrega-desplaçament [11]

Al 2017, Raoof et al. aplica FRP i FRCM per al reforç a flexió de bigues de formigó armat. Als paràmetres a estudiar, com als estudis anteriors es troben les fibres (carboni, basalt, vidre), nombre de capes (1,3,5,7) i l'ancoratge als extrems. Però també afegeix un nou paràmetre, que és el recobriment de la fibra en el cas del FRCM. [12]

Comparant el comportament del FRP i el FRCM (Figura 2.9), és clar que per a un mateix nombre de capes, el FRP proporciona més increment de la capacitat a flexió. Per aconseguir la mateixa, el FRCM necessita una capa extra i l'ús d'un ancoratge als extrems.

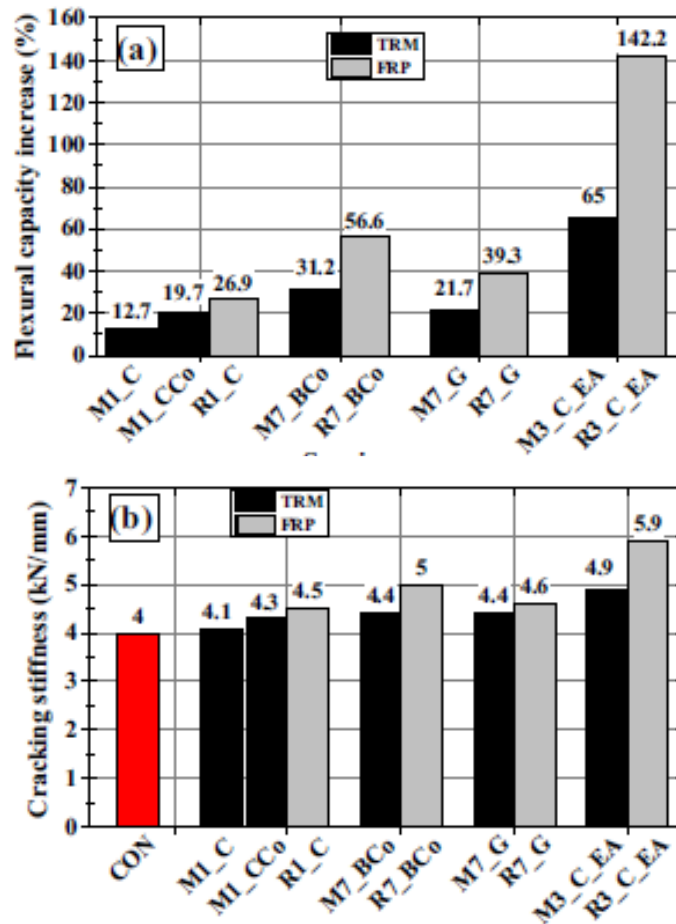


Figura 2. 9. Comparació de l'increment de la capacitat a flexió (superior) i la rigidesa durant la fissuració (inferior) [12]

Parant atenció a l'efecte del recobriment, es va estudiar l'efecte del recobriment aplicat a una capa de fibra de carboni. Utilitzar el recobriment suposa un augment de la rugositat superficial de la fibra, aconseguint una millor interacció amb la matriu cementícia, que comporta un augment del 55% respecte a l'ús de les fibres de carboni sense recobrir. [12]

Com a conclusió, el FRCM és un sistema de reforç d'estructures amb possibilitat de substituir el FRP.

Com s'ha comentat amb anterioritat, l'ús de les fibres sintètiques és estès a aquests tipus de reforç, a causa de les seves altes prestacions.

Un nou ventall d'aplicacions apareix quan es considera substituir les fibres sintètiques per fibres naturals, rebaixant el cost econòmic i ambiental que suposa la fabricació de les sintètiques.

### 2.3. Fibres naturals a materials compostos

El camp de les fibres naturals és ampli, ja que hi ha molts factors que determinen les seves propietats. El seu origen, la seva edat, els tractaments als quals han estat sotmeses i les condicions ambientals fan variar les seves propietats.

La Taula 2.1 compara diferents propietats de fibres naturals amb la fibra de vidre. Hi ha fibres que poden suportar càrregues del mateix ordre de magnitud, tals com la seda, en cànem o el lli, però amb deformacions superiors.

*Taula 2. 1. Comparació entre fibres naturals i sintètiques [13]*

Fibra	Densitat (kg/cm <sup>3</sup> )	Resistència a tracció (MPa)	Deformació a ruptura (%)	Mòdul d'elasticitat (GPa)
Fibra de vidre	2,5	2000 - 3000	2,5	70
Lli	1,5	345 - 1830	1,2 - 3,2	27 - 80
Cànem	1,5	550 - 1110	1,6	58 - 70
Sisal	1,3 - 1,5	507 - 855	2,0 - 2,5	9,4 - 28
Cotó	1,5 - 1,6	287 - 800	3,0 - 10,0	5,5 - 13

També, una altra dels avantatges de les fibres naturals és la reducció del seu impacte, ja que són més barates i més fàcils de fabricar, i més reciclables. Com es menciona a la Taula 2.2.

Taula 2. 2. Comparació entre fibres naturals i sintètiques [14]

	Fibres naturals	Fibra de vidre
Densitat	Baixa	El doble de les fibres naturals
Cost	Baix	Baix però més elevat que FN
Reciclabilitat	Si	No
Reposició	Si	No
Consum d'energia en la manufactura	Baix	Elevat
Distribució	Mundial	Mundial
Producció de CO <sub>2</sub> en la manufactura	Nul	Elevat
Risc a la salut si són inhalades	No	Si
Residu	Biodegradable	No biodegradable

A partir del 2000, la recerca en l'aplicació de fibres naturals en materials compostos s'ha incrementat.

Huang et al. [13] va estudiar l'efecte de l'aplicació d'un recobriment de FRP de lli sota un assaig de flexió a 4 punts, variant el nombre de capes, el reforç intern d'acer de les bigues i una fissuració inicial. Els resultats van mostrar que el FRP augmentava la càrrega última i la ductilitat de la biga a tots els casos, especialment per als casos amb menor reforç d'acer, provant que el FRP de lli és un sistema de reforç efectiu.

Wang et al. [14] va reforçar una biga de formigó armat amb FRP de lli, comparant l'efecte del recobriment dels teixits, als quals se'ls va aplicar un recobriment de Nano-TiO<sub>2</sub> i fibres de basalt. Les bigues reforçades amb el reforç recobert van donar una resistència més elevada que les no recobertes.

L'any 2014, Cevallos et al. [15] va estudiar els paràmetres del teixit i com influenciava el comportament mecànic del FRCM. Amb tres tipus de fibres (sisal, lli i vidre) i teixits bidireccionals, aplicant entre 1 i 3 capes, es van assajar FRCM sota assajos de tracció.

A les Figures 2.10 i 2.11 es mostren els diferents tipus de comportament del FRCM. Per al FRCM de fibra de vidre, es veuen clarament dues etapes, ja que l'etapa de la fissuració és gairebé inexistent i la seva fallada és dona per sota de l'1% de deformació.

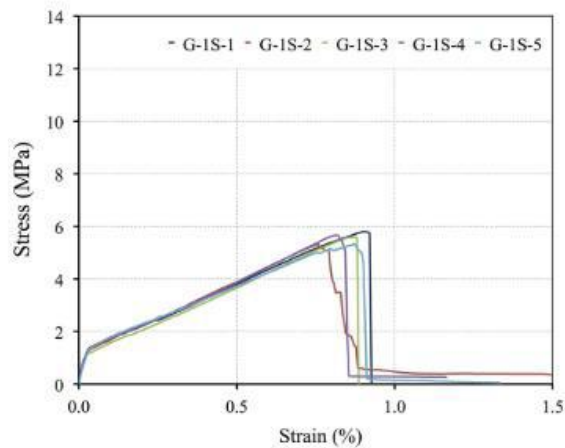


Figura 2. 10. Corbes tensió-deformació del FRCM de fibra de vidre [15]

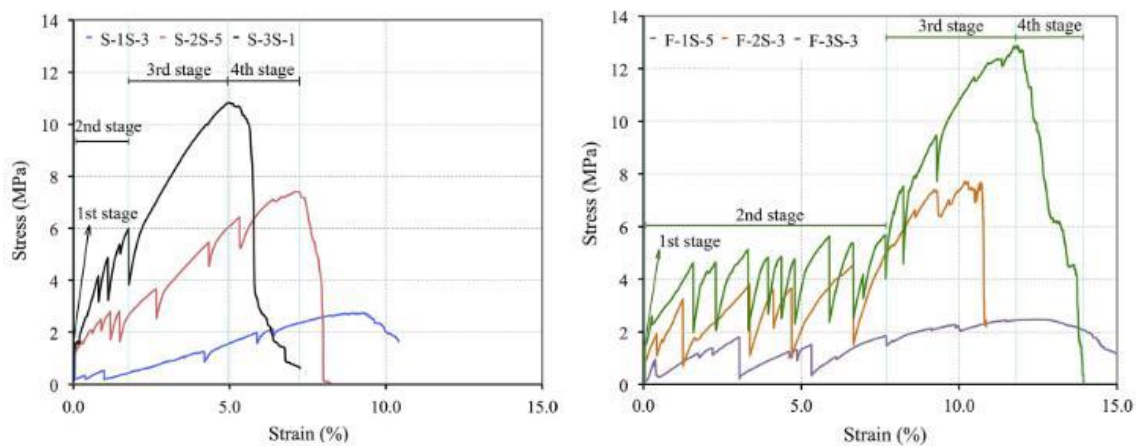


Figura 2. 11. Corbes tensió-deformació del FRCM de sisal (esquerra) i lli (dreta) [15]

Per les fibres naturals, es veuen les tres etapes ben diferenciades. Amb deformacions al moment de fallada d'entre el 5 i el 15%, a causa del potencial de deformació de les fibres.

També, es veu clarament l'efecte de les capes de teixit. Per a la fibra de vidre no és un increment significatiu, però per les fibres vegetals s'aconsegueix un increment superior al 25% per a ambdues fibres, a través d'un augment de les fissures a l'etapa de fissuració del FRCM.

Ardanuy et al. [16] va dur a terme una revisió sobre el fibro-ciment, comparant la recerca que es centrava en la disposició de les fibres, aleatòriament disposades o alineades, amb diferents tipus de fibres per a l'obtenció de materials de fibrociment variant el percentatge de les fibres (Figura 2.12).

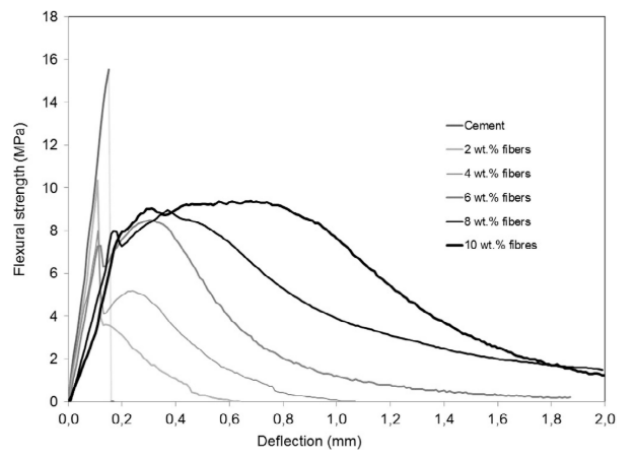


Figura 2. 12. Corba tensió-deformació del fibrociment [16]

L'addició de les fibres causa una reducció de la tensió màxima, però amb un augment de la seva deformació de 10 vegades més. L'addició de fibres provoca un augment de la tensió que pot suportar, la seva ductilitat i la seva deformació.

També, va estudiar la modificació dels materials per obtenir una millor interacció amb la matriu i la seva durabilitat, modificant la matriu (afegint compostos puzolànics) o modificant la superfície de les fibres (mitjançant l'hornificació o el tractament amb silici).

L'hornificació va proveir les fibres amb una més elevada estabilitat dimensional a través de cicles de mullat i assecat (*wet and dry cycles*).

Els resultats dels assajos de tracció i flexió es troben a la Figura 12. L'hornificació provoca un augment de l'etapa de fissuració.

Al sector de la construcció, els FRCM de fibres vegetals es troben majoritàriament en el reforç d'estructures d'obra de fàbrica.

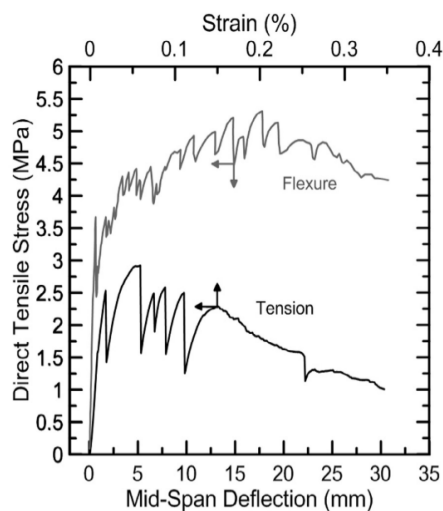


Figura 2. 13. Corba tensió-deformació mitjana per les fibres de sisal hornificades. [16]



Al 2016, Olivito et al. [17] va comparar la interacció entre FRMC de lli i FRMC de PBO aplicat a totxos d'argila utilitzant un assaig de tallant de doble capa, amb longituds adherides de 50 i 100mm (Figura 2.14).

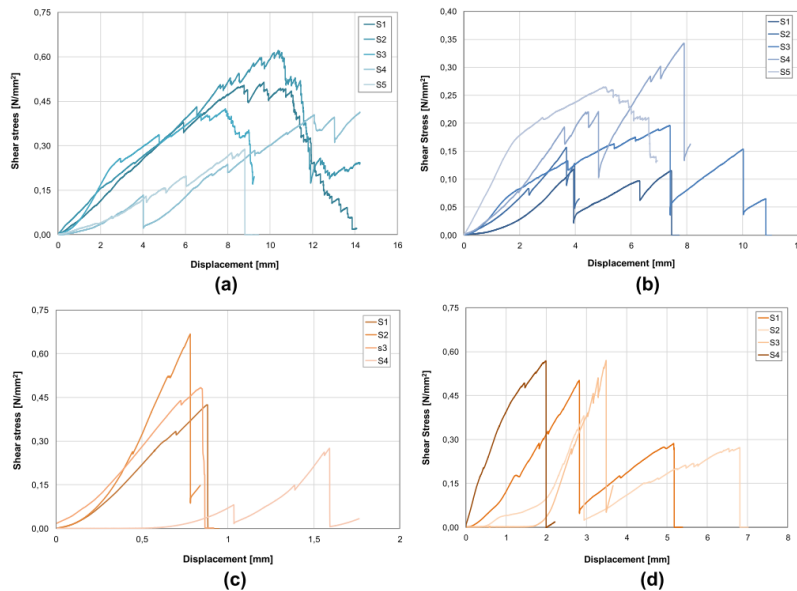


Figura 2. 14. Corbes tensió-desplaçament: Lli (blau) i PBO (taronja). Longituds: 50mm (esquerra) i 100mm (dreta)[17]

El FRMC de lli va mostrar tenir millors propietats mecàniques i interacció amb el substrat. La fibra vegetal, en general, manté la tensió màxima similar al PBO, però augmentant el desplaçament.

L'any 2018, Bello et al. [18] estudia l'efecte del FRMC de sisal per al reforç de l'obra de fàbrica. Caracteritzant el FRMC a través d'assajos de tracció, obtenint els modes de fallada i estudiant l'adhesió amb el substrat.

La comparació entre les fibres impregnades amb resina i les fibres sense impregnar es mostra a la figura 2.15. El recobriment de la fibra provoca una homogeneïtzació del comportament del material compost i un augment de la tensió màxima.

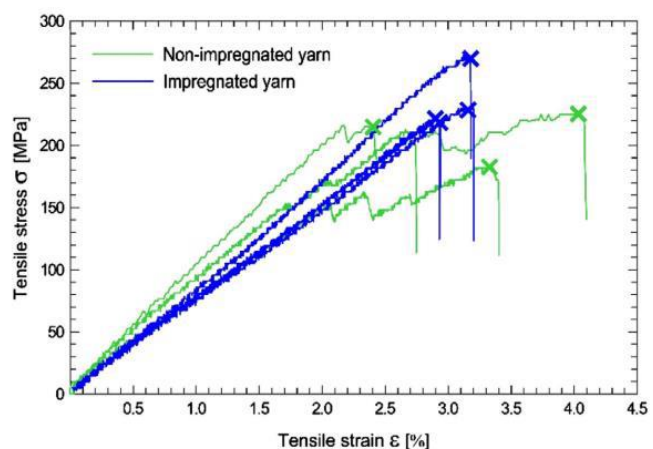


Figura 2. 15. Corbes tensió-deformació [18]

Luis Mercedes va estudiar el FRCM vegetals per al reforç de parets d'obra de fàbrica sota càrregues excèntriques [19]. Estudiant diferents fibres, teixits, recobriments i matrius cementícies, arriba a la conclusió que les combinacions més adients per aquesta aplicació consistien en malles de cotó i cànem recobertes amb resina epoxi. A la Figura 2.16, cinc parets d'obra de fàbrica van ser utilitzades a aquest estudi: una de control (WN), una reforçada únicament amb morter (WMN), una reforçada amb FRCM de fibra de vidre (WG), una reforçada amb FRCM de fibra de cotó (WC) i una reforçada amb fibra de cànem (WH). El protocol de càrrega cíclica va consistir en ASTM E2126-02a.

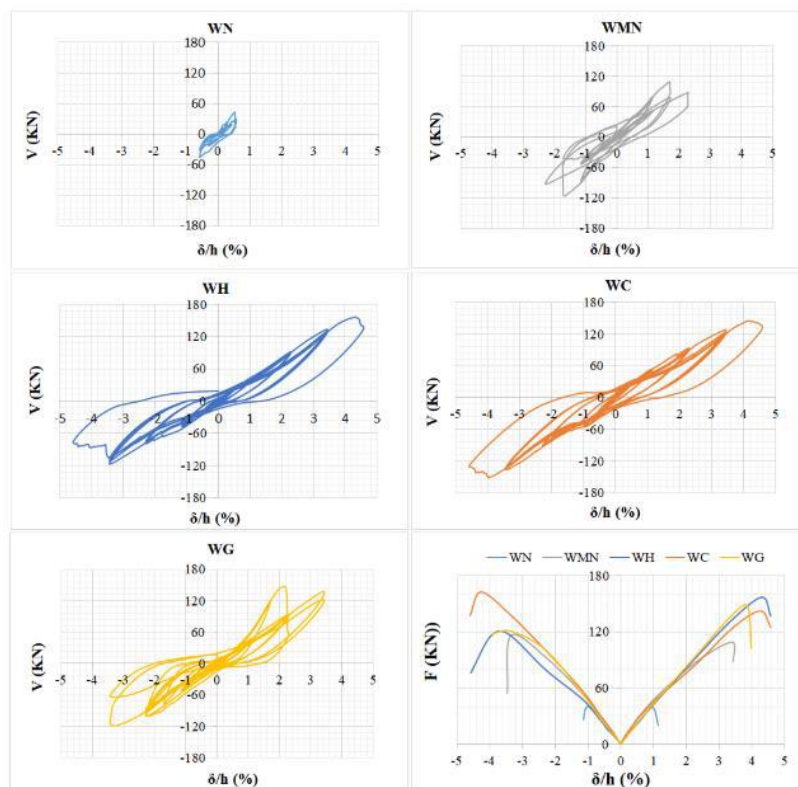


Figura 2. 16. Cicles d'histèresi de les parets d'obra de fàbrica [19]

Utilitzant com a referència la paret de control, totes les parets reforçades incrementen la mitjana d'envolents durant el desplaçament. Les parets reforçades amb FRCM, obtenen envolents més grans que la reforçada amb morter, a causa de l'actuació de les fibres.

El FRCM vegetal assoleix valors de desplaçament superiors als obtinguts del FRCM de fibra de vidre, ja que les seves envolents són més obertes.

El cotó, al ser més dúctil, provoca una major deformació mentre que el cànem, més rígid, obté suporta més càrrega.

Les fibres vegetals han demostrat ser possibles competidores de les fibres sintètiques en l'àmbit del reforç d'estructures.

Per reforçar estructures de formigó armat amb FRCM de fibres vegetals, encara hi ha molta recerca per endavant.

## 2.4. Modificació de la superfície del reforç amb fibres

La modificació superficial de les fibres en els materials compostos es duu a terme per dues raons principals: la millora en la interacció entre les fibres i la matriu, i també la protecció de les fibres vegetals en vers el medi alcalí de les matrius cementícies i les condicions ambientals externes.

El principal problema de les fibres vegetals és l'absorció d'aigua. Durant el període de presa i enduriment del morter, les fibres absorbeixen l'aigua amb pH bàsic del morter augmentant el seu diàmetre. Més endavant, aquesta aigua és alliberada als voltants de la fibra facilitant la seva degradació.

Per augmentar la seva durabilitat, la recerca pren dues posicions: per una banda, dotar la fibra d'estabilitat dimensional o recobrir-la amb un recobriment o un tractament.

Com a recobriment, les resines són les més habituals. La resina epoxi, polièster o altres, eviten el contacte de l'aigua amb la fibra. [1]

Modificant la superfície amb diferents tractaments com: tractament amb silici [16], tractament amb alcalins [20], acetilació [20], [21].

També, hi ha aplicacions de plasma [20], [22] que aconsegueixen activar la superfície de les fibres per a la seva modificació.

Enfocant-nos en la hornificació, Claramunt et al. [23] va estudiar la seva aplicació per millorar la durabilitat de la polpa de kraft de fusta tova y els línters del cotó en materials compostos de base cementícia. A través de 4 cicles d'assecament i humectació, es va mesurar la retenció d'aigua, la longitud, índex de rissat, viscositat i cristal·linitat. Augmentant el nombre de cicles, la retenció d'aigua, l'índex d'arissament, i la viscositat disminueixen, mentre que la cristal·linitat augmenta.

Per tots els casos, les mostres hornificades van assolir valors més elevats que les mostres no hornificades. Els línters del cotó i la pasta kraft van assolir valors màxims similars per ambdues mostres. La polpa de kraft va proporcionar una major ductilitat.

L'efecte que el tractament d'envelliment va tenir sobre les provetes és la pèrdua de propietats mecàniques.

Respecte a l'aplicació del plasma, Ventura et al. [22] van estudiar la variació de les propietats de les fibres després d'aplicar un tractament amb plasma corona, argó i etilè, a mostres de no teixits vegetals sota càrregues de tracció.

El plasma d'argó, va augmentar la resistència del no teixit, que pot se degut a un augment de fricció entre les fibres.

El plasma corona, va presentar resultats similars o inferiors, ja que un nombre de fibres més elevat van ser trencades durant l'assaig.

El plasma d'etilè va provocar la polimerització a la superfície de les fibres millorant les propietats mecàniques.

De tots els tractaments amb plasma, el plasma corona és el que es considera de bona relació cost-eficàcia.

#### 2.4.1. Recobriments naturals

De la mateixa manera que s'han substituït les fibres sintètiques amb fils de fibres naturals, també es va fer recerca en la possible substitució de les resines sintètiques tals com epoxi, polièster, vinil... per altres resines que tinguessin un origen més sostenible.

Abbas et al. [24] recobreix fibres vegetals amb una emulsió de cera d'abella que dona una interfase hidrofòbica per protegir les fibres del morter. Bakhtiari Ghaleh et al. [25] recobreix fibres amb resina i microsilica, mentre que Veloso de Carvalho et al. [26] ho fa amb polianina i magnetita per millorar la interfase amb la matriu de morter. També, Zhao et al. [27] millora la durabilitat de les fibres recobrint-les amb òxid de grafè.

Entre altres investigacions, es mostra que hi ha un interès de la comunitat científica en desenvolupar nous recobriments per aquest tipus de requeriment.

Per anar completament a resines vegetals, dos exemples són la colofònia i la goma aràbiga.

La colofònia és una resina de pi que s'utilitza a la indústria dels adhesius, recobriments i tintures. És una resina que no pot ser dissolta en aigua, de manera que calen altres solvents com l'acetona o la turpentina. [28] En la revisió de l'ús de la fibra de sisal en materials compostos basats en ciment realitzada per Tolêdo Filho et al. [29], l'ús de colofònia com a recobriments de fibres de sisal reduïa l'absorció d'aigua de les fibres.

La goma aràbiga, en canvi, s'utilitza a la indústria farmacèutica i alimentària. S'afegeix per donar flexibilitat als productes, variant entre una concentració en pes d'entre el 40 i el 80%. [30] Aquesta, a diferència de la colofònia, sí que és possible dissoldre-la en aigua, sotmetent-la a temperatures al voltant dels 60°C.

## 2.5. Predicció de comportament de bigues de formigó armat

Per poder predir el comportament de les estructures reforçades, es desenvolupen els models de predicció.

Aquests models poden ser analítics o numèrics.

Un model analític consisteix en, a través de paràmetres de l'estructura i expressions matemàtiques, predir el comportament sota una sol·licitació.

Un model numèric consisteix a la utilització d'un software on mitjançant calibració d'un model de l'espècimen assajat o a assajar, i a través de la caracterització dels seus materials, proporcionar una predicció del seu comportament.

A aquesta secció s'explicaran diversos casos de models de predicció.

### 2.5.1. Models numèrics de FRCM sota assajos de tracció

L'anàlisi pel mètode dels Elements finits (FEA) és una eina per al càlcul numèric molt potent. Permet simular el comportament de materials i analitzar la seva resposta estructural.

Per simular el FRCM, un dels grans inconvenients és el lliscament entre la matriu i les fibres, on els models de formigó armat convencionals no poden ser utilitzats.

Bertolesi et al. [31] va modelar FRCM a tracció a través de l'anàlisi en 2D de FEA. Per determinar els factors amb més influència, es van modelar 3 tipus: una configuració de fil no lineal, amb una deformació inicial del compòsit i amb una matriu inicialment fissurada. Els resultats van mostrar que la no-linealitat dels fils va influenciar les corbes

tensió-deformació, i per tant la seva rigidesa, així com la curvatura inicial. Els més corbats, van mostrar una rigidesa i tensió inferiors durant l'etapa II. També, la presència de microfissures va causar una reducció de la rigidesa a la transició entre les etapes II i III.

Larrinaga et al. [32] va simular 4 FRCM de basalt sota esforços de tracció, modificant el nombre de capes de basalt (1-4). Un model en 3D va ser desenvolupat, on el morter va ser caracteritzat amb un model de fractura plàstica i les fibres de basalt com a elements de tipus barra, caracteritzats per corbes tensió-deformació uniaxials. L'anàlisi era més acurat com més capes de reforç tenia el compòsit. Va simular correctament la deformació final de la segona etapa ( $\epsilon_{s,II}$ ).

Grande et al. [33] va estudiar el comportament a tracció de FRCM a través de simulació numèrica i ho va comparar amb altres referències [31], [32]. Proposant una esquematització en 1D on la interfase matriu-reforç és mallada amb una fila de molles no lineals.

Els diferents casos es poden dividir en el cas 1 (amb dues variacions) comparant amb [31] i el cas 2 que fa referència a la literatura [32].

El cas 1a: l'objectiu va ser examinar l'efecte en la matriu i el reforç únicament. Modificant el comportament de la matriu (fràgil, plàstic perfecte), els valors de resistència a tracció (0,75-1,25) i la posició de la càrrega (centrada, als extrems, aleatòria).

En el cas de plàstic perfecte, els resultats van ser sobreestimats, però paral·lels a les corbes experimentals a l'etapa III, arribat a una correctament predita tensió de fallada.

El cas 1b: l'objectiu era considerar el fenomen de la separació entre la matriu i el reforç. Mantinent el comportament fràgil amb una càrrega centrada a la molla de la matriu, i modificant la molla que simula la interfase: comportament fràgil amb i sense tensió residual després del màxim, i l'estovament lineal sense tensió residual.

Sense una tensió residual, van notar-se diverses baixades de tensió a l'etapa II a causa del procés de separació. Tot i això, les corbes són acurades comparant amb les experimentals.

Amb tensió residual, la separació del reforç de la matriu passa simultàniament a la fissuració de la matriu. On la separació només involucra petites parts del reforç en comptes de la totalitat de l'espècimen, com als altres casos.

El cas 2: a través de la literatura, considerant els mateixos valors de resistència a la tracció per a totes les molles de la matriu i de generació aleatòria entre 0,75 i 1,25. Als dos casos, considerant un comportament fràgil de les molles que representen el reforç i un estovament lineal per la molla de la interfase.

El model va ser acurat reproduint la resposta experimental, tenint en compte l'addició de diverses capes de reforç. Especialment amb la generació aleatòria de tensions que reproduïx l'increment del dany de la matriu durant l'etapa II.

Donnini et al. [34] va estudiar la influència del recobriment del reforç amb resina epoxi. A través d'un assaig de pull-out i un assaig d'adherència de doble capa, va desenvolupar un model per estudiar la resposta estructural. Per descriure les tres etapes del FRCM, van ser definits tres termes energètics: la zona de tallant elàstica, la fase de separació i el procés de fricció final. Les simulacions numèriques van aconseguir simular el comportament del FRCM. Per als espècimens sense recobriment, la longitud d'adherència efectiva va ser de 200mm, ja que incrementar la longitud no provocava un augment de la càrrega. Per als espècimens recoberts, es va donar un increment de la càrrega durant la fase de lliscament final, per un augment de la fricció entre la matriu i el reforç provocada pel recobriment.

Per aprofundir al tema del projecte, s'explicarà amb més detall la recerca duta a terme per Mercedes durant la seva tesi doctoral.

Mercedes va utilitzar Abaqus<sup>®</sup> per simular FRCM vegetal sota esforços de tracció directa. Quatre models van ser desenvolupats, un per cada fibra vegetal (Figura 2.17, cànem, lli, cotó i sisal) [19].

Per simular les malles vegetals es van utilitzar elements truss, un per cada flocc, per reduir els costos computacionals de les simulacions en 3D. També, la malla va ser considerada com inserida a la matriu, sense considerar cap desplaçament relatiu entre la malla i la matriu, per la bona adherència de la interfase.

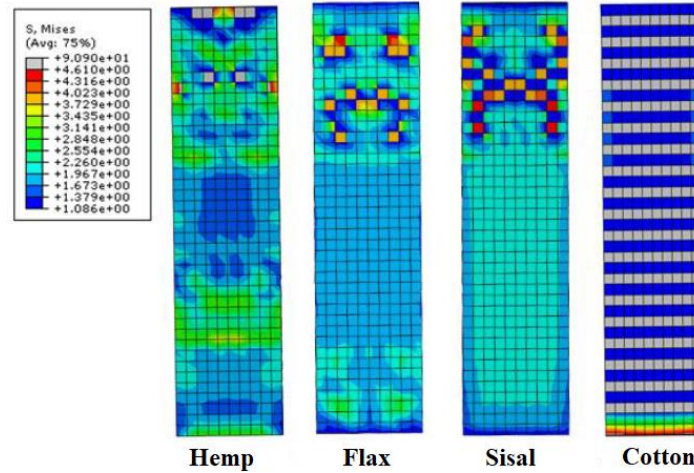


Figura 2. 17. Fallada dels models numèrics de FRCM [19]

Amb aquest ajustos va ser possible reduir la diferència entre els valors simulats i els experimentals i analítics (Figura 2.18).

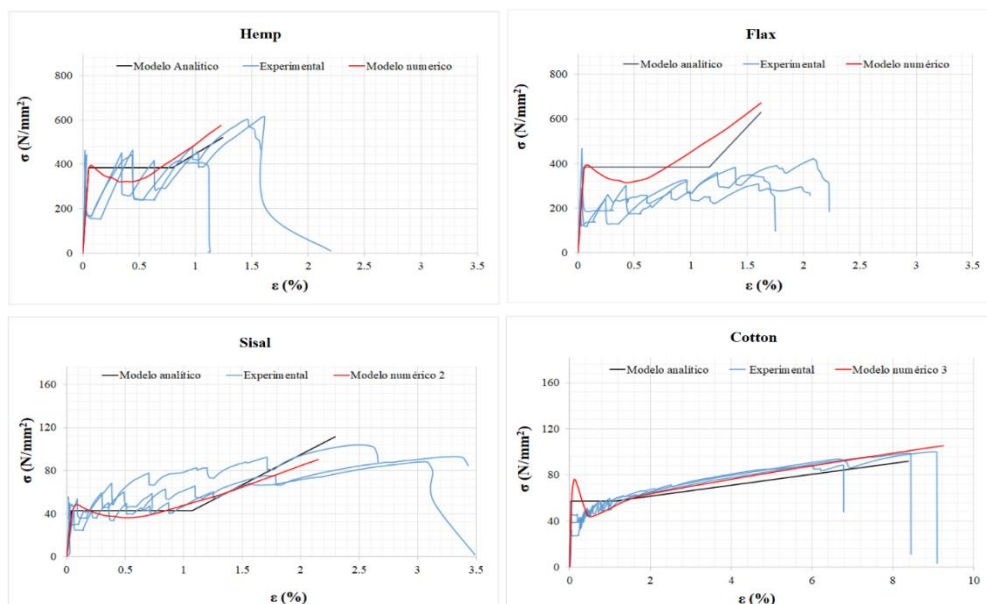


Figura 2. 18. Comparació de les corbes tensió-deformació experimental i models analítics i numèrics [19]

En general, als casos on la interacció entre la matriu i la fibra és suficientment bona, el comportament del FRCM pot ser predit per models analítics o numèrics. Tot i això, encara no s'ha trobat un model capaç de simular el creixement de la tensió durant la segona etapa.

### 2.5.2. Models analítics de FRCM sota assajos de tracció

Un dels models analítics més utilitzats per predir el comportament del FRCM sota esforços de tracció és el model Aveston-Cooper-Kelly (ACK). Consisteix a un model trilíneal que es basa en diferents hipòtesis. [32], [35]–[37]



Com s'ha explicat anteriorment, el model consta de 3 etapes (Figura 2.19):

- Etapa I: Des de l'inici fins que apareix la primera fissura a la matriu.
- Etapa II: Etapa de fissuració, fins que el morter es troba totalment fissurat.
- Etapa III: On tota la càrrega és suportada per les fibres.

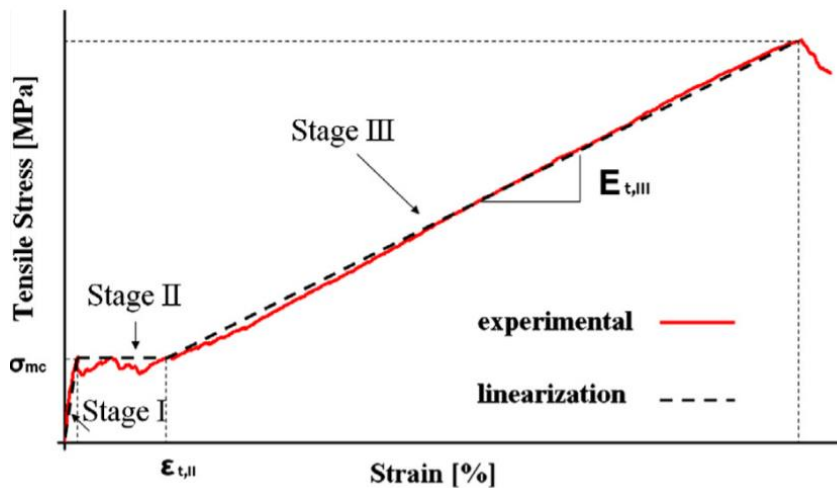


Figura 2. 19. Corba tensió-deformació ACK [32]

Les hipòtesis que es necessiten assumir per poder utilitzar aquest model són:

- Les fibres únicament suporten càrregues en la seva direcció longitudinal.
- Vincle entre la fibra i la matriu dèbil.
- Un cop les fibres es desprenen de la matriu, únicament s'apliquen les lleis de tallant per fricció, i és constant al llarg de la superfície despresa.
- Els efectes de Poisson de la matriu i les fibres són negligits.
- La càrrega es transmet de manera equilibrada a totes les fibres.
- Les tensions normals de la matriu són uniformes a la secció transversal.

Larrinaga et al. va estudiar el comportament del FRCM de basalt sota càrregues de tracció, variant el nombre de capes de 0 a 4) i va comparar els resultats experimentals amb els que prediu el model ACK.

A la primera etapa, s'aplica la llei de mescles:

$$E_{t,I} = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (2.1)$$

on  $E_{t,I}$  és el mòdul de Young teòric de la primera etapa.

$E_f$  és el mòdul de Young de les fibres.

$E_m$  és el modul de Young de la matriu.

$V_f$  i  $V_m$  són les fraccions volumètriques de la fibra i la matriu.

Aquesta etapa perdura fins que s'arriba a la tensió de fissuració de la matriu ( $\sigma_{mc}$ ). Aquest valor està influït directament per la tensió de fallada del morter ( $\sigma_{mu}$ ).

$$\sigma_{mc} = \frac{E_{t,I} \cdot \sigma_{mu}}{E_m} \quad (2.2)$$

Durant l'etapa de fissuració, una tensió constant de tallant per fricció  $\tau$  és considerada, pel despreniment de les fibres de la matriu a mesura que s'allarguen. La longitud de la zona despresada pot ser expressada per la força d'equilibri al llarg de l'eix longitudinal de les fibres:

$$\delta = \frac{V_m \cdot r \cdot \sigma_{mu}}{V_f \cdot 2 \cdot \tau} \quad (2.3)$$

on  $r$  és el radi de les fibres.

$\tau$  és la tensió de tallant per fricció entre la matriu i les fibres.

Coneixent que la distància entre fissures es troba a l'interval  $(\delta, 2 \delta)$ , que l'aparició de la fissura és aleatòria i que Widom va determinar la distància mitjana entre fissures és igual a  $X=1,333 \cdot \delta$ , la deformació de FRCM al final de l'etapa II es pot expressar com:

$$\varepsilon_{t,II} = (1 + 0,666 \cdot \alpha_e) \cdot \frac{\sigma_{mu}}{E_m} \quad (2.4)$$

On:

$$\alpha_e = \frac{E_m \cdot V_m}{E_f \cdot V_f} \quad (2.5)$$

A la tercera etapa, la matriu deixa de col·laborar en l'estar completament fissurada, de manera que les fibres suporten la càrrega aplicada. La rigidesa a l'etapa III es defineix com:

$$E_{t,III} = E_f \cdot V_f \quad (2.6)$$

Amb la informació de la Taula 2.3 es modela el comportament seguint el model ACK, amb els resultats obtinguts a la Taula 2.4.

Taula 2. 3. Informació Model ACK Larrinaga [27]

Paràmetre	Valor
$E_f$	67 GPa
$E_m$	8.25 GPa
$t_f$	0.0396 mm
$\sigma_{mu}$	2.48 MPa

Taula 2. 4. Resultats model ACK Larrinaga [27]

Series	$V_m (-)$	$V_f (-)$	$\varepsilon_{t,I} (GPa)$	$\sigma_{mc} (MPa)$	$\varepsilon_{t,II} (\%)$
TB1	0.9965	0.0035	8.46	2.54	0.734
TB2	0.9930	0.0070	8.66	2.60	0.381
TB3	0.9895	0.0105	8.87	2.67	0.263
TB4	0.9860	0.0140	9.07	2.73	0.204

A la Figura 2.20, es troben els resultats tant del model ACK com de la campanya experimental. El model ACK mostra una elevada correlació al comportament experimental i prova ser efectiu per al model del comportament del FRCM. La discrepància més gran es troba a l'etapa III, on el model manté una rigidesa superior a l'experimental, que és inferior per culpa de la ruptura dels filaments dels fils i del despreniment dels fils respecte de la matriu.

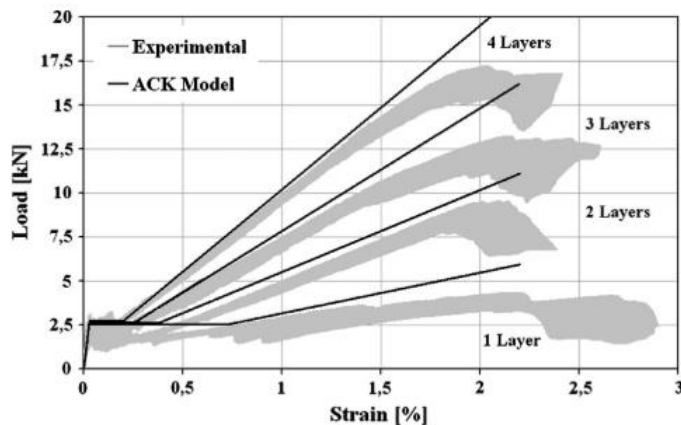


Figura 2. 20. Resultats experimentals i del model ACK [32]

Padalu et al. també va aplicar el model ACK per modelar el comportament de FRCM de basalt i de cable, amb malles de 25 i 50mm. [36]

Per fer-ho, també utilitza un altre model: el *Simplified Tri-linear Model* (STL) proposat per Minafo i Mendola [38].

La taula 2.5 compara les expressions utilitzades a cadascun dels models.

Taula 2. 5. Padalu et al. Models analítics. [28]

Nomenclatura	Definició	ACK model	STL model
$\sigma_{mc}$	Tensió de fissuració	$\frac{E_{t,I} \cdot \sigma_{mu}}{E_m}$	$\frac{\left(A_m + \frac{E_r}{E_m} \cdot A_r\right) \cdot \sigma_{mu}}{A_m + A_r}$
$\varepsilon_{t,I}$	Deformació corresponent a la tensió de fissuració	$\frac{\sigma_{mc}}{E_{t,I}}$	$\frac{\sigma_{mu}}{E_m}$
$\sigma_{mf}$	Tensió al final de l'etapa III	$E_{t,III} \cdot \varepsilon_{t,III}$	$f_{max} \cdot V_r + \sigma_{mu} \cdot V_m$
$\varepsilon_{t,III}$	Deformació al final de l'etapa III	$\frac{A_r \cdot f_{max}}{A_m \cdot E_{t,III}} - \frac{\sigma_{mc} - E_{t,III} \cdot \varepsilon_{t,III}}{E_{t,III}}$	$\frac{\sigma_{mf}}{E_r \cdot V_r}$
$E_{t,III}$	Mòdul d'elasticitat de l'etapa III	$E_r \cdot V_r$	$\frac{\sigma_{mf} - \sigma_{mc}}{\varepsilon_{t,III} - \varepsilon_{t,II}}$

On  $f_{max}$  és la resistència a tracció del reforç i el mòdul d'elasticitat del morter es calcula amb l'expressió 2.7:

$$E_m = 4.3 \cdot \frac{1}{\left(\frac{w}{c}\right)} + \frac{21 \cdot T}{T + 1.5} \quad (2.7)$$

Taula 2. 6. Paràmetres de l'equació 2.7 [28]

Nomenclatura i unitats	Definició	Valor
$\frac{w}{c}$ (-)	Relació aigua-ciment	0.48
T (days)	Període de presa i enduriment	28

La Figura 2.21 mostra els resultats dels dos models i els compara amb les corbes experimentals pel FRCM de cable.

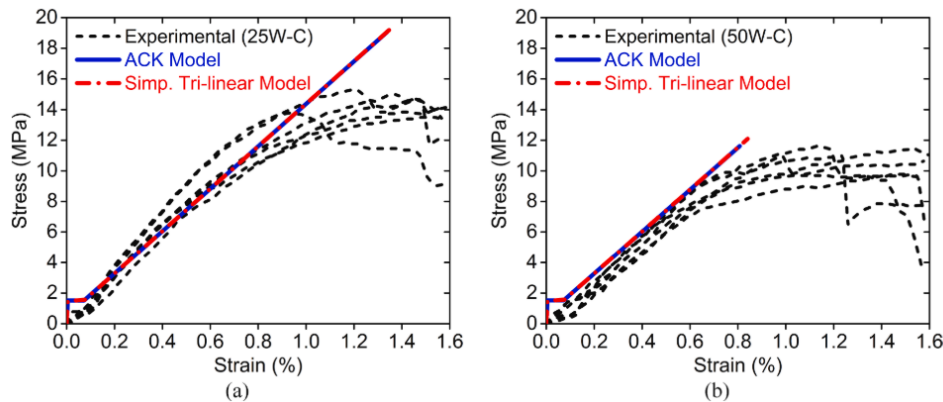


Figura 2. 21. Comparació entre les corbes experimentals i analítiques del FRCM de cable: malla 25 mm (a), malla 50 mm (b)[28]

Pels espècimens de cable, als dos models, la rigidesa inicial i la tensió màxima són sobreestimades en comparació amb els resultats experimentals.

La primera fissura i el pendent a l'etapa III són correctament predits per a ambdós casos de malla.

Per als espècimens de basalt (Figura 2.22), el comportament és sobreestimat en tots els casos. La rigidesa inicial pot ser deguda al càlcul empíric del mòdul d'elasticitat del

morter, i a l'etapa III a causa de la ruptura dels filaments de la fibra de basalt al llarg de l'assaig. També es pot donar pel lliscament dels espècimens a les mordaces.

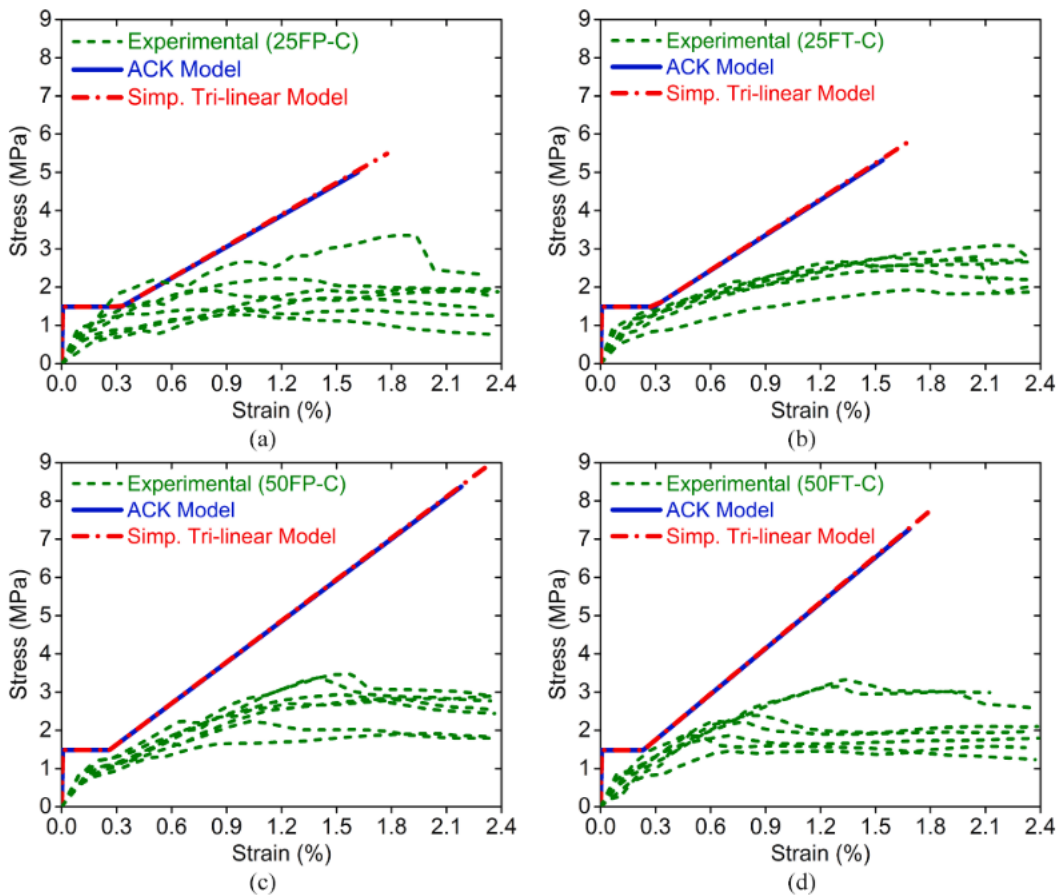


Figura 2. 22. Comparació entre corbes experimentals i analítiques del FRCM de: malla 25 mm longitudinal (a), malla 25 mm transversal (b), malla 50 mm longitudinal (c), malla 50 mm transversal (d) [28]

En ambdós casos, els models ACK i STL prediuen el comportament del FRCM de manera molt similar, sent la tensió de fissuració la més acurada de tots els valors.

Per aprofundir en el tema principal del projecte, la recerca duta a terme per Mercedes et al. serà exposada amb més detall.

Mercedes et al. va estudiar el comportament mecànic de FRCM de fibres vegetals amb 4 tipus de fibra sota esforços de tracció. Depenent la fibra, es modifica la geometria per aconseguir seccions de fibra equivalents, que es recobreixen amb resines epoxi i polièster. [36]

Mercedes va modelar analíticament el FRCM a través del model ACK (Taula 2.7).

Taula 2. 7. Model ACK aplicat per Mercedes et al.[1]

	Etapa I	Etapa II	Etapa III
Mòdul d'elasticitat	$E_I = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$	$E_{II} = 0$	$E_{III} = E_f \cdot V_f$
Deformació	$\varepsilon_I = \frac{\sigma_{mc}}{E_I}$	$\varepsilon_{II} = (1 + 0,666 \cdot \alpha_e) \cdot \frac{\sigma_{mu}}{E_m}$	$\varepsilon_{III} = \frac{A_f \cdot \sigma_f}{A_m \cdot E_{III}} - \frac{\sigma_{mc} + E_{III} \cdot \varepsilon_{II}}{E_{III}}$

on  $A_m$  és la secció del FRCM complet.

$A_f$  és la secció de les fibres.

El model ACK prova ser efectiu per modelar els FRCM amb malles recobertes amb epoxi, però no aplicable als recoberts amb polièster. Les diferències que es mostren a la Figura 2.23, suggereixen que s'apliqui un ajust al model.

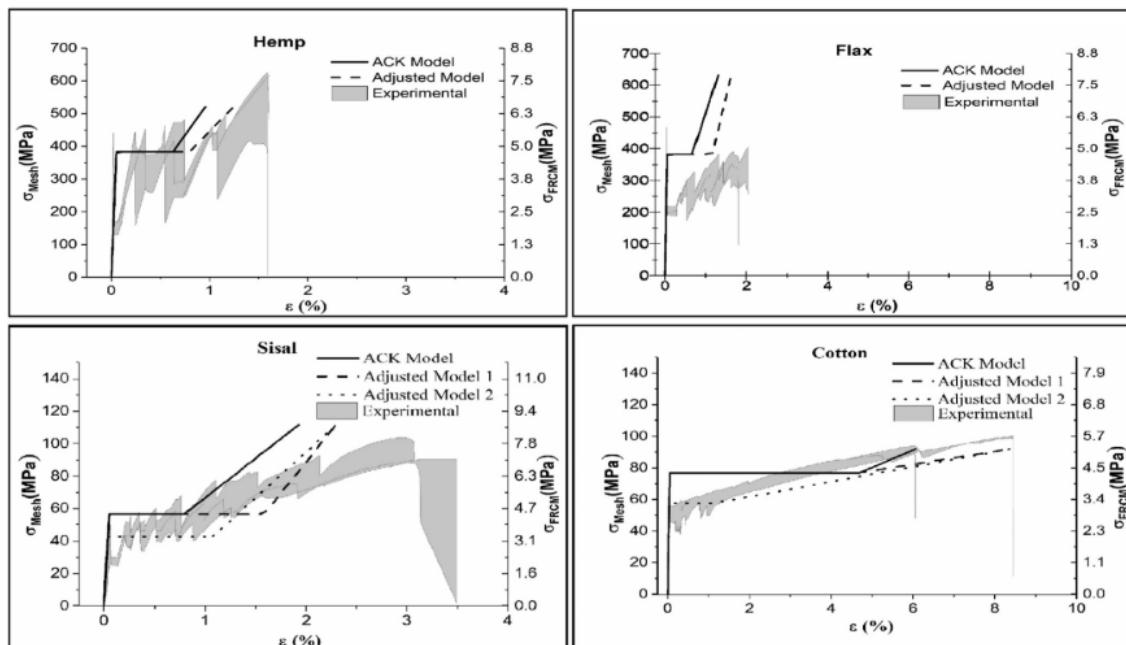


Figura 2. 23. Comparació entre el model ACK i l'experimental. [1]

Per ajustar el model, Mercedes agafa la proposta feta per Larrinaga et al. [34], aplicant el model de fissuració de l'Eurocodi 2, per estimar la distància entre fissures ( $w_k$ ) del formigó armat.

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (2.8)$$

on  $s_{r,max}$  és la distància màxima entre fissures.

$\varepsilon_{sm}$  és la deformació mitjana del reforç.

$\varepsilon_{cm}$  és la deformació mitjana al morter entre fissures.

El sumatori dels amples de fissures pot considerar-se com la diferència entre l'elongació del reforç i l'elongació del formigó.

$$\sum w = \Delta l - \Delta l_c = (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \cdot l \quad (2.9)$$

On els valors de  $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$  poden calcular-se com:

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \quad (2.10)$$

on  $\sigma_s$  és la tensió al reforç d'una secció fissurada.

$f_{ct,eff}$  és el valor mitjà de la tensió a tracció del formigó quan es forma la primera fissura.

$\rho_{p,eff}$  és la relació de reforç  $A_s/A_c$ .

$\alpha_e$  és la relació  $E_s/E_c$ .

$k_t$  és el factor de duració de la càrrega. (0,6 per duracions curtes i 0,4 per llargues).

Amb l'Eq. 2.11 és possible calcular la deformació al final de la segona etapa. Adaptant-nos a la notació del FRCM:

$$\varepsilon_{II} = \frac{\sigma_u - k_t \cdot \frac{\sigma_{mc}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_{e2} \cdot \rho_{p,eff})}{E_f} - \varepsilon_I \quad (2.11)$$

on  $\sigma_u$  és la tensió a tracció de la malla.

$\sigma_{mc}$  és el valor mitjà de tensió de tracció quan es forma la primera fissura al morter.

$\rho_{p,eff}$  és la relació  $A_f/A_m$ .

$\alpha_e$  és la relació  $E_f/E_m$ .

L'etapa III també va modificar-se segons la formulació presentada per Jimenez Montoya [37], que representa el formigó armat amb una regla poligonal  $(N - \Delta L/L)$ . S'assumeix



que la deformació de l'acer creix paral·lelament a la línia de la segona etapa. (Figura 2.24)

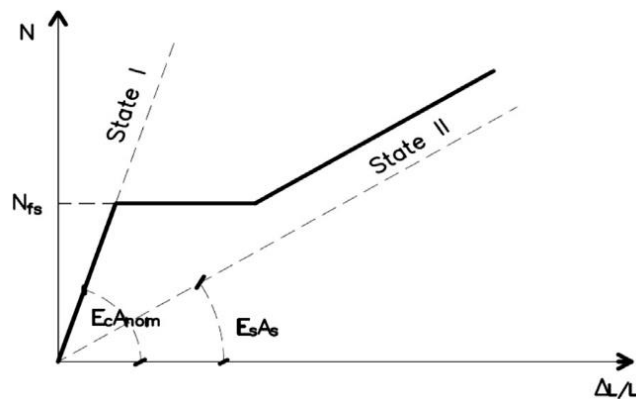


Figura 2. 24. Comportament teòric del formigó armat [39]

Al primer model modificat ("Adjusted model 1"), el mòdul d'elasticitat i la deformació a l'etapa III es calculen com:

$$E_{III} = \frac{\sigma_u - \sigma_{mc}}{\varepsilon_{III} - \varepsilon_{II}} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_{III} = \frac{\sigma_u}{E_f \cdot V_F} \quad (2.13)$$

Amb el model modificat 1, els espècimens de cotó i sisal van mostrar una tensió de fissuració i una deformació al final de l'etapa II inferiors que els altres models.

Això pot ser degut a la gran diferència entre el mòdul d'elasticitat del morter (8,92 GPa) i els de les fibres: cotó (4,87GPa), sisal (0,93GPa).

Els autors, tot i considerar la relació entre els mòduls d'elasticitat, també van considerar un altre ajust per representar millor el comportament del FRCM.

La segona modificació ("Adjusted model 2") va reduir la tensió de fissuració ( $\sigma_{mc}$ ) multiplicant l'Eq. 2.2 per un coeficient empíric ( $\beta$ ) definit com a 0,75 per als casos on el mòdul d'elasticitat de la fibra és inferior al del morter.

$$\sigma_{mc} = \frac{\beta \cdot E_f \cdot \sigma_{mu}}{E_m} \quad (2.14)$$

També, el factor de duració de la càrrega ( $k_t$ ) no va ser considerat al calcular la deformació al final de l'etapa II ( $\epsilon_{II}$ ), amb la intenció de reduir  $\epsilon_{II}$  per millorar la precisió quan el mòdul d'elasticitat de la fibra és inferior al del morter.

Comparant els tres models analítics proposats (ACK, adjusted 1, adjusted 2) s'ha vist que:

- El model ACK modela correctament la primera etapa, però perd precisió a les etapes II i III.
- El model ajustat 1 va ser precís per als espècimens de lli i cànem.
- El model ajustat 2 va ser precís per als espècimens de cotó i sisal, on el mòdul d'elasticitat de les fibres és inferior al del morter.
- Els models ajustats mostren més precisió que l'ACK a l'hora de predir el comportament experimental del FRCM. Tot i això, cap és capaç de reproduir l'increment de la tensió durant l'etapa II.

## 2.6. Conclusions del capítol

La recerca relacionada amb l'aplicació del FRCM vegetal a substrats de formigó és encara un camp en recerca.

Les possibilitats de combinació entre fibres, recobriments i matrius fa que les possibilitats siguin immenses. Per aquest motiu es important delimitar l'àrea a estudiar, determinant materials i deixant altres com possibles variables.

Per aquesta tesi doctoral, es va decidir aprofundir en la línia de recerca del grup d'investigació, fixant com a materials base:

- La matriu: el morter de reparació Sika Montop-612.
- Les fibres de les malles: fils comercials de la marca Rombull<sup>®</sup> de cotó trenat  $\phi 1,5\text{mm}$  i el fil de cànem polit de  $\phi 0,5\text{mm}$ .

Es decideix fer recerca en el tipus de recobriment a utilitzar. Mantenint com a recobriment de control la resina epoxi MasterBrace P3500 de BASF<sup>®</sup> i entre les possibilitats seleccionar un altre recobriment per comparar.

La campanya de caracterització consistirà en l'assaig mecànic dels fils amb i sense recobriment de totes les combinacions, seleccionant finalment 4 casos per continuar amb la caracterització.

A continuació, l'assaig de pull-out, tracció de malles i tracció de FRCM finalment delimitaran els dos recobriments a utilitzar a la campanya de caracterització en gran format.

En gran format s'estudiarà l'adherència del FRCM al substrat amb l'adaptació de la norma UNE EN ISO 10080:2006 [40], que regula l'assaig d'adherència entre barres d'acer amb el formigó.

Seguidament, es prepararan les bigues per ser assajades amb anàlisi modal i a flexió estàtica (en el cas de les de control) i cíclica en el cas de les bigues reforçades.

Les bigues seran sotmeses a un assaig d'anàlisi modal pre i post reforç per veure l'efecte del mateix en les freqüències dels modes de vibració.

Per acabar amb la campanya experimental, es durà a terme l'assaig de flexió seguint un protocol FEMA 461 [2], en el qual cada doc cicles s'anirà incrementant el desplaçament de l'actuador en 1,4 vegades el desplaçament anterior.

Finalment, es proposa desenvolupar un model numèric que pugui predir el comportament de les bigues assajades tant a flexió estàtica com a flexió cíclica.

# CAPÍTOL III. CARACTERITZACIÓ DELS MATERIALS

## 3.1. Introducció

Aquest capítol introdueix al lector en la campanya experimental dissenyada per determinar les propietats mecàniques individuals i conjuntes dels materials que formen el FRCM i el substrat al qual s'aplicarà (formigó armat).

L'assaig de tracció de fils proveirà de dades per entendre l'impacte del recobriment sobre les propietats mecàniques del fil, i serà el que definirà els recobriments a seguir caracteritzant.

L'assaig de pull-out estudiarà la compatibilitat entre el recobriment i la matriu de manera simple, aplicant tracció a un fil immers a una matriu de morter.

L'assaig de malles ajudarà a comprendre el comportament de les malles recobertes.

L'assaig de tracció de FRCM mostrarà de manera clara la interacció dels materials quan aquests, en conjunt, són sotmesos a càrregues considerables.

El capítol conclourà amb la selecció dels dos recobriments amb els quals dur a terme l'estudi d'adherència amb el substrat i la flexió cíclica amb bigues de formigó armat.

## 3.2. Definició dels materials

Com s'ha explicat anteriorment, el material compost de reforç consta de tres parts diferenciades:

- Les fibres: d'origen vegetal que proporcionen la resistència necessària.
- El recobriment: encarregat de protegir la fibra i millorar la interacció amb la matriu.
- Matriu: el morter al qual es troben immerses les fibres.

Per dur a terme la selecció dels materials, s'ha tingut en compte la recerca prèvia al grup de recerca, per aprofundir en una de les línies de recerca.

Mercedes [19] va estudiar diferents, fibres, tipus de teixit, recobriments i matrius seleccionant unes combinacions que donaven millors prestacions. Aquestes consistien en la matriu:

- Matriu: Sika Monotop-612, un morter comercial de reparació. Propietats a la Taula 3.1.

Taula 3. 1. Propietats del morter

Propietat	Sika Monotop-612
Composició química <sup>1</sup>	Morter de ciment preparat, millorat amb resines sintètiques, fum de sílice i reforçat amb fibres de poliamida.
Densitat del morter fresc <sup>1</sup>	2,1 kg/l (a 20°C)
Granulometria <sup>1</sup>	0-2 mm
Resistència a compressió <sup>2</sup>	39,25 MPa
Resistència a flexió <sup>2</sup>	6,56 Mpa
Resistència a tracció <sup>2</sup>	2,9 MPa

<sup>1</sup>Facilitat pel fabricant. <sup>2</sup>Extret de [1].

- Fibres: Fils comercials de la marca Rombull. Propietats a la Taula 3.2.
  - o Fils de cotó de 1.5mm: pel seu potencial d'elongació.
  - o Fils de cànem 0.5mm: per la seva elevada resistència.

Taula 3. 2. Propietats dels fils donades pel fabricant

Propietat	Cànem	Cotó
Diàmetre del fil (mm)	0,5	1,5
Càrrega màxima (N)	83,4	78,5

- Recobriments:
  - o Resina epoxi MasterBrace P3500 bicomponent: d'elevada adherència i baixa viscositat.
  - o Resina de polièster combinada al 50% entre SILMAR SIL66BQ-249A (per la seva flexibilitat).

Propietats a la Taula 3.3.

Taula 3. 3. Propietats de les resines epoxi i polièster

Propietat	MasterBrace P3500	SILMAR SIL66BQ-249A
Densitat (g/cm <sup>3</sup> )	1,05	-
Resistència a tracció (Mpa)	22,9 ± 4	69,6
Elongació (%)	18,2 ± 7	1,9
Resistència a flexió (Mpa)	Sense ruptura	138,6
Mòdul d'elasticitat a flexió (Mpa)	233,1	4095

A aquest projecte, es pretén aprofundir en l'aplicació de recobriments per a materials compostos de reforç estructural.

Els recobriments amb els quals s'ha iniciat la campanya experimental són les següents.

A partir de la recerca anterior del grup de recerca.

- Resina epoxi MasterBrace P3500 [41] és una resina de baixa viscositat i elevada adhesió bicomponent.
- Resina de polièster SILMAR SIL66BQ-249A és una resina de polièster flexible que s'utilitza entre altres aplicacions per a la fabricació de taules de surf.

Un dels interessos és la transició cap a materials compostos més sostenibles, per aquest motiu s'estudiaran també altres opcions a les resines convencionals.

Silicones:

- PDMS: o polidimetilsiloxà és una silicona utilitzada al sector biològic. Entre les seves característiques es troba la seva flexibilitat, al ser un elastòmer, i una resistència a la tracció comparable a la del morter. [42]

Resines d'origen natural:

- Colofònia: resina obtinguda de les coníferes amb aplicacions al sector dels adhesius, recobriments i gomes entre altres. [28]

Com que no és soluble en aigua, aquesta ha de ser dissolta en altres dissolvents trobats a la bibliografia o substitutius.

- Dissolta en aiguarràs o turpentina. [29]
- Dissolta en acetona, en ser un substitutiu.
- Goma Aràbiga: resina obtinguda de l'Acàcia, utilitzada als sectors del menjar i farmacèutic per donar flexibilitat als productes. Entre un 40 i un 80% de goma aràbiga pot ser afegit en funció de la rigidesa desitjada. Per aquesta aplicació, es busca un recobriments flexible, de manera que s'utilitzarà un 40% de % en massa on el dissolvent consisteix a aigua destil·lada. [30]

Per donar més opcions a estudiar, es va valorar també l'aplicació d'ultrasons a la barreja, per homogeneïtzar la barreja. Per dissoldre la goma aràbiga cal aplicar temperatura i agitació, de manera que l'aire entra a la barreja i queda atrapat, donant heterogeneïtat. L'aplicació d'ultrasons, que per cavitació homogeneïtza la barreja eliminant les bombolles d'aire. [43]

- Pre aplicació d'ultrasons
- Post aplicació d'ultrasons

### 3.3. Assaig de tracció de fils

L'assaig de tracció de fils consisteix a la tracció dels fils de cànem i cotó, amb i sense totes les possibilitats de recobriments. L'objectiu és determinar l'efecte dels recobriments en les propietats mecàniques dels fils i seleccionar aquelles combinacions que és

#### 3.3.1. Preparació dels espècimens

Els espècimens utilitzats a aquest assaig, són fils de 40 cm de llarg.

Els fils sense recobrir són directament tallats, mentre que els recoberts són inicialment col·locats en tensió sobre un marc de fusta per mantenir la rectitud del fil.



Figura 3. 1. Fils col·locats al marc

A continuació són recoberts amb la concentració de resina corresponent a la Taula 3.4. Per només els fils, 20g de resina són suficients.

Taula 3. 4. Preparació dels recobriments

Nomenclatura	Recobriments	Concentració	Referència
EP	Epoxi MasterBrace P3500	39g Part A/11g Part B	Fitxa tècnica (Annex)
PES	Polièster SIL66BQ 249A	Resina amb 2% en massa de l'accelerant proveït	Fitxa tècnica (Annex)
GA	Goma Aràbiga	40% en massa dissolt en aigua destil·lada	[30]
GAU	Goma Aràbiga amb ultrasons	40% en massa dissolt en aigua destil·lada + 15 minuts immers en aigua destil·lada amb ultrasons	[30]
COLAC	Colofònia amb acetona	Relació 1:6 en massa entre la resina i el dissolvent	[29] amb un substitutiu
COLTUR	Colofònia amb trementina	Relació 1:6 en massa entre la resina i el dissolvent	[29]
PDMS	PDMS	Unicomponent	-

Es deixen reticular durant 48h en el cas de les resines sintètiques (epoxi i polièster) i en el cas de les resines naturals i PDMS, 1 setmana.

Un cop passat el període de reticulació de les resines, s'aplica 5cm de FRP. Consisteix en una matriu de resina epoxi (MasterBraceP3500) reforçada amb un no teixit de fibra de



vidre (Mapegrid G220) a ambdós extrems. Per millorar la transmissió de la càrrega entre l'equipament d'assaig i els espècimens i per evitar concentracions de tensions.



Figura 3. 2 Aplicació de 5cm de FRP de fibra de vidre.

Es deixa reticular durant 48h, i s'extreuen i retallen els espècimens.

### 3.3.2. Equipament

L'assaig de tracció consisteix a una adaptació de la norma EN ISO 13934-1/2 [44], que dona les pautes per l'assaig de tracció de teixits, als requeriments donats. L'equipament per dur a terme l'experimentació consta d'una premsa electromecànica MTS Insight de 10 kN de rang, i l'ús d'un extensòmetre de 25mm de rang i 50mm de longitud inicial.

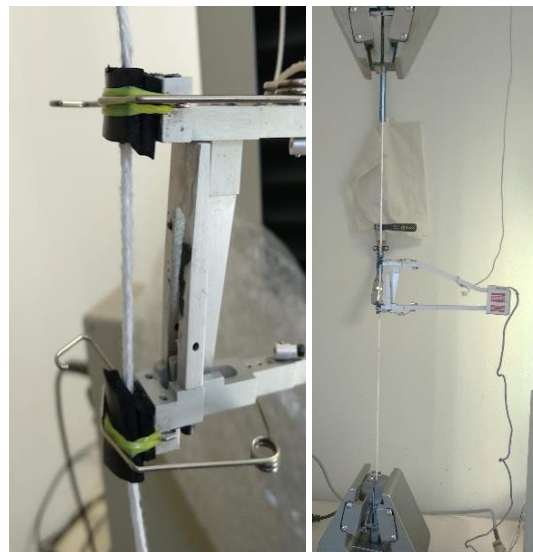


Figura 3. 3. Configuració de l'assaig de tracció de fils

S'aplica una precàrrega de 5N per assegurar que l'extensòmetre és fixat als espècimens en tensió a través de gomes que eviten el desplaçament durant l'assaig (Figura 3.3). La velocitat d'assaig és de 5mm/min.

### 3.3.3. Resultats

La Taula 3.5 i les Figures 3.4 i 3.5 mostren els resultats dels assajos de tracció de fils. La nomenclatura de cada cas consisteix primer en la nomenclatura del recobriment aplicat (Taula 3.5) i les dues últimes lletres fan referència al tipus de fil utilitzat: CO per cotó i HE per cànem.

Taula 3. 5. Resultats de l'assaig de tracció de fils

Fil	Recobriment	F <sub>MAX</sub> (N)	δ <sub>MAX</sub> (mm)	σ <sub>MAX</sub> (MPa)	ε <sub>MAX</sub> (%)	E (MPa)
Cotó (CO)	-	489	11,22	276	22,45	1 590
	Epoxy (EP)	486	9,85	275	19,69	1 701
	Polièster (PES)	477	11,43	270	22,87	1 406
	Goma Aràbiga(GA)	457	9,12	258	18,24	1 829
	Goma Aràbiga + Ultrasons (GAU)	446	12,05	253	24,10	1 589
	Colofònia + aiguarràs (COLTUR)	513	11,51	290	23,02	1 649
	Colofònia + acetona (COLAC)	467	10,94	264	21,88	1 710
	PDMS	404	10,46	228	20,92	1 173
Cànem (HE)	-	89	0,90	454	1,79	24 160
	Epoxy (EP)	110	0,63	560	1,26	41 252
	Polièster (PES)	111	0,51	585	1,10	51 561
	Goma Aràbiga(GA)	76	0,45	387	0,90	31 013
	Goma Aràbiga + Ultrasons (GAU)	69	0,61	350	1,21	26 724
	Colofònia + aiguarràs (COLTUR)	71	0,45	360	0,91	34 364
	Colofònia + acetona (COLAC)	95	0,55	486	1,09	40 921
	PDSM	51	3,45	256	0,07	30 809

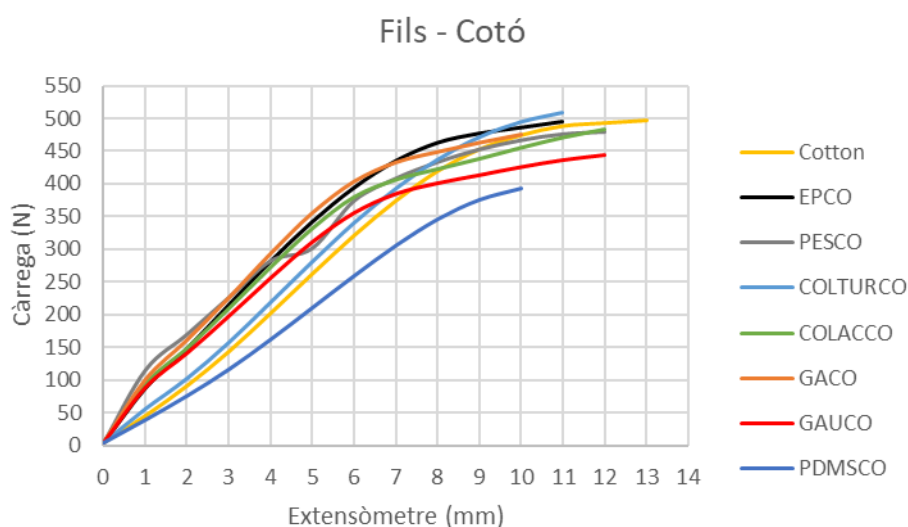


Figura 3. 4. Corbes càrrega-extensòmetre dels fils de cotó

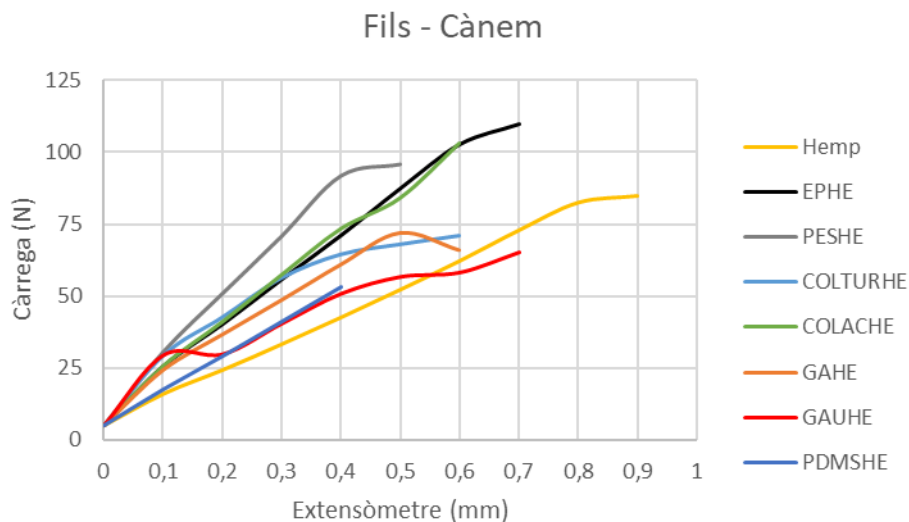


Figura 3. 5. Corbes càrrega-extensió dels fils de cànem

#### 3.3.4. Discussió

La deformació de les fibres està relacionada amb les propietats úniques de cada fibra, i també amb el tipus de fil utilitzat. Els fils trenats permeten que les fibres llisquin relativament unes d'altres sense separar-se, presentant una deformació de tipus plàstic, mentre que els fils filats mantenen la deformació elàstica fins a la fallada.

En primer lloc, s'analitza la variació de les propietats dels fils en recobrir-los (Taula 3.5). Pel que fa a la resistència a la tracció, les variacions negatives són menors per al cotó (per sota del 10%) amb l'excepció de la colofònia dissolta en trementina, mentre que el cànem va experimentar diferències significatives.

Això és degut a la diferència en la fabricació de cada fil. El fil de cotó és un fil trenat i amb més diàmetre, el que fa que la seva càrrega màxima sigui superior i els resultats més homogenis. En canvi, el cànem és un fil filat d'1/3 el diàmetre del de cotó, amb imperfeccions visibles al llarg del fil. Les imperfeccions més significatives directament es tallaven per evitar el seu ús, però altres imperfeccions menys significatives poden haver estat passades per alt. També, en ser un fil polit, a mesura que s'estira, les fibres que componen els caps es van separant, facilitant el trencament.

Les resines sintètiques van augmentar en més d'un 20% la resistència a la tracció del cànem, mentre que les naturals van disminuir en més d'un 10%, amb l'excepció de la colofònia dissolta en acetona, que la va augmentar en menys d'un 10%.

El mòdul elàstic va augmentar significativament amb tots els fils de cànem, excepte en el cas del GAU, mentre que el cotó va sofrir una variació menys significativa, inferior al 20%. Principalment, en els casos en què el mòdul d'elasticitat va augmentar, la deformació va disminuir per a tots dos fils.

El PDMS fa disminuir tant la resistència a tracció com la deformació dels fils. Al ser una silicona flexible, aquesta provoca una reducció del mòdul d'elasticitat.

### 3.3.5. Conclusions

Per continuar la campanya experimental s'ha de valorar els resultats obtinguts per a cada tipus de recobriments i fibra. Es considera la resina epoxi com resina de control.

La resina de polièster presenta un augment de la rigidesa a l'inici de l'assaig, que s'atenua al llarg del mateix, ja que és una resina flexible, arribant a una càrrega lleugerament inferior, però amb una major elongació. De manera que es selecciona per continuar avaluant-la.

De les resines naturals, la goma aràbiga ha presentat uns similars a la resina epoxi en el cas del cotó, mentre que en el cas del cànem ha tingut més variabilitat. L'efecte de l'ús d'ultrasons provoca un increment de la rigidesa dels fils, que a més, en el cas del cotó també acaba en una reducció de la resistència a la tracció. De manera que es descarta l'ús dels ultrasons aplicats a la goma aràbiga, però es manté la resina per continuar la campanya experimental.

Finalment, la colofònia es presentava amb dos possibles dissolvents. Ha resultat interessant que en funció de la fibra, funcionava millor l'acetona o la trementina. En el cas del cànem es selecciona la dissolució amb acetona, ja que presenta resultats més similars a la resina epoxi. En el cas del cotó es selecciona la dissolució amb trementina, ja que dóna valors més elevats tant en resistència a la tracció com en elongació.

Per a continuar la campanya experimental, es van seleccionar 2 casos de recobriments sintètics i 2 naturals: epoxi i polièster com a sintètics, i goma aràbiga i la colofònia més adequada per a cada fil (dissolta en acetona, COLAC, per al cànem i dissolta en trementina, COLTUR, per al cotó) com a naturals.

### 3.4. Assaig de pull-out

#### 3.4.1. Preparació dels espècimens

Els espècimens consisteixen a fils de 40cm de longitud, embeguts en una matriu cilíndrica de  $\Phi 6$ cm de morter, amb dues alçades, 20 i 30mm.

La preparació dels fils és la mateixa que l'explicada a l'apartat 2.1, amb la diferència que el FRP de fibra de vidre es col·loca només en un dels extrems del fil.

Un cop els fils estàn preparats, aquests són embeguts en la matriu de morter dintre un suport que manté el fil estirat, per mantenir la perpendicularitat del fil respecte la matriu.



*Figura 3. 6. Espècimens de pull-out*

#### 3.4.2 Equipament d'assaig

Per dur a terme l'assaig de pull-out s'utilitza la premsa electromecànica MTS Insight de 10kN de rang, amb un extensòmetre de 25mm de rang i 50mm de longitud inicial.

Es col·loca una plaça d'alumini de suport que ajuda a fixar la base de l'espècimen a través de perfils en forma de L.



Figura 3. 7. Muntatge de l'assaig a tracció (esquerra), detall de la subjecció de la base (dreta)

La velocitat de l'assaig és definida per l'estudi que va dur a terme Donnini et al. [34] i és de 0,5 mm/min.

### 3.4.3. Resultats

Els resultats de l'assaig de pull-out dels fils es poden trobar a la Taula 3.6 i a les figures 3.8 i 3.9, per a l'alçada de 20mm i les figures 3.10 i 3.11 per l'alçada de 30mm.

Taula 3. 6. Resultats de l'assaig a pull-out

Fibra	Recobriments	Alçada(mm)	F <sub>MAX</sub> (N)	Extensòmetre <sub>MAX</sub> (mm)	Σ <sub>MAX</sub> (MPa)	ε (%)	Fallada
CO	-	20	100	8,10	30	1,14	Lliscament
	EP	20	254	2,70	144	5,40	Trencament
	PES	20	319	19,35	180	38,70	Trencament
	GA	20	82	9,47	46	18,94	Lliscament
	COL + TUR	20	41	2,03	23	4,06	Lliscament
HE	-	20	25	0,80	127	1,60	Lliscament
	EP	20	90	2,86	458	5,72	Trencament
	PES	20	82	0,93	421	1,86	Trencament
	GA	20	-	-	-	-	Fallada abans d'assajar
	COL+ AC	20	34	2,81	173	5,62	Lliscament
CO	-	30	100	0,71	57	1,42	Lliscament
	EP	30	284	2,01	161	4,02	Trencament
	PES	30	349	25,00	194	50,00	Pèrdua d'extensòmetre
	GA	30	72	3,32	41	6,64	Lliscament
	COL + TUR	30	40	1,97	23	3,94	Lliscament
HE	-	30	43	0,93	219	1,86	Lliscament
	EP	30	80	1,70	407	3,40	Trencament

	PES	30	48	0,45	244	0,90	Trencament
	GA	30	31	2,48	158	4,96	Lliscament
	COL+ AC	30	14	1,65	71	3,30	Lliscament

20 mm - Cànem

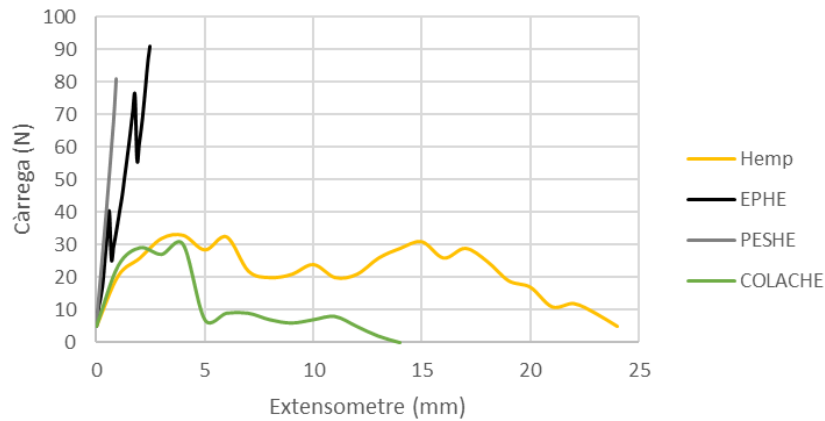


Figura 3. 8. Corbes Càrrega-extensòmetre dels assaigs de pull-out de cànem, 20mm

20 mm - Cotó

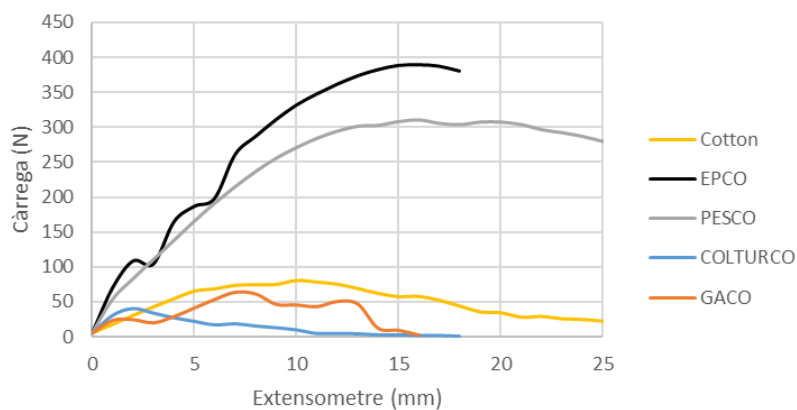


Figura 3. 9. Corbes Càrrega-extensòmetre dels assaigs de pull-out de cotó, 20mm

30mm - Cànem

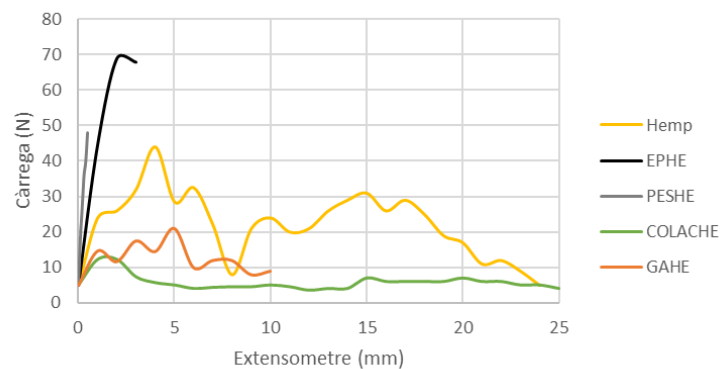


Figura 3. 10. Corbes Càrrega-extensòmetre dels assaigs de pull-out de cànem, 30mm

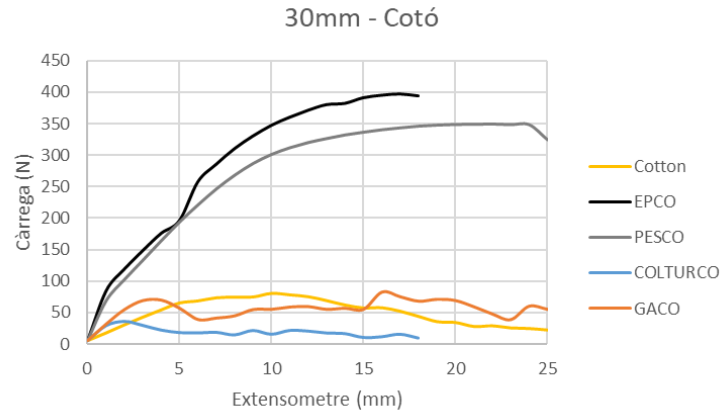


Figura 3. 11. Corbes Càrrega-extensió dels assaigs de pull-out de cotó, 30mm

#### 3.4.4. Discussió

Als assaigs de pull-out s'ha vist clarament com el recobriment afecta directament a la interfase amb la matriu.

En el cas sense recobrir, o amb recobriments naturals, el mode de fallada és el lliscament de la fibra respecte a la matriu. Mentre que els recobriments de resines sintètiques provoquen el trencament del fil, sense que hi hagués lliscament amb la matriu.

Una de les raons és a causa de la rugositat del recobriment. Les resines sintètiques en tenir períodes curts de reticulació, donen una superfície més rugosa, mentre que les naturals, al tenir períodes més llargs és més llisa.

La variació de l'alçada no provoca grans variacions entre els resultats, inferiors al 15%.

#### 3.4.5. Conclusions

D'aquest assaig cal destacar la millora de la compatibilitat entre el fil i la matriu per l'aplicació de resines sintètiques.

En el cas de les naturals, aquestes empitjoren la compatibilitat respecte als fils sense recobrir.



### 3.5. Assaig de tracció de malles

L'objectiu de l'assaig de tracció de malles és determinar la resistència de les malles i el seu comportament sota esforços de tracció. També, ajudarà a veure la conformitat de malla que els diferents tipus de recobriment donen als fils.

Conformitat dona la qualitat de conforme, que es defineix com "De forma igual a un altre objecte pres com a tipus o model". [45]

De manera que s'agafa com a model les malles recobertes amb epoxi i es compara l'estabilitat de la malla.

#### 3.5.1. Preparació dels espècimens

Els espècimens consisteixen en malles de cotó o cànem de 40 cm de longitud recobertes amb resina. Per teixir les malles es fabrica un marc amb la configuració especificada a la Figura 3.

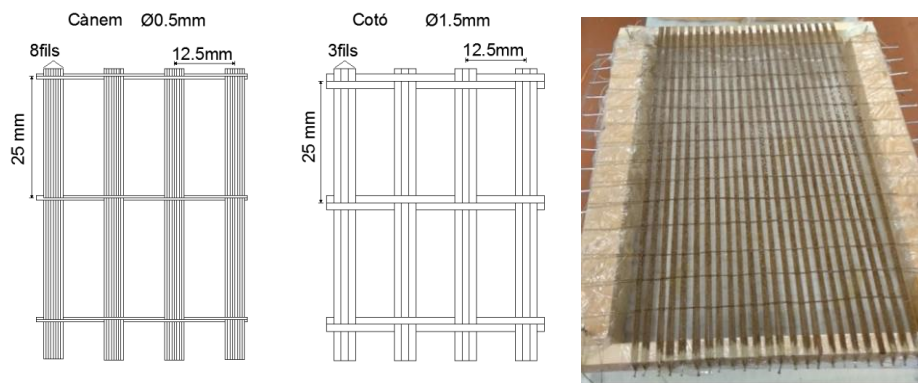


Figura 3. 12. Configuració de les malles (esquerra) i malla de cànem recoberta (dreta)

Es recobreix manualment utilitzant un pinzell amb la resina corresponent, en una quantitat de 100g per cada marc de malles de cànem, i 150g per cada marc de cotó, fins a tenir el teixit completament impregnat.

A continuació, es deixa reticular la resina durant 48h en el cas de les resines sintètiques, i 1 setmana en el cas de les naturals. Un cop reticulades, són extretes del marc i tallades cada quatre flocs per obtenir els espècimens de malla.

A continuació es col·loca als extrems un polímer epoxi (MasterBrace P3500) reforçat amb fibres de vidre (Mapegrid G220) de 5cm a cada extrem per assegurar una bona transmissió entre l'equip d'assaig i els espècimens.



Figura 3. 13. Espècimens de malla

Un cop passades 48h els espècimens es troben preparats per ser assajats.

### 3.5.2. Equipament d'assaig

Per realitzar l'assaig de tracció de malles, s'utilitza la norma UNE EN ISO 13943-1/2 [44], adaptada als requeriments d'aquest tipus de teixit.

Per realitzar-lo, s'utilitza una premsa electromecànica MTS Insight de 10kN de rang, i un extensòmetre de 25mm de rang i 50mm de longitud inicial. Per subjectar els espècimens, s'utilitzen mordaces de 5cm d'amplada. La velocitat d'assaig va ser de 5mm/min.

L'extensòmetre es col·loca sobre dues plaques rígides adherides a una goma. Aquestes pincen la malla utilitzant cargols per mantenir fixa la posició de l'extensòmetre (Figura 3.14).



Figura 3. 14. Configuració d'assaig de tracció de malles

### 3.5.3. Resultats

Els resum dels resultats de l'assaig de tracció de malles es troben a la Taula 3.7 i a les figures 3.15 i 3.16.

Taula 3. 7. Resultats de l'assaig a tracció de malles

Fibra	Recobriment	$F_{peak}$ (N)	$\delta_{peak}$ (mm)	$\sigma_{peak}$ (MPa)	$\epsilon_{peak}$ (%)	E (MPa)
CO	EP	5 523	10.79	260.43	21.58	1 371
	PES	6118	10.71	288.50	21.41	1 301
	GA	4 974	13.23	234.13	29.15	958
	COLTUR	5 505	8.86	258.94	17.71	1500
HE	EP	4 712	0.96	750.32	1.93	40 535
	PES	3 443	0.60	548.25	1.20	45 589
	GA	2 507	1.14	399.20	2.27	32 904
	COLAC	2 583	0.65	411.30	1.29	44 306

Malles - Cànem

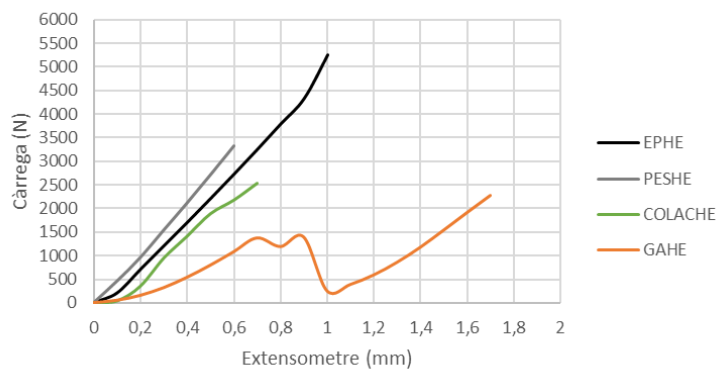


Figura 3. 15. Corbes Càrrega-extensòmetre dels assaigs de pull-out de cànem, 30mm

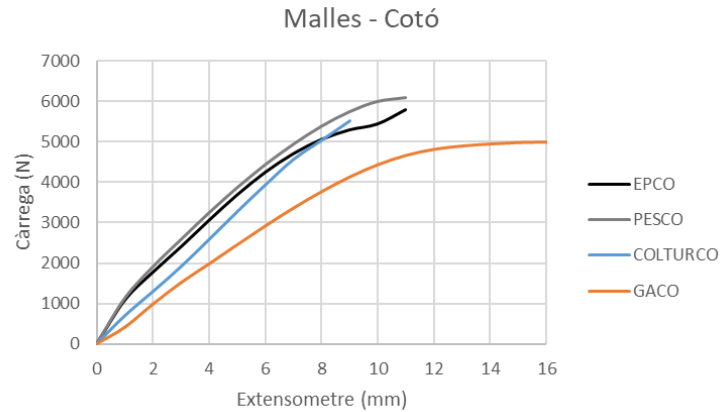


Figura 3. 16. Corbes Càrrega-extensió dels assaigs de pull-out de cotó, 30mm

### 3.5.4. Discussió

Al ser la resina epoxi la més utilitzada per a recobrir fils i malles amb finalitats estructurals, es va prendre com a referència a l'hora de comparar amb l'efecte de les altres resines.

Igual que en el cas dels fils, les mostres de cànem van mostrar variacions més significatives de les propietats mecàniques que les de cotó, degut tant a l'estructura del fil, com a la seva homogeneïtat.

Les malles van mostrar un 10% menys de rigidesa que els fils, però van aconseguir una resistència a la tracció similar. Pot deure's al fet que existeix una transmissió de càrrega entre els fils durant l'assaig, la qual cosa proporciona petites variacions de les propietats generals.

En el cas del cànem, tots els recobriments van reduir la seva resistència en comparació amb l'epoxi i la variació del mòdul d'elasticitat és inferior al 20%. L'elongació només va augmentar amb la resina de goma aràbiga, a causa de la flexibilitat de la resina. Aquesta va permetre que les fibres llargues que conformen els fils es llisquessin sense perdre el contacte.

Per a les de cotó, que van mostrar una resposta no lineal, la resina de polièster va ser l'única que va augmentar la resistència de manera significativa, al mateix temps que va reduir la deformació en el pic i va mantenir un mòdul d'elasticitat similar. Els fils i les malles de cotó presenten tots dos tipus de deformació, elàstica i plàstica, i la resistència màxima es va aconseguir durant la deformació plàstica, cosa que significa que l'efecte de la resina de polièster va ser més significatiu en aquesta etapa.

La goma aràbiga va proporcionar una major deformació en la resistència màxima a la tracció, ja que va permetre que les fibres es llisquessin relativament unes d'altres sense perdre el contacte.

L'efecte de la colofònia es va considerar menys significatiu que el de la goma aràbiga, degut no sols a les propietats mecàniques de les malles, sinó també a la seva consistència. Les malles havien de manipular-se amb cura, ja que la manipulació podia danyar la mostra.

### 3.5.5. Conclusions

Les resines sintètiques donen millors propietats que les resines naturals. Aquestes resines tenen una viscositat baixa i bona adherència, de manera que adhereixen millor les fibres dels fils amb elles mateixes.

En el cas de les resines naturals, es van proposar amb la idea de trobar un possible substitut per les sintètiques, però es pot veure com en general no milloren les propietats mecàniques dels fils, fins i tot, en el cas del cànem recobert amb colofònia no dona la conformitat de malla. Aquesta no manté la forma, dificultant el transport i preparació per l'assaig.

Entre les dues resines naturals, la goma aràbiga proporciona un recobriment més estable i proporciona majors deformacions que les resines sintètiques.

## 3.6. Assaig de tracció de FRCM

### 3.6.1. Preparació dels espècimens

Els espècimens de FRCM tenen unes dimensions de 40cm x5 cm x1 cm. Consistents d'una matriu de morter amb una malla com les explicades als espècimens de malla.

La fabricació consisteix en:

- L'aplicació sobre el motlle de 5 mm de morter (Figura 3.17).



Figura 3. 17. Primera capa de morter

- La col·locació de la malla, fent pressió perquè el morter penetri a través dels forats de la malla (Figura 3.18).

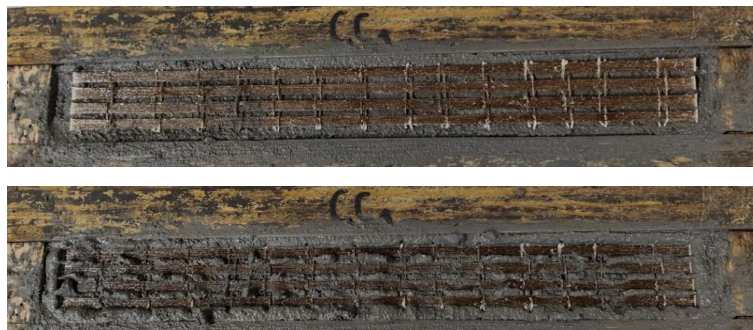


Figura 3. 18. Col·locació de la malla

- Aplicació d'una segona capa de morter de 5 mm (Figura 3.19).



Figura 3. 19. Segona capa de morter

Un cop passats 28 dies de curat, a aquests espècimens se'ls adhereix 4 plaquetes d'acer als extrems, les quals seran les encarregades de traspasar la càrrega de l'equipament d'assaig als espècimens mitjançant un utillatge específic. (Figura 3.20).

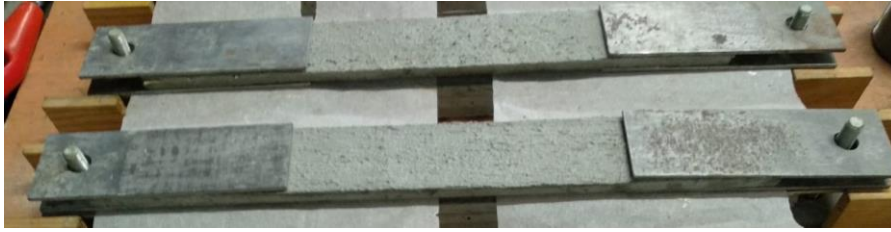


Figura 3. 20. Espècimens de FRCM

### 3.6.2. Equipament

A aquest apartat es defineixen les diferents configuracions d'assaig.

Els assajos de tracció consisteixen en l'ús d'una premsa electromecànica MTS Insight de 10 kN de rang amb un extensòmetre integrat de 50 mm de longitud inicial i 25 mm de rang. A tots els assajos s'aplica una precàrrega de 5N i es realitza l'assaig amb una velocitat de 5 mm/min.

El mètode de subjecció en aquest cas és un *Clevis Grip* (Figura 3.21). Consisteix a col·locar dues plaques metàl·liques al pont i a la base de la premsa i entre les quals es col·loca un mosquetó fixat per un cargol. Aquest és el que s'introdueix entre les plaques adherides als espècimens i es fixa amb un altre cargol. [46]



Figura 3. 21. Configuració de l'assaig a tracció de FRCM amb Clevis Grip

### .6.3. Resultats

Els resultats de l'assaig a tracció de FRCM es troben a la Taula 3.8 i a les Figures 3.22 i 3.23. La Figura 3.24 mostra els diferents modes de fallada.

Taula 3. 8. Resultats experimentals dels FRCM a tracció

Fibra	Recobriments	A càrrega màxima			Fallada
		F <sub>MAX</sub> (N)	Ext <sub>MAX</sub> (mm)	$\sigma_{\text{Mesh}}$ (MPa)	
CO	EP	3562	20.68	118	Lliscament de la malla
	PES	2687	18.02	147	Lliscament de la malla
	GA	2882	23.66	104	Lliscament dels fils dintre la matriu
	COLTUR	3406	20.51	160	Lliscament dels fils dintre la matriu
HE	EP	2294	3.30	399	Lliscament de la malla
	PES	2768	5.00	421	Ruptura de la malla
	GA	1057	5.39	168	Lliscament dels fils dintre la matriu
	COLACHE	1568	0.14	249	Lliscament dels fils dintre la matriu



### FRCM - Cànem

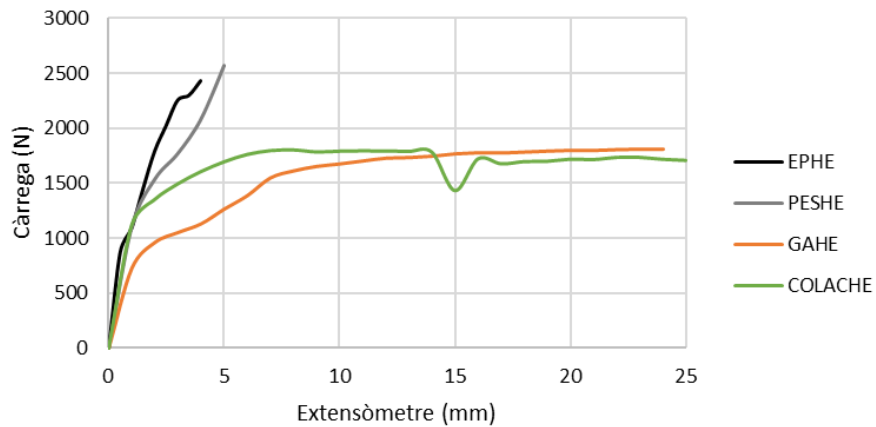


Figura 3. 22. Corbes Càrrega-Extensòmetre dels FRCM de cànem

### FRCM - Cotó

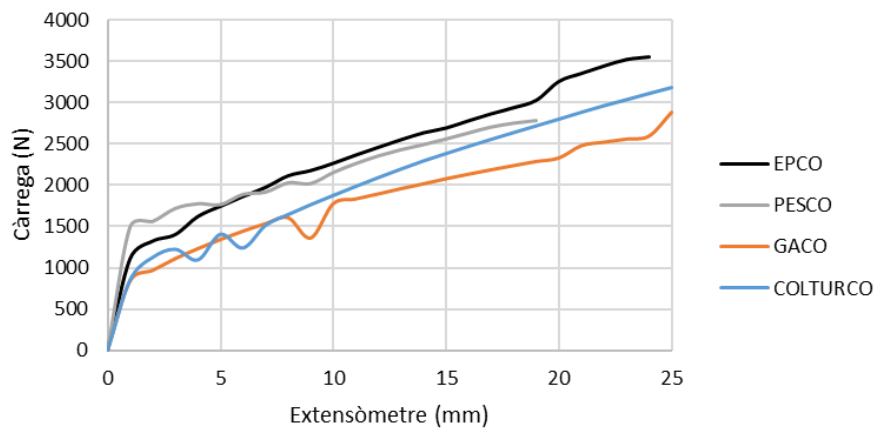


Figura 3. 23. Corba càrrega - extensòmetre dels FRCM de cotó

Els modes de fallada corresponen a:

- (I) Lliscament de la malla.
- (II) Trencament de la malla.
- (III) Lliscament dels fils dintre de la matriu.

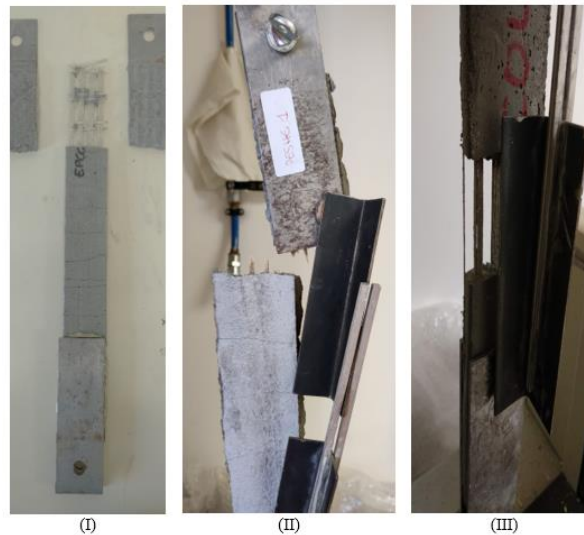


Figura 3. 24. Modes de fallada del FRCM

#### 3.6.4. Discussió

Pel que fa a les mostres de FRCM, les mostres van mostrar un comportament en dues etapes, on la primera etapa és més rígida, i després de la fissuració i la transmissió de la càrrega es redueix fins a fallar per lliscament.

Les provetes de cànem tenen un comportament més heterogeni. El recobriments sintètic (polièster) va proporcionar valors de resistència més alts, i va fallar per lliscament o trencament de la malla. D'altra banda, els recobriments naturals van presentar un lliscament complet de les fibres de la matriu de morter. En el cas dels de cotó, els resultats van ser més homogenis, mantenint-se les maneres de fallada en funció de l'origen de la resina.

Observant la Taula 3.8, l'efecte del reforç de les fibres s'aprecia clarament durant la primera etapa, en la qual la proveta encara no s'ha esquerdat. Fins i tot si es considera que principalment el morter suportava la càrrega, el pendent era major per a les mostres de cànem en comparació amb els casos de cotó.

En la segona fase, en la qual es va produir la multifissuració i el lliscament, el revestiment de polièster i el natural van reduir el pendent, a excepció del PESHE. Això pot estar relacionat amb la manera de decisió de cada cas. Les provetes de cànem amb recobriments de polièster van ser les úniques que van fallar per trencament de malla, cosa que significa que la transmissió de càrregues entre els materials va ser correcta (Figura 9).

La fallada de les provetes amb recobriment sintètic va consistir en el lliscament relatiu de la malla amb el morter, que va acabar tallant la matriu del morter (Figura 3.21), amb l'excepció de PESHE. El sistema d'ancoratge, una arpa de forqueta, on no hi havia cap element que pressionés els extrems de les provetes mentre s'aplicava la càrrega, en tenir una baixa compatibilitat fibra-matriu, va provocar un desplaçament relatiu entre la malla i la matriu. L'únic cas que va tenir la falla esperada va ser el de FRCM de cànem recobert de polièster.

Finalment, les provetes amb recobriment natural també van mostrar una manera de fallada diferent, ja que la malla es va lliscar completament de la matriu de morter. Després de l'etapa de multifissuració, els fils longitudinals no es van trencar, sinó que es van enlairar completament de la matriu i la resistència restant va consistir en la fricció entre les fibres i la matriu. El que indica clarament la baixa compatibilitat entre les fibres naturals recobertes i la matriu, per a les concentracions utilitzades en aquesta recerca. La superfície de les fibres era més llisa en el cas de les fibres sintètiques recobertes, probablement a causa del temps de reticulació. Els líquids tendeixen a les formes esfèriques per a reduir les tensions superficials [47], per la qual cosa l'augment del temps de reticulació va permetre a les resines naturals remodelar-se homogèniament, reduint la rugositat de la superfície.

De nou, considerant les provetes recobertes d'epoxi com a referència, a les Figures 3.19 i 3.19 es mostren les corbes, càrrega – obertura de l'extensòmetre.

La resina de polièster va augmentar la resistència a la tracció i la rigidesa de les provetes, mentre que la goma aràbiga va augmentar la rigidesa de les provetes, però va disminuir la resistència a la tracció d'aquestes. Finalment, la colofònia va augmentar la rigidesa de les provetes i també va augmentar la resistència de les de cotó, però va disminuir la de les de cànem. En general, els tres recobriments van augmentar la rigidesa en comparació amb el recobriment epoxi, ja que aquest és més flexible que els altres. En el cas dels recobriments naturals, la goma aràbiga va mostrar una menor compatibilitat amb la matriu, ja que la resistència de les mostres va disminuir. Pot haver-se del fet que el dissolvent de la goma aràbiga és l'aigua destil·lada, on potser es va diluir més durant el

període de curat del morter. En el cas de la colofònia, l'efecte és diferent segons el tipus de fibra a recobrir. Probablement, a causa de la resistència de la fibra al dissolvent (acetona), on el cotó té més resistència.

Una última observació empírica va ser que les condicions dels fils després de la prova. Els fils amb revestiment sintètic continuaven mantenint el revestiment en la seva superfície, però els revestiments naturals semblaven haver perdut el revestiment superficial. Es pot considerar que s'ha perdut per reaccions químiques amb el morter fresc, o per la fricció amb la matriu del morter.

### 3.6.5. Conclusions

La primera i més important conclusió és la baixa compatibilitat de les resines naturals amb la matriu de morter. La superfície llisa provoca la fallada per lliscament dintre de la matriu i fa que, en les concentracions provades, no siguin aptes per FRCM amb sol·licitacions estructurals. També, de manera empírica, es veu com la malla perd el recobriment en lliscar amb la matriu.

Tot i això, pel que fa a resistència, aquestes arriben a resistències comparables a les resines sintètiques degut a la fricció durant el lliscament.

En el cas dels espècimens recoberts amb epoxi i polièster, en el cas de la resina epoxi, aquesta és molt rígida, de manera que si la transmissió de càrrega entre la matriu i la malla no és bona, aquesta acaba seccionant la matriu de morter. Això també ocorre amb el cotó recobert amb polièster.

Únicament als espècimens de cànem recobert amb polièster s'aconsegueix la fallada desitjada, que és el trencament de la malla. Això deu ser provocat per una bona transmissió entre la matriu i la malla, i també degut a una bona compatibilitat entre el recobriment i el fil.

El cànem al ser molt rígid, aprofita la flexibilitat aportada per la resina de polièster i entra en càrrega un cop la matriu es troba completament esgotada.

### 3.7. Caracterització del formigó

Per caracteritzar les bigues de formigó. L'empresa Paver Prefabricats ens va proporcionar 12 cubs de 15x15x15 cm<sup>3</sup> de mostres del formigó utilitzat en les dues amassades en què es van fabricar les bigues i biguetes.

Per no ser estàndard, aquestes no poden ser assajades mitjançant assaigs destructius degut a l'equipament d'elevat rang necessari.

Per això es decideix dur a terme un assaig no destructiu d'esclerometria per determinar la seva resistència a compressió, es pesen les mostres per determinar la densitat i finalment es duu a terme un assaig d'ultrasons per determinar el mòdul d'elasticitat dinàmic.

#### 3.7.1. Determinació de la densitat

La densitat de les provetes es determina utilitzant una balança de precisió.

Les mostres es classifiquen segons l'amassada i es pesen, obtenint els resultats de la Taula 3.9.

Taula 3. 9. Pes i densitat mitjana del formigó

	Pes (g)	Densitat (kg/l)
Amassada 1	7606,2	2,254
Amassada 2	7452,5	2,208

#### 3.7.2. Determinació de la resistència a compressió

La determinació de la resistència a compressió es duu a terme amb un assaig no destructiu d'esclerometria.

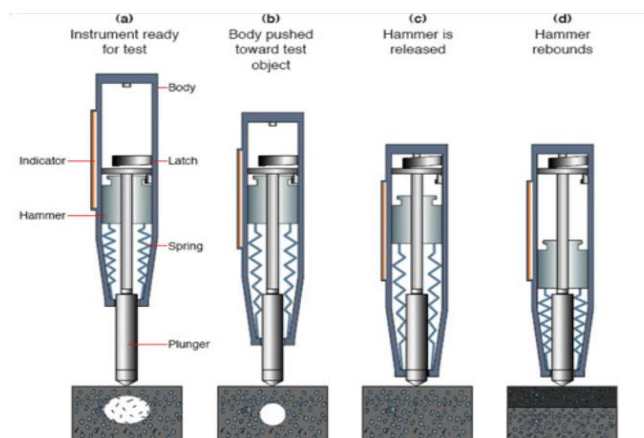


Figura 3. 25. Utilització de l'escleròmetre [48]

Es col·loca l'escleròmetre en posició vertical i es pressiona el cos sobre la superfície de les provetes fins que el Martell és alliberat. Aquest rebota i dona un valor que ha de ser convertit per l'escala que proporciona el mateix escleròmetre a resistència a compressió. (Figura 3.26).

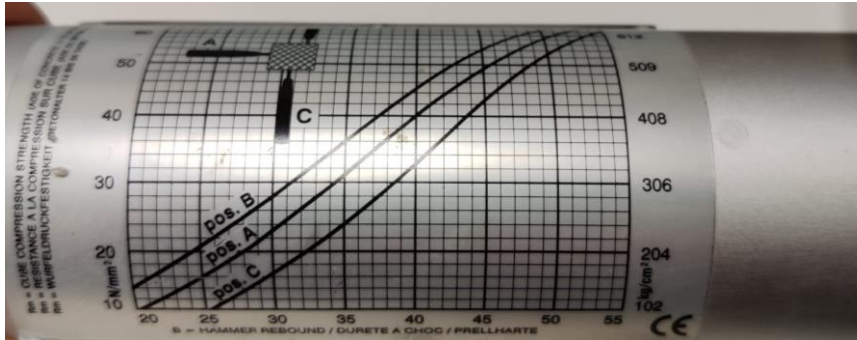


Figura 3. 26. Gràfic de conversió de l'escleròmetre

Agafant quatre mesures per espècimens, es calculen els valors mitjans que es troben a la Taula 3.10.

Taula 3. 10. Resistència a compressió per esclerometria

	Resistència a compressió (MPa)
Amassada 1	28,3
Amassada 2	25,8

De manera que l'amassada 1, que té una densitat superior, també té una resistència a compressió superior.

### 3.7.3. Determinació del mòdul d'elasticitat dinàmic

Finalment es duu a terme un assaig d'ultrasons per determinar el mòdul d'elasticitat dinàmic del formigó.

Per dur-ho a terme es necessita un generador d'ones al qual estarà connectat un emissor i un receptor. Aquests són col·locats als extrems de la proveta amb vaselina per millorar el contacte entre el dispositiu i la superfície. El generador crea ones que viatgen de l'emissor al receptor a través de la proveta, i es visualitza el temps de vol.



Figura 3. 27. Exemple d'assaig d'ultrasons

A continuació es calcula el mòdul elàstic dinàmic amb les següents equacions [48]:

$$E_{dinàmic} = \frac{\rho \cdot V^2}{K} \quad (x.x)$$

On  $\rho$  és la densitat en  $\text{kg/m}^3$ .

$V$  és la velocitat en  $\text{m/s}$ .

$K$  és una constant adimensional calculada amb l'equació 3.1.

$$K = \frac{1 - \nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} = 1,1 \quad (3.1)$$

On  $\nu$  és el coeficient de Poisson (0,2 en el cas de formigó).

Els resultats es troben a la Taula 3.11.

Taula 3. 11. Resultats de l'assaig d'ultrasons

	$E_{dinàmic}$ (GPa)
Amassada 1	40.195
Amassada 2	34.952

Es veu com l'amassada 1, té un mòdul d'elasticitat dinàmic superior.

### 3.8. Conclusions del capítol

Després de tota la caracterització de les diferents combinacions entre fil i recobrint, així com la caracterització del substrat i de la matriu, es considera que es té una idea clara del comportament de cadascun d'ells.

De l'assaig de tracció de fils es van determinar les dues resines sintètiques i les dues naturals amb les quals es va dur a terme la totalitat de la caracterització del FRCM. La resina epoxi com a resina de control i la resina de polièster per la seva flexibilitat i compatibilitat demostrada a l'assaig de tracció de FRCM, sobretot pel cànem.

De les resines naturals es van triar la colofònia amb el dissolvent adient per cada cas (COLTUR per cotó i COLAC per cànem) i la goma aràbiga sense el procés d'ultrasò, ja que enrigidia la resina i reduïa la deformació de les fibres.

Amb l'assaig de malles es van veure les propietats mecàniques de les diferents combinacions i l'assaig de FRCM va ser la clau per tancar aquest procés.

Als FRCM es va veure clarament la compatibilitat dels recobriments amb la matriu, descartant les resines naturals, ja que la seva compatibilitat era baixa i es va considerar que no tenia sentit utilitzar-les en una campanya experimental de gran format.

De manera que es decideix continuar la recerca tenint la resina epoxi com la resina de control i la resina de polièster com la novetat.

De la caracterització del substrat, s'extreu que les dues amassades tenen diferències en les seves propietats, però aquestes són inferiors al 15%, de manera que no serà una referència a l'hora de comparar el comportament de les bigues a flexió.



# CAPÍTOL IV. ADHERÈNCIA AMB EL SUBSTRAT

## 4.1. Introducció

Aquest capítol pretèn introduir al lector en les pràctiques comunes d'estudi d'adherència amb el substrat, i les raons darrere la decisió d'una nova adaptació per a l'estudi d'adherència al substrat de reforços externs. Així com la preparació i assaig dels espècimens i l'anàlisi dels resultats.

## 4.2. Estudis d'adherència amb el substrat

El més comú per l'estudi d'adherència amb el substrat és l'ús d'assaigs d'arrencament per una o dues capes (*single and double lap*).

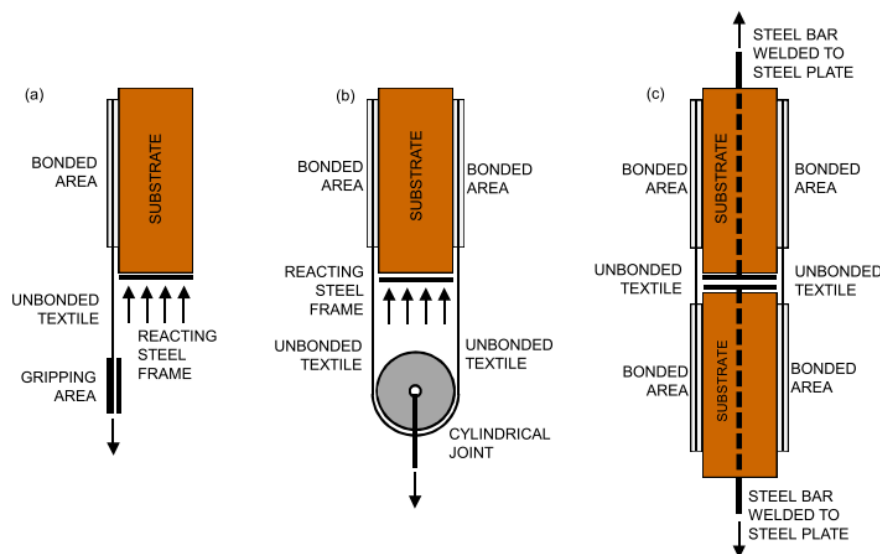


Figura 4. 1. Tipus d'assaigs d'adherència [50]

A la Figura 4.1, trobem a l'esquerra un assaig *single-lap* on el reforç extern es troba adherit a una de les superfícies del substrat, de manera que s'aplica una tensió en la mateixa direcció de les fibres mantenint el substrat fixat.

Al centre, es troba un assaig *double-lap*, on el reforç s'adhereix a dues superfícies oposades del substrat i s'estira de manera simultània als tèxtils que reforcen ambdues parts. (Figura 4.2, centre).

A la dreta es troba un assaig de *double-lap*, però el reforç extern també s'adhereix a dos substrats independents. L'objectiu és aplicar tensió a l'intentar separar els substrats entre ells. (Figura 4.3, dreta).

#### 4.2.1. Assajos d'adherència *single-lap*

Un assaig de *single-lap* consisteix a l'adherència parcial del reforç extern que s'adhereix al substrat en qüestió (en aquest àmbit normalment obra de fàbrica o formigó) i s'estira a través de la malla del reforç.

Depenent de la relació entre la fibra i la matriu, la fallada d'aquest tipus d'assaig pot variar, i per tant la corba tensió – desplaçament. De Santis et al. [49] reflecteix clarament les corbes a la Figura 4.2 i els diferents modes de fallada a la Figura 4.3. S'assaja l'adherència entre obra de fàbrica i diferents FRCM amb fibres sintètiques tals com basalt, carboni o acer entre altres.

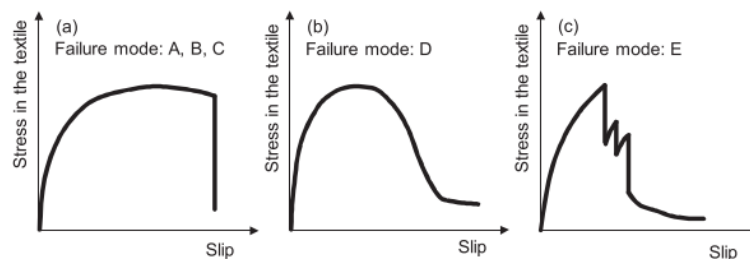


Figura 4. 2. Corbes tensió - desplaçament possibles a un assaig d'adherència 'single-lap' [50]

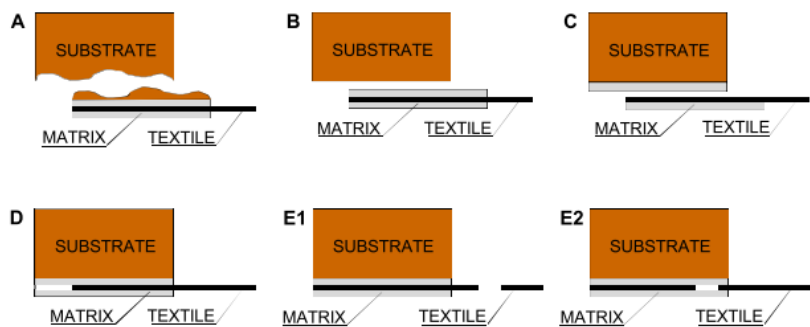


Figura 4. 3. Classificació dels modes de fallada

La primera corba (Figura 4.2, esquerra) reflecteix una bona interacció entre la fibra i la matriu. De manera que la tensió va creixent fins que ocorre una fallada fràgil. A la Figura 4.3, on tenim els diferents modes de fallada, aquest tipus d'interacció fibra-matriu provoca fallades com les de la part superior (A,B,C).

Durant la realització d'aquest projecte, una bona adherència entre la fibra i la matriu, també provoca la fallada per trencament del tèxtil (Figura 4.3, E1)

En el segon cas, la interacció entre la matriu i la fibra és relativament dèbil, de manera que el tèxtil llisca completament de la matriu (Figura 4.3, D) aconseguint una corba que assoleix la disminució de la tensió suaument. [49]

Finalment, si la interacció és molt dèbil, el tèxtil lliscarà parcialment de la matriu o trencarà produint una sobtada disminució de la tensió, però mantenint tensions de lliscament en estar encara parcialment embegut a la matriu. (Figura 4.3, E2). [49]

Durant la realització d'aquest projecte, una interacció molt dèbil de la matriu i la fibra provoca també la fallada D (Figura 4.3) corresponent una corba c (Figura 4.2).

Sneed et al. [50] van realitzar un assaig de tallant *single-lap*, per estudiar l'adherència d'un FRCM amb fibres d'acer amb el substrat de formigó. La fallada característica observada va ser el lliscament de les fibres i una ruptura de la matriu a la interfase fibra-matriu.

D'Ambrisi et al. [51] va estudiar l'adherència de FRCM de PBO amb un substrat de formigó. Variant la longitud adherida i les capes de FRCM aplicades busca trobar la relació adherència-desplaçament per ser capaç de modelitzar el seu comportament i calcular la longitud efectiva d'ancoratge, distància entre fissures i l'obertura.

#### 4.2.2. Assajos d'adherència double-lap

Un assaig de double-lap consisteix a tenir adherit el FRCM a dos substrats, o sobre un mateix substrat, adherir-hi el FRCM a dues de les seves superfícies de manera que s'aplica tensió simultània.

Falope et al. [52] adhereix FRCM d'acer de diferents densitats i amb diferents longituds d'adherència a substrats de formigó i a través de tracció directa. A continuació, busca un model analític que li permeti modelar el lliscament del FRCM sobre el substrat.

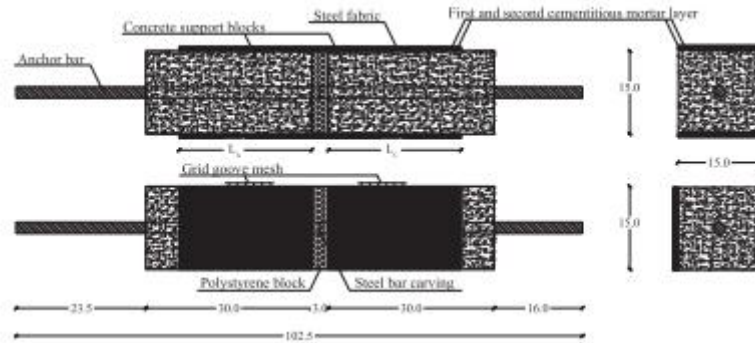


Figura 4. 4. Espècimen de double-lap [53]

Barducci et al. [53] que estudia de manera experimental i analítica l'adherència entre el FRCM i el substrat, deduïnt que el mecanisme de separació ocorre sempre abans a la interfase fibra-matriu que a la interfase entre la matriu i el substrat.

Tant com als assajos de 'single-lap' com als de double-lap' el més comú es trobar que s'aplica una tensió paral·lela al FRCM. Tot i no ser la càrrega a la qual després aquest material es trobaria sotmès en estar en servei.

L'objectiu a assolir és l'estudi de la interacció entre el substrat i el FRCM en condicions de servei, de manera que busquem que s'apliqui una càrrega perpendicular a la direcció del FRCM, per aconseguir càrregues de flexió.

Per aquest motiu, una nova metodologia d'assaig ha estat desenvolupada al proper apartat.

### 4.3. Metodologia de l'assaig

Per aquest assaig d'adherència, es pren com a referència l'assaig normalitzat d'adherència entre barres d'acer i formigó (Figura 9), de la norma UNE-EN ISO 10080:2006 [40]. Aquesta configuració consisteix en dues peces de formigó unides per la part superior per una peça metàl·lica i a la part inferior (cara de tracció) pel reforç usualment l'armadura d'acer, però en el cas d'estudi és un reforç extern de FRCM, el qual està adherit a les peces amb diferents longituds d'ancoratge.

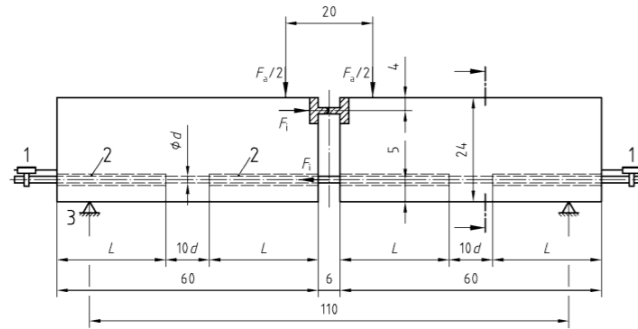


Figura 4. 5. Geometria de l'assaig d'adherència per flexió entre l'acer de l'armadura i el formigó [55]

A aquest projecte es duu a terme una adaptació de la geometria i del mètode proposat per adaptar-lo a reforços externs:

- Mètode: es decideix realitzar l'assaig en posició horitzontal per evitar la influència de la gravetat durant l'assaig. La fricció entre les bigues i la superfície es considera negligible. Es realitza l'aplicació de les càrregues mitjançant un actuator hidràulic amb control per desplaçament, a una velocitat de 5 mm/min.
- Geometria: es redueix la secció de la biga, ja que no influeix en les variables a estudiar, mantenint el llarg i es dissenyen amb un forat passant per facilitar el moviment de les bigues. També es modifiquen les arestes en contacte amb la ròtula per col·locar una ròtula externa al moment de l'assaig.

#### 4.3.1. Preparació dels espècimens

A continuació es detalla la fabricació dels diferents espècimens utilitzats.

Els espècimens consisteixen en parelles de bigues de formigó massís encarregades a Paver Prefabricats SA, que es mantenen juntes mitjançant una barra roscada a través del forat passant de les biguetes. A la part inferior, on s'aplicarà el FRCM, es dona més rugositat amb un martell de percussió.

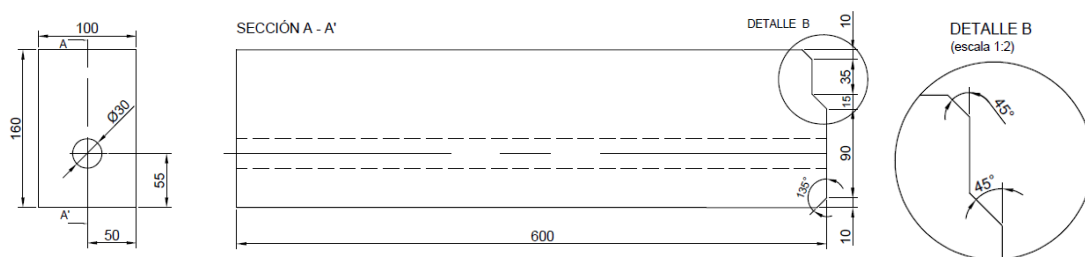


Figura 4. 6. Geometria de les biguetes d'adherència

Es dissenyen i es compren les bigues amb la geometria especificada a la Figura 4.6. El formigó utilitzat a la seva fabricació és formigó comú de 30 MPa.

Un cop aparellades, es fabriquen marcs per elaborar malles de 10x120 cm, que equivalen a malles de 10 flocs d'ordit i 24 passades de trama (que són espaiades cada 5cm per afavorir la penetració del morter). Que seran recobertes amb resina epoxi o polièster. Un cop reticulades les malles es comença el reforç de les biguetes.

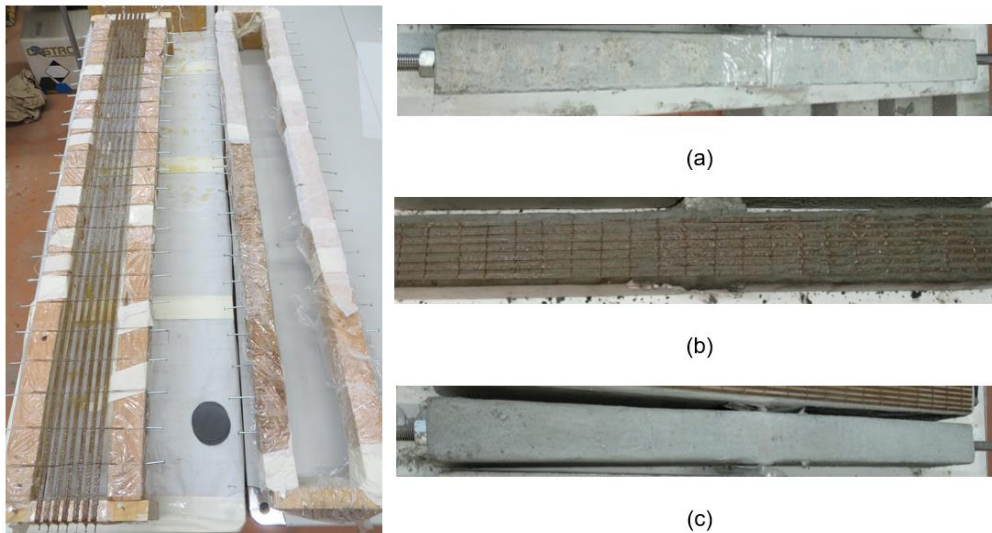


Figura 4. 7. Procés de reforç dels espècimens: fabricació de la malla (esquerra), reforç de les bigues (dreta)

El procés de reforç de les bigues (Figura 4.7), (a) consisteix en el previ recobriment de la longitud no ancorada (10, 20 o 30 cm) amb un material hidrofòbic (en aquest cas, plàstic film). Es prepara el morter amb una relació d'aigua-morter del 16,6% en pes i s'aplica una primera capa de 5 mm de morter a tota la superfície. Es col·loca la malla i es pressiona perquè el morter penetri correctament a través dels diferents espais de la malla (b). Finalment, s'aplica una segona capa de 5 mm de morter, s'anivella i es deixa curar durant 28 dies fins que els espècimens estan preparats per ser assajats (c).

#### 4.3.2. Equipament d'assaig

Per dur a terme l'assaig, s'utilitza un actuador hidràulic de 50 kN de rang subjectat a un marc de càrrega.

Es va utilitzar utilatge d'elevada densitat i dimensions que no permeten les seves deformacions per a les càrregues a aplicar, es delimita l'àrea d'assaig i es col·loquen els suports i els punts de càrrega. Es van modificar lleugerament les distàncies entre suports i els punts d'aplicació per adaptar-se al material disponible.

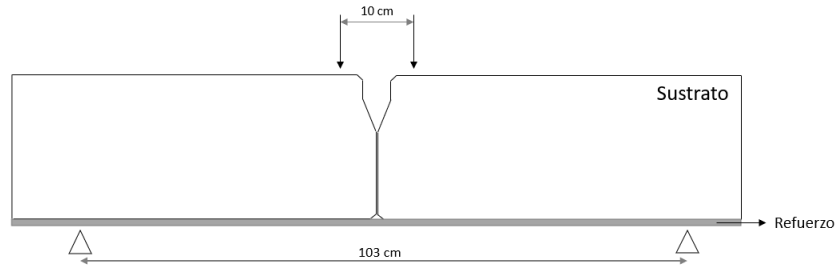


Figura 4. 8. Distàncies entre suports i entre punts d'aplicació

La figura 5 representa la zona d'assaig real utilitzada.

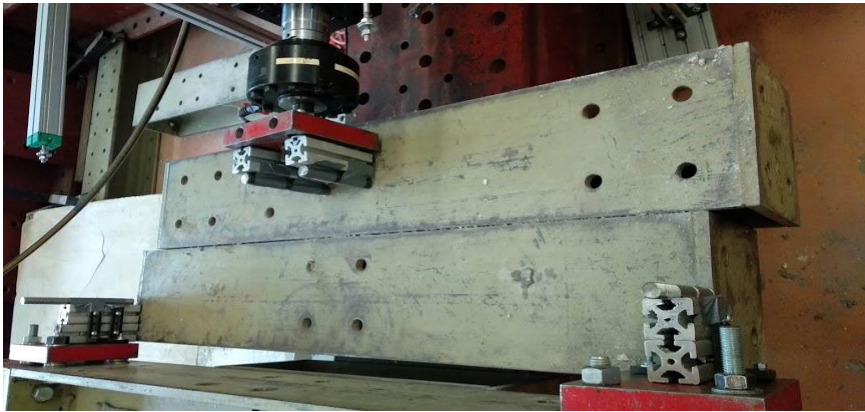


Figura 4. 9. Configuració de la zona d'assaig

La sensorització va consistir en dos potenciòmetres de 10 cm de rang col·locats a 30cm de l'extrem de la biga, per assegurar una que la càrrega s'aplicava simètrica a les dues biguetes. Al centre es va col·locar un LVDT de 15mm de rang per mesurar l'obertura del contacte entre les biguetes.

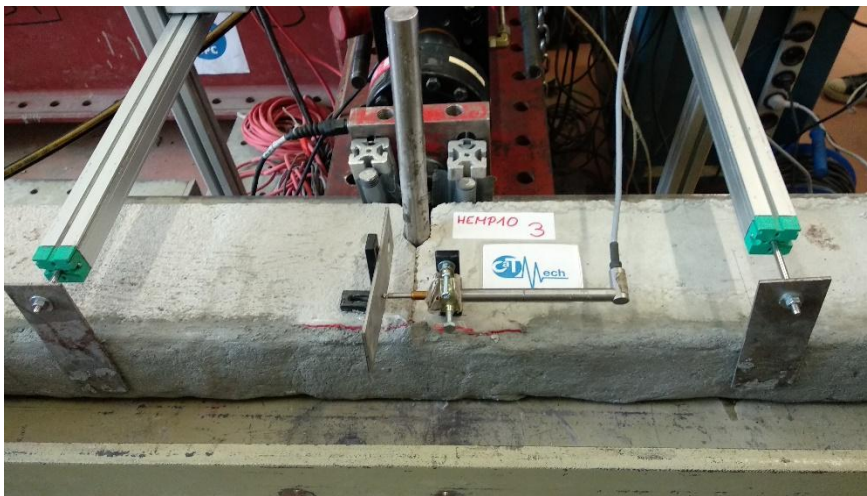


Figura 4. 10. Sensorització

### 4.3.3. Resultats

A continuació, es mostren els resultats experimentals dels 12 espècimens d'adherència assajats, corresponents a les següents configuracions:

- Cànem recobert amb epoxi amb longitud d'adherència de 50 cm.
- Cànem recobert amb epoxi amb longitud d'adherència de 40 cm.
- Cànem recobert amb epoxi amb longitud d'adherència de 30 cm.
- Cotó recobert amb epoxi amb longitud d'adherència de 50 cm.
- Cànem recobert amb polièster amb longitud d'adherència 50 cm.
- Cotó recobert amb polièster amb longitud d'adherència 50 cm.

Es mostra la Taula 4.1 el resum dels resultats, així com imatges de la fallada dels espècimens i els gràfics de força-desplaçament de l'actuador a les figures 4.11 i 4.12.

Les fallades es classifiquen com:

- I – Ruptura de la malla.
- II – Despreniment del reforç del substrat.
- III – No hi ha ruptura ni despreniment total.

Taula 4. 1. Resultats de l'assaig d'adherència per flexió

Fibra	Recobriments	Long. Adherència (cm)	Espècimen	F (kN)	Desp. (mm)	F mitjana (kN)	Desp mitjà (mm)	Fallada
Cànem	Epoxi	50	1	4,31	11,75	4,53	14,46	I
			2	4,53	15,78			I
			3	4,77	15,86			I
		40	1	4,83	24,31	5,11	21,30	II
			2	4,94	20,36			I
			3	5,57	19,24			I
		30	1	4,51	21,91	4,75	22,56	I
			2	4,48	23,29			I
			3	5,27	22,47			I
Cotó	Epoxi	50	1	4,10	51,63	4,04	73,21	III
			2	3,72	108,26			III



			3	4,31	59,75			III
Cànem	Polièster	50	1	-	-	3,57	11,65	-
			2	3,51	12,14			I
			3	3,63	11,16			I
Cotó	Polièster	50	1	3,84	116,70	4,46	103,23	-
			2	-	-			III
			3	5,09	89,76			III

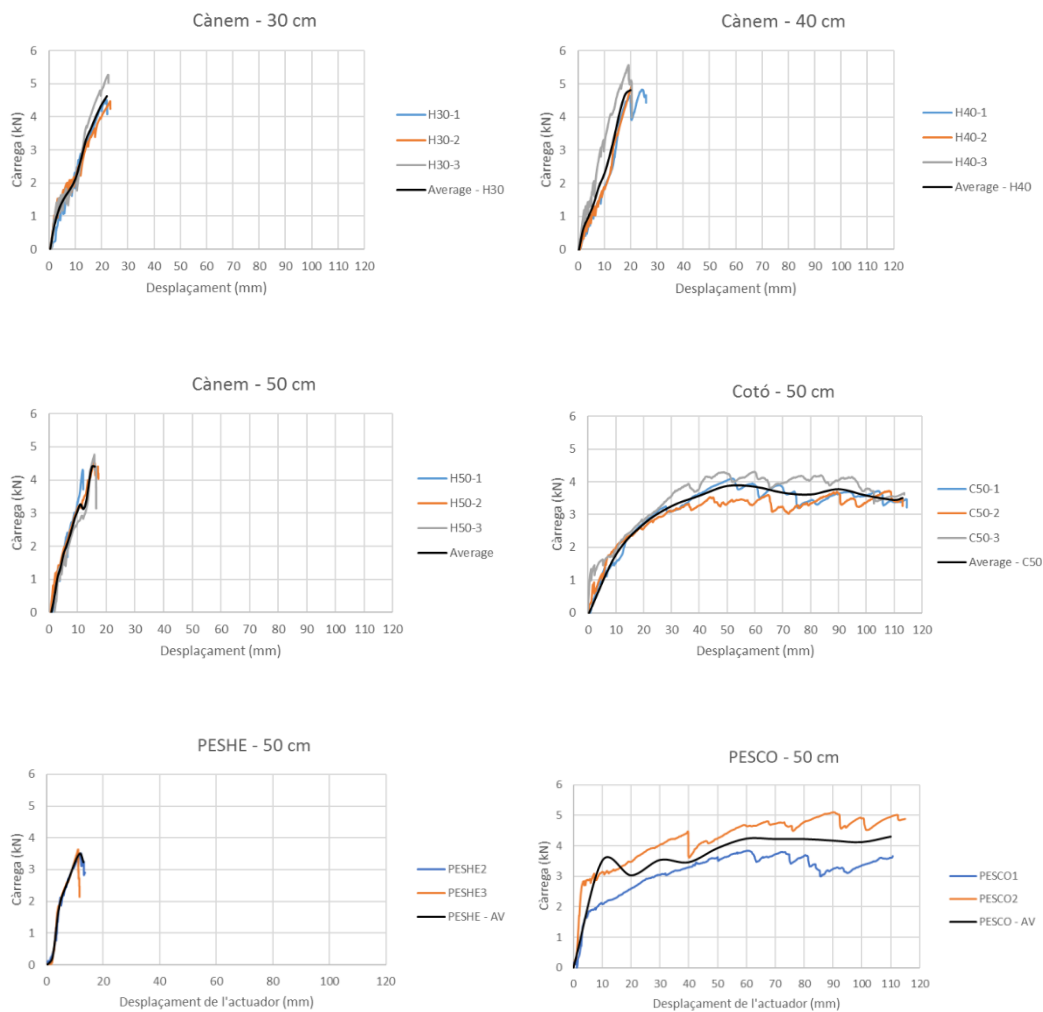


Figura 4. 11. Corbes de càrrega - desplaçament de l'actuador de l'assaig d'adherència per flexió



Figura 4. 12. Fissuració dels diferents casos: cànem (esquerra), cotó (dreta)

#### 4.3.4. Discussió

A l'assaig d'adherència per flexió, s'estudia l'efecte de dues variables:

- La longitud d'adherència: s'estudia l'efecte que té la longitud d'adherència en els espècimens utilitzant tres longituds diferents per a un mateix tipus de FRCM, en aquest cas cànem.
- La fibra: per comparar l'efecte de la fibra en aquesta aplicació, s'escull una longitud d'adherència i també s'assaja canviat la fibra per cotó. La longitud seleccionada va ser la de 50 cm, per poder visualitzar més clarament la deformació del cotó.
- El recobriment: per comparar l'efecte del recobriment sobre la fibra quan aquesta està sotmesa a càrregues de tracció per flexió.

A continuació s'analitza per a cadascuna de les variables:

- Efecte de la longitud d'adherència

En fer una comparació entre les longituds d'adherència pel cànem (Figura 4.13), a l'augmentar la longitud augmenta el desplaçament en el moment de fallada, que s'incrementa en un 47% al reduir la longitud 10 cm, i un 55% al reduir-la 20 cm.

En canvi, amb la força es veu un augment de la força màxima al reduir la longitud, un 12% reduint-la 10 cm. Al continuar reduint-la 10cm, la força en aquest cas pateix una reducció del 7%.

De manera que es considera òptima la longitud d'adherència de 40cm, al presentar un increment de la força i del desplaçament considerable.

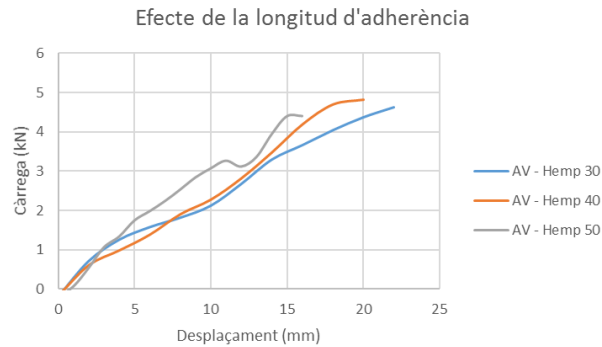


Figura 4. 13. Comparació de les mitjanes per a cada longitud d'adherència

- Efecte de la fibra

Al fer una comparació entre la fibra utilitzada per a un mateix cas de longitud d'adherència (Figura 4.14), es fa notable el potencial de deformació del cotó, que la seva deformació triplica la del seu comparable de cànem.

Si bé la força no arriba a la càrrega del cànem recobert amb epoxi, és del mateix ordre de magnitud (un 10,8% més baixa), i es manté contant durant tota l'elongació de la fibra. Aquesta càrrega és mantinguda mitjançant mecanismes de fricció entre la malla de cotó i el morter.

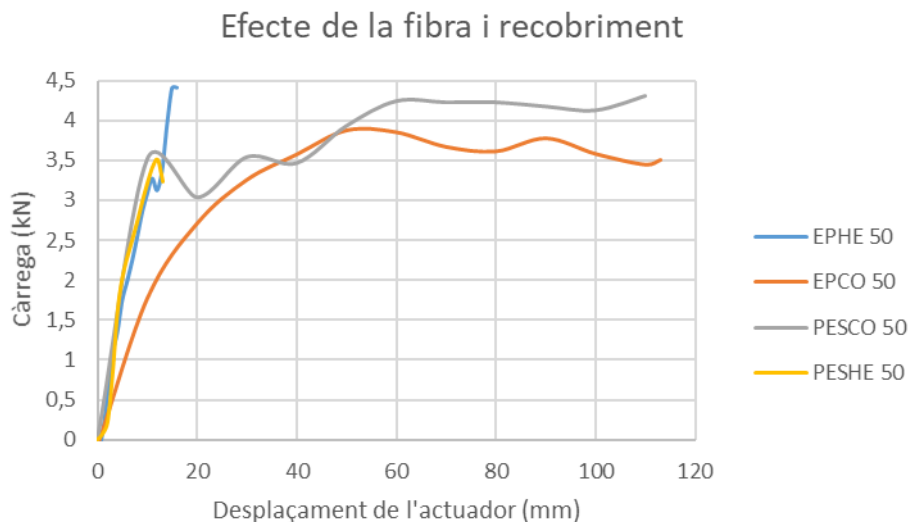


Figura 4. 14. Comparació de les mitjanes per a cada fibra

Al no haver fallat en cap cas a causa de la ruptura de la malla, si bé una estructura amb una fletxa tan elevada deixa de tenir funcionalitat estructural, la seva resistència a la ruptura evitaria l'esfondrament total de l'estructura.

#### 4.3.5. Conclusions

Com a conclusions de l'assaig experimental, es troba que:

- Els espècimens de cànem presenten un comportament fràgil mentre que els de cotó presenten un comportament dúctil, amb una pseudoplasticitat que li permet dissipar més energia abans del trencament.
- Les provetes de cànem aconseguen valors de càrrega màxima més elevats i s'esquerden menys, cosa que significa una completa transmissió entre la matriu i la fibra.
- L'efecte de la longitud enllaçada es pot observar en el desplaçament en els pics de càrrega, on un increment de la longitud adherida redueix l'allargament que la fibra pot suportar abans de trencar-se.
- L'obertura de l'esquerda es redueix quan s'incrementa la longitud adherida.
- Les provetes de cotó, a causa de la seva pseudoplasticitat, mantenen la capacitat de càrrega mitjançant la fricció.

#### 4.4. Conclusions del capítol

S'ha assolit amb èxit l'adaptació de la normativa per l'assaig d'adherència d'un reforç extern sobre un substrat de formigó armat.

De l'estudi d'adherència amb el substrat, s'extreu que la longitud d'adherència no modifica significativament la força màxima que pot suportar el reforç, sinó més aviat la deformació del material compost al qual assoleix la càrrega màxima.

El tipus de fibra determina el tipus de fallada, ja que la malla de cànem acaba per trencar-se en tots els casos, mentre que la de cotó tendeix a deformar-se sense arribar al trencament.

El cànem amb epoxi assoleix la càrrega més elevada i a continuació comença a trencar els diversos fils que la conformen, mentre que el cotó es deforma i manté la càrrega, gràcies, en part, a la fricció amb la matriu.

Això ens dóna indicis del tipus de fallada que es pot esperar durant els assajos de flexió.

# CAPÍTOL V. FLEXIÓ CÍCLICA DE BIGUES REFORÇADES

## 5.1. Introducció

Aquest capítol explica amb detall tot el procés de preparació i assaig d'anàlisi modal, el reforç de les bigues, i finalment l'assaig a flexió de les bigues de formigó armat reforçades amb FRCM vegetal, així com l'exposició i l'anàlisi de resultats dels diferents assajos realitzats.

## 5.2. Geometria de les bigues

Primer de tot, es va determinar la geometria de les bigues a utilitzar a partir de les dimensions utilitzades a diferents assajos de l'estat de l'art. Les dimensions seleccionades són 15 cm x 25 cm x 300 cm. (Annex A1).

Els càlculs realitzats per la determinació de les armadures es troben a l'Annex A1.

La geometria final va consistir amb les dimensions de la Figura 5.1.

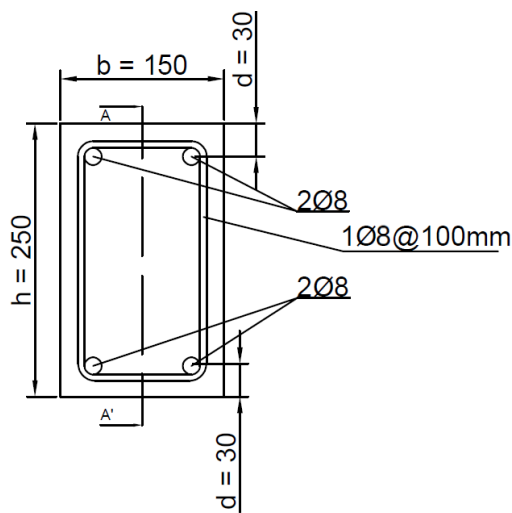


Figura 5. 1. Secció de les bigues de formigó armat

Com es veu a la Figura 5.2, cada 10 cm es troba l'armadura de tallant que és del M8 assenyalat a la figura anterior.



Figura 5. 2. Armadures de les bigues

Les bigues són encarregades a Paver Prefabricats, que les fabrica en dues amassades.

## 5.3. Assaig d'anàlisi modal

### 5.3.1. Context de l'anàlisi modal

Abans de reforçar les bigues, aquestes són sotmeses a un assaig d'anàlisi modal. Aquest assaig no destructiu consisteix en l'excitació de punts marcats de la estructura, la qual és captada per un sensor, en aquest cas, fix. L'objectiu és obtenir les diferents freqüències de ressonància de l'estructura obtenint els modes de vibració.

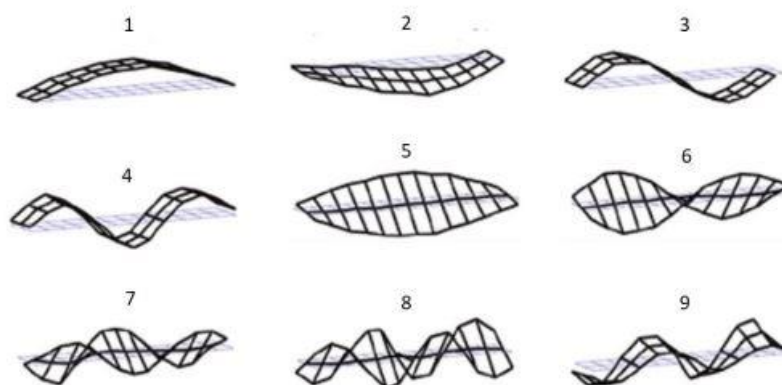


Figura 5. 3. Modes de vibració.

La Figura 5.3, mostra diferents modes de vibració que pot tenir una estructura. Dels modes 1 al 4, són modes purament de flexió, essent 1, 3 i 4 modes de flexió vertical i el mode 2 de flexió transversal. Els modes 5, 6, 7 i 8 són modes purament de torsió, on l'estructura rota de manera transversal. Finalment, el mode 9 correspon a un mode que combina flexió i torsió.

### 5.3.2. Preparació dels espècimens

Per l'anàlisi modal, les bigues són marcades amb una graella de punts, que seran on es duran a terme els impactes. Un total de 51 punts són marcats a la superfície superior de la biga.



Figura 5. 4. Distribució dels punts d'impacte sobre la biga

Per l'assaig pre-reforç, les bigues no necessiten més preparació per dur a terme l'assaig.

En el cas de l'assaig post-reforç, les bigues han de ser preparades per ser reforçades.

#### 5.3.2.1. Les malles

Es teixeixen les malles formades per 10 flocs en un marc de fusta (Figura 5.5). La diferència amb les utilitzades per FRCM consisteix en la separació entre els fils de trama, que són espaiats fins arribat als 5 cm. Això és per obrir més la malla a la penetració del morter.

La malla és recoberta amb resina epoxi o de polièster, amb una dosificació de 550g per les malles de cotó i 375g per les malles de cànem.

Un cop impregnades, es deixen 48h abans de ser extretes del marc.



Figura 5. 5. Malla per bigues de flexió

#### 5.3.2.2. Les bigues

En primer lloc, la superfície a reforçar de les bigues ha de ser enrugosida, ja que és una cara llisa (Figura 5.6). Per fer-ho, a l'igual que amb les biguetes d'adherència, s'utilitza un martell mecànic Hikoki DH26PB2.



Figura 5.6. Biga abans i després de la utilització del martell mecànic

A continuació, com es mostra a la Figura 5.7, es col·loca un marc al voltant de la biga per evitar que el futur morter dipositat no es desprengui per l'efecte de la gravetat, que es sosté mitjançant s'ergents.



Figura 5.7. Marc col·locat a la biga

Per reforçar la biga es segueix el mateix procediment que amb les biguetes d'adherència.

1. Preparació de la barreja de morter. S'utilitza el morter de reparació R3, Sika Monotop 612, amb una relació aigua-morter de 16,6% en pes.
2. S'humiteja la superfície a reforçar i s'aplica una capa de 5mm de morter. Per assegurar l'alçada de la capa, s'utilitza un regle metàl·lic i es comprova cada 20 cm aproximadament que la capa tingui l'alçada corresponent (Figura 5.8).

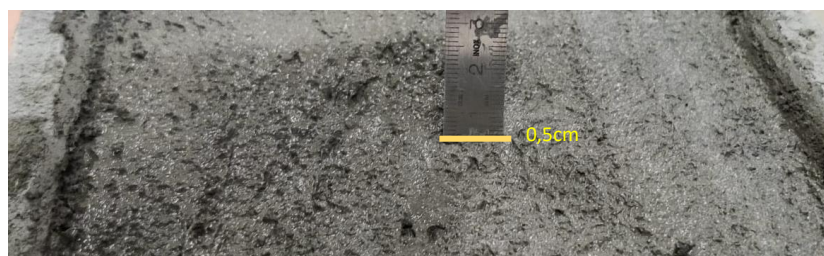
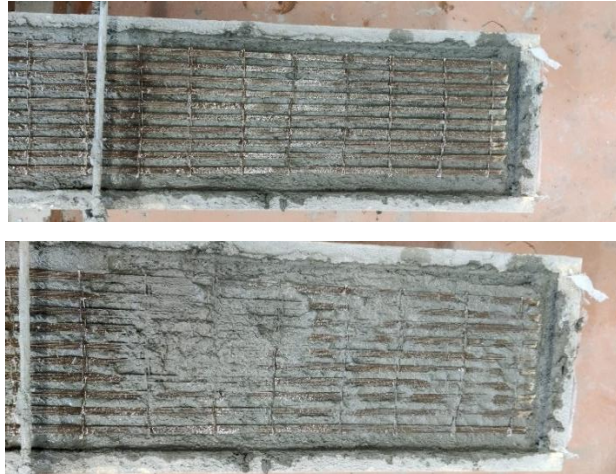


Figura 5.8. Col·locació de la primera capa de morter i mesura

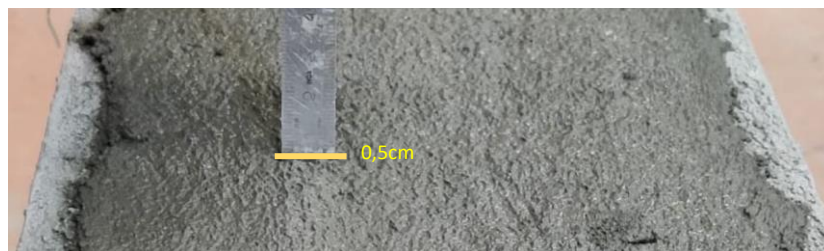
3. Es col·loca la malla i es pressiona contra el morter per fer que penetri a través de les obertures (Figura 5.9).





*Figura 5. 9. Malla col·locada sobre la primera capa*

4. A continuació es col·loca una segona capa de morter de 5mm d'alçada. De la mateixa manera que abans de col·locar la malla, amb l'ús d'un regle metàl·lic, es busca el contacte amb la malla i una mesura de 0,5 cm cada 20 cm aproximadament (Figura 5.10).



*Figura 5. 10. Malla recoberta amb la segona capa de morter i comprovació*

5. Finalment, es col·loca un plàstic recobrint la biga per evitar l'evaporació de l'aigua (Figura 5.11).



*Figura 5. 11. Biga reforçada en temps de presa i enduriment*

Un cop reforçades, es deixen 28 dies de presa i enduriment abans de dur a terme l'assaig d'anàlisi modal post-reforç.

### 5.3.3. Equipament

Per dur a terme l'anàlisi modal, s'utilitza un martell d'impacte model 8206-003 de Brüel&Kjaer i un acceleròmetre model 4370V també de Brüel&Kjaer (Figura 5.12).

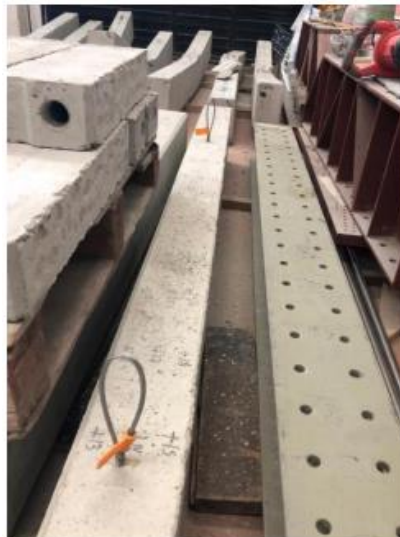


*Figura 5. 12. Fotografia de l'equipament extreta dels catàlegs*

La punta del martell utilitzada és una punta de plàstic que és la que més s'adequava al formigó. L'acceleròmetre es fixa a la posició 9 de la graella de punts magnèticament enganxant una arandela a la biga.

Per registrar les dades, es va utilitzar un adquiredor model 3050-B-060 de Brüel&Kjaer i el software de la mateixa companyia PULSE Labshop.

Les bigues són penjades utilitzant el pont grua amb cadenes que s'agafen a unes argolles metàl·liques proveïdes pel fabricant de les bigues (Figura 5.13).



*Figura 5. 13. Elements de subjecció de les bigues*

L'assaig consisteix en la realització de dos impactes idealment idèntics a cada punt assenyalat amb el martell (Figura 5.14). L'acceleròmetre registra les dades de les vibracions que s'utilitzarà al post-processat de les dades.

El primer impacte es realitza i es dona temps al programa perquè visualitzi les dades de l'impacte. A continuació, es realitza el segon impacte. Per saber si s'han els impactes són similars, es mira al gràfic de coherència que proveeix el programa. Si el segon impacte ha tingut la mateixa direcció i força que el primer, es mostrarà un gràfic de coherència similar al de la Figura 5.14 (dreta), on els valors entre 0,9 i 1 són desitjables.

Si és així, es guarda el punt i es procedeix amb el següent. En cas contrari, s'ha de tornar a repetir els dos impactes al mateix punt.

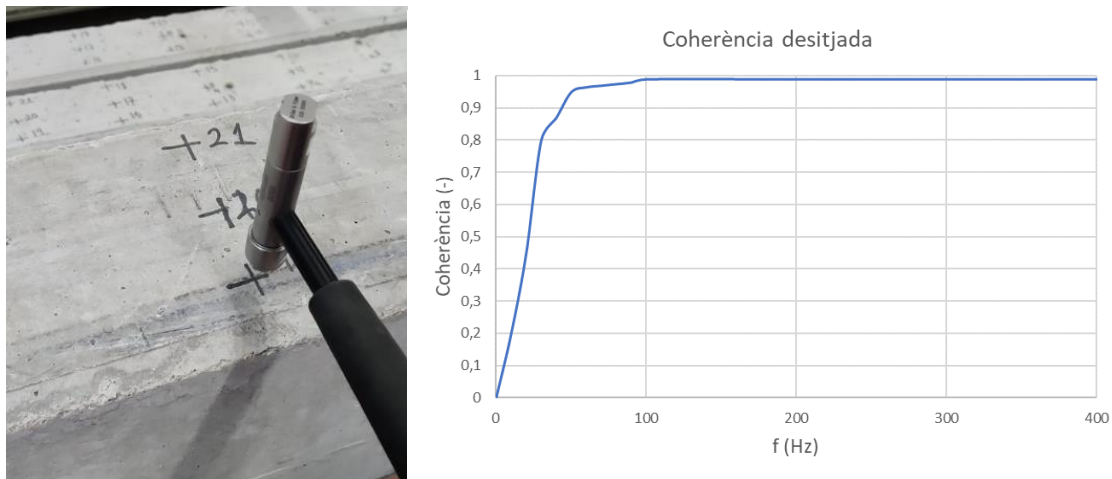


Figura 5. 14. Impacte amb el martell (esquerra), coherència ideal (dreta)

A freqüències baixes la coherència és inferior a 0,9, però això no suposa un problema, ja que els modes de vibració a estudiar es troben a partir dels 90Hz.

#### 5.3.4. Resultats

El software utilitzar per fer el postprocés de la informació adquirida és ME'ScopeVES.

A una plantilla prèviament preparada d'AutoCAD amb la graella de punts, s'importa i s'associen la informació dels diferents impactes amb els punts impactats.

A continuació, es superposa la informació de tots els punts. Els modes de vibració ressonen generant pics a les freqüències dels modes (Figura 5.15).

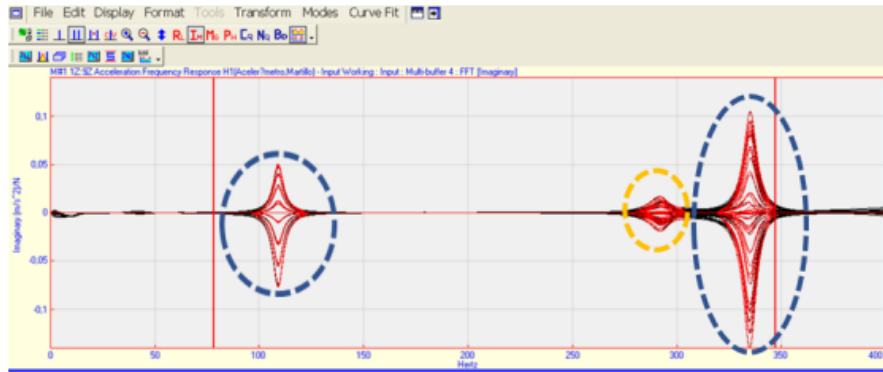


Figura 5. 15. Superposició dels impactes i freqüència dels modes de vibració

A continuació, s'acoten les freqüències dels modes fins a extreure el valor concret de freqüència i amortiment.

Després de post-processar totes les bigues, els modes comuns trobats són la primera flexió (Figura 5.16) i la primera torsió (Figura 5.17).

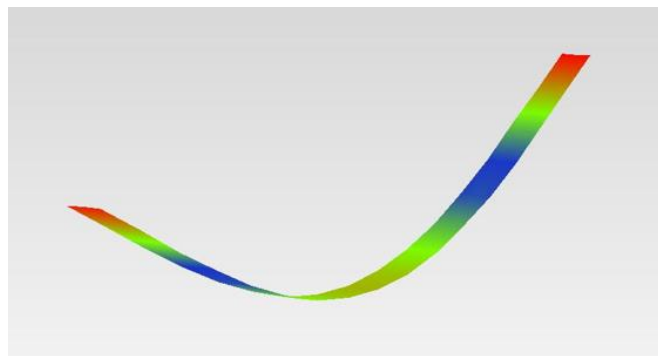


Figura 5. 16. Primer mode de flexió

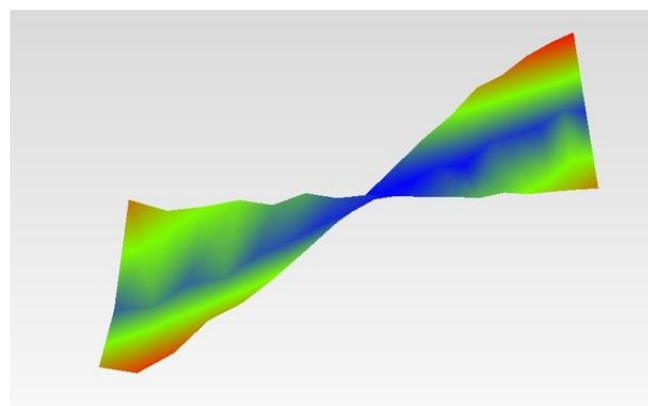


Figura 5. 17. Primer mode de torsió

A la Taula 5.1 es troben les freqüències i amortiment dels modes comuns trobats.

Taula 5. 1. Resultats de l'anàlisi modal

Espècimen	Primer mode de flexió				Primer mode de torsió			
	Pre-reforç		Post-reforç		Pre-reforç		Post-reforç	
	F (Hz)	$\zeta$ (%)	F (Hz)	$\zeta$ (%)	F (Hz)	$\zeta$ (%)	F (Hz)	$\zeta$ (%)
EPHE1	107,0	2,75	108	2,76	332	1,08	319	1,14
EPHE2	76,4	6,29	78,2	6,2	297	1,69	285	1,73
EPHE3	54,2	8,80	60	7,68	311	2,15	234	2,35
EPCO1	107,0	2,76	110	2,74	333	1,15	321	1,13
EPCO2	109,0	2,69	113	2,70	335	1,10	325	1,12
EPCO3	109,0	2,68	113	2,69	335	1,08	327	1,12
PESHE1	101,0	2,94	103	2,02	312	1,16	297	1,12
PESHE2	107,0	2,73	109	1,89	333	1,07	321	0,80
PESHE3	108,0	2,71	110	1,89	337	1,07	324	0,81
PESCO1	61,9	7,37	68,5	4,38	265	2,07	250	1,48
PESCO2	101,0	2,94	93,5	2,67	311	1,16	291	0,94
PESCO3	91,9	3,75	95,9	2,40	304	1,29	290	0,94

\*Siguent  $\zeta$  l'amortiment en %.

Es considera que als modes de vibració on l'esmoreïment en algun dels casos és superior al 5% hi ha hagut algun error durant el postprocés de dades i, per tant, les freqüències dels dos modes trobats no són correctes.

### 5.3.5. Discussió

La discussió es durà a terme primer fent una comparació entre massades abans de ser reforçades. A continuació es compararà l'efecte del reforç tenint en compte el cas (EPCO, EPHE, PESCO, PESHE) i l'amassada.

- Efecte de la amassada

Començant per les bigues sense reforçar, totes les bigues tenen les mateixes característiques. Tot i així, es veu una gran diferència entre els valors per a un mateix mode de vibració. Això és degut a que les bigues van estar fabricades en dues amassades. Per això es consideren dos grups a la Taula 5.2:

Taula 5. 2. Relació entre espècimens i amassades

Amassada 1	EPHE1	EPCO1	EPCO2	EPCO3	PESHE2	PESHE3
Amassada 2	EPHE2	EPHE3	PESHE1	PESCO1	PESCO2	PESCO3

Avaluant els valors mitjans de cada grup, trobem els valors de la Taula 5.3.

Taula 5. 3. Valors mitjans de freqüència i amortiment pels modes de vibració de bigues no reforçades

Espècimen	Primer mode de flexió		Primer mode de torsió	
	Pre-reforç	Pre-reforç	Pre-reforç	Pre-reforç
	F (Hz)	Am (%)	F (Hz)	Am (%)
Amassada 1	107,8	2,55	334,2	1,09
Amassada 2	81,1	5,67	300,0	1,59

L'amassada 1 es correspon amb una densitat superior i un major mòdul d'elasticitat. Al ser més rígida, la freqüència és major. En el cas de flexió és clar ja que l'expressió 5.1 relaciona la freqüència de vibració dels modes de flexió amb la rigidesa de l'element [54]:

$$\omega = \frac{\pi^2}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_y}{\bar{m}}} \quad (5.1)$$

On  $\omega$  és la freqüència en Hz.

E és el mòdul d'elasticitat en Pa.

$I_y$  és la inèrcia de la secció en l'eix y en m<sup>4</sup>.

m és la massa distribuïda de la biga en kg/m.

En el cas de la torsió, no hi ha manera de model·lar-lo de forma analítica, de manera que es possible pensar que aquesta major densitat i rigidesa, augmenta la freqüència de vibració de tots els modes de la biga.

- Efecte del reforç

Un cop les bigues són reforçades, a la Taula 5.4 es troben els valors mitjans de freqüència en compte el tipus de reforç.

Taula 5. 4. Valors mitjans de freqüència i amortiment post-reforç

Espècimen	Primer mode de flexió		Primer mode de torsió	
	Pre-reforç	Post-reforç	Pre-reforç	Post-reforç
	F (Hz)	F (Hz)	F (Hz)	F (Hz)
EPHE	107,0	108,0	332,0	319,0
EPCO	108,3	112,0	334,0	324,0
PESHE	105,3	107,3	327,0	314,0
PESCO	96,5	94,3	314,5	290,5

En la majoria de casos es veu com després de ser reforçades, la freqüència de vibració del primer mode de flexió augmenta al voltant de 5%, mentre que la freqüència del mode de torsió disminueix en un 5%.

A l'hora de valorar perquè es degut aquesta variació s'han de considerar tant el mòdul d'elasticitat com el volum afegit a les bigues.

Fent ús un altre cop de l'Equació 5.1, l'addició del FRCC comporta una modificació en la rigidesa (EI) i en la massa de la biga. La Taula 5.5 exposa els diferents valors de cada terme.

Taula 5. 5. Dades dels materials

	Formigó	Acer	Morter	Malla			
				EPCO	EPHE	PESCO	PESHE
E (MPa)	40 000	210 000	8 920	1 371	40 535	1 301	45 566
$I_y$ (m <sup>4</sup> )	$1,56 \cdot 10^{-4}$	$1,73 \cdot 10^{-6}$	$2,54 \cdot 10^{-5}$	$6,84 \cdot 10^{-8}$	$2,03 \cdot 10^{-8}$	$6,84 \cdot 10^{-8}$	$2,03 \cdot 10^{-8}$
m (kg/m)	53,66	1,61	3,15	0,047	0,047	0,053	0,037
$E \cdot I_y$ (MPa·m <sup>4</sup> )	6,24	0,37	0,23	0,000094	0,00082	0,000089	0,000925

A la Taula 5.6 es pot veure com els elements més significants en la modificació de la freqüència són, per ordre: el formigó, l'acer, el morter i finalment les malles essent més significativa la malla de cànem que la de cotó per ambdós casos.

A continuació es calcula el terme interior de l'arrel quadrada de l'equació 5.1.

Taula 5. 6. Terme inclosos en l'arrel quadrada de l'equació X

Biga	Control	EPCO	EPHE	PESCO	PESHE
$\frac{\sum E \cdot I_y}{\sum m}$ (m <sup>2</sup> /s)	25836,92	26393,13	26395,95	26392,44	26397,36
$\Delta \frac{\sum E \cdot I_y}{\sum m}$ (%)	-	2,15	2,16	2,15	2,16

Com es pot veure a la Taula 5.6, el terme és superior als casos reforçats. La variació respecte a les bigues de control es d'aproximadament un 2,15% en tots els casos. Això implica que indiferentment del tipus de malla, la variació és similar. L'element afegit comú a tots els casos és el morter. S'adhereix la mateixa quantitat de morter a cadascuna de les bigues, de manera que és possible que la variació sigui deguda majoritàriament degut al morter que no pas a les malles.

Per fer una petita comparació entre els fils, tot i tenir un impacte insignificant en la modificació de la freqüència, el cànem té un impacte superior degut a la rigidesa de la malla recoberta de cànem és superior per ambdós casos que la del cotó.

### 5.3.6. Conclusions

Per concloure aquest apartat, s'ha dut a terme amb èxit l'anàlisi modal de les bigues de formigó armat sense i amb reforç.

S'han trobat i analitzat més en detall els modes de vibració comuns a tots els casos, i les conclusions són les següents:

- La rigidesa dels materials modifica la freqüència dels modes de vibració.

A través de les equacions dels modes naturals de vibració d'una biga, s'ha vist com la rigidesa és molt significativa en el comportament vibratori. A escala experimental s'ha pogut comprovar el seu efecte, al tenir diferències de fins al 40% en la freqüència de vibració d'un mateix mode segons l'amassada a la que pertanyés la biga.

- L'efecte del reforç en les freqüències de vibració és majoritàriament degut a l'aplicació del morter, que modifica el cantell de la biga.

A la Taula 5.5, s'ha pogut veure la significació de cadascun dels elements utilitzats per al reforç de les bigues, tenint diferents ordres de magnitud entre el morter i les malles.

- El FRCM de cànem té un impacte més alt en la variació del comportament vibratori.

Això és degut a l'elevat mòdul d'elasticitat del cànem, que és similar al del mateix formigó, tot i tenir una secció i pes de la malla inferior a la de cotó.



## 5.4. Assaig de flexió cíclica

Per l'assaig de flexió cíclica, les bigues ja estan preparades per ser assajades.

### 5.4.1. Equipament

Per dur a terme l'assaig de flexió s'utilitza un actuador oleo-hidràulic de 100kN de rang. La força es transmesa a una biga que té una separació de 100 cm entre els punts d'aplicació de força sobre la biga (Figura 5.18).



Figura 5. 18. Test set-up

La sensorització consisteix en 3 parelles de sensors. Es col·loquen 4 potenciómetres de 10cm de rang a 83 cm dels extrems de la biga i 2 potenciómetres localitzats al centre de 25 cm de rang.

El programa d'adquisició de dades és el CATMAN de HBM a una freqüència de 50Hz.

Per les bigues de control es duu a terme un assaig de flexió estàtica, dut a terme per control de desplaçament a una velocitat de 1mm/s, per determinar la seva capacitat màxima.

Per les bigues reforçades, s'aplica un protocol FEMA 461 [2] que combina cicles d'increment del desplaçament de l'actuador. En un protocol que s'utilitza per avaluar la resiliència de les estructures en cas de terratrèmols. Es fan dos cicles per a cada desplaçament, començant per 1mm, i a continuació aquest és augmentat en 1,4 vegades el desplaçament del cicle anterior (Figura 5.19). L'assaig es duu a terme mitjançant un control per desplaçament a una velocitat de 1mm/s.

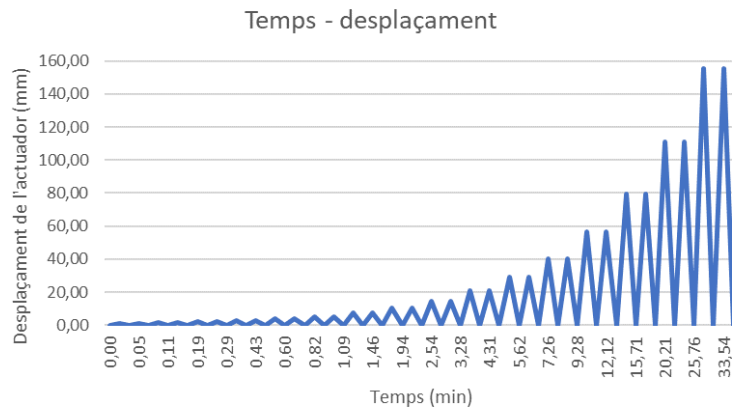


Figura 5. 19. Desplaçament de l'actuador durant l'assaig de flexió cíclica

D'aquesta manera es pot veure a cada cicle la recuperació elàstica de la biga i determinar els paràmetres de deteriorament.

#### 5.4.2. Paràmetres a avaluar

A través del tipus d'assaig definit, cal especificar quins són aquells paràmetres que són interessants d'avaluar.

Aquests són:

- Força/desplaçament - temps

Serveix per comprovar la correcta aplicació de la càrrega a l'espècimen.

- Moment - desplaçament

L'objectiu és observar la variació en el moment màxim capaç de suportar per a cada cicle. El desplaçament utilitzat és la mitjana mesurada pels potenciómetres centrals. Per calcular el moment, tenint en compte la configuració de l'assaig, al ser un assaig de flexió a 4 punts, el moment es calcula com:

$$M = \frac{F}{2} \cdot a \quad (5.2)$$

On F és la força en kN.

a és la distància lliure entre un suport i el punt d'aplicació de càrrega més proper (890 mm).

- Rigidesa a flexió

La rigidesa a flexió és la seva capacitat per resistir esforços de flexió. Es calcula com:

$$EI \text{ (kNmm)} = \frac{F \cdot a \cdot (3L^2 - 4a^2)}{24 \cdot d} \quad (5.3)$$

On  $F$  és la força registrada en funció del temps en kN.

$L$  es la longitud total de la biga en mm.

$d$  és la mitjana del desplaçament dels potenciómetres centrals en funció del temps en mm.

$a$  és la distància lliure entre un suport i el punt d'aplicació de càrrega més proper (890 mm).

Aquesta s'anirà degradant a mesura que es succeeixen els cicles. De manera que la seva degradació la relacionarem com la mitjana de les càrregues màximes per cicle entre la mitjana del desplaçament d'aquells punts, tot en valor absolut.

$$K_i = \frac{|F_i^+ + F_i^-|}{|\delta_i^+ + \delta_i^-|} \quad (5.4)$$

- Ductilitat

La ductilitat ( $\mu$ ) associada a bigues de formigó armat sotmeses a càrregues de flexió és una magnitud associada a la seguretat estructural dels modes de fallada que es desenvolupen en un procés de càrrega continua. Es sol definir com la relació entre la fletxa al centre de la secció de la biga quan s'assoleix el màxim de càrrega ( $\delta_u$ ), entre la fletxa de la biga quan aquesta comença a plastificar ( $\delta_y$ ).

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (5.5)$$

- Índex de tenacitat

La tenacitat és la mesura de la fragilitat d'aquest. Es calcula a partir de la corba força desplaçament.

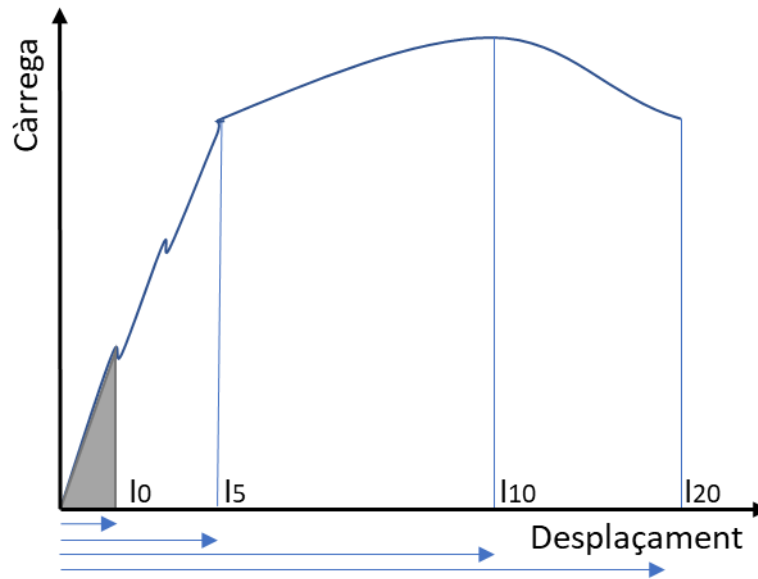


Figura 5. 20. Corba força desplaçament per al càlcul de la tenacitat [57]

A la Figura 5.20, determina 3 punts en els quals es calculen els índex de tenacitat com la relació entre les àrees característiques de la corba força – desplaçament, Eq. 5.6.

$$I_x = \frac{A_{I_x} - A_{I_0}}{A_{I_0}} \quad (5.6)$$

Per aquest cas, interessava veure quan la biga començava a fissurar, el moment en el qual ja no tenia recuperació elàstica i, per tant, començava a haver deformació plàstica i el punt de càrrega màxima.

De manera que els índexs de tenacitat corresponen a:

- $l_0$  correspon al moment de la primera fissura. (Es busca desplaçament del primer punt de disminució de càrrega en un període d'aplicació).
- $l_5$  correspon al moment on comença ha haver-hi deformació plàstica. (Es busca el desplaçament del primer punt en el qual s'aprecia la variació del pendent).
- $l_{10}$  correspon al punt de càrrega màxima. (Es busca el desplaçament al qual s'aplica la càrrega màxima).
- $l_{20}$  correspon al punt de ruptura.

Es van determinar diferents punts d'estudi de la tenacitat per adequar-los al tipus d'estructura assajada.

- Energia dissipada i factor d'amortiment

L'energia dissipada total es calcula com la suma de les àrees sota la corba del gràfic força-desplaçament de cada cicle. Per fer-ho es tenen en compte les càrregues i descàrregues, de manera que l'energia dissipada és l'àrea de la zona de càrrega, menys la de descàrrega de cada cicle (Eq. 5.7).

$$E_{td} = \sum_{i+1}^n E_{di} = \sum_{i+1}^n (E_{di,càrrega} - E_{di,descàrrega}) \quad (5.7)$$

Per obtenir-ho, es va utilitzar la funció 'trapz' de MATLAB. Aquesta funció serveix per processar la integració numèrica mitjançant la divisió de l'àrea sota la corba en petits trapezoides, que són fàcilment computables. El resultat final es un escalar que es el valor final de la integració. En aquest cas, l'energia dissipada. [55]

#### 5.4.3. Resultats

A aquest apartat es mostren els resultats obtinguts. La discussió sobre els mateixos detallada es troba al següent apartat.

##### *Modes de fallada*

A les figures 5.21, 5.22 i 5.23 es mostren el mode de fallada de cada cas. A la figura 5.24 es mostra la fissuració abans del trencament del cas PESHE.

Es consideren tres modes de fallada:

- I: Trencament de l'armadura de tracció
- II: Trencament de la malla previ al trencament de l'armadura de tracció
- III: Finalització degut a limitacions espacials.

Es pot veure com les bigues reforçades amb cotó pateixen una fissuració més elevada al llarg de l'assaig que les de cànem.

També, el mode de fallada és diferent, ja que per les bigues reforçades amb cànem aquest trenca de manera més sobtada.



Figura 5. 21. Fallada EPCO2



Figura 5. 22. Fallada EPHE 2



*Figura 5. 23. Fallada PESCO 2*



*Figura 5. 24. Fissuració biga PESHE 1.*

A la Taula 5.7 es mostren els resultats de cadascun dels paràmetre a avaluar de cadascuna de les bigues assajades.

Taula 5. 7. Resultats de l'assaig de flexió cíclic

	C1	C2	EPCO1	EPCO2	EPCO3	EPHE1	EPHE2	EPHE3	PESCO1	PESCO2	PESCO3	PESHE1	PESHE2	PESHE3
$F_{MAX}$ (kN)	28,77	26,95	33,88	34,64	33,75	30,91	29,57	27,99	25,83	30,09	31,73	28,61	29,15	29,32
$M_{MAX}$ (kNm)	14,17	13,27	16,69	17,06	16,62	15,22	14,56	13,79	12,72	14,82	15,63	14,09	14,35	14,44
$\delta_{MAX}$ (mm)	68,71	55,59	81,67	79,96	72,84	37,16	28,57	34,14	61,53	55,68	54,02	35,77	58,33	56,63
$EI_{MAX}$ (kN mm <sup>2</sup> )	337,44	390,71	334,41	349,19	373,50	670,49	834,28	660,91	338,35	435,59	473,46	644,72	402,74	417,31
$F_{ROT}$ (kN)	20,74	22,27	25,59	24,77	24,46	8,24	9,04	10,07	24,19	25,86	23,07	21,08	20,99	23,04
$M_{ROT}$ (kNm)	10,21	10,97	12,60	12,20	12,05	4,06	4,45	4,96	11,92	12,74	11,36	10,38	10,34	11,35
$\delta_{ROT}$ (mm)	129,83	103,13	149,95	173,43	185,59	89,38	96,97	124,18	183,28	186,58	163,89	114,25	111,85	106,34
$EI_{ROT}$ (kN mm <sup>2</sup> )	128,83	174,01	137,53	115,12	106,22	47,28	75,17	65,37	106,40	111,73	113,48	144,89	151,26	174,62
$E_{dt}$ (kNmm)	2.786,90	2.417,20	9.002,90	11.000,00	9.836,70	7.120,90	6.125,00	6.061,10	5.125,90	8.457,40	7.666,30	6.384,70	6.943,70	5.866,60
Y fissuració	0,60	0,79	1,12	1,70	3,68	1,74	1,83	3,81	4,04	3,00	1,27	0,98	0,85	1,76
Y plastificació	11,28	14,23	10,55	13,05	15,31	11,82	11,85	16,65	14,58	14,71	10,82	14,47	14,33	14,04
Ductilitat	11,51	7,25	14,21	13,29	12,12	7,56	8,18	7,46	12,57	12,59	15,15	8,11	7,81	7,57
Índex de tenacitat I5	59,75	57,49	59,75	169,35	36,69	48,43	33,24	3,60	28,11	59,30	27,75	35,77	42,97	20,82
Índex de tenacitat I10	63,74	73,34	266,53	52,94	71,43	52,54	40,60	5,22	32,43	76,24	43,96	48,68	56,42	31,23
Índex de tenacitat I20	63,99	140,23	307,31	59,26	78,88	10,04	41,21	5,28	323,68	123,59	78,02	100,36	136,16	32,85
Cicle de càrrega màxima	0	0	13	14	13	11	12	11	13	12	13	12	13	12
Nº de cicles fins ruptura	0	0	15	16	16	15	14	14	15	15	15	15	15	14
Fallada*	I	I	III	III	III	II	II	II	III	III	I	II	II	II
Amassada	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2



#### 5.4.4. Discussió

La Taula 5.8 mostra agrupat per a cada cas, els resultats de la taula 5.7. A cada casella es pot observar el valor del paràmetre assenyalat a la primera columna i sota el valor es troba el coeficient de variació en tant per cent.

Taula 5. 8. Resultats de l'assaig a flexió per cada cas

	Control	EPCO	EPHE	PESCO	PESHE
$F_{MAX}$ (kN)	27,86 4,62%	34,09 1,4%	29,49 5,0%	29,22 10,4%	29,03 1,3%
$M_{MAX}$ (kNm)	13,72 4,62%	16,79 1,4%	14,52 5,0%	14,39 10,4%	14,29 1,3%
$\delta_{MAX}$ (mm)	62,15 14,93%	78,16 6,0%	33,29 13,1%	57,08 6,9%	50,24 25,0%
$EI_{MAX}$ (kN mm <sup>2</sup> )	364,08 10,35%	352,37 5,6%	721,89 13,5%	415,80 16,8%	488,26 27,8%
$F_{ROT}$ (kN)	21,51 5,02%	24,94 2,3%	9,12 10,1%	24,37 5,8%	21,70 5,3%
$M_{ROT}$ (kNmm)	10,59 5,02%	12,28 2,3%	4,49 10,1%	12,01 5,8%	10,69 5,3%
$\delta_{ROT}$ (mm)	116,48 16,17%	169,66 10,7%	103,51 17,7%	177,92 6,9%	111,81 3,7%
$EI_{ROT}$ (kN mm <sup>2</sup> )	151,42 14,17%	119,62 13,5%	62,61 22,6%	110,54 3,3%	156,92 10,0%
$E_{dt}$ (kNmm)	2602,05 21,10%	9946,53 10,1%	6435,67 9,2%	7083,20 24,6%	6398,33 8,4%
Y fissuració	0,70 10,05%	2,17 62,0%	2,46 47,39%	2,77 50,5%	1,20 41,1%
Y plastificació	12,76 18,07%	12,97 18,4%	13,44 20,7%	13,37 16,5%	14,28 1,5%
Ductilitat	9,38 32,12%	13,21 7,9%	7,73 5,0%	13,44 11,0%	7,83 3,5%
Índex de tenacitat I5	58,62 4,22%	47,03 20,65%	26,70 48,24%	38,39 47,2%	33,19 34,0%
Índex de tenacitat I10	68,54 8,96%	60,53 15,99%	37,32 45,77%	50,88 44,6%	45,44 28,4%
Índex de tenacitat I20	102,11 52,82%	65,12 18,37%	46,76 45,04%	175,10 74,6%	89,79 58,4%

### Força/Desplaçament - temps

Primer de tot, es va determinar el correcte desenvolupament dels assajos a través de les gràfiques Força/desplaçament – temps.

La Figura 5.25 es mostra com a exemple. La resta es poden trobar a l'Annex A2.

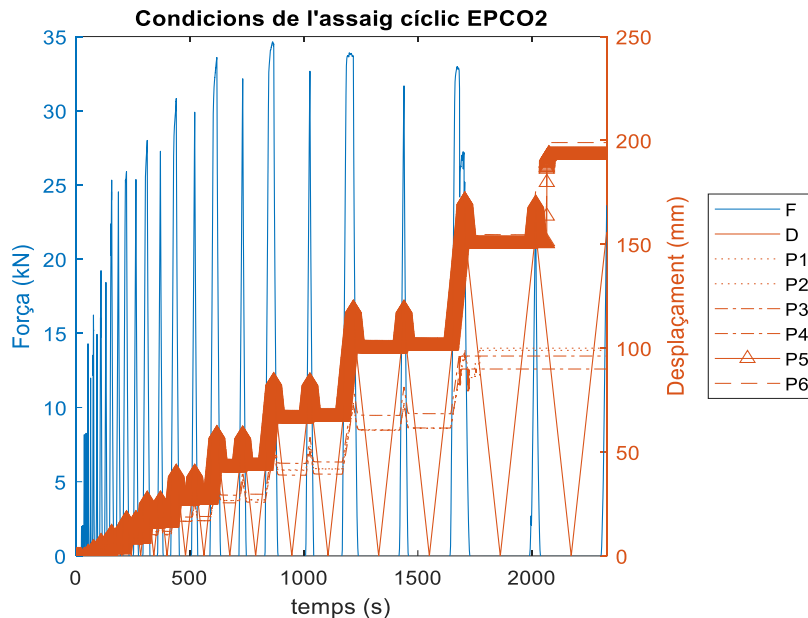


Figura 5. 25. Força/Desplaçament - temps EPCO2

Aquí es pot veure com en blau, la força es va incrementant a mesura que passen els cicles de càrrega i descàrrega. En taronja contínua, el desplaçament de l'actuador, que coincideix amb de la Figura 5.19.

La resta de línies corresponen als diferents potenciòmetres col·locats segons la figura 5.18.

De manera que queda verificada la correcta execució dels assajos.

### Moment - desplaçament

A continuació es tracen les corbes, moment – desplaçament, on aquest és la mitjana dels potenciòmetres del centre de la biga.

La figura 5.26, mostra un exemple de la gràfica moment – desplaçament del cas d'un assaig cíclic, en aquest cas EPCO2. Les gràfiques de cada biga es poden trobar a l'Annex A2.

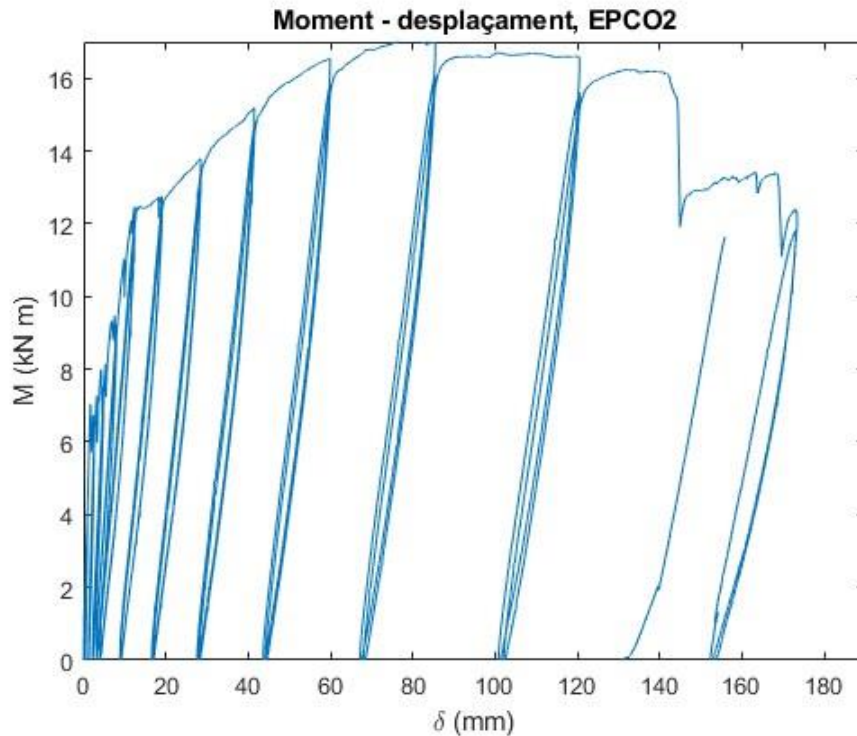


Figura 5. 26. Moment - desplaçament EPCO2

Degut a la difícil visualització del conjunt de bigues en un únic gràfic, es va decidir eliminar les descàrregues per veure l'evolució del moment vers el desplaçament.

A la figura 5.27 es mostren les 14 bigues assajades. En negre les bigues de control i després cada cas per un color.

Començant per la zona inicial elàstica, per aplicar els desplaçaments imposats, cal una càrrega superior degut a la rigidesa del cànem, en comparació amb el cotó.

Però un cop arribat al punt on comença la deformació plàstica (aproximadament 40mm), es comença a trencar la malla de les bigues reforçades amb cànem, reduint la càrrega necessària per l'aplicació dels desplaçaments (S'escolta durant l'execució de l'assaig el trencament fil a fil) fins que la biga falla pel trencament de l'armadura de tracció.

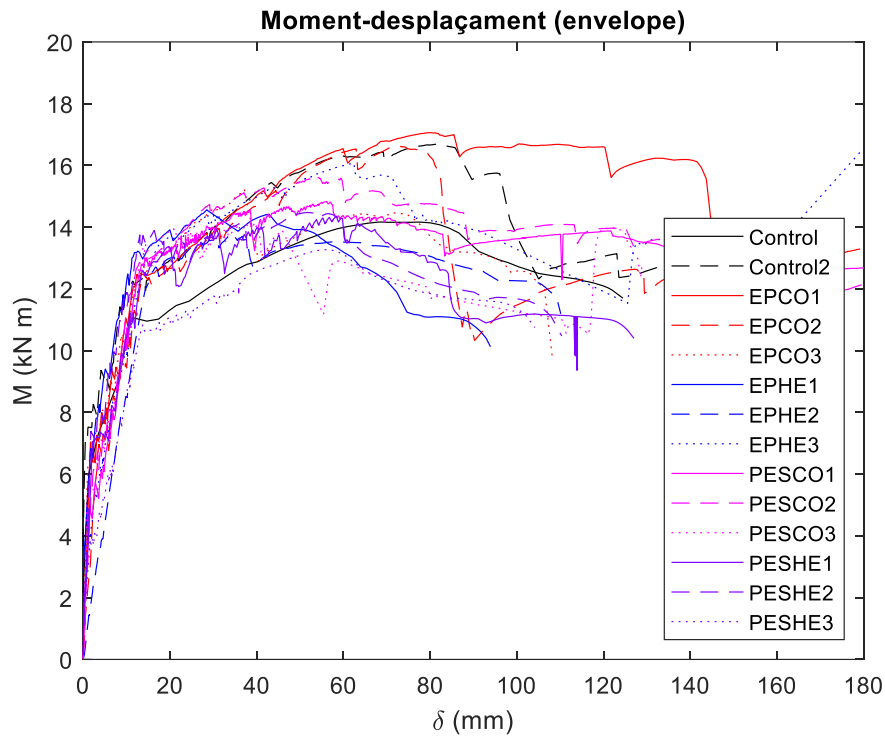


Figura 5. 27. Moment - desplaçament de l'assaig de flexió sense descàrregues

Per les bigues reforçades amb cotó, en canvi, es necessita una càrrega més elevada per poder deformar els fils, generalment sense arribar al trencament de la malla. El cotó és capaç d'absorbir part de la càrrega aplicada, de manera que l'armadura de tracció de la biga pot deformar-se sense arribar a trencar, fins que l'assaig finalitza per limitacions espaials de la zona d'assaig.

Hi ha, tot i això, una excepció pel cas de PESCO1, ja que en arribar a la limitació espacial, va coincidir amb el trencament de l'armadura de tracció, sense el trencament de la malla de reforç.

#### Rigidesa a flexió

A continuació s'avalua la rigidesa de la biga en funció del desplaçament. Per fer-ho s'aplica l'equació 5.3 per al cas de la configuració d'assaig utilitzada.

Amb l'aplicació de l'equació anterior i l'eliminació de les descàrregues s'obté la figura 5.28. A l'Annex es pot trobar la figura amb les descàrregues.

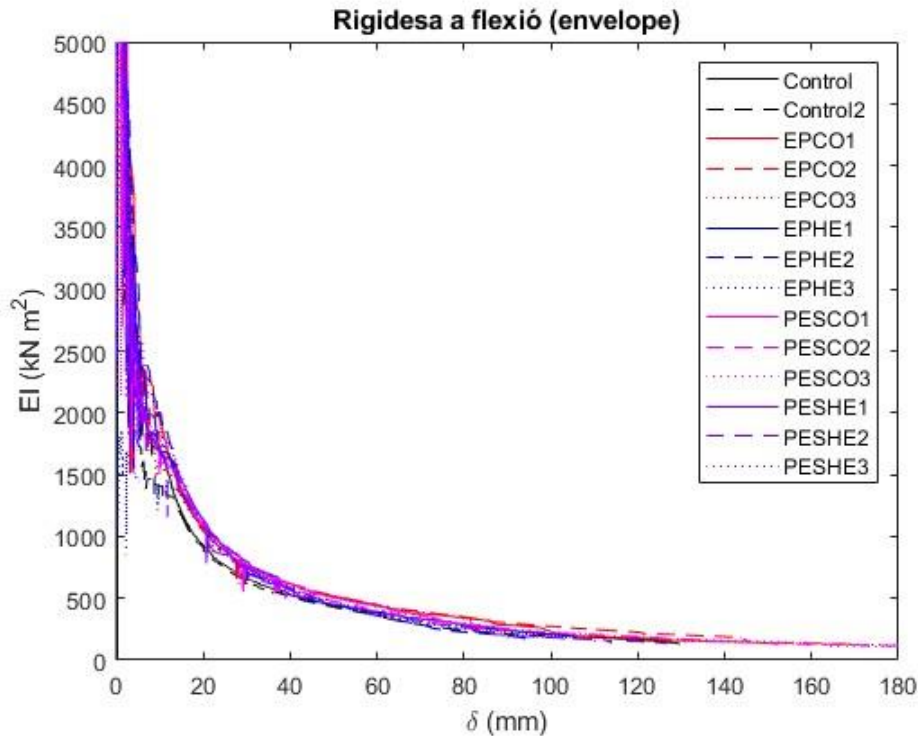


Figura 5. 28. Degradació de la rigidesa a flexió

En general, l'addició del reforç extern a la biga provoca un increment de la rigidesa de la mateixa. Aquest resultat és coherent amb l'augment de les freqüències dels modes de vibració pròpies de les bigues obtinguts a l'assaig d'anàlisi modal, degut a l'augment del cantell de la secció de la biga.

Igual que es va comentar amb el moment-desplaçament, a desplaçaments petits, el canem genera una petita rigidesa superior a la del cotó. Mentre que un cop arribat al desplaçament a partir del qual comença a haver-hi deformació plàstica de la biga reforçada, provocant el trencament dels fils de la malla de canem, les bigues reforçades amb canem tendeixen a una rigidesa similar a la de les bigues de control. Per les reforçades amb cotó, en canvi, es manté una rigidesa lleugerament superior.

Per comparar més clarament entre casos, les figures 5.29, 5.30, 5.31 i 5.32 mostra la degradació per a cadascun dels reforços aplicats.

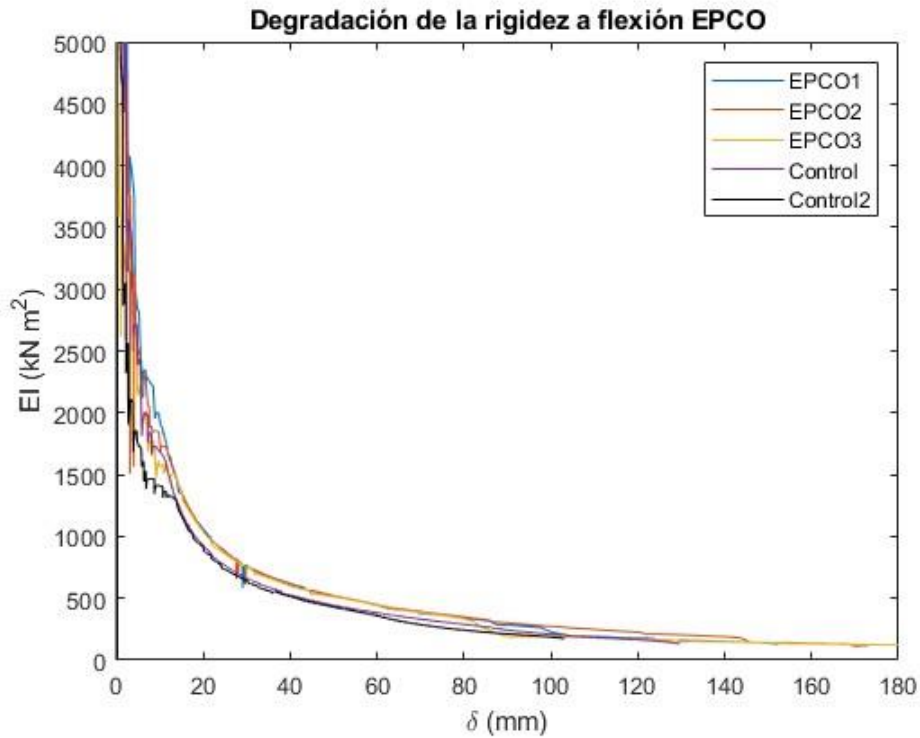


Figura 5. 29. Degradació de la rigidesa EPCO

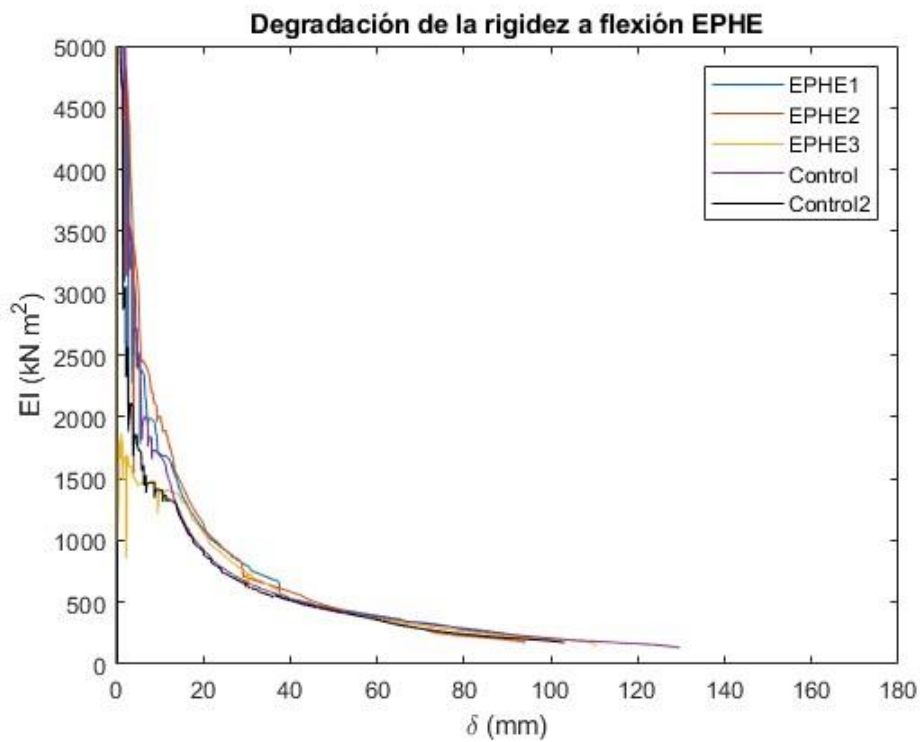


Figura 5. 30. Degradació de la rigidesa EPHE

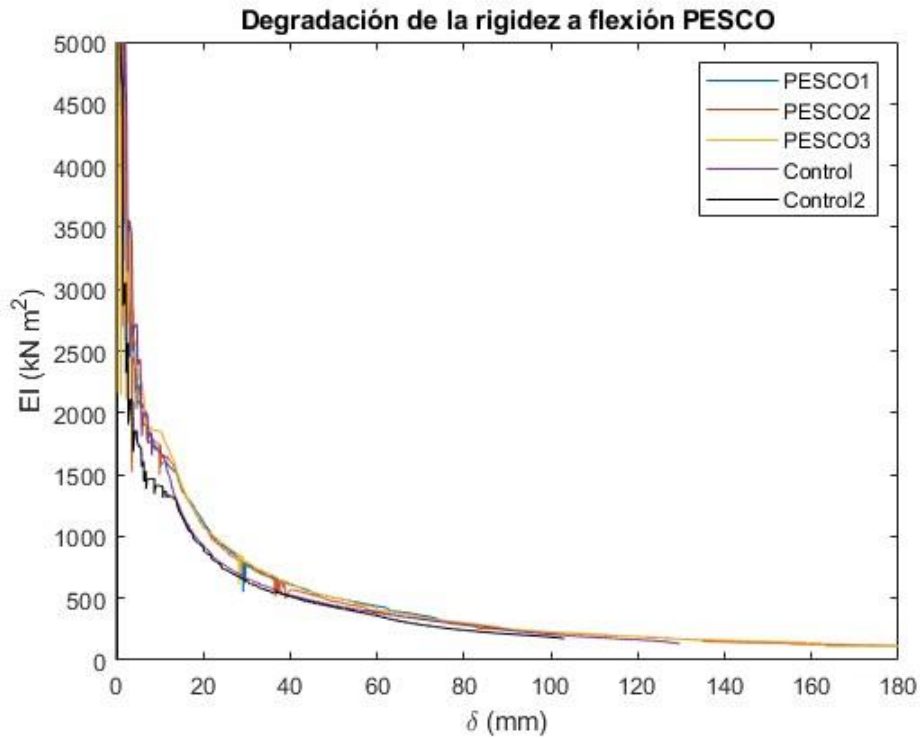


Figura 5. 31. Degradació de la rigidesa PESCO

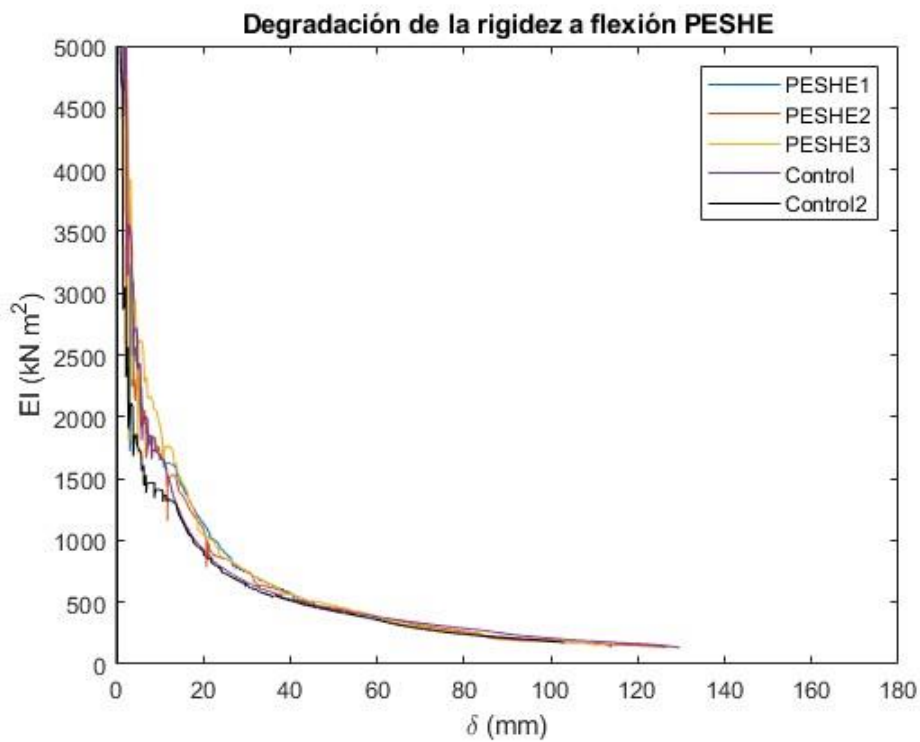


Figura 5. 32. Degradació de la rigidesa PESHE

Com s'ha assenyalat, els reforços de cànem tendeixen a la degradació que segueixen les bigues de control, degut al trencament dels fils.

En el cas del cotó aquesta degradació és menor que la que pateixen les bigues de control per a ambdós recobriments.

El recobriment de epoxi, és una resina més rígida, i queda reflectit a la Figura 5.30, ja que hi ha una variació més gran respecte les bigues de control que amb el recobriment de polièster que és més flexible.

Si ara s'avalua la pèrdua de la rigidesa per cada cicle, com es mostra a la Figura 5.33, la rigidesa als cicles inicials el cànem sol tenir una rigidesa superior al cotó, mentre que es degrada de forma més ràpida degut al trencament dels fils de la malla.

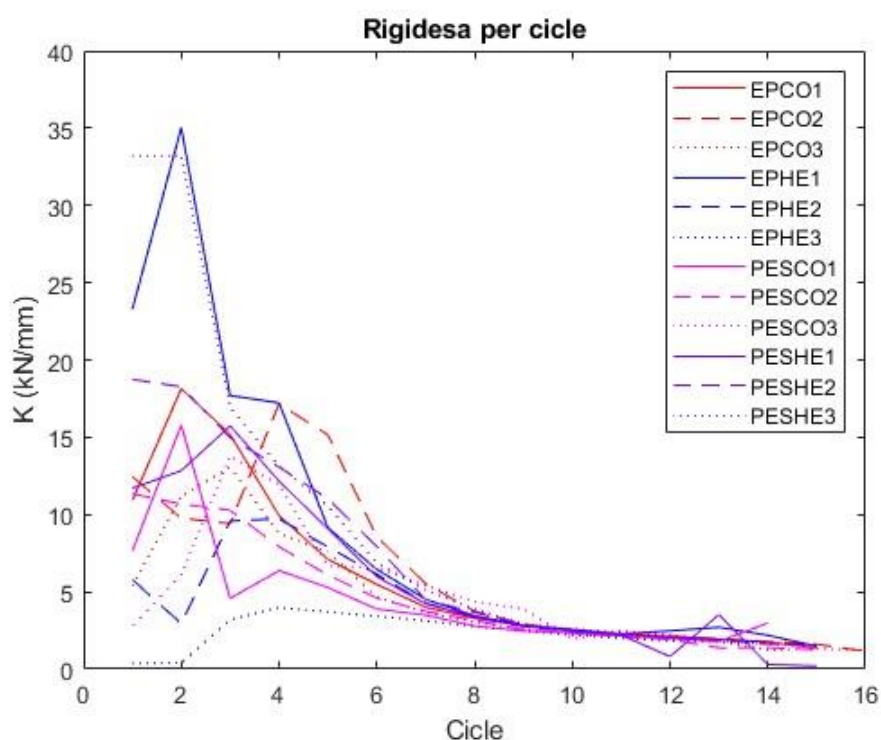


Figura 5. 33. Degradació de la rigidesa per cicle

Per a tots els casos, la rigidesa disminueix a partir del segon cicle, ja que als primers el desplaçament és ínfim (1 i 1,4 mm, degut a l'aparició de fissures, en primer lloc al morter, fins a arribar a la biga i esgotant el formigó fins a que es finalitza l'assaig per fallada o per limitacions espaials.



### Energia dissipada

L'energia dissipada per cada cas es troba a la Figura 5.34. En aquesta les bigues de control no s'utilitzen degut ja que es va dur a terme un assaig estàtic i no cíclic.

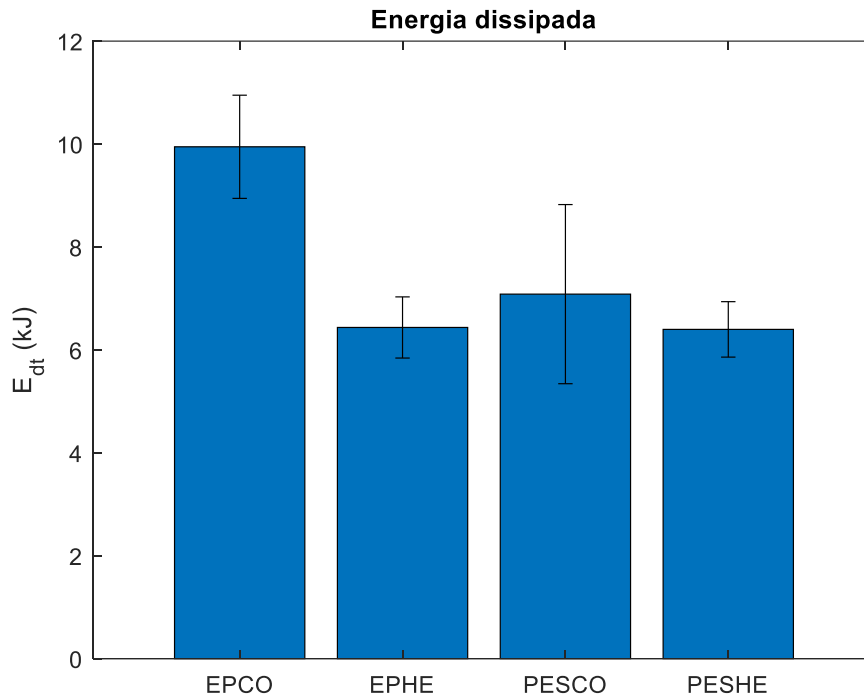


Figura 5. 34. Energia dissipada

El cotó dissipa entre un 10 i un 54% més d'energia que el seu símil de cànem, degut a la seva capacitat d'elongació.

Comparant els recobriments entre ells, les bigues de malles recobertes amb epoxi dissipen més energia que les de malles recobertes amb polièster, un 40% més en el cas de malles cotó i un 1% en el cas de les malles de cànem.

### Factor d'amortiment

El factor d'amortiment relaciona l'energia dissipada amb l'energia aplicada, i s'interpreta com la capacitat que té el sistema de dissipar energia.

A la figura 5.35, es veu com aquest factor oscil·la als primers cicles, fins que s'estabilitza i es manté al voltant d'entre 0,25 i 0,29.

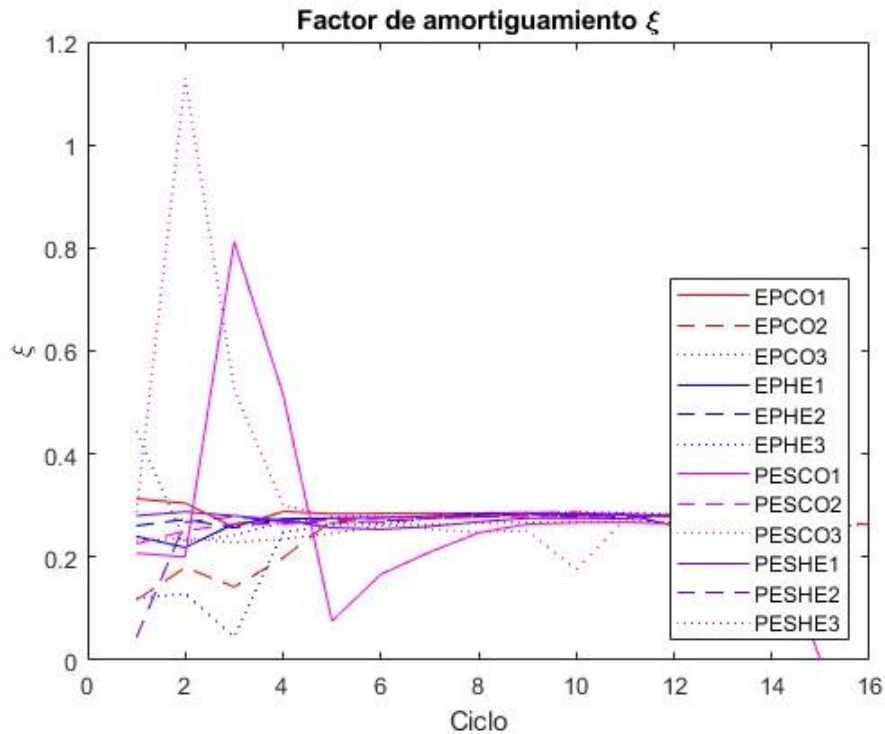


Figura 5. 35. Factor d'amortiment

De manera que el sistema és capaç de dissipar al voltant del 30% de l'energia aplicada.

#### Ductilitat i índex de tenacitat

Per obtenir l'índex inicial amb el qual es fa la comparació ( $I_0$ ), es busca el punt on apareix la primera fissura. A continuació, a través de les gràfiques moment-desplaçament es busca el punt de plastificació (desplaçament  $I_5$ ). Aquest és el primer punt en el qual no es pateixen fissures en la càrrega del cicle. (Figura 5.36).

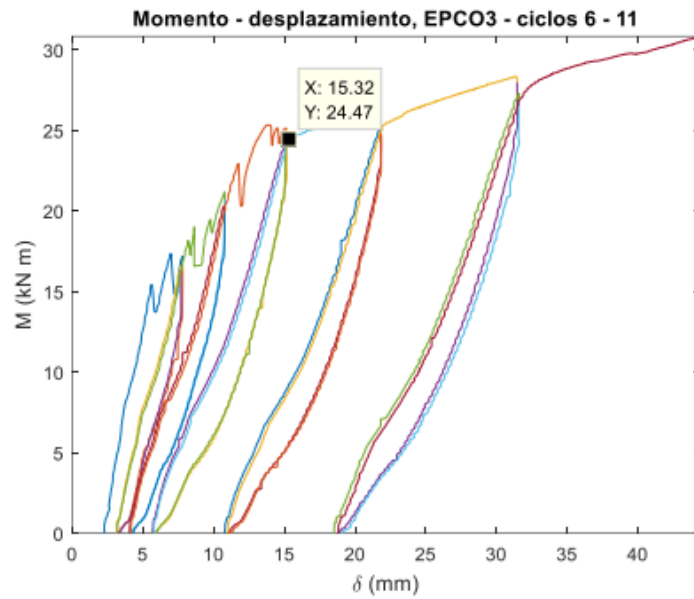


Figura 5. 36. Determinació del desplaçament de plastificació

El punt de la càrrega màxima ( $I_{10}$ ) es troba buscant el màxim al gràfic moment-desplaçament.

Finalment, el punt de ruptura és l'últim punt en el qual es compara la tenacitat ( $I_{20}$ ).

La figura 5.37 mostra la ductilitat i les índex de tenacitat del cas. La ductilitat relaciona el desplaçament al moment de càrrega màxima i el desplaçament del punt de plastificació.

Els valors obtinguts són coherents amb el comportament que s'ha anat veient a través de tota la discussió.

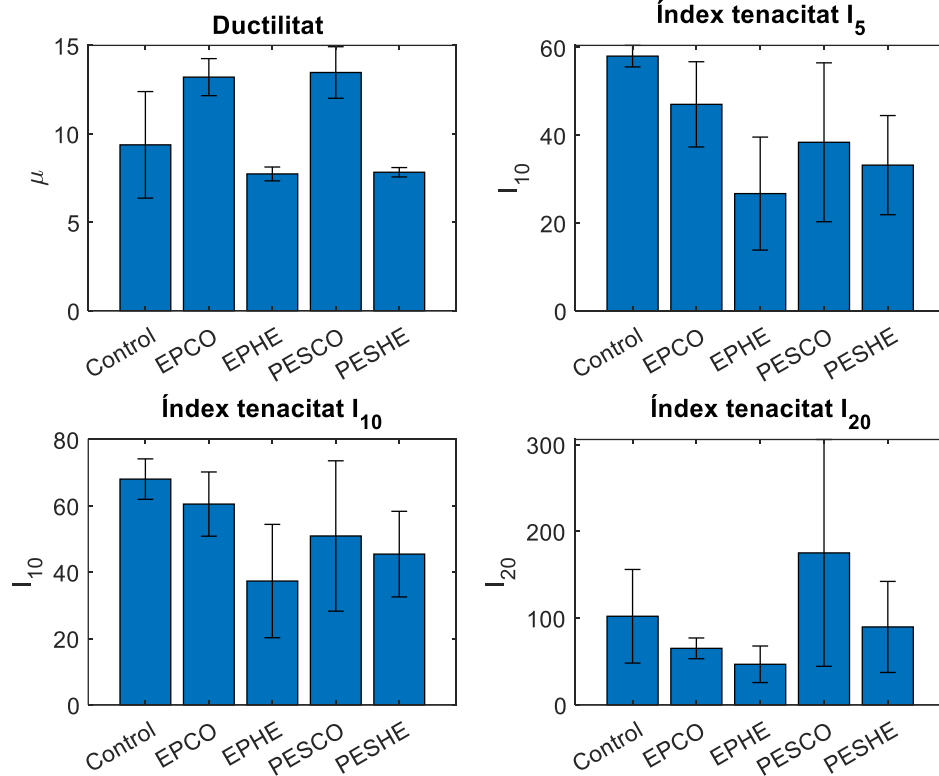


Figura 5. 37. Evolució de la tenacitat

El cotó té més ductilitat ja que el ser màxim es troba al voltant dels 80mm de desplaçament, mentre que el cànem es troba al voltant dels 40mm.

En quant als índexs de tenacitat, en general, el cotó té índexs més elevats que el seu semblant en cànem, degut a l'elongació sense trencament que pateix. D'aquesta manera el sistema es capaç de dissipar més energia a través del reforç, en comptes d'haver de ser la biga qui la dissipa, fissurant a desplaçaments més grans.

En el cas de l'índex de tenacitat  $I_{20}$ , que és al moment de finalització de l'assaig, el coeficient de variació es tant elevat degut a que en un dels casos (PESCO3), la finalització coincideix amb el trencament d'una de les barres que conforma l'armadura de tracció de la biga.

*Comparació entre casos*

La Figura 5.38 compara la força màxima aplicada, la rigidesa i el desplaçament en moment de càrrega màxima.

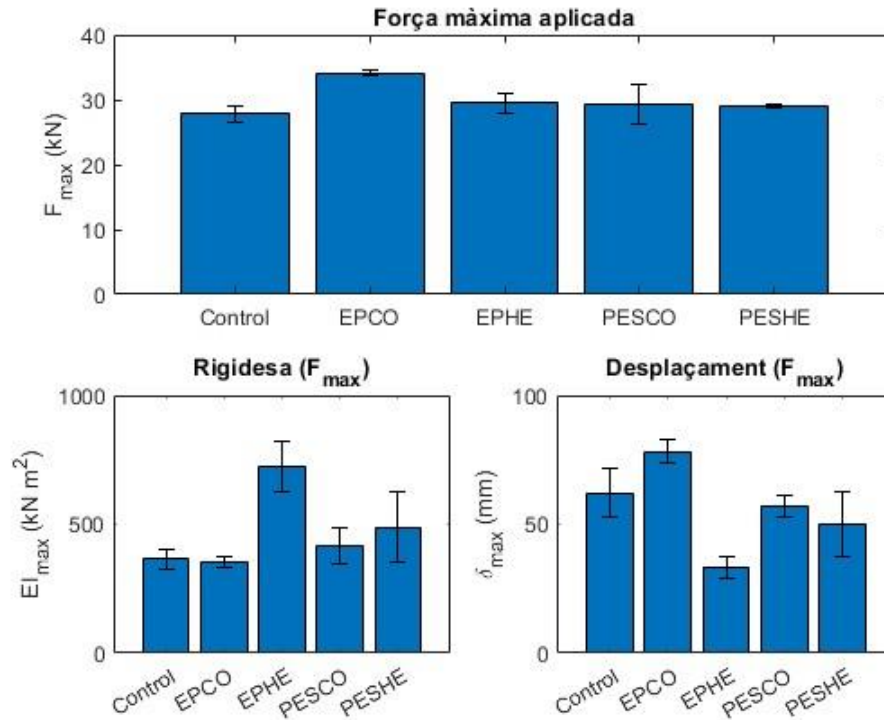


Figura 5. 38. Comparació dels paràmetres al màxim

Tenint en compte que el fet que l'assaig de les bigues de control hagi estat estàtic, pot provocar que la càrrega màxima sigui superior, ja que s'ha arribat de forma més sobtada, sense donar temps a les partícules a recol·locar-se.

Pel cas del cotó es veu com la càrrega màxima és superior a les de cànem. Això és deu a que la malla de cotó únicament es deforma sense arribar a trencar, sent més resilient a les càrregues aplicades, i arribant a desplaçaments superiors.

En el cas del cànem, les malles van trencant fil a fil fins que es trenca tant com la malla com l'armadura, donant per finalitzat l'assaig.

Si comparem amb més detall les càrregues màximes per cas, en tots els casos la càrrega màxima és superior en els casos reforçats que en el de control. Ja que el reforç absorbeix part de la càrrega i permet que l'armadura es deformi sense trencar.

Pel que fa a la rigidesa, exceptuant EPCO que té un valor semblant degut a la seva rigidesa, es veu com les bigues reforçades tenen una rigidesa superior entre un 14 i un 100%. En el cas del cànem, EPHE té gairebé el doble de rigidesa que les bigues de control, no només degut a la fibra sinó també al recobrint, aplicant un recobrint més flexible com és el polièster, la rigidesa augmenta un 34,11% únicament.

Mirant en més detall la ruptura a la Figura 5.39, les forces més elevades es troben en els casos on el recobriment de les malles és de polièster. La resina Silmar era una resina més flexible, de manera que col·labora en la continuïtat de la fibra en moments posteriors a la càrrega màxima.

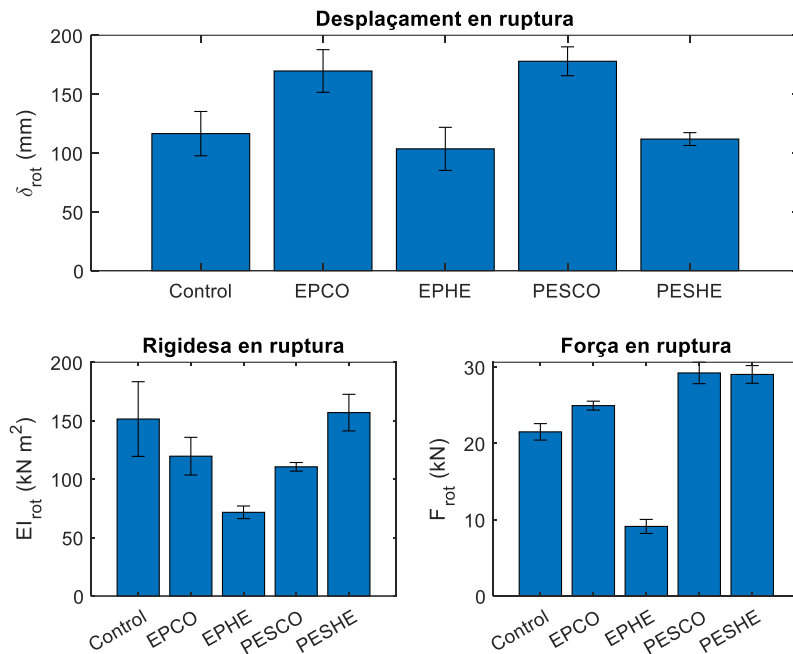


Figura 5. 39. Comparació dels paràmetres per la ruptura

Finalment, comparant els diferents desplaçaments utilitzats pel càlcul dels diferents paràmetres, es pot veure com l'efecte del reforç clarament retarda l'aparició de fissures sobre el substrat (Figura 5.40, superior Esquerra).

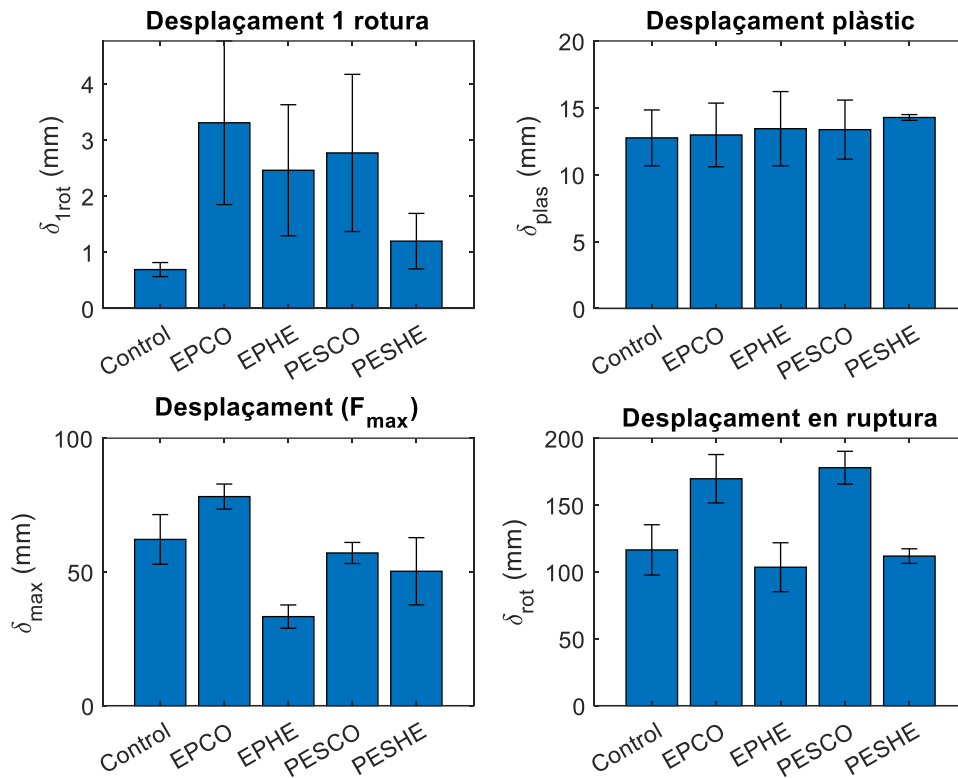


Figura 5. 40. Comparació dels desplaçaments

Si a continuació, mirem el desplaçament en el qual es comença a presentar la deformació plàstica, la variació del desplaçament de les reforçades en comparació a les de control és insignificant, de manera que si bé el reforç té un efecte més significatiu en l'aparició de les primeres fissures, el substrat és el que marca el pas a la deformació plàstica.

Finalment, mirant els punts de càrrega màxima i al moment de ruptura, el reforç de cotó té un efecte més significatiu sobretot en el moment de ruptura, entre un 45 i un 50%, degut a l'elongació de la malla sense arribar al trencament.

En el cas del cànem, aquest té uns valors inferiors a les bigues de control, entre un 20 i un 46% en el moment de càrrega màxima, i entre un 4 i un 11% en el moment de ruptura.

De manera que el reforç de cànem rigiditza la biga, sent capaç de suportar càrregues més elevades a desplaçament inferiors, mentre que el reforç de cotó suporta aquestes càrregues a desplaçaments similars o superiors que les bigues de control.

#### 5.4.5. Conclusions

S'ha pogut dur a terme amb èxit el reforç, i l'assaig a flexió cíclica de 12 bigues reforçades dividides en 4 casos.

- El reforç incrementa la càrrega màxima que poden suportar les bigues, per a tots els casos.

L'addició d'1cm de FRCM és capaç d'incrementar entre un 4 i un 20% la càrrega màxima que suporta la biga.

- El reforç de cotó es capaç dissipa més energia que el de cànem.

Això és degut a la seva capacitat d'elongació, que afecta el mode de fallada. El cànem trenca la malla fil a fil, fins que un cop desapareguda es produeix la fallada de la biga. El cotó en canvi, finalitza l'assaig amb la malla deformada sense trencament, d'aquesta manera es capaç de seguir dissipant energia durant un període més llarg.

- L'aplicació del reforç retarda l'aparició de fissures sobre la biga.

El reforç és capaç de dissipar més energia durant els primers cicles, de manera que el desplaçament al qual es produeix la primera fissura varia entre un 70 i un 300%, respecte a les bigues de control.

- L'aplicació del reforç no té un efecte significatiu en l'augment del desplaçament de deformació plàstica.

Això és degut a que únicament s'ha aplicat 1cm de reforç sobre un substrat de 25cm d'alçada. De manera que la deformació plàstica es manté similar a una biga de control, amb un augment entre un 1 i un 12%.

- El reforç de cotó augmenta la ductilitat de la biga, mentre que el de cànem la redueix.

Això és degut al tipus de fibra i al seu comportament. El cànem és una fibra rígida que rigiditza la biga (té rigideses un 30% més elevades), mentre que el cotó té un comportament més dúctil, amb una zona plàstica considerable, que fa variar la rigidesa menys d'un 15%.



- El recobriments d'epoxi suporta càrregues més elevades que el recobriments de polièster.

Les bigues reforçades amb epoxi han suportat càrregues d'entre un 1 i un 15% més elevades que el seu símil en polièster.

- El recobriments de polièster fa més dúctils les bigues que el seu símil en epoxi.

Això es degut a les propietats de les resines, on la resina epoxi és més rígida, mentre que la de polièster es més flexible.

## 5.5. Conclusions del capítol

Per concloure aquest apartat, s'ha dut a terme amb èxit l'anàlisi modal de les bigues de formigó armat sense i amb reforç i el seu assaig a flexió estàtica per les de control i cíclica per les bigues reforçades.

S'han trobat i analitzat més en detall els modes de vibració comuns a tots els casos, i les conclusions són les següents:

- La rigidesa dels materials modifica la freqüència dels modes de vibració.

Fent augmentar les freqüències de vibració degut a la variació del cantell.

- L'efecte del reforç en les freqüències de vibració és majoritàriament degut a l'aplicació del morter, que modifica el cantell de la biga.

Ja que el morter té una fracció volumètrica més elevada, té un efecte més significatiu que les malles.

- El reforç incrementa la càrrega màxima que poden suportar les bigues, per a tots els casos.

L'addició del reforç incrementa la càrrega tal com es veu a la Taula 5.8. (discussió)

- El reforç de cotó es capaç dissipa més energia que el de canem.

El cotó és un fil més dúctil amb una zona plàstica més extensa. Això provoca que l'energia que pot dissipar es manté durant períodes més llargs.

- L'aplicació del reforç retarda l'aparició de fissures sobre la biga.

Ja que absorbeix més energia durant els cicles inicials, de manera que la biga no ha de dissipar-la.

- L'aplicació del reforç no té un efecte significatiu en l'augment del desplaçament de deformació plàstica.

L'addició del FRCM suposa una addició del 4% de cantell, de manera que si bé col·labora amb la biga en moments inicials, la biga continua mantenint el seu comportament a llargues etapes de l'assaig.

- El reforç de cotó augmenta la ductilitat de la biga, mentre que el de cànem la redueix.

Això es deu al tipus de fil utilitzat, el cànem és un fil que aporta més rigidesa, mentre que el cotó és un fil més dúctil, que col·labora amb la biga.

- El recobriments d'epoxi suporta càrregues més elevades que el recobriments de polièster.
- El recobriments de polièster fa més dúctils les bigues que el seu símil en epoxi.

Això és degut a les propietats de les resines, on la resina epoxi és més rígida, mentre que la de polièster és més flexible.

# CAPÍTOL VI. MODEL NUMÈRIC

## 6.1. Introducció

Aquest capítol explica els models analítics i numèrics desenvolupats per a la predicció del comportament de bigues de formigó armat reforçades amb FRCM vegetal. S'estudien els models per obtenir les freqüències de vibració i models per predir el seu comportament sota flexió cíclica.

Pels models numèrics d'anàlisi modal i flexió cíclica s'utilitza el software ANSYS™.

## 6.2. Models numèrics

Els models numèrics són una eina de càlcul que permet reproduir el comportament i validar els resultats obtinguts a través dels assajos experimentals. Aquest capítol dona detall de les simulacions realitzades tant per l'anàlisi modal com per l'assaig a flexió de les bigues reforçades utilitzant el software ANSYS®.

Al tenir resultats dels assajos de bigues de control, bigues reforçades amb malles recobertes amb resina epoxi i bigues reforçades amb malles recobertes de resina de polièster, es van separar i utilitzar les d'epoxi per la calibració i les de polièster per la validació dels models.

A la Figura 6.1, s'explica l'ús que se'ls va donar als diferents paquets d'assajos experimentals.

Les bigues de control van ser utilitzades per calibrar els paràmetres per al formigó i l'acer. Amb aquests paràmetres, amb les bigues reforçades amb malles recobertes amb epoxi es van calibrar els paràmetres del morter i les malles. Finalment, amb les bigues reforçades de polièster, es van modificar els paràmetres de les malles amb les propietats obtingudes experimentalment de les malles de polièster per validar els models.

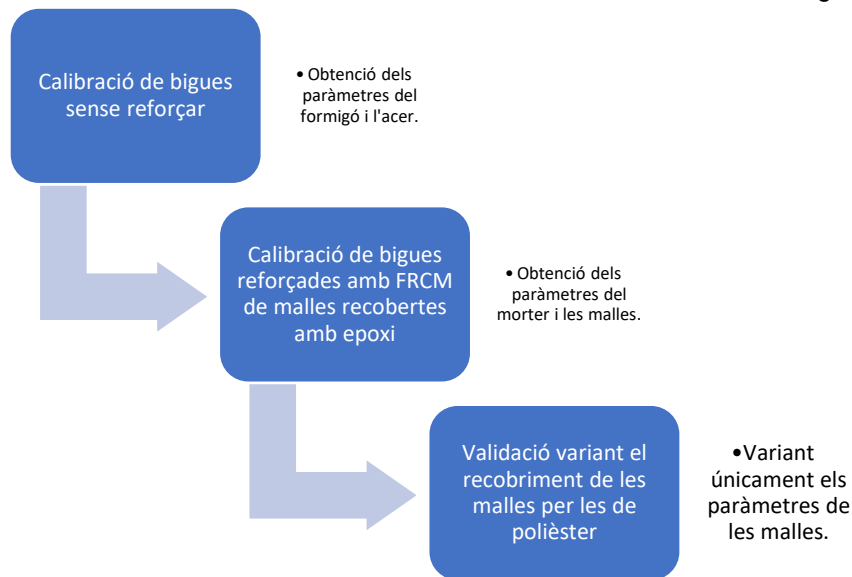


Figura 6. 1. Calibració i validació dels models numèrics

### 6.2.1. Geometria de les bigues

En primer lloc, es determina la geometria de la biga de 15cm x 25 cm de secció i 300mm de llargada, seguint la geometria de la secció especificada a l'apartat 5.2, Figura 5.1.

Tenint en compte que la biga es troba recolzada amb suports a 100mm dels extrems, es decideix no simular les zones exteriors, reduint la llargada de la biga a 2800mm. Per simplificar el càlcul, es decideix simular únicament la meitat de la biga (1400mm) i aplicar un plànol de simetria (Figura 6.2).

S'assigna a l'element el material predeterminat *Concrete*.

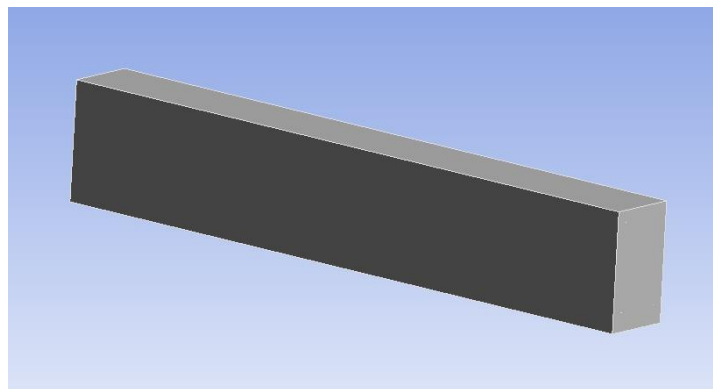


Figura 6. 2. Biga de formigó simulada

A continuació es dissenyen les armadures d'acer (Figura 6.3). Per aquest cas, per reduir la càrrega de càlcul es decideix no simular les armanures de tallant degut a que el seu efecte sota esforços de flexió és negligible.

Les armadures es troben 25mm de la cara inferior i lateral i a 40mm de la superior i tenen una secció de 8mm. Se'ls assigna el material predeterminar *Steel*.

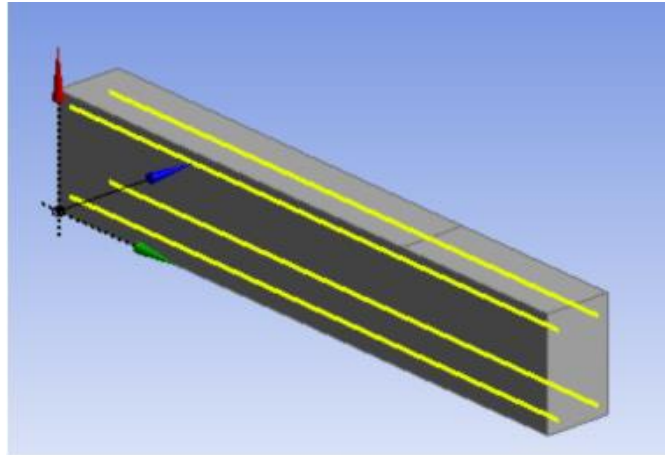


Figura 6. 3. Biga amb armadures

Per les bigues reforçades, es parteix de la biga generada anteriorment i s'afegeix la secció de morter de 150mm x 10mm. A través de la funció *Extrude* s'extrueix per crear un sòlid separat de la viga de formigó s'utilitza *Frozen*.

Finalment, únicament falta la creació de les malles de cotó i cànem. En aquest cas també es negligeixen les trames de la malla, ja que no col·laboren en esforços de flexió. El procediment utilitzat es idèntic al de les barres d'acer, amb la diferència que aquest cop la secció serà rectangular.

Això es degut a què es fa una simplificació de les malles. Considerant una amplada de 4 mm i calculant l'alçada de manera que s'obtenen àrees equivalents ( $1,57\text{mm}^2$  per floc de cànem i  $5,30\text{mm}^2$  per floc de cotó).

A la Figura 6.4, es veu la biga reforçada simulada amb els flocs de les malles.

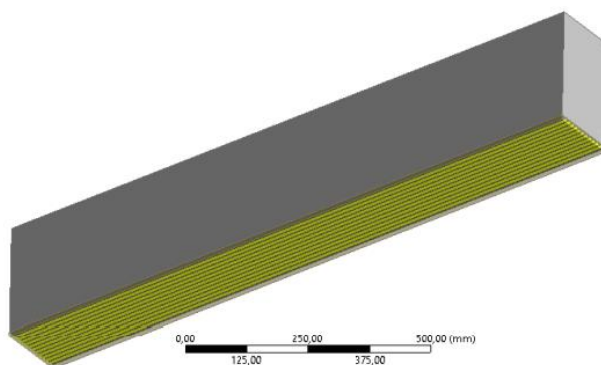


Figura 6. 4. Biga reforçada simulada

## 6.2.2. Propietats dels materials

Un cop definida les geometries dels diferents elements, es realitza la definició de cadascun dels materials.

### 6.2.2.1. Formigó

Pel formigó (*Concrete*) es seleccionen al ser un material genèric, el propi software ja demana quines propietats són necessàries. El que sí, s'ha de determinar és el criteri de fallada a seguir. S'estableix el criteri de *Drucker-Prager*, utilitzat en models de roques o formigó per simular el seu comportament [56]–[58]. Les propietats assignades al formigó es troben a la Taula 6.1.

Taula 6. 1. Propietats del formigó simulat

Símbol	Propietats	Formigó
$\rho$	Densitat (kg/m <sup>3</sup> )	2300
E	Mòdul d'elasticitat (MPa)	2900
$\nu$	Coeficient de Poisson (-)	0,2
$f_{uc}$	Límit de compressió uniaxial (MPa)	26
$f_{bc}$	Límit de compressió biaxial (MPa)	30
$f_{ut}$	Resistència a la tracció uniaxial (MPa)	1

### 6.2.2.2. Acer

En el cas de l'acer, al ser un material deformable, aquest té tant una zona de deformació elàstica, com una zona de deformació plàstica. De manera que és necessària una multilinearitat per definir les propietats del material a la zona plàstica (Taula 6.2).

Taula 6. 2. Propietats de l'acer simulat

Propietats	Acer
Densitat (kg/m <sup>3</sup> )	7850
Mòdul d'elasticitat (MPa)	210.000
Límit elàstic (MPa)	500
Coefficient de Poisson (-)	0,3
Mòdul tangent (MPa)	Màx. 18.000 Mín. 425

Un cop arribat al límit elàstic, es passa al comportament no-lineal de l'acer, que segueix la corba descrita a la Figura 6.5.

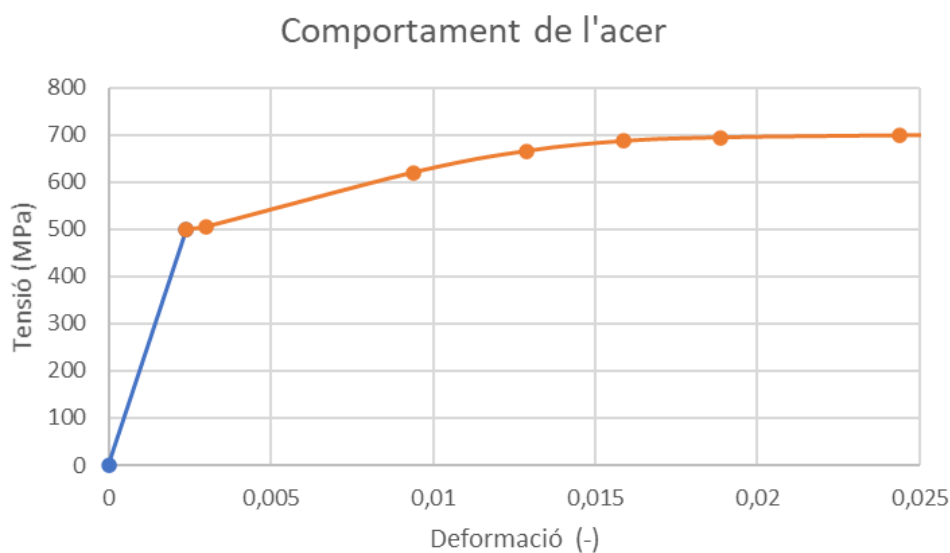


Figura 6. 5. Comportament de l'acer

### 6.2.2.3. Morter

El morter es simula com un formigó amb el criteri de fallada de Drucker-Prager. De manera que l'entrada de dades és la mateixa que pel cas de formigó, però amb els valors del morter.

Taula 6. 3. Propietats del morter simulat

Símbol	Propietats	Morter
$\rho$	Densitat ( $\text{kg/m}^3$ )	2300
E	Mòdul d'elasticitat (MPa)	800
$\nu$	Coeficient de Poisson (-)	0,2
$f_{uc}$	Límit de compressió uniaxial (MPa)	39,5
$f_{bc}$	Límit de compressió biaxial (MPa)	45,0
$f_{ut}$	Resistència a la tracció uniaxial (MPa)	2,0

#### 6.2.2.4. Malla de cànem

La malla de cànem va definir-se com un material totalment elàstic. Les propietats associades a un material *Isotropic Elastic* es troben a la Taula 6.4.

Taula 6. 4. Propietats de les malles de cànem simulades

Propietats	Malla EPHE	Malla PESHE
Densitat ( $\text{g/cm}^3$ )	0,74	0,74
Mòdul d'elasticitat (MPa)	41.355	45.566
Coeficient de Poisson (-)	0,35	0,35

#### 6.2.2.5. Malla de cotó

La malla de cotó va definir-se com un material multilineal degut a la seva gran deformació plàstica. Les propietats associades a un material *Isotropic Elastic* es troben a la Taula 6.5.

Taula 6. 5. Propietats de les malles de cotó simulades

Propietats	EPCO	PESCO
Densitat ( $\text{g/cm}^3$ )	0,67	0,67
Mòdul d'elasticitat (MPa)	1.371,4	1.301,0
Coeficient de Poisson (-)	0,35	0,35



### 6.2.3. Contactes

Per la simulació d'assaig a flexió de bigues, els contactes que hi havia entre la biga i l'actuador i els suports eren cilindres, de manera que és simularan com arestes a les distàncies que corresponen de la cara superior de la biga i el reforç.

A la Figura 6.6, es veu a la cara superior l'aresta de contacte amb l'actuador.

També a continuació s'aplica, tenint com a referència el plànol indicat, la simetria de la biga per tenir la biga completa.

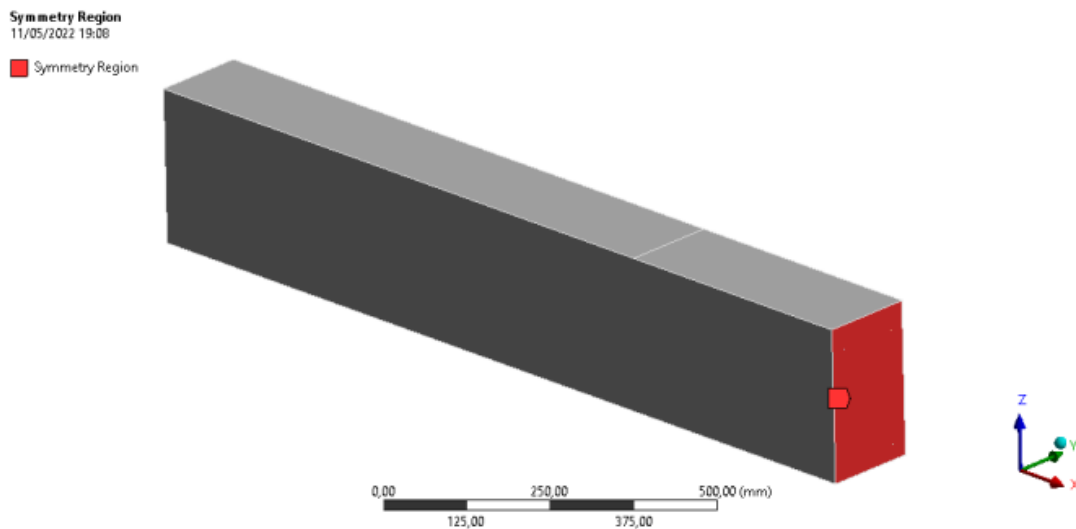


Figura 6. 6. Detall de l'aresta de càrrega i plànol de simetria

El contacte entre els diferents materials que conformen la biga consisteixen en contactes de tipus *bonded*. Aquest tipus de contacte assegura una compatibilitat total de deformacions als plans on hi ha contacte entre materials.

Aquest tipus de contacte es troba a:

- Formigó amb armadura
- Formigó amb morter
- Morter amb malles

### 6.2.4. Mallat

Un cop determinats els elements a simular, cal seleccionar un tamany de malla que proporcioni resultats fiables sense que tingui un cost computacional massa elevat.

Es van plantejar dos tamanyes de malla, 50mm i 25mm.

Es va fer un anàlisi de convergència per veure les diferències en els resultats de la simulació. Els resultats es troben a la Figura 6.7.

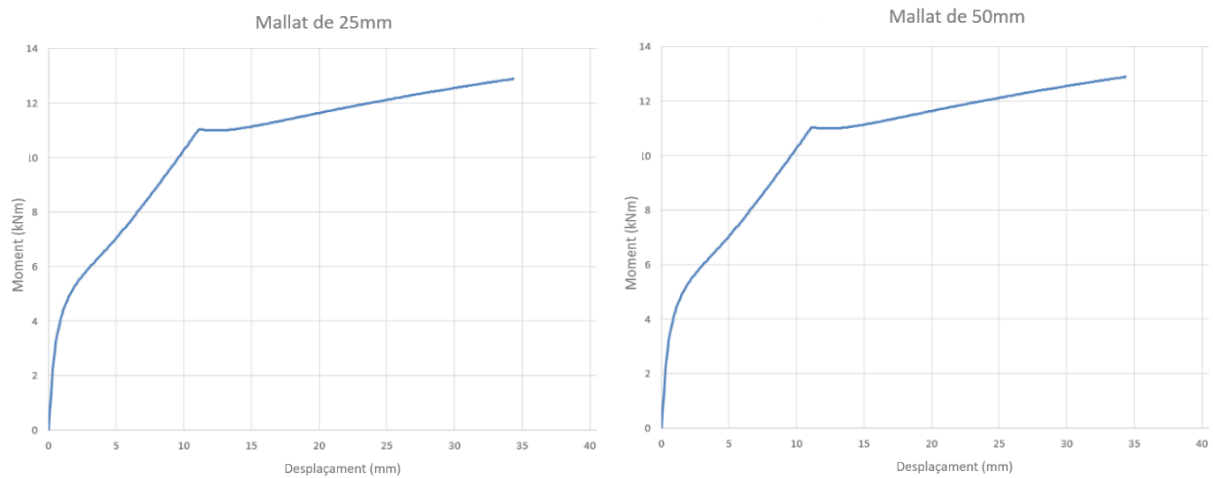


Figura 6. 7. Anàlisi de convergència

La diferència entre els resultats és de 0,11%. De manera que es decideix utilitzar el mallat de 50mm per reduir costos computacionals.

A la Figura 6.8 es veu la biga reforçada amb el mallat corresponent.

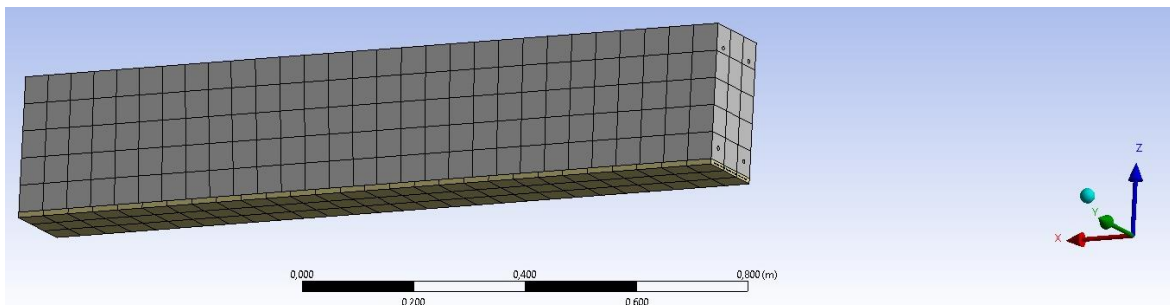


Figura 6. 8. Mallat de les bigues simulades

### 6.2.5. Condicions de contorn

Per l'aplicació de la càrrega i la reacció del suport, es van crear arestes als plans corresponents.

Pel suport, es fixen els desplaçaments en les direccions Y i Z (Figura 6.8), deixant lliure el desplaçament longitudinal a la biga, que queda restringit degut al pla de simetria.

Per l'aplicació de la càrrega, es fixen els desplaçaments en els plans X i Y, deixant lliure el desplaçament en Z. Aquest desplaçament tindrà dues variacions dependent del tipus de biga a simular.

Per les bigues de control, les quals van ser assajades a flexió estàtica, s'aplica un descens en la direcció Z fins arribar als 60mm.

Per les bigues reforçades, les quals es van sotmetre a assaig cíclic de flexió, se l'aplica un desplaçament on la càrrega i la descàrrega tenen la mateixa pendent (Figura 6.9).



Figura 6. 9. Càrrega i descàrrega de l'assaig cíclic

#### 6.2.6. Resultats de l'assaig de flexió estàtica i cíclica

A les Figures 6.10, 6.11 i 6.12 es troben els gràfics resultants de les simulacions a flexió de les bigues, tant les reforçades amb malla recoberta amb epoxi com les de control.

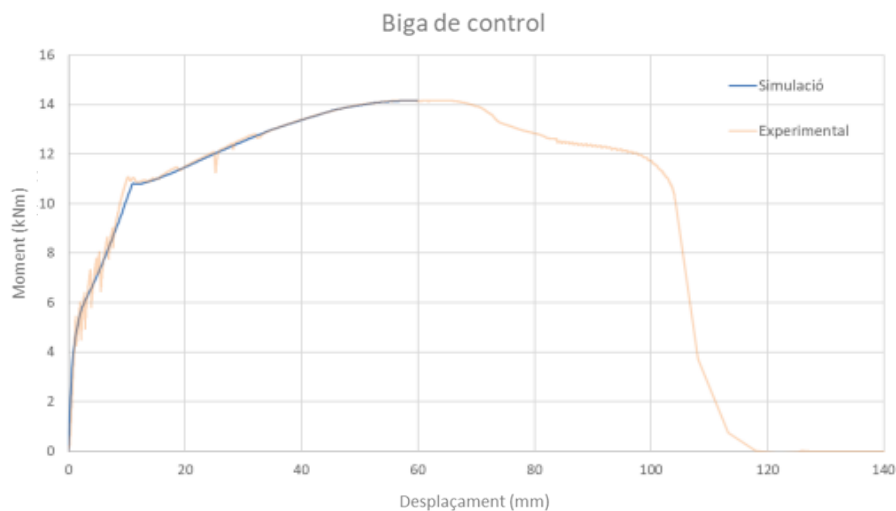


Figura 6. 10. Comparació biga de control simulada i experimental

A la Figura 6.10, es pot veure com s'ha dut a terme un correcte calibratge dels paràmetres de formigó i l'acer. D'aquesta manera la simulació aconsegueix simular amb un error inferior al 2%.

A l'inici, el formigó i l'acer es troben a la zona elàstica de deformació, fins que a partir dels 5kNm comença la fissuració del formigó. L'armadura d'acer, però, continua a la zona elàstica de deformació.

A aquesta zona de fissuració, degut a les limitacions del software no es possible simular les pèrdues de càrrega per fissuració, Tot i això, s'aconsegueix una fidel continuació del pendent fins a arribar als 11kNm.

Als 11 kNm, el formigó es troba fissurat i aquestes fissures es van propagant i comença la deformació plàstica de l'acer. Aquesta deformació s'ha pogut simular degut a la multilinearitat aplicada a l'element acer.

A la Figura 6.11, es troba la simulació de les bigues reforçades amb malla de cotó recoberta amb epoxi.

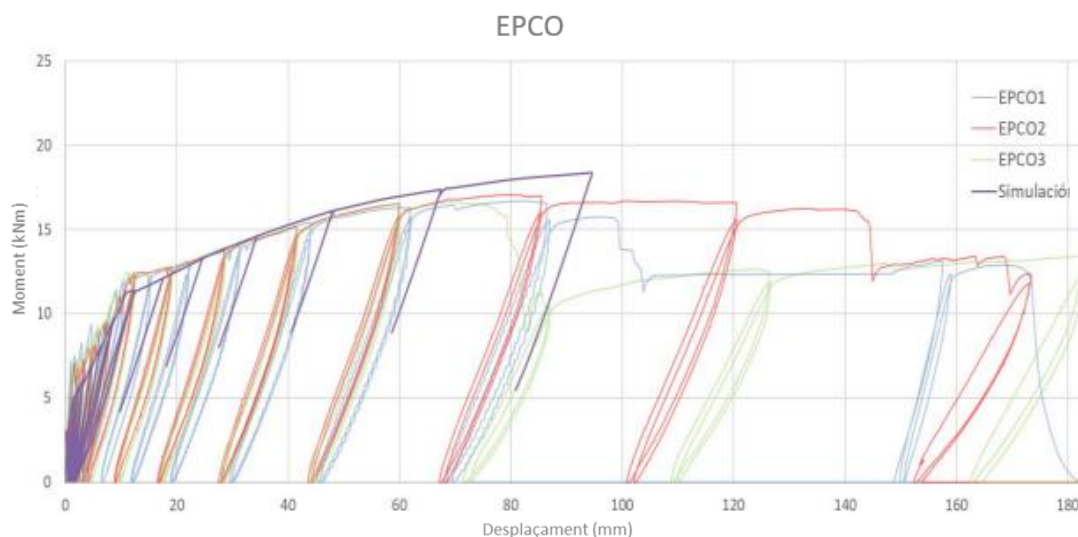


Figura 6. 11. Biga reforçada amb malla de cotó recoberta amb epoxi simulada

Tal com es pot veure, la simulació segueix de manera fidel a les dues primeres zones (quan treballen en conjunt i la fissuració) amb diferències inferiors al 5% tenint en compte que no es possible simular la fissuració. A l'entrar a la zona de deformació plàstica, es veu com hi ha una sobre estimació dels valors degut a que no es possible simular les ruptures de la matriu de morter.

Finalment, la simulació acaba al cicle 13, punt en el qual el cap de compressió del formigó es trenca.

A partir d'allà hi ha una disminució en la càrrega a aplicar als següents cicles, que no es possible simular amb el model implementat.

A la Figura 6.12 es troba la simulació de la biga reforçada amb malla de cànem recoberta amb epoxi.

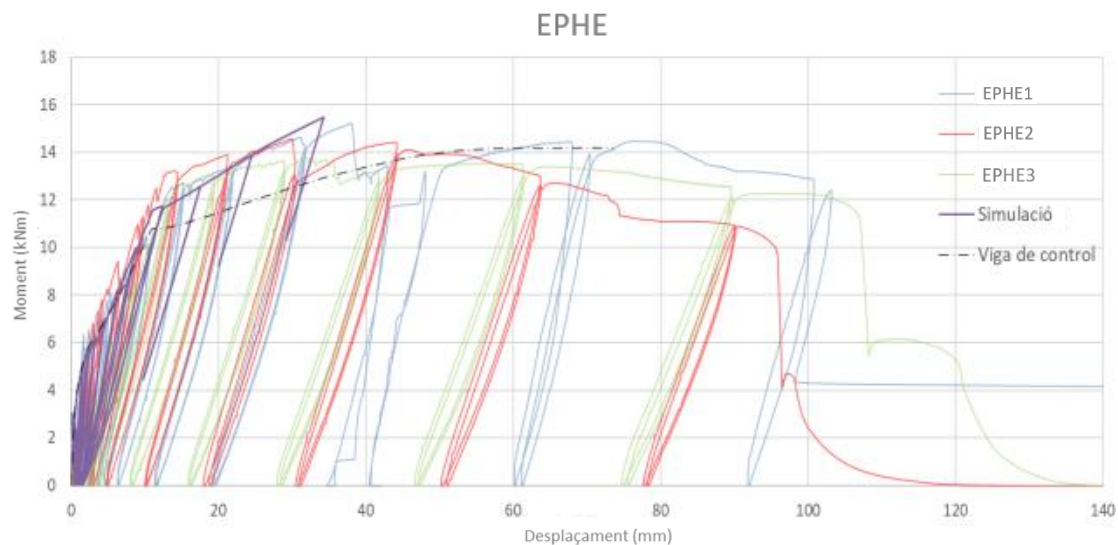


Figura 6. 12. Biga reforçada amb FRCM de cànem recobert amb epoxi simulada

En aquest cas, la simulació únicament arriba als 35 mm de desplaçament, degut a l'elevat mòdul elàstic del cànem i a la seva fratura més fràgil.

Igual que amb el cas de bigues reforçades amb cotó, durant les primeres dues etapes la simulació és acurada. Al moment en què comença la tercera etapa, de deformació plàstica, les fibres de cànem comencen a trencar-se fins que un cop eliminada la totalitat de la malla, aquesta arriba a comportar-se com una biga de control.

Si ara es comparen les càrregues màximes a diferents cicles, a les Figures 6.13 i 6.14 es pot veure com la diferència entre els valors experimentals i simulats és inferior al 10% en ambdós casos.

Els cicles són els seleccionats on hi ha una aplicació de desplaçament considerable i es poden veure diferències de manera més clara.

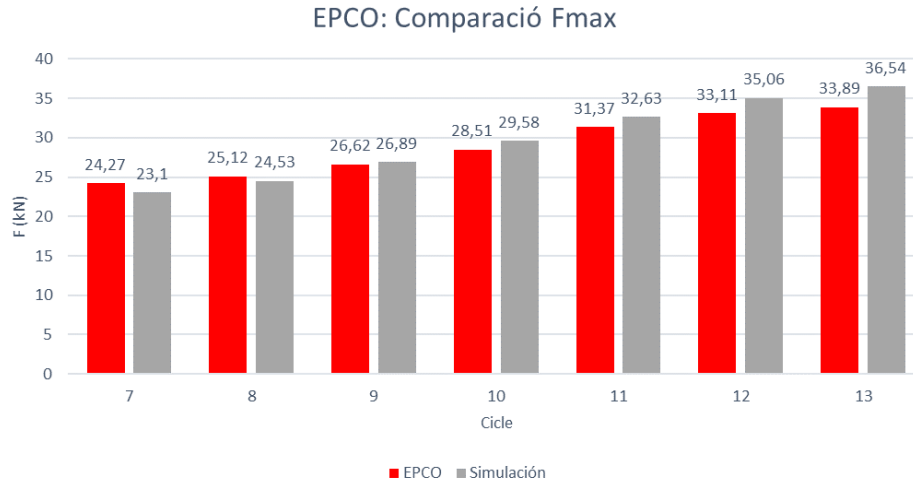


Figura 6. 13. Diferència de càrrega entre EPCO simulada i experimental

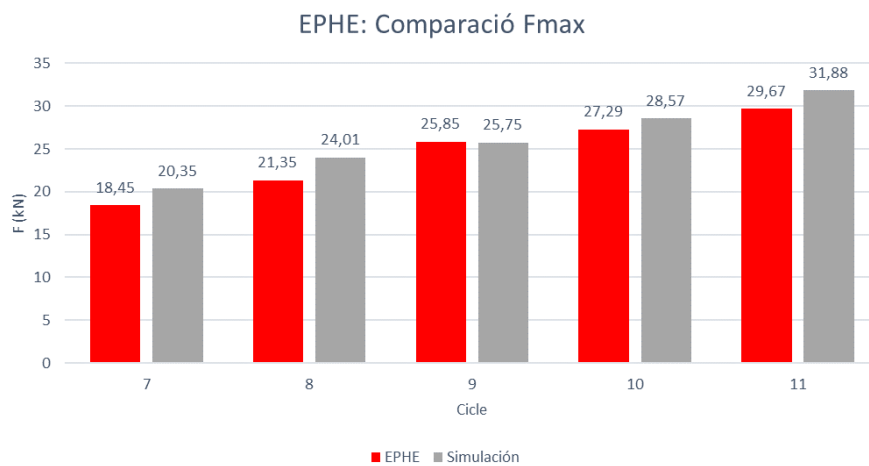


Figura 6. 14. Diferència de càrrega entre EPHE simulada i experimental

Com a conclusió, s'extreu que la simulació de les bigues és acurat en el seu comportament tant a flexió estàtica com a flexió cíclica.

### 6.2.7. Validació del model

Per anar més enllà, es va decidir validar al model substituint les dades de les malles recobertes amb epoxi, per les dades experimentals de les malles recobertes amb polièster (dades a la Taula 6.4 i 6.5).

A les Figures 6.15 i 6.16, es veu com la simulació d'aquestes conté diferències més significatives que amb les bigues reforçades amb epoxi en la zona de deformació plàstica.

Per al cas de les bigues reforçades amb cotó recobert amb polièster, aquesta diferència arriba fins al 25% a l'últim cicle, mentre que per les de cànem es manté més fidel al comportament real.

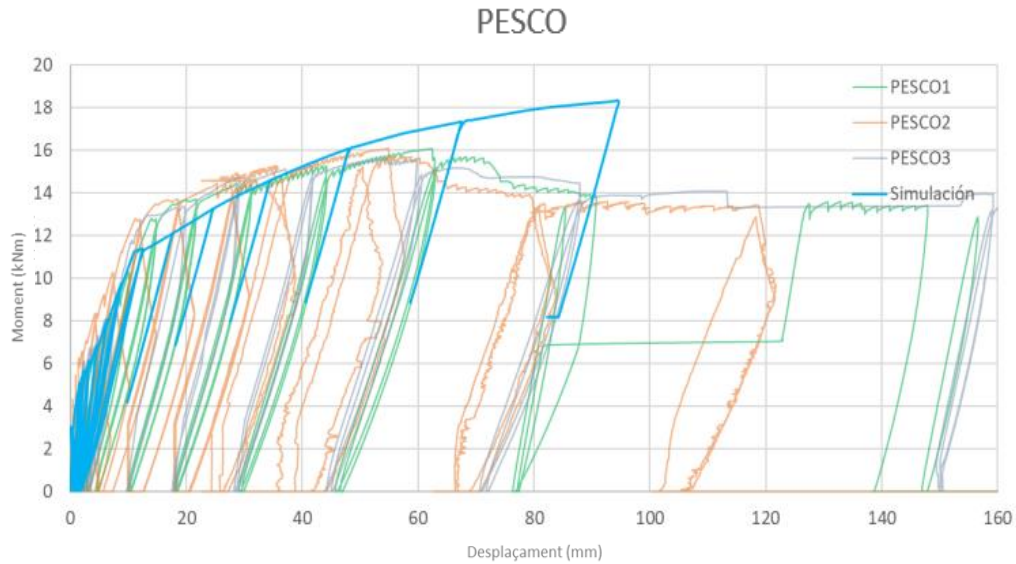


Figura 6. 15. Biga reforçada amb FRCM de cotó recobert amb polièster

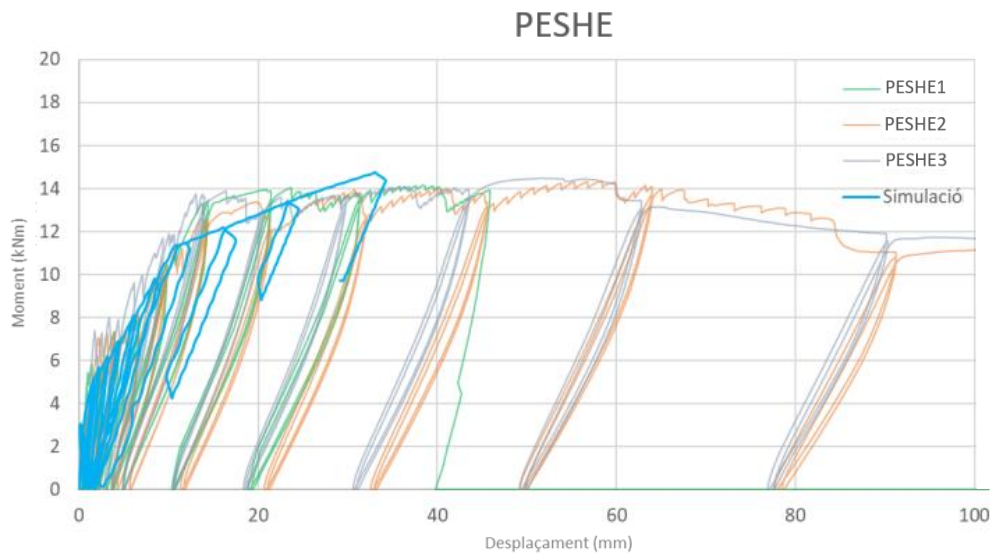


Figura 6. 16. Biga reforçada amb FRCM de cànem recobert amb polièster

Si es comparen els valors de càrrega màxima per cicle, a les Figures 6.17 i 6.18, en el cas del cotó les diferències són més significatives arribant a un 46%, mentre que en el cas de les de cànem, aquestes el 30% en els casos més extrems.

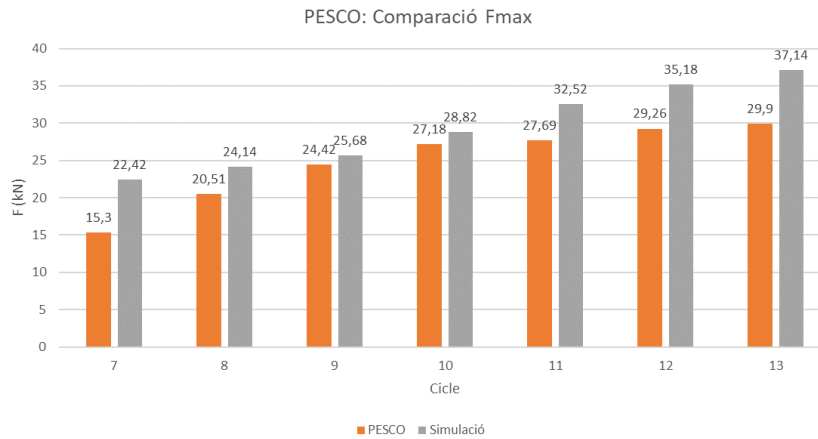


Figura 6. 17. Comparació de càrrega entre PESCO simulada i experimental

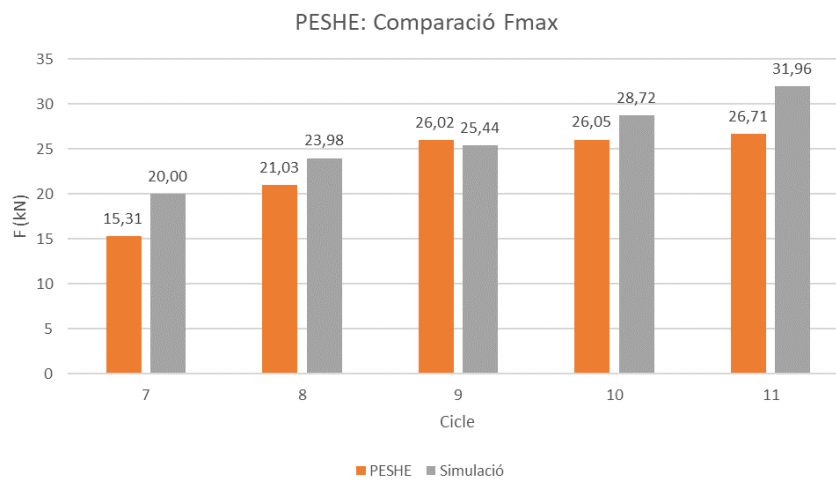


Figura 6. 18. Comparació entre PESHE simulada i experimental

De manera que es conclou que el model és vàlid per les bigues de control i les reforçades amb epoxi, mentre que per les de polièster es conclou que es necessita més informació per ser capaç de simular correctament el comportament de les bigues.

### 6.3. Conclusions del capítol

S'ha dut a terme una correcta calibració del model numèric de bigues de formigó armat a flexió estàtica, i bigues reforçades a flexió cíclica.

El model aconseguit calibra amb diferències inferiors al 2% les bigues de control, de manera que es considera sòlida la base sobre la qual simular el reforç de les bigues.

Al calibrar les bigues reforçades amb malla recoberta amb epoxi, fins a arribar a la zona de fissuració, on la diferència és inferior al 5%.



A la zona plàstica, sí que es veu una sobreestimació de la càrrega a aplicar, degut a la limitació d'ANSYS a l'hora de simular trencaments. Aquestes diferències arriben al 15% als casos d'epoxi.

Al ser valors relativament baixos, el model de bigues reforçades amb FRCM amb malla recoberta amb epoxi és acceptat com a satisfactori

Per anar un pas més enllà a l'hora de validar el model, es va proposar fer la variació única de les propietats de les malles de polièster per veure si el model s'ajustava correctament.

Com era d'esperar, el model és menys acurat per les bigues reforçades amb polièster, ja que únicament un canvi en les propietats elàstiques no representa correctament el comportament sota les sol·licitacions requerides.

# CAPÍTOL VII. CONCLUSIONS

## 7.1. Introducció

Aquest capítol resumeix les conclusions extretes al llarg de la recerca duta a terme per entendre el comportament de les bigues de formigó armat reforçades amb FRCM vegetal sota càrregues de flexió cíclica. També es donen idees i referències per aprofundir en el coneixement d'aquest tipus de reforç.

## 7.2. Conclusions

A través de la recerca bibliogràfica es va determinar l'interès en l'estudi d'aquest tipus de reforç aplicat al formigó armat.

### 7.2.1. Campanya de caracterització

A través de la campanya de caracterització s'obtenen les següents conclusions:

- El recobriment dels fils provoca una millora en les seves propietats mecàniques.

Tot i que la funció principal del recobriment és la protecció de les fibres del medi alcalí del morter, també s'aconsegueix un augment de les propietats mecàniques.

- L'homogeneïtzació de la resina a través dels ultrasons provoca una rigidització de la mateixa.

L'aplicació d'ultrasons allarga el procés de fabricació de les provetes amb una rigidització que per aquesta aplicació no interessa. Per aquest motiu es va descartar el seu ús.

- Les resines sintètiques tenen millor compatibilitat amb els fils.

Comparant l'efecte de recobrir els fils amb resina sintètica o natural, es va veure com l'epoxi i polièster milloraven les propietats mecàniques i donaven la conformitat que es necessitava per manipular les malles.

- Les resines naturals tenen una baixa compatibilitat amb la matriu.

A l'assaig de FRCM es veu clarament com el recobriment modifica el mode de fallada. La baixa compatibilitat provoca un lliscament dels fils dintre de la matriu que no interessa per aquest tipus d'aplicació.

De manera que es continua la recerca amb la campanya experimental en gran format.

### 7.2.2. Adherència al substrat

Sobre l'assaig d'adherència amb el substrat, s'extreu que:

- La longitud d'adherència no modifica significativament el comportament del reforç sota càrregues de flexió.

La variació de la càrrega suportada així com la deformació tenen diferències inferiors al 15% al variar la longitud d'adherència.

- La fibra és el determinant del mode de fallada de l'espècimen.

En el cas de les fibres de cànem, aquestes amb una petita elongació comencen a trencar-se progressivament fins que ocorre la fallada. El cotó, en canvi, el deforma sense en cap moment arribar al trencament.

De manera que és previsible el tipus de fallada que tindran les bigues sotmeses a flexió.

### 7.2.3. Bigues a flexió

Per acabar amb la campanya experimental, es duu a terme els assajos d'anàlisi modal, i flexió estàtica i cíclica.

Dels assajos d'anàlisi modal s'extreu que:

- La rigidesa dels materials modifica la freqüència de vibració.

L'augment del cantell provoca un augment en la rigidesa de les bigues, augmentant així la freqüència de vibració.

- L'efecte del reforç en les freqüències de vibració és majoritàriament degut a l'aplicació de morter.

Al ser l'element que té la fracció volumètrica més elevada, té un efecte més significatiu que les malles.

Finalment dels assajos de flexió, s'extreu que:

- El reforç incrementa la càrrega màxima que suporten les bigues.

Tal com s'ha vist experimentalment, el reforç ajuda al substrat a suportar les càrregues.

- L'aplicació del reforç retarda l'aparició de fissures al substrat.

A l'absorbir més energia inicialment, aquesta provoca fissures en el morter, mantenint compacte el formigó.

- El reforç de cotó dissipa més energia que el de cànem.

Al ser un fil més dúctil, té una zona plàstica més extensa, i l'energia que pot dissipar es manté durant períodes més llargs.

- El reforç de cotó augmenta la ductilitat de la biga mentre que el de cànem la redueix.

Això es degut a les propietats dels fils i les fibres que els conformen. El cànem es rígid i el cotó més dúctil.

- L'aplicació del reforç no té un efecte significatiu en l'augment del desplaçament de deformació plàstica.

El reforç col·labora amb la biga sobretot als primers cicles, de manera que en períodes més llargs, el seu efecte va desapareixent, tornant a les bigues de control en el cas del cànem.

- El recobriments d'epoxi suporta càrregues més elevades que el recobriments de polièster.
- El recobriments de polièster fa més dúctils les bigues que el seu símil en epoxi.

Això és degut a les propietats pròpies de cada recobriments. La resina epoxi és rígida mentre que la de polièster ja indica que és més flexible.

#### 7.2.4. Model numèric

Un cop acabada la campanya experimental, es va desenvolupar un model numèric que simulés el comportament de les bigues de control i reforçades, sota flexió estàtica i cíclica.

Les conclusions són les següents:

- La campanya de caracterització de materials és clau pel desenvolupament de models numèrics.

Una correcta caracterització simplifica la calibració dels materials a l'hora començar un model numèric.

- El model es representa correctament una biga de formigó armat a flexió estàtica.

La diferència inferior al 2% per les bigues de control indiquen una bona calibració dels paràmetres del formigó i acer.

- El model és vàlid per les bigues reforçades amb malles recobertes amb epoxi sota càrregues de flexió cícliques.

En general, fins a la zona de fissuració la diferència és inferior al 5%. Un cop a la zona plàstica, la diferència augmenta fins a un 15% degut a la limitació a l'hora de simular pèrdues de càrrega o trencament dels elements.

- Variar únicament les propietats de la malla no és suficient per simular correctament el comportament de les bigues reforçades.

Tot i el model ser vàlid, el fet de variar únicament les propietats de les malles, no és suficient perquè el model s'adapti al comportament real de les bigues.

### 7.3. Futures línies de recerca

Si bé s'ha realitzat una bona caracterització i un bon estudi de les propietats i el comportament de bigues de formigó armat reforçades amb FRCM de malla vegetal sota càrregues cícliques, hi ha encara molta recerca per endavant en l'ús d'aquest tipus de reforç.

La que ara mateix és clau és la durabilitat d'aquest tipus de reforç. S'estan embebint fibres d'origen vegetal a un ambient agressiu que les degrada i no es tenen clars quins són els períodes màxims on aquest tipus de reforç manté les seves propietats mecàniques. Si un dels objectius és l'aplicació a estructures ja fabricades per allargar el seu temps útil, serà clau saber el tipus de manteniment a dur a terme.

Una altra línia interessant és l'estudi del pretensat de les malles recobertes a l'hora d'aplicar el reforç sobre el substrat. En el formigó armat és comú trobar estructures que pretensen les barres d'acer per assolir majors càrregues abans que el morter es fissuri, augmentant així la seva resistència a tracció.



Finalment, una altra línia és la del desenvolupament de models de predicció tant analítics com numèrics. Si bé durant la realització d'aquesta tesi s'ha assolit la creació d'un model numèric adequat, complementar-ho amb un model analític és finalment comprendre de manera clara els mecanismes de transmissió i fallada d'aquest tipus de recobriment aplicat al formigó armat.

## CAPÍTOL VIII. REFERÈNCIES

Les referències consultades per a la realització d'aquesta tesi doctoral han estat les següents:

- [1] L. Mercedes, L. Gil, and E. Bernat-Maso, "Mechanical performance of vegetal fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 175, pp. 161–173, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.171.
- [2] FEMA 461, "Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Component," no. June, 2007.
- [3] A. Camões and R. M. Ferreira, "Technological evolution of concrete: From ancient times to ultra high-performance concrete," *Struct. Archit. - Proc. 1st Int. Conf. Struct. Archit. ICSA 2010*, pp. 1617–1624, 2010.
- [4] S. Demis and V. G. Papadakis, "Durability design process of reinforced concrete structures - Service life estimation, problems and perspectives," *J. Build. Eng.*, vol. 26, p. 100876, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.job.2019.100876.
- [5] SIKA, "Prestressing Systems for Structural Strengthening with Sika CarboDur." p. 24, 2015. [Online]. Available: <https://www.sika.com/content/dam/dms/corporate/p/glo-structural-strengthening-for-contractors.pdf>
- [6] C. Escrig Pérez, "Estudio del comportamiento mecánico de vigas de hormigón armado reforzadas a flexión y a cortante con materiales compuestos de matriz cementítica," *TDX (Tesis Dr. en Xarxa)*, pp. 206–207, 2015, [Online]. Available: <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/95831>
- [7] S. Chandra Das and E. Haque Nizam, "Applications of Fibber Reinforced Polymer Composites ( FRP ) in Civil Engineering," *Int. J. Adv. Struct. Geotech. Eng. ISSN*, vol. 03, no. 03, pp. 2319–5347, 2014, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Subrata\\_Das30/publication/305305006\\_Applications\\_of\\_Fiber\\_Reinforced\\_Polymer\\_Composites\\_FRP\\_in\\_Civil\\_Engineering/links/5787609d08aea50b6b1901a8/Applications-of-Fiber-Reinforced-](https://www.researchgate.net/profile/Subrata_Das30/publication/305305006_Applications_of_Fiber_Reinforced_Polymer_Composites_FRP_in_Civil_Engineering/links/5787609d08aea50b6b1901a8/Applications-of-Fiber-Reinforced-)

Polymer-Composites-FRP-in-Civil-Engineeri

- [8] M. R. Irshidat and A. Al-Shannaq, "Bond strength evaluation between textiles reinforced mortar with carbon nanotubes and concrete substrate," *Lat. Am. J. Solids Struct.*, vol. 16, no. 9, pp. 1–14, 2019, doi: 10.1590/1679-78255796.
- [9] L. Ascione, G. De Felice, and S. De Santis, "A qualification method for externally bonded Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) strengthening systems," *Compos. Part B Eng.*, vol. 78, no. April, pp. 497–506, 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.03.079.
- [10] D. Baggio, K. Soudki, and M. Noël, "Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems," *Constr. Build. Mater.*, vol. 66, no. September 2014, pp. 634–644, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.097.
- [11] Z. C. Tetta, L. N. Koutas, and D. A. Bournas, "Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams," *Compos. Part B Eng.*, vol. 77, pp. 338–348, 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.03.055.
- [12] S. M. Raoof, L. N. Koutas, and D. A. Bournas, "Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams," *Constr. Build. Mater.*, vol. 151, pp. 279–291, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.023.
- [13] L. Huang, B. Yan, L. Yan, Q. Xu, H. Tan, and B. Kasal, "Reinforced concrete beams strengthened with externally bonded natural flax FRP plates," *Compos. Part B Eng.*, vol. 91, pp. 569–578, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.02.014.
- [14] H. Wang and G. Xian, "Shear capacity of RC beams strengthened with flax fiber sheets grafted with nano-TiO<sub>2</sub>," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 6, pp. 1–20, 2020, doi: 10.3390/ma13061430.
- [15] O. A. Cevallos and R. S. Olivito, "Effects of fabric parameters on the tensile behaviour of sustainable cementitious composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 69, pp. 256–266, 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.10.004.



- [16] M. Ardanuy, J. Claramunt, and R. D. Toledo Filho, "Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research," *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 115–128, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035.
- [17] R. S. Olivito, R. Codispoti, and O. A. Cevallos, "Bond behavior of Flax-FRCM and PBO-FRCM composites applied on clay bricks: Experimental and theoretical study," *Compos. Struct.*, vol. 146, pp. 221–231, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.03.004.
- [18] C. B. de Carvalho Bello, I. Boem, A. Cecchi, N. Gattesco, and D. V. Oliveira, "Experimental tests for the characterization of sisal fiber reinforced cementitious matrix for strengthening masonry structures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 219, pp. 44–55, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.168.
- [19] L. E. Mercedes Cedeño, "Análisis del comportamiento frente acciones cíclicas de muros de mampostería reforzados con materiales compuestos de matriz inorgánica y tejidos de fibras vegetales," Universitat Politècnica de Catalunya, 2019. Accessed: Apr. 03, 2020. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/170439#.XodWzqlWTnA.mendeley>
- [20] P. H. F. Pereira *et al.*, "Vegetal fibers in polymeric composites: A review," *Polimeros*, vol. 25, no. 1, pp. 9–22, 2015, doi: 10.1590/0104-1428.1722.
- [21] L. Nagarajan and S. Pavithra, "Use of Natural Textile Fibres for Structural Engineering," *Int. J. Sci. Res.*, vol. 5, no. 2013, pp. 2319–7064, 2013, [Online]. Available: [www.ijsr.net](http://www.ijsr.net)
- [22] H. Ventura, J. Claramunt, A. Navarro, M. A. Rodriguez-Perez, and M. Ardanuy, "Effects of wet/dry-cycling and plasma treatments on the properties of flax nonwovens intended for composite reinforcing," *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 2, pp. 1–18, 2016, doi: 10.3390/ma9020093.
- [23] J. Claramunt, M. Ardanuy, J. A. García-Hortal, and R. D. T. Filho, "The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 5, pp. 586–595, 2011, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.03.003.

- [24] A. Abbass, M. C. Paiva, D. V. Oliveira, P. B. Lourenço, R. Fangueiro, and N. M. Alves, "The Potential of Beeswax Colloidal Emulsion/Films for Hydrophobization of Natural Fibers Prior to NTRM Manufacturing," in *Key Engineering Materials*, Apr. 2022, vol. 916 KEM, pp. 82–90. doi: 10.4028/p-97q9jn.
- [25] M. Bakhtiari Ghaleh, P. Asadi, and M. R. Eftekhari, "Enhancing mechanical performance of waste tire concrete with surface double pre-coating by resin and micro-silica," *J. Build. Eng.*, vol. 50, no. January, p. 104084, 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104084.
- [26] F. Veloso de Carvalho *et al.*, "Polyaniline and magnetite on curaua fibers for molecular interface improvement with a cement matrix," *J. Mol. Struct.*, vol. 1233, p. 130101, 2021, doi: 10.1016/j.molstruc.2021.130101.
- [27] L. Zhao *et al.*, "The improved resistance against the degradation of sisal fibers under the environment of cement hydration by surface coating of graphene oxide (GO) based membranes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 305, no. March, p. 124694, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124694.
- [28] N. T. Mata, S. Villanueva, and M. Henríquez, "Trend study : Applications of Colophony ( Rosin ) and its Derivatives," *Ing. UC*, vol. 25 (3), no. February, pp. 325–337, 2018.
- [29] R. D. Tolêdo Filho, K. Joseph, K. Ghavami, and G. L. England, "the Use of Sisal Fibre As Reinforcement in Cement Based Composites," *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 3, no. 2, pp. 245–256, 1999, doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v3n2p245-256.
- [30] F. M. Ward, *Uses of Gum Arabic (Acacia sp.) in the Food and Pharmaceutical Industries*. 2000. doi: 10.1007/978-1-4615-4207-0\_20.
- [31] E. Bertolesi, F. G. Carozzi, G. Milani, and C. Poggi, "Numerical modeling of Fabric Reinforce Cementitious Matrix composites (FRCM) in tension," *Constr. Build. Mater.*, vol. 70, pp. 531–548, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.006.
- [32] P. Larrinaga, C. Chastre, H. C. Biscaia, and J. T. San-José, "Experimental and numerical modeling of basalt textile reinforced mortar behavior under uniaxial

- tensile stress,” *Mater. Des.*, vol. 55, pp. 66–74, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.09.050.
- [33] E. Grande and G. Milani, “Numerical simulation of the tensile behavior of FRCM strengthening systems,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 189, no. November 2019, p. 107886, 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.107886.
- [34] J. Donnini, G. Lancioni, and V. Corinaldesi, “Failure modes in FRCM systems with dry and pre-impregnated carbon yarns: Experiments and modeling,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 140, no. July 2017, pp. 57–67, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.12.024.
- [35] J. Aveston, “Theory of multiple fracture of fibrous composites,” *J. Mater. Sci.*, vol. 8, no. 3, p. 352, 1973, Accessed: Aug. 19, 2020. [Online]. Available: <http://mendeley.csuc.cat/fitxers/304f1a884f16d27d754a99a9aa770999>
- [36] P. K. V. R. Padalu, Y. Singh, and S. Das, “Tensile properties of wire and fibre reinforced cementitious matrix composites for strengthening of masonry,” *Structures*, vol. 23, no. October 2019, pp. 164–179, 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2019.10.006.
- [37] P. Larrinaga, C. Chastre, J. T. San-José, and L. Garmendia, “Non-linear analytical model of composites based on basalt textile reinforced mortar under uniaxial tension,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 55, pp. 518–527, 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.06.043.
- [38] G. Minafò and L. La Mendola, “Experimental investigation on the effect of mortar grade on the compressive behaviour of FRCM confined masonry columns,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 146, no. January, pp. 1–12, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.03.033.
- [39] J. C. Arroyo Portero, *Hormigón armado / Juan Carlos Arroyo Portero, Francisco Morán Cabré, Álvaro García Meseguer ; colaboradores: Ángel Castillo Talavera [i 11 més]*. [Madrid] : CINTER Divulgación Técnica, 2018. Accessed: Sep. 03, 2020. [Online]. Available: [https://discovery.upc.edu/iii/encore/record/C\\_\\_Rb1536391\\_\\_Shormig%F3n](https://discovery.upc.edu/iii/encore/record/C__Rb1536391__Shormig%F3n)

armado

jimenez

montoya\_\_Orightresult\_\_U\_\_X1;jsessionid=2FEB385167C3F19710C257B925746  
71D?lang=cat

- [40] AENOR, "UNE: EN-ISO 10080:2006," 2006
- [41] M. Primer, C. D. E. Aplicaci, and M. D. E. Utilizaci, "MasterBrace P 3500 - ficha tecnica," pp. 1–5, 2015.
- [42] T. K. Kim, J. K. Kim, and O. C. Jeong, "Measurement of nonlinear mechanical properties of PDMS elastomer," *Microelectron. Eng.*, vol. 88, no. 8, pp. 1982–1985, 2011, doi: 10.1016/j.mee.2010.12.108.
- [43] Muthupandian Ashokkumar and Franz Grieser, "ULTRASOUND ASSISTED CHEMICAL PROCESSES," *Rev. Chem. Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 41–83, 1999, doi: doi:10.1515/REVCE.1999.15.1.41.
- [44] EN ISO 13934-1/2, "Textiles - Tensile properties of fabrics - Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method," EN ISO 13934-1/2, 2013
- [45] I. d'Estudis C.- Diec2, "Institut d'Estudis Catalans - Diec2." <https://dlc.iec.cat/Results?DecEntradaText=conforme&AllInfoMorf=False&OperEntrada=0&OperDef=0&OperEx=0&OperSubEntrada=0&OperAreaTematica=0&InfoMorfType=0&OperCatGram=False&AccentSen=False&CurrentPage=0&refineSearch=0&Actualitzacions=False> (accessed Feb. 16, 2023).
- [46] A. Jabr, A. El-ragaby, and F. Ghrib, "Effect of the Fiber Type and Axial Stiffness of FRCM on the Flexural Strengthening of RC Beams," 2017, doi: 10.3390/fib5010002.
- [47] S. Ono and S. Kondo, "Molecular Theory of Surface Tension in Liquids," in *Structure of Liquids / Struktur der Flüssigkeiten*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1960, pp. 134–280. doi: 10.1007/978-3-642-45947-4\_2.
- [48] E. Bernat-Maso, E. Teneva, C. Escrig, and L. Gil, "Ultrasound transmission method to assess raw earthen materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 555–564,

2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.012.

- [49] S. De Santis, F. G. Carozzi, G. de Felice, and C. Poggi, "Test methods for Textile Reinforced Mortar systems," *Compos. Part B Eng.*, vol. 127, pp. 121–132, 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.03.016.
- [50] L. H. Sneed, S. Verre, C. Carloni, and L. Ombres, "Flexural behavior of RC beams strengthened with steel-FRCM composite," *Eng. Struct.*, vol. 127, pp. 686–699, 2016, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.09.006.
- [51] A. D'Ambrisi, L. Feo, and F. Focacci, "Bond-slip relations for PBO-FRCM materials externally bonded to concrete," *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 8, pp. 2938–2949, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.06.002.
- [52] F. O. Falope, L. Lanzoni, and A. M. Tarantino, "Double lap shear test on steel fabric reinforced cementitious matrix (SFRCM)," *Compos. Struct.*, vol. 201, no. March, pp. 503–513, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.06.001.
- [53] S. Barducci, V. Alecci, M. De Stefano, G. Misseri, L. Rovero, and G. Stipo, "Experimental and Analytical Investigations on Bond Behavior of Basalt-FRCM Systems," *J. Compos. Constr.*, vol. 24, no. 1, 2020, doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000985.
- [54] O. A. M. A. Kara, "Estudio De La Frecuencia De Vibración En Vigas," *Univ. Politécnica Madrid.*, vol. 7, no. 2, pp. 107–115, 2014.
- [55] "Trapz," *MathWorks*. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/trapz.html>
- [56] L. R. Alejano and A. Bobet, "Drucker-Prager criterion," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 45, no. 6, pp. 995–999, 2012, doi: 10.1007/s00603-012-0278-2.
- [57] J. Q. Bao, X. Long, K. H. Tan, and C. K. Lee, "A new generalized Drucker-Prager flow rule for concrete under compression," *Eng. Struct.*, vol. 56, pp. 2076–2082, 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2013.08.025.
- [58] T. Yu, J. G. Teng, Y. L. Wong, and S. L. Dong, "Finite element modeling of confined concrete-I: Drucker-Prager type plasticity model," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 3, pp. 665–679, 2010, doi: 10.1016/j.engstruct.2009.11.014.

- [59] L. Ombres, "Flexural analysis of reinforced concrete beams strengthened with a cement based high strength composite material," *Compos. Struct.*, 2011, doi: 10.1016/j.compstruct.2011.07.008.
- [60] K. Georgiadi-stefanidi, E. Mistakidis, P. Perdikaris, and T. Papatheocharis, "Numerical simulation of the nonlinear bending response of fibre-reinforced cementitious matrix beams and comparison with experimental results," *Eng. Struct.*, vol. 33, no. 12, pp. 3579–3589, 2011, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.07.022.
- [61] L. Ombres, "Debonding analysis of reinforced concrete beams strengthened with fibre reinforced cementitious mortar," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 81, pp. 94–109, 2012, doi: 10.1016/j.engfracmech.2011.06.012.
- [62] S. M. Raoof, L. N. Koutas, and D. A. Bournas, "Textile-reinforced mortar ( TRM ) versus fibre-reinforced polymers ( FRP ) in flexural strengthening of RC beams," *Constr. Build. Mater.*, vol. 151, pp. 279–291, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.023.
- [63] C. Escrig, L. Gil, and E. Bernat-maso, "Experimental comparison of reinforced concrete beams strengthened against bending with different types of cementitious-matrix composite materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 137, pp. 317–329, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.106.
- [64] M. Elghazy, A. El, U. Ebead, and A. Nanni, "Experimental results and modelling of corrosion-damaged concrete beams strengthened with externally-bonded composites," *Eng. Struct.*, vol. 172, no. January, pp. 172–186, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.06.037.
- [65] X. Shang, J. Yu, L. Li, and Z. Lu, "Strengthening of RC Structures by Using Engineered Cementitious Composites : A Review," *Sustainability*, vol. 11, p. 3384, 2019, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/12/3384/htm>
- [66] P. Jiménez Montoya, A. García Meseguer, F. Morán Cabré, and J. C. Arroyo Portero, *Hormigón armado / Pedro Jiménez Montoya ; Alvaro García Meseguer, Francisco Morán Cabré, Juan Carlos Arroyo Portero.*, 15a ed. ba. Barcelona:



Gustavo Gili, 2011.

- [67] P. A. S. Rocha, “Construção da curva de interação para pilares mistos de aço e concreto totalmente revestidos com base nos domínios de deformação de seções de concreto armado,” vol. 8, no. 4, pp. 457–466, 2015.
- [68] Comisión Permanente del Hormigón, “Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008,” *Boe N° 203*, p. 704, 2008.

# ANNEXOS

## A1. Càlculs de l'armadura.

Per decidir la geometria de les bigues a flexió, es va consultar diverses referències entre 2011 i 2019 que es troben a la Taula A1.1.

*Taula A1. 1. Geometria de bigues assajades a flexió*

Referència	Secció transversal (mm x mm)	Longitud (mm)
Luciano Ombres [59]	150 x 250	3000
Georgiadi-Stefanidi et al. [60]	150 x 200	1800
Luciano Ombres [61]	150 x 250	3000
Sneed et al. [50]	203 x 305	3048
Jabr et al. [46]	150 x 250	2400
Raof et al. [62]	150 x 250	2800
Escrig et al. [63]	200 x 450	4400
Elghazy et al. [64]	150 x 250	2800
Shang et al. [65]	200 x 300	1800

La secció més comuna és la de 150mm x 250mm, mentre que la longitud es troba normalment entre 2400 i 3000 mm.

De manera que s'escull una secció de 150 mm x 250 mm amb una longitud de 3000 mm per assegurar els efectes de les càrregues de flexió.

Un cop les dimensions són determinades, és necessari calcular l'armadura de la biga. Seguint el procediment descrit al llibre Hormigón Armado de Jimenez-Montoya [66].



### A1.1. Armadura longitudinal

Per calcular l'armadura mínima perquè la biga sigui capaç de suportar el seu propi pes, és necessari que es compleixin dos criteris: el mecànic i el geomètric.

$$\text{Mecànic: } A_S \geq 0,04 \cdot A_C \cdot \left( \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \right) \quad (9.1)$$

$$\text{Geomètric: } A_S \geq \frac{2,8}{1000} \cdot A_C \quad (9.2)$$

On  $A_C$  és la secció de la biga en  $\text{mm}^2$ .

$f_{cd}$  és la resistència a compressió del formigó en MPa.

$F_{yd}$  és la resistència a tracció del reforç d'acer en MPa.

Amb la secció de  $150 \times 250 \text{ mm}^2$  i seleccionant uns valors estàndard de formigó (25 MPa) i acer (500MPa), és necessari trobar els coeficients de disseny tenint en compte els factors de seguretat: 1,5 pel formigó i 1,15 per l'acer. La taula A1.2 exposa els valors utilitzats.

Taula A1. 2. Paràmetres de disseny de l'armadura

Paràmetre	Factor de seguretat	Valor
$A_C$ ( $\text{mm}^2$ )	-	37.500
$f_{cd}$ (MPa)	1,5	16,67
$f_{yd}$ (MPa)	1,15	434

Amb els valors determinats calculem els valors mínims d'armadura.

$$\text{Mecànic: } A_S \geq 57,61 \text{ mm}^2$$

$$\text{Geomètric: } A_S \geq 105 \text{ mm}^2$$

De manera que es continua el càlcul utilitzant  $105 \text{ mm}^2$ , per complir ambdós criteris.

A continuació és necessari calcular un reforç que sigui capaç de suportar 37,5kNm. A diferents estudis, com Tetta et al.[11] una biga de formigó armat arriba als 50kN de càrrega. Per assegurar que treballem en un interval on el reforç actua, aquesta es redueix a 37,5kN.

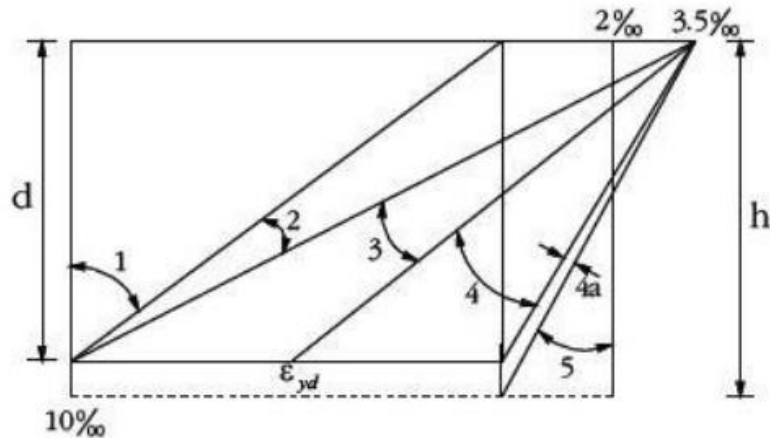


Figura A1. 1. Dominis de deformació de bigues de formigó armat [67]

El domini al que es troba la biga al ser sotmesa a flexió és el segon domini, que té un valor reduït de reforç. De manera que l'alçada màxima de la fibra neutra és de  $0,259 \cdot d$ , on  $d$  és la posició de l'armat respecte la cara superior de la biga.

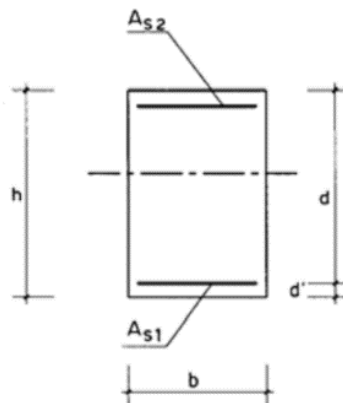


Figura A1. 2. Secció d'una biga de formigó armat [68]

Si es considera un recobriment de 30mm, es necessita calcular les armadures de tracció i compressió.

Primer es calcula l'armadura a compressió. Si es suposa que no hi ha armadura, el moment màxim que podrà suportar serà:

$$M_{LIM} = f_{cd} \cdot b \cdot y \cdot \left(d - \frac{y}{2}\right) \quad (9.3)$$

On  $f_{cd}$  és la resistència a compressió del formigó en  $N/mm^2$ .

$b$  és la base de la secció en mm.

$y$  és la profunditat del formigó que suporta càrregues a compressió en mm.

$d$  és la distància de l'armadura de tracció respecte a la cara superior de la biga en mm.

Si el formigó té una resistència a compressió de  $30 \text{ N/mm}^2$ ,  $b$  és  $150 \text{ mm}$ ,  $y$  és  $45,58 \text{ mm}$  i  $d$  és  $220 \text{ mm}$ , el moment màxim té un valor de  $22,47 \text{ kNm}$ .

Al ser un valor inferior al valor de disseny ( $37,5 \text{ kNm}$ ), es necessari col·locar una armadura de compressió.

La distribució de càrregues es troba a la Figura A1.2.

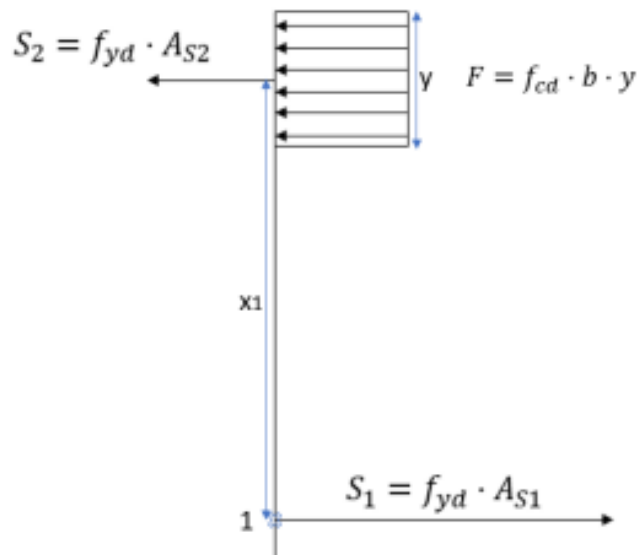


Figura A1. 3. Distribució de càrregues

A continuació es fa balanç de forces i moments perquè la secció estigui equilibrada, tenint en compte que la fibra neutra ha de trobar-se com a màxim a  $0,256 \cdot d$ .

$$\sum M_0 = 0 \quad (9.4)$$

$$\sum F_x = 0 \quad (9.5)$$

$$X_{LIM} = 0,259 \cdot d \quad (9.6)$$

Utilitzant l'equació 9.4 i la Figura A1.2, es troba l'expressió del moment de disseny.

$$M_d = F \cdot x_1 + S_2 \cdot x_2 = f_{cd} \cdot b \cdot y \cdot \left(d - \frac{y}{2}\right) + f_{yd} \cdot (d - d') \cdot A_{s_2} \quad (9.7)$$

Finalment es calcula l'àrea de l'armadura amb l'equació 9.8:

$$A_{s_2} = \frac{M_d - f_{cd} \cdot b \cdot y \cdot \left(d - \frac{y}{2}\right)}{f_{yd} \cdot (d - d')} \quad (9.8)$$

Suposant el moment de disseny ( $M_d$ ) com 37,5 kNm i un recobriment de l'armadura de 30mm.

$$A_{s_2} = 181,9 \text{ mm}^2 \approx 182 \text{ mm}^2$$

A continuació es calcula l'armadura de tracció. Es considera tant l'armadura de compressió com la de tracció i es torna a aplicar l'equilibri de la secció.

$$S_1 = S_2 + F \quad (9.9)$$

$$A_{s_1} \cdot f_{yd} = A_{s_2} \cdot f_{yd,c} + f_{cd} \cdot b \cdot y \rightarrow A_{s_1} = \frac{A_{s_2} \cdot f_{yd,c} + f_{cd} \cdot b \cdot y}{f_{yd}} \quad (9.10)$$

Siguent  $A_{s_1}$  l'àrea de l'armadura de tracció i  $A_{s_2}$  l'àrea de l'armadura de compressió. També  $f_{yd}$  és el límit elàstic de l'acer de 500 MPa.

$$A_{s_1} = 444 \text{ mm}^2$$

A la Taula A1.3 es troben els valors calculats de les armadures, així com la els valors finals escollits.

Taula A1. 3. Armadura de tracció i compressió

Armadura	Àrea de disseny (mm <sup>2</sup> )	Àrea final mm <sup>2</sup> )	Nombre i diàmetre de barres d'armadura
Compressió	182	100	2Ø8
Tracció	444	100	2Ø8

Es decideix reduir el valor de les armadures, degut a que es vol simular una biga que ha estat en servei durant un llarg període de temps i per tant té disminució en la capacitat resistent dels seus elements.

### A1.2. Armadura transversal

L'armadura transversal de disseny utilitzada serà de 75kN per assegurar que la biga no tindrà càrregues de rasant.

Seguint la normativa EHE-08 [68], en flexió simple, s'utilitzen les següents expressions per calcular la contribució a rasant del formigó  $V_{CU}$ .

$$V_{CU} = \frac{0,15}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d \quad (9.11)$$

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \quad (9.12)$$

$$\rho = \frac{A_{S_2}}{b \cdot d} \quad (9.13)$$

A la Taula A1.4 es defineixen els símbols i es dona els valors utilitzats pel càlcul.

Taula A1. 4. Paràmetres de les equacions 9.11, 9.12 i 9.13

Nomenclatura	Definició	Valor
$\gamma_c$ (-)	Coefficient de seguretat del formigó	1.5
$\xi$ (-)	Coefficient calculat a l'equació 9.12	1.95
$\rho$ (-)	Proporció geomètrica de l'armadura	$9.14 \cdot 10^{-3}$
$f_{ck}$ (MPa)	Resistència a compressió del formigó	25
b (mm)	Base de la secció	150
d (mm)	Distància entre la cara superior i el centre de l'armadura de tracció.	220

De manera que la contribució té un valor de 18.26kN.

A continuació es compara aquest valor amb el mínim que hauria de tenir:

$$V_{CU_{MIN}} = \frac{0,075}{\gamma_c} \cdot \xi^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d \quad (9.14)$$

$$V_{CU_{MIN}} = 22,47 \text{ kN}$$

Al ser menor ambdós valors inferiors al valor de disseny (75kN), és necessari l'ús d'una armadura de rasant. Es calcula la càrrega que ha de suportar l'armadura com:

$$V_d \leq V_{CU_{MIN}} + V_{SU} \quad (9.15)$$

$$V_{SU} = 75 - 22,47 = 52,53 \text{ kN}$$

S'utilitza  $V_{SU}$  per trobar la secció d'armadura de rasant.

$$V_{SU} = A_{90} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{y90,d} \cdot \cotg\theta \quad (9.16)$$

$$A_{90} = \frac{V_{SU}}{0,9 \cdot d \cdot f_{y90,d}} \quad (9.17)$$

A la Taula A1.5. es defineixen els paràmetres i els valors utilitzats pel càlcul de l'armadura.

Taula A1. 5. Paràmetres de les equacions 9.16 i 9.17

Símbol	Definició	Valor
$f_{y90,d}$	Límit elàstic de l'armadura en MPa.	400
$\cotg\theta$	Cotangent de l'angle entre les barres a compressió del formigó i l'eix de la biga.	1
d	És la distància entre la cara superior de la biga i el centre de l'armadura de tracció en mm.	220

De manera que l'àrea calculada és de 0,663 mm<sup>2</sup>.

Finalment, es calcula la separació entre les armadures. Per fer-ho es proposa la utilització de barres de Ø6mm a les quals corresponen un àrea de 28,3 mm<sup>2</sup>.

$$s_t = \frac{A_S}{A_{90}} = \frac{2 \cdot 28,3}{0,6633} = 85,24 \text{ mm} \quad (9.18)$$

Per facilitar la manufactura, amb els fabricants es va acordar una separació de 100mm entre armadures. També finalment, les barres van ser Ø8mm.

La figura A1.4 mostra la secció final de la secció de les bigues de formigó armat per ser assajades a flexió.

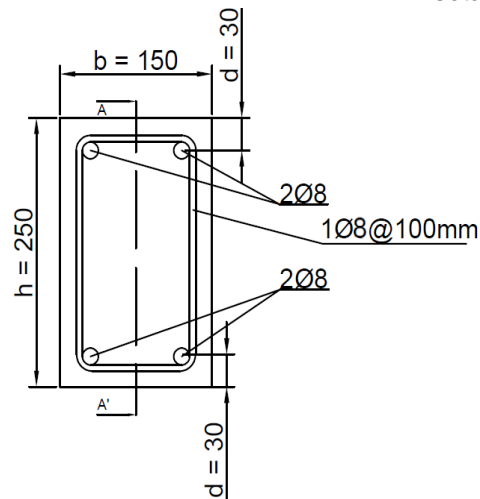


Figura A1. 4. Secció final de les bigues a flexió.

### A1.3. Comprovació de la fissuració

L'última comprovació a realitzar per assegurar que les bigues es troben ben dimensionades, consisteix en la comprovació de qu no es fissuraran degut al seu propi pes.

També és l'EHE-08 [68] qui proveeix del procediment a seguir per comprovar l'estat últim de fissuració.

Es considera la secció de 150mm x 250mm amb un recobriment de les armadures de 30mm.

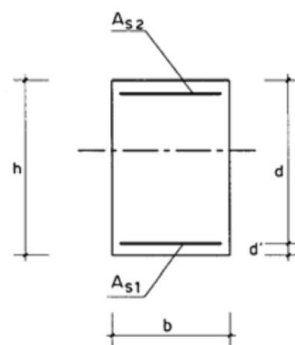


Figura A1. 5. Secció rectangular de la biga [68]

Es necessita:

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200.000}{10.000 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}}} = \frac{200.000}{10.000 \cdot \sqrt[3]{25}} = 7,18 \quad (9.19)$$

$$\rho_1 = \rho_2 = \frac{A_{S_1}}{b \cdot d} = \frac{100}{150 \cdot 220} = 3,03 \cdot 10^{-3} \quad (9.20)$$

Amb els valors calculats, es calcula la profunditat de la fibra neutra i la inèrcia de fissuració:

$$\left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \cdot \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{d'}{d}\right)}{n \cdot \rho_1 \cdot \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2}}\right] = 0,183 \quad (9.21)$$

$$X = 42,22 \text{ mm}$$

$$I_f = n \cdot A_{S_1} \cdot (d - X) \cdot \left(d - \frac{X}{3}\right) + n \cdot A_{S_2} \cdot (X - d') \cdot \left(\frac{X}{3} - d'\right) = 2,653 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 \quad (9.22)$$

$$I_f = 2653 \text{ cm}^4$$

Per assegurar que es compleix el límit de servei, la normativa europea estableix que l'ample de fissura ha de ser inferior al màxim establert per aquest cas.

$$w_k \leq w_{max} = 0,3 \text{ mm} \quad (9.23)$$

La normativa espanyola estableix que l'ample de fissura es calcula com:

$$w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm,r} \quad (9.24)$$

On  $\beta$  és el coeficient que relaciona l'amplada mitjana de fissura amb l'amplada característica.

$s_m$  és la separació mitjana entre fissures en mm.

$\varepsilon_{sm,r}$  és l'elongació relativa de les armadures, tenint en compte la col·laboració del formigó.

Per calcular els coeficients s'utilitzen les equacions 9.25 i 9.26:

$$s_m = 2 \cdot c + 0,2 \cdot s + 0,4 \cdot k_1 \cdot \frac{\theta \cdot A_{c,ef}}{A_s} \quad (9.25)$$

$$A_{c,ef} = b \cdot (c + \theta \cdot 7,5) \quad (9.26)$$

A la Taula A1.6 es defineixen els símbols així com els valors utilitzats.



Taula A1. 6. Paràmetres de les equacions 9.26 i 9.26

Símbol i unitat	Definició	Valor
c (mm)	Recobriments de les armadures	30
s (mm)	Distància entre barres longitudinals.	50
$k_1$ (-)	Coeficient d'influència del diagrama de forces de tracció sota flexió simple.	0.125
$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	Àrea de l'armadura de tracció	100
$A_{c,ef}$ (mm <sup>2</sup> )	Àrea de formigó que envolta l'armadura de tracció.	15750
$\Theta$ (mm)	Diameter de la barra traccionada més gruixuda.	8

A continuació es calcula l'elongació relativa, amb l'equació 9.27.

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \left[ 1 - k_2 \cdot \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \geq 0.4 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (9.27)$$

On  $E_s$  és el mòdul d'elasticitat de l'acer en MPa.

$\sigma_s$  és la tensió de les armadures d'acer quan el formigó no col·labora en MPa.

$\sigma_{sr}$  és la tensió de les armadures quan el formigó col·labora en MPa.

$k_2$  és un coeficient que depèn del tipus de càrrega. En aquest cas, 0.5 per càrregues de llarga duració.

Les tensions de les armadures, en estructures no pretensades, permeten simplificacions de les equacions de càlcul [68]:

$$\sigma_s = \frac{M_k}{0.8 \cdot d \cdot A_s} \quad (9.28)$$

$$\sigma_{sr} = \frac{M_f}{0.8 \cdot d \cdot A_s} \quad (9.29)$$

On  $M_k$  és el moment pel qual es calcula l'estat de fissuració en kNm.

$M_f$  és el moment de fissuració en kNm.

$A_s$  és la secció total de l'armadura en mm<sup>2</sup>.

Primer s'ha de calcular el moment causat pel pes del formigó. Agafant un formigó H-25, amb una densitat de 2300 kg/m<sup>3</sup> [68], i una biga de 3m de longitud, la càrrega distribuïda ( $q$ ) serà de 845,25 N/m. De manera que el moment màxim causat serà:

$$M_k = \frac{q \cdot l^2}{8} = 950.91 \text{ Nm} \quad (9.30)$$

$$\sigma_s = 54.03 \text{ MPa}$$

Per calcular el moment de fissuració, es necessita calcular la tensió de l'armadura de tracció en el moment que el formigó comença a fissurar ( $f_{ctm,fi}$ ).

$$f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (9.31)$$

$$f_{ctm,fi} = \max \left\{ \left( 1.16 - \frac{h}{1000} \right) \cdot f_{ctm} \right. \quad (9.32)$$

Suposant una resistència a compressió del formigó ( $f_{ck}$ ) de 25 MPa i un canto ( $h$ ) de 250mm.

$$f_{ctm} = 2.565 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm,fi} = \max \begin{cases} 2.57 \text{ MPa} \\ 3.46 \text{ MPa} \end{cases}$$

De manera que la tensió a l'armadura quan el formigó comença a fissurar és de 3,46 MPa. Cosa que permet el càlcul de fissuració.

$$M_f = f_{ctm,fi} \cdot \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 \quad (9.33)$$

I finalment utilitzant l'equació 9.29 es calcula la tensió a l'armadura quan el morter no col·labora.

$$\sigma_{sr} = 307.17 \text{ MPa}$$

Siguent aquesta molt inferior a la màxima que pot suportar l'armadura, es considera que la biga ha estat correctament dissenyada.

## A2. Corbes experimentals individuals

Aquest apartat conté les corbes individuals amb les quals s'han calculat les corbes mitjanes.

### A2.1. Assaig de tracció de fils

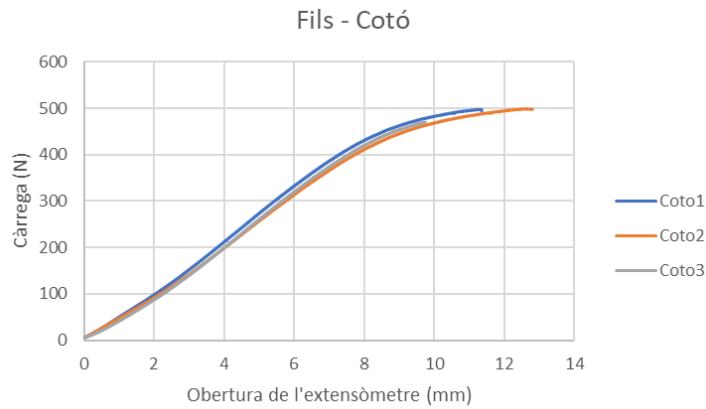


Figura A2.1. 1. Càrrega - extensòmetre del fil de cotó

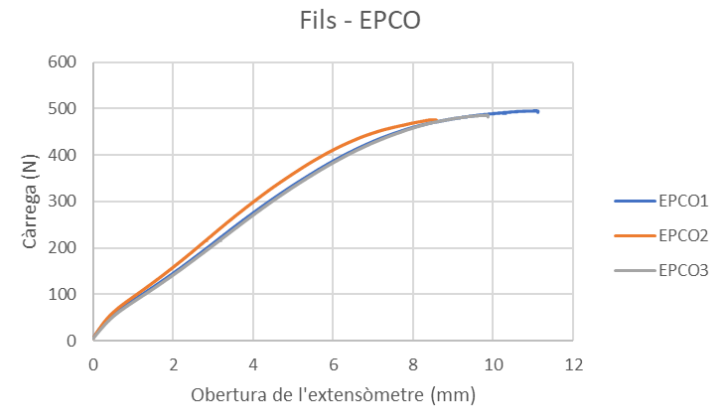


Figura A2.1. 2. Càrrega - extensòmetre de EPCO

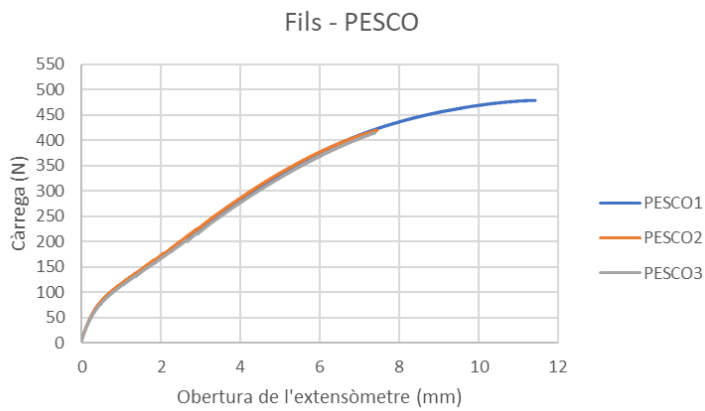


Figura A2.1. 3. Càrrega - extensòmetre de PESCO

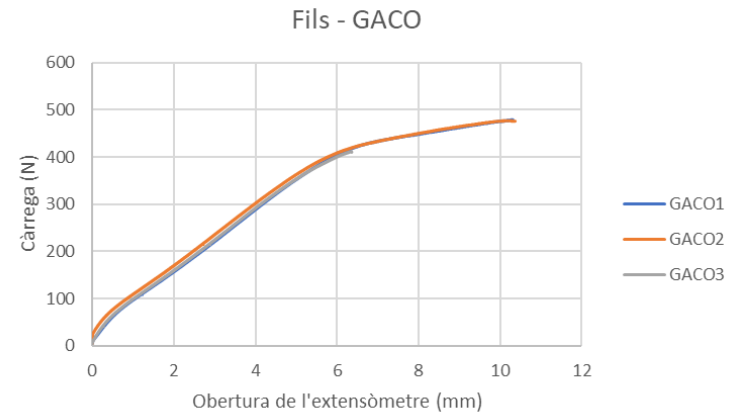


Figura A2.1. 4. Càrrega - extensòmetre de GACO

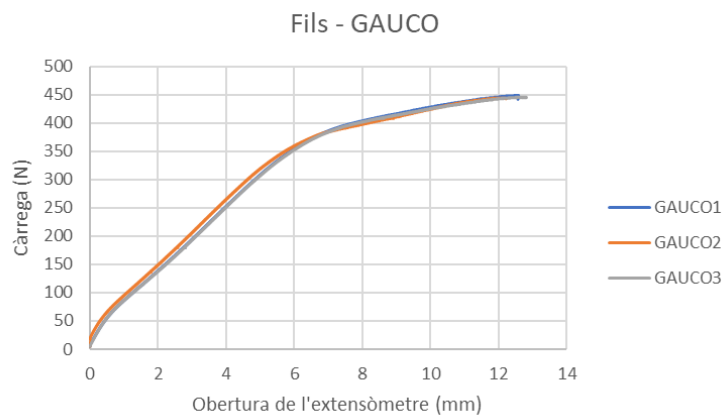


Figura A2.1. 5. Càrrega - extensòmetre de GAUCO

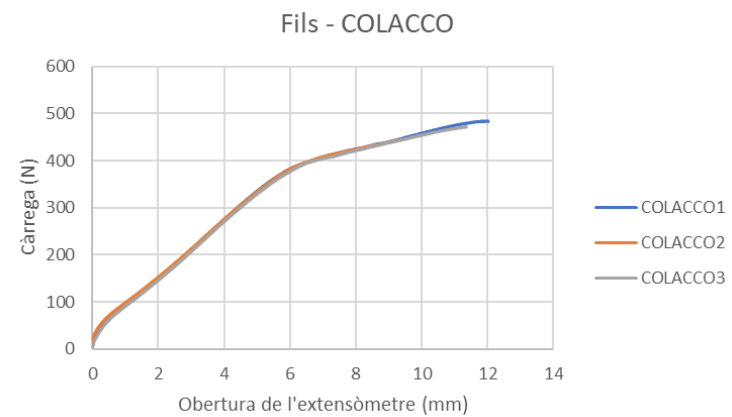


Figura A2.1. 6. Càrrega - extensòmetre de COLACCO

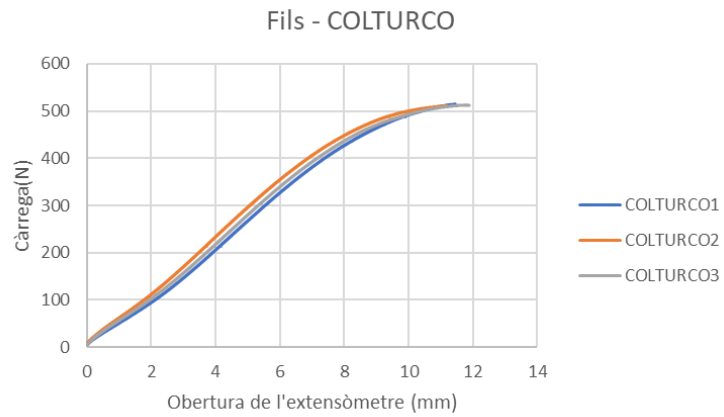


Figura A2.1. 7. Càrrega - extensòmetre de COLTURCO

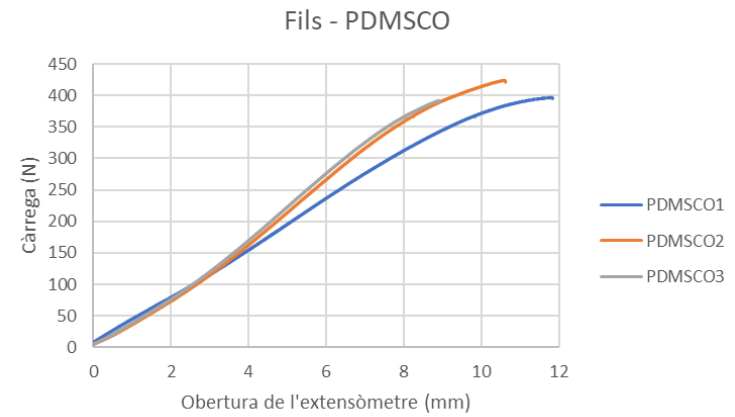


Figura A2.1. 8. Càrrega - extensòmetre de PDMSCO

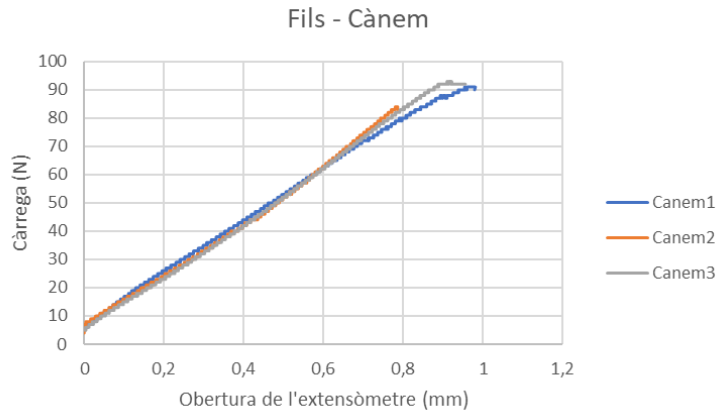


Figura A2.1. 9. Càrrega - extensòmetre del fil de cànem

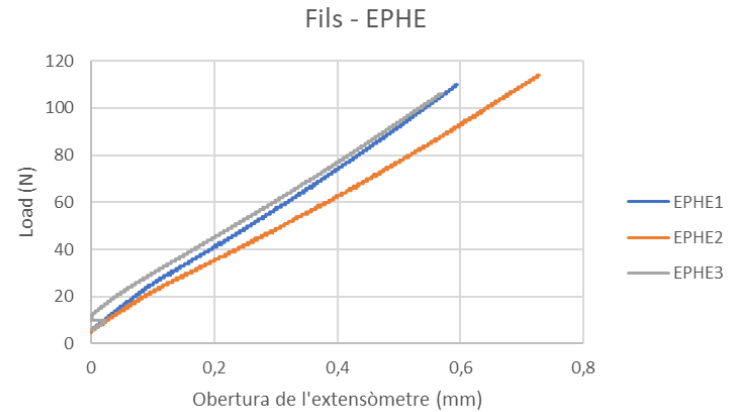


Figura A2.1. 10. Càrrega - extensòmetre de EPHE

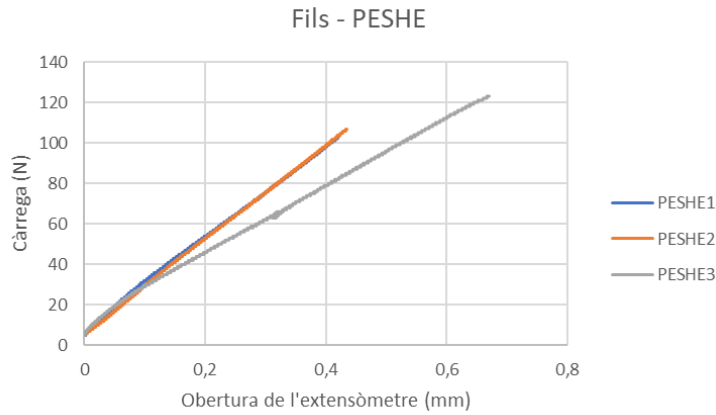


Figura A2.1. 11. Càrrega - extensòmetre de PESHE

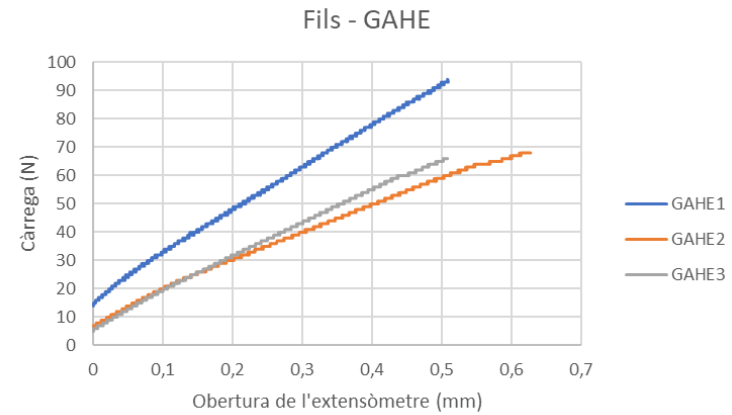


Figura A2.1. 12. Càrrega - extensòmetre de GAHE

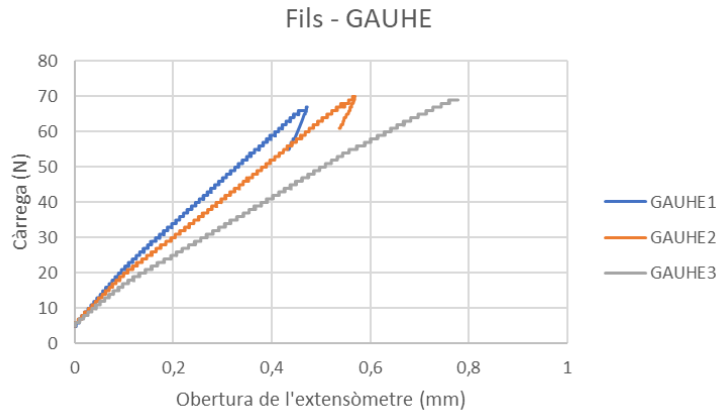


Figura A2.1. 13. Càrrega - extensòmetre de GAUHE

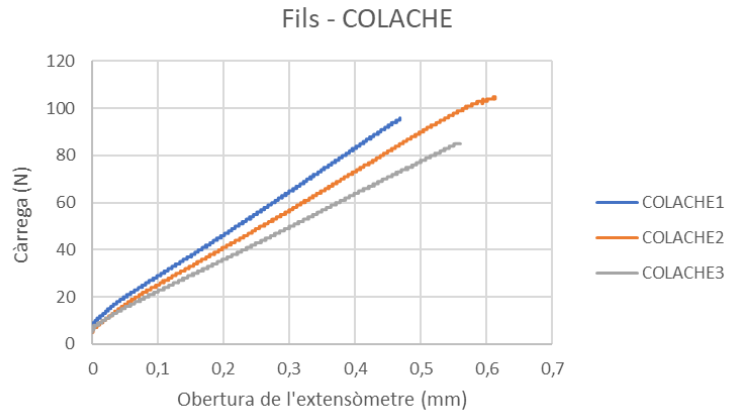


Figura A2.1. 14. Càrrega - extensòmetre de COLACHE

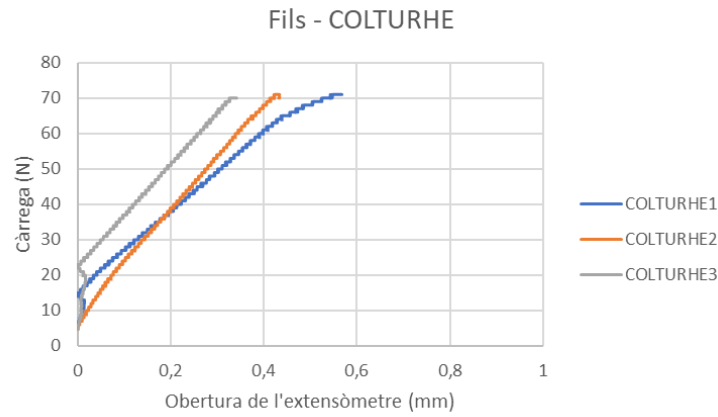


Figura A2.1. 15. Càrrega - extensòmetre de COLTURHE

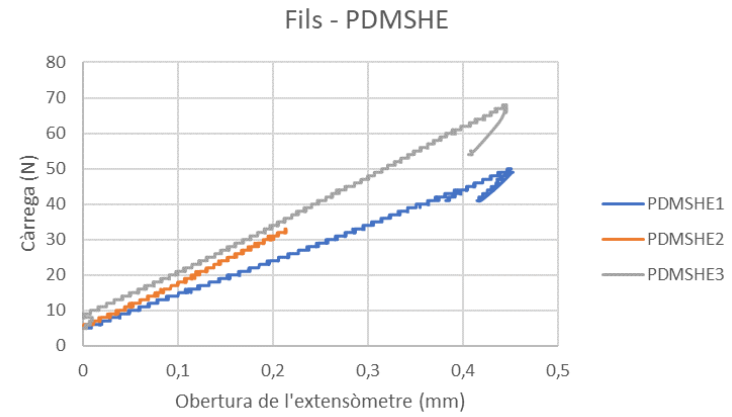


Figura A2.1. 16. Càrrega - extensòmetre de PDMSHE

## A2.2. Assaig de tracció de malles

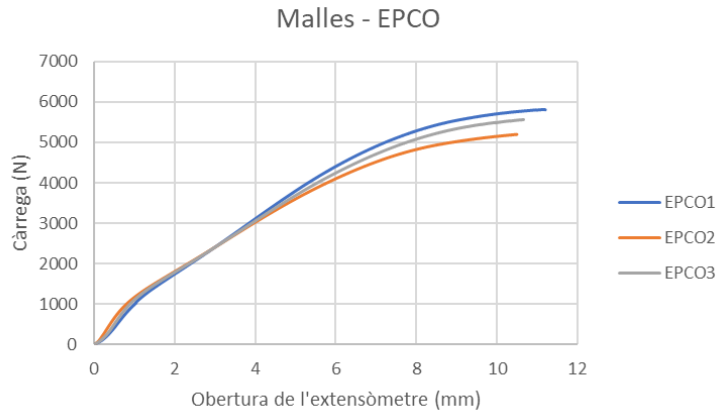


Figura A2.2. 1. Càrrega - extensòmetre de la malla EPCO

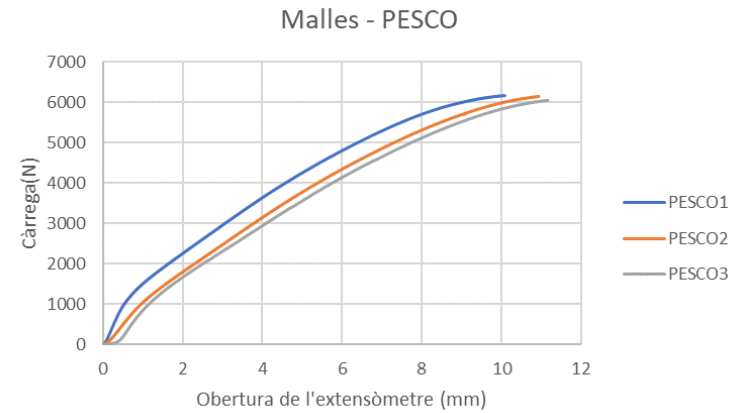


Figura A2.2. 2. Càrrega - extensòmetre de la malla PESCO

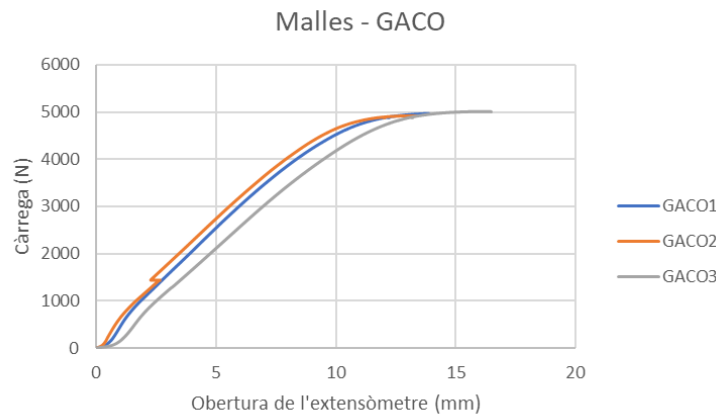


Figura A2.2. 3. Càrrega - extensòmetre de la malla GACO

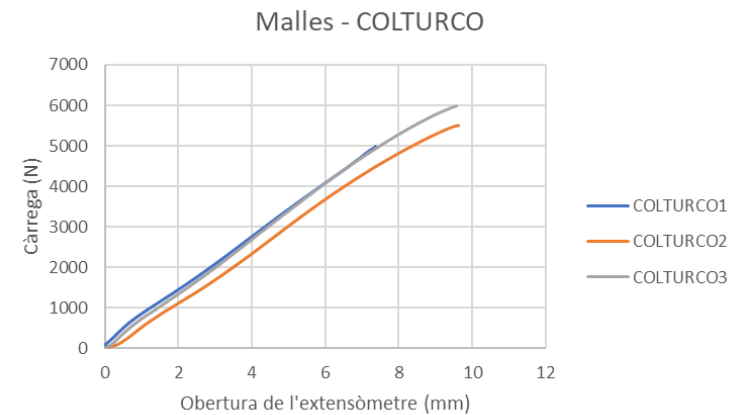


Figura A2.2. 4. Càrrega - extensòmetre de la malla COLTURCO



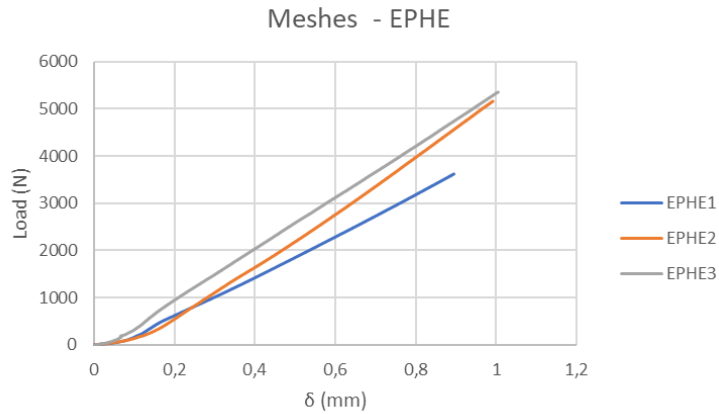


Figura A2.2. 5. Càrrega - extensòmetre de la malla EPHE

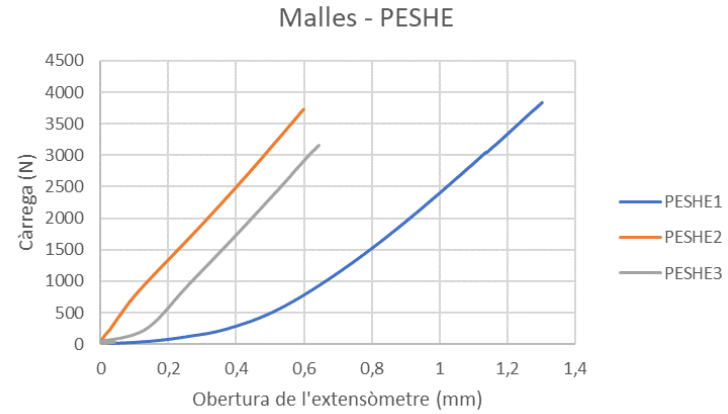


Figura A2.2. 6. Càrrega - extensòmetre de la malla PESHE

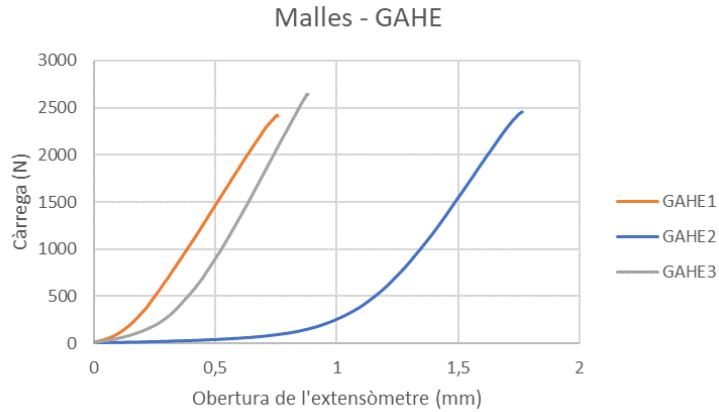


Figura A2.2. 7. Càrrega - extensòmetre de la malla GAHE

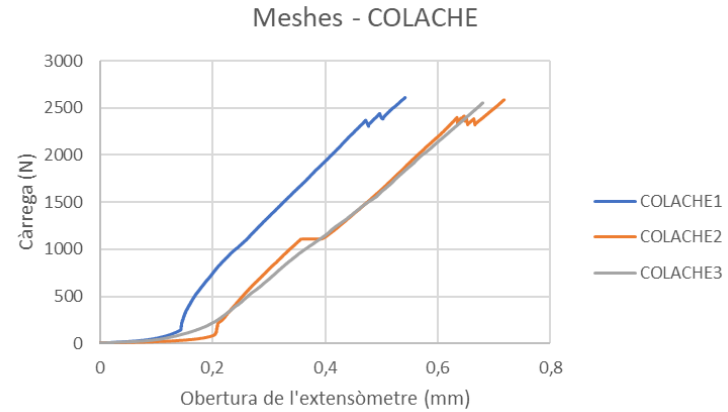


Figura A2.2. 8. Càrrega - extensòmetre de la malla COLACHE

A2.3. Assaig de tracció de FRCM

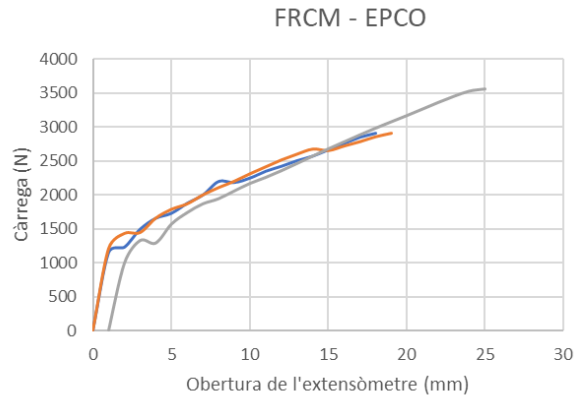


Figura A2.3. 1. Càrrega - extensòmetre del FRCM EPCO

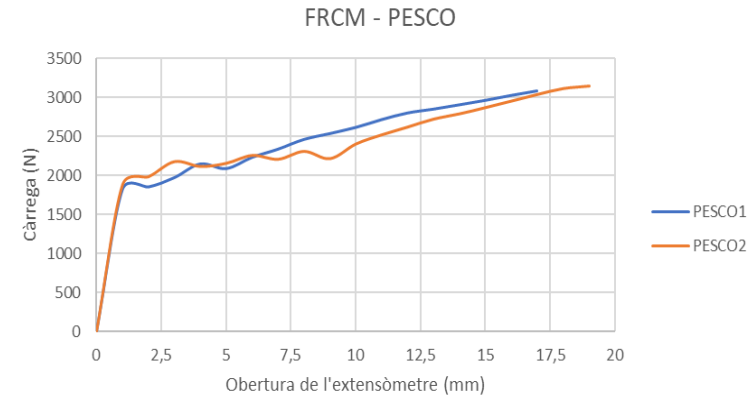


Figura A2.3. 2. Càrrega - extensòmetre del FRCM PESCO

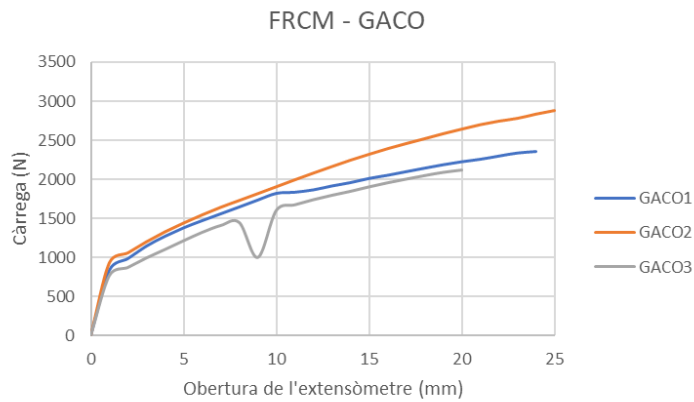


Figura A2.3. 3. Càrrega - extensòmetre del FRCM GACO

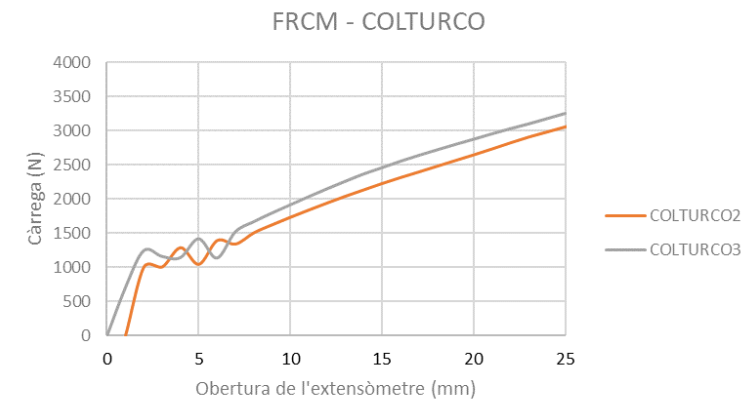


Figura A2.3. 4. Càrrega - extensòmetre del FRCM COLTURCO

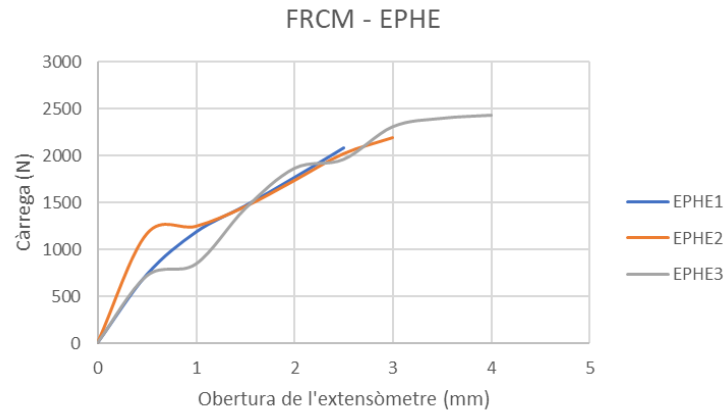


Figura A2.3. 5. Càrrega - extensòmetre del FRCM EPHE

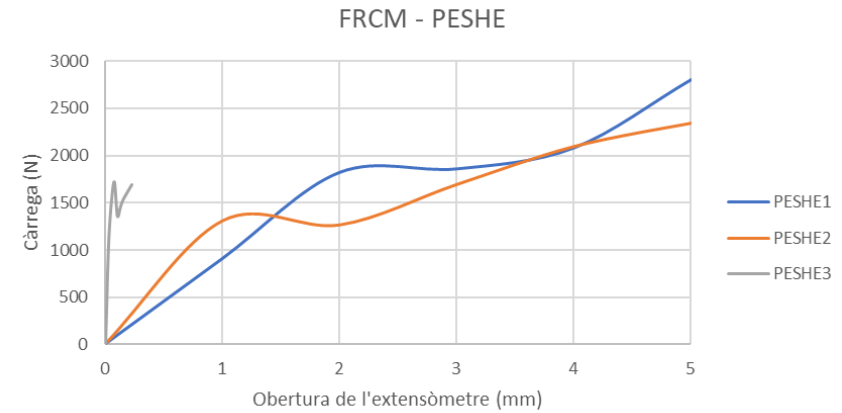


Figura A2.3. 6. Càrrega - extensòmetre del FRCM PESHE

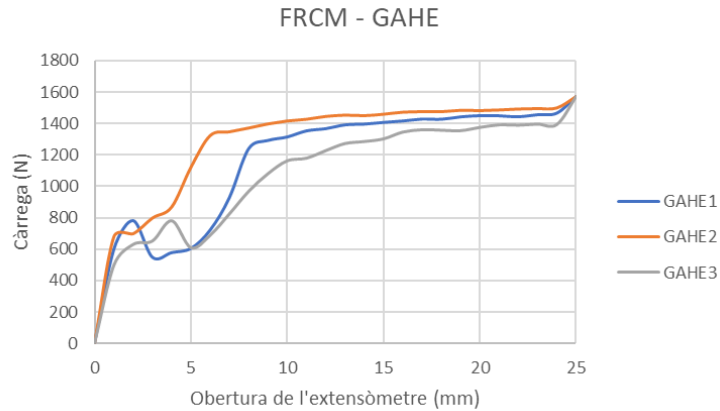


Figura A2.3. 7. Càrrega - extensòmetre del FRCM GAHE

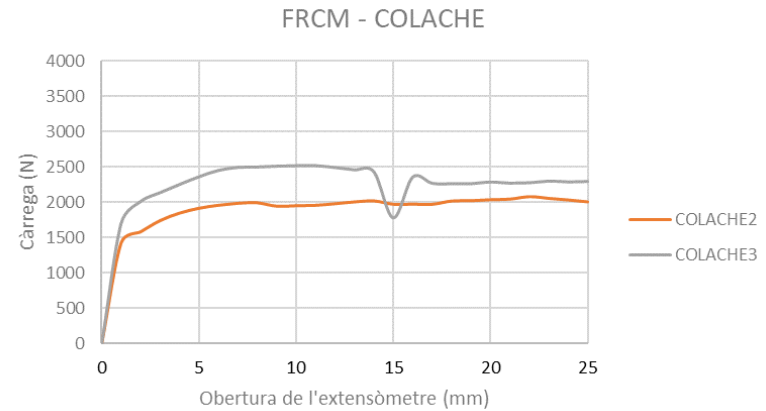


Figura A2.3. 8. Càrrega - extensòmetre del FRCM COLACHE

## A2.4. Assaig de flexió

### A2.4.1. Condicions de l'assaig cíclic

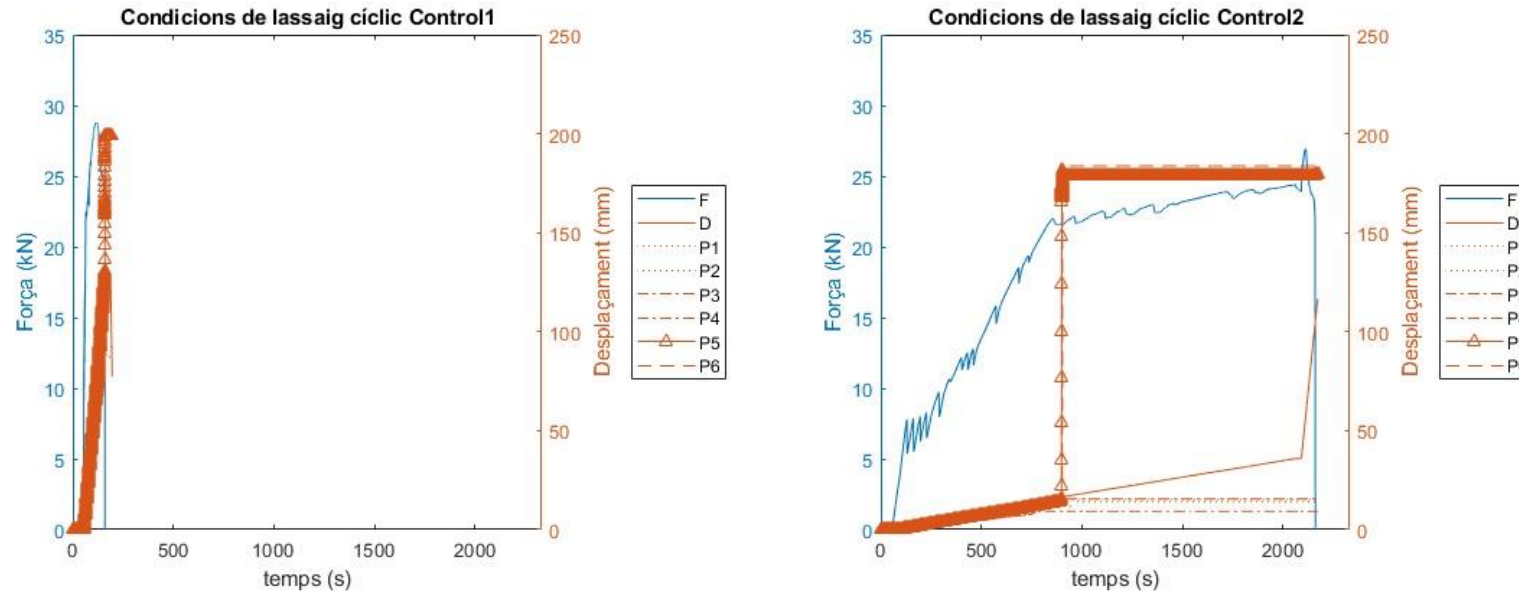


Figura A2.4. 1. Aplicació de la càrrega de flexió estàtica a les bigues de control

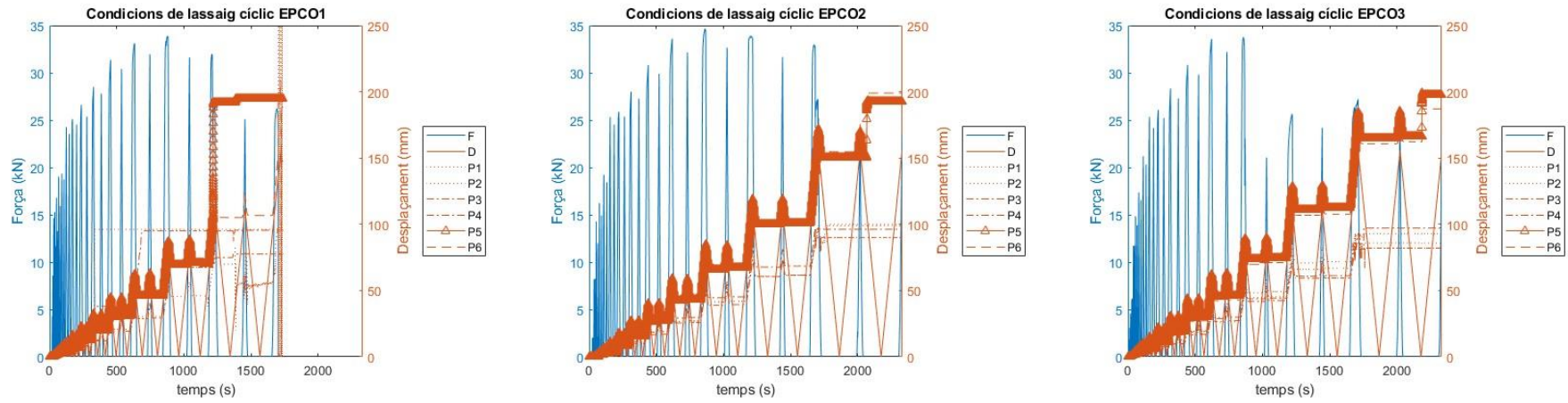


Figura A2.4. 2. Aplicació de la càrrega de flexió cíclica a les bigues reforçades amb EPCO

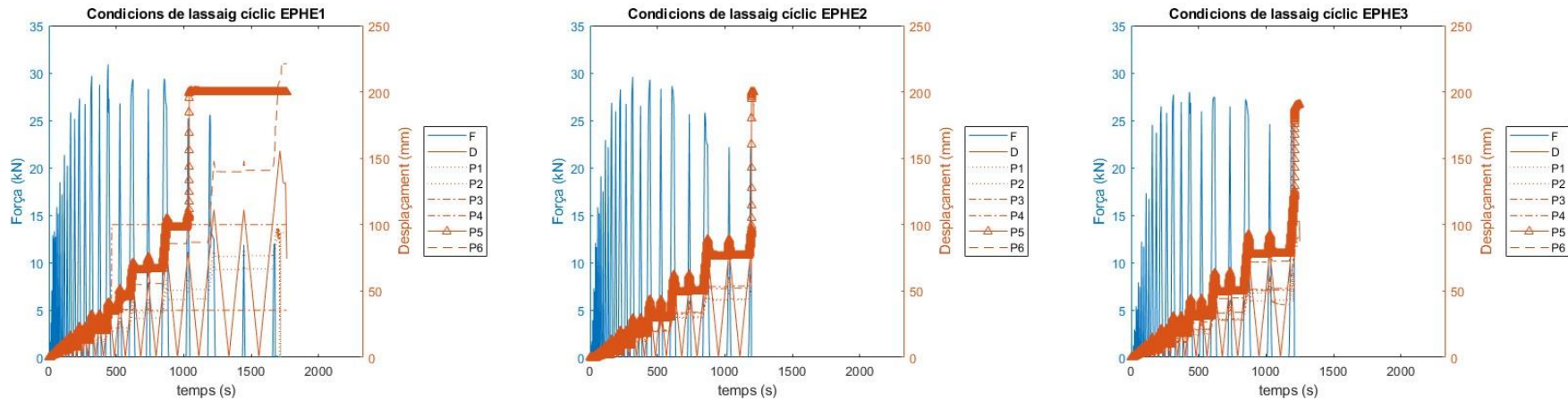


Figura A2.4. 3. Aplicació de la càrrega de flexió cíclica a les bigues reforçades amb EPHE

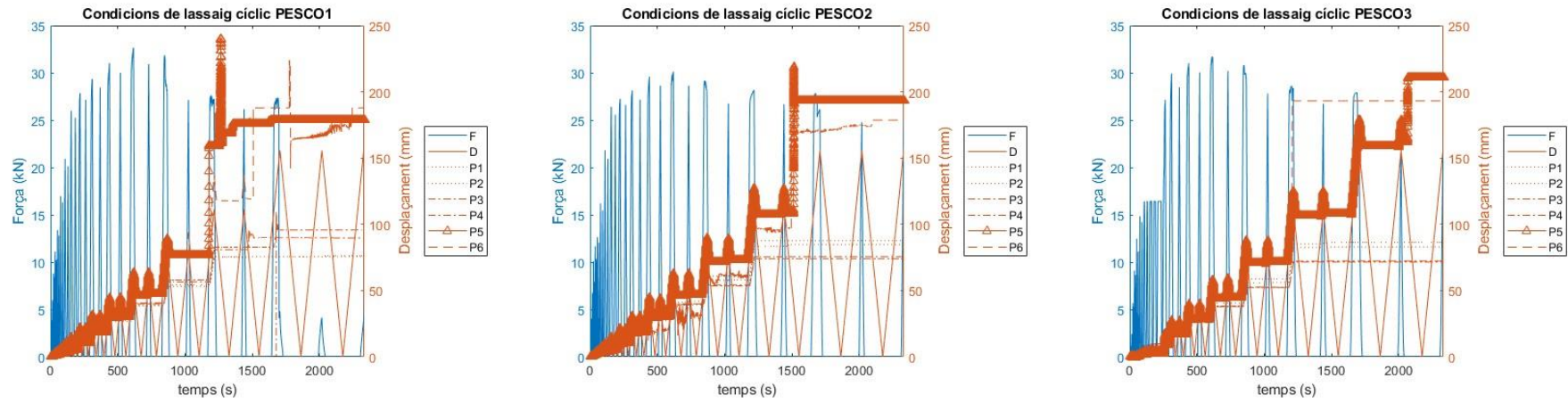


Figura A2.4. 4. Aplicació de la càrrega de flexió cíclica a les bigues reforçades amb PESCO

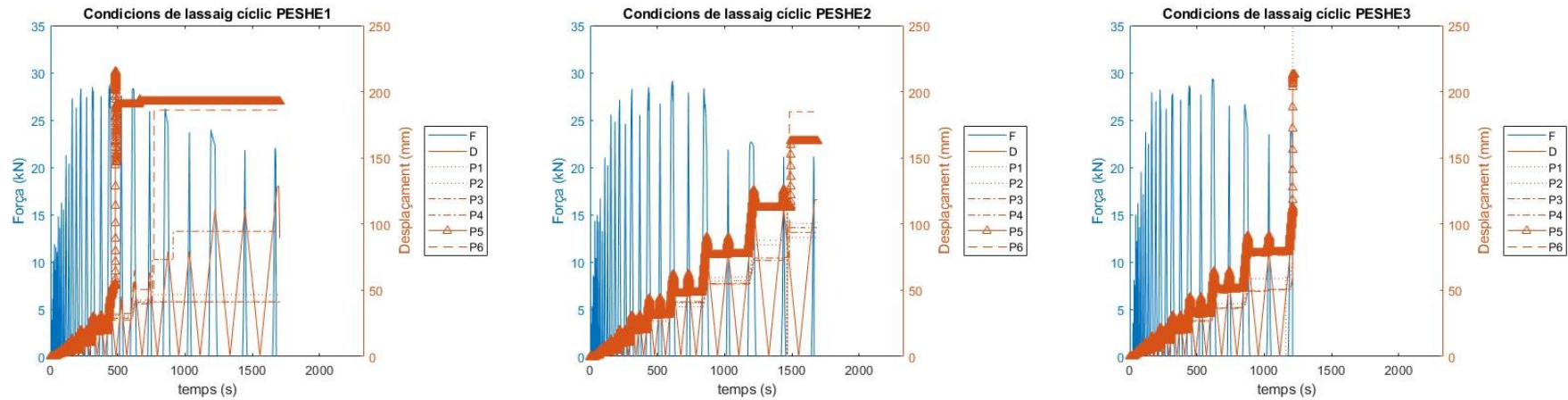


Figura A2.4. 5. Aplicació de la càrrega de flexió cíclica a les bigues reforçades amb PESHE

A2.4.2. Gràfics moment – desplaçament de l'actuador

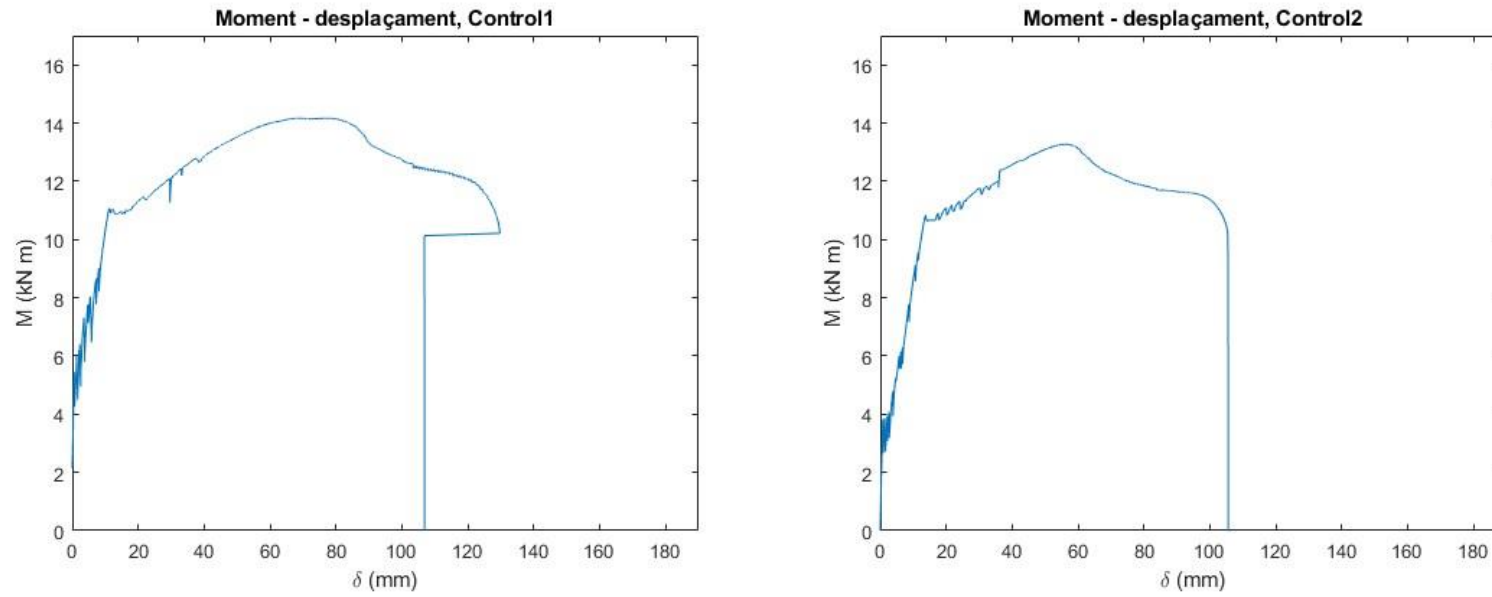


Figura A2.4. 6. Corba moment - desplaçament de l'actuador de les bigues de control

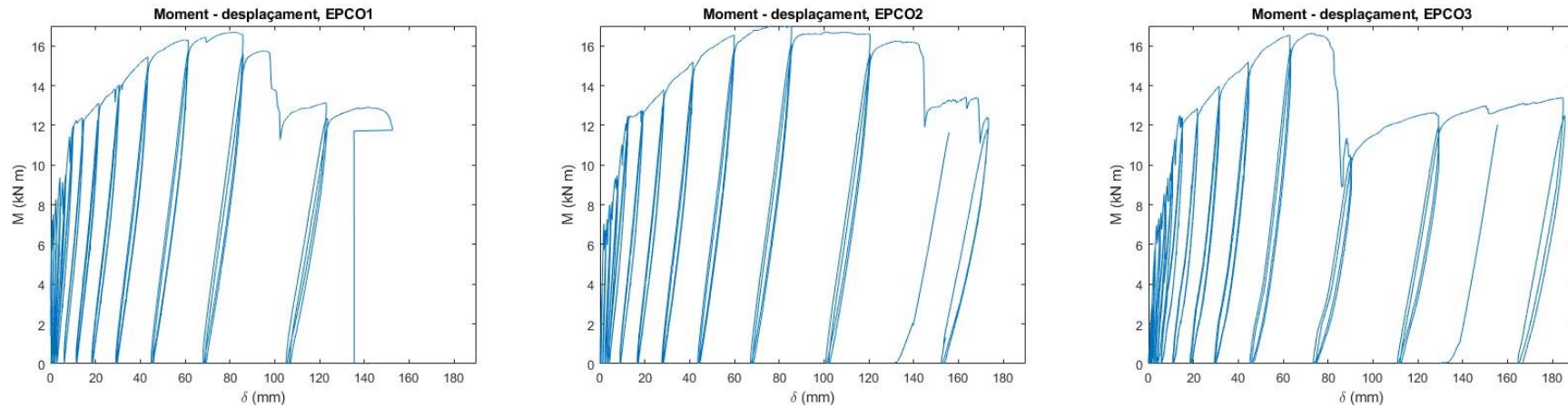


Figura A2.4. 7. Corba moment - desplaçament de l'actuador de les bigues reforçades amb EPCO

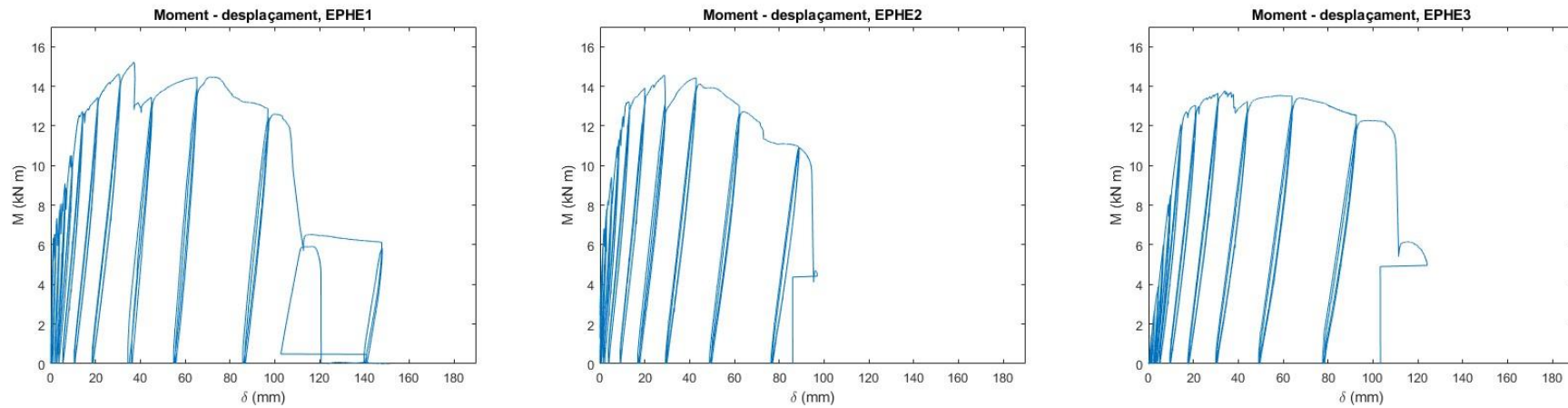


Figura A2.4. 8. Corba moment - desplaçament de l'actuador de les bigues reforçades amb EPHE



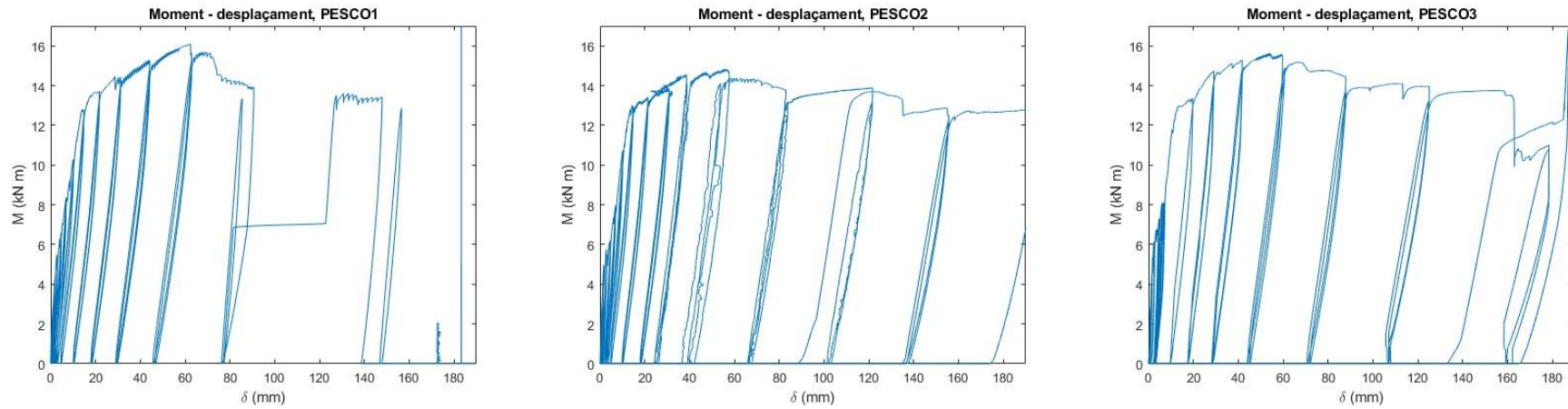


Figura A2.4. 9. Corba moment - desplaçament de l'actuador de les bigues reforçades amb PESCO

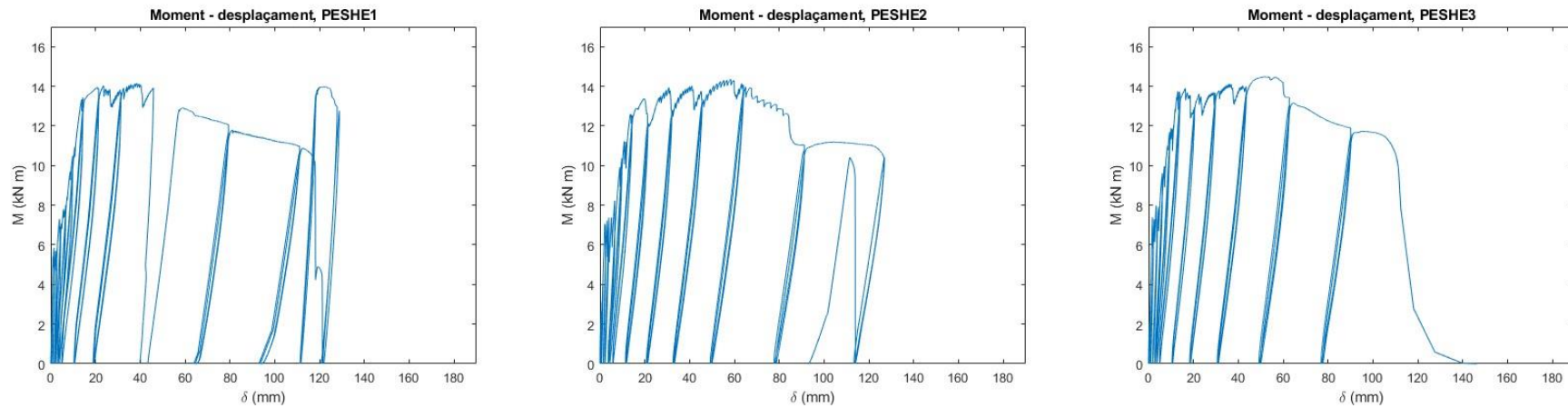


Figura A2.4. 10. Corba moment - desplaçament de l'actuador de les bigues reforçades amb PESHE