



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

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

Treball final de grau

Estudi experimental de l'adherència fibra-matriu en compostos Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM)

Autor: Gerard Solé Jardí

Director: Ernest Bernat Masó

Col·laborador: Luis Mercedes

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Juny 2019

Agraïments

A Ernest Bernat per la seva tutoria i dedicació

A Luis Mercedes per la seva predisposició en ajudar-nos en tot moment

A Enrique Hurtán per les bones estones passades al laboratori

Finalment, a la meva família

Índex de continguts

Capítol 1. Introducció i objectius	6
1.1. Introducció.....	6
1.2. Objectius.....	6
Capítol 2. Estat de l'art	8
2.1. Descripció del FRCM	8
2.2. Antecedents històrics	9
2.3. Informació d'altres estudis	10
2.4. Diferents tipus d'assajos en l'estudi de l'adherència del FRCM.....	11
Capítol 3. Descripció dels materials i propietats.....	14
3.1. Fibres	14
3.2. Morter.....	21
3.3. Adhesiu	22
Capítol 4. Fabricació de les provetes	24
4.1. Mètode d'assaig dissenyat en el nostre estudi	24
4.2. Avaluació de riscos	24
4.3. Preparació de les fibres	25
4.4. Fabricació dels motlles	26
4.5. Preparació del morter	28
4.6. Fabricació de les provetes	30
4.7. Preparacions prèvies als assajos.....	33
Capítol 5. Experiment.....	38
5.1. Introducció.....	38
5.2. Mètode Clevis	39
5.3. Guia de realització de l'assaig.....	40
5.4. Captació de dades.....	45

Capítol 6. Resultats i anàlisis	48
6.1. Provetes de fibres de vidre	50
6.2. Provetes de fibres de carboni	51
6.3. Provetes de fibres de basalt	52
6.4. Provetes de fibres de PBO	54
6.5. Anàlisis	55
Capítol 7. Impacte mediambiental	62
Capítol 8. Pressupostos	63
Capítol 9. Conclusions	64
Capítol 10. Referències.....	66

Índex de figures

Figura 1. Gràfica comparativa Tensió-Deformació de diferents tipus de materials utilitzats en reforços per al morter [2]	8
Figura 2. Gràfica del comportament general d'un compost FRCM [1].....	9
Figura 3. Assaig d'adherència One shear bond test [8]	12
Figura 4. Assaig d'adherència Double shear bond test [5]	12
Figura 5. Dimensionat malla de fibra de vidre [2]	15
Figura 6. Malla de fibra de vidre	15
Figura 7. Dimensionat malla de fibra de basalt [2].....	16
Figura 8. Fibra de basalt ja tallada	17
Figura 9. Dimensionat de la malla de fibra de carboni [2].....	18
Figura 10. Malla de fibra de carboni	18
Figura 11. Dimensionat malla de fibra de PBO[2]	20
Figura 12. Malla de fibra de PBO	20
Figura 13. Fotografies detall del sac de morter Sika Monotop-612	22
Figura 14. Propietats de l'adhesiu Loctite EA 3425 en funció del temps i temperatura de cura[18].....	23
Figura 15. Loctite EA 3425 + embocadura mescladora	23
Figura 16. Tall de malla de fibra de vidre.....	25
Figura 17. Tall de malla de fibra de carboni.....	25
Figura 18. Tall de malla de fibra de basalt	26
Figura 19. Tall de malla de fibra de PBO	26
Figura 20. Fusta base de conglomerat del motlle de fabricació.....	27
Figura 21. Motlle de fabricació	27
Figura 22. Aplicació de vaselina al motlle	28
Figura 23. (a) Estris utilitzats en la mesura del morter. (b) Procediment de mesura del morter	29
Figura 24. Mescla del morter amb la màquina mescladora	29
Figura 25. Model 3D general del tipus de proveta utilitzat	30
Figura 26. Estri utilitzat en la distribució del morter al llarg del motlle	31
Figura 27. Procés intermedi de fabricació de les provetes.....	31

Figura 28. Procés d'allisat superficial de les provetes al motlle	32
Figura 29. Procés de desencoframent del motlle	33
Figura 30. Exemple de proveta allisada	34
Figura 31. Pistola utilitzada en l'aplicació del adhesiu epoxi.....	34
Figura 32. Motlle d'adhesió de les platines a la superfície de les provetes	35
Figura 33. Exemple d'aplicació de l'adhesiu a la platina.....	36
Figura 34. Exemple de provetes en el procés d'adhesió de la platina amb l'ús de pesos	36
Figura 35. Provetes llestes per l'assaig amb Mètode Clevis	37
Figura 36. Premsa utilitzada Insight 10 kN de la marca MTS.....	38
Figura 37. Esquema mètode Clevis i morfologia de les provetes [5]	39
Figura 38. Plànol bàsic de la morfologia de les provetes utilitzades en l'estudi	40
Figura 39. (a) Mètode d'ancoratge de la proveta a la premsa, (b) Proveta ja muntada	41
Figura 40. Detall imants utilitzats en l'assaig.....	42
Figura 41. (a) Detall muntatge dels perfils d'acer, (b) Detall de l'estructura anivellada	42
Figura 42. (a) Detall muntatge extensòmetre als perfils d'acer, (b) Muntatge general extensòmetre.....	43
Figura 43. Proveta muntada a punt per realitzar l'assaig.....	44
Figura 44. Captura software de la premsa.....	45
Figura 45. Gràfic Tensió-Deformació de la malla de la proveta SG5_2.	51
Figura 46. Gràfica Tensió-Deformació de la malla de fibra de carboni de la proveta SCb5_2	52
Figura 47. Gràfica Tensió-Deformació de la malla de fibra de basalt de la proveta SB10_1	53
Figura 48. Gràfica Tensió-Deformació de la malla de fibra de Pbo de la proveta SPbo5_3	54
Figura 49. Gràfica Tensió-Deformació de la malla de fibra de Pbo de la proveta SPbo5_1	55
Figura 50. Gràfic comparatiu de la tensió màx. ruptura de les fibres	55
Figura 51. Gràfic comparatiu de la tensió tangencial de les fibres	58

Figura 52. Gràfic comparatiu dels Mòduls de Young de les fibres59
 Figura 53. Gràfic comparatiu dels Mòduls de Young del morter60
 Figura 54. Gràfic comparatiu de la deformació última de les fibres61

Índex de taules

Taula 1. Propietats de la malla de fibra de vidre utilitzada en l'estudi[13]14
 Taula 2. Propietats de la malla de fibra de basalt utilitzada en l'estudi[14]16
 Taula 3. Propietats de la malla de fibra de carboni utilitzada en l'estudi[16]17
 Taula 4. Propietats de la malla de fibra de PBO[15]19
 Taula 5. Propietats del morter Sika Monotop 612[17]21
 Taula 6. Propietats de l'adhesiu Loctite EA 3425[18]23
 Taula 7. Proporcions d'aigua en la mescla del morter28
 Taula 8. Taula recull de dades durant l'assaig47
 Taula 9. Taula resultats provetes SG50
 Taula 10. Taula resultats provetes SCb52
 Taula 11. Taula resultats provetes SB53
 Taula 12. Taula resultats provetes SPbo54
 Taula 13. Taula pressupostos instrumentació63
 Taula 14. Taula pressupostos general63

Capítol 1. Introducció i objectius

1.1. Introducció

Actualment, el material més utilitzat en el sector de la construcció és el formigó armat. Fet conegut són les bones propietats d'aquest material a compressió que li dona el formigó sumades amb la resistència a tracció de l'acer. Tot i això, aquest material es veu afectat al pas del temps i als efectes meteorològics entre d'altres, fet que les prestacions van disminuint progressivament fins a un punt on es posa en risc la seguretat estructural de l'edifici.

El *Fabric-Reinforced Cementitious Matrix* (d'ara en endavant FRCM) és un material innovador que combina fibres vegetals o sintètiques amb el morter per tal de millorar estructures, i oferir una recuperació important de les prestacions en estructures danyades. Tot i això, és un material que encara està en procés d'estudi i desenvolupament. Part d'aquest estudi és el que tractarem en aquest treball. On, estudiarem el comportament de quatre tipus de fibres sintètiques assajades a tracció per tal de determinar l'adherència de la fibra al morter.

1.2. Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball és estudiar l'adherència fibra-matriu del material compost FRCM i finalment poder determinar l'adherència, dels diferents tipus de fibres sintètiques estudiats en aquesta campanya experimental.

Per tal d'assolir aquest objectiu general, es plantegen els següents objectius parcials:

- Dissenyar una campanya experimental.
- Dissenyar les provetes per tal de que siguin eficients per a determinar les diferents variables a estudiar.
- Executar els assajos i realitzar un anàlisi crític que tingui implicacions pràctiques.
- Analitzar la influència de la longitud d'ancoratge amb l'adherència del compost FRCM, així com analitzar quins factors poden influir en aquesta adherència.
- Determinar un paràmetre que pugui ser indicatiu de l'adherència fibra-matriu en compostos FRCM.



- Estudiar les variabilitats que pugui presentar el morter en variar la longitud d'ancoratge

Capítol 2. Estat de l'art

2.1. Descripció del FRCM

El FRCM és un material compost de matriu cementítica i teixits de fibres tèxtils sintètiques o bé vegetals. Per això, podem dir que actua com un símil del formigó armat (la matriu ens aporta resistència a la compressió i el reforç ens aporta resistència a la tracció) però amb diferències clares. La principal diferència és que el cost de grans estructures amb FRCM és molt elevat degut al cost de les fibres sintètiques.

Per tant, s'ha dissenyat bàsicament com a reforç exterior en estructures danyades per tal d'augmentar la resistència a tracció. A això, li sumem que les fibres ens donen més variabilitat en la generació de perfils més adaptatius a l'estructura que es vol reforçar. A més a més, aquest material compost ens aporta altres avantatges com ara, la millor resistència al foc que alternatives de reforç com l'FRP.

Les fibres utilitzades en aquests tipus de reforç poden ser sintètiques, polimèriques o bé vegetals, entre d'altres. El que podem esperar dels diferents tipus de fibra és que el seu comportament és lineal fins a ruptura.

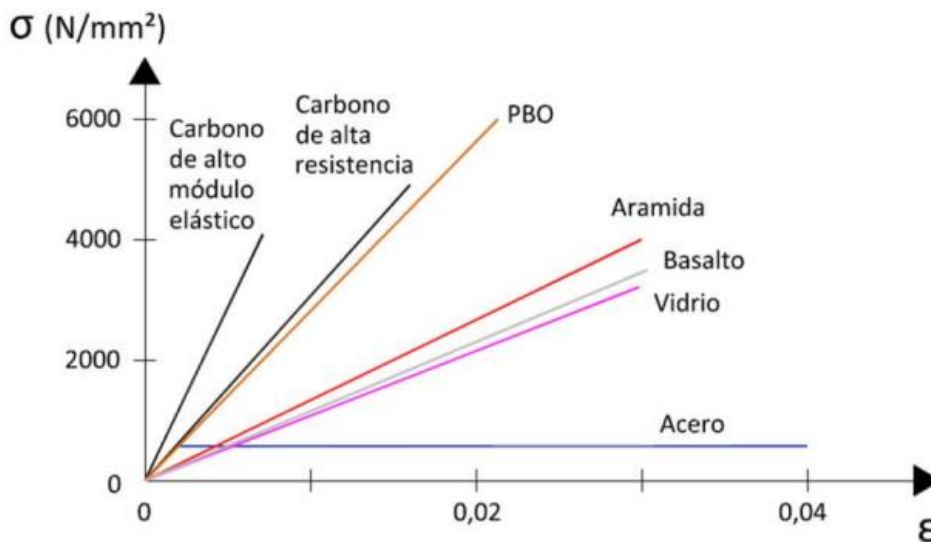


Figura 1. Gràfica comparativa Tensió-Deformació de diferents tipus de materials utilitzats en reforços per al morter [2]

Val a dir, que el morter que s'utilitza en aquest tipus de material és un morter de base cementítica, amb una mida d'àrid recomanada de 2mm. Això ens permet obtenir una millor adherència a la fibra amb la que l'estem reforçant. Sabem doncs que la fibra de reforç ens proporciona un increment a la resistència a tracció tal i com l'acer fa amb el formigó. Així doncs el morter ens donarà la resistència a compressió característica.

Sabem que el FRCM presenta el següent comportament a tracció [1]:

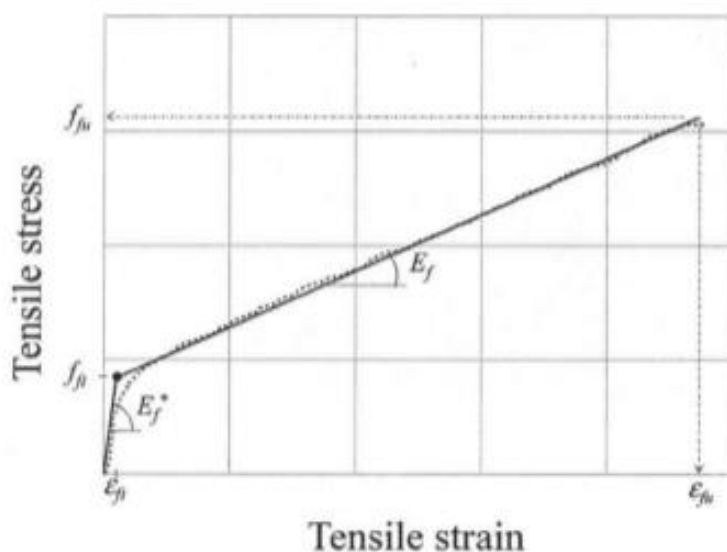


Figura 2. Gràfica del comportament general d'un compost FRCM [1]

En aquesta gràfica del comportament general del FRCM es veuen clarament dos trams diferenciats. El primer tram és característic del morter fins a la primera ruptura i el segon tram és característic de la linealitat comentada anteriorment de la fibra de reforç. Tot i això, sabem que a la realitat això pot variar per múltiples factors.

2.2. Antecedents històrics

Els materials compostos s'han utilitzat al llarg de la història ja que ens ofereixen bones propietats de cadascun dels materials.

Fent una visió global al llarg de la història, podem dir que un símil d'aquest material s'ha utilitzat durant segles.

Si mirem enrere o, fins i tot actualment a països subdesenvolupats podem trobar construccions fetes amb fang i palla. Aquest tipus de construccions serien, *grosso*

modo un símil d'una matriu cementítica amb fibra tèxtil. Aquestes estructures en llocs on els fenòmens meteorològics no són molt desfavorables poden resistir molt temps.

Tot i això, no es fins el 1980 quan s'inicien les investigacions sobre el FRCM. Començat el nou segle, l'interès sobre el FRCM segueix en augment. Val a dir que encara no és un material optimitzat i tot i que hi ha molts estudis sobre aquest camp, no està estandarditzat. Per això, es realitza aquest tipus d'estudi, per tal de determinar el problema que es suposa entre l'adherència de la matriu i el reforç, juntament amb una sèrie de diferents estudis que s'han anat realitzant a la UPC darrerament.

Referent a la normativa establerta en l'estandardització, val a dir que des de fa aproximadament uns 6 anys, no es disposava d'una normativa específica pel disseny d'elements amb FRCM. Això, feia de l'estudi una tasca complicada degut a les diferents possibilitats i interpretacions.

L'any 2013 es va redactar la primera guia de disseny i construcció amb l'ús del material compost FRCM. [1]

2.3. Informació d'altres estudis

En aquest apartat tractarem la informació extreta d'altres estudis i campanyes experimentals la qual s'ha utilitzat en aquest estudi per dissenyar la campanya experimental.

Per tal de dissenyar l'experiment i la fabricació de les provetes, s'han utilitzat procediments i configuracions extretes d'investigacions anteriors. Tot i que el disseny de les provetes tal com s'han fabricat en aquest treball per tal d'estudiar l'adherència fibra-matriu, ha estat un disseny nou. Ja que s'ha incorporat la variant de descobrir la part central de la proveta deixant sol la fibra sense morter.

En estudis anteriors es van determinar tant la velocitat d'assaig, com el mètode d'assaig que s'utilitzarien.

Pel que fa la velocitat d'assaig, estudis passats com l'estudi sobre la relació entre la velocitat d'assaig i les característiques mecàniques del FRCM realitzat per Rosell, Albert [6], van ajudar a escollir la velocitat d'assaig. La velocitat d'assaig escollida en el nostre estudi és de 5mm/min. Això, ens garanteix una bona representació de les

proprietats del FRCM ja que 5 mm/min és una bona velocitat que no influeix en les característiques del mecàniques i és prou ràpida per a que els assajos es puguin realitzar de forma dinàmica.

Pel que fa el mètode d'assaig, es tracta del mètode Clevis. Això va ser determinat per estudis com el de Arboleda, Diana [3], en el qual es va comparar el mètode Clevis amb el sistema de mordaces. El problema amb el sistema de mordaces és que no permet el lliscament de la fibra amb la matriu ja que queda tot pinçat de manera que no és útil per assajar l'adherència on es trobarien resultats poc fiables. Per tant, es va escollir el mètode Clevis.

El mètode Clevis és un sistema d'assaig de provetes a tracció, en el qual s'adhereixen dues platines per banda de la proveta. El fet és que al assajar-les a tracció, la màquina estirà de la platina de manera la platina transferirà els esforços al morter de manera uniforme. A més a més, com que el morter està lligat a la malla de reforç, aquest transferirà els esforços a la malla; sempre i quant la malla no llisqui al llarg del morter.

Amb l'ús d'aquest mètode, no s'adulteren els resultats ja que es permet el lliure lliscament de la malla al llarg de la matriu, per tant permetrà estudiar l'adherència. Més endavant s'explicarà amb més detall el mètode, així com la guia de realització de l'assaig.

2.4. Diferents tipus d'assajos en l'estudi de l'adherència del FRCM

En aquest apartat, es tractaran alguns dels diferents tipus d'assajos que es realitzen en l'actualitat per tal d'assajar l'adherència de les fibres a la matriu de morter. En la majoria d'assajos que s'estan realitzant actualment, el material de reforç s'adhereix a una columna de maons. Això, recrea una realitat d'on es pot utilitzar aquest tipus de reforç. Tot i això, en el nostre estudi s'estudiarà purament l'adherència de les fibres a un tipus de morter de reparació estructural com és el Sika Monotop-612.

2.4.1. One shear bond test

En aquest assaig, s'utilitza una columna de maons a la qual se li adhereix el compost FRCM de reforç. El FRCM s'adhereix de manera que la part superior queda descoberta i es per on s'estirà fins a ruptura o lliscament de la pròpia, per tal de determinar si l'adherència és bona o no.

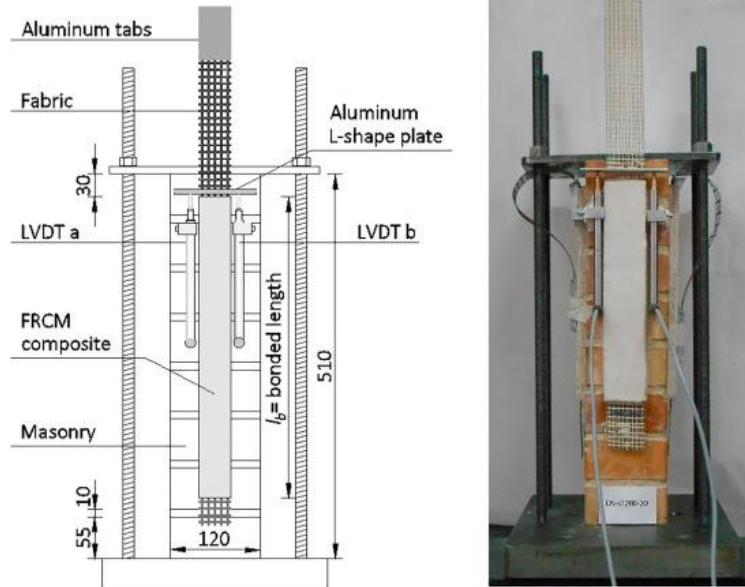


Figura 3. Assaig d'adherència One shear bond test [8]

2.4.2. Double shear bond test

Aquest tipus d'assaig és similar a l'anterior, però la diferència és que el compost FRCM està adherit als dos costats de la columna de maons. Per tant, per tal d'estirar a tracció s'utilitzarà una politja que tirarà cap a munt tal com es pot veure en la següent figura estirant la malla fins a ruptura o lliscament.

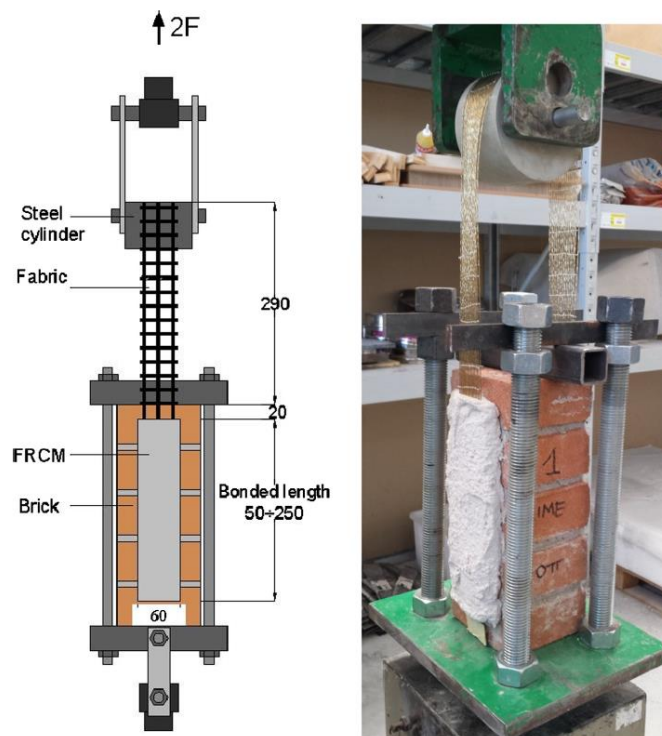


Figura 4. Assaig d'adherència Double shear bond test [5]

En aquest tipus d'assajos, del qual existeixen variacions en la forma d'estirar; la força o càrrega que aguanta la malla serà el doble que en cas anterior ja que aquí tenim la malla adherida a dues parts de la columna de maons.

Capítol 3. Descripció dels materials i propietats

3.1. Fibres

3.1.1. Fibra de vidre

Les fibres de vidre són un material format per filaments de vidre extremadament fins. Es conforma a base de formulacions de vidre o sílice extruïdes per a formar fils de diàmetre diminut per tal de ser utilitzades per a formar teixits.

En aquest estudi hem utilitzat la malla MapeGRID G220 de la marca MAPEI. La malla Mapegrid G220 és una malla de retícula quadrada, amb un contingut d'òxid de circoni d'un 17%. És una malla que pel seu particular teixit pot ser aplicada a suports de construcció ja que permet superar la carència de la resistència a tracció del morter o formigó. Fet que fa que la ruptura es transformi d'una forma fràgil a una forma més dúctil.

En la part experimental, no hi ha hagut cap complicació per tallar ni manipular la fibra de vidre ja que s'ha pogut realitzar la tasca amb tisores.

Aquesta fibra presenta les següents propietats donades pel fabricant:

Propietats	MapeGRID G220
Mòdul de Young	72 GPa
Resistència a Tracció màxima	45 kN/m
Deformació última a tracció	1,80%
Dimensió malla	25 x 25 mm
Densitat	2,5 g/cm ³
Espessor equivalent	0,035 mm
Preu	33,3 €/m ²

Taula 1. Propietats de la malla de fibra de vidre utilitzada en l'estudi[13]

En la següent figura, podem veure el dimensionat del mallat, fet que ens serà útil posteriorment per tal de calcular l'àrea. A més a més, sabem pel propi fabricant que l'espessor equivalent de la malla és de 0,035 mm.

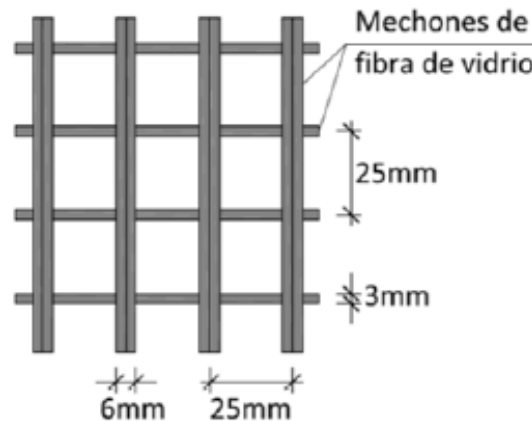


Figura 5. Dimensionat malla de fibra de vidre [2]



Figura 6. Malla de fibra de vidre

3.1.2. Fibra de basalt

La fibra de basalt és una matriu tèxtil equilibrada composta per fibres de basalt produïdes mitjançant la fusió i extrusió de roques volcàniques. Aquest procés es denomina vulcanització. El teixit es solda tèrmicament amb fils de polièsters per facilitar la fabricació de la malla. És un teixit adequat per a fer de reforç en elements de maçoneria gràcies a la seva tenacitat.

El basalt prové del ràpid refredament de la lava volcànica i està compost bàsicament per magnesi i ferro. Constitueix una de les roques més abundants a l'escorça terrestre ja que forma part de la major part dels fons oceànics.

En aquest estudi s'ha utilitzat la fibra MapeGRID B250 de la marca MAPEI. La malla en concret està formada per fibres de basalt resistents a l'alcalinitat. Gràcies al seu teixit, incrementa les característiques i la ductilitat, així com distribueix els esforços més uniformement a les estructures reforçades en treballs de maçoneria.

Treballant amb aquest tipus de fibra, s'ha observat que és un material difícil de manejar, sobretot amb les eines les quals es disposaven. Això es degut que presenta una bona resistència al cisallament i complicava la labor de tallar-la.

Aquest fet, feia que es desfilés i s'havia d'anar amb cura i paciència amb l'ajut d'un cúter, tot i que aquest fenomen ha sigut més acusat amb les fibres polimèriques de PBO que tractarem posteriorment.

Aquesta fibra presenta les següents propietats donades pel fabricant:

Propietats	MapeGRID B250
Mòdul de Young	89 GPa
Resistència a Tracció màxima	60 kN/m
Deformació última a tracció	1,80%
Dimensió malla	6 x 6 mm
Densitat	2,75 g/cm ³
Esessor equivalent	0,039 mm
Preu	25 €/m ²

Taula 2. Propietats de la malla de fibra de basalt utilitzada en l'estudi[14]

Les dimensions d'aquesta malla són les següents:

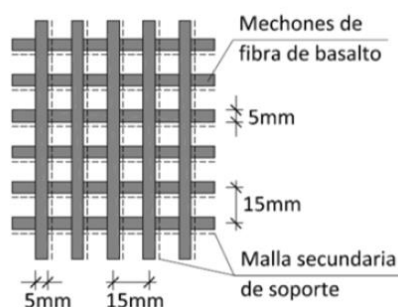


Figura 7. Dimensionat malla de fibra de basalt [2]

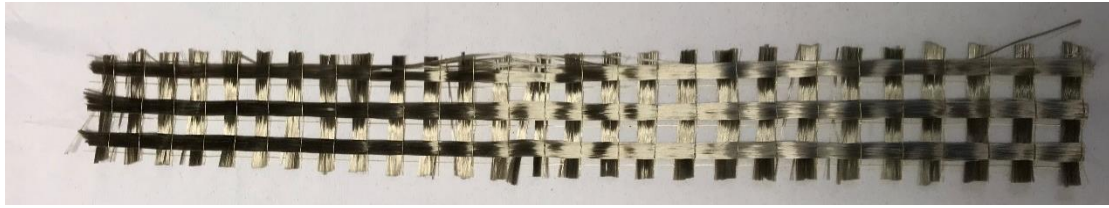


Figura 8. Fibra de basalt ja tallada

3.1.3. Fibra de carboni

La fibra de carboni és un material format per fibres de 5-10 micres de diàmetre, compost principalment per àtoms de carboni. Posteriorment, varis mils de fibres de carboni estan trenats per a formar un fil, que després pot ser utilitzar com a teixit en una tela.

En l'estudi s'ha utilitzat la malla X MESH C10 de la marca RUREDIL. És una malla dissenyada especialment per a ser utilitzada en materials FRCM per tal de reparar i enfortir construccions. És una fibra d'alta resistència, bidireccional i de pes equilibrat.

S'utilitza per incrementar la resistència a flexió i cissalladura de panells estructurals en construcció, augmentant així la seva ductilitat. També s'utilitza per millorar prestacions en zones sísmiques.

El treball amb aquest tipus de fibres no ha sigut molt complex ja que s'han pogut tallar amb facilitat amb l'ús de tisores.

Les propietats tècniques d'aquesta fibra anunciades pel fabricant són:

Propietats	Ruredil X Mesh C10
Mòdul de Young	240 GPa
Tensió de ruptura	4,8 GPa
Deformació última a tracció	1,80%
Densitat	1,82 g/cm ³
Pes de les fibres	168 g/m ²
Esessor equivalent en sec	0,047 mm
Preu	~100 €/m ²

Taula 3. Propietats de la malla de fibra de carboni utilitzada en l'estudi[16]

En la següent figura, podem veure el dimensionat del mallat, fet que ens serà útil posteriorment per tal de calcular l'àrea. A més a més, sabem pel propi fabricant que l'espessor de la malla és de 0,047 mm.

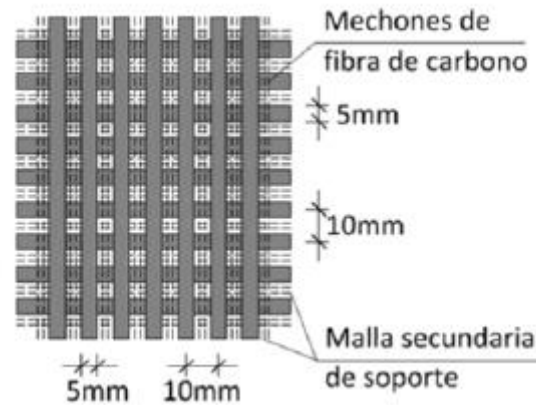


Figura 9. Dimensionat de la malla de fibra de carboni [2]

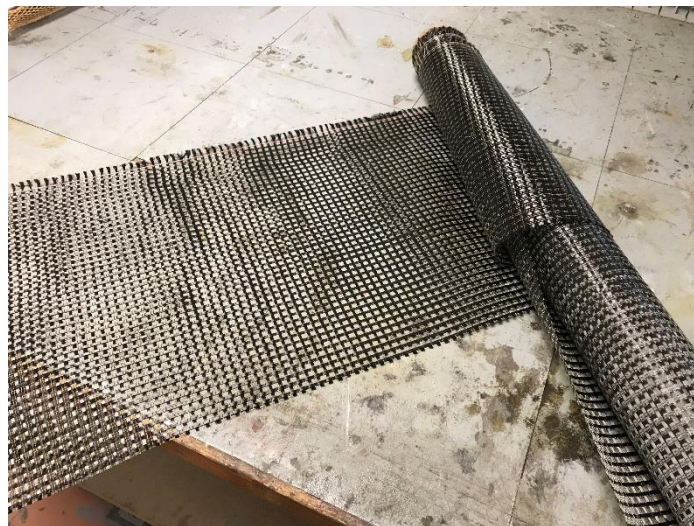


Figura 10. Malla de fibra de carboni

3.1.4. Fibra polimèrica de PBO

El polímer el qual estan formades aquestes fibres és el: *Polyparaphenylene benzobisoxazole* (PBO). El PBO és un polímer que s'utilitza per fabricar la fibra sintètica d'altres prestacions Zylon. Els fils de Zylon, tenen una resistència d'aproximadament 10 vegades l'acer i suporten temperatures de fins a 650°C. Les fibres de PBO, suporten l'impacte més bé que l'acer i el carbó fet pel qual el seu ús en la Fórmula 1 és molt comú.

La fibra de PBO utilitzada en aquest estudi, és una matriu inorgànica estabilitzada que està especialment dissenyada per aplicacions de reforç amb materials FRCM.

S'utilitza en aplicacions en les que es vol millorar:

- Reforç a la flexió
- Resistència al tall
- Confinament de columnes amb baixa excentricitat.
- Confinament i reforç de columnes d'alta excentricitat.
- Apta per treballar amb zones sísmiques.
- Molt bona en aplicacions amb altes temperatures, suporta temperatures de fins a 650°C.
- Resistent al foc.

La bobina d'aquesta malla és d'1 metre d'amplada per 15 metres de llargada. Pel que fa al ús d'aquesta malla, va ser molt complicat treballar-hi ja que presenta una gran resistència al tall. Amb l'ajut d'un cúter i paciència, es va aconseguir tallar, però tot i que es va intentar; no es va aconseguir un tall perfecte ja que les fibres es desfilaven abans de tallar-se.

Les propietats tècniques anunciades pel fabricant són:

Propietats	Ruredil X Mesh Gold
Mòdul de Young	270 GPa
Tensió de ruptura	5,8 GPa
Resistència a Tracció màxima	264 kN/m
Deformació última a tracció	2,15%
Densitat	1,56 g/cm ³
Pes de les fibres	88 g/m ²
Temperatura de fallada	650 °C
Espessor equivalent	0,0455 mm
Preu	~300 €/m ²

Taula 4. Propietats de la malla de fibra de PBO[15]

En la següent figura, podem veure el dimensionat del mallat, fet que ens serà útil posteriorment per tal de calcular l'àrea. A més a més, sabem pel propi fabricant que l'espessor de la malla és de 0,0455 mm.

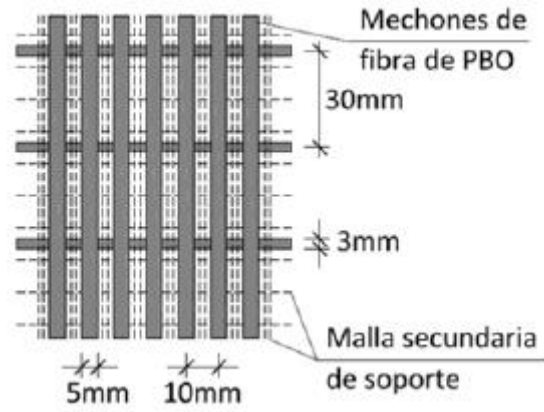


Figura 11. Dimensionat malla de fibra de PBO[2]

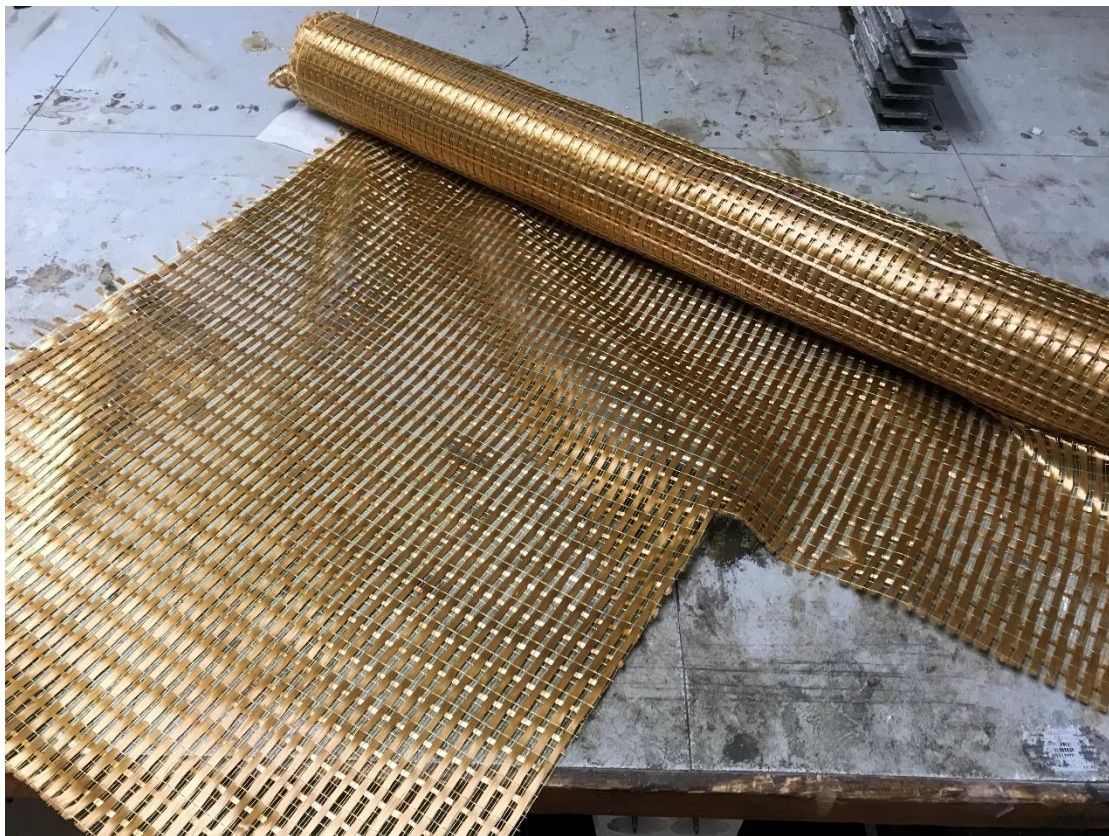


Figura 12. Malla de fibra de PBO

3.2. Morter

Els morters són un compost de conglomerats inorgànics (cement, cal, guix..), arena i aigua. A més a més, se'ls hi pot afegir diferents tipus d'additius com ara resines, fum de sílice, fibres... Els morters serveixen per unir elements de construcció tals com maons, blocs de formigó... tot i que aquesta no es la seva única aplicació ja que hi ha morters que serveixen per reparar estructures o elements. Per això, hi ha multitud de morters a escollir.

En aquest estudi, s'ha utilitzat el morter Monotop-612 de la marca Sika. Aquest, és un morter de reparació estructural d'un component, reforçat amb fibres i fum de sílice que compleix els requisits de la Clase R3 de la UNE-EN 1504-3. El Sika Monotop-612 és un morter de cement preparat, millorat amb resines sintètiques, fum de sílice i fibres de poliamida.

Com que es tracta d'un morter de reparació, s'utilitza principalment en:

- La reparació del formigó, tant en superfícies verticals com en sostres.
- Rejuntat d'elements prefabricats.
- Regularització de superfícies de formigó o morter.

Les propietats proporcionades pel fabricant es detallen a continuació:

Propietats	Sika Monotop-612
Resistència a Compresió	40,3 N/mm ²
Resistència a Tracció	8,3 N/mm ²
Adhèrencia	1,9 N/mm ²
Mòdul de Young	25,2 GPa
Resistència a Cisalla	1,8 N/mm ²
Percentatge aigua recomanat	14,5% en pes
Contingut de fibres polimèriques	8% en pes
Granulometria	≤ 2 mm
Esessor en capa	5 a 30 mm
Densitat en fresc	2,1 kg/l (a +20°C)
Classificació al foc	Euroclasse A1
Temps de curat	28 dies
Contingut ió clor	< 0,03 %
Preu (sac de 25 kg)	32,95 €

Taula 5. Propietats del morter Sika Monotop 612[17]

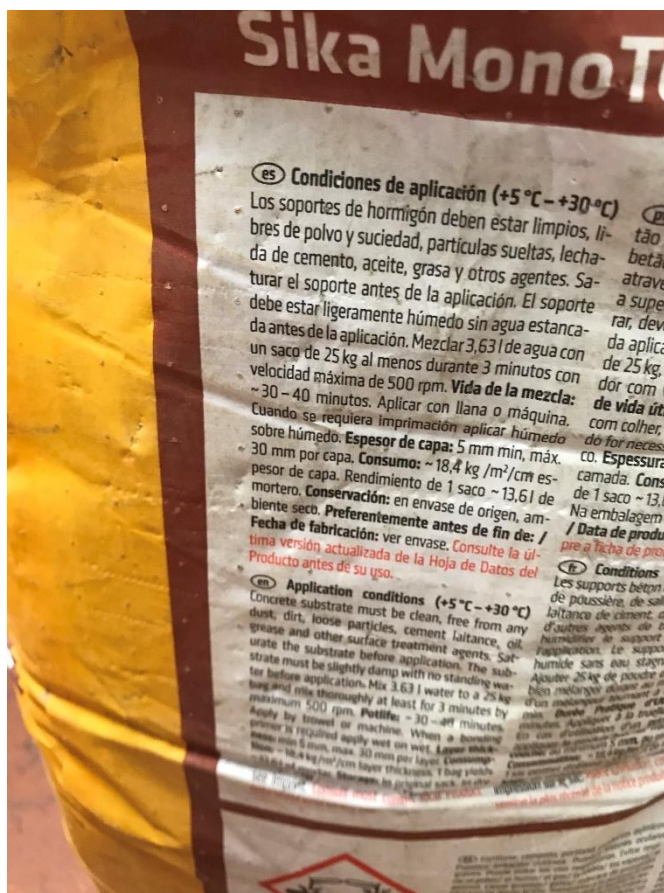
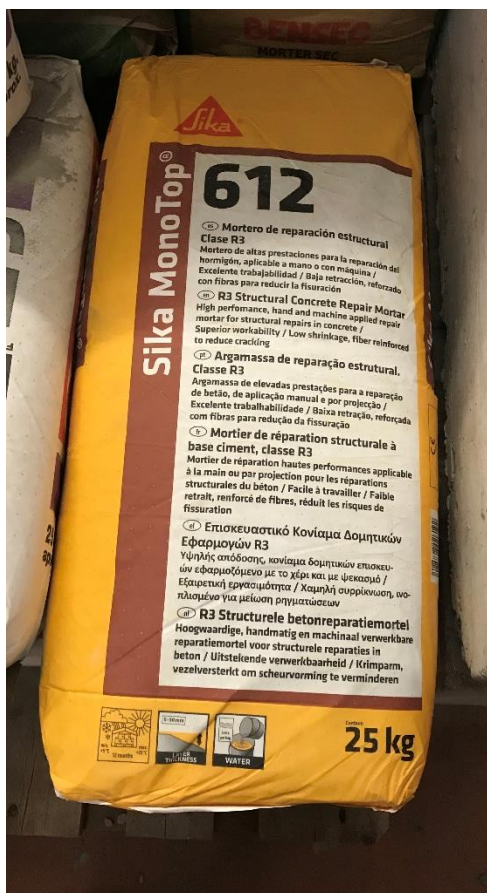


Figura 13. Fotografies detall del sac de morter Sika Monotop-612

3.3. Adhesiu

Per tal de realitzar l'assaig amb el mètode Clevis, s'ha hagut d'unir unes platines metàl·liques a la provetes. L'adhesiu que s'ha utilitzat per tal d'unir les platines a les provetes ha sigut el Loctite EA 3425 conegut com Hysol 3425 de la marca Henkel.

Es tracta d'un adhesiu epoxi estructural i bicomponent, que presenta tixotropia (la seva viscositat es redueix si es sotmet el fluid a esforços de cisalla). És un adhesiu excel·lent per la seva aplicació en metalls i grans superfícies ja que està dissenyat per ser utilitzat en vinculació estructural. Proporciona alta resistència i també bona resistència química.

El Hysol 3425 cura a temperatura ambient i el temps recomanat de cura mínim són 24h. En la següent gràfica podem veure com varia la resistència d'aquest adhesiu en funció del temps i la temperatura de cura:

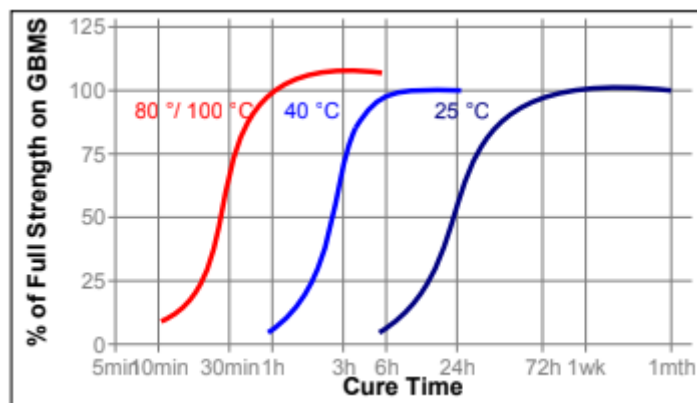


Figura 14. Propietats de l'adhesiu Loctite EA 3425 en funció del temps i temperatura de cura[18]

Les propietats d'aquest adhesiu que anuncia el fabricant són de mostres de 1.2mm d'adhesiu curades durant 7 dies a 22°C i són les següents:

Propietats	Loctite EA 3425
Mòdul de Young	1350 N/mm ²
Tensió de ruptura	27 N/mm ²
Deformació última a tracció	3,0%
Resistència a compressió	65 N/mm ²
Coefficient de conducció tèrmica	0,28 W/m·K
Duresa amb duròmetre D	70 a 80
Resistivitat elèctrica volumètrica	10 ¹⁵ Ω·cm
Preu/unitat	100 €/u

Taula 6. Propietats de l'adhesiu Loctite EA 3425[18]



Figura 15. Loctite EA 3425 + embocadura mescladora

Capítol 4. Fabricació de les provetes

En aquest apartat, es tractarà la metodologia que s'ha seguit al laboratori per tal de realitzar la fabricació de provetes.

4.1. Mètode d'assaig dissenyat en el nostre estudi

El mètode d'assaig que s'ha dissenyat en el nostre estudi es basa principalment en el mètode Clevis tal com s'ha anunciat anteriorment, i en el disseny d'unes provetes les quals en el centre no hi tenen morter. Això, s'assembla a l'assaig anterior ja que tenim una part descoberta de morter, en el qual hi queda la malla descoberta. La diferència està en que en el nostre estudi es tirarà de la proveta mitjançant les platines, mentre que en l'assaig anterior es tira de la malla amb l'ús d'una politja.

S'han dissenyat aquest tipus de provetes per tal d'estudiar la interacció del morter amb la malla de fibra. Per tant, si el fallo de la proveta és la ruptura de la malla, podem afirmar que la interacció morter-fibra serà bona. En el cas que la proveta tingui altres tipus de fallada com poden ser lliscament de les fibres, la interacció no serà bona ja que no s'aprofitaran totes les propietats de les pròpies fibres.

Finalment, en el nostre estudi es determinarà una forma quantitativa de mesurar l'adherència. Això serà possible gràcies al paràmetre estudiat de la tensió màxima tangencial. Aquesta, és la tensió que aguanta la proveta a l'esforç tangencial.

Tot i això, aquest paràmetre serà estudiat juntament amb el tipus de ruptura de la proveta i serà característica de cada tipus de proveta.

4.2. Avaluació de riscos

Els principals riscos que podem patir a l'hora de treballar al laboratori i els EPI's (Equips de Protecció Individual que utilitzarem per tal de minimitzar aquests riscos són:

- Ús de botes de seguretat amb punta de metall per evitar qualsevol caiguda d'algun estri emprat.
- A l'hora de treballar amb el morter, és important utilitzar ulleres de protecció i mascareta per evitar el contacte amb la pols de morter.

- Si utilitzem el compressor d'aire comprimit, és imprescindible l'ús d'ulleres de protecció per evitar que qualsevol partícula impacti contra els ulls.
- L'ús de guants és imprescindible en el maneig de les fibres, ja que aquestes poden deixar partícules molt molestes a la pell.
- A l'hora de mesclar el morter, realitzar assajos o utilitzar qualsevol tipus de màquina en moviment, és fonamental l'ús de guants que atorguin protecció mecànica.
- A l'hora d'utilitzar l'adhesiu epoxi o qualsevol dissolvent o producte químic és imprescindible l'ús de les ulleres de seguretat per evitar qualsevol esquitxada, així com també l'ús de mascareta per evitar el contacte amb els gasos que pugin desprendre. A més a més, també és imprescindible l'ús de guants per evitar el contacte d'aquests substàncies amb la pell.

4.3. Preparació de les fibres

El primer pas que s'ha realitzat ha sigut la preparació de les fibres. Les fibres utilitzades en l'estudi han estat: basalt, carboni, vidre i PBO. Aquestes fibres venen prefabricades enrotllades en una bobina. Per tant, la feina ha estat tallar-les a la mida desitjada de 400x50 mm.

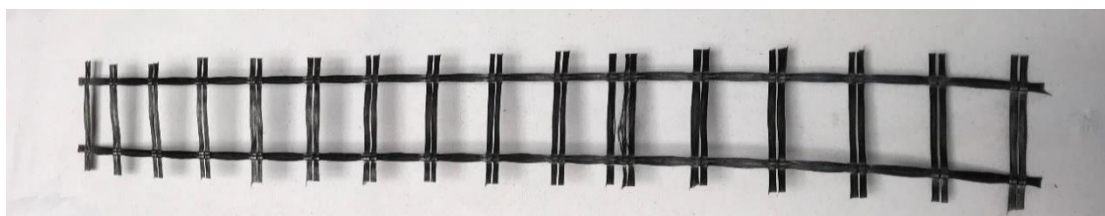


Figura 16. Tall de malla de fibra de vidre

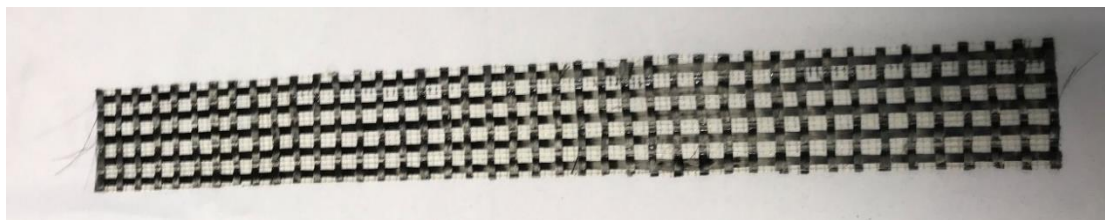


Figura 17. Tall de malla de fibra de carboni

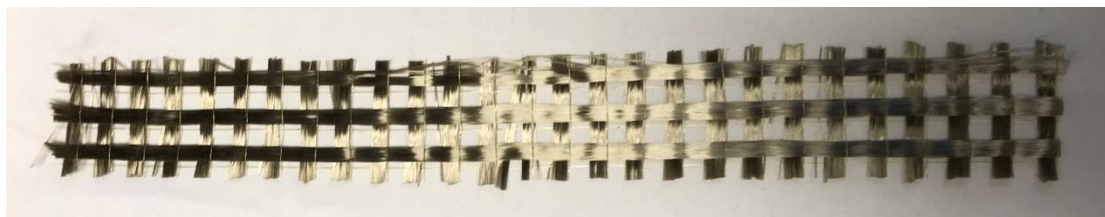


Figura 18. Tall de malla de fibra de basalt

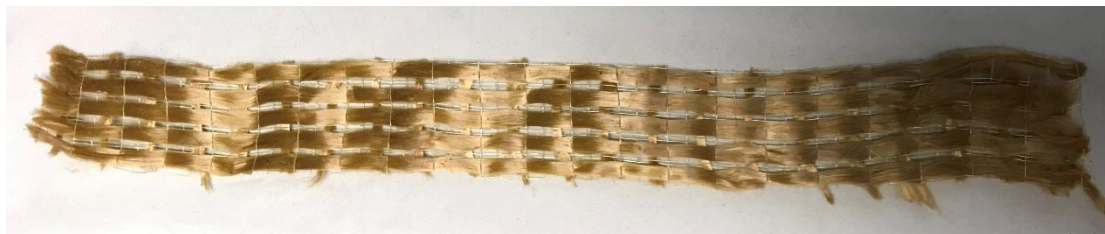


Figura 19. Tall de malla de fibra de PBO

Tot i que sembli un treball trivial, ha tingut part de complicació sobretot en el tall de les fibres del polímer sintètic PBO. Pel que fa a les fibres de vidre i carboni, es poden tallar fàcilment amb l'ús de tisores. Les fibres de basalt però, tenen més complicació en el tall ja que s'havia d'anar amb compte que les fibres no es desfilassin, i es va utilitzar un cúter. Tot i això, el cas més complicat va ser amb les fibres PBO. S'ha observat que les fibres de PBO presenten gran resistència al tall, sumat al fet que són fibres molt flexibles. El procediment emprat per tallar-les ha sigut semblant al de les fibres de basalt, però amb més paciència i cura de no desfilar la fibra. Cal remarcar que no s'ha pogut realitzar un tall igual de precís en les fibres de PBO com en la resta de fibres a causa d'aquestes complicacions.

4.4. Fabricació dels motlles

Un cop les fibres van ser tallades, es van començar a preparar els motlles. Els motlles consten d'una fusta base de conglomerat de mida: 1400x610x9 mm, sobre la qual es claven una sèrie de llistons plans de fusta a la distància desitjada.



Figura 20. Fusta base de conglomerat del motlle de fabricació

Primerament es neteja la fusta de conglomerat base i es claven els llistons. Es clava un llistó vertical llarg i posteriorment els quatre llistons horitzontals de 5 cm de longitud, i així successivament fins a completar el motlle.



Figura 21. Motlle de fabricació

Una vegada tenim clavats els llistons que ens permetran fabricar la proveta, passem a encintar el motlle. Utilitzarem precinto i amb molta cura encintarem la superfície del motlle. Aquesta cinta ens permet realitzar un desencoframent més fàcil i per tant ha de quedar perfectament llisa sense bombolles.

En cada motlle, al centre de cada espai on es fabricarà la proveta, s'insereixen unes peces de cartró plastificat de diferents mides (50, 100 i 150 mm). Aquestes ens garantiran que la proveta quedi descoberta de morter pel centre, només mantenint la fibra enmig i aconseguint així la longitud lliure. Tenen 3 diferents longituds per tal de realitzar l'estudi de l'adherència en funció de la longitud de fixació de la fibra.

Finalment, s'aplicarà vaselina a la part superior de la cinta per tal de facilitar el desemmotllament.



Figura 22. Aplicació de vaselina al motlle

Tal com s'aprecia a la figura 18, en un motlle s'hi poden fabricar 15 provetes. Al laboratori disposem de quatre fustes base per realitzar motlles, per tant s'han fabricat 4 motlles, els quals estan repartits en els dos treballs que es realitzaven en aquell moment: aquest estudi de l'adherència amb fibres artificials i un altre estudi igual però amb fibres vegetals.

4.5. Preparació del morter

Tal com s'ha esmenat en el capítol 3, s'ha utilitzat morter Sika en l'elaboració de les provetes. Per tal de prepara-ho, es mescla aigua amb la pols de morter on s'ha tingut en compte la proporció d'aigua utilitzada en altres estudis del FRCM que és un pèl superior a la recomanada pel fabricant.

Mortor	Proporció fabricant	Proporció utilitzada
Sika	14,5%	16%

Taula 7. Proporcions d'aigua en la mescla del morter

En la preparació del morter, s'ha utilitzat una màquina mescladora i s'ha anat pesant el morter de 2kg en 2kg fins a dipositar 10kg de morter en una galleda on es va fer la mescla. S'ha emprat aquest procediment perquè si realitzéssim tot el morter necessari pels quatre motlles de cop, aquest aniria solidificant-se en el procés d'omplir els motlles i dificultaria molt el treball, alhora que perdríem una certa quantitat de morter.



(a)



(b)

Figura 23. (a) Estris utilitzats en la mesura del morter. (b) Procediment de mesura del morter



Figura 24. Mescla del morter amb la màquina mescladora

Aquesta tasca es va realitzar conjuntament amb l'Enrique, que és la persona que fa el mateix estudi però amb les fibres d'origen vegetal. Llavors ens vam dividir els quatre motlles que disposàvem al laboratori de manera que en teníem dos cadascú.

S'han necessitat aproximadament entre uns 5,5 - 6 kg de morter en pols per motlle.

4.6. Fabricació de les provetes

Un cop es tenen els motlles preparats amb la vaselina, el morter mesclat i les fibres tallades correctament i s'ha comprovat que les dimensions de les fibres quadren amb les del motlle, passem a fabricar les provetes.

Cal recordar que les provetes que s'assajaran en aquest estudi, estaran sense morter en la part central. Hi haurà tres tipus de provetes diferents segons la seva longitud d'ancoratge amb el morter. Això es realitza d'aquesta manera ja que el que es vol estudiar és l'adherència de la fibra amb la matriu, llavors s'estudiarà el desplaçament de la fibra al llarg de la matriu en funció de la superfície de contacte entre la fibra i el morter. Per aconseguir-ho, es fa ús de tres tipus de cartró plastificat de diferents longituds, que es dipositen en el centre de l'espai destinat a cada proveta en el motlle. D'aquesta manera aconseguirem que en la part central de cada proveta estigui la fibra sola, mentre que en els extrems trobarem la fibra reforçada amb el morter.

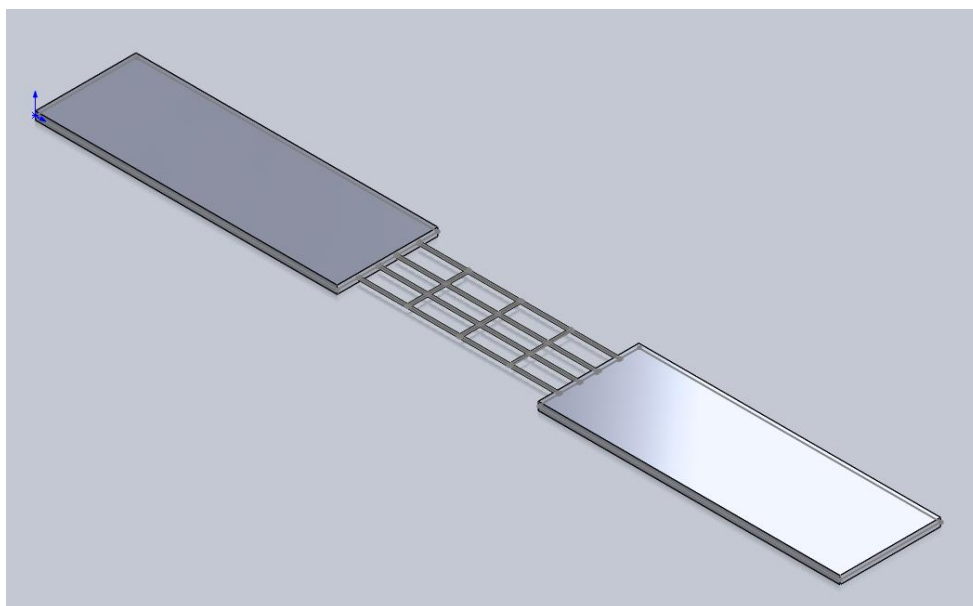


Figura 25. Model 3D general del tipus de proveta utilitzat

Per fer-ho, s'ha introduït primerament una certa quantitat de morter a cada posició en el motlle. Un cop tenim aquesta quantitat de morter introduïda, distribuïm el morter al llarg de la posició menys en el centre on disposem d'uns útils de cartró plastificats que faran de separació per tal de fabricar les provetes de la forma que es vol, com s'ha comentat anteriorment. Per tal de distribuir uniformement el morter, s'utilitza un útil dissenyat expressament per aquesta labor. Aquest útil és el següent:



Figura 26. Estri utilitzat en la distribució del morter al llarg del motlle

Com podem veure, amb l'ajut d'aquest útil es distribueix el morter de manera que en quedarà la meitat a la part inferior. Llavors, es col·loca la fibra i es recobreix amb més morter al damunt tot col·locant una altra peça de cartró plastificat al damunt del tros de fibra que ha de quedar descoberta.

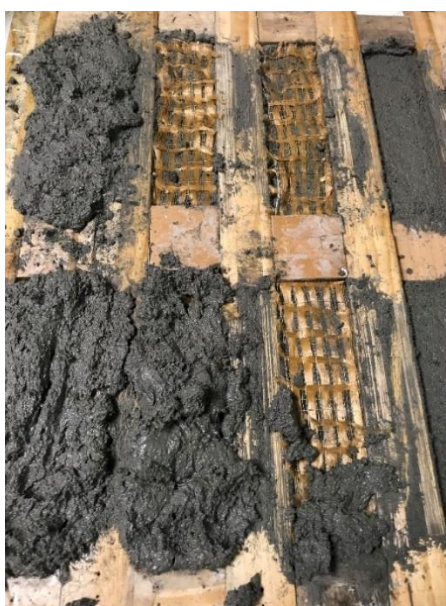


Figura 27. Procés intermedi de fabricació de les provetes

Es realitza aquest procediment per a la resta de provetes i amb l'ajut d'una rasqueta i una mica d'aigua, es poleix la superfície superior de la proveta per tal de facilitar l'adherència de l'adhesiu que s'utilitzarà posteriorment en la preparació de les provetes per realitzar l'assaig.



Figura 28. Procés d'allisat superficial de les provetes al motlle

Finalment, es deixen curar les provetes durant 28 dies. Al cap d'un parell de setmanes, es van extreure del motlle i es van deixar curant fins arribar als 28 dies. Això, es va fer per tal d'utilitzar els motlles un altre cop ja que s'havien de fabricar la resta de provetes que quedaven.

El procés de desencofrar les provetes del motlle va ser relativament senzill. Això, va ser gràcies a les configuracions prèvies del precinto i la vaselina que se li van aplicar als motlles. Alhora de desencofrar, es van anar retirant els llistons amb l'ajuda d'un tornavís pla i es van anar extraient les provetes tal com mostra la següent figura.



Figura 29. Procés de desencoframent del motlle

Per tal de fabricar les provetes restants, es va fer servir el mateix procediment descrit anteriorment. Un cop ha curat el morter, s'han de preparar les provetes per l'assaig.

4.7. Preparacions prèvies als assajos

Un cop extretes les provetes del motlle, el primer pas és allisar-ne la superfície. Per tal de fer-ho, es van utilitzar llimes i l'ajut de la polidora en algunes provetes on la superfície era més irregular. És important garantir un bon allisat per tal de que la superfície de les provetes sigui el més regular possible alhora d'encolar unes platines a les provetes.



Figura 30. Exemple de proveta allisada

Un cop tenim la proveta allisada, passem a enganxar unes platines de metall a la proveta. Aquestes planxes tenen un forat en la part superior que serà necessari per tal d'assajar amb el mètode Clevis.

Les platines, s'encolen a la superfície de la proveta amb un adhesiu bicomponent (activador i catalitzador) de la marca Loctite 3425. Aquest s'aplica amb una pistola i una punta especials que garanteixen la correcta mescla dels seus dos components.



Figura 31. Pistola utilitzada en l'aplicació del adhesiu epoxi

Primerament, es netegen les platines amb alcohol de cremar. La superfície de les platines està granellada per tal d'ajudar amb la correcta adhesió a la proveta. A més a més, les platines tenen un forat que és el que ens permetrà agafar-les per realitzar l'assaig amb el mètode Clevis.

Per tal de realitzar aquesta tasca, s'utilitza un motlle especial dissenyat sol per aquest motiu. Aquest motlle consta de 10 cargols que sobresurten i 20 fustes que ens permeten un correcte alineament de la proveta. Els cargols són el suficientment llargs

com perquè es puguin posar 2 provetes (una damunt de l'altra) i així poder realitzar el doble de provetes en el mateix motlle.



Figura 32. Motlle d'adhesió de les platines a la superfície de les provetes

És important saber que la maniobrabilitat del adhesiu és d'uns 30 minuts per tant, aquesta tasca s'ha de fer amb una certa celeritat.

Es fixen els cargols que faran de guia amb Loctite i posteriorment es col·loquen les platines a la part inferior, de tal manera que la proveta quedarà fixada per una longitud d'uns 10cm aproximadament. Les platines es col·loquen al motlle utilitzant els cargols com a guia a través del forat de les pròpies platines. És molt important en aquesta tasca, garantir que el cargol i el forat estiguin concèntrics en tot moment ja que així obtindrem la concèntricitat entre les dues cares de les platines enganxades a la superfície inferior i superior de la proveta.

Posteriorment apliquem l'adhesiu a la platina de manera uniforme i col·loquem la proveta damunt. Després al damunt hi col·loquem una altra platina i hi apliquem pes.



Figura 33. Exemple d'aplicació de l'adhesiu a la platina



Figura 34. Exemple de provetes en el procés d'adhesió de la platina amb l'ús de pesos

Repetim aquest procediment per la resta tenint en compte que en el motlle hi caben 10 provetes (5 en cada pis). Les provetes un cop acabades queden de la següent manera:



Figura 35. Provetes llestes per l'assaig amb Mètode Clevis

Finalment, es tindrien totes les provetes preparades per la realització de l'assaig.

Capítol 5. Experiment

5.1. Introducció

Per tal de realitzar l'assaig, s'ha utilitzat la premsa Insight 10 Kn de la marca MTS. Cal remarcar que es tracta d'una molt bona màquina. Això es degut a la seva facilitat en fer-la servir i la possibilitat de prendre les dades de l'assaig mitjançant el propi software, fet pel qual no cal estar prenent totes les dades al detall durant l'assaig.



Figura 36. Premsa utilitzada Insight 10 kN de la marca MTS

Per tal d'assajar l'adherència, s'ha utilitzat el mètode Clevis. S'ha utilitzat aquest mètode perquè és la manera més eficient i realista que es pot realitzar al laboratori tal com s'ha explicat anteriorment.

5.2. Mètode Clevis

El mètode Clevis és un mètode d'assaig basat en l'adhesió de dues platines d'acer a la proveta, les quals tenen un forat per tal de facilitar l'ancoratge de les provetes a la màquina d'assaig.

Per tal de realitzar l'assaig correctament amb el mètode Clevis, tot i que l'amplada de les platines no ha de ser d'una mida específica, ja que no està normalitzat al estar encara en procés de desenvolupament; sí que solen tenir una mida entre 40 i 60 mm.

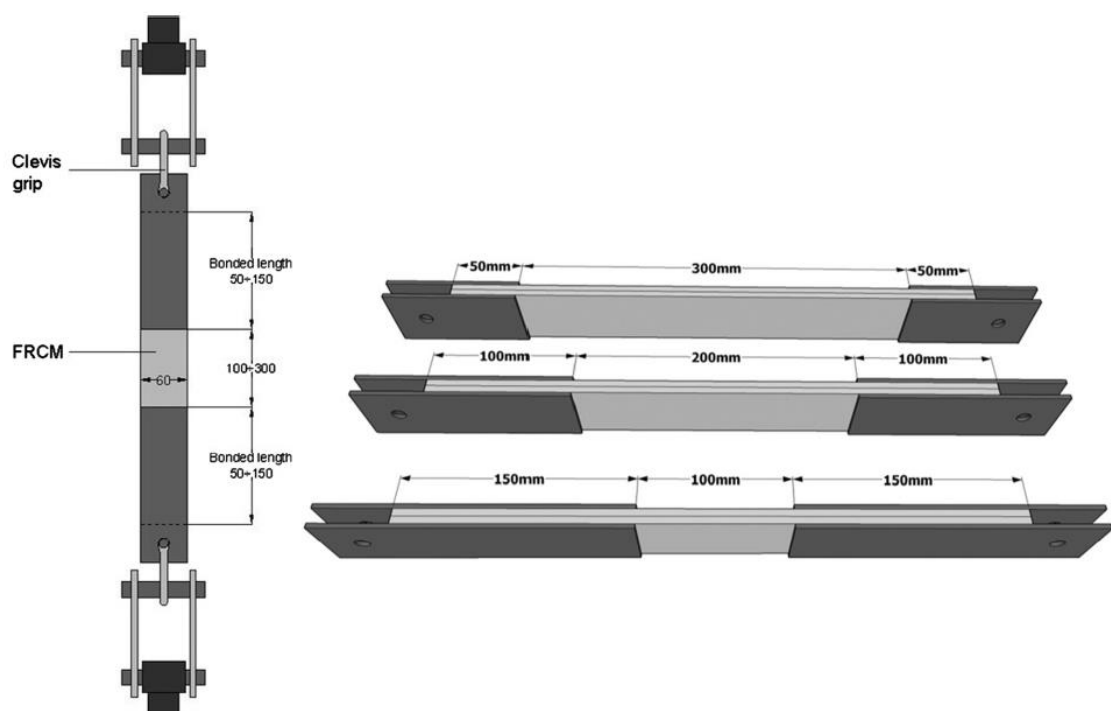


Figura 37. Esquema mètode Clevis i morfologia de les provetes [5]

En la següent imatge es pot veure una representació de les provetes amb les platines i de diferents longituds d'ancoratge. La longitud d'ancoratge utilitzada en el nostre estudi és de 100mm per banda i 200mm al centre. Cal recordar que la morfologia de les provetes que s'han utilitzat tenen en compte que en el centre hi ha una zona descoberta on sol hi ha fibra amb 3 diferents longituds lliures de la fibra amb el morter de 50, 100 i 150 mm.

Per tant, la morfologia exacta de les provetes en el nostre estudi serà la següent, variant la longitud lliure d'enmig entre 50, 100 i 150 mm, però sense variar la longitud total de la proveta de 400mm.

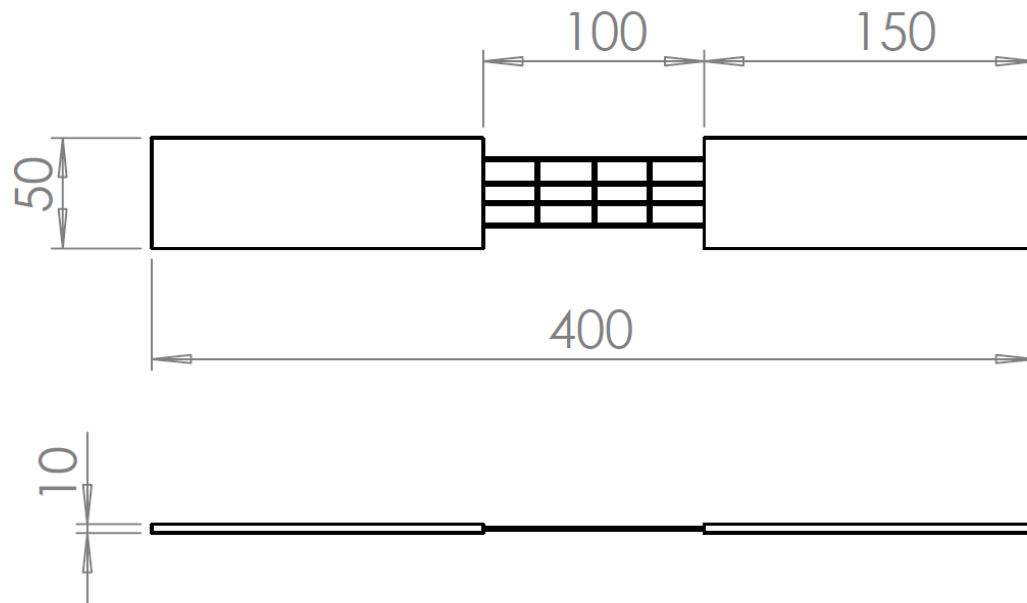


Figura 38. Plànol bàsic de la morfologia de les provetes utilitzades en l'estudi

5.3. Guia de realització de l'assaig

Primerament, la proveta es passa per un passador a través d'un mosquetó, utilitzant el forat de les platines tal com a la figura 38a, de forma que queda penjada. El fet que quedi penjada ens permet aconseguir que la proveta no presenti cap tipus de resistència i s'alineï correctament. Posteriorment, es passa pel passador inferior de la mateixa forma i s'aplica una precàrrega de 5 N per tal que no es mogui.



Figura 39. (a) Mètode d'ancoratge de la proveta a la premsa, (b) Proveta ja muntada

El següent pas serà instal·lar l'extensòmetre. S'ha de tenir especial cura ja que l'extensòmetre ha d'estar totalment anivellat, per tant utilitzarem un anivellador. Per tal de col·locar l'extensòmetre, s'utilitzen dos imants de Neodimi per tal d'aguantar l'estructura en la qual instal·larem l'extensòmetre a les platines metàl·liques.

Això, ho fem així perquè l'extensòmetre té un rang de mesura fins a 50mm, mentre que la distància entre les platines és d'aproximadament 200mm. Utilitzant aquest sistema que es va idear en estudis anteriors, aconseguim llegir la deformació de forma correcta.

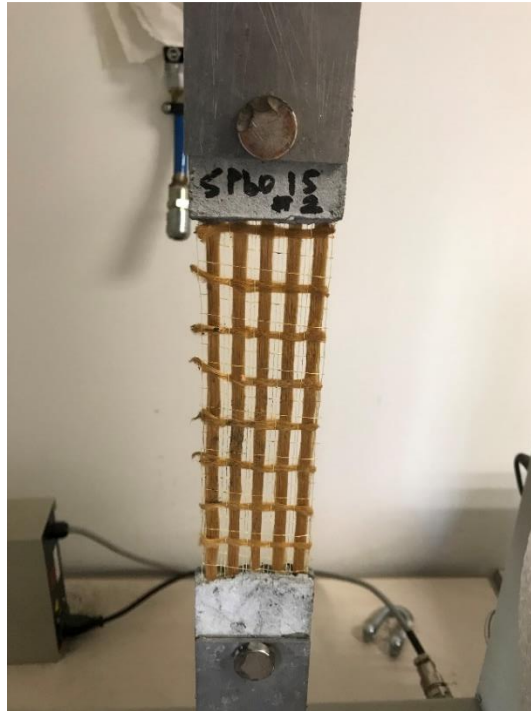


Figura 40. Detall imants utilitzats en l'assaig

L'estructura en la qual es col·loca l'extensòmetre consta de dos perfils en L d'acer i dues varetes verticals en les quals, s'introdueixen els perfils que aniran enganxats a les platines metàl·liques mitjançant els imants. L'estructura és la següent:



(a)



(b)

Figura 41. (a) Detall muntatge dels perfils d'acer, (b) Detall de l'estructura anivellada

Un cop és té l'estructura anivellada, s'instal·la l'extensòmetre fent ús d'unes petites ranures que tenen els perfils en L.

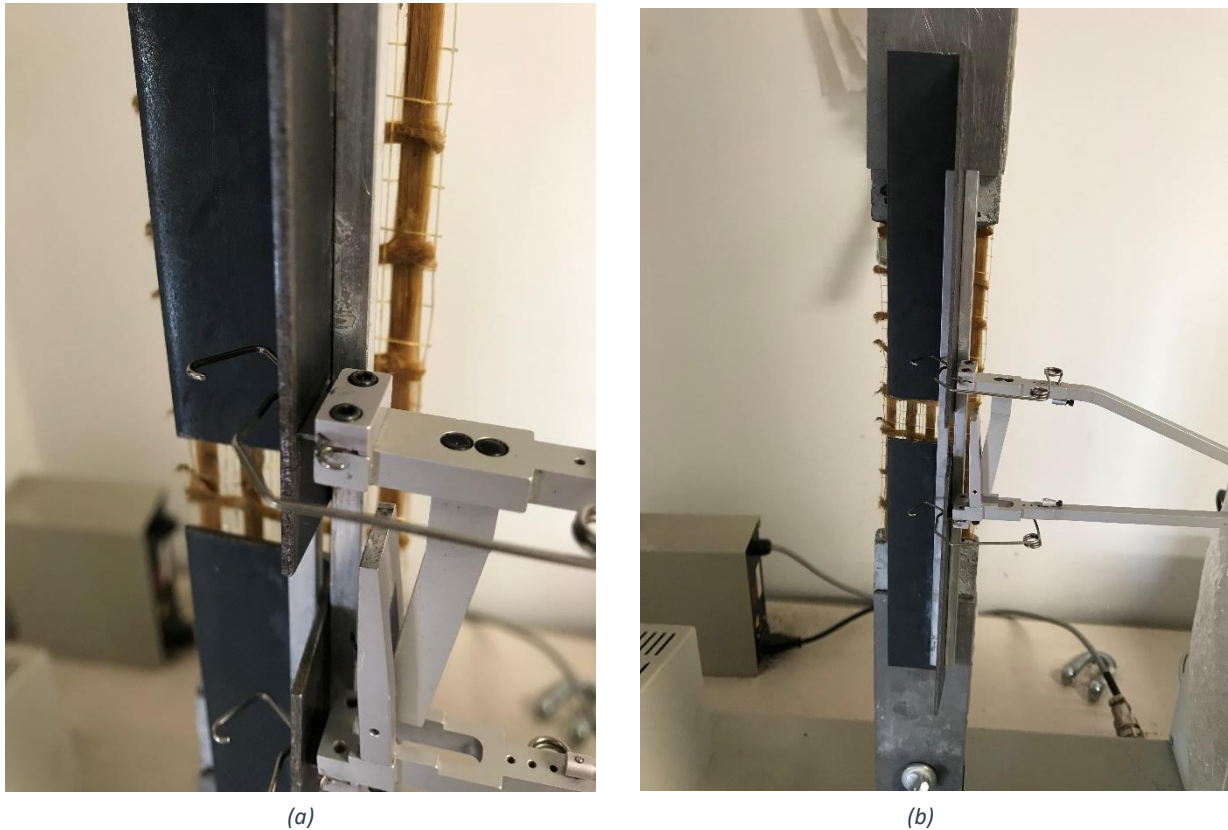


Figura 42. (a) Detall muntatge extensòmetre als perfils d'acer, (b) Muntatge general extensòmetre

Una vegada es té el sistema muntat, es procedeix a assajar l'espècimen. S'assaja a una velocitat de 5mm/min ja que és l'adient per assajar provetes amb el mètode Clevis tal com es va determinar en estudis anteriors [3]. Utilitzarem el software propi de la màquina on hi posarem tots els canals a zero i es comprovarà que en l'inici del moviment, l'extensòmetre estigui llegint valors positius ja que a vegades pot variar degut a un desalineament de la proveta.

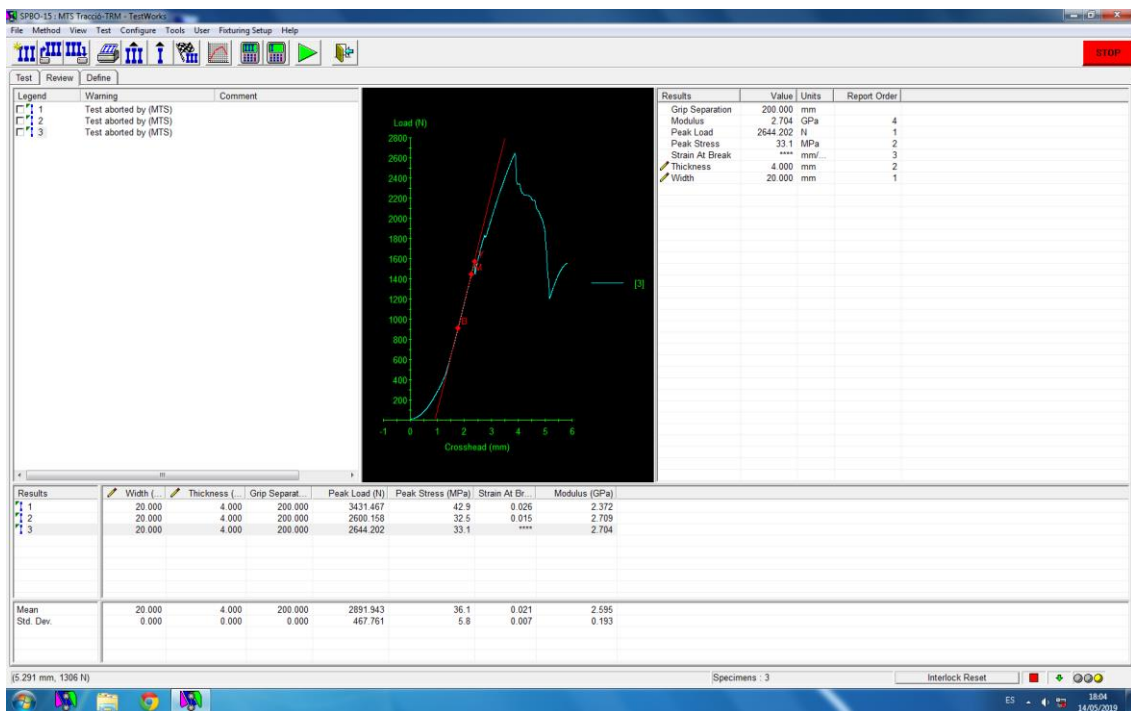


Figura 43. Proveta muntada a punt per realitzar l'assaig

Finalment, repetim aquest procediment per la resta de provetes.

5.4. Captació de dades

A partir del software de la màquina, es pot extreure els resultats de l'assaig en format TXT. Aquests resultats es van post-processar amb Microsoft Excel per tal d'extreure els gràfics i els resultats propis de l'assaig.



Tot i això, durant l'assaig de cada proveta, es realitzava un recull de les dades

Figura 44. Captura software de la premsa

principals manualment. Això es va realitzar per tal de tindre un control de cada proveta i apuntar la causa de la fallada de cadascuna. També s'anotava la longitud inicial de separació de les provetes per tal de calcular la deformació posteriorment.

Pel que fa a la nomenclatura de les provetes, s'ha utilitzat la següent: YXXX0_1. On:

- Y: és el corresponent al morter, en el nostre cas morter Sika de manera que Y=S
- XXX: correspon al material, de manera que tenim:
 - o XXX=Pbo, per les provetes del polímer PBO
 - o XXX=G, per les provetes de fibra de vidre.
 - o XXX=B, per les provetes de fibra de basalt.
 - o XXX=Cb, per les provetes de fibra de carboni

- 0: correspon a la longitud lliure de cada tipus de proveta.
 - o 5: 5cm de longitud lliure.
 - o 10: 10 cm de longitud lliure.
 - o 15: 15 cm de longitud lliure.
- _1: correspon al número de la proveta, com que tenim 3 de cada tipus, aquest nombre varia entre l'1, el 2 i el 3.

La taula recull de les dades principals és la següent:

Mostra	Li (mm)	Carga (N)	Causa fallada	Data fabricació	Data de l'assaig	Problemes fabricació
SPbo5_1	195	3316,6	1+3	22/03/2019	13/05/2019	
SPbo5_2	198	2222,2	1+3	22/03/2019	13/05/2019	
SPbo5_3	196	1818,3	1+3	22/03/2019	27/05/2019	Descartem per desplaçament
SPbo10_1	202	2180,9	1+3	22/03/2019	13/05/2019	
SPbo10_2	199	3356,3	1+3	22/03/2019	23/05/2019	
SPbo10_3	201	3255,2	1+3	26/04/2019	27/05/2019	
SPbo15_1	200	3431,5	1+3	22/03/2019	13/05/2019	
SPbo15_2	198	2644,2	1+3	22/03/2019	13/05/2019	
SPbo15_3	200	2600	1+3	22/03/2019	13/05/2019	
SCb5_1	201	1865,8	1	22/03/2019	13/05/2019	
SCb5_2	199	1912,7	1	22/03/2019	13/05/2019	
SCb5_3	197	1994,5	1	22/03/2019	27/05/2019	
SCb10_1	195	2031,6	1+3	22/03/2019	13/05/2019	
SCb10_2	196	1937,3	1	22/03/2019	13/05/2019	Platina mal adherida
SCb10_3	198	2149,6	1	22/03/2019	13/05/2019	
SCb15_1	196	2244,3	1	22/03/2019	13/05/2019	
SCb15_2	200	2317,9	1	22/03/2019	13/05/2019	
SCb15_3	197	1642	1	22/03/2019	27/05/2019	
SG5_1	196	1119,5	2	22/03/2019	13/05/2019	
SG5_2	196	1298	2	22/03/2019	13/05/2019	
SG5_3	197	1198,4	2	22/03/2019	13/05/2019	
SG10_1	196	1446,3	2	22/03/2019	13/05/2019	
SG10_2	197	1290,7	2	22/03/2019	13/05/2019	
SG10_3	201	1424,6	2	22/03/2019	23/05/2019	
SG15_1	202	1234,9	2	22/03/2019	23/05/2019	
SG15_2	196	1361,9	2	22/03/2019	23/05/2019	
SG15_3	197	1147,3	2	22/03/2019	23/05/2019	
SB5_1	201	320	1	22/03/2019	13/05/2019	Descartem per desplaçament
SB5_2	200	628,1	1	26/04/2019	27/05/2019	
SB5_3	201	974,6	1	26/04/2019	27/05/2019	
SB10_1	196	823,4	1	22/03/2019	13/05/2019	
SB10_2	194	986,1	1	26/04/2019	27/05/2019	
SB10_3	197	666,8	1	26/04/2019	27/05/2019	

SB15_1	200	980,4	1	26/04/2019	23/03/2019
SB15_2	198	953,4	1	26/04/2019	27/05/2019
SB15_3	200	838,7	1	22/03/2019	27/05/2019

Llegenda

- 1: Lliscament fibres
- 2: Ruptura fibres
- 3: Fisura múltiple i desprendiment del morter

Taula 8. Taula recull de dades durant l'assaig

A partir d'aquí i les dades exportades des del programa es van post-processar els resultats. Val a dir que el programa dona el resultats en forma de Força (N)-Desplaçament(mm). Per tant, aquests resultats es van passar a Tensió (MPa)-Deformació mitjançant les següents fórmules:

- Tensió:

$$\sigma \text{ (MPa)} = \frac{F \text{ (N)}}{S \text{ (mm}^2\text{)}}$$

On la F és la força donada per la màquina en cada moment i la S és la secció transversal de la proveta.

- Deformació:

$$\varepsilon = \frac{X \text{ (mm)}}{L_i \text{ (mm)} + \phi_{imant} \text{ (mm)}}$$

On X és el desplaçament de l'extensòmetre en cada moment, L_i és la longitud entre platines de cada proveta i el diàmetre del imant és suma a la longitud entre platines ja que la base on està situat l'extensòmetre està adherida amb un imant per banda. Per tant, sumem l'equivalent al radi del imant dues vegades.

Capítol 6. Resultats i anàlisis

Inicialment, introduïrem una sèrie de paràmetres els quals ens seran útils alhora d'estudiar l'adherència.

- Carga (F (N)): Força a tensió que suporta la proveta.
- Secció morter (S_m (mm^2)): secció transversal del morter. És una constant en les provetes de l'estudi que val 500 mm^2 .
- Secció fibres (S_f (mm^2)): secció transversal de les fibres calculada a partir de les dimensions longitudinals de la malla i l'espessor equivalent donat pel fabricant.
- Secció tangencial fibres (S_{tf} (mm^2)): secció tangencial de les fibres que està en contacte amb el morter. Calculada a partir de la multiplicació del perímetre de cada malla per la longitud d'ancoratge de la malla al morter.
- Tensió màxima de la malla (σ_f (MPa)): Tensió màxima que suporta la malla abans de trencar-se o lliscar.

$$\sigma_f(\text{MPa}) = \frac{F \text{ (N)}}{S_f \text{ (mm}^2\text{)}}$$

- Tensió màxima del morter (σ_m (KPa)): Tensió màxima de pre-fissura que suporta el morter.

$$\sigma_m(\text{KPa}) = \frac{F \text{ (N)}}{S_m \text{ (mm}^2\text{)}} \cdot 1000$$

- Tensió màxima tangencial de la malla de fibres (σ_{tf} (MPa)): Tensió màxima tangencial que suporta la fibra abans de lliscar o trencar-se, paràmetre important i que fins ara sembla no estar caracteritzat anteriorment. Aquest paràmetre ens permetrà caracteritzar i quantificar l'adherència del tipus de fibres utilitzades amb el tipus de morter utilitzat.

$$\sigma_{tf}(\text{KPa}) = \frac{F \text{ (N)}}{S_{tf} \text{ (mm}^2\text{)}} \cdot 1000$$

- Deformació màxima de les fibres (ϵ_f). On, $X_{Ff\text{màx}}$ és el desplaçament de l'extensòmetre en el punt de càrrega màxima (punt de ruptura).

$$\varepsilon_f = \frac{X_{Ff\text{màx}} (mm)}{L_i (mm) + \phi_{imant} (mm)}$$

- Deformació màxima del morter (ε_m). On, X_{Fm} és el desplaçament de l'extensòmetre en el punt de la primera fissura del morter.

$$\varepsilon_m = \frac{X_{Fm} (mm)}{L_i (mm) + \phi_{imant} (mm)}$$

- Mòdul de Young de la malla de fibres (E_f (MPa)). Calculat a partir de l'aplicació de la següent fórmula, és a dir, calculant el pendent de la recta de la zona lineal de les fibres.

$$E_f (MPa) = \frac{\Delta\sigma_f (MPa)}{\Delta\varepsilon_f}$$

- Mòdul de Young del morter (E_m (KPa)). Calculat a partir de l'aplicació de la següent fórmula, és a dir, calculant el pendent de la recta de la zona lineal del morter (zona de pre-fissura).

$$E_m (KPa) = \frac{\Delta\sigma_m (KPa)}{\Delta\varepsilon_m}$$

Val a dir que en provetes les quals les malles llisquen o es trenquen abans que el morter, no es poden estudiar tots els paràmetres de igual manera ja que en ocasions el morter no arriba a tenir fissures, per tant no té sentit parlar de Mòdul de Young de pre-fissuració o la Tensió de fissuració del morter.

Els tipus de ruptura de les provetes en general han sigut els següents:

- Ruptura de les fibres: implica una bona adherència en la interacció matriu-reforç. És la ruptura desitjada.
- Multi-fissura del morter: implica bona adherència ja que vol dir que s'estan assolint valors alts de càrrega. Tot i que vindrà condicionada en el final del recorregut, si la malla llisca o no. Ja que pot tenir bona adherència inicial i, posterior a la fissura del morter, lliscar.

- Lliscament de la malla: la proveta no trenca en el sentit físic, sinó que va lliscant. De manera que l'elongació, passa a ser relativa ja que la malla s'està desplaçant al llarg de la matriu.

6.1. Provetes de fibres de vidre

El comportament de les fibres de vidre ha estat en totes les provetes igual, totes les provetes han patit el mateix tipus de ruptura; ruptura de les fibres abans de fissura del morter i cap tipus de lliscament de les fibres al llarg del morter.

Primerament val a dir que en aquest tipus de provetes, a causa de la geometria de la malla i l'amplada de la proveta, sol hi havia dos flocs de fibra per proveta. Això pot ser una causa de que les fibres trenquessin abans que el morter. A més a més, sabem que aquesta fibra és la única de les quatre estudiades que porten revestiment, fet que pot influir en augmentar l'adherència de les provetes.

Tot i això, la ruptura en aquest tipus de provetes ha sigut la millor esperada ja que no hi ha hagut lliscament i s'han trencat totes les provetes per la zona de les fibres.

Els resultats han sigut els següents:

	Proveta	σ_f (MPa)	σ_m (KPa)	σ_{tf} (KPa)	ϵ_f	ϵ_m	E_f (GPa)	E_m (GPa)
Mostres individuals	SG5_1	640,00	-	527,18	7,58E-03	-	74,12	0,47
	SG5_2	741,71	-	610,97	7,93E-03	-	65,20	0,60
	SG5_3	684,57	-	563,90	7,31E-03	-	105,43	0,37
	SG10_1	826,29	-	794,07	1,52E-02	-	72,35	0,30
	SG10_2	737,71	-	708,95	1,33E-02	-	62,61	0,31
	SG10_3	814,29	-	782,54	1,26E-02	-	76,31	0,26
	SG15_1	705,71	-	813,84	1,30E-02	-	71,61	0,20
	SG15_2	778,29	-	897,53	1,76E-02	-	61,91	0,18
	SG15_3	655,43	-	755,85	1,39E-02	-	62,18	0,22
Mirjana	SG5	688,8	-	567,3	7,61E-03	-	81,6	0,48
	SG10	792,8	-	761,9	1,37E-02	-	70,4	0,29
	SG15	713,1	-	822,4	1,48E-02	-	65,2	0,20

(*) Problema fabricació

(') Lliscament inicial de la platina

Taula 9. Taula resultats provetes SG

En aquest cas, resulta redundant estudiar els paràmetres de tensió màxima del morter i deformació última ja que no arriba a fissura.

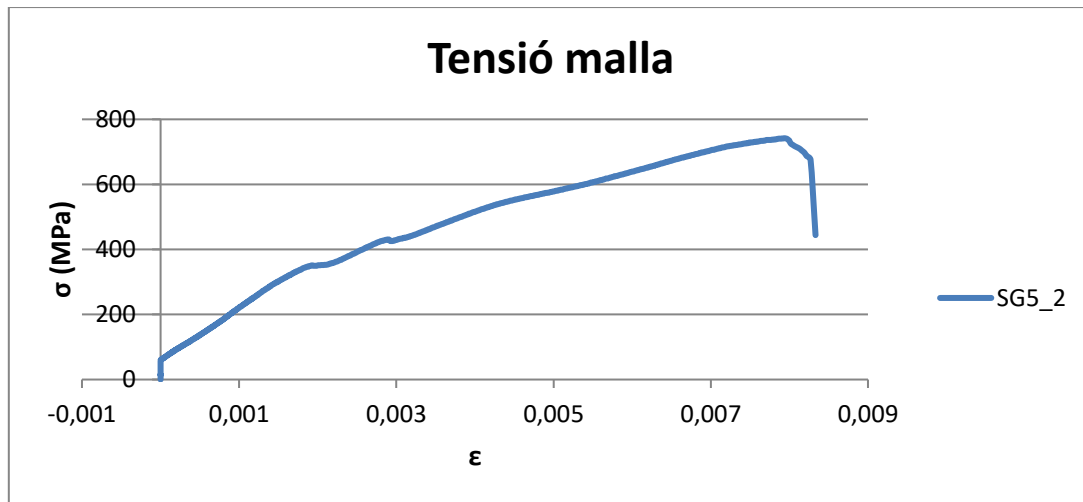


Figura 45. Gràfic Tensió-Deformació de la malla de la proveta SG5_2.

Com podem observar en aquesta gràfica de la proveta SG5_2, no s'observa cap zona on es produeixi lliscament. La malla manté un comportament gairebé lineal en tot el recorregut fins que trenca.

6.2. Provetes de fibres de carboni

El comportament d'aquestes provetes en general ha sigut similar. La tendència general és que les fibres de carboni llisquen al llarg de la matriu de morter. Cap floc de fibres de carboni ha arribat a trencat llavors podem definir que l'adherència no es del tot bona ja que no estem aprofitant realment la totalitat de les propietats de la fibra.

També cal remarcar que el morter no ha arribat a fissura en totes les provetes.

Tot i així, gràcies a l'estudi del paràmetre de la tensió tangencial podem caracteritzar aquesta adherència.

Els resultats obtinguts són els següents:

	Proveta	σ_f (MPa)	σ_m (KPa)	σ_{tf} (KPa)	ϵ_f	ϵ_m	E_f (GPa)	E_m (GPa)
Mostres individuals	SCb5_1	794,04	(1)	211,27	5,37E-03	(1)	171,77	0,81
	SCb5_2	814,04	3436	216,59	4,75E-03	3,14E-03	118,58	1,19
	SCb5_3	848,94	3234	225,88	5,67E-03	2,86E-03	273,78	1,52
	SCb10_1	864,68	1978	268,41	7,60E-03	1,82E-03	153,75	1,31
	SCb10_2	824,26	(1)	255,86	7,93E-03	(1)	216,84	0,95
	SCb10_3	914,89	1998	284,00	(')	(')	55,93	0,56
	SCb15_1	954,89	1606	355,70	8,27E-03	2,87E-03	157,49	0,73
	SCb15_2	986,38	(1)	367,43	5,60E-03	(1)	195,35	0,98
	SCb15_3	698,72	3050	260,27	7,31E-03	4,98E-03	134,57	0,58
Mitjana	SCb5	819,01	3335,00	217,91	5,26E-03	3,00E-03	145,17	1,17
	SCb10	867,94	1988,00	269,42	7,77E-03	1,82E-03	142,17	0,94
	SCb15	880,00	2328,00	327,80	7,06E-03	3,92E-03	162,47	0,76

- (1) Morter no arriba a fissurar
 (') Lliscament de la fibra molt pronunciat

Taula 10. Taula resultats provetes SCb

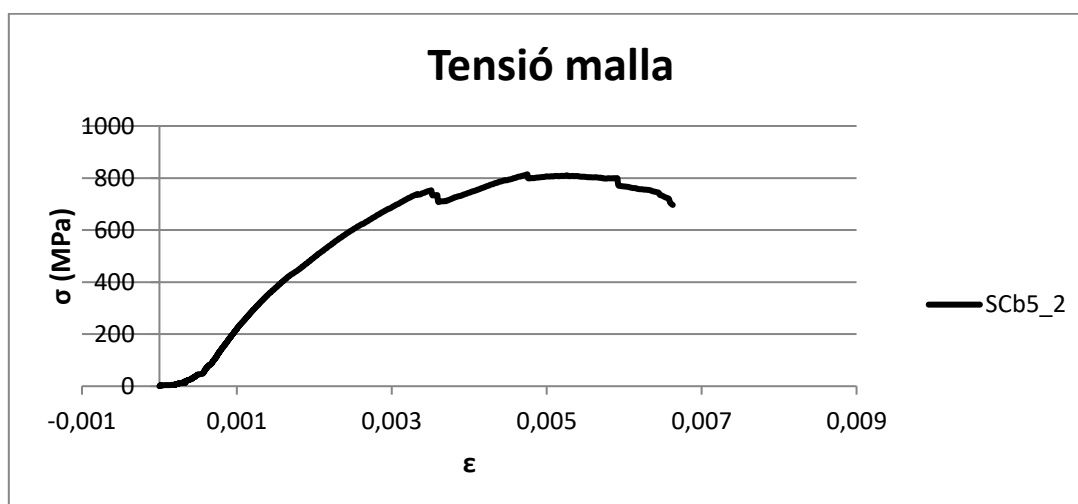


Figura 46. Gràfica Tensió-Deformació de la malla de fibra de carboni de la proveta SCb5_2

Com es pot observar en aquesta gràfica de la proveta SCb5_2, la malla suporta esforços fins que el lliscament és tant acusat, que ja no suporta més esforços, i va lliscant fins a separar-se del morter.

6.3. Provetes de fibres de basalt

El comportament d'aquestes provetes no ha sigut l'esperat. Les fibres llisquen en gran mesura i el morter no arriba ni a fissura en la majoria de casos. Les provetes no suporten gran càrrega i les propietats de les fibres no estan ben representades a causa d'aquesta mala adherència.

Podem caracteritzar aquesta adherència mitjançant l'estudi de la tensió tangencial.

Els resultats obtinguts han sigut els següents:

	Proveta	σ_f (MPa)	σ_m (KPa)	σ_{tf} (KPa)	ϵ_f	ϵ_m	E_f (GPa)	E_m (GPa)
Mostres individuals	SB5_1	164,10	-	50,47	9,55E-03	-	40,19	-
	SB5_2	322,05	-	99,04	9,91E-03	-	89,12	0,68
	SB5_3	498,46	-	153,29	4,63E-03	-	54,59	0,68
	SB10_1	422,05	-	151,42	7,45E-03	-	64,83	0,31
	SB10_2	505,64	-	181,41	7,30E-03	-	84,50	0,44
	SB10_3	342,05	-	122,72	5,58E-03	-	86,85	0,50
	SB15_1	502,56	-	216,37	8,07E-03	-	67,62	0,65
	SB15_2	488,72	-	210,41	9,35E-03	-	60,44	0,30
	SB15_3	430,26	-	185,24	7,90E-03	-	56,41	0,33
Mirjana	SB5	328,21	-	100,93	8,03E-03	-	61,30	0,68
	SB10	423,25	-	151,85	6,78E-03	-	78,73	0,42
	SB15	473,85	-	204,01	8,44E-03	-	61,49	0,43

(*) Problema fabricació

(') Lliscament inicial de la platina

Taula 11. Taula resultats provetes SB

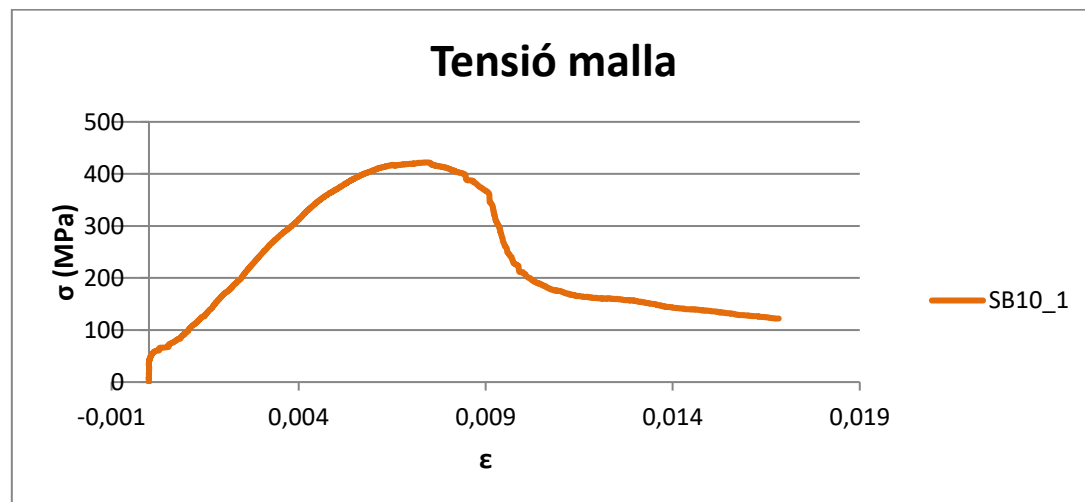


Figura 47. Gràfica Tensió-Deformació de la malla de fibra de basalt de la proveta SB10_1

Com podem observar en aquesta gràfica corresponent a la proveta SB10_1, les provetes de fibra de basalt tenen un comportament caracteritzat pel lliscament. Tot sembla indicar, que la malla llisca des del primer moment i a mesura que es va desenvolupant l'assaig, llisca més. També, es pot observar que la proveta no arriba a trencar de cop. Simplement, va lliscant fins a la separació de la malla i el morter.

6.4. Provetes de fibres de PBO

Aquestes provetes són les que aguanten més carga de tots els tipus assajats de provetes. Tot i això, cap proveta ha arribat a trencar per la zona de les fibres, per tant es pot dir que la interacció fibra-matriu no és del tot bona.

Els resultats obtinguts són el següents:

	Proveta	σ_f (MPa)	σ_m (KPa)	σ_{tf} (KPa)	ϵ_f	ϵ_m	E_f (GPa)	E_m (GPa)
Mostres individuals	SPbo5_1	1458,02	1652,00	375,67	2,67E-02	5,37E-03	91,21	0,69
	SPbo5_2	976,70	2616,00	251,65	1,57E-02	6,30E-03	73,14	0,38
	SPbo5_3	799,12	2530,00	205,90	1,95E-02	4,37E-03	22,63 (*)	1,11
	SPbo10_1	958,68	2012,00	288,18	1,81E-02	5,26E-03	208,47	0,73
	SPbo10_2	1475,16	816,00	443,43	3,44E-02	1,28E-02	121,66	(*)
	SPbo10_3	1430,77	1984,00	430,09	1,46E-02	3,70E-03	175,19	0,78
	SPbo15_1	1508,13	2432,00	544,01	2,03E-02	7,38E-03	152,66	0,46
	SPbo15_2	1142,86	3306,00	412,25	1,47E-02	7,51E-03	99,21	0,65
	SPbo15_3	1162,20	3140,00	419,23	1,32E-02	6,45E-03	134,27	0,63
Mitjana	SPbo5	1077,95	2266,00	277,74	2,07E-02	5,35E-03	82,18	0,72
	SPbo10	1288,21	1604,00	387,23	2,24E-02	7,26E-03	168,44	0,76
	SPbo15	1271,06	2959,33	458,49	1,60E-02	7,11E-03	128,71	0,58

(*) Problema fabricació

(') Lliscament inicial de la platina

Taula 12. Taula resultats provetes SPbo

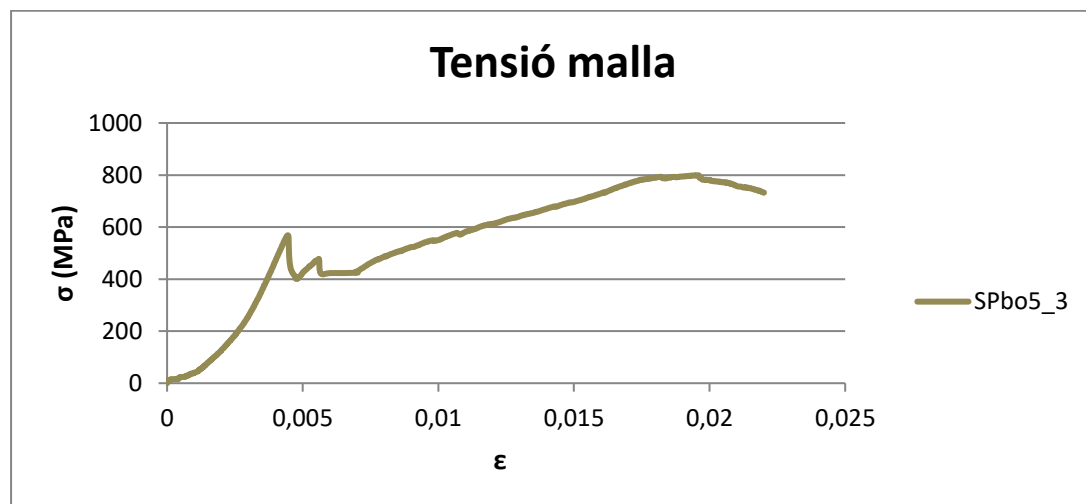


Figura 48. Gràfica Tensió-Deformació de la malla de fibra de Pbo de la proveta SPbo5_3

En aquesta gràfica corresponent a la proveta SPbo5_3, es pot observar com la malla llisca al llarg de la proveta després de la primera fractura del morter. La deformació que s'observa en la proveta es deguda al fort lliscament de la matriu al llarg de la malla

que fa que tingui un mòdul de Young tant baix en relació amb la resta de provetes. Això, va ser degut a un problema de desalineament de la proveta en la fabricació.

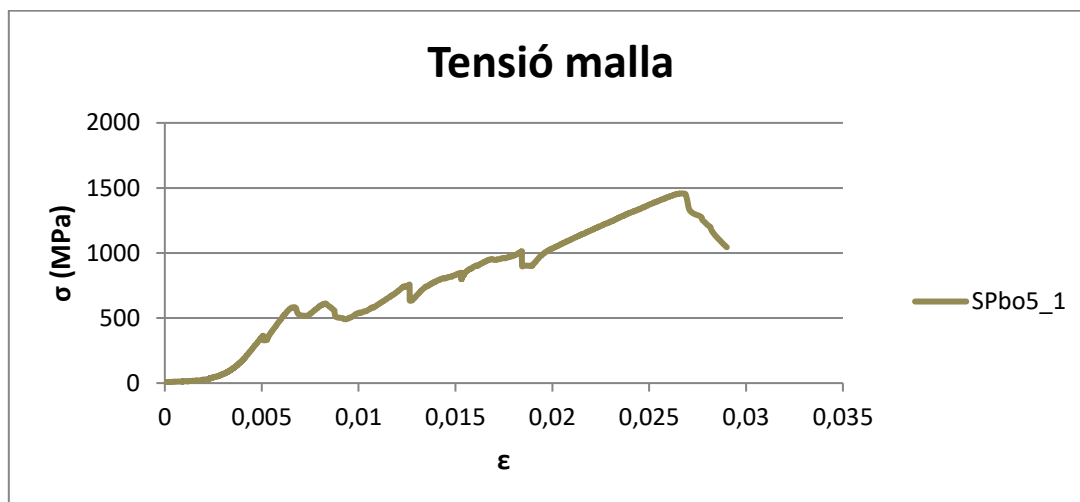


Figura 49. Gràfica Tensió-Deformació de la malla de fibra de Pbo de la proveta SPbo5_1

En canvi, en la proveta SPbo5_1 el lliscament no és tant acusat i es pot observar com el morter pateix multi-fissura. Tot i això, la ruptura final també va ser per lliscament ja que les fibres anaven desplaçant-se fins a separar-se de la matriu i no es van arribar a trencar.

6.5. Anàlisis

6.5.1. Tensió màxima de ruptura de les fibres

Primerament, s'analitzarà el paràmetre de la tensió màxima de ruptura de cada tipus de proveta amb l'ajut del següent gràfic:

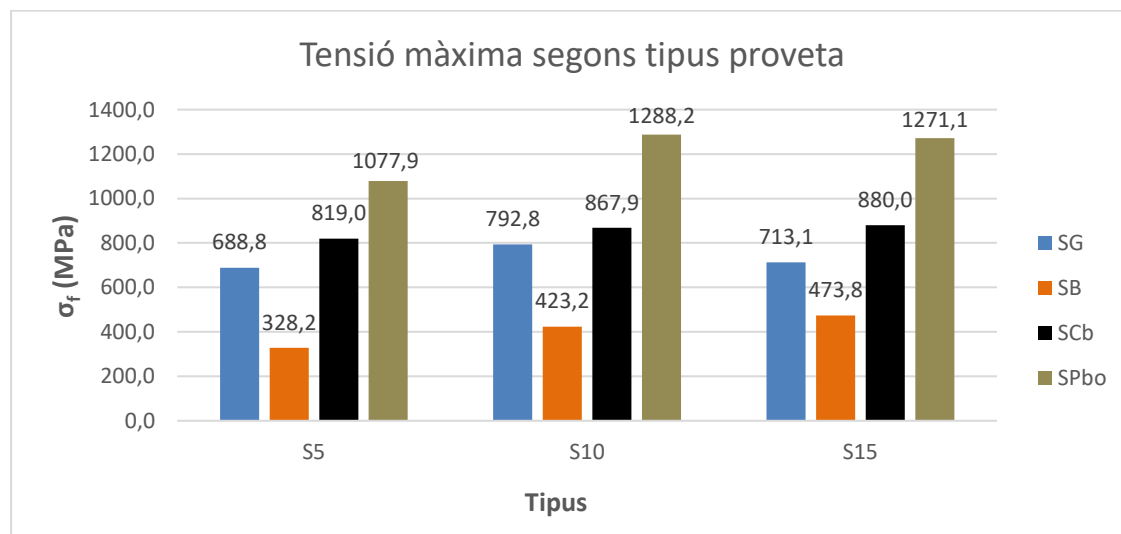


Figura 50. Gràfic comparatiu de la tensió màx. ruptura de les fibres

Com es pot veure, les provetes de PBO són les provetes que tenen major tensió de ruptura. Això es degut a les característiques de la fibra, és la més resistent i la que té més mòdul de Young. Tot i això, la tensió de ruptura és queda lluny de la especificada pel fabricant (5800 MPa). Tot sembla indicar, que aquest fet és degut al lliscament de la fibra al llarg de la matriu. La fibra, no arriba a trencar en cap ocasió (la seva fallada és per lliscament i multi-fissura del morter), per tant, no arriba al punt de tensió de ruptura que arribaria en el cas que s'assagés sola.

Un cas similar és el de les provetes de fibra de carboni, són les següents en número de tensió de ruptura màxima però també tenen aquest problema. El valor de tensió de ruptura indicat pel fabricant és de 4800 MPa. Per tant, els valors de l'ordre de 850 MPa obtinguts disten molt dels que tindria teòricament la fibra sola. Cal remarcar que com en el cas anterior, les fibres no arriben a trencar i la seva fallada és per lliscament.

S'observa un comportament més acusat en les provetes de fibres de basalt. Són les que tenen obtenen els pitjors resultats en la tensió màxima de ruptura i això és degut al acusat lliscament causat per la mala interacció fibra-matriu. La seva fallada també ha estat per lliscament.

Continuant amb l'estudi d'aquest paràmetre, les provetes de fibra de vidre han obtingut uns resultats intermedis si comparem amb la resta de provetes en termes de tensió màxima de ruptura. Això, com estudiarem posteriorment, no vol dir que tinguin mala adherència. De fet, són les úniques provetes que han trencat per la zona esperada (ruptura de les fibres).

El fet que tinguin valors més baixos en la tensió de ruptura que en el cas de carboni i PBO, és degut a que la malla de fibra de vidre a causa de la seva geometria sol hi havia 2 flocs de fibres de vidre. En canvi, en les de PBO i carboni havien 5 flocs de fibres. A part, les fibres de PBO i carboni, tenen més bona resistència a tracció que les de fibra de vidre, ja que són de més altes prestacions. Els mòduls de Young de les fibres de PBO i carboni són de l'ordre de 3 vegades les de les fibres de vidre.

A més a més, val a dir que la fibra de vidre utilitzada en l'assaig tenia un revestiment extern. Fet pel qual pot ajudar en l'adherència de la fibra amb la matriu.

De fet, en l'estudi amb provetes de fibres vegetals que s'ha fet en paral·lel per l'Enrique H, s'ha observat que les provetes amb fibres vegetals i revestiment de resina han obtingut millors resultats en termes d'adherència.

Finalment, en termes generals, podem veure una certa relació en què, a major longitud d'ancoratge, menor càrrega última resisteixen les provetes. Sobretot, es veu en les provetes que llisquen (basalt, carboni i PBO). Per tant, sembla, com a mínim que augmentar la longitud d'ancoratge no millora l'adherència sinó al contrari. Això, que inicialment ens podria semblar sorprenent; podria ser degut a la major possibilitat de realineació dels flocs de les provetes al tenir més longitud lliure (menys morter).

Llavors, la flexibilitat de la malla descoberta permetria realinear-se a la proveta, cosa que faria limitar els esforços de segon ordre (flexió i tallant en les vores dels espais lliures), que serien majors en provetes amb major longitud d'ancoratge (més longitud lliure).

Per tant, per concloure aquesta hipòtesis; més morter vol dir menys possibilitats de realineació i més efectes de segon ordre que comprometen resistència.

Tot i això, cal remarcar que una adherència òptima farà assolir valors de tensió més alts ja que el conjunt pot aguantar més càrrega, com es veu en el cas de les provetes de fibra de vidre.

6.5.2. Tensió màxima tangencial de les fibres

Estudiarem aquest paràmetre a partir del següent gràfic obtingut després del tractament de dades dels assajos:

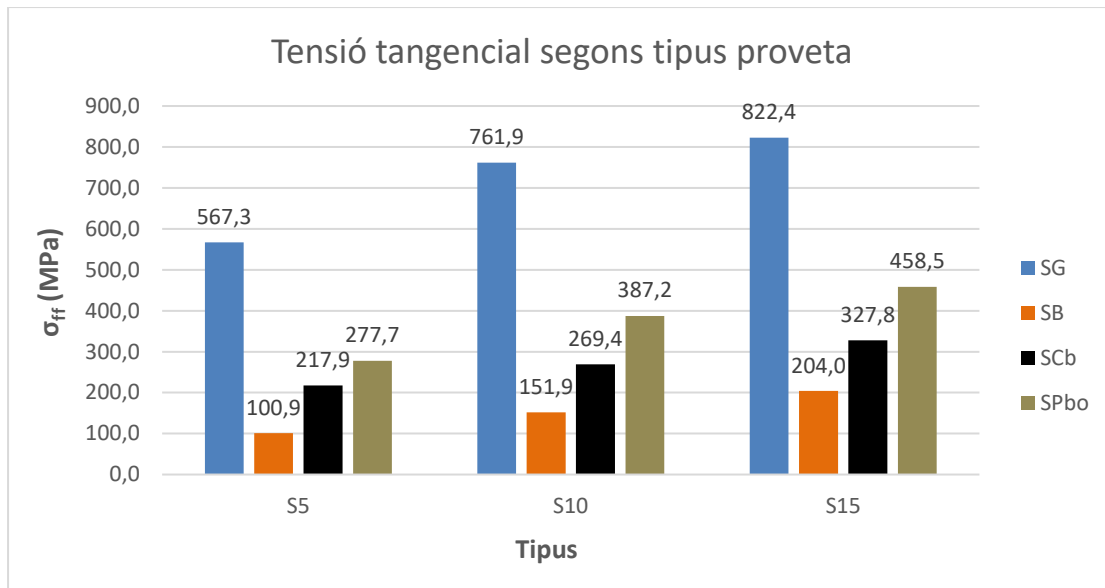


Figura 51. Gràfic comparatiu de la tensió tangencial de les fibres

Com es pot veure a simple vista, els valors de tensió tangencial màxims han estat obtinguts per les fibres de vidre. Això es degut a que tot i que no són les provetes que han aguantat més càrrega, sí que en relació a l'àrea d'ancoratge amb el morter han estat les que més tensió tangencial han suportat. Per tant, es veu reflectit directament amb l'adherència ja que són les úniques provetes que han resultat tenir una adherència òptima.

Posteriorment, podem veure que les provetes de basalt han sigut les que menys tensió tangencial han suportat, seguides de les de carboni i les de PBO. Aquests resultats no són sorprenents. De fet, són representatius al que es va veure durant els assajos i en els gràfics de tensió-deformació de cada proveta.

Per tant, podem afirmar que el paràmetre de la tensió tangencial és un bon indicatiu en el sentit físic de l'adherència fibra-matriu estudiada. A més tensió tangencial que aguantí la fibra, més bona adherència tindrà aquesta a la matriu.

A més a més, es pot veure la relació que té aquest paràmetre amb la longitud d'ancoratge de la fibra al morter. S'han estudiat 3 longituds diferents en les quals es deixava enmig una superfície lliure de 5, 10 i 15 cm.

Com podem veure en el gràfic, a mesura que augmenta la longitud lliure, és a dir, disminueix la longitud d'ancoratge de la fibra al morter, augmenta la tensió tangencial i per tant augmentaria l'adherència. Això, que pot arribar a ser sorprenent, no té el

sentit físic que hauria de tenir. El fet és que les provetes suporten una càrrega màxima similar en tots els casos, per tant, s'ha observat que l'adherència en aquest estudi no ha variat en funció de la longitud d'ancoratge de la fibra amb el morter.

El motiu pel qual els valors de la tensió tangencial augmenten en funció que longitud d'ancoratge disminueix. Això és perquè l'àrea tangencial disminueix en funció que longitud d'ancoratge disminueix. Per tant, com que no hi ha hagut una variació de càrrega màxima suficient en els diferents tipus de provetes amb diferents longituds, la tensió augmenta al dividir la càrrega per una àrea cada vegada més petita.

Per tant, la conclusió corresponent és que amb la longitud d'ancoratge mínima, ja seria suficient.

6.5.3. Mòdul de Young de les fibres

En el següent gràfic, podem veure la mitjana dels diferents mòduls de Young de totes les provetes:

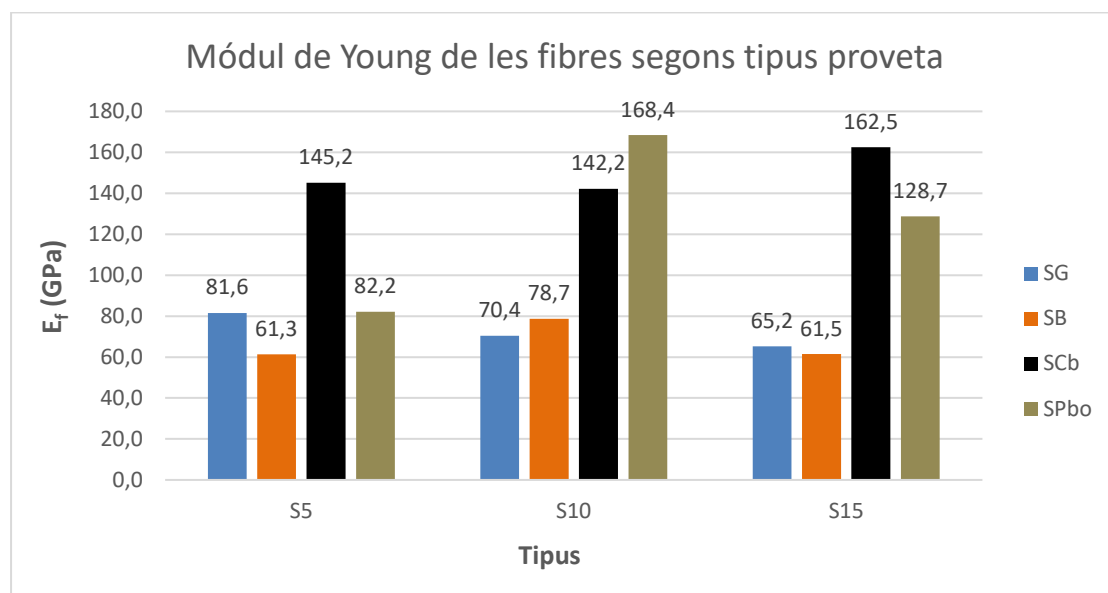


Figura 52. Gràfic comparatiu dels Mòduls de Young de les fibres

Com es pot observar, en aquest gràfic no es veu una relació clara de la variació del mòdul de Young en funció de la longitud d'ancoratge entre provetes.

Tot i això, es pot veure clarament que el mòdul de Young es veu afectat pel lliscament de les provetes. De manera que en les provetes de fibra de vidre, el mòdul de Young és molt similar al indicat pel proveïdor (72 GPa). En canvi, la resta de provetes que

presenten lliscament, obtenen resultats dels mòduls inferiors als proporcionats pels fabricants.

6.5.4. Mòdul de Young del morter

En el següent gràfic, podem veure la mitjana dels diferents mòduls de Young del morter de totes les provetes:

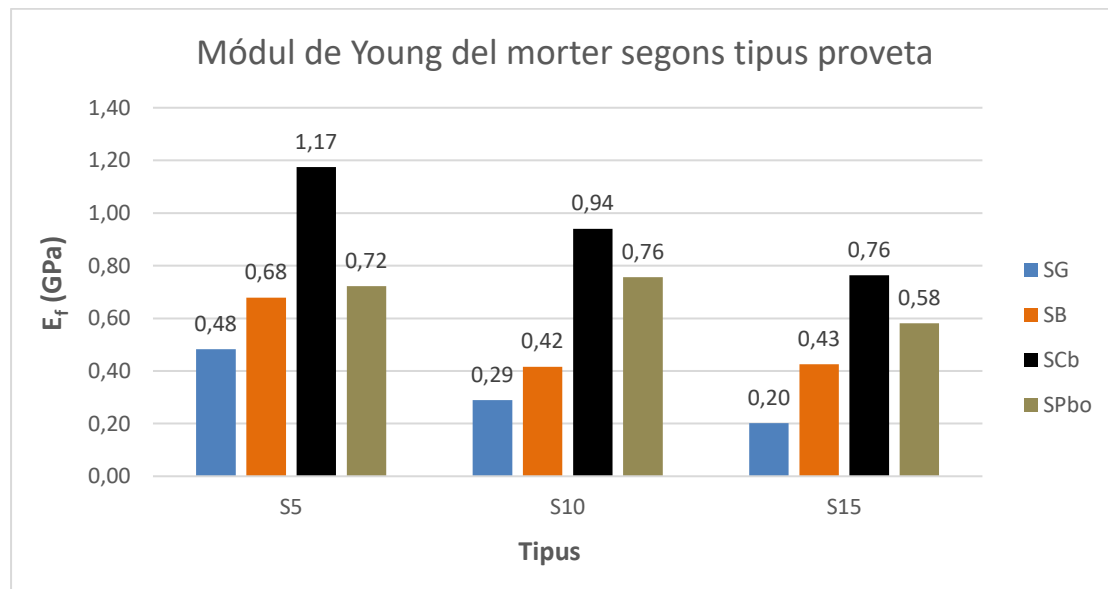


Figura 53. Gràfic comparatiu dels Mòduls de Young del morter

Com es pot observar, en el mòdul de Young del morter sí que es veu una certa relació en funció de la longitud d'ancoratge. A més longitud d'ancoratge, s'observa un mòdul de Young del morter més elevat generalment. Això, podria ser degut a què en les provetes que tenen major longitud d'ancoratge, més contribueix la malla a la rigidesa del conjunt de la proveta, tot i que parcialment llisqui. Per tant, com que el mòdul de les fibres, és molt més elevat que el del morter, al tenir més zona de malla fixada pel morter el conjunt treballa de forma més rígida abans de la fissura del morter.

Així doncs, augmentar la longitud d'ancoratge no augmenta càrrega resistida ni adherència, per sí la rigidesa del FRCM.

6.5.5. Deformació última de les fibres

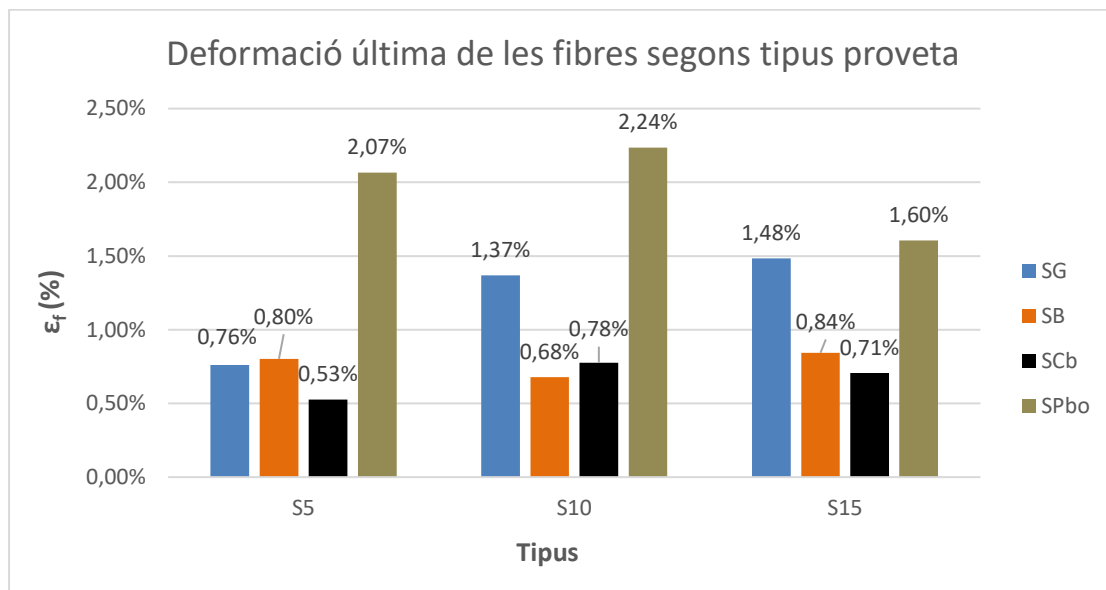


Figura 54. Gràfic comparatiu de la deformació última de les fibres

Com podem veure en aquesta gràfica, podem extreure que, com a norma general, la deformació augmenta en les provetes que tenen més longitud lliure. En el cas de les provetes de PBO, no es veu clarament reflectit ja que baixa en les provetes de 15cm de longitud lliure. Això, segurament es degut al emmascarament dels resultats en la deformació que provoca el lliscament de la malla.

Això, es veu clarament reflectit en les provetes que no llisquen, les provetes de fibra de vidre. A mesura que augmenta la longitud lliure, augmenta la deformació última. Això, pot ser degut a què al tenir més longitud lliure, la malla té més capacitat per repartir esforços i deformar-se més.

Capítol 7. Impacte mediambiental

Primerament, val a dir que la recerca d'aquest estudi, contribueix a reduir l'impacte ambiental de forma qualitativa gràcies a:

- Evitar l'ús de resines per a l'adhesió del FRP en l'alternativa de reforç consistent a enganxar laminats a l'estructura. Per tant, el FRCM és millor alternativa ambiental en aquest sentit.
- Elimina el problema de corrosió dels reforços amb acer, permetent allargar la vida útil de les estructures reforçades i reduir l'impacte que suposa la seva demolició.

Pel que fa a l'impacte mediambiental lligat al desenvolupament del TFG, es pot dir que s'han utilitzat aproximadament 22 kg de morter. Sabent que les emissions de CO₂ del morter per kg són d'aproximadament: 0,222 kgCO₂/kg_{morter} [7]. Per tant, podem estimar unes emissions de CO₂ de 4,88 kgCO₂.

A més a més, també hem utilitzat l'adhesiu epoxi Loctite EA 3425 a l'hora d'adherir les platines; això també té un impacte mediambiental associat.

Capítol 8. Pressupostos

		Element	Cost unitari (EUR)	Unitats (u)	Cost (EUR)
INSTRUMENTACIÓ	Materials	Malla de f. de vidre	0,67 €	6	4,00 €
		Malla de f. de carboni	2,00 €	6	12,00 €
		Malla de f. de basalt	0,50 €	6	3,00 €
		Malla de f. de PBO	6,00 €	6	36,00 €
		Sika Monotop-612	32,95 €	1	32,95 €
		Adhesiu Loctite EA 3425	100,00 €	2	200,00 €
		Altres (cinta+vaselina+claus)	-	-	10,00 €
				TOTAL	297,95 €

Taula 13. Taula pressupostos instrumentació

En la part de la instrumentació, val a dir que no s'ha tingut en compte els costos dels motlles (llistons i fustes base), tampoc el cost del motlle d'adhesió, ni de les platines. Això, es degut a que aquests elements són aprofitables de forma sistemàtica i ja estan totalment amortitzats.

COSTOS DIRECTES	GRUP	REFERÈNCIA	HORAS (h)	PREU/HORA (EUR/h)	COST (EUR)
	PERSONAL	DIRECTOR	8	80	640,00 €
		TÈCNIC DEL LABORATORI	15	50	750,00 €
		ENGINYER DEL PROJECTE	360	20	7.200,00 €
	TOTAL				8.590,00 €
	GRUP	REFERÈNCIA	HORES (h)	PREU/HORA (EUR/h)	COST (EUR)
	INFRAESTRUCTURA	PREMSA INSIGHT 10 KN	8	100	800,00 €
		INSTRUMENTACIÓ	-	-	297,95 €
	TOTAL				1.097,95 €
	COST TOTAL DEL PROJECTE				9.687,95 €

Taula 14. Taula pressupostos general

Capítol 9. Conclusions

En l'estudi realitzat, s'han assajat un total de 36 provetes. En concret, 9 provetes de cada tipus: fibra de vidre, basalt, carboni i polímer PBO. Més concretament, s'han assajat 3 provetes de cada tipus amb 3 longituds lliures de la malla diferents: 50, 100 i 150 mm.

A partir de les dades obtingudes experimentalment i posteriorment analitzades en el capítol 6, s'han pogut extraure les següents conclusions:

- No s'ha obtingut una relació clara sobre si l'efecte d'augmentar la longitud d'ancoratge de la malla al morter, té una repercussió positiva en la tensió màxima de ruptura, el mòdul de Young i la tensió tangencial que caracteritza l'adherència.
- S'ha obtingut una relació en la qual a major longitud d'ancoratge, menor càrrega última (i per tant, tensió màxima) resisteixen sobretot, les provetes que presenten lliscament. Per tant, sembla que augmentar la longitud d'ancoratge, no millora l'adherència. Això, pot ser degut a la realineació de les provetes, que fa que a major longitud lliure, es realineïn més eficientment; evitant així, esforços tallants i de flexió en les vores dels espais lliures.
- El paràmetre estudiat de la tensió tangencial, pot ser un bon paràmetre per tal de caracteritzar l'adherència. De manera que, a més tensió tangencial que suporta la càrrega, s'ha observat que la interacció fibra-matriu, en termes d'adherència, és més bona.
- El mòdul de Young de les provetes que presenten lliscament, és inferior al proporcionat pel fabricant. En canvi, en les provetes de fibra de vidre que no presenten lliscament, aquest mòdul és similar al indicat pel proveïdor. Això, ens indica que la proveta no aprofita totes les propietats de les malles.
- Pel que fa al mòdul de Young del morter, s'ha observat en termes generals que, a mesura que augmenta la longitud d'ancoratge de la malla al morter, el mòdul augmenta. Això, pot ser degut a què la malla contribueixi més en el conjunt, fet que fa augmentar la rigidesa del FRCM.

- Finalment, tot sembla indicar que amb la longitud d'ancoratge mínima, ja seria suficient. Tot i què, se'n pot veure ressentida la rigidesa del conjunt.
- La deformació última augmenta al augmentar la longitud lliure de la malla en les provetes que no llisquen. Això, pot ser degut a què la fibra, té més capacitat per deformar-se i repartir esforços al tenir més longitud lliure. En les provetes que llisquen, el resultat de la deformació podria estar emmascarat pel lliscament de la malla.

Finalment, a nivell de futures línies de treball, una proposta interessant seria estudiar l'adherència variant diferents longituds d'ancoratge de les platines a les provetes amb el mètode Clevis. Així, es podria estudiar la relació que té la longitud d'ancoratge de la platina a la superfície de la proveta i comparar-ho amb aquest estudi. A més a més, també es podria estudiar si aplicar un revestiment a les fibres sintètiques faria augmentar l'adherència i quantificar-ho amb el paràmetre de la tensió tangencial caracteritzat en aquest estudi.

Capítol 10. Referències

- [1] ACI Committee 549, ACI 549.4R-13, (2013). Guide to design and construction of externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) systems for repair and strengthening concrete and masonry structures.
- [2] Escrig Pérez, C. (2015). Estudio del comportamiento mecánico de vigas de hormigón armado reforzadas a flexión y a cortante con materiales compuestos de matriz cementítica. *TDX (Tesis Doctorals En Xarxa)*, 206–207. Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/95831>
- [3] D. Arboleda, F.G. Carozzi, A. Nanni, C. Poggi. (2015). Testing procedures for the uniaxial tensile characterization of fabric-reinforced cementitious matrix composites, *J. Compos. Constr.* 11. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000626.
- [4] Mercedes, L., Gil, L., & Bernat-Maso, E. (2018). Mechanical performance of vegetal fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites. *Construction and Building Materials*, 175, 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.171>
- [5] Donnini, J., & Corinaldesi, V. (2017). Mechanical characterization of different FRCM systems for structural reinforcement. *Construction and Building Materials*, 145, 565–575. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.051>
- [6] Colomer, A. R. (2016). Estudi experimental sobre la relació entre la velocitat d'assaig i les característiques mecàniques del material compost Textile Reinforced-Mortar.
- [7] Mercader, M. P., Ramírez de Arellano, A., & Olivares, M. (2012). Modelo de cuantificación de las emisiones de CO2 producidas en edificación derivadas de los recursos materiales consumidos en su ejecución. *Informes de La Construcción*, 64(527), 401–414. <https://doi.org/10.3989/ic.10.082>

- [8] Ombres, L., Iorfida, A., Mazzuca, S. and Verre, S. (2018). Bond analysis of thermally conditioned FRCM-masonry joints. [online] ScienceDirect. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118304020>
- [9] Carozzi, F. G., & Poggi, C. (2015). Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening. *Composites Part B: Engineering*, 70, 215–230. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.056>
- [10] D'Antino, T., & Papanicolaou, C. (2017). Mechanical characterization of textile reinforced inorganic-matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 127, 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.034>
- [11] de Felice, G., De Santis, S., Garmendia, L., Ghiassi, B., Larrinaga, P., Lourenço, P. B. Papanicolaou, C. G. (2014). Mortar-based systems for externally bonded strengthening of masonry. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 47(12), 2021–2037. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0360-1>
- [12] Vilà, J.A. (2017). Influència de la força de pretesat dels teixits en les propietats mecàniques de materials tipus Fabric-Reinforcement Cementitious Matrix (FRCM).
- [13] Mapei Spain S.A. (2018). Fitxa tècnica MAPEGRIDG220. Recuperat de <http://www.mapei.com/public/ES/products/1033-mapegridg220-es.pdf>
- [14] Mapei Spain S.A. (2014). Fitxa tècnica MAPEGRIDB250. Recuperat de: https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider48/products-documents/1032_mapegridb250_gb.pdf?sfvrsn=bb44532a_0
- [15] Ruredil S.p.A (2012). Fitxa tècnica RUREDIL X MESH GOLD. Recuperat de: http://english.ruredil.it/SchedeProdottoENG/RuredilXMeshGOLD_ing_1.pdf
- [16] Ruredil S.p.A (2014). Fitxa tècnica RUREDIL X MESH C10. Recuperat de: <http://www.conspec-rep.com/pdf/FRCM-C10%20Technical%20Data%20Sheet.pdf>

- [17] Sika AG (2009). Fitxa tècnica SIKA MONOTOP-612. Recuperat de:
<https://esp.sika.com/dms/getdocument.get/753e6720-2bee-342e-80a9-c9a0259bd338/Sika%20MonoTop-612.pdf>
- [18] Henkel-Adhesives (2014). Fitxa tècnica LOCTITE EA 3425. Recuperat de:
<https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/14bd/0900766b814bd9c7.pdf>