



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

---

# FABRICACIÓ D'UN FIBROCIMENT ALTAMENT SOSTENIBLE A PARTIR DE RESIDUS DE LES INDÚSTRIES TÈXTIL I DE LA MINERIA

Treball final de grau  
Enginyeria de Sistemes Biològics

Autora: Paula Santamaría Camacho  
Tutor: Josep Claramunt Blanes  
Cotutor: Payam Sadrolodabae  
03/07/2023

## RESUM

És ben conegut que les civilitzacions mesopotàmica i egípcia construïen els habitatges a base d'argila i palla. Així mateix, els inques i maies feien servir fibres vegetals en la ceràmica per evitar l'aparició d'esquerdes en la fase d'assecatge. És clar que l'ús dels fibrociments ha estat constant al llarg de la història degut a les seves propietats mecàniques. Aquestes propietats, donades per les fibres, consisteixen en una major resistència a les deformacions mantenint la càrrega, cosa que resulta en una major ductilitat.

D'altra banda, la continua degradació del planeta a causa de l'esgotament de recursos naturals i la forta contaminació antropogènica, provoca la contemplació d'alternatives en la producció de materials. Un dels principals problemes en tot el món és la generació de residus.

L'objectiu del present treball és revaloritzar dos tipus de residus, per una banda llots de la pedrera Moratonas i també residus de la indústria tèxtil provinents de l'empresa Triturats La Canya. Per això, es fabricaran plaques de ciment reforçades amb no teixits de residus tèxtils i es caracteritzaran mecànicament.

Amb l'objectiu de trobar les millors propietats mecàniques de la matriu, primer s'han fabricat i assajat sis provetes amb diferents dosificacions per després comparar-les. Seguidament s'han elaborat plaques de 30x30 cm seguint una adaptació del sistema Hastchek. Les plaques, composades de la matriu control i la matriu prèviament escollida, estaven reforçades amb sis capes de fibra de no teixit de residus tèxtils dels les indústries de peces de vestir. Cada placa ha estat assajada als 7 dies (control).

Com a principals indicadors de les propietats mecàniques s'ha calculat, per cada placa, el mòdul de ruptura (MOR), el mòdul d'elasticitat (MOE), el límit de proporcionalitat (LOP) i l'energia absorbida durant l'assaig. S'han realitzat assaigs de tracció i assaigs de flexió de quatre punts.

Els resultats han indicat que les provetes de diferents dosificacions presenten diferències significatives només pel que fa al MOE en flexió. En canvi, en compressió hi ha diferències significatives tant en el MOR i com en el MOE. Parlant del fibrociment, l'energia específica és l'únic paràmetre que mostra diferències significatives entre les plaques. Tot i la dispersió dels resultats dels valors MOR, MOE i LOP, s'ha de tenir en compte que s'ha fabricat la matriu d'una placa amb residus i la matriu de l'altra sense residus. Els resultats indiquen que la valorització de residus de la indústria pedrera i tèxtil dona bons resultats a més de reduir l'impacte ambiental. Els paràmetres mecànics d'una matriu de ciment LC3, que conté només un 50% de ciment Portland, són similars als del ciment Portland convencional. Quan es parla de les propietats mecàniques de plaques de fibrociment, la fabricada amb residu de pedrera dona gairebé els mateixos resultats que la placa de ciment convencional. Respecte als no teixits utilitzats com a fibres de reforç en ciment, augmenten la resistència a deformacions a la mateixa vegada que mantenen la càrrega suportada.

## ABSTRACT

It is well known that the Mesopotamian and Egyptian civilizations built their homes out of clay and straw. Likewise, the Incas and Mayans used vegetable fibers in ceramics to prevent the appearance of cracks during the drying phase. It is clear that the use of fiber cements has been constant throughout history due to their mechanical properties. These properties, given by the fibers, consist of greater resistance to deformations while maintaining the load, which results in greater ductility.

On the other hand, the continuous degradation of the planet due to the exhaustion of natural resources and the strong anthropogenic pollution, causes the contemplation of alternatives in the production of materials. One of the main problems around the world is the generation of waste.

The aim of this work is to revalue two types of waste, on the one hand sludge from the Moratonas quarry and also waste from the textile industry from Triturats La Canya. For this, cement panels reinforced with textile waste nonwovens will be manufactured and mechanically characterized.

With the aim of finding the best mechanical properties of the matrix, six test tubes with different dosages were first manufactured and tested and then compared. Subsequently, 30x30 cm plates were produced following an adaptation of the Hastchek system. The plates, composed of the control matrix and the previously chosen matrix, were reinforced with six layers of non-woven fiber from textile waste from the garment industries. Each plate was tested at 7 days (control).

As the main indicators of the mechanical properties, the modulus of rupture (MOR), the modulus of elasticity (MOE), the limit of proportionality (LOP) and the energy absorbed during the test have been calculated for each plate. Tensile tests and four-point bending tests have been carried out.

The results have indicated that the different dosages provided show significant differences, just because of the MOE in flexion. In canvi, in compression there are significant differences both in the MOR and in the MOE. Speaking of the fibrocement, the specific energy is the only parameter that shows significant differences between the slabs. Tot and the dispersion of the results of the MOR, MOE and LOP values, it must be taken into account that the matrix of a plate with residues and the matrix of the other sense residues have been manufactured. The results indicate that the recovery of waste from the stone and textile industry gives good results in addition to reducing the environmental impact. The mechanical parameters of an LC3 cement matrix, which contained only 50% Portland cement, are similar to those of conventional Portland cement. When it comes to the mechanical properties of fibrocement plates, the one manufactured with quarry residue gives gairebé the mateixos resultsats than the conventional cement plate. Regarding the non-teixits used with reinforcing fibers in the cement, they increase the resistance to deformations to the vegada mateixa that keep the surface supported

## SUMARI

ÍNDEX DE TAULES .....	7
SÍMBOLS I ACRÒNIMS .....	8
AGRAÏMENTS.....	9
1. INTRODUCCIÓ .....	10
1.1 LA FUNCIÓ DE LES FIBRES COM A MATERIAL DE REFORÇ .....	11
1.2 HISTÒRIA.....	12
1.3 PRODUCCIÓ DEL CIMENT CONVENCIONAL .....	12
1.4 MATRIU: CIMENT LC3.....	14
1.5 FIBRES: LLI I RESIDU TÈXTIL.....	15
1.6 FIBROCIMENTS .....	16
2. OBJECTIUS .....	19
3. MATERIALS I MÈTODES.....	20
3.1. MATERIALS .....	20
3.1.1. MATRIUS.....	20
3.1.2. FIBRA .....	23
3.2. MÈTODES.....	24
3.2.4. ASSAIG DE LES PLAQUES .....	32
3.2.5. ANÀLISI DELS RESULTATS DELS ASSAIGS.....	35
4. RESULTATS .....	37
4.1. CARACTERITZACIÓ DE LES MATRIUS.....	37
4.1.1. FLEXIÓ .....	37
4.1.2. COMPRESSIÓ .....	39
4.2. CARACTERITZACIÓ DE LES PLAQUES DE FIBROCIMEN.....	41
4.2.1. ANÀLISI DELS RESULTATS DE LES PLAQUES .....	42
5. DISCUSSIÓ .....	43
5.1. CARACTERÍSTIQUES MECÀNIQUES DE LA MATRIU.....	43
5.2. CARACTERÍSTIQUES MECÀNIQUES DEL MATERIAL COMPOST.....	43
CONCLUSIONS .....	44
BIBLIOGRAFIA.....	45
ANNEXOS.....	47
A. ANNEX A. Fitxa tècnica del ciment .....	47
B. ANNEX B. Relació aigua-ciment a les plaques.....	51
C. ANNEX C. Dimensions i pesos de les provetes i plaques .....	51
D. ANNEX D. Resultats del mètode de Thompson tau modificat .....	53
E. ANNEX E. Corbes tensió-deformació .....	55

## ÍNDIX DE FIGURES

<i>Figura 1.1. Composició del ciment LC3</i> .....	14
<i>Figura 1.2. Classificació de les fibres</i> .....	15
<i>Figura 3.3. (a) Fibres llargues de lli (L); (b)Fibres curtes fetes de residu tèxtil (RT)</i> .....	23
<i>Figura 3.4. Procés de cardat: (a) Obrir les fibres; (b) Passar per la màquina de carda; (c) Red de fibres</i> .....	24
<i>Figura 3.5. Procés de punxonar: (a) Passant per la punxonadora; (b) Després de la punxonadora; (c)Teixits finals de RT</i> .....	24
<i>Figura 3.6. Motlle separat en 3 provetes de 40x40x100cm</i> .....	25
<i>Figura 3.7. Provetes desemmotllades i identificades</i> .....	25
<i>Figura 3.8. (a) Cambra climàtica; (b) Provetes en procés d'enduriment</i> .....	26
<i>Figura 3.9. Assaig de flexió en 3 punts realitzat en premsa amb cèl·lula de càrrega de 300 kN.</i> .....	27
<i>Figura 3.10. Assaig de compressió realitzat en premsa amb cèl·lula de càrrega de 300 kN.</i> ....	29
<i>Figura 3.11. Sistema Hastchek amb càmera de buit incorporada.</i> .....	30
<i>Figura 3.12. Preparació de la premsa per extreure l'aigua sobrant des de perspectives diferents.</i> .....	31
<i>Figura 3.13. (a) Placa curada; (b) Placa tallada en 6 fragments; (c) Serra amb la que es van tallar les plaques; (d) Fragment de la placa en el que es poden apreciar les 6 capes de fibra.</i> .	32
<i>Figura 3.14. Assaig de flexió dels fragments de les plaques on es veuen clarament esquerdes en tot el perfil.</i> .....	33
<i>Figura 3.15. Esquema del càlcul per l'obtenció del MOR, LOP, MOE i energia</i> .....	35
<i>Figura 3.16. Valors del mètode Thompson <math>\tau</math> modificat</i> .....	36
<i>Figura 4.1.. Corbes característiques pels assaigs de flexió de les matrius</i> .....	37
<i>Figura 4.2. Mitjanes obtingudes per a les provetes pels assaigs de flexió. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.</i> .....	38
<i>Figura 4.3. Corbes característiques per a les provetes pels assaigs de compressió.</i> .....	39
<i>Figura 4.4.Mitjanes obtingudes per a les provetes pels assaigs de compressió. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.</i> .....	39
<i>Figura 4.5. Corbes característiques dels fragments de les plaques amb fibra pels assaigs a flexió.</i> .....	41
<i>Figura 4.6.Mitjanes obtingudes per a les plaques pels assaigs de flexió. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.</i> .....	42
<i>Figura A 1. Fitxa tècnica del ciment proporcionada pel fabricant</i> .....	47
<i>Figura A. 2. Composició química i propietats físiques del metacaolí proporcionada pel fabricant</i> .....	48
<i>Figura A.3. Fitxa tècnica del guix proporcionada pel fabricant</i> .....	48
<i>Figura A.4. Fitxa tècnica del fluïdificant proporcionada pel fabricant</i> .....	49
<i>Figura A.5. Fitxa tècnica del desencofrant proporcionada pel fabricant</i> .....	50
<i>Figura E.1. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu C assajades a flexió.</i> .....	55

<i>Figura E.2. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu F assajades a flexió. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.3. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu L1 assajades a flexió. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figura E.4. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu L2 assajades a flexió. ....</i>	<i>56</i>
<i>Figura E.5. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu LC3-L1 assajades a flexió. 56</i>	
<i>Figura E.6. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu M-LC3-L1 assajades a flexió. ....</i>	<i>56</i>
<i>Figura E.7. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu LC3-L2 assajades a flexió. 57</i>	
<i>Figura E.8. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu M-LC3-L2 assajades a flexió. ....</i>	<i>57</i>
<i>Figura E.9. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu LC3-KL-L2 assajades a flexió. ....</i>	<i>57</i>
<i>Figura E.10. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu M-LC3-KL-L2 assajades a flexió. ....</i>	<i>58</i>
<i>Figura E.11. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu C assajades a compressió. ....</i>	<i>58</i>
<i>Figura E.12. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu F assajades a compressió. ....</i>	<i>59</i>
<i>Figura E.13. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu L1 assajades a compressió. ....</i>	<i>59</i>
<i>Figura E.14. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu L2 assajades a compressió. ....</i>	<i>60</i>
<i>Figura E.15. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu LC3-L1 assajades a compressió. ....</i>	<i>60</i>
<i>Figura E.16. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu M-LC3-L1 assajades a compressió ....</i>	<i>61</i>
<i>Figura E. 17. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu LC3-L2 assajades a compressió. ....</i>	<i>61</i>
<i>Figura E. 18. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu M-LC3-L2 assajades a compressió. ....</i>	<i>62</i>
<i>Figura E.19. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu LC3-KL-L2 assajades a compressió. ....</i>	<i>62</i>
<i>Figura E.20. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu M-LC3-KL-L2 assajades a compressió. ....</i>	<i>63</i>

## ÍNDIX DE TAULES

<i>Taula 1. Dosificacions de les diferents matrius en grams. ....</i>	<i>22</i>
<i>Taula 2. Dosificacions de les plaques amb 6 capes de fibra .....</i>	<i>30</i>
<i>Taula 3. Resultats del test de Tukey per a les provetes assajades a flexió. Les mitjanes que no comparteixen un mateix superíndex són significativament diferents. Entre parèntesi, la desviació estàndard. ....</i>	<i>38</i>
<i>Taula 4. Resultats del test de Tukey per a les provetes assajades a compressió. Les mitjanes que no comparteixen un mateix superíndex són significativament diferents. Entre parèntesi, la desviació estàndard .....</i>	<i>40</i>
<i>Taula 5. Resultats del test de Tukey per a les plaques assajades a flexió. Les mitjanes que no comparteixen un mateix superíndex són significativament diferents. Entre parèntesi, la desviació estàndard. ....</i>	<i>42</i>
<i>Taula A.6. Composició química del caolí proporcionada pel fabricant.....</i>	<i>47</i>
<i>Taula B.7. Relació d'aigua-ciment durant i després de l'elaboració de la placa .....</i>	<i>51</i>
<i>Taula C.8. Dimensions i pesos de les provetes de matriu .....</i>	<i>51</i>
<i>Taula C.9. Dimensions de les plaques amb 6 capes de fibra .....</i>	<i>52</i>
<i>Taula D.10. Resultats de MOR obtinguts en l'assaig a flexió de les matrius. Els valors atípics subratllats. Les cel·les en blanc indiquen la falta de dades degut a trencaments. ....</i>	<i>53</i>
<i>Taula D.11. Resultats de MOE obtinguts en l'assaig a flexió de les matrius. Els valors atípics subratllats. Les cel·les en blanc indiquen la falta de dades degut a trencaments. ....</i>	<i>53</i>
<i>Taula D.12. Resultats de MOR obtinguts en l'assaig a compressió de les matrius. Els valors atípics subratllats. Les cel·les en blanc indiquen la falta de dades degut a trencaments. ....</i>	<i>54</i>
<i>Taula D.13. Resultats de MOE obtinguts en l'assaig a compressió de les matrius. Els valors atípics subratllats. Les cel·les en blanc indiquen la falta de dades degut a trencaments. ....</i>	<i>54</i>
<i>Taula D.14. Resultats de l'energia específica en J/m<sup>2</sup> obtinguts en l'assaig a flexió de les plaques de fibrociment. Els valors atípics subratllats. ....</i>	<i>54</i>

## SÍMBOLS I ACRÒNIMS

$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ . Disilicat alumínic (caolinita)

$\text{CaCO}_3$ . Carbonat càlcic

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Sulfat càlcic dihidratat (guix)

C. Placa control

C(C/M). Plaques assajades a compressió

$\text{CO}_2$ . Diòxid de carboni

F. Filler de cal

FL. Fluïdificant

KL. Caolí

LC3. "Limestone Calcined Clay Cement"

LOP. Límit de proporcionalitat

M. Morter

MK. Metacaolí

MOE. Mòdul d'elasticitat

MOR. Mòdul de ruptura

L1. Llot 1

L2. Llot 2

RILEM. Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux

RT. Residu tèxtil



## AGRAÏMENTS

En primer lloc, vull agrair al meu tutor del treball final de grau, Josep Claramunt, per la seva orientació constant i l'ajuda tècnica, que han estat essencials.

També agraeixo al Payam Sadrolodabae per la seva ajuda amb l'anàlisi estadístic dels resultats.

Per últim, agraeixo al Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia per la cessió dels materials necessaris, així com laboratoris i magatzems.

## 1. INTRODUCCIÓ

Avui dia, la indústria de la construcció és responsable del 39% d'emissions de diòxid de carboni relacionades amb l'energia i els processos. El ciment Portland és el material més utilitzat en construcció degut a les seves propietats. El clínquer, producte de la calcinació de roca calcària i argila, és l'element principal utilitzat en la seva producció. L'energia que es consumeix per produir 1000 kg de Ciment Portland és de 5 GJ i es generen 900 kg de CO<sub>2</sub> (Chau, Qiao y Li 2011). En general la seva producció és responsable del 7% de las emissions antropogèniques de CO<sub>2</sub> en tot el món (ANDRES et al. 1999).

Les activitats d'extracció de clínquer i el seu posterior tractament està causant un impacte mediambiental que no és sostenible a llarg termini. Els darrers anys, l'emergència climàtica s'ha convertit en un dels reptes més grans que enfronta la nostra societat. El canvi climàtic, impulsat per les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle derivades d'activitats humanes, està generant impactes significatius al nostre planeta. És evident que calen accions urgents per mitigar i adaptar-se a aquests efectes, i una de les àrees clau per abordar aquesta crisi és la gestió de residus. És per això que una de les solucions estudiada en aquest document és la valorització de residus generats en altres indústries, és a dir, utilitzar aquests per substituir una part del ciment Portland tradicional. La idea es basa en un model d'economia circular, on la producció de ciment implica la reutilització de residus de la indústria minera, fent disminuir gasos d'efecte hivernacle.

La valorització de residus fa referència a la transformació d'aquests en recursos útils, ja sigui a través de la seva reutilització, reciclatge o recuperació energètica. En implementar tècniques de valorització de residus, es poden obtenir beneficis significatius, com ara la reducció d'emissions de gasos amb efecte d'hivernacle, la conservació de recursos naturals, la creació d'ocupació i la generació de noves oportunitats econòmiques.

Si més no, actualment un dels sectors identificat com una font important d'emissions de gasos hivernacle i de l'impacte ambiental és la indústria tèxtil. Aquest impacte ambiental es dona a causa del consumisme desenfrenat en aquest sistema capitalista. La indústria tèxtil s'ha convertit en una de les més grans i globalitzades del món, per la demanda de peces de roba i una constant rotació de tendències de moda. Tanmateix, aquesta producció massiva té conseqüències significatives en termes d'esgotament de recursos naturals, contaminació de l'aigua i aire, i degradació del sòl. És per tot això que cal analitzar i comprendre com mitigar els impactes negatius per aconseguir un futur sostenible.

## 1.1 LA FUNCIÓN DE LES FIBRES COM A MATERIAL DE REFORÇ

Les fibres són materials que es poden incorporar a una varietat de materials, incloent-hi els materials de construcció per millorar diverses propietats d'aquests, com ara la resistència mecànica, la tenacitat, la durabilitat, la resistència al foc i la resistència a la tracció.

Un dels exemples més comuns d'ús de fibres en materials de construcció és en el reforç del formigó. El formigó tradicional és fort en compressió, però té una resistència limitada a la tracció. L'addició de fibres, com ara les de vidre, polímer o acer, augmenta la resistència a la tracció del formigó i millora la seva capacitat per resistir les tensions i evitar el trencament.

Les fibres també poden millorar la tenacitat dels materials de construcció. La tenacitat és la capacitat d'un material per absorbir i dissipar energia en lloc de trencar-se de forma fràgil. Les fibres actuen com a punts de reforç en el material, impeding la propagació de fissures i augmentant la seva resistència a l'impacte.

A més de millorar les propietats mecàniques, les fibres poden afegir durabilitat als materials de construcció. La seva presència ajuda a reduir la formació de fissures i minimitza els danys causats per les forces ambientals, com ara la congelació i descongelació repetides, els canvis de temperatura i els efectes de càrrega i descàrrega cíclica.

En el cas de materials aïllants, com ara els panells aïllants o els materials per a cobertes, l'addició de fibres pot millorar la seva resistència al foc. Les fibres resistents al foc poden retardar la propagació de les flames i ajudar a evitar la deformació i la degradació del material en situacions d'incendi.

En resum, les fibres ofereixen una solució versàtil per millorar les propietats dels materials de construcció. Amb l'addició adequada de fibres en materials com el formigó, es pot augmentar la resistència mecànica, la tenacitat, la durabilitat i la resistència al foc. Aquestes millores contribueixen a la construcció d'estructures més resistents, segures i duradores.

## 1.2 HISTÒRIA

Els materials compostos de matriu i fibra ja s'utilitzaven en la prehistòria per a la construcció. El més utilitzat és la barreja de fang i fibra vegetal. El naixement del fibrociment, però, és a principis del segle XX i es pot atribuir a Hatschek i Amédée Baille-Lemaire. Hatschek és qui va patentar el procés que consistia a estendre capes fines de pasta de ciment i fibres de cel·lulosa sobre una malla de tela metàl·lica i premsar-les per formar una placa sòlida. D'altra banda, Amédée Baille-Lemaire va patentar un procés per a la fabricació de teules de fibrociment, una alternativa lleugera que combinava la resistència del ciment amb les propietats de reforç de les fibres. Es van començar a incorporar fibres d'amiant com a material de reforç degut a les seves propietats físiques i químiques, com la resistència al foc, la capacitat d'aïllament tèrmic i acústic, i la seva resistència a la tracció. (Gabriela Llerena Encalada 2014)

No obstant això, es va descobrir que l'exposició a les fibres d'amiant pot ser extremadament perjudicial per a la salut humana. La inhalació de petites partícules d'amiant provoca malalties greus com càncer de pulmó i altres trastorns respiratoris. A mesura que es van conèixer els riscos de l'amiant per a la salut, la seva utilització va ser prohibit o restringit en molts països. Tot i així, no és fins el 1999 que a la Unió Europea es prohibeix definitivament l'ús de productes amb amiant. («Unión Europea. Directiva 1999/77/CE de la Comisión.» 1999)

Aquesta situació fa que es busquin alternatives amb propietats el més semblant possibles. Una de les opcions que es tenen en compte és l'ús de fibres vegetals, que provenen de residus d'indústries relacionades amb plantes, de boscos o zones forestals, de l'agricultura i fins i tot de restes d'aliments. Paral·lelament es fabriquen fibres sintètiques (fibra de vidre, polivinilacohol...) però aquestes tenen un preu molt més elevat.

## 1.3 PRODUCCIÓ DEL CIMENT CONVENCIONAL

Una matriu de ciment és un component clau en materials com el formigó i el morter. Es refereix a la part de la mescla que forma la base o "col·loide" del material, proporcionant cohesió i resistència. La matriu de ciment és una pasta que es forma quan el ciment en pols es mescla amb aigua i es deixa hidratar i endurir.

En el context de formigó, la matriu de ciment està composta principalment per ciment Portland, un aglutinant hidràulic («UNE-EN 197-1:2011.» 2011). Quan s'afegeix aigua al ciment, s'inicia una reacció química anomenada hidratació, en la qual el ciment forma cristalls i gel hidratat.

El morter, per altra banda, és una barreja de ciment Portland, sorra i aigua. En aquest cas, la matriu està formada per la combinació de ciment i aigua, i la sorra actua com a agregat de farcit.

El principal component del ciment és el clínquer que s'obté de la calcinació de pedra calcària ( $\text{CaCO}_3$ ), argila i altres addicions com sorra o pirita, a temperatures entre  $1350^\circ\text{C}$  i  $1450^\circ\text{C}$  (Ludwig y Zhang 2015). Els components més comuns en la composició del clínquer són:

1. El silicat tricàlcic ( $\text{C}_3\text{S}$ ): Representa el 50-70%. És el responsable de la resistència inicial i de les propietats de durabilitat del ciment.
2. Silicat bicàlcic ( $\text{C}_2\text{S}$ ): Representa el 15-30%. Contribueix a l'enduriment progressiu i a la resistència a llarg termini del ciment.
3. Aluminat tricàlcic ( $\text{C}_3\text{A}$ ): Representa el 5-10%. Proporciona resistència al ciment però és altament reactiu amb l'aigua i pot provocar problemes d'expansió.
4. Ferrit tetracàlcic o aluminoferrósilit ( $\text{C}_4\text{AF}$ ): Representa el 5-10%. Contribueix a l'enduriment i resistència del ciment.

El clínquer pot contenir impureses com ara sulfats, òxid de magnesi, òxid de sodi, òxid de potassi, entre d'altres. Cal tenir en compte que components principals són crítics per determinar les propietats del ciment final.

A més, el ciment Portland pot contenir diverses addicions per tal de modificar les seves propietats i adaptar-se a diferents necessitats i condicions d'aplicació. Algunes d'aquestes addicions són:

1. Putzolanes: Materials silícics o aluminosos que reaccionen amb el calç del ciment durant el procés d'hidratació formant hidròxids i silicats de calci.
2. Escòria d'alt forn: Subproducte de la producció de ferro i acer. Es pot utilitzar com a additiu per incrementar la resistència, reduir la permeabilitat i augmentar la durabilitat en condicions agressives.
3. Fum de sílice: Subproducte de la indústria del vidre i del silici. Té propietats putzolàniques que ajuden a millorar la cohesió i resistència química del ciment.
4. Fillers: Materials mòlts, com ara el carbonat de calci, el talc o el metacaolí. Ajuden a omplir els buits entre partícules de ciment, millorant la seva densitat, treballabilitat i resistència.

Se'n consideren majoritàries totes aquelles que conformen més d'un 5 % en massa del total (Felipe R 2016). També poden contenir addicions minoritàries que no poden sumar més d'un 5 % en massa del total.

## 1.4 MATRIU: CIMENT LC3

El ciment LC3 (“Limestone Calcined Clay Cement”) és un tipus de ciment innovador que ha estat desenvolupat com a alternativa més sostenible al ciment Portland convencional. El ciment LC3 té una composició diferent al Portland ja que utilitza una combinació de calcària (Limestone) i argila calcinada (Calcined Clay) com a matèries principals. Té propietats similars als ciments Portland però amb una reducció del 50% de clínquer, el que pot arribar reduir el 40% d'emissions de CO<sub>2</sub>(Martín y Santos 2022). Com s'aprecia en la **Figura 1.1**, el ciment LC3 està compost per un 50% de clínquer, un 30% d'argila calcinada, un 15% de pedra calcària i un 5% de guix. Es sol fabricar utilitzant pedra calcària i argiles de baixa qualitat en abundants quantitats, ja que quan es combinen tenen un efecte sinèrgic i aconseguen tenir un rendiment similar al ciment Portland.

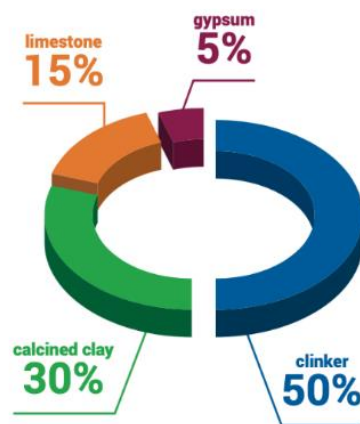


Figura 1.1. Composició del ciment LC3. Figura extreta de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratory of Construction Materials (Suïssa).

Una de les principals avantatges d'aquest ciment innovador és la reducció de les emissions de CO<sub>2</sub>, el fet de reduir la quantitat de ciment Portland convencional fa que tingui un menor impacte ambiental.

També cal dir que l'LC3 fa un ús eficient i sostenible de les matèries primeres locals disponibles. La calcària i l'argila són recursos abundants en moltes regions, el que permet reduir la dependència d'importacions de matèries primeres. Si a més a més, aquests recursos que s'utilitzen són residus generats per indústries properes, la eficiència i sostenibilitat ambiental és encara major.

El ciment LC3 té un ampli rang d'aplicacions perquè es pot utilitzar en una àmplia varietat d'aplicacions de construcció, incloent-hi elements estructurals com parets, paviments i revestiments.

Cal considerar que el ciment LC3 encara està en fase de desenvolupament i implantació, i la seva adopció a gran escala pot variar segons les regions i els requisits normatius locals.

No obstant això, els avantatges potencials del ciment LC3 en la reducció de les emissions de CO<sub>2</sub> i l'ús més sostenible de recursos són prometedors per al futur de la indústria del ciment.

## 1.5 FIBRES: LLI I RESIDU TÈXTIL

En la **Figura 1.2** es mostra una de les classificacions de les fibres segons el seu origen.

Hi ha moltes maneres de classificar les fibres: segons l'origen (naturals, sintètiques, artificials), segons la composició química (orgàniques, inorgàniques), segons l'estructura (monofilament, multifilament, film) o segons les propietats físiques (termoplàstiques, termoestables).

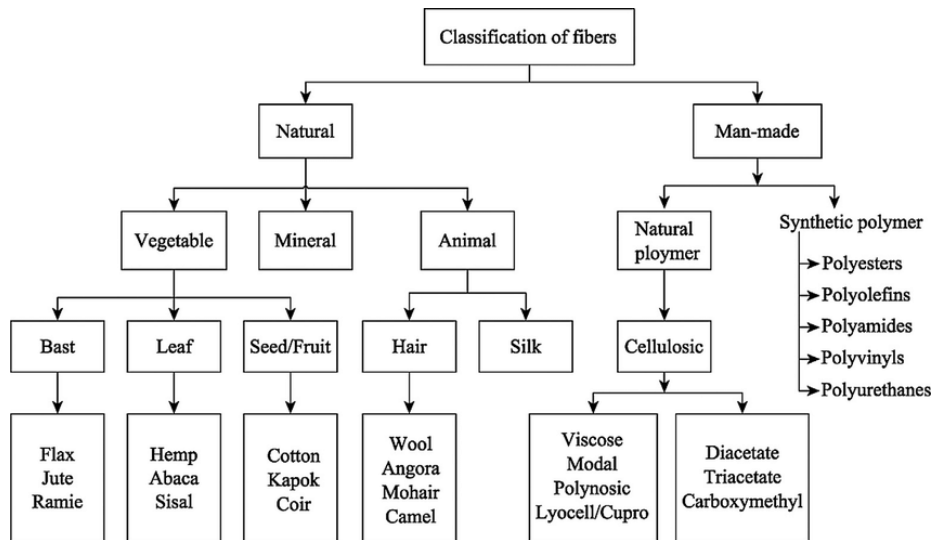


Figura 1.2 Classificació de les fibres

El lli és una fibra natural vegetal obtinguda de la pantà de lli (*Linum usitatissimum*). A continuació es presenten algunes característiques d'aquesta fibra:

1. Resistència: Força relativament elevada comparada amb altres fibres naturals com ara el cotó. La seva resistència a tracció li dona durabilitat i estabilitat en la confecció de teixits i roba.
2. Transpirabilitat: Permet la circulació de l'aire gràcies a la seva estructura, la qual cosa fa que sigui un material transpirable.
3. Absorció d'humitat: Té una capacitat d'absorció d'humitat de fins a un 20% del seu pes.
4. Caràcter ecològic: El cultiu de lli requereix menys aigües i pesticides en comparació amb altres cultius tèxtils. És una opció més sostenible i respectuosa amb el medi ambient.

Els residus tèxtils no són un component comú utilitzat en la fabricació de fibrociment. No obstant això, s'han realitzat investigacions on els residus tèxtils es trituren o desfibren per obtenir fibres curtes que es poden utilitzar com a reforç en fibrociments. Aquestes fibres tèxtils reciclades podrien millorar algunes propietats del material compost final, com la tenacitat i la resistència a la tracció.

## 1.6 FIBROCIMENTS

El fibrociment és un material de construcció reconegut per la seva versatilitat i durabilitat. Consisteix en un compost de ciment, la matriu, reforçada amb fibres. El concepte de fibrociment va sorgir com una resposta a la necessitat de trobar un material que pogués combinar la resistència del ciment amb la flexibilitat i la tenacitat de les fibres. Aquesta combinació va permetre un material que era més lleuger i més fàcil de manipular i instal·lar en comparació a altres materials de construcció tradicionals.

El fibrociment sempre ha estat utilitzat en una àmplia gamma d'aplicacions constructives, incloent-hi cobertes, revestiments de façana, canonades, làmines, panells, entre d'altres.

Hi ha diverses formes d'incorporar les fibres dins la matriu: fibra dispersa, teixides, no teixides, en punt de mitja, encolades o trenades («Fibrous materials reinforced composites production techniques A2 - Fanguero, R. BT - Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications.» [sin fecha]).

L'elecció d'una forma o una altra implica diferències com són el procés de fabricació, la densitat del fil, el nombre de filaments, la naturalesa de les unions de les fibres... Aquestes diferències poden influir en l'estabilitat i les propietats mecàniques ja que presenten diferents graus de penetrabilitat de la matriu. Per tant, el procés d'elaboració dels fibrociment ha d'assegurar una alta penetració augmentant així la interacció entre la matriu i la fibra.

Hi ha diferents tipus de fibrociments usats com a substituïts del d'amiant. S'acostumen a classificar en quatre grups en funció de la naturalesa de les fibres:

### 1. Formigó reforçat amb fibres metàl·liques

Les fibres metàl·liques poden ser d'alumini, carboni o acer. Les més utilitzades són les d'acer. El material compost resultant del reforç de formigó amb fibres d'acer es caracteritza per la seva alta resistència. Aquesta està directament relacionada amb la llargada de les fibres. La col·locació de les fibres dins la matriu es pot fer de forma dispersa, o amb una malla o làmina metàl·lica. Les fibres d'acer milloren les característiques mecàniques dels morters reduint l'aparició de fissures, aportant ductilitat incrementant la resistència a tensió i augmentant la durabilitat. També permeten que els gruixos siguin menors i, consegüentment, un estalvi econòmic. Alguns dels seus usos són en lloses eliminant així l'ús d'armadures; en revestiments de túnels i estabilització de talussos; en reparacions; i en estructures exposades a impactes i/o explosions. (Hegger y Voss 2008)



## 2. Formigó reforçat amb fibres de vidre

La principal avantatge de les fibres de vidre és que s'usen de tipus AR Cem-FIL resistents a l'alcalinitat. Això aporta una gran durabilitat del material compost en el temps i davant l'exposició a fenòmens atmosfèrics. Aquestes fibres tenen un mòdul d'elasticitat superior a la majoria de fibres orgàniques però menor que el de l'acer.(Andrea et al. 2019)

Altres beneficis del formigó reforçat amb fibres de vidre és la seva resistència a flexió i tracció, elevada resistència a l'impacte, reducció del pes i gran aptitud per ser modelats. Això es degut a que les fibres de vidre són fines, llargues i flexibles fabricades amb vidre de silicat. Aquestes es distribueixen de manera uniforme a la barreja de formigó.

## 3. Ciment reforçat amb fibres sintètiques

S'entén per fibres sintètiques aquelles que s'obtenen a partir de polímers sintètics normalment derivats del petroli.

Existeixen dos grans grups de fibres sintètiques, les microfibras i les macrofibras.

- Microfibras: Tenen un diàmetre inferior a 0,3 mm, són fibres fines i curtes, i s'utilitzen per controlar les fissures per contracció i millorar la resistència a l'esquerdament per retracció del ciment. Degut a la seva mida, es barregen de forma uniforme i donen reforç a escala microscòpica, és a dir, distribueixen tensions i redueixen les fissures microscòpiques.
- Macrofibras: Tenen un diàmetre de 0,3 mm a 1 mm, són més llargues i gruixudes. Donen reforç estructural i resistència a esforços de tracció i flexió en el ciment. Degut a la seva mida, les microfibras resisteixen càrregues més pesades. S'utilitzen per controlar les fissures per flexió i millorar la tenacitat del material.

Poden ser de diferents materials, com propilè, polietilè, poliamida o polièster. El polipropilè és la fibra amb el mòdul d'elasticitat més baix però la gran varietat de formes i mides en que es pot trobar faciliten la seva unió amb la matriu. També aporta un augment de la ductilitat fet que fa que s'usin sovint combinades amb fibres d'acer. El polièster és el que presenta una resistència superior i un mòdul d'elasticitat superior.

#### 4. Ciment reforçat amb fibres d'origen natural

Les darreres dècades s'ha estudiat profundament la viabilitat dels fibrociments fets a base de fibres d'origen natural. Amb la creixent preocupació per la crisi climàtica s'han estudiat multitud de fibres de diferents orígens. L'origen de les fibres pot ser natural o artificial. Les fibres naturals s'obtenen sense l'ús de químics, mentre que les artificials, provenen de materials naturals però passen per un procés per tal d'obtenir fibres amb millors propietats.

Quan es parla de fibres d'origen natural, el principal avantatge és l'elevada disponibilitat, la baixa densitat, una petjada de carboni nul·la i una bona degradabilitat. Això fa que els ciments reforçats amb fibres natural, sobretot vegetals, siguin lleugers i puguin alleugerir el cost.

No obstant, les fibres vegetals presenten alguns desavantatges que limiten força la seva implementació. Són fibres amb una alta capacitat d'hidratació el que fa modificar el seu volum, baixa resistència a l'alcalinitat i susceptibilitat a patir atacs biològics. Això fa que el principal inconvenient sigui la seva poca durabilitat.

#### 5. Ciment reforçat amb fibres de la indústria tèxtil

Respecte a la reutilització de roba per a fabricar fibres de reforç, recentment, han sorgit projectes com RECYBUILDMAT des de TECTEX, un grup de recerca en tecnologia tèxtil de la UPC. Té com a objectiu, entre d'altres, dissenyar materials per a la construcció sostenible a partir de fibres que són teles no teixides fabricades amb fibres recuperades de residus de roba (Ardanuy, Claramunt y Ventura 2021). Les teles no teixides consisteixen en formar xarxes amb fibres que s'uneixen per procediments mecànics, però sense ser teixides. Els estudis consisteixen en fabricar un material compost format per una matriu cimentosa i teles no teixides punxonades. S'ha vist que els no teixits arriben a una flexió de més de 30 mm i resistències de més de 30 MPa sense que el material compost es trenqui en dos. És per aquests avantatges que s'utilitzen no teixits en aquest projecte.

## 2. OBJECTIUS

L'objectiu principal d'aquest treball de final de grau és determinar les propietats mecàniques d'un material compost fet a partir de ciment Portland i residu de pedra calcària de la pedrera Moratonas a Sant Vicenç de Castellet reforçat amb no teixit de la indústria tèxtil provinent de la empresa Triturats La Canya per tal de comparar-les amb els les característiques d'un material compost fet de ciment Portland sense residu.

Així doncs, el treball consta d'uns objectius específics que són els següents:

- Realitzar una caracterització de les matrius amb diferents dosificacions de residus de pedra calcària a partir d'assajos de flexió i compressió.
- Analitzar els resultats dels assajos i fer un estudi estadístic per decidir la matriu més sostenible a la vegada que resistent per fer la placa de fibrociment.
- Realitzar la caracterització de la placa de fibrociment mitjançant un assaig de flexió de 4 punts.
- Comprovar si realment un fibrociment amb una matriu feta amb residus de pedrera pot tenir propietats mecàniques semblants a un fibrociment amb una matriu de ciment convencional.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

#### 3.1. MATERIALS

##### 3.1.1. MATRIUS

- **Ciment**

Totes les matrius per elaborar el material compost tenien una base de ciment de nom comercial Super Dragón fabricat per Cementos Molins Industrial, S.A. És ciment Portland tipus I de categoria resistent molt alta: 52,5 R. Està compost majoritàriament per clínquer amb només un 2 % de pedra calcària. Es caracteritza per la seva elevada resistència a la compressió, tant inicial com final, i per un ràpid enduriment. («Cemento SUPER-DRAGON - Cementos Molins Industrial, S.A.» 2020)

- **Caolí**

El caolí és una argila blanca utilitzada en la fabricació de porcellana i altres materials ceràmics com rajoles. És silicat d'alumini hidratat format per la descomposició de feldespat i altres silicats d'alumini. La seva fórmula química és  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ . Es va utilitzar un de la marca Arciresa.

- **MK**

El metacaolí va ser utilitzat per donar resistència mecànica i per reduir la permeabilitat degut a la porositat refinada produïda per l'efecte putzolànic d'aquest (Antoni 2013). És un material suplementari en la fabricació de ciment i es produeix en calcinar el caolí a temperatures de 550°C. Es tracta de silicat d'alumini deshidratat. Es va utilitzar un de la marca Arciresa.

- **Guix**

El guix és un mineral format per sulfat càlcic dihidratat ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ). És un material que endureix ràpidament quan es barreja amb aigua, és un bon aïllant tèrmic i regulador de la humitat. Es va fer servir un guix de la marca Beissier.

- **Llots 1 i 2**

Dos tipus de residus de la pedrera de roca ornamental localitzada al municipi de Sant Vicenç de Castellet. Els residus que es generen en aquesta indústria són llots, una barreja d'aigua i sediments de pedra calcària procedent de la pedrera. Aquests llots són tractats per tal d'eliminar l'aigua i obtenir material sòlid. Els components dels residus més abundants són la roca carbonàtica, com és la pedra calcària, una roca sedimentària composta principalment per calcita i dolomia, la roca metamòrfica, quars i bioclasts, fragments de bivalves, equinoderms i foraminífers.

La única diferència entre llots és la mida dels clasts, els del llot 1 són més grans i es classifiquen com a rudites.

- Llot 1: prové de la pedrera. La roca es pot classificar com a **calcitorudita amb bioclasts**.
- Llot 2: és un residu del poliment, operació que es fa per allisar una superfície i eliminar rugositats. Prové d'una roca que es pot classificar com a **calcitoarenita amb bioclasts**.

- **Filler de cal**

El filler de cal és pedra calcària composta principalment per carbonat de calci ( $\text{CaCO}_3$ ), generalment calcita. En construcció, el filler calcari millora les característiques resistents i la durabilitat del formigó. Es va fer servir filler tipus F de l'empresa Reverté, que compleix amb la norma UNE-EN 13139:2003. («UNE-EN 13139:2003. Norma española. Áridos para morteros» 2003) Aquest filler té una distribució granulomètrica calibrada i consistent i no conté sulfats, sofre ni matèria orgànica.

- **Fluidificant**

Els fluidificants, també coneguts com a reductors d'aigua, són additius que incrementen el nivell de fluïdesa fent més fàcil la barreja en l'elaboració de morters. S'utilitza el fluidificant SikaPlast 1003 NG, que té una base química de policarboxilat modificat. La dosificació recomanada és de 0,4% fins al 2,0%.

- **Desencofrant**

L'agent desencofrant evita l'adherència del formigó o del morter als encofrats. S'utilitza el SikaDesencofrant LN, amb una base química d'oli mineral.

- **Aigua**

L'aigua utilitzada en aquest projecte és desionitzada, és a dir, s'han extret cations com el sodi, el calci, el ferro i altres, i anions com el carbonat, el fluorur i altres, mitjançant un intercanvi iònic.

En l'Annex A es mostren les fitxes tècniques i característiques dels materials proporcionades pels fabricants.

La **Taula 1** mostra les diferents dosificacions de les matrius que es van estudiar amb la finalitat de trobar quina era la més apte.

En primer lloc, es va elaborar una matriu amb ciment i aigua únicament que es va anomenar “C” de control.

També es van fer matrius amb la mateixa quantitat de ciment que de filler de cal (F), i amb la mateixa quantitat de ciment que dels diferents llots (L1 de llot 1 i L2 de llot 2).

En relació amb l'interès d'aquest projecte, es van elaborar matrius de ciment LC<sup>3</sup> (**Limestone Calcined Clay Cement**), traduït de l'anglès ciment d'argila calcinada de pedra calcària. Aquest ciment té com a característica que és baix en carboni, ja que es disminueix el clinker un 50% i s'utilitzen altres materials com un 5% de guix, un 15% de pedra calcària (en aquest cas, els llots provinents de pedreres) i un 30% d'argila calcinada, metacaolí. Les matrius LC3-L1 (lloc 1) i LC3-L2 (lloc 2) estan formades d'aquest ciment LC3.

Es van voler preparar matrius LC3 modificades (M-LC3), amb encara més residu que les anteriors, les matrius M-LC3-L1 i M-LC3-L2. Tenen menys quantitat encara de ciment, un 37,5%, i de guix, un 2,5% però més metacaolí, 40%, i més residu, 20%.

Per últim, es va fer una prova de LC3 amb caolí i lloc 2 (LC3-KL-L2) i les dosificacions anteriors dels morters amb més residu però amb caolí i lloc 2 (M-LC3-KL-L2).

*Taula 1. Dosificacions de les diferents matrius en grams.*

Nom	Ciment	MK <sup>1</sup>	KL <sup>2</sup>	Guix	Llot 1	Llot 2	Filler cal	Aigua	FL <sup>3</sup>	Total	a/c <sup>4</sup>
<b>C</b>	2687,5	0	0	0	0	0	0	941,25	27,5	2687,5	0,35
<b>F</b>	1440	0	0	0	0	0	1440	756	26	2880	0,26
<b>L1</b>	1200	0	0	0	1200	0	0	630	17,5	2400	0,26
<b>L2</b>	1200	0	0	0	0	1200	0	630	9,5	2400	0,26
<b>LC3-L1</b>	1440	892,5	0	100,5	447	0	0	447	57,6	2880	0,31
<b>M-LC3-L1</b>	1080	1152	0	72	576	0	0	330,75	57,6	2880	0,31
<b>LC3-L2</b>	1440	892,5	0	100,5	0	447	0	447	57,6	2880	0,31
<b>M-LC3-L2</b>	1080	1152	0	72	0	576	0	330,75	57,6	2880	0,31
<b>LC3- KL-L2</b>	1440	0	892,50	100,5	0	447	0	1080	57,6	2880	0,38
<b>M-LC3-KL-L2</b>	1080	0	1152	72	0	576	0	972	57,6	2880	0,34

<sup>1</sup> Metacaolí

<sup>2</sup> Caolí

<sup>3</sup> Fluidificant

<sup>4</sup> a/c és la relació aigua-ciment. El pes de l'aigua sempre ha de ser menor que el pes del ciment.

### 3.1.2. FIBRA

La fibra curta que es va utilitzar per fabricar no teixits procedia de residus tèxtils (RT) de Triturats La Canya S.A (Espanya). Aquesta fibra consistia en un 31% de polièster i un 69% de cotó. Degut a que les fibres de residus tèxtils eren molt curtes, es van barrejar amb fibres de lli (L) més llargues (60 mm) proporcionades per l'Institut Naturalnych (Polònia). (Sadrolodabae et al. 2021)

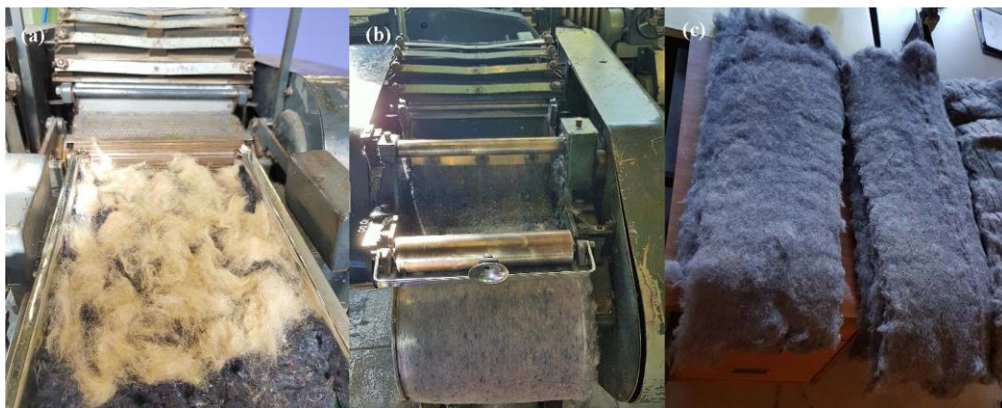


*Figura 3.3. (a) Fibres llargues de lli (L); (b) Fibres curtes fetes de residu tèxtil (RT)*

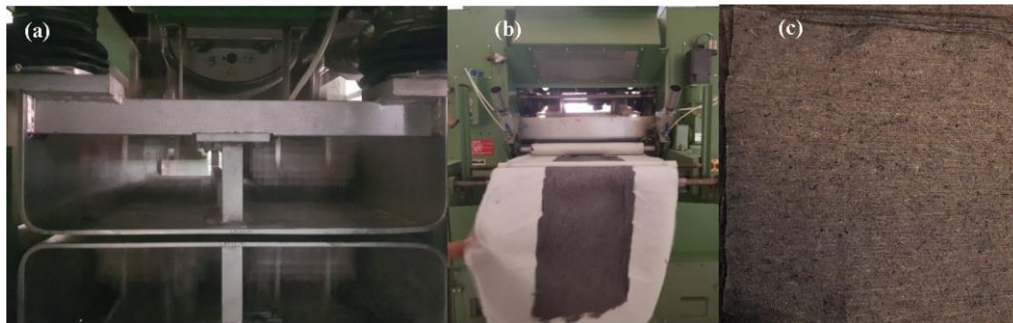
## 3.2. MÈTODES

### 3.2.1. ELABORACIÓ DELS NO TEIXITS

No es van elaborar els no teixits en aquest projecte. S'extreu la informació sobre l'elaboració i anàlisi d'aquests de l'article de P. Sadrolodabae (2021) (Sadrolodabae et al. 2021). En primer lloc, es van obrir 52 g de fibres curtes de RT amb 28 g de fibres llargues L i es van cardar formant napes uniformes. (**Figura 3.4**). Aquestes napes formades per 65% de RT i 35% de fibra F, es van passar per la punxonadora per finalment obtenir els no teixits (**Figura 3.5**). De cada napa tractada es van obtenir no teixits de 0,75 mm de gruix i un gramatge de 155 g/m<sup>2</sup>.



*Figura 3.4. Procés de cardat: (a) Obrir les fibres; (b) Passar per la màquina de carda; (c) Red de fibres*



*Figura 3.5. Procés de punxonar: (a) Passant per la punxonadora; (b) Després de la punxonadora; (c) Teixits finals de RT*

Es van realitzar assajos de tracció dels no teixits utilitzant un textuòmetre TA.XT amb una cèl·lula de càrrega de 0,5 kN i una velocitat de desplaçament de 100 mm/min.

Els resultats de l'assaig de tracció de les fibres van indicar que la càrrega màxima de ruptura per tracció (per pes) dels no teixits es 2 N/g amb un coeficient de variació del 19%. La força màxima suportada va ser de 28 N. Els valors són molt baixos degut a la que la major part d'aquestes fibres es conforma de residus tèxtils reciclats com són el polièster i el cotó.



### 3.2.2. PREPARACIÓ DE LA MATRIU

Seguint la norma UNE EN 196-1:2005 («(EX)UNE-EN\_196-1=2005»), es van fabricar 6 provetes de cada dosificació (**Taula 1**). Es van utilitzar 2 motlles de 3 provetes de 4x4x16 cm cadascuna com els de la **Figura 3.6**. Un cop feta la barreja es va introduir al motlle i es va deixar assecar per 24h.

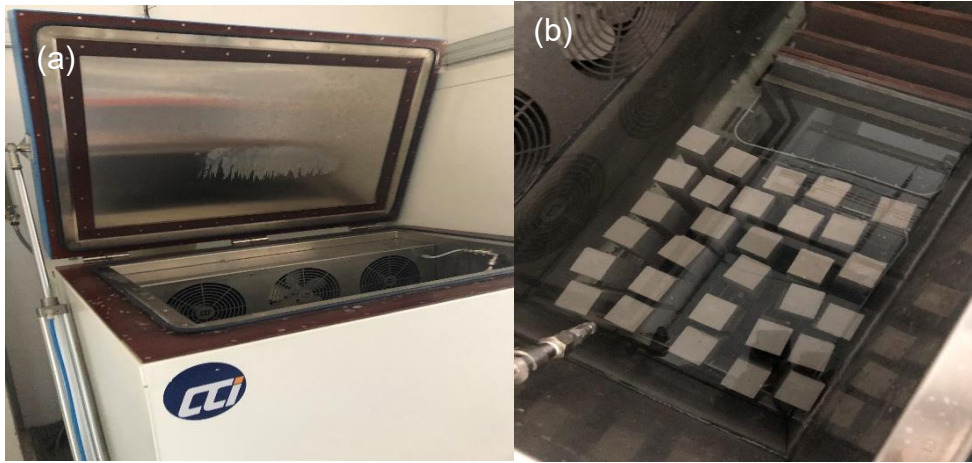


*Figura 3.6. Motlle separat en 3 provetes de 4x4x16 cm*

Passades les 24h es van desemmotllar i numerar les peces de l'1 al 6 per a cada matriu (**Figura 3.7**). A continuació, es van deixar en la cambra tèrmica de la **Figura 3.8** amb aigua a 20°C.



*Figura 3.7. Provetes desemmotllades i identificades*



*Figura 3.8. (a) Cambra climàtica; (b) Provetes en procés d'enduriment*

### 3.2.3. ASSAIG DE LES MATRIUS

Després de 28 dies a la cambra es van pesar les peces (ANNEX C) i es van realitzar els assajos de flexió i compressió al Laboratori de Preparació de Mostres Vegetals de l'EEABB, l'Escola d'Enginyeria Agroalimentària i de Biosistemes de Barcelona (UPC).

#### 3.2.3.1. FLEXIÓ

L'assaig de flexió es va dur a terme a la premsa de la **Figura 3.9**. La cèl·lula de càrrega utilitzada va ser la de 300 kN. La velocitat d'assaig va ser de 10 mm/min. Es va optar per l'assaig de tres punts per la seva precisió com recomana el la norma UNE. («(EX)UNE-EN\_196-1=2005. norma española» 2005)



*Figura 3.9. Assaig de flexió en 3 punts realitzat en premsa amb cèl·lula de càrrega de 300 kN.*

Un cop obtingudes les dades, es van calcular diferents paràmetres mecànics. Per un assaig de tres punts les fórmules són les següents:

- Deformació

$$\delta = \frac{6 \cdot f \cdot h}{l^2} \quad \text{Equació 3.1}$$

- Tensió (MOR): valor màxim de tensió al llarg de l'assaig.

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad \text{Equació 3.2}$$

- Mòdul d'elasticitat (MOE): Mesura de la rigidesa de la placa. Relaciona la deformació amb la tensió suportada. És el pendent de la recta tensió-deformació en el seu tram elàstic.

$$MOE (N/mm^2) = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\delta_2 - \delta_1} \quad \text{Equació 3.3}$$

o bé:

$$MOE (N/mm^2) = \frac{(F_2 - F_1) \cdot l^3}{4 \cdot (f_2 - f_1) \cdot b \cdot h^3} \quad \text{Equació 3.4}$$

On:

$\delta$  = deformació

$\sigma$  = tensió (Mpa)

F = força (N)

l = llargada (mm)

f = posició (mm)

b = amplada (mm)

h = gruix (mm)

### 3.2.2.2. COMPRESSIÓ

L'assaig de compressió es va dur a terme a la mateixa premsa però la cèl·lula de càrrega utilitzada va ser la de 300 kN.



Figura 3.10. Assaig de compressió realitzat en premsa amb cèl·lula de càrrega de 300 kN.

Igual que en l'assaig de flexió, amb les dades obtingudes, es van calcular els diferents paràmetres. En aquest cas, la tensió i la deformació es van determinar amb les següents fórmules:

- Deformació

$$\delta = \frac{f}{h} \quad \text{Equació 3.5}$$

- Tensió (MOR): valor màxim de tensió al llarg de l'assaig.

$$\sigma = \frac{F}{b \cdot h} \quad \text{Equació 3.6}$$

- Mòdul d'elasticitat (MOE): Mesura de la rigidesa de la placa. Relaciona la deformació amb la tensió suportada. És el pendent de la recta tensió-deformació.

$$MOE (N/mm^2) = \frac{\sigma_2 - \sigma_1 (MPa)}{\delta_2 - \delta_1 (mm/mm)} \quad \text{Equació 3.7}$$

### 3.2.3. ELABORACIÓ I CURAT DE PLAQUES

Un cop escollida la millor matriu, es van elaborar les dues plaques amb 6 capes de fibra cadascuna. Les matrius fabricades van ser C (100% Ciment Portland) i M-LC3-L2 (matriu amb més residu i menys ciment que els LC3).

Aquestes van ser les dosificacions de les plaques:

*Taula 2. Dosificacions de les plaques amb 6 capes de fibra*

Nom	Ciment (g)	MK (g)	Guix (g)	Llot 2(g)	Aigua (g)	FL (g)	Total (g)	a/c
<b>C</b>	1600	0	0	0	1200	0	1600	0,75
<b>M-LC3-L2</b>	600	640	40	320	1360	5	1600	0,85

Es va fer servir una adaptació del sistema Hastchek (**Figura 3.11**), un motlle amb petits orificis a la part inferior que, connectat a una cambra de buit, permet extreure aigua durant el procés d'elaboració de la placa. Per evitar que pels orificis s'hi extragués el ciment, entre el motlle i la primera capa de ciment es col·loca un teixit procedent de la indústria paperera que fa de filtre. És important impregnar el teixit amb desencofrant, en aquest cas de la marca Sika, per garantir que després es pogués treure la placa sense causar desperfectes.



*Figura 3.11. Sistema Hastchek amb càmera de buit incorporada.*

Aquests van ser els passos a seguir per elaborar les plaques amb sis capes de fibra:

1. Fer la barreja de ciment amb una relació aigua-ciment elevada per poder impregnar les fibres.
2. Posar una primera capa de ciment fluid en el motlle.
3. Fer el buit per eliminar l'aigua.
4. Col·locar el ciment fluid dins una safata i impregnar una capa de fibra, prèviament mullada amb aigua calent.
5. Introduir la fibra impregnada dins del motlle, mirant que estigui ben estirada.
6. Fer el buit per eliminar l'aigua del fluid.
7. Repetir els passos 4, 5 i 6 amb les 6 capes de fibra.
8. Col·locar un teixit que fa de filtre, prèviament impregnat en desencofrant, un cop introduïdes totes les capes de fibra.
9. Posar a sobre una llosa metàl·lica.

Finalment, per extreure l'aigua sobrant, es va introduir el motlle a la premsa (**Figura 3.12**) durant 24 hores a una força de 300 kN. Es va premsar utilitzant el mòdul de càrrega màxima de 300 kN. Passades les 24 hores, les plaques es van posar a curar en aigua. El curat es va realitzar en una safata plena d'aigua a temperatura ambient durant 7 dies.



*Figura 3.12. Preparació de la premsa per extreure l'aigua sobrant des de perspectives diferents.*

Un cop acabat el procés d'elaboració de la placa, es va pesar l'aigua recollida del buit i del premsat. Per saber la relació real ciment – aigua es va fer la diferència entre el pes d'aigua inicial i el final (**Annex A**).

### 3.2.4. ASSAIG DE LES PLAQUES

Es va plantejar assajar les dues plaques a flexió.

Les plaques, un cop curades, van ser tallades en sis fragments d'amplada similar per ser assajades d'acord amb les recomanacions del RILEM.

Per fer-ho es va utilitzar una serra de la marca Mecánica Científica S.A. model 27.0190 (**Figura 3.13**), la qual consta de dues fulles separades 10 cm.

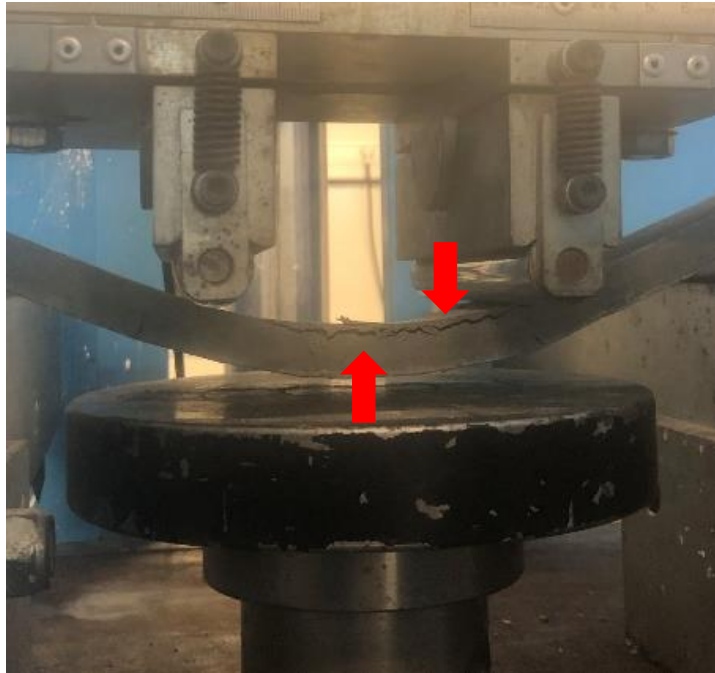


*Figura 3.13. (a) Placa curada; (b) Placa tallada en 6 fragments; (c) Serra amb la que es van tallar les plaques; (d) Fragment de la placa en el que es poden apreciar les 6 capes de fibra.*



L'assaig de flexió es va dur a terme a la mateixa premsa on es van fer els assajos de flexió i compressió de les matrius i on es van compactar les plaques. En aquest cas, la cèl·lula de càrrega que es va utilitzar va ser la de 3 kN. Es va optar per realitzar l'assaig de quatre punts per la seva precisió com recomana el comitè RILEM. («Test for the determination of modulus of rupture and limit of proportionality of thin fibre reinforced cement sections»)

A la **Figura 3.14** es pot veure l'aparició esquerdes després de l'assaig de flexió. Aquestes indiquen les deformacions del material i la pèrdua d'elasticitat.



*Figura 3.14. Assaig de flexió dels fragments de les plaques on es veuen clarament esquerdes en tot el perfil.*

Amb les dades obtingudes de força i posició, es van calcular els següents paràmetres:

- Deformació

$$\delta = \frac{108 \cdot f \cdot h}{23 \cdot l^2}$$

- Tensió (MOR): valor màxim de tensió al llarg de l'assaig.

$$\sigma = \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2}$$

- Mòdul de ruptura (MOR): Tensió unitària màxima que suporta una placa abans de la ruptura.
- Límit de proporcionalitat (LOP): Tensió unitària màxima a la que es pot sotmetre el material sense que pateixi deformacions no reversibles.
- Mòdul d'elasticitat (MOE): Mesura de la rigidesa de la placa. Relaciona la deformació amb la tensió suportada. És el pendent de la recta tensió-deformació fins el LOP.

$$MOE \left( \frac{N}{mm^2} \right) = \frac{23 \cdot (F_2 - F_1) \cdot l^3}{108 \cdot (f_2 - f_1) \cdot b \cdot h^3}$$

- Energia específica: Quantitat d'energia que absorbeix la placa durant l'assaig. Consisteix en l'àrea de la corba força-posició per unitat de superfície. Es calcula l'àrea fins que la corba descendent arriba al 40 % del MOR o un 10 % de la llargada entre mordasses o suports.

$$Energia (J) = \frac{(F_2 - F_1)}{2} \cdot (f_2 - f_1)$$

$$E_{específica} (J/mm^2) = \frac{\Sigma E}{b \cdot h}$$

$\delta$  = deformació

$\sigma$  = tensió (Mpa)

F = força (N)

l = llargada (mm)

f = posició (mm)

b = amplada (mm)

h = gruix (mm)

### 3.2.5. ANÀLISI DELS RESULTATS DELS ASSAIGS

Amb les dades extretes dels assaigs es van dibuixar les corbes tensió-deformació. Es va poder determinar el mòdul de ruptura (MOR) i el mòdul d'elasticitat (MOE). A més a més en les plaques es va determinar l'energia específica i de forma gràfica també el límit de proporcionalitat (LOP) tal i com es mostra en **la Figura 3.15**.

Després de dibuixar totes les corbes de les peces, s'escull la corba representativa. La corba representativa és aquella que més s'apropa a les mitjanes dels paràmetres de tot el conjunt. A l'Annex C es mostra el conjunt de corbes.

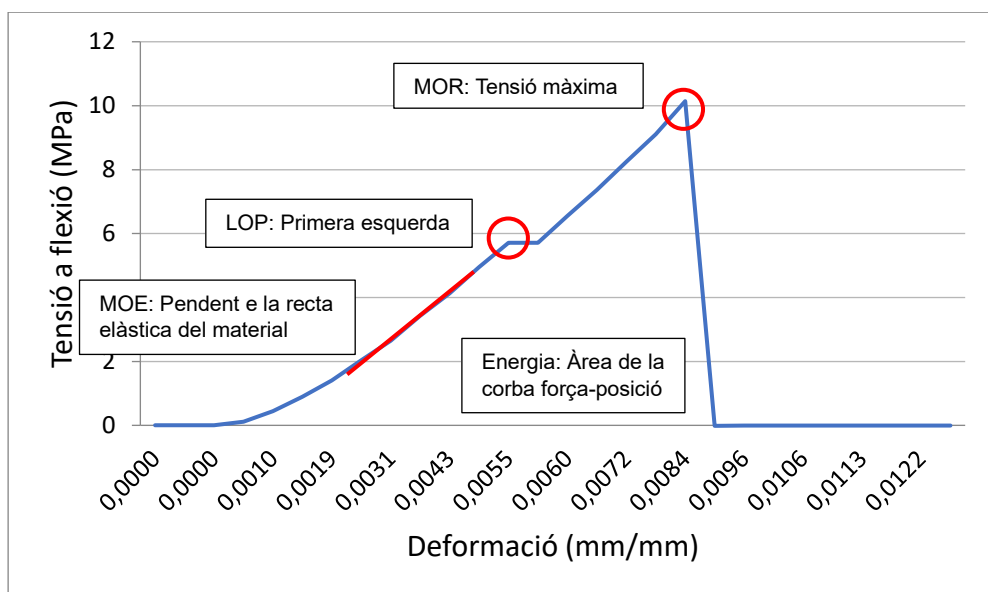


Figura 3.15. Esquema del càlcul per l'obtenció del MOR, LOP, MOE i energia

Per a comparar les dosificacions es va utilitzar el programa Minitab. Es van realitzar tests ANOVA per determinar si les diferències entre les mitjanes dels paràmetres anteriorment explicats eren significatives. Per a complementar aquesta anàlisi, es va realitzar el test de Tukey per determinar quines eren les mitjanes significativament diferents. Es va definir un interval de confiança del 95%.

Per tal d'eliminar la possible dispersió en els resultats es va aplicar el mètode de Thompson Tau modificat. Aquest mètode determina els valors atípics o "outliers" i després aquests són eliminats amb la finalitat de no tenir-los en compte en l'anàlisi estadística.

En primer lloc, es determina  $\tau$  en funció de les mostres que es volen analitzar. En el cas de l'assaig de flexió de la matriu, hi havia 6 provetes per a cada dosificació, per tant,  $\tau$  és 1,6563 (**Figura 3.16**). En el cas de l'assaig de compressió de la matriu, hi havia 12 peces (6 provetes trencades per la meitat), per tant  $\tau$  és 1,8290.

$n$	$\tau$		$n$	$\tau$		$n$	$\tau$
3	1.1511		21	1.8891		40	1.9240
4	1.4250		22	1.8926		42	1.9257
5	1.5712		23	1.8957		44	1.9273
6	1.6563		24	1.8985		46	1.9288
7	1.7110		25	1.9011		48	1.9301
8	1.7491		26	1.9035		50	1.9314
9	1.7770		27	1.9057		55	1.9340
10	1.7984		28	1.9078		60	1.9362
11	1.8153		29	1.9096		65	1.9381
12	1.8290		30	1.9114		70	1.9397
13	1.8403		31	1.9130		80	1.9423
14	1.8498		32	1.9146		90	1.9443
15	1.8579		33	1.9160		100	1.9459
16	1.8649		34	1.9174		200	1.9530
17	1.8710		35	1.9186		500	1.9572
18	1.8764		36	1.9198		1000	1.9586
19	1.8811		37	1.9209		5000	1.9597
20	1.8853		38	1.9220		( $\rightarrow \infty$ )	1.9600

*Figura 3.16. Valors del mètode Thompson  $\tau$  modificat*

Després es calcula el "delta" del paràmetre (per exemple MOR), que és la resta absoluta de la mitjana de MOR menys el valor de MOR de la proveta. Si "delta" és més gran que la multiplicació de la desviació estàndard de tota la mostra per  $\tau$ , la dada és atípica.

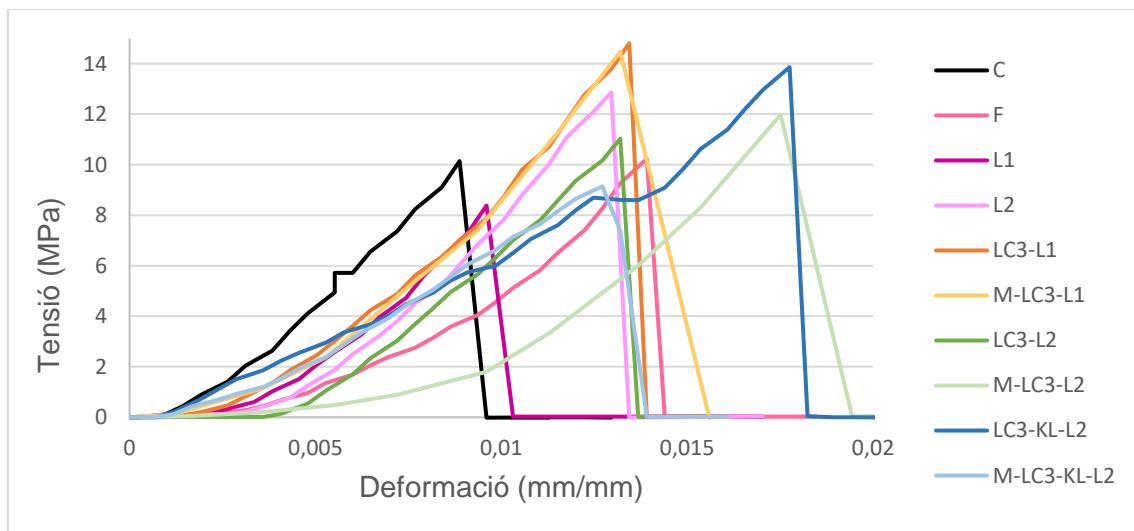
A l'annex D es mostren els resultats dels assaigs dels diferents paràmetres. A les plaques de fibrociment només hi va haver valors atípics a l'energia específica.

## 4. RESULTATS

### 4.1. CARACTERITZACIÓ DE LES MÀTRIS

#### 4.1.1. FLEXIÓ

En la **Figura 4.1** es mostren les corbes característiques per a les diferents dosificacions de les matrius obtingudes en els assaig de flexió per a les provetes. Com es pot veure, la mitjana dels valors del MOR entre diferents dosificacions és de 12 MPa aproximadament. Pel que fa al MOE, les tres gràfiques mostren un comportament similar. Veiem com el trencament de la majoria de les provetes es produeix en valors propers a una deformació unitària de 0,013 mm/mm.



*Figura 4.1. Corbes característiques pels assaigs de flexió de les matrius*

Si s'observen les mitjanes obtingudes per al conjunt de provetes control així com la desviació estàndard es poden veure possibles tendències (**Figura 4.2**). En el cas del MOR les mitjanes amb valors més grans es troben en les dosificacions L2, LC3-L1, M-L2 i LC3-KL-L2. No obstant, la dispersió dels resultats, no permet concloure que aquests augments siguin significatius. En el MOE la tendència canvia lleugerament, la mitjana més baixa s'ha obtingut per les provetes L1 i M-LC3-L2.

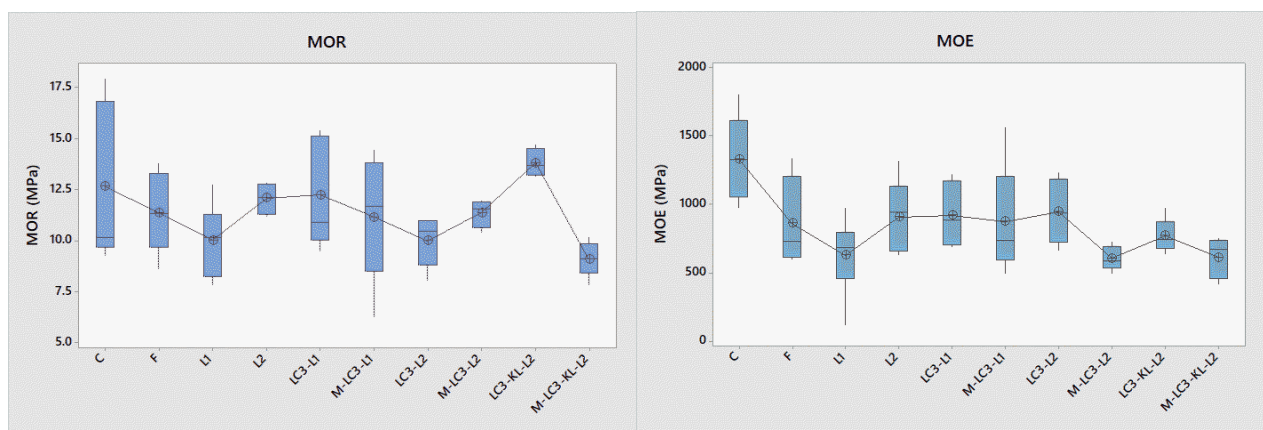


Figura 4.2. Mitjanes obtingudes per a les provetes dels assaigs de flexió. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.

A la **Taula 3** es poden observar els resultats del test de Tukey. Respecte al MOR, només són significativament diferents els morters LC3-KL-L2 i M-LC3-KL-L2. D'altra banda, si s'analitzen les mitjanes del MOE, sí que hi ha diferències significatives entre les mitjanes més grans, la del morter C, i les més petites, que són les L1, M-LC3-L2, LC3-KL-L2 i M-LC3-KL-L2.

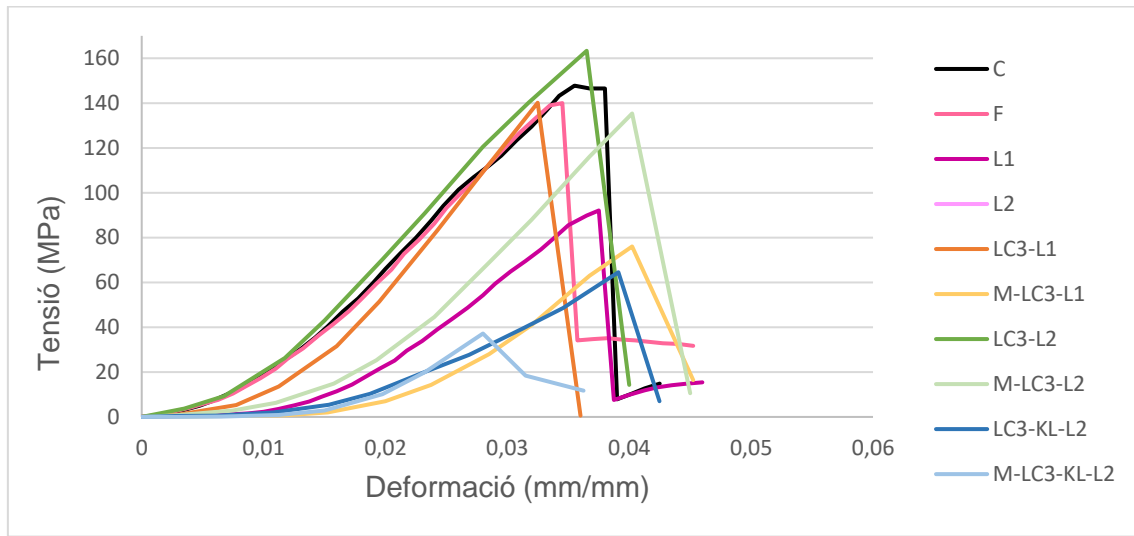
Taula 3. Resultats del test de Tukey per a les provetes assajades a flexió. Les mitjanes que no comparteixen un mateix superíndex són significativament diferents. Entre parèntesi, la desviació estàndard.

MOR (MPa)									
C	F	L1	L2	LC3-L1	M-LC3-L1	LC3-L2	M-LC3-L2	LC3-KL-L2	M-LC3-KL-L2
12,65 <sup>ab</sup> (3,93)	11,37 <sup>ab</sup> (2,05)	10,01 <sup>ab</sup> (1,78)	12,08 <sup>ab</sup> (0,78)	12,24 <sup>ab</sup> (2,69)	11,16 <sup>ab</sup> (3,02)	9,99 <sup>ab</sup> (1,24)	11,36 <sup>ab</sup> (0,70)	13,81 <sup>a</sup> (0,69)	9,09 <sup>b</sup> (0,84)

MOE (MPa)									
C	F	L1	L2	LC3-L1	M-LC3-L1	LC3-L2	M-LC3-L2	LC3-KL-L2	M-LC3-KL-L2
1331,89 <sup>a</sup> (319,89)	862,81 <sup>ab</sup> (309,83)	628,09 <sup>b</sup> (286,72)	906,71 <sup>ab</sup> (273,56)	921,08 <sup>ab</sup> (249,37)	875,11 <sup>ab</sup> (394,28)	946,83 <sup>ab</sup> (227,71)	603,36 <sup>b</sup> (88,54)	770,40 <sup>b</sup> (126,95)	612,11 <sup>b</sup> (146,97)

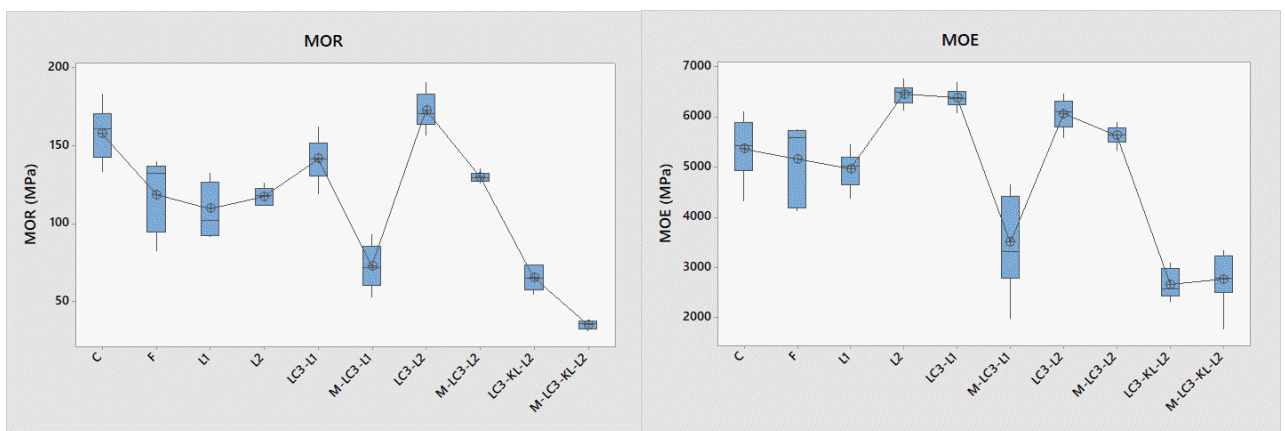
#### 4.1.2. COMPRESSIÓ

La **Figura 4.3** mostra les corbes característiques per a les diferents dosificacions de les matrius obtingudes a l'assaig de compressió de les provetes. Com es pot veure, els valors MOR més grans oscil·len entre 120 i 160 MPa i els més baixos entre 40 i 75 MPa. Pel que fa al MOE, les tres gràfiques mostren un comportament similar. Veiem com el trencament la proveta M-LC3-KL-L2 és el que abans es produeix mentre que les provetes M-LC3-L1 i la M-LC3-L2 són les que més triquen a trencar-se, que coincideix que són les que tenen menys ciment i més llot.



*Figura 4.3. Corbes característiques per a les provetes pels assaigs de compressió.*

En els diagrames de caixa (**Figura 4.4**) s'observa com la resistència als esforços de compressió de les provetes és quasi deu vegades superior als esforços de flexió. En aquest cas, les mitjanes més baixes són del morter M-LC3-L1, LC3-KL-L2 i M-LC3-KL-L2, i les més altes del morter C i LC3-L2.



*Figura 4.4. Mitjanes obtingudes per a les provetes pels assaigs de compressió. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.*

Com es pot veure a la **Taula 4**, les provetes C, LC3-L1, LC3-L2 i M-LC3-L2 tenen mitjanes superiors en els valors de MOR. No obstant, els resultats del test de Tukey revelen que en el cas del MOR, LC3-KL-L2 i M-LC3-KL-L2 són significativament diferents entre elles i entre totes les provetes, excepte M-LC3-L1 i LC3-KL-L2. Hi ha diferències significatives entre C i F, C i L1, C i L2, C i M-LC3-L1, C i M-LC3-L2, C i LC3-KL-L2 i C i M-LC3-KL-L2.

Respecte al MOE, tampoc no hi ha diferències significatives entre els morters C, F i L1 ni entre C i M-LC3-L2.

*Taula 4. Resultats del test de Tukey per a les provetes assajades a compressió. Les mitjanes que no comparteixen un mateix superíndex són significativament diferents. Entre parèntesi, la desviació estàndard*

<b>MOR (MPa)</b>									
<b>C</b>	<b>F</b>	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>LC3-L1</b>	<b>M-LC3-L1</b>	<b>LC3-L2</b>	<b>M-LC3-L2</b>	<b>LC3-KL-L2</b>	<b>M-LC3-KL-L2</b>
157,32 <sup>ab</sup> (17,11)	118,14 <sup>de</sup> (23,29)	109,29 <sup>e</sup> (16,87)	117,25 <sup>de</sup> (5,70)	141,33 <sup>bc</sup> (13,02)	72,48 <sup>f</sup> (13,36)	172,42 <sup>a</sup> (11,94)	129,76 <sup>cd</sup> (3,28)	65,15 <sup>f</sup> (7,77)	34,84 <sup>g</sup> (2,49)

<b>MOE (MPa)</b>									
<b>C</b>	<b>F</b>	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>LC3-L1</b>	<b>M-LC3-L1</b>	<b>LC3-L2</b>	<b>M-LC3-L2</b>	<b>LC3-KL-L2</b>	<b>M-LC3-KL-L2</b>
4911,30 <sup>c</sup> (611,26)	5157 <sup>c</sup> (755,94)	4961,92 <sup>c</sup> (337,12)	6451,23 <sup>a</sup> (206,46)	6375,11 <sup>a</sup> (179,79)	3499,46 <sup>d</sup> (937,84)	6055,03 <sup>ab</sup> (288,52)	5626,32 <sup>bc</sup> (172)	2651,78 <sup>e</sup> (289)	2762,30 <sup>e</sup> (473,14)

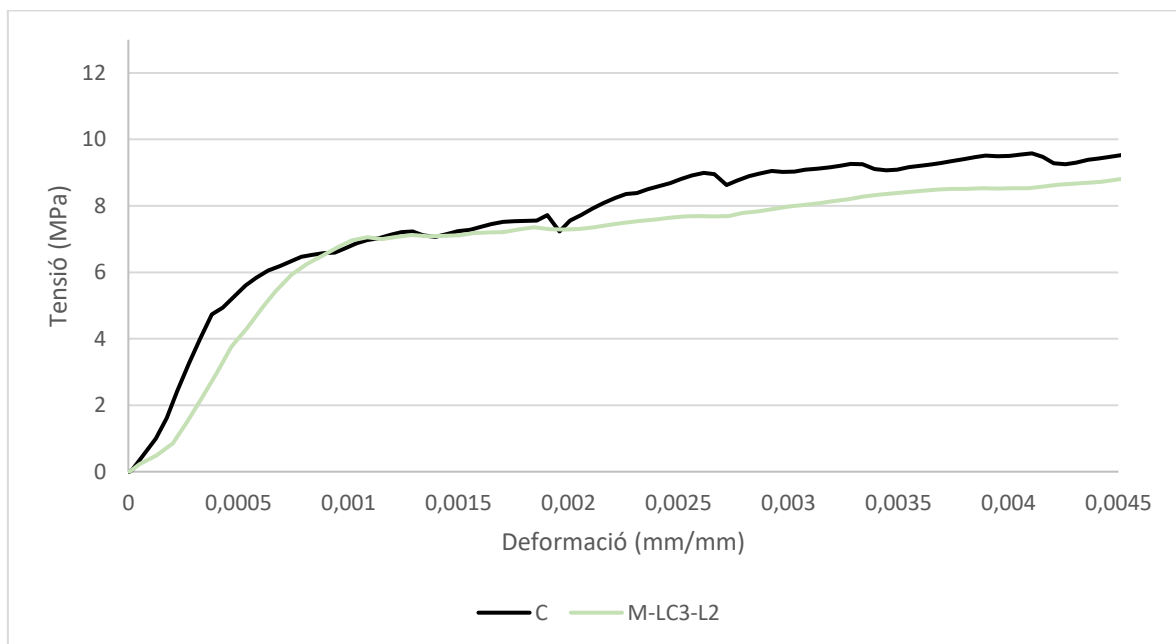


## 4.2. CARACTERITZACIÓ DE LES PLAQUES DE FIBROCIMENT

Es van fabricar dues plaques de fibrociment i es van comparar. Una placa estava formada per la matriu control de ciment Portland (C) i l'altra amb la matriu M-LC3-L2. Es va escollir la matriu M-LC3-L2 perquè és de les que obtenim millors resultats respecte a resistència i és de les que utilitza menys ciment Portland.

En la **Figura 4.5** es mostren les corbes característiques per als fragments de placa obtinguts en els assaigs de flexió, on C1 és el fragment número 1 de la placa C i M-LC3-L2-1 és el fragment número 1 de la placa M-LC3-L2.

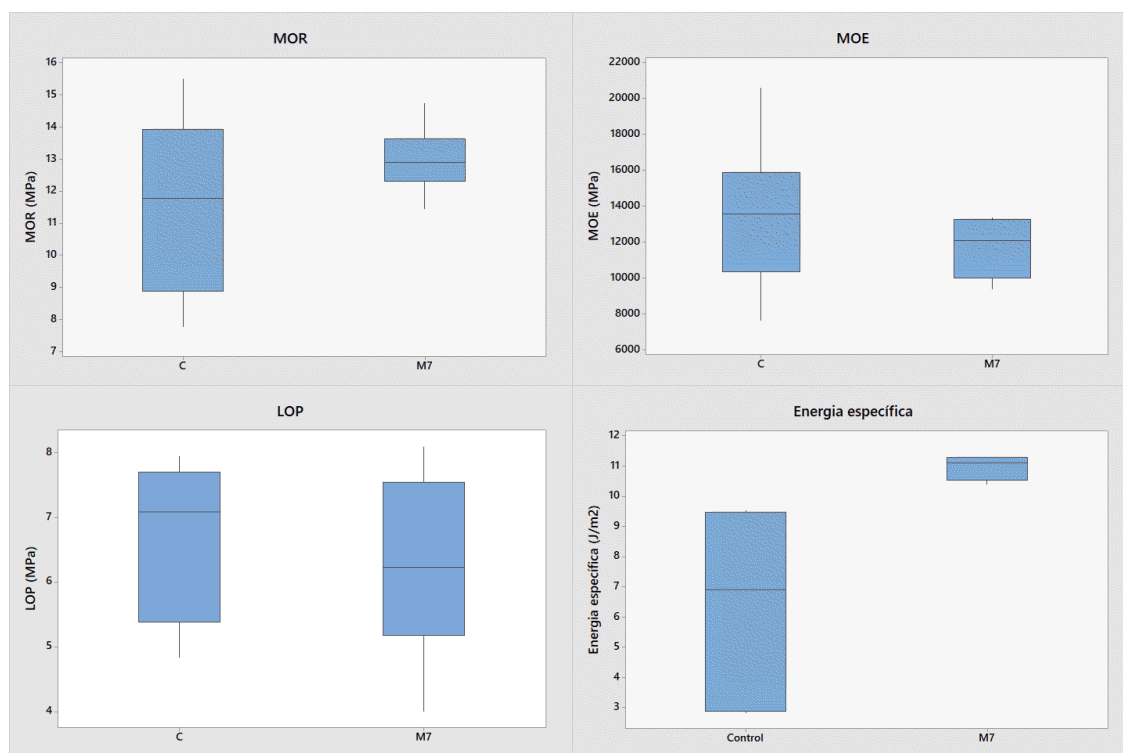
La Mitjana dels valors del MOR en la placa control és de 11,6 MPa, mentre que en la placa M-LC3-L2 és de 13 MPa. Es veu també com no es produeix el trencament de la placa gràcies a les fibres ja que continua incrementant la deformació.



*Figura 4.5. Corbes característiques dels fragments de les plaques amb fibra pels assaigs a flexió.*

#### 4.2.1. ANÀLISI DELS RESULTATS DE LES PLAQUES

En la **Figura 4.6** es pot observar com augmenten les mitjanes dels valors MOR i energia específica a la placa M-LC3-L2. Tanmateix, la dispersió de les dades no permet concloure que això sigui significatiu. En el cas del MOE i el LOP, les mitjanes són superiors a la placa control (C). Com anteriorment, no es pot dir que els resultats siguin significatius.



*Figura 4.6. Mitjanes obtingudes per a les plaques pels assaigs de flexió. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.*

A la **Taula 5** es mostren els resultats del test de Tukey. Cap dels paràmetres ha presentat diferències significatives entre les plaques C i M-LC3-L2, excepte l'energia específica. Tot i que veiem un augment de MOR, no podem afirmar que la diferència sigui significativa.

*Taula 5. Resultats del test de Tukey per a les plaques assajades a flexió. Les mitjanes que no comparteixen un mateix superíndex són significativament diferents. Entre parèntesi, la desviació estàndard.*

	<b>C</b>	<b>M-LC3-L2</b>
MOR (MPa)	11,59 <sup>a</sup> (2,81)	12,99 <sup>a</sup> (1,08)
MOE (MPa)	13515,62 <sup>a</sup> (3563,38)	11738,72 <sup>a</sup> (1618,94)
LOP (MPa)	6,69 <sup>a</sup> (1,23)	6,25 <sup>a</sup> (1,44)
Energia específica (J/m <sup>2</sup> )	6,42 <sup>b</sup> (3,00)	10,96 <sup>a</sup> (0,41)

## 5. DISCUSSIÓ

### 5.1. CARACTERÍSTIQUES MECÀNIQUES DE LA MATRIU

Després de la realització dels assaigs de les provetes, sembla que es poden aconseguir valors de resistència de matrius, fabricades amb menys quantitat de ciment i incloent llots, molt properes als valors de ciment Portland i inclús superiors.

El MOR de flexió de la matriu LC3-KL-L2 és el més gran, seguit del de ciment Portland i del de l'LC3-L1. Les matrius LC3-L1 i LC3-KL-L2 resulten ser les de ciment LC3. Aquests tenen les mateixes quantitats de clínquer, guix i aigua, però en comptes d'utilitzar MK, es va voler utilitzar caolí en M8, en les mateixes quantitats. L'altra diferència va ser la utilització del llot 1 en LC3-L1 i del llot 2 en LC3-KL-L2.

Per que fa al MOE de flexió, són les matrius LC3-L1 i LC3-L2 les que tenen un valor mitjà més gran, després de la matriu C. La matriu LC3-L2 torna a ser ciment LC3, amb les mateixes proporcions que LC3-L2 però utilitzant llot 2 en comptes de llot 1.

En l'assaig de flexió sembla ser que la substitució de caolí per metacaolí ha estat millor en LC3-KL-L2 que en M-LC3-KL-L2. La principal diferència entre aquestes matrius són les proporcions de ciment-llot. Mentre que en LC3-KL-L2 la quantitat de ciment ha sigut major i la de llot 2 menor, en M-LC3-KL-L2 ha sigut a la inversa.

En compressió el MOR més elevat és el de LC3-L2, per sobre de C, mentre que el MOE més elevat és el de L2. La matriu L2 es compon de 50% ciment Portland i 50% llot 2. Tot i així, el MOE pot tenir una alta dispersió degut a que es calcula a partir de les dades obtingudes als assaigs, mitjançant la recta de regressió entre dos punts del pendent dels gràfics, i no amb instrumentació específica. En l'assaig de compressió la substitució de caolí per metacaolí ha suposat pitjors resistències i elasticitat.

### 5.2. CARACTERÍSTIQUES MECÀNIQUES DEL MATERIAL COMPOST

En el cas dels materials compostos el MOR i energia específica va ser superior en la placa M-LC3-L2, formada per una matriu LC3 amb menor quantitat de ciment (37,5%) i major quantitat de llot 2 (20%). Un increment en el MOR reflexa l'efectivitat de les capes de fibra i la seva adherència a la matriu M-LC3-L2. Això pot significar que l'LC3 és competent alhora d'adherir-se a fibres gràcies a la seva composició.

En canvi, el MOE ha estat lleugerament superiors en la placa C. Els valors tan grans són deguts a l'increment de deformabilitat que donen les fibres. Els LOP són molt similars en ambdues plaques. Sent el LOP l'indicador del moment en que la matriu es trenca, es pot deduir un comportament similar en les matrius.

## CONCLUSIONS

En aquest projecte s'han analitzat les característiques mecàniques de provetes de ciment i residus de pedrera. S'han calculat els paràmetres mecànics per tal de comparar numèricament les propietats mecàniques en diferents dosificacions de ciment. Després de tenir els resultats de les provetes s'ha decidit la dosificació més sostenible i resistent per fabricar una placa reforçada amb no teixit de residus tèxtils. A continuació s'exposen les principals conclusions extretes de les dades i resultats obtinguts en el conjunt d'assajos:

1. El grau de dispersió de les dades obtingudes ha estat elevat. En el cas de la matriu, el mòdul d'elasticitat ha presentat una variabilitat més elevada que en el cas del mòdul de ruptura. Això podria ser degut a la diferència horària entre la fabricació, el desemmotllatge i la cura, i/o a la temperatura de curat. Tot i així, el mòdul d'elasticitat és un paràmetre en el qual no és necessària una gran precisió atès que el que importa és saber l'ordre de magnitud de rigidesa del material.  
En el cas del material compost, també el mòdul d'elasticitat i l'energia específica tenen més variabilitat que el mòdul de ruptura i el límit de proporcionalitat. Es pot deure al fet que s'ha treballat amb residus (tant el llot com la fibra) o a la fabricació manual de la placa, ja que els paràmetres són molt sensibles al gruix de les capes de fibra-ciment.
2. Respecte a l'ús de residus de la indústria pedrera, es possible trobar una nova funció per als llots i a la mateixa vegada obtenir bons resultats.
3. Les matrius amb ciment LC3 han donat resultats molt similars a les matrius amb ciment 100% Portland.
4. Respecte a l'ús de fibres de no teixit com a reforç per a compostos de construcció, es poden valoritzar residus per tal de reduir l'impacte de la construcció sobre els recursos naturals. Tanmateix, la utilització de fibres de no teixit com a element de reforç del fibrociment modifica les propietats mecàniques d'aquest, donant una major resistència a deformacions a la vegada que es manté la càrrega.
5. Els resultats semblen suggerir que les propietats mecàniques de la placa fabricada amb llot poden ser igual o més bones que la fabricada només amb ciment Portland.

Com a conclusió, es poden aconseguir molt bons resultats de tensió amb menys quantitat de ciment i reutilitzant materials que en un principi no tenen més utilitat. Aquest treball, però, serveix com una primera aplicació de residus de la pedrera Moratonas en materials de construcció. També es continua demostrant el valor de les fibres en la indústria dels materials, aquesta vegada donant-li una segona vida a residus tèxtils de roba de l'empresa Triturats La Canya. Si més no, amb més estudis i investigacions els resultats poden millorar.

## BIBLIOGRAFIA

- ANDREA, P., CRUZ, C., ANDRÉS, J., DUQUE, M., CARLOS, J. y CARDONA, O., 2019. EFECTOS DE LAS TÉCNICAS Y MATERIALES SOBRE EL REFORZAMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA, Y SU INCIDENCIA EN SU COMPORTAMIENTO.
- ANDRES, R.J., FIELDING, D.J., MARLAND, G., BODEN, T.A., KUMAR, N. y KEARNEY, A.T., 1999. Carbon dioxide emissions from fossil-fuel use, 1751-1950. *Tellus B*, vol. 51, no. 4, ISSN 0280-6509. DOI 10.1034/j.1600-0889.1999.t01-3-00002
- ANTONI, M., 2013. Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone.
- ARDANUY, M., CLARAMUNT, J. y VENTURA, H., 2021. Reciclado de fibras provenientes de residuos de ropa y remanentes textiles para su aplicación en materiales de construcción sostenibles (RECYBUILDMAT.:
- Cemento SUPER-DRAGON - Cementos Molins Industrial, S.A.* [en línea], 2020. 2020. S.l.: s.n. [consulta: 30 junio 2023]. Disponible en: <https://www.cmi.cemolins.es/es/productos/super-dragon>.
- CHAU, C.K., QIAO, F. y LI, Z., 2011. Microstructure of magnesium potassium phosphate cement. *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 6, ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.035.
- (EX)UNE-EN\_196-1=2005. norma española. [en línea], 2005. [consulta: 7 julio 2023]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0034791>.
- FELIPE R, 2016. BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. [en línea]. Disponible en: <http://www.boe.es>.
- Fibrous materials reinforced composites production techniques A2 - Figueiro, R. BT - Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications. 2011 [en línea], [sin fecha]. [consulta: 21 julio 2023]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845695583500077>.
- GABRIELA LLERENA ENCALADA, A., 2014. ESTAB UPC. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://mastersuniversitaris.upc.edu/tecnologiaarquitectura/>.
- HEGGER, J. y VOSS, S., 2008. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. *Engineering Structures*, vol. 30, no. 7, ISSN 01410296. DOI 10.1016/j.engstruct.2008.01.006.
- LUDWIG, H.M. y ZHANG, W., 2015. *Research review of cement clinker chemistry*. 1 diciembre 2015.
- MARTÍN, C. y SANTOS, E., 2022. REDUCCION DE LAS EMISIONES CO2EN LA PRODUCCION DEL CEMENTO EMPLEANDO PIEDRA CALCAREA Y ARCILLAS CALCINADAS (LC3=LIMESTONE CALCINED CLAY CEMENT).

CLARAMUNT, J., ARDANUY, M. y FUENTE, A. de la, 2021. Characterization of a textile waste nonwoven fabric reinforced cement composite for non-structural building components. *Construction and Building Materials*, vol. 276, ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.122179.

Test for the determination of modulus of rupture and limit of proportionality of thin fibre reinforced cement sections - [PDF Document]. A: [en línea]. [Consulta: 25 juliol 2021]. . [en línea], [sin fecha]. [consulta: 30 junio 2023]. Disponible en: <https://fdocuments.in/document/test-for-the-determination-of-modulus-of-rupture-and-limit-of-proportionality.html>.

UNE-EN 197-1:2011. [en línea], 2011. Disponible en: [www.aenor.es](http://www.aenor.es).

UNE-EN 13139:2003. Norma española. Áridos para morteros. , 2003.

Unión Europea. Directiva 1999/77/CE de la Comisión. [en línea], 1999. [consulta: 10 julio 2023]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0077&from=ES>.

## ANNEXOS

## ANNEX A. Fitxa tècnica del ciment

# SD

## SUPER DRAGON

### CEMENTO PÓRTLAND

EN 197-1 - CEM I 52,5 R

**DESCRIPCIÓN:**

Nuestro **SUPER DRAGON** es un cemento de alta resistencia, diseñado principalmente para la industria del prefabricado de hormigón. Sus características principales son:

- Altas resistencias iniciales y finales.
- Endurecimiento rápido, incluso en tiempo frío.

**CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO:**

	Valor habitual	Especificaciones según norma
Clinker (%)	98	min. 95 - máx. 100
Compos. miscelario (%)	2	min. 0 - máx. 5
<b>QUÍMICAS</b>		
Pérdida por calcinación (%)	2,5	máx. 5,0
Sulfato, SO <sub>4</sub> (%)	3,4	máx. 4,0
Oxígeno, O <sub>2</sub> (%)	0,04	máx. 0,10
Piedra residual (%)	0,7	máx. 5,0
<b>FÍSICAS</b>		
Superficie específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4900	-
Expansión Le Chatelier (mm)	0,5	máx. 10
Hielo Fragmento (mm.)	110	min. 45
<b>MECÁNICAS</b>		
Compresión a 2 días (MPa)	40	min. 30,0
Compresión a 28 días (MPa)	61	min. 52,5

Si necesita más información, solicítenosla.

AENOR certifica el cumplimiento de este cemento con las especificaciones de la norma UNE-EN 197-1 (Cemento común), evaluado según establecido en el Reglamento Europeo CE (CE Marca N). Por lo tanto, dispone también del correspondiente certificado de conformidad CE. Este cemento contiene un agente reductor del consumo CO<sub>2</sub>. AENOR certifica también el cumplimiento del límite reglamentario del contenido en Cr (VI) soluble en agua según la norma UNE-EN 196-10.

**EXPEDICIÓN Y ALMACENAMIENTO:**

- Disponible a granel y en sacos de 25 Kg.
- Los sacos deben almacenarse en lugares secos y ventilados. Deben quedar protegidos de la humedad del suelo y del ambiente.
- El almacenamiento de cemento a granel debe realizarse en silos estancos.

**RECOMENDADO PARA:**

- Hormigón armado.
- Hormigón pretensado.
- Hormigón de alta resistencia.
- Prefabricados en general y, especialmente, en elementos estructurales sean pretensados o no.
- Hormigón para desmoldado, desmoldado y desmoldado rápidos, incluso en tiempo frío.

**NO INDICADO PARA:**

- Hormigón seco compactado.
- Hormigón con áridos potencialmente reactivos o expuestos a ambientes agresivos.

**PRECAUCIONES DE PUESTA EN OBRA:**

Dado el elevado contenido en clinker de este cemento y su alta reactividad, es muy importante extremar las operaciones de curado del producto final puesto en obra, sobre todo en climas calurosos, secos y eventualmente con viento.

**NOTA MEDIOAMBIENTAL:**

Desde el año 2009 la implantación de nuevas tecnologías en la nueva línea de producción, la utilización de combustibles alternativos y las mejoras en el uso de aditivos de molienda en nuestra fábrica de Sant Vicenç dels Horts (Barcelona), nos han permitido reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un -13 % por tonelada en la fabricación de este cemento portland.



Figura A.5.2.1. Fitxa tècnica del ciment proporcionada pel fabricant

Taula A.6. Composició química del caolí proporcionada pel fabricant

%	típic
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35.77
SiO <sub>2</sub>	48.53
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.24
TiO <sub>2</sub>	0.96
CaO	< 0,10
MgO	< 0,10
Na <sub>2</sub> O	0,02
K <sub>2</sub> O	1,13
P/C	12,14

Propiedades físicas		Análisis químico	
Aspecto/Color.....	Polvo blanco - beige	% SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	94.69
Pérdida por calcinación.....	< 2 %	% CaO libre.....	< 0.1
Puzolanicidad (Ensayo Chapelle).	700-1000 mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g	% MgO.....	0.11
Densidad aparente:		% Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O.....	< 1.6
- Aireada.....	439 kg/m <sup>3</sup>		
- Compactada.....	706 kg/m <sup>3</sup>		
Peso específico.....	2,55 g/cm <sup>3</sup>		

Figura A.5.2.2. Composició química i propietats físiques del metacaolí proporcionada pel fabricant

## FICHA TÉCNICA



## PREPARADO DE YESO

Yeso fino de reparación.



## CARACTERÍSTICAS GENERALES

### DESCRIPCIÓN

Yeso fino para reparaciones en paredes interiores.

### CAMPOS DE APLICACIÓN

Preparado para relleno de huecos en paredes interiores.  
Para reparaciones sobre placas de cartón-yeso.  
Para fijación/anclaje de cajas eléctricas, empotrados.

### PROPIEDADES

- Alta resistencia.
- Blanco y acabado fino.
- Fácil aplicación.
- Interior.

### Presentación

Ref.	Tipo	Uds. caja	Uds. palé
70447-001	Estuche 1 kg	10	63
70447-002	Estuche 5 kg	4	28

### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Producto	
Composición	Sulfato de calcio hemihidrato modificado.
Color	Blanco
Densidad polvo	0,8 g/cm <sup>3</sup>
Densidad pasta	1,7 g/cm <sup>3</sup>
Granulometría	Fino
pH	7 - 8
Aplicación	
Temperatura aplicación	5 a 35 °C
Mezcla	50 % (0,5 l agua x 1 kg polvo)
Herramientas	Liana o espátula
Tiempo trabajo (vida útil mezcla)	< 10 min a 20 °C
Tiempo secado	Aprox. 24 h a 20 °C
Consumo	Aprox. 1,6 kg/m <sup>2</sup> y mm de espesor

Debido al empleo de materias primas naturales en nuestros productos, los valores indicados pueden variar ligeramente en cada lote de producción, sin por ello afectar a la idoneidad del producto.

Figura A.5.2.3. Fitxa tècnica del guix proporcionada pel fabricant





## HOJA DE DATOS DEL PRODUCTO

## SikaPlast®-1003 NG

Superplastificante de nueva generación y alto rango para hormigones.

## DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Aditivo superplastificante de alto rendimiento para la fabricación de todo tipo de hormigones realizados en plantas de hormigón preparado; especialmente aquellos con consistencia fluida mejorando su bombeabilidad.

## USOS

- SikaPlast®-1003 NG ha sido especialmente diseñado para hormigones de altas prestaciones.
- Aditivo muy adecuado para mezclas "robustas", donde existen frecuentes variaciones en las materias primas y en la humedad de éstas.
  - Realización de todo tipo de hormigones, mejorando considerablemente la consistencia y facilidad de colocación de los mismos.
  - El hormigón puede transportarse a largas distancias sin pérdida de trabajabilidad.
  - La segregación y exudación de agua en el hormigón se ven muy disminuidas.
  - Se puede utilizar como aditivo único. Realizando hormigones con muy diversas consistencias.
  - Hormigones proyectados por vía húmeda.

## CARACTERÍSTICAS / VENTAJAS

SikaPlast®-1003 NG es un poderoso superplastificante, que permite conseguir:

Realizar hormigones con relaciones a/c bajas sin pérdida de propiedades como:

1. Bombeabilidad
  2. Fluidéz
  3. Plasticidad
- Facilita notablemente la colocación o puesta en obra de los hormigones, mejorando la adherencia a las armaduras.
  - Aumento de la densidad del hormigón mejorando sus resistencias mecánicas, durabilidad e impermeabilidad.
  - Incrementa la estabilidad y la cohesión de las mezclas.
  - Mejora notablemente el acabado superficial de los hormigones.
  - Por su alto poder de reducción de agua, optimiza al máximo las mezclas, economizando el precio del m<sup>3</sup> de hormigón.
  - Reducción o eliminación total del proceso de vibrado en el hormigón.
  - Aumento de las resistencias mecánicas.
  - Mejora la adherencia a las armaduras.
  - Incrementa la impermeabilidad.
  - Facilita notablemente la colocación o puesta en obra de los hormigones.

## CERTIFICADOS / NORMAS

Cumple con las especificaciones de la norma UNE-EN-934-2: Tablas 3.1 y 3.2 superplastificante / reductor de agua.

## INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

Base Química	Policarboxilato modificado
Presentación	Contenedores de m <sup>3</sup> y bajo pedido puede suministrarse a granel
Conservación	12 meses desde su fecha de fabricación.

Hoja De Datos Del Producto  
SikaPlast®-1003 NG  
Mayo 2022, Versión 02.01  
021301011000003155

1 / 2

ambiente	En sus envases de origen bien cerrados y no deteriorados entre + 5°C y +35°C. Proteger de la acción directa de la luz solar y de las heladas.
	Líquido marrón
Densidad	1.08 - 1.10 Kg/l
pH	2 - 4
Contenido Total de Ión Cloruro	Libre de cloruros

## INFORMACIÓN DE APLICACIÓN

Dosificación Recomendada	0,4% - 2,0%
Compatibilidad	SikaPlast®-1003 NG se puede combinar con otros aditivos de la gama Sika. Se recomienda hacer ensayos antes de combinar los productos.

## NOTAS

Todos los datos técnicos indicados en estas Hojas de Datos de Producto están basados en ensayos de laboratorio. Las medidas reales de estos datos pueden variar debido a circunstancias más allá de nuestro control.

## ECOLOGIA, SEGURIDAD E HIGIENE

Para cualquier información referida a cuestiones de seguridad e higiene en el uso, manejo, almacenamiento y eliminación de residuos de productos químicos, los usuarios deben consultar la Hoja de Seguridad del producto, que contiene los datos físicos, ecológicos, toxicológicos y demás cuestiones relacionadas con la seguridad.

## INSTRUCCIONES DE APLICACIÓN

## DOSIFICACIÓN

SikaPlast®-1003 NG se añadirá al agua de amasado o a la mezcla de hormigón ya realizada.

## RESTRICCIONES LOCALES

Tenga en cuenta que como resultado de las regulaciones locales específicas, el funcionamiento del producto puede variar de un país a otro. Por favor, consulte la Hoja de Datos de Producto local para la descripción exacta de los campos de aplicación.

## NOTAS LEGALES

Esta información y, en particular, las recomendaciones relativas a la aplicación y uso final del producto, están dadas de buena fe, basadas en el conocimiento actual y la experiencia de Sika de los productos cuando son correctamente almacenados, manejados y aplicados, en situaciones normales, dentro de su vida útil y de acuerdo con las recomendaciones de Sika. En la práctica, las posibles diferencias en los materiales, soportes y condiciones reales en el lugar de aplicación son tales, que no se puede deducir de la información del presente documento, ni de cualquier otra recomendación escrita, ni de consejo alguno ofrecido, ninguna garantía en términos de comercialización o idoneidad para propósitos particulares, ni obligación alguna fuera de cualquier relación legal que pudiera existir. El usuario debe ensayar la conveniencia de los productos para la aplicación y la finalidad deseadas. Sika se reserva el derecho de modificar las propiedades de sus productos. Se reservan los derechos de propiedad de terceras partes. Los pedidos son aceptados en conformidad con los términos de nuestras vigentes Condiciones Generales de Venta y Suministro. Los usuarios deben conocer y utilizar la versión última y actualizada de las Hojas de Datos de Productos, copias de las cuales se mandarán a quien las solicite.

OFICINAS CENTRALES Y FABRICA  
Carretera de Fuencarral, 72  
P. I. Alcobendas  
Madrid 28108 - Alcobendas  
Tel.: 916 57 23 75  
Fax: 916 62 19 38

OFICINAS CENTRALES Y CENTRO  
LOGÍSTICO  
C/ Aragoneses, 17  
P. I. Alcobendas  
Madrid 28108 - Alcobendas  
Tel.: 916 57 23 75  
Fax: 916 62 19 38



Hoja De Datos Del Producto  
SikaPlast®-1003 NG  
Mayo 2022, Versión 02.01  
021301011000003155

2 / 2

Figura A.5.2.4. Fitxa tècnica del fluidificant proporcionada pel fabricant



SikaPlast-1003NG-es-15-05-2022-2-1.pdf



## HOJA DE DATOS DEL PRODUCTO

## Sika® Desencofrante LN

ACEITE DESENCOFRANTE PARA TODO TIPO DE ENCOFRADOS, PRINCIPALMENTE METÁLICOS

## DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Agente desencofrante que evita la adherencia del hormigón o del mortero a los encofrados.

## USOS

Se utiliza para todo tipo de encofrados, principalmente metálicos, cuando se desea obtener una superficie de acabado impecable.

## CARACTERÍSTICAS / VENTAJAS

- El hormigón no se ensucia y se puede aplicar rápida y limpiamente.
- Permite un ahorro de tiempo y de mano de obra en la limpieza de los encofrados.
- Disminuye el desgaste de la madera.
- Resulta económico, debido a su gran rendimiento y fácil manejo.
- Se prolonga la duración de utilización de los encofrados.

## INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

Base Química	Aceite mineral
Presentación	Garrafa de 25 l y bidones de 200 l. Bajo pedido puede suministrarse en contenedores de m <sup>3</sup> .
Apariencia / Color	Líquido amarillento
Conservación	12 meses desde su fecha de fabricación
Condiciones de Almacenamiento	En sus envases de origen bien cerrados y no deteriorados. En lugar seco y fresco protegiéndolos de las heladas y el frío excesivo, a una temperatura entre +5°C y +30°C
Densidad	0,9 kg/l
<b>INFORMACIÓN DE APLICACIÓN</b>	
Consumo	Dependiendo de la naturaleza del soporte, aprox. 1 l de producto para 10-20 m <sup>2</sup> .

Hoja De Datos Del Producto  
Sika® Desencofrante LN  
Diciembre 2020, Versión 01.01  
021405021000003127

1 / 2

## NOTAS

Todos los datos técnicos indicados en estas Hojas de Datos de Producto están basados en ensayos de laboratorio. Las medidas reales de estos datos pueden variar debido a circunstancias más allá de nuestro control.

## ECOLOGIA, SEGURIDAD E HIGIENE

Para obtener información y asesoramiento sobre la manipulación, el almacenamiento y la eliminación segura de productos químicos, los usuarios deben consultar la versión más reciente de la Ficha de Datos de Seguridad (FDS) que contiene datos físicos, ecológicos, toxicológicos y otras cuestiones relacionados con la seguridad.

## INSTRUCCIONES DE APLICACION

## APLICACIÓN

Se aplica sobre encofrados limpios y secos utilizando brochas. Se suministra listo para su empleo. Puede ser aplicado varios días antes de la confección del encofrado o inmediatamente antes del hormigonado, ya que su eficacia perdura y por otra parte no hay que respetar ningún plazo de espera antes de echar el hormigón.

En el caso de que un hormigón cuyo encofrado haya sido tratado con Sika® Desencofrante LN vaya a ser enfoscado o pintado posteriormente, se impone un lavado vigoroso de su superficie mediante cepillos de raices y agua, en cuanto se haya desencofrado. Para cualquier aclaración rogamos consulten con nuestro Departamento Técnico. Se recomienda homogeneizar el producto previamente a su uso.

## RESTRICCIONES LOCALES

Tenga en cuenta que como resultado de las regulaciones locales específicas, el funcionamiento del producto puede variar de un país a otro. Por favor, consulte la Hoja de Datos de Producto local para la descripción exacta de los campos de aplicación.

## NOTAS LEGALES

Esta información y, en particular, las recomendaciones relativas a la aplicación y uso final del producto, están dadas de buena fe, basadas en el conocimiento actual y la experiencia de Sika de los productos cuando son correctamente almacenados, manejados y aplicados, en situaciones normales, dentro de su vida útil y de acuerdo con las recomendaciones de Sika. En la práctica, las posibles diferencias en los materiales, soportes y condiciones reales en el lugar de aplicación son tales, que no se puede deducir de la información del presente documento, ni de cualquier otra recomendación escrita, ni de consejo alguno ofrecido, ninguna garantía en términos de comercialización o idoneidad para propósitos particulares, ni obligación alguna fuera de cualquier relación legal que pudiera existir. El usuario debe ensayar la conveniencia de los productos para la aplicación y la finalidad deseadas. Sika se reserva el derecho de modificar las propiedades de sus productos. Se reservan los derechos de propiedad de tercera partes. Los pedidos son aceptados en conformidad con los términos de nuestras vigentes Condiciones Generales de Venta y Suministro. Los usuarios deben conocer y utilizar la versión última y actualizada de las Hojas de Datos de Productos, copias de las cuales se mandarán a quién las solicite.

OFICINAS CENTRALES Y FABRICA  
Carrtera de Fuencarral, 72  
P. I. Alcobendas  
Madrid 28108 - Alcobendas  
Tels.: +34 916 57 23 75  
Fax: +34 916 62 19 38



Hoja De Datos Del Producto  
Sika® Desencofrante LN  
Diciembre 2020, Versión 01.01  
021405021000003127

2 / 2

OFICINAS CENTRALES Y CENTRO  
LOGÍSTICO  
C/ Argonne, 17  
P. I. Alcobendas  
Madrid 28108 - Alcobendas  
Tels.: +34 916 57 23 75  
Fax: +34 916 62 19 38

SikaDesencofranteLN-es-ES (12-2020) 1-1.pdf

Figura A.5.2.5. Fitxa tècnica del desencofrant proporcionada pel fabricant



## ANNEX B. Relació aigua-ciment a les plaques

Taula B.7. Relació d'aigua-ciment durant i després de l'elaboració de la placa

Placa	Ciment inicial (g)	Aigua inicial (g)	a/c inicial	Aigua eliminada amb buit (g)	Aigua eliminada després compressió (g)	a/c final
<b>C</b>	1600	1200	0,75	808,35	52,65	0,21
<b>M7</b>	1600	1360	0,85	414,22	111,55	0,52

## ANNEX C. Dimensions i pesos de les provetes i plaques

Taula C.8. Dimensions i pesos de les provetes de matriu

Proveta	Pesos abans cambra tèrmica (g)	Pesos després cambra tèrmica (g)	Proveta	Pesos abans cambra tèrmica (g)	Pesos després cambra tèrmica (g)
C1-1	526,1	532,96	M5-1-1	444,18	458,6
C1-2	519,22	532,34	M5-1-2	444,24	457,8
C1-3	520,83	535,51	M5-1-3	443,01	456,45
C2-1	527,86	541,97	M5-2-1	439,26	452,35
C2-2	525,51	539,46	M5-2-2	441,54	454,95
C2-3	526,12	539,61	M5-2-3	439,62	542,65
M1-1-1	527,57	539,2	M6-1-1	496,44	513,12
M1-1-2	528,66	539,44	M6-1-2	502,21	518,74
M1-1-3	525,44	537,15	M6-1-3	492,96	509,45
M1-2-1	532,39	543,37	M6-2-1	494,57	510,83
M1-2-2	530,61	541,51	M6-2-2	496,9	513,18
M1-2-3	533,81	545,02	M6-2-3	492,78	508,83
M2-1-1	526,85	539,17	M7-1-1	481,87	495,42
M2-1-2	523,1	535,43	M7-1-2	486,73	501,01
M2-1-3	529,83	541,9	M7-1-3	485,97	500,03
M2-2-1	394,68	403,83	M7-2-1	487,1	501,17
M2-2-2	424,66	434,4	M7-2-2	489,23	503,14
M2-2-3	376,45	384,85	M7-2-3	489,69	503,6
M3-1-1	498,24	507,55	M8-1-1	474,22	490,8
M3-1-2	488,14	496,95	M8-1-2	473,87	490,95
M3-1-3	502,3	511,75	M8-1-3	475,24	491,1
M3-2-1	517,05	527,05	M8-2-1	471,38	487,15
M3-2-2	522,64	532,4	M8-2-2	475,02	490,8
M3-2-3	513,42	523,65	M8-2-3	474,67	490,15
M4-1-1	474,8	490,2	M9-1-1	487,56	500,65
M4-1-2	472,77	487,9	M9-1-2	485,27	498,25
M4-1-3	476,9	491,85	M9-1-3	491,36	504
M4-2-1	477,49	493,3	M9-2-1	488,83	501,35
M4-2-2	476,84	492,45	M9-2-2	486,75	498,3
M4-2-3	479,35	494,9	M9-2-3	485,44	497,85

Llargada de 100 mm, amplada de 40 mm i gruix de 40 mm excepte en M2-2-1, M2-2-2 i M2-2-3 (30, 32 i 29 mm respectivament)

Taula C.9. Dimensions de les plaques amb 6 capes de fibra

100% PORTLAND	Amplada (mm)	Gruix (mm)	M7 llot 2	Amplada (mm)	Gruix (mm)
1	46,71	10,4	1	54,8	13,8
2	48,1	9,56	2	43,39	12,7
3	48,77	10,17	3	39,44	12,01
4	43,33	10,88	4	43,59	13,18
5	44,46	10,37	5	45,52	12,18
6	46,04	9,97	6	50,84	12,57

## ANNEX D. Resultats del mètode de Thompson tau modificat

Taula D.10. Resultats de MOR obtinguts en l'assaig a flexió de les matrius. Els valors atípics subratllats. Les cel·les en blanc indiquen la falta de dades degut a trencaments.

MOR (MPa)	C	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
	9,25	12,40	10,79	11,17	10,61	6,22	9,05	11,65	13,86	7,79
	10,17	8,57	10,25	12,57	15,43	14,47	9,98	8,20	9,81	8,59
	10,14	13,10	12,78	11,70	10,88	11,43	8,01	10,36	14,75	10,20
	15,69	10,06	8,38	12,86	9,46	11,96	11,03	11,47	13,13	9,07
	17,98	10,23	10,06	16,86	14,81	13,61	10,97	11,98	13,50	9,71
		13,84	7,81			9,26	10,90	15,83		9,14

Taula D.11. Resultats de MOE obtinguts en l'assaig a flexió de les matrius. Els valors atípics subratllats. Les cel·les en blanc indiquen la falta de dades degut a trencaments.

MOE (MPa)	C	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
	967,89	1341,73	669,74	623,35	202,15	629,81	973,09	673,47	770,21	117,30
	1325,27	620,10	574,49	694,44	1227,03	1084,55	1165,36	548,33	729,75	717,50
	1136,36	739,13	701,74	952,65	686,18	757,96	1238,19	568,61	631,47	670,58
	1812,82	594,10	975,87	943,45	752,79	1571,96	899,66	609,86	977,22	412,28
	1417,10	726,44	110,11	1319,67	1018,31	717,24	747,88	487,65	743,34	505,01
		1155,38	736,58			489,12	656,79	732,26		755,19

Taula D.12. Resultats de MOR obtinguts en l'assaig a compressió de les matrius. Els valors atípics subratllats. Les cel·les en blanc indiquen la falta de dades degut a trencaments.

	<b>C</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>	<b>M9</b>
<b>MOR (MPa)</b>	133,90	133,90	119,58	117,61	150,50	86,68	190,95	99,03	64,55	27,11
	147,78	135,67	127,39	99,99	107,20	85,14	175,25	128,09	64,62	37,64
	145,55	46,91	132,95	91,37	162,15	93,36	177,57	141,81	72,34	37,01
	132,56	81,79	125,11	118,34	141,90	71,70	159,91	131,76	124,40	32,23
	112,10	139,92	126,35	112,19	154,09	81,87	165,91	79,97	123,86	31,51
	163,23	140,00	95,25	111,41	118,68	58,50	163,28	120,75	73,49	37,21
	183,51	131,91	92,10	123,54	126,80	76,05	178,65	125,48	73,97	26,33
	176,18	96,03	100,00	111,15	146,50	60,21	184,38	128,52	53,88	35,90
	164,05	100,10	101,60	121,62	131,68	70,13	189,85	132,51	62,65	30,68
	168,30	89,26	91,09	112,93	140,86	61,49	163,79	126,63	55,68	35,47
	158,11	132,78	90,83	126,43	140,16	52,17	163,34	135,37		35,10
							156,16	129,68		35,67

Taula D.13. Resultats de MOE obtinguts en l'assaig a compressió de les matrius. Els valors atípics subratllats. Les cel·les en blanc indiquen la falta de dades degut a trencaments.

	<b>C</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>	<b>M9</b>
<b>MOE (MPa)</b>	5366,28	5712,11	4881,18	3286,58	6444,25	4670,56	6465,27	3910,77	2525,23	3219,71
	5427,02	5.662,52	5165,30	4793,80	6303,29	4398,47	5562,78	5423,20	2678,80	3347,42
	5313,48	990,92	5165,30	4930,56	6511,23	4418,76	6355,14	5721,10	2971,28	2557,14
	4919,09	2880,79	5466,76	6257,23	6303,29	3313,18	6139,93	5488,56	5598,57	2491,69
	4301,76	5592,05	5257,81	6543,02	6065,89	3890,77	5777,65	5778,11	5571,50	1442,12
	4348,19	5725,13	4668,65	6365,08	6206,40	2932,51	5936,46	5798,26	3097,78	3282,75
	6123,27	5755,25	4151,07	6114,00	6242,75	4622,93	6191,13	5902,84	3559,92	1744,38
	5878,31	4114,60	4939,58	6419,13	6363,16	2774,22	6181,32	5564,69	2300,25	3033,31
	5565,73	4204,52	5105,28	7007,37	6406,78	2727,45	6417,29	5320,71	2422,59	2682,42
	5733,97	4144,61	4365,17	6568,80	6698,61	2783,50	6066,26	5630,83	2566,53	2789,61
	5958,56	5502,24	4604,14	6769,93	6580,58	1961,73	5825,92	5618,38		2885,53
							5741,20	5642,83		2351,34

Taula D.14. Resultats de l'energia específica en J/m<sup>2</sup> obtinguts en l'assaig a flexió de les plaques de fibrociment. Els valors atípics subratllats.

	<b>C</b>	<b>M7</b>
<b>Energia específica (J/m<sup>2</sup>)</b>	9,44	12,62
	9,54	11,29
	2,91	11,21
	7,38	6,64
	6,42	10,38
	2,82	10,98

## ANNEX E. Corbes tensió-deformació

Figura E.1. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu C assajades a flexió.

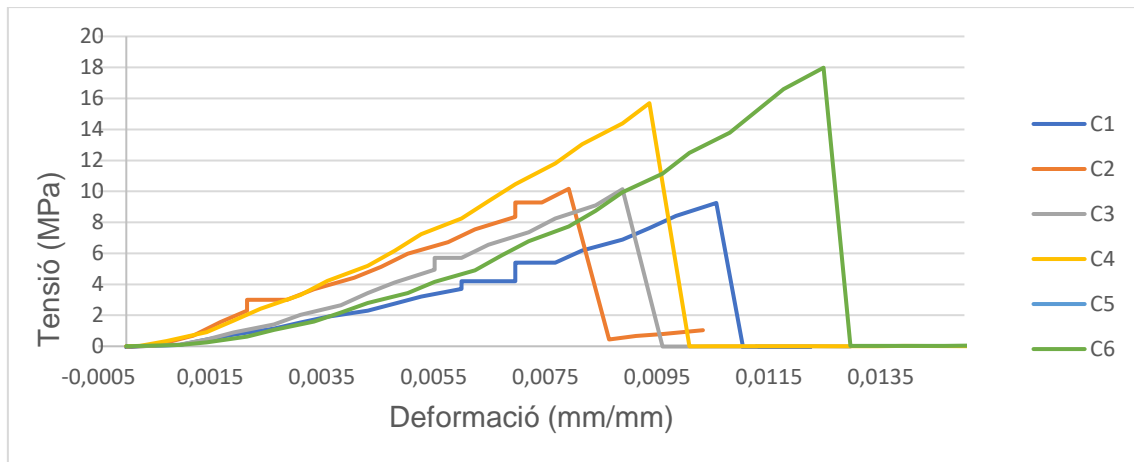


Figura E.2. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu F assajades a flexió.

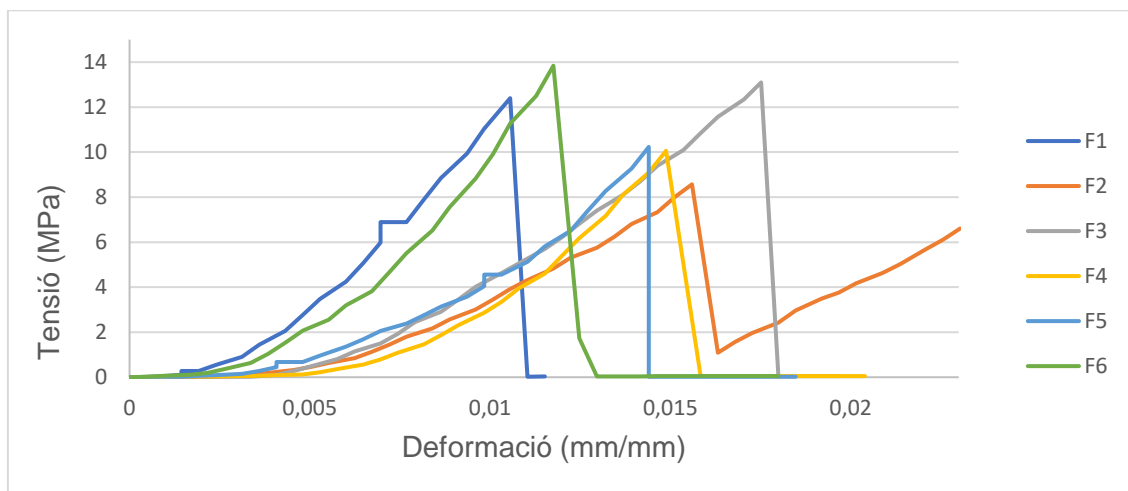


Figura E.3. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu L1 assajades a flexió.

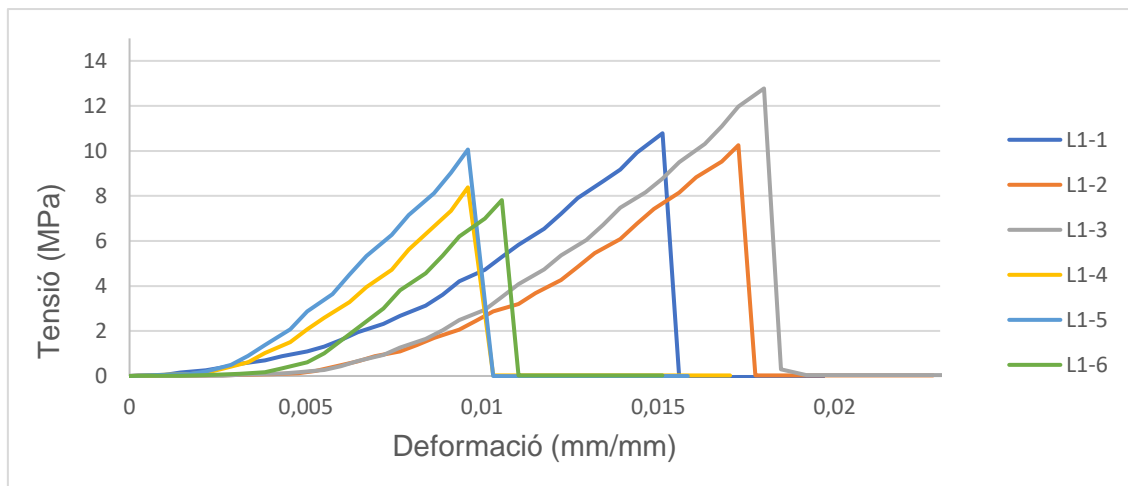


Figura E.4. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu L2 assajades a flexió.

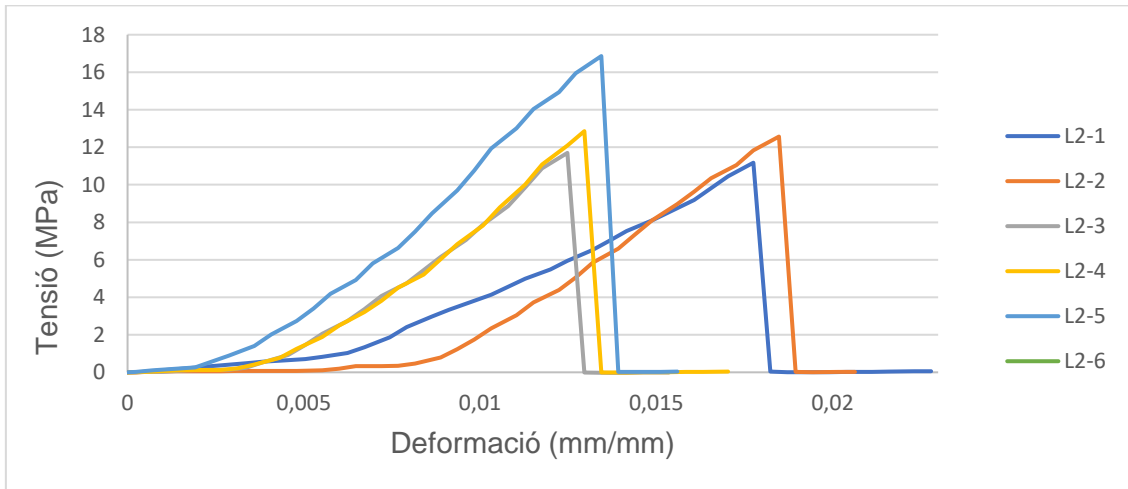


Figura E.5. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu LC3-L1 assajades a flexió.

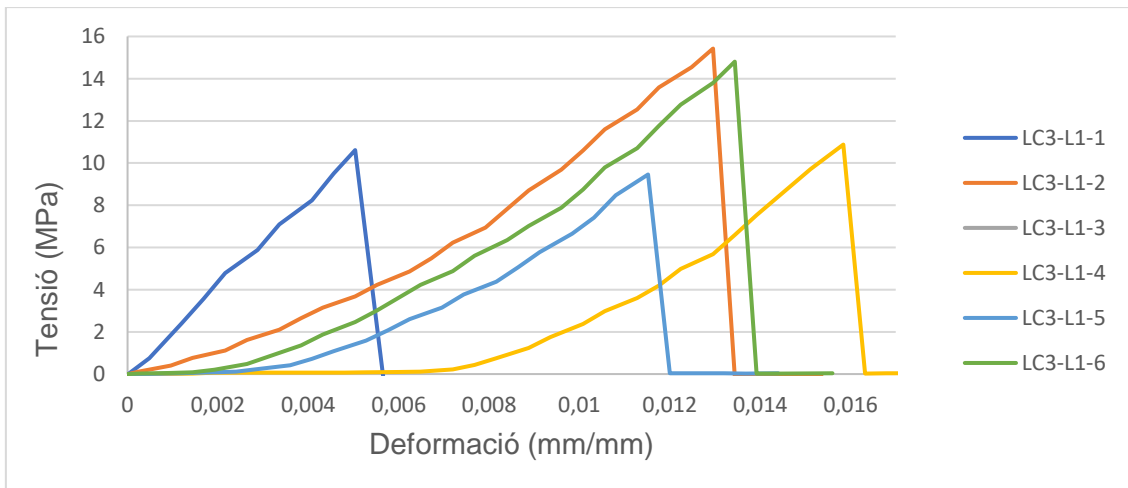


Figura E.6. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu M-LC3-L1 assajades a flexió.

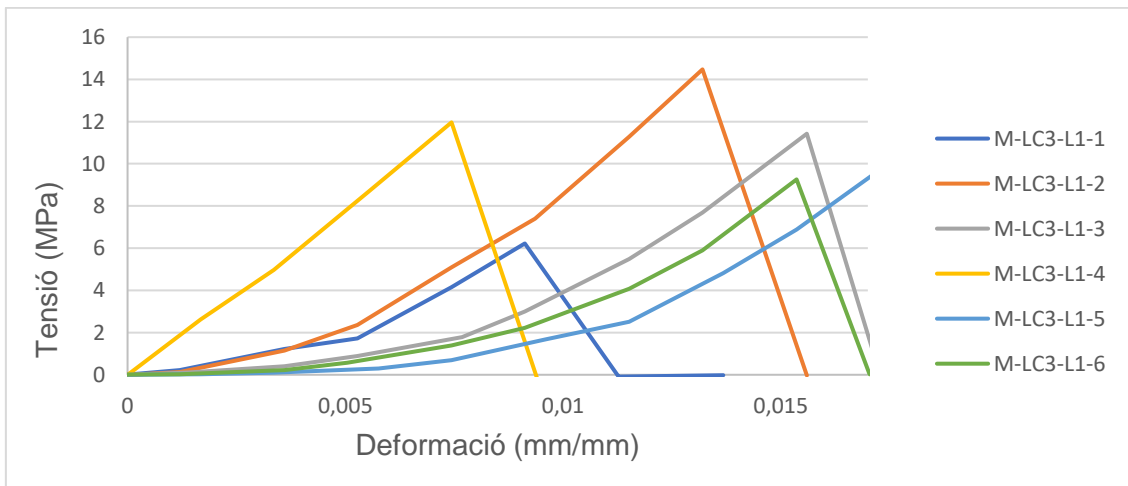




Figura E.7. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu LC3-L2 assajades a flexió.

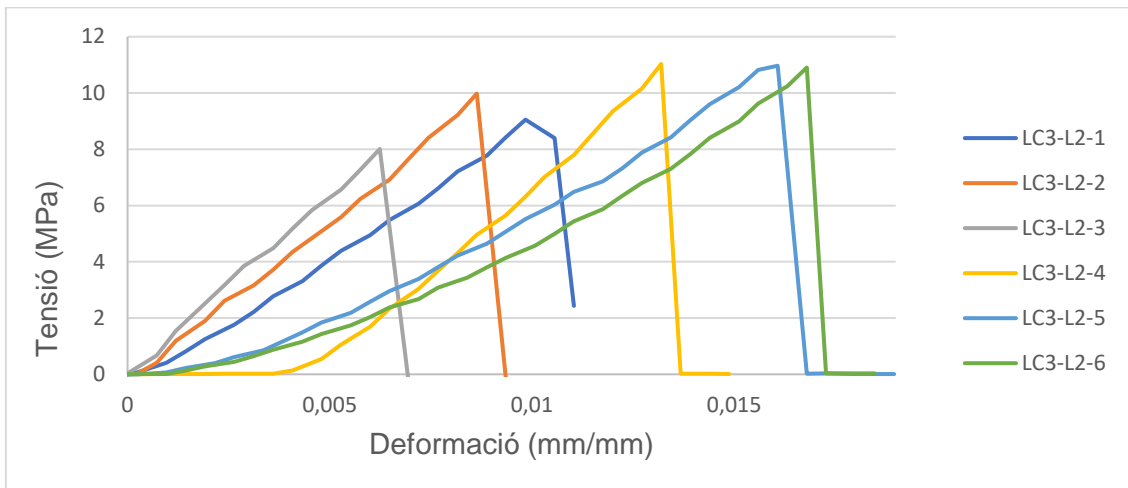


Figura E.8. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu M-LC3-L2 assajades a flexió.

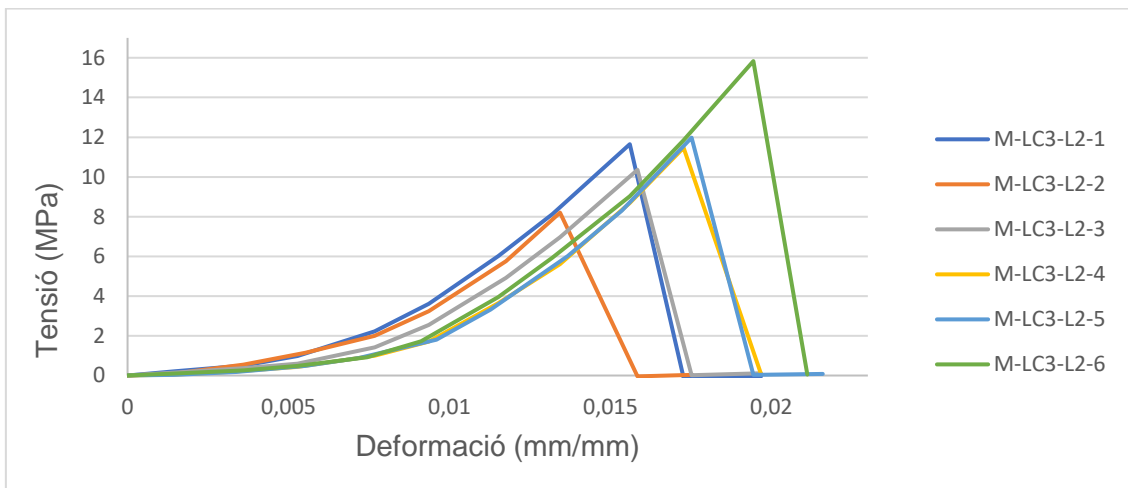


Figura 5.2. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu LC3-KL-L2 assajades a flexió.

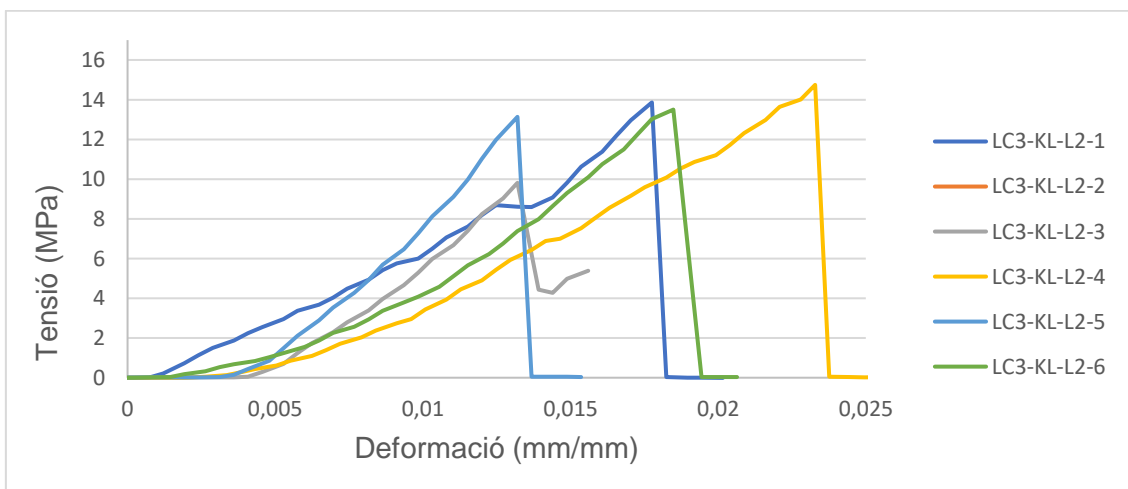


Figura E.10. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu M-LC3-KL-L2 assajades a flexió.

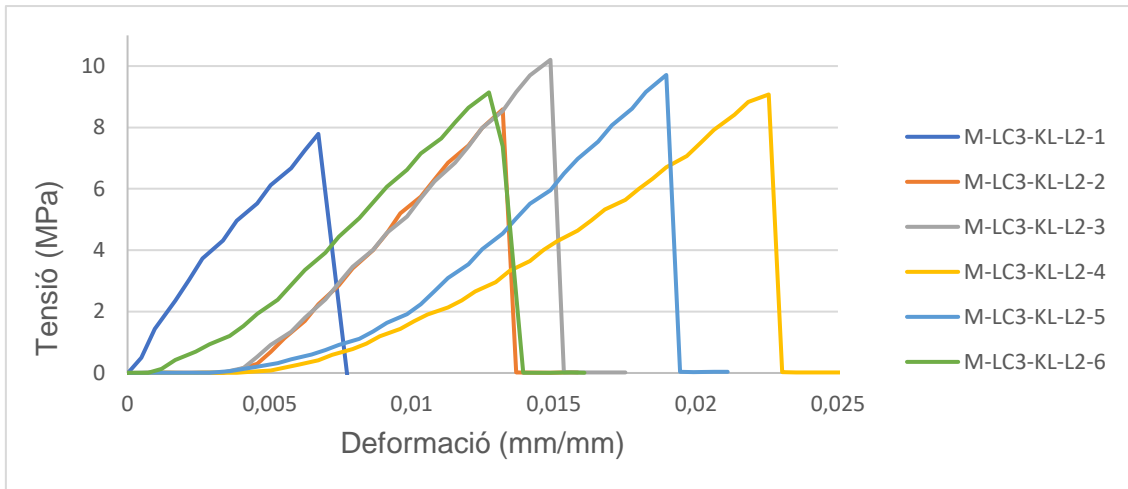


Figura E.11. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu C assajades a compressió.

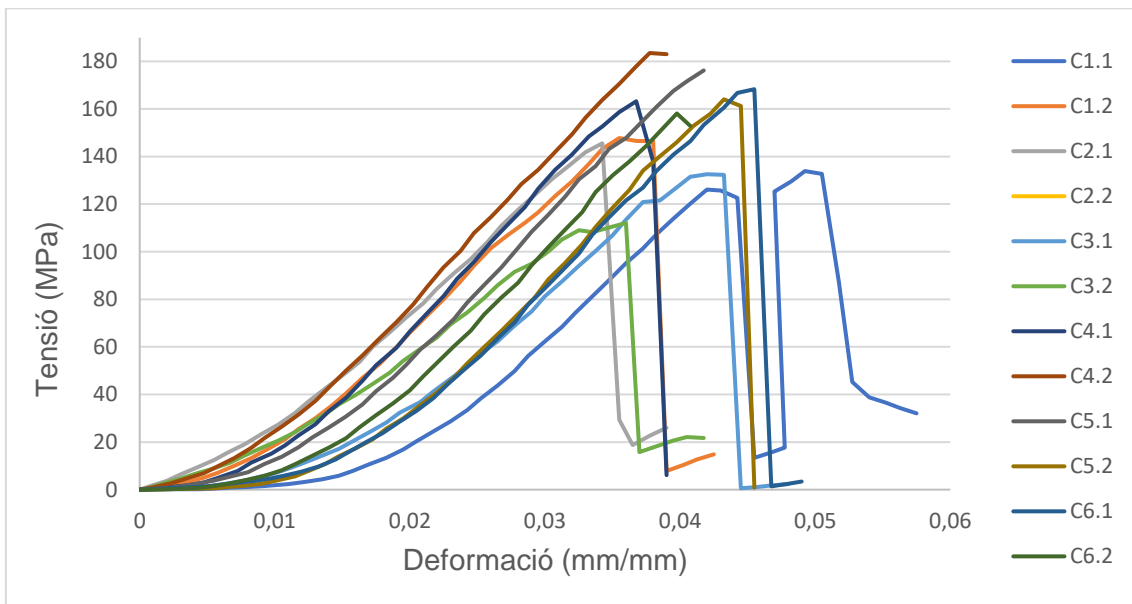


Figura E.12. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu F assajades a compressió.

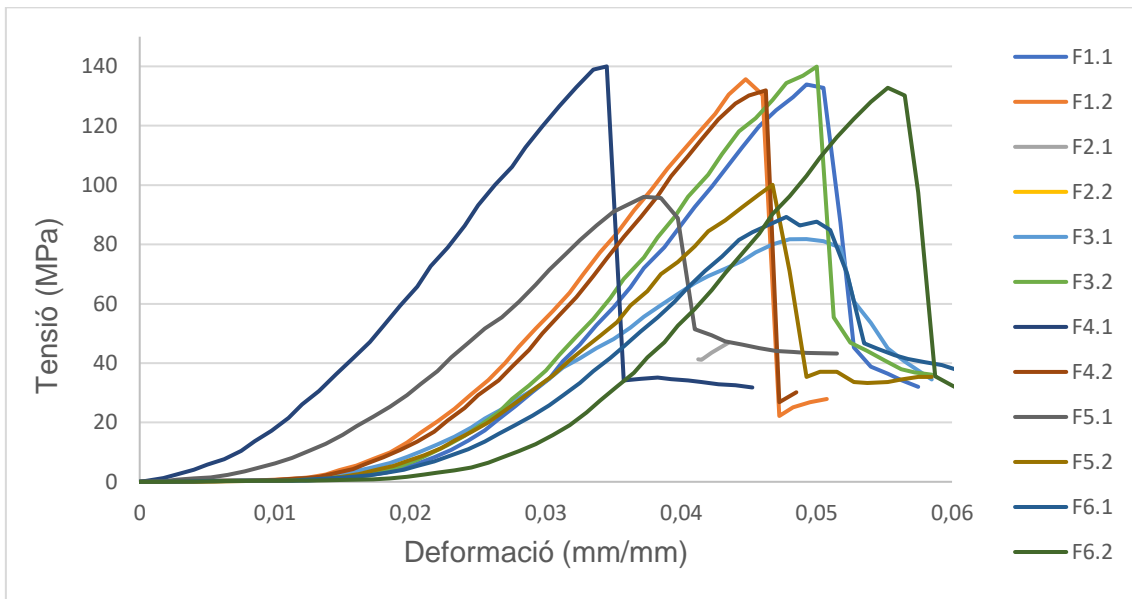


Figura E.13. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu L1 assajades a compressió.

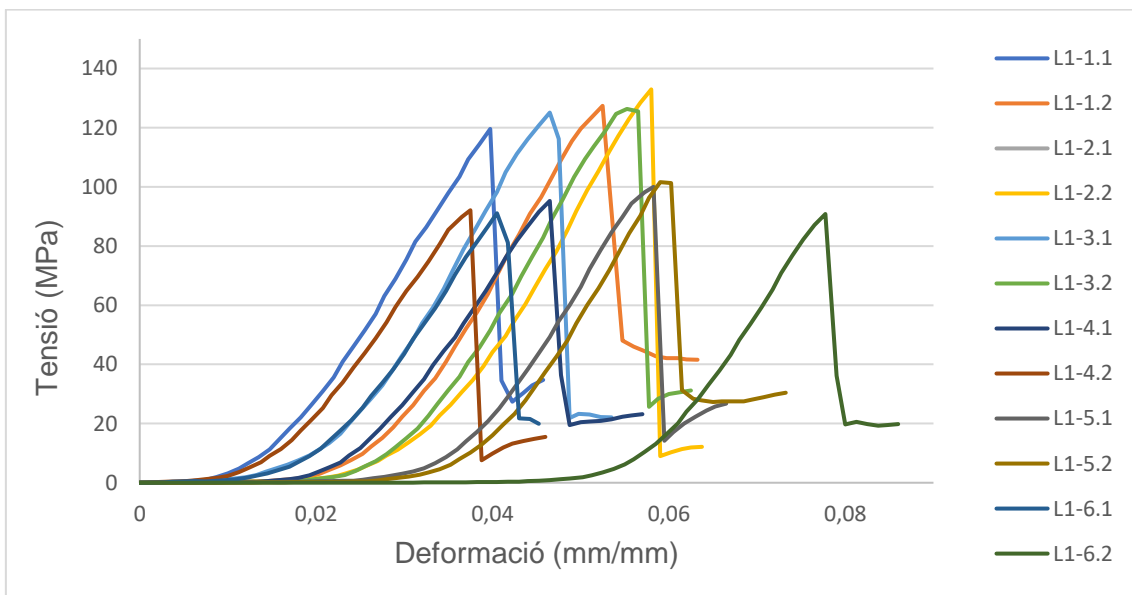


Figura E.14. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu L2 assajades a compressió.

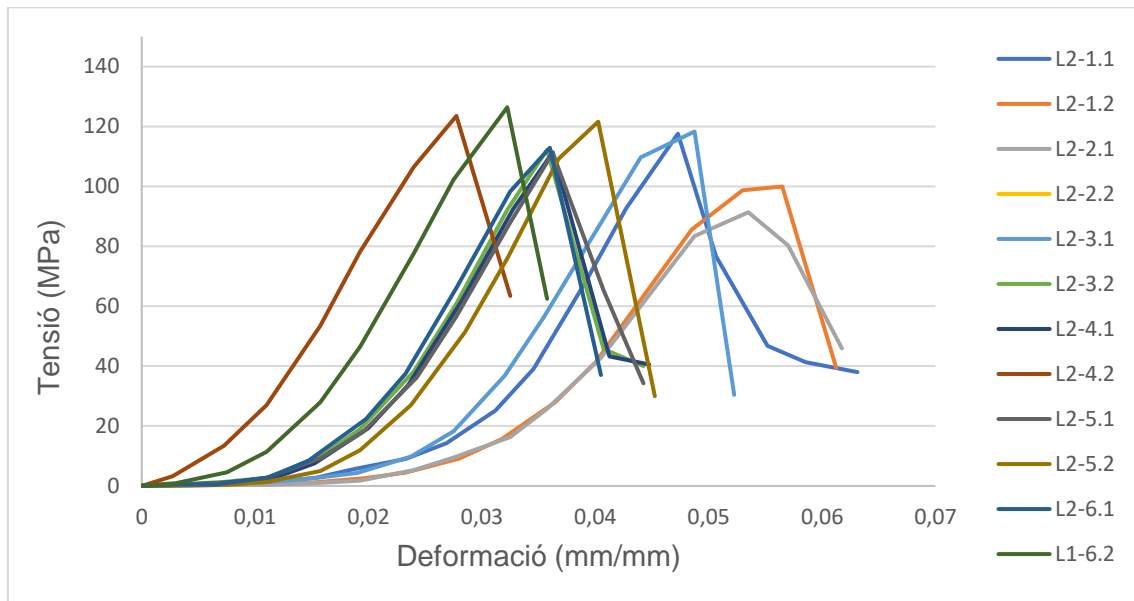


Figura E.15. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu LC3-L1 assajades a compressió.

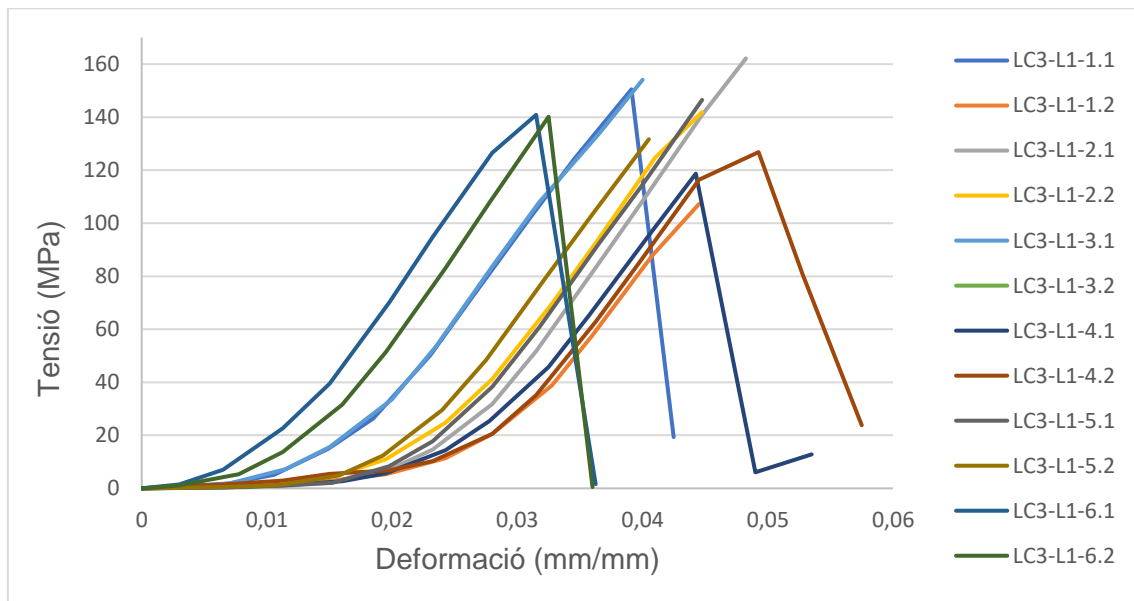


Figura E.16. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu M-LC3-L1 assajades a compressió

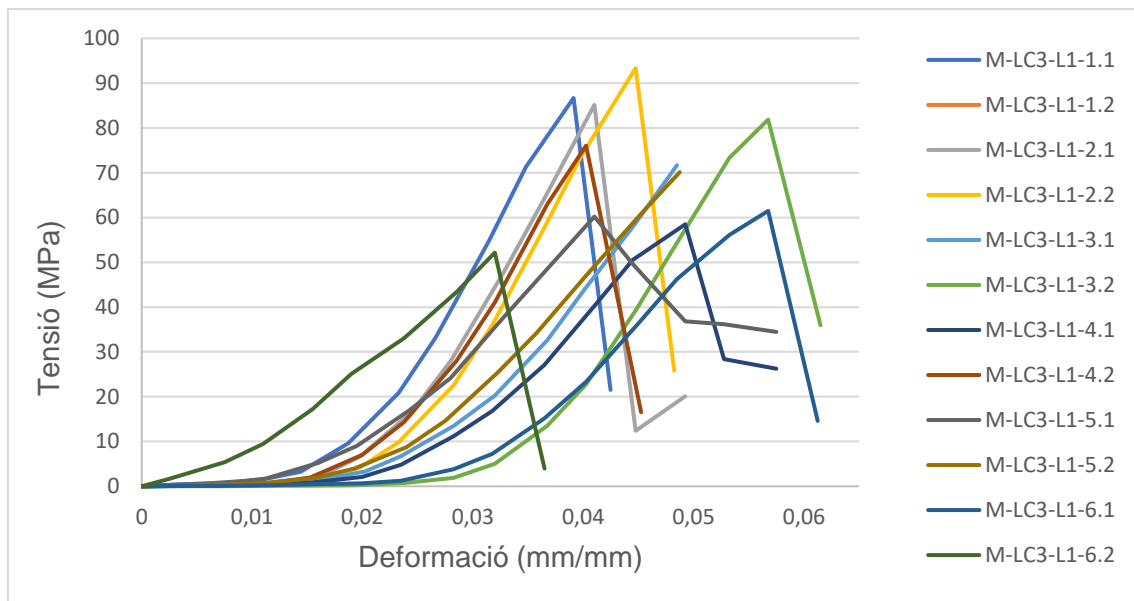


Figura E.17. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu LC3-L2 assajades a compressió.

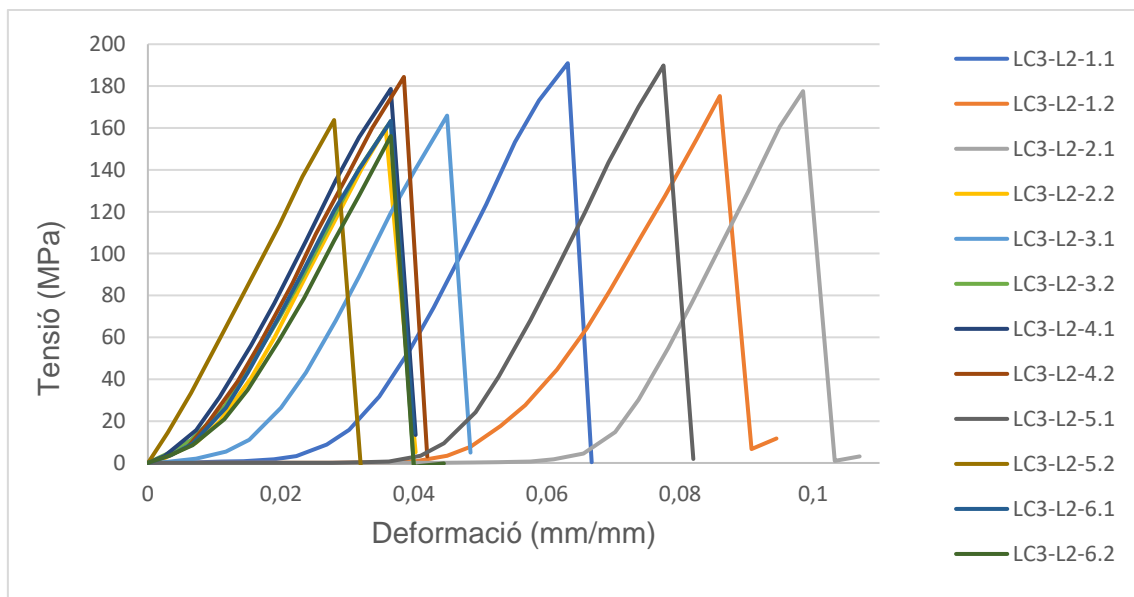


Figura E.18. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu M-LC3-L2 assajades a compressió.

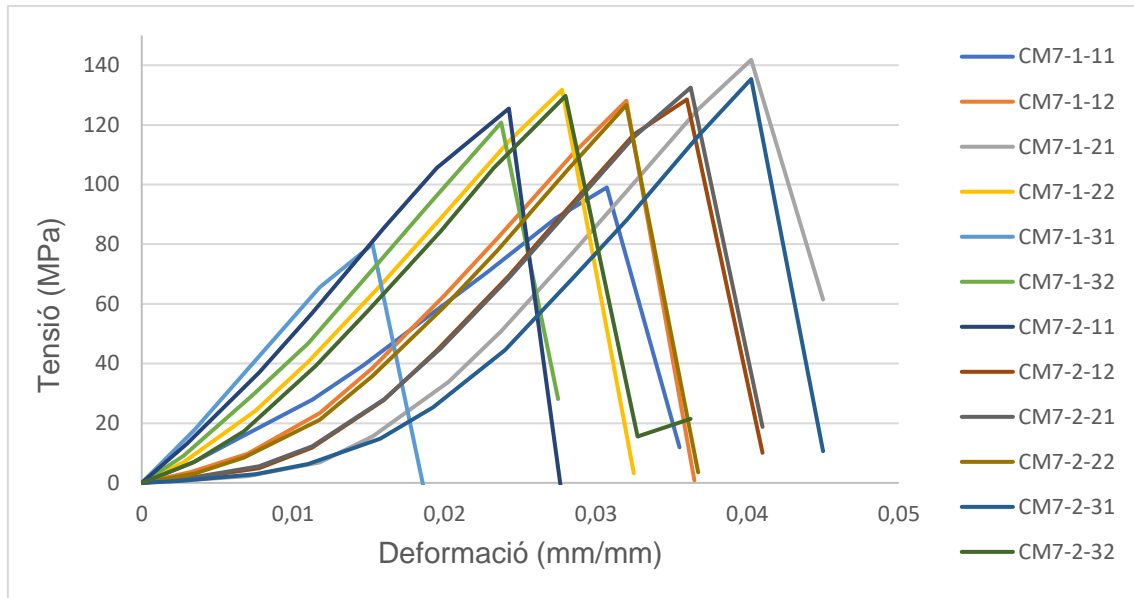


Figura E.19. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu LC3-KL-L2 assajades a compressió.

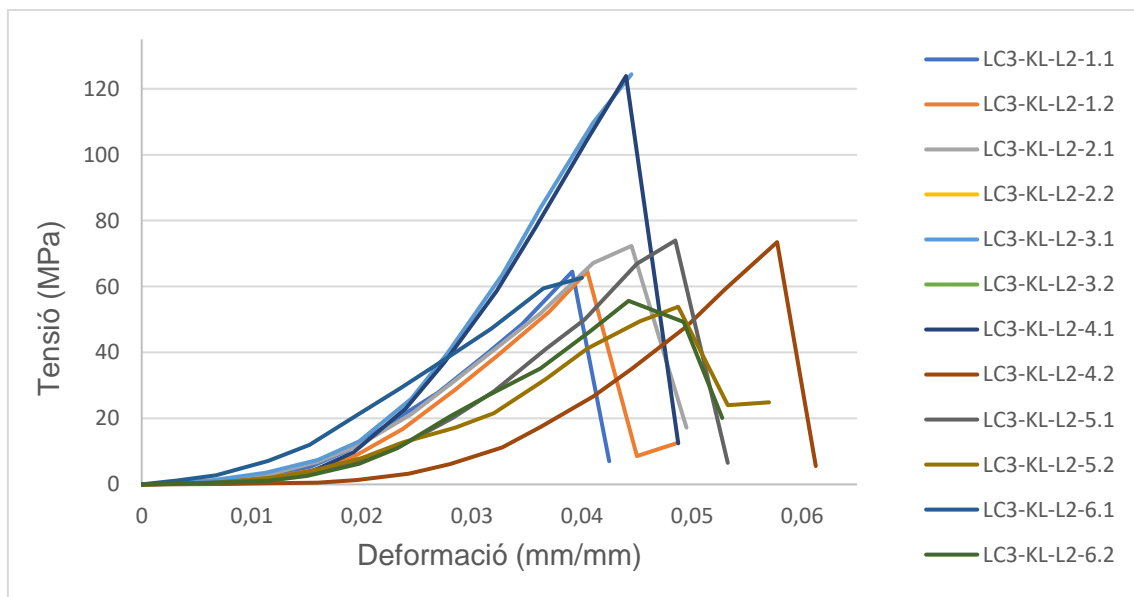


Figura E.20. Corbes tensió deformació de les provetes amb matriu M-LC3-KL-L2 assajades a compressió.

