



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria Agroalimentària  
i de Biosistemes de Barcelona

# VALORITZACIÓ DE RESIDUS DE FIBRES SINTÈTIQUES PER A LA FABRICACIÓ DE MATERIALS COMPOSTOS PER A LA CONSTRUCCIÓ

Treball final de grau

Enginyeria de Sistemes Biològics

Autor: Lluç Tost i López

Tutor: Josep Claramunt Blanes

24/ setembre / 2021



## Resum

És ben conegut que des de fa milers d'anys s'han usat en la construcció matrius pètries reforçades amb fibra. El seu ús ha estat constant al llarg de la història. La prohibició de l'ús d'amiant a les acaballes del segle XX obre una nova etapa dins els fibrociments. Paral·lelament, la creixent degradació del planeta fruit del model productiu lineal està obligant a destinar esforços a buscar maneres de pal·liar la problemàtica. Un dels principals problemes és l'elevada quantitat de residus que es generen, calen doncs, estratègies per tal de revaloritzar aquests residus.

L'objectiu del present treball és definir les característiques mecàniques de plaques de ciment reforçades amb no teixits d'aramida. També son objectius la determinació de la influència del nombre de capes de no teixit així com l'efecte de l'envelliment en les seves propietats. S'ha considerat oportú analitzar si el gruix de les plaques influeix en els resultats finals de les plaques.

S'han elaborat plaques de 30x30 cm seguint una adaptació del sistema Hastchek. Les plaques estaven reforçades amb quatre, cinc o sis capes de no teixit. Per a la fabricació dels no teixits s'han utilitzat fibres d'aramida procedents de residus tèxtils triturats. Per a cada composició de placa unes han estat assajades als vint-i-vuit dies (control) i unes altres s'han sotmès a envelliment forçat en cicles sec-humit o en cicles gel-desgel.

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 plaques de ciment reforçades amb només quatre capes presenten pitjors propietats mecàniques que les reforçades amb cinc o sis capes. En canvi, entre cinc i sis capes no s'han observat diferències significatives. Respecte l'envelliment, el cicles sec-humit han deteriorat les propietats mecàniques de forma dràstica mentre que els cicles gel-desgel no han mostrat cap alteració. La dispersió dels resultats no permet trobar cap relació entre el gruix de les plaques i les seves propietats mecàniques.

## Abstract

It is well known that since thousand years ago brittle matrix reinforced with fiber have been used for construction. Their use has been constant all over the history. Since the prohibition of the use of asbestos at the end of the XX century a new era began inside the fibrecement. Simultaneously, the growth degradation of the planet resulting from the productive lineal model is forcing to allocate efforts in finding ways to palliate the problematic. One of the principal problems is the high quantity of waste that is generated, it is therefore necessary strategies in order to revalorize this amount of waste.

The main objective in the present work is to define the mechanic characteristics of the cement-based composites reinforced with aramid non-woven. In addition, the determination of the influence of the number of layers of non-woven as well as the effect of the aging in their properties are also objectives of this work. It has been deemed appropriate to analyze if the thickness from the composites influences over its final result.

Composites of 30x30cm have been made following an adaptation of Hastchek system. The composites were reinforced with four, five or six layers of non-woven. For the non-wovens fabrication have been used aramid fibers coming from crushed textile residues. For each configuration of composites some of them have been tested past twenty-eight days (control) and the left ones have been submitted in a forced aging in dry-humid cycles or ice-breakup cycles.

As principal indicators of the mechanic properties it has been calculated, for each composite, the modulus of rupture (MOR), elastic modulus (MOE), limit of proportionality (LOP) and the energy absorbed during the essay. It has been realized traction tests and four point bending tests.

The results have showed that the four-layer fiber reinforced composites have worth mechanical properties than the ones reinforced with five or six layers. Instead, between five and six layers not significant differences have been detected. Concerning the aging, the dry-humid cycles have deteriorated the mechanic properties in a drastic way while the ice-breakup cycles haven't showed any alteration. There is not any relation between the thickness and the mechanic properties due to the dispersion of the results.

# Sumari

<b>ÍNDEX DE FIGURES</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDEX DE TAULES</b>	<b>11</b>
<b>SÍMBOLS I ACRÒNIMS</b>	<b>13</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>15</b>
<b>1. INTRODUCCIÓ</b>	<b>16</b>
1.1. Història .....	16
1.2. Matriu: ciment.....	17
1.3. Fibra: aramida .....	18
1.4. Fibrociment .....	21
1.5. Fibrociments d'aramida .....	25
<b>2. EMERGÈNCIA CLIMÀTICA</b>	<b>27</b>
2.1. Generació de residus.....	30
2.2. Indústria de la construcció .....	30
2.3. Indústria de la moda .....	32
<b>3. OBJECTIUS</b>	<b>34</b>
<b>4. MATERIALS I MÈTODES</b>	<b>35</b>
4.1. Materials.....	35
4.1.1. Matriu.....	35
4.1.2. Fibra .....	36
4.2. Mètodes .....	36
4.2.1. Elaboració dels no teixits.....	36
4.2.2. Preparació de la matriu.....	38
4.2.3. Elaboració i curat de les plaques.....	39
4.2.4. Assaig de les plaques.....	40
4.2.5. Tractament d'envelliment accelerat.....	44
<b>5. DISSENY EXPERIMENTAL</b>	<b>47</b>
<b>6. RESULTATS</b>	<b>49</b>
6.1. Caracterització dels no teixits .....	50
6.2. Caracterització de les plaques control .....	50
6.2.1. Tracció .....	50
6.2.2. Flexió.....	53

---

6.3.	Durabilitat de les plaques.....	55
6.3.1.	Cicles sec-humit.....	55
6.3.2.	Cicles gel-desgel .....	59
6.4.	Gruix de les plaques .....	64
<b>7.</b>	<b>DISCUSSIÓ</b> .....	<b>66</b>
7.1.	No teixit .....	66
7.2.	Característiques mecàniques de les plaques.....	66
	<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>71</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>73</b>
	Referències bibliogràfiques .....	73
	<b>ANNEXOS</b> .....	<b>83</b>
	Annex A. Fitxa tècnica del ciment.....	83
	Annex B. Relació aigua ciment de les plaques.....	84
	Annex C. Dimensions i pesos de les provetes .....	86
	Annex D. Corbes tensió-deformació.....	89
	Annex E. Corbes de gruix .....	95

# Índex de figures

<i>Figura 1.1. Classificació de les fibres artificials proposada per la BISFA.</i>	19
<i>Figura 1.2. Fórmula química de la meta-aramida.</i>	20
<i>Figura 1.3. Fórmula química de la para-aramida.</i>	20
<i>Figura 2.1. Emissions de CO<sub>2</sub> a nivell mundial les últimes dècades.</i>	28
<i>Figura 2.2. Temperatura mitjana global des de 1850-1900 fins l'actualitat.</i>	28
<i>Figura 2.3. Evolució emissions totals de CO<sub>2</sub> a Catalunya.</i>	29
<i>Figura 2.4. Evolució de les emissions de CO<sub>2</sub> mundials per al període 1751-2011 causades per la combustió de combustibles fòssils i la fabricació de ciment i torxes.</i>	31
<i>Figura 2.5. Evolució de la producció de clínquer a Catalunya.</i>	31
<i>Figura 2.6. Percentatge de residus en funció de l'origen dels països de la OECD.</i>	32
<i>Figura 4.1. Triturat d'aramida procedent dels polos del cos de Bombers de la Generalitat de Catalunya.</i>	36
<i>Figura 4.2. Triturat de fibra a l'entrada i sortida de la màquina de carda.</i>	37
<i>Figura 4.3. Napes entrant a la màquina punxonadora. A la fotografia de l'esquerra entrant per primera vegada, a la de la dreta per segona vegada.</i>	37
<i>Figura 4.4. A dalt a l'esquerra safata amb el ciment diluït on es van impregnar les napes. A dalt a la dreta càmera de buit amb una capa de ciment a ja col·locada. A baix a l'esquerra premsa preparada per extreure l'aigua sobrant. A baix a la dreta serra amb que es van tallar les plaques.</i>	40
<i>Figura 4.5. Provetes de 6, 5 i 4 capes, de dalt a baix respectivament, un cop tallades.</i>	41
<i>Figura 4.6. Probeta col·locada a la UTM per ser assajada a tracció.</i>	42

---

<i>Figura 4.7. Proveta essent assajada a flexió. Font: pròpia.</i>	43
<i>Figura 4.8. Composició de dos cicles sencers en l'envelliment sec-humit.</i>	45
<i>Figura 4.9. Composició d'un cicle sencer en l'envelliment gel-desgel.</i>	45
<i>Figura 5.1. Esquema del tall de la placa 5C-C en sis provetes i de la destinació d'aquestes.</i>	47
<i>Figura 6.1. Esquema del càlcul per l'obtenció del MOR, LOP, MOE i energia.</i>	49
<i>Figura 6.2. Corbes característiques per a les plaques control pels assaigs de tracció.</i>	51
<i>Figura 6.3. Mitjanes obtingudes per a les plaques control pels assaigs de tracció. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.</i>	52
<i>Figura 6.4. Corbes característiques per a les plaques control pels assaigs de flexió.</i>	53
<i>Figura 6.5. Mitjanes obtingudes per a les plaques control pels assaigs de flexió. Les barres d'error mostren la desviació estàndard.</i>	54
<i>Figura 6.6. Corbes representatives per a les plaques csh en els assaigs de tracció.</i>	55
<i>Figura 6.7. Mitjanes obtingudes per a les plaques csh (color fosc) i control (color clar) pels assaigs de tracció. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.</i>	56
<i>Figura 6.8. Corbes representatives per a les plaques csh en els assaigs de flexió.</i>	57
<i>Figura 6.9. Mitjanes obtingudes per a les plaques csh (color fosc) i control (color clar) pels assaigs de flexió. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.</i>	58
<i>Figura 6.10. Corbes representatives per a les plaques cgd en els assaigs de tracció.</i>	60
<i>Figura 6.11. Mitjanes obtingudes per a les plaques cgd (color fosc) i control (color clar) pels assaigs de tracció. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.</i>	61
<i>Figura 6.12. Corbes representatives per a les plaques cgd en els assaigs de flexió.</i>	62



<i>Figura 6.13. Mitjanes obtingudes per a les plaques cgd (color fosc) i control (color clar) pels assaigs de flexió. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.</i>	63
<i>Figura 6.14. Valors obtinguts pels quatre paràmetres estudiats segons el gruix de les plaques 5C-C-T.</i>	65
<i>Figura 6.15. Valors obtinguts pels quatre paràmetres estudiats segons el gruix de les plaques 5C-C-F.</i>	65
<i>Figura 7.1. Resum de les mitjanes obtingudes en els assaigs de tracció. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.</i>	67
<i>Figura 7.2. Resum de les mitjanes obtingudes en els assaigs de flexió. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.</i>	68
<i>Figura 7.3. Imatges a lupa de les fibres. A l'esquerra control, a la dreta sec-humit i a baix gel-desgel.</i>	69
<i>Figura A.1. Fitxa tècnica del ciment proporcionada pel fabricant.</i>	83
<i>Figura D.1. Corbes tensió-deformació de les plaques control assajades a tracció.</i>	89
<i>Figura D.2. Corbes tensió-deformació de les plaques control assajades a flexió.</i>	90
<i>Figura D.3. Corbes tensió-deformació de les plaques sec-humit assajades a tracció.</i>	91
<i>Figura D.4. Corbes tensió-deformació de les plaques sec-humit assajades a flexió.</i>	92
<i>Figura D.5. Corbes tensió-deformació de les plaques gel-desgel assajades a tracció.</i>	93
<i>Figura D.6. Corbes tensió-deformació de les plaques gel-desgel assajades a flexió.</i>	94
<i>Figura E.1. Corbes de gruix de les plaques 4C-C-T.</i>	95
<i>Figura E.2. Corbes de gruix de les plaques 5C-C-T.</i>	95
<i>Figura E.3. Corbes de gruix de les plaques 6C-C-T.</i>	96

<i>Figura E.4. Corbes de gruix de les plaques 4C-E-T.</i>	96
<i>Figura E.5. Corbes de gruix de les plaques 5C-E-T.</i>	96
<i>Figura E.6. Corbes de gruix de les plaques 6C-E-T.</i>	96
<i>Figura E.7. Corbes de gruix de les plaques 4C-H-T.</i>	96
<i>Figura E.8. Corbes de gruix de les plaques 5C-H-T.</i>	96
<i>Figura E.9. Corbes de gruix de les plaques 6C-H-T.</i>	96
<i>Figura E.10. Corbes de gruix de les plaques 5C-C-F.</i>	96
<i>Figura E.11. Corbes de gruix de les plaques 6C-C-F.</i>	96
<i>Figura E.12. Corbes de gruix de les plaques 4C-E-F.</i>	96
<i>Figura E.13. Corbes de gruix de les plaques 5C-E-F.</i>	96
<i>Figura E.14. Corbes de gruix de les plaques 6C-E-F.</i>	96
<i>Figura E.15. Corbes de gruix de les plaques 4C-H-F.</i>	96
<i>Figura E.16. Corbes de gruix de les plaques 5C-H-F.</i>	96
<i>Figura E.17. Corbes de gruix de les plaques 6C-H-F.</i>	96

## Índex de taules

<i>Taula 4.1. Característiques del ciment utilitzat proporcionades pel fabricant. Font: Cementos Molins Industrial S.A.</i>	35
<i>Taula 4.2. Paràmetres de configuració de l'assaig de les napes.</i>	38
<i>Taula 5.1. Nomenclatura de les provetes.</i>	48
<i>Taula 6.1. Caracterització del no teixit obtingut.</i>	50
<i>Taula 6.2. Resultats del test de Tukey per a les plaques control assajades a tracció. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una <math>p = 0,05</math>.</i>	52
<i>Taula 6.3. Resultats obtinguts per a la prova t-student per a les plaques control assajades a flexió. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una <math>p = 0,05</math>.</i>	54
<i>Taula 6.4. Resultats del test de Tukey per a les plaques csh assajades a tracció. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una <math>p = 0,05</math>.</i>	56
<i>Taula 6.5. Resultats obtinguts per a la prova t-student comparant les mitjanes dels assaigs de tracció de les plaques csh i les control per a cada nombre de capes de no teixit. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una <math>p = 0,05</math>.</i>	57
<i>Taula 6.6. Resultats del test de Tukey per a les plaques csh assajades a flexió. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una <math>p = 0,05</math>.</i>	59
<i>Taula 6.7. Resultats obtinguts per a la prova t-student comparant les mitjanes dels assaigs de flexió de les plaques csh i les control per a cada nombre de capes de no teixit. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una <math>p = 0,05</math>.</i>	59
<i>Taula 6.8. Resultats del test de Tukey per a les plaques cgd assajades a tracció. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una <math>p = 0,05</math>.</i>	61

<i>Taula 6.9. Resultats obtinguts per a la prova t-student comparant les mitjanes dels assaigs de tracció de les plaques cgd i les control per a cada nombre de capes de no teixit. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una <math>p = 0,05</math>.</i>	62
<i>Taula 6.10. Resultats del test de Tukey per a les plaques cgd assajades a flexió. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una <math>p = 0,05</math>.</i>	64
<i>Taula 6.11. Resultats obtinguts per a la prova t-student comparant les mitjanes dels assaigs de flexió de les plaques cgd i les control per a cada nombre de capes de no teixit. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una <math>p = 0,05</math>.</i>	64
<i>Taula B.1. Relació aigua ciment durant l'elaboració de les plaques.</i>	84
<i>Taula B.2. Relació aigua ciment final de les plaques.</i>	85
<i>Taula C.1. Dimensions i pesos de les provetes control assajades a tracció.</i>	86
<i>Taula C.2. Dimensions i pesos de les provetes control assajades a flexió.</i>	86
<i>Taula C.3. Dimensions i pesos de les provetes sec-humit assajades a tracció.</i>	87
<i>Taula C.4. Dimensions i pesos de les provetes sec-humit assajades a flexió.</i>	87
<i>Taula C.5. Dimensions i pesos de les provetes gel-desgel assajades a tracció.</i>	88
<i>Taula C.6. Dimensions i pesos de les provetes gel-desgel assajades a flexió.</i>	88

## Símbols i acrònims

4C. Plaques amb quatre capes de no teixit

5C. Plaques amb cinc capes de no teixit

6C. Plaques amb sis capes de no teixit

$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Disilicat alumínic dihidratat, argila

BISFA. Oficina Internacional per l'Estandarització de les Fibres Artificials

C. Plaques control

cgd. Cicles gel-desgel

csh. Cicles sec-humit

$\text{CaCO}_3$ . Carbonat de calci, pedra calcària

$\text{CH}_4$ . Metà.

$\text{CO}_2$ . Diòxid de carboni

E. Plaques a cicles sec-humit

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

F. Plaques assajades a flexió

FACRFA. Formigó autocompactant reforçat amb fibres d'acer

FRFA. Formigó reforçat amb fibres d'acer

FRFVI. Formigó reforçat amb fibres de vidre

FS. Fibres sintètiques

FV. Fibres vegetals

FVI. Fibres de vidre

GEH. Gasos d'efecte hivernacle

H. Plaques a cicles gel-desgel

HR. Humitat relativa

LOP. Límit de proporcionalitat

MOE. Mòdul d'elasticitat

MOR. Mòdul de ruptura

$\text{N}_2\text{O}$ . Òxid de dinitrogen, òxid nitròs

NTA. No teixit d'aramida

ONU. Organització de les Nacions Unides

PAD. Polietilè d'alta densitat

PE. Polièster

PP. Polipropilè

PVA. Polivinilalcohol

$R^2$ . Coeficient de determinació

RILEM. Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux

SD. Desviació estàndard

T. Plaques assajades a tracció

UTM. Universal testing machine

## **Agraïments**

Agrair al Josep Claramunt Blanes, com a tutor del treball, la dedicació i entrega al llarg del treball. En especial en l'ajuda en tots els tràmits burocràtics per tal de poder tirar endavant aquest treball.

Agrair a la Mònica Ardanuy Raso i tots els companys del Departament d'enginyeria tèxtil i paperera de l'ESEIAAT el seguiment al llarg del període d'elaboració dels no teixits així com la cessió de la maquinària necessària.

# 1. Introducció

Les matrius cimentoses tenen poca ductilitat degut, sobretot, a la seva baixa resistència a tracció. Aquestes propietats, en canvi, són molt necessàries per a la major part de materials de construcció que normalment estan sotmesos a esforços de flexió i tracció. És per això que es fa necessari l'ús de reforços interns o externs que millorin aquests atributs. El principal reforç que s'utilitza actualment són les barres d'acer dins l'estructura de formigó, donant lloc al formigó armat. Les barres d'acer aporten resistència a la tracció. Això permet suportar millor els esforços de tracció, flexió, tallant i torsió minimitzant l'aparició d'esquerdes. L'altre possible reforç per les matrius cimentoses són les fibres. A diferència de les barres d'acer, la seva distribució dins la matriu en la majoria de casos és discontinua i aleatòria el que fa que no siguin tant eficients resistint esforços de tracció. És per això, que en termes generals, el reforç de fibres s'utilitza per reduir l'aparició d'esquerdes mentre que per augmentar la capacitat de càrrega s'usen les barres d'acer.

Les fibres aconsegueixen millorar el comportament del material un cop hi ha la primera esquerda. És, en aquest moment, quan l'esforç recau majoritàriament sobre les fibres el que permet la deformació del material. Deixa de ser un material rígid i fràgil per passar a ser un material dúctil. Aquesta deformació millora la resistència a l'impacte, és a dir, augmenta la capacitat d'absorció d'energia.

La ductilitat adquirida gràcies al reforç de la fibra fa que les aplicacions d'aquests materials vagin enfocades a usos en els que la deformació és important com per exemple elements de façanes i interiors, panells, cobertes, etc.

## 1.1. Història

Els materials compostos de matriu pètria i fibra ja s'utilitzaven en la prehistòria per a la construcció. Un exemple n'és la tova, producte de la barreja de fang i fibra vegetal. No és, però, fins a principis del segle XX que neix el concepte de *fibrociment* fruit de la millora de les propietats del ciment en incorporar fibres d'amiant. Ràpidament aquest nou material passa a ser altament utilitzat en la construcció per les seves propietats. Si les comparem amb la matriu pètria sense



fibra, en destaca per l'alta resistència al foc, l'aïllament tèrmic i acústic i bona resistència a esforços de tracció.<sup>[1]</sup>

A principis de segle ja es comença a advertir del possibles efectes nocius de l'amiant però no és fins el 1924, que es reporta la primera víctima com a conseqüència de l'exposició a aquest.<sup>[2]</sup> Les cada vegada més evidents relacions entre l'amiant i malalties pulmonars i la disminució de l'obtenció de matèria primera a causa de la I i II Guerres Mundials fan que poc a poc es destinin més esforços a buscar fibres alternatives amb propietats el més semblants possibles. Una de les primeres opcions que es tenen en compte és l'ús de fibres vegetals. La seva abundància fa que les fibres vegetals tinguin un baix cost podent així mantenir un baix preu i una abundant quantitat de matèria primera.

Paral·lelament es fabriquen fibres sintètiques (fibra de vidre, polivinilacohol...) que, mesclades amb el ciment, ofereixen propietats similars a les de l'amiant. No obstant, el seu preu és massa elevat i s'usen només per a aplicacions molt concretes.<sup>[1]</sup> Tot i les evidències, no és fins el 1999 que a la Unió Europea es prohibeix definitivament l'ús de productes amb amiant.<sup>[3]</sup>

## **1.2. Matriu: ciment**

El ciment és un conglomerat hidràulic altament utilitzat en la construcció per la seva resistència a compressió i pel seu baix cost en comparació amb altres materials com l'acer.

La norma UNE-EN 197-1:2011 descriu el ciment com «El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, cuando es amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.»

El principal component del ciment és el clínquer. S'obté de la calcinació a temperatures entre 1400 °C i 1500 °C<sup>[5]</sup> de pedra calcària (CaCO<sub>3</sub>), argila (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O) i altres addicions com sorra, pirita, hematita... Posteriorment es mol tot.

Com a productes finals es forma silicat bicàlcic, silicat tricàlcic, aluminat tricàlcic, aluminoferrit tetracàlcic i, en menor mesura, calç lliure i òxids de magnesi. El silicat bicàlcic i el silicat tricàlcic han de suposar mínim dos terços de la massa del clínquer.

El ciment pot contenir addicions. Se'n consideren majoritàries totes aquelles que conformen més d'un 5 % en massa del total.<sup>[6]</sup>

1. Escòria d'alt forn
2. Putzolanes
3. Cendres volants
4. Esquist calcinat
5. Pedra calcària
6. Fum de sílice
7. Sulfat de calci

També poden contenir addicions minoritàries que no poden sumar més d'un 5 % en massa del total. Són materials minerals naturals o derivats del procés de fabricació del clínquer. Normalment aporten alguna millora en les propietats físiques com la retenció d'aigua.

Finalment, per millorar les prestacions dels ciments, aquests també poden incorporar additius. Es consideren additius tots aquells components que no estan contemplats com a addicions. En la suma de tots ells no excedeixen l'1 % en massa.

### **1.3. Fibra: aramida**

Tot i que hi ha forces maneres de classificar les fibres (per les característiques físiques, per les característiques químiques, per l'origen dels seus constituents...), una de les classificacions més acceptades és la que proposa l'Oficina Internacional per l'Estandardització de les Fibres Artificials (BISFA). (Figura 1.1)

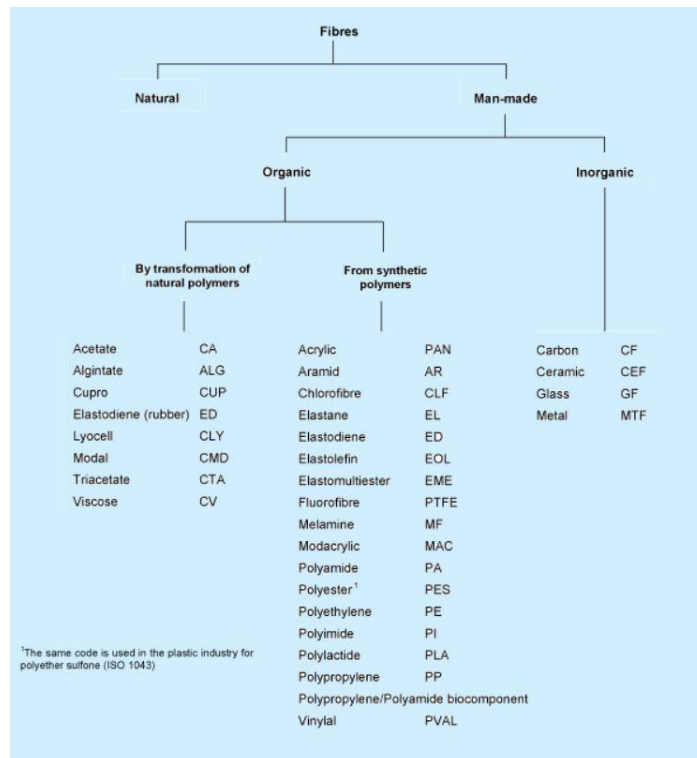


Figura 1.1. Classificació de les fibres artificials proposada per la BISFA. Font: <https://bisfa.org/generic-fibre-names/>

Les fibres orgàniques tenen tres característiques estructurals comunes: elevat grau de cristallinització, ordenació lateral ordenada i baix contingut de defectes axials.<sup>[8]</sup> Es poden classificar en tres categories:<sup>[9]</sup>

1. Fibres de polímers de líquid liotròpic cristal·lí. Com per exemple les fibres d'aramida.
2. Fibres de cadenes de polímers flexibles allargades. Com per exemple fibres de polietilè de cadena llarga d'elevat pes molecular.
3. Fibres de polímers de líquid termotròpic cristal·lí. Com per exemple copolímers d'àcid naftoic i benzoic.

El nom d'aramida és un nom creuat que prové de la unió de les paraules "aromatic polyamide". Està formada per macromolècules lineals compostes per grups aromàtics units per grups amides o imides. Com a mínim un 85 % dels grups amides o imides han d'estar units dos anells aromàtics. El total de grups imides no pot superar els d'amides.

L'aramida es degrada a una temperatura superior als 380 °C i no es fon per sota d'aquesta. Això la converteix en un teixit força utilitzat com a recobriments de protecció contra el foc. En canvi, l'exposició als raigs ultraviolats degrada de forma considerable les seves propietats obligant així a recobrir els teixits per protegir-los.<sup>[9]</sup>

Hi ha dos tipus d'aramides, les meta-aramides i les para-aramides. Les meta-aramides es caracteritzen per una excel·lent resistència a la calor i per tenir un coeficient de dilatació tèrmic baix. No obstant, no ofereix una resistència massa elevada. Per això, la seva principal aplicació és en la fabricació de granotes tant pels pilots de competició com pels bombers i en material aeroespacial.

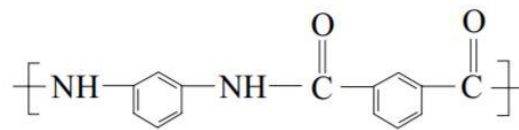


Figura 1.2. Fórmula química de la meta-aramida.  
Font: <https://bisfa.org/>

Les para-aramides, en canvi, tenen una elevada resistència; cinc cops major que la de l'acer.<sup>[10]</sup> L'abradió, flexió i tracció continuada afecten molt poc a les seves propietats. Algunes de les seves aplicacions són en armilles antibales, en la confecció de músculs pneumàtics o en el reforç a estructures danyades.<sup>[11, 12]</sup>

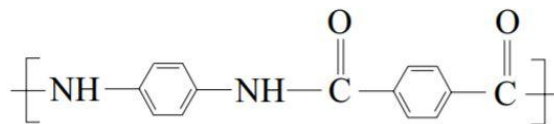


Figura 1.3. Fórmula química de la para-aramida.  
Font: <https://bisfa.org/>

Diverses empreses comercialitzen fibres d'aramida. Algunes de les fibres de para-aramides al mercat les comercialitzen l'empresa DuPont a través del nom Kevlar, Teijin sota el nom de Technora i Akzo Industrial Fibers amb el nom de Twaron. Per a les meta-aramides, algunes de les que es troben actualment al mercat són Nomex o Kermel comercialitzada per DuPont.

## 1.4. Fibrociment

Hi ha varies formes d'incorporar les fibres dins la matriu: fibra dispersa, teixides, no teixides, en punt de mitja, encolades o trenades.<sup>[13]</sup> 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.

Els 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 que comunament s'usen són d'alumini, carboni o acer, essent aquestes darreres les més utilitzades. El material compost resultant del reforç de formigó amb fibres d'acer (FRFA) es caracteritza per la seva alta resistència. Aquesta està directament relacionada amb la llargada de les fibres (relació d'aspecte entre 20 i 100). La col·locació de les fibres dins la matriu es fa de forma dispersa. 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.<sup>[14]</sup>

Actualment s'està treballant en l'adició de fibres d'acer a formigó autocompactant (FACRFA). El formigó autocompactant presenta millores respecte el formigó convencional com són l'eliminació del treball de compactació, una major homogeneïtat, major fluïdesa que permet accedir a zones densament armades... Tot i

que no són masses els estudis realitzats amb FACRFA en comparació amb els de FRFA, aparentment el FACRFA presenta una major ductilitat i un major càrrega màxima.<sup>[15]</sup>

## 2. Formigó reforçat amb fibres de vidre (FRFVI)

La principal avantatge de les fibres de vidre (FVI) 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. Les FVI tenen un mòdul d'elasticitat superior a la majoria de fibres orgàniques però menor que el de l'acer.

Altres beneficis del FRFVI són la seva resistència a flexió i tracció, elevada resistència a l'impacte, reducció del pes i gran aptitud per ser modelats.<sup>[16]</sup>

L'aplicació de fibra normalment es fa pel mètode de projecció simultània ja que permet una major homogeneïtat i una major proporció de fibra. La quantitat de fibra de vidre ve determinada per l'ús que hagi de tenir el material compost podent anar des de percentatges inferiors a l'1 % fins vora el 5 %.<sup>[16]</sup>

Una altra fibra que recentment està sent estudiada és la fibra de basalt com a reforç del formigó. Presenta un reforç estructural menor que el de les FVI però, en canvi, té una gran resistència a les elevades temperatures. Aquest fet la converteix en una alternativa per a estructures que han de suportar grans temperatures.<sup>[17]</sup> A més a més, A. B. Kizilkanat et al. en el seu estudi conclou que les fibres de basalt respecte les FVI aporten una millor manejabilitat del formigó, propietats mecàniques més altes i un comportament de fractura millor.<sup>[18]</sup>

## 3. Ciment reforçat amb fibres sintètiques

S'entén per fibres sintètiques (FS) aquelles que s'obtenen a partir de polímers sintètics normalment derivats del petroli. En les darreres dècades l'ús de FS ha augmentat molt en aconseguir superar la barrera econòmica de la seva producció. Es distingeixen dos

grans grups de fibres: les microfibras que s'usen per reduir la fissuració de la matriu o millorar la resposta a altes temperatures; i les macrofibras que s'usen com a substitutes de les fibres d'acer, per millorar les propietats mecàniques.<sup>[14]</sup> És habitual que en una mateixa matriu es combinin FS amb altres fibres, sintètiques o no, com a reforç aconseguint així una complementarietat i millora de les prestacions.

Dins les FS destaquen el niló, el polietilè d'alta densitat (PAD), el polipropilè (PP), l'acrílica, el polièster (PE) i l'aramida, aquesta darrera usada en el present treball i desenvolupada en un apartat únic. La fibra de PP a causa del seu baix preu i el seu fàcil processament ha estat la més estudiada. Per exemple, H. R. Pakravan (2019) compara els fibrociments de tres FS: PP, polivinilalcohol (PVA) i PE.<sup>[19]</sup> El PP 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. El principal avantatge que aporten les fibres de PP és un augment de la ductilitat fet que fa que s'usin sovint combinades amb fibres d'acer. El PE és de les tres el que presenta una resistència superior i un mòdul d'elasticitat superior. Consegüentment, els fibrociments de PE són els que presenten unes millors propietats mecàniques. El seu elevat preu ha estat el que ha limitat l'extensió del seu ús en la construcció. Finalment, pel que fa a les fibres de PVA tenen una alta adherència a la matriu cimentosa. Això millora el rendiment mecànic del fibrociment. El seu cost inferior i la major disponibilitat que el PE ha fet que el seu ús vagi en augment.

Les FS, a part d'aportar resistència a la flexió, tensió i compressió, també aporten resistència a impactes i disminució d'aparició d'esquerdes. De fet, és per aquestes darreres propietats per les que són principalment utilitzades. El FRFA presenta major capacitat de càrrega i d'absorció d'energia. D. J. Kim et al. (2008) en el seu estudi compara FRFA amb fibrociments de PAD i de PVA conclouent que el FRFA té unes millors propietats mecàniques.<sup>[20]</sup> Aquesta menor idoneïtat de les FS ha fet que actualment, aprofitant la seva bona compatibilitat, es baralla l'opció de combinar-les amb fibres d'algun altre grup (metàl·lica, de vidre o natural) per aquelles aplicacions en les que es requereixi resistència a tracció i a impactes simultàniament.<sup>[21,22]</sup>

#### 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. Aquests esforços s'han accentuat amb la creixent preocupació per la crisi climàtica. Així doncs, han estat multitud la varietat de fibres estudiades.

Dins aquest grup de fibrociments cal distingir-ne dos tipus de fibres: les artificials i les naturals. Les primeres provenen de materials naturals que han passat per un procés de manufactura per tal d'obtenir noves fibres amb millors propietats. En canvi, les naturals la fibra s'obté sense l'ús de processos químics. A continuació ens centrarem només en les naturals, en concret en les vegetals (FV).

El principal avantatge de les FV és la seva elevada disponibilitat el que comporta que es puguin adquirir a un baix preu. Altres característiques de les FV són la seva baixa densitat, una petjada de carboni nul·la, una bona biodegradabilitat i una gran disponibilitat de morfologies i formes.<sup>[21]</sup> Això fa que els ciments reforçats amb fibres vegetals (CRFV) siguin especialment adients per aplicacions en les que es requereixi lleugeresa o en les que es vulgui alleugerir el cost. També s'ha vist que els CRFV tenen bones propietats com a aïllants tèrmics i acústics.<sup>[23]</sup>

No obstant, les FV 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. El gran nombre de FV fa que hi hagi una grans diferències pel que fa a propietats físiques i mecàniques.<sup>[24]</sup> Són nombrosos els estudis que s'han fet analitzant les propietats de ciments reforçats amb FV com per exemple amb sisal<sup>[25]</sup>, pi<sup>[26]</sup>, jute o cànem.<sup>[27]</sup>

Crida l'atenció els possibles fibrociments que es puguin fer a partir de residus agrícoles. Presenten una doble avantatge: es valoritzen un gran nombre de residus actualment sense sortida i es poden adquirir a molt baix preu. Alguns dels residus que s'han estudiat són el bagàs de canya de sucre<sup>[28]</sup>, fibra de coco<sup>[29]</sup>, bagàs de blat<sup>[30]</sup>, blat de moro<sup>[31]</sup>, plàtan o l'eucaliptus.<sup>[26]</sup>



## 1.5. Fibrociments d'aramida

L'aramida, igual que altres fibres sintètiques, ha estat altament testada com a possible reforç pels materials de construcció. La majoria de vegades ha estat introduïda a la matriu mitjançant capes de teixit. Mobasher et al. (2014) compara fibrociments de carboni, fibra de vidre i polipropilè amb els d'aramida.<sup>[32]</sup> Els resultats mostren com el reforç d'aramida és el que mostra millors resultats després del de carboni. Conclusions similars es mostren a l'article de A Peled et al. (2008) on es compara l'aramida amb polietilè d'alta densitat, polipropilè i fibra de vidre.<sup>[33]</sup> L'aramida juntament amb polietilè mostren els millors resultats. Cal destacar que el fibrociment híbrid amb aramida i polipropilè, més barat que el de només aramida, mostra comportaments semblants al fibrociment d'aramida exclusivament.

No obstant, també hi ha estudis que analitzen el reforç del ciment amb fibra d'aramida introduïda sense estar teixida. Curosu et al. (2017) estudia la resistència a la tracció de ciment reforçat amb fibra de PAD, aramida i zylon.<sup>[34]</sup> Conclou que les fibres d'aramida i zylon presenten uns resultats significativament millors que els de PAD, suportant esforços superiors de tensió i presentant esquerdes més estretes.

Una altra línia d'aplicació que presenta bons resultats és la del reforç de la matriu amb barres de polímer reforçat. Consisteix en una matriu cilíndrica de resina, normalment èster d'epoxi o de vinil amb fibres encastades. Les fibres més usades són les de carboni, les d'aramida i les de vidre. Aquestes barres s'introdueixen dins el ciment o formigó aportant-li les mateixes propietats que les barres d'acers amb les que es prepara el formigó armat. El principals beneficis d'aquesta tecnologia són el seu baix preu, el seu baix pes i la major durabilitat en eliminar la corrosió.<sup>[35]</sup> Una de les seves potencials aplicacions és com a reforç de les travesses de les vies del tren. La seva major durabilitat així com la seva nul·la conductivitat elèctrica l'han situat com a alternativa a les barres d'acer.

No hi ha articles en els que s'utilitzin no teixits d'aramida (NTA) com a reforç d'una matriu cimentosa. Sí s'ha estudiat l'ús de NTA dins de matrius polimèriques.<sup>[36, 37, 38]</sup> Ni et al. (2015) introdueix capes de NTA entre làmines de polímer reforçat amb fibra de carboni.<sup>[39]</sup> Aquests polímers s'usen com a material estructural en l'aeronàutica per reduir les vibracions i el soroll. Es conclou que incorporant NTA en la dosi correcta es pot aconseguir un material que millori les

propietats aïllants. En una línia semblant, Wong et al (2017) combina les propietats de dues fibres per millorar el polímer reforçat amb fibra de carboni.<sup>[40]</sup> Introdueix capes de NTA i fibres fenoxi de forma discreta. Comproven que hi ha una sinèrgia entre els dues fibres introduïdes, fent que es millori la interacció matriu-fibra i consegüentment la transferència de càrregues. Així, obté un nou material compost amb una alta tolerància al dany després de l'impacte.

## 2. Emergència climàtica

Des de la invenció de la màquina de vapor i la conseqüent revolució industrial, les emissions de diòxid de carboni (CO<sub>2</sub>) han anat en augment. Ja des de finals del segle XIX s'apuntava que aquestes emissions suposaven un augment de la temperatura de la Terra. Ara bé, la preocupació sobre les possibles conseqüències d'aquest augment de la temperatura encara van trigar forces dècades a arribar. Així ho demostra la primera conferència de l'ONU sobre el medi humà l'any 1972 on es parlen temes com la contaminació química o la caça de balenes. Tot i així, amb prou feines es menciona el concepte de canvi climàtic.<sup>[41]</sup>

El concepte de canvi climàtic no apareix en l'esfera pública fins que l'any 1975 Wallace S. Broecker publica l'article *Climate Change: are we on the brink of a pronounced global warming?*<sup>[42]</sup>. En aquest preveia que les emissions de CO<sub>2</sub> farien augmentar de manera pronunciada la temperatura global. Tot i així, els primers passos van centrats en reduir els gasos que ataquen directament a la capa d'ozó no centrant l'atenció en els gasos d'efecte hivernacle (GEH). Així, el 1987 amb el Protocol de Montreal s'acorda reduir a la meitat les emissions de clorofluorocarburs<sup>[43]</sup> i el 1995 a la UE entra en vigor la prohibició de fabricar i importar clorofluorocarburs.<sup>[44]</sup> El 1992 a Rio de Janeiro té lloc la primera cimera pel clima per mirar de trobar un acord entre la majoria de països per fixar uns objectius comuns<sup>[45]</sup>. No és fins vint cimeres després que, a l'any 2015, es firma l'Acord de París. El document és ratificat per més de dos-cents països i, s'acorda, que la temperatura global a finals del segle XXI no pot ser més de 2 °C superior a la del període preindustrial.<sup>[46]</sup>

Les emissions de GEH; sobretot CO<sub>2</sub>, metà (CH<sub>4</sub>) i òxid nitrós (N<sub>2</sub>O), han anat creixent a una velocitat lineal les últimes quatre dècades. L'any 2019 va marcar un nou rècord de concentració mitjana de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera situant-se a 410,5 µl/l.<sup>[47]</sup> Tot i la reducció temporal de les emissions de GEH, arrel de la pandèmia de COVID-19 i els consegüents confinaments, aquesta disminució afectarà lleugerament a la taxa de creixement global però en cap cas a les conseqüències derivades com l'augment de temperatura.

Aquest augment de les emissions de GEH és conseqüència de l'ús de combustibles fòssils indiscriminat i exclusiu. L'augment de les economies a nivell global juntament amb un augment de

la població ha portat a un augment del ritme d'exploració d'aquests recursos. Això genera un doble problema: per un costat un augment de les emissions de GEH i les conseqüències que en deriven; per l'altre costat, una dependència cap a uns recursos finits i amb manca d'alternativa.

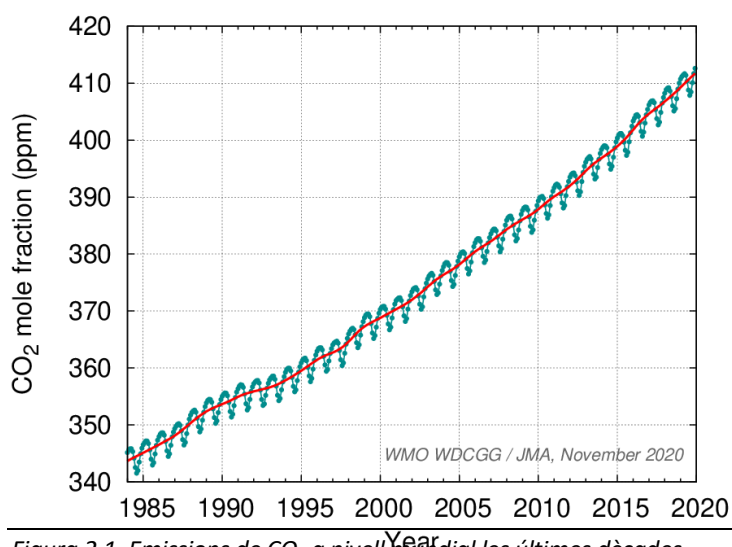


Figura 2.1. Emissions de CO<sub>2</sub> a nivell mundial les últimes dècades.  
Font: State of the Global Climate 2020.

Com s'ha dit, al 2020 tot i el context marcat per la COVID-19, la temperatura mitjana va ser 1,2 °C superior a la del període entre 1850 i 1900. Aquest resultat col·loca al 2020 entre els tres anys més càlids. Cal mencionar que els últims deu anys encapçalen la llista dels anys amb temperatures mitjanes més elevades. L'augment de temperatures de l'atmosfera fa augmentar de retruc la temperatura de les aigües oceàniques. Aquesta és la principal causa del desgel dels pols i com a conseqüència un augment del nivell del mar.

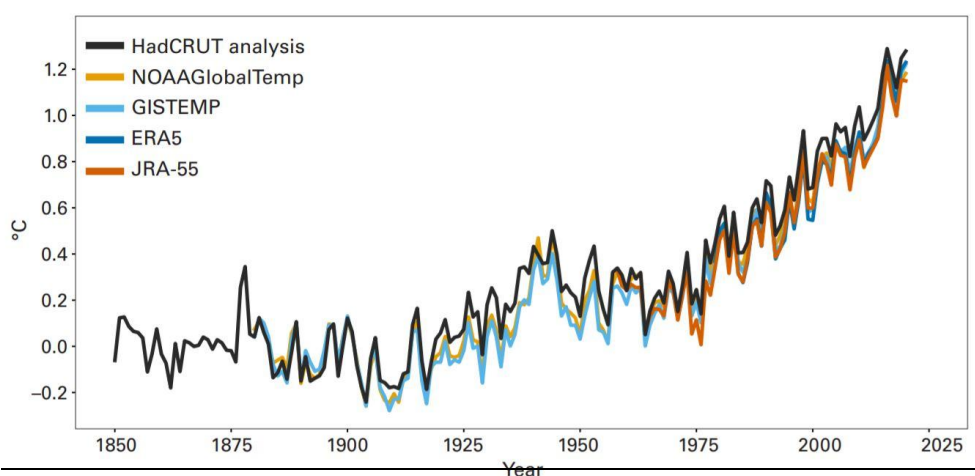


Figura 2.2. Temperatura mitjana global des de 1850-1900 fins l'actualitat. Font: Met Office.

Altres conseqüències de l'augment de la concentració de CO<sub>2</sub> i de les temperatures són l'acidificació de l'oceà a causa de l'absorció de CO<sub>2</sub> atmosfèric; el desgel de glaceres i la pèrdua d'aigua dolça; la variació de la pluviometria concentrant-la en episodis més concrets...<sup>[47]</sup>

Catalunya no escapa d'aquesta realitat i com a contribució a l'Acord de París s'ha compromès a reduir en un 40 % les emissions de GEH per al 2030 respecte al nivell del 2005. Aquesta reducció formarà part de la contribució espanyola de reduir un 25 % les emissions durant el mateix període.<sup>[49]</sup> L'oficina Catalana del Canvi Climàtic s'encarrega de supervisar el compliment dels acords presos per la millora de la situació climàtica.

Les emissions de GEH a Catalunya presenten un patró molt similar al del conjunt de l'estat mostrant un augment irregular però sostingut fins l'any 2005. A partir d'allà i arrel de la crisi econòmica, les emissions experimenten una davallada brusca. (Figura 2.3)

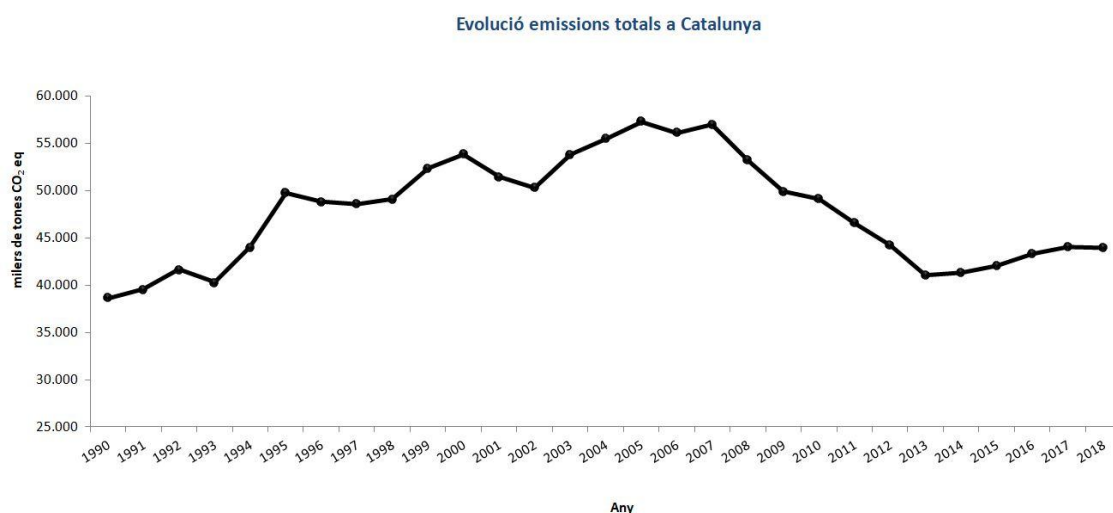


Figura 2.3. Evolució emissions totals de CO<sub>2</sub> a Catalunya.

Font: [https://canvicultimatic.gencat.cat/ca/canvi/inventaris/emissions\\_de\\_geh\\_a\\_catalunya/](https://canvicultimatic.gencat.cat/ca/canvi/inventaris/emissions_de_geh_a_catalunya/)

Pel que fa a l'evolució de les temperatures cal destacar que dins el període 1950-2019, set dels deu anys més càlids pertanyen a la darrera dècada.<sup>[51]</sup> El més alarmant és que cal remuntar-nos trenta-cinc anys enrere per trobar un dels deu anys més freds. Els que mostren també un canvi en les darreres dècades són els índexs d'extremes (dies de glaçada, dies de calor, nits fredes...). Pel que fa a la pluviometria, la tendència a part d'anar a la baixa és de grans irregularitats interanuals i intraanuals.

## 2.1. Generació de residus

Els problemes mediambientals derivats de l'emissió de GEH no es poden explicar sense fixar-nos en el nostre model productiu. Durant anys, el sistema de producció capitalista s'ha basat en una economia lineal: extreure – produir – consumir – descartar. Aquesta linealitat sumada a una actitud marcadament consumista ha portat a un disminució de les matèries primeres i un augment de la generació de residus.

Així doncs, es fa necessària la implementació d'un model d'economia circular on en primera instància hi hagi un canvi en els hàbits de consum. És ben coneguda la frase de “el millor residu és el que no es genera”. Cal doncs, reduir la demanda de productes per a reduir-ne la producció.

No obstant, el consum és inherent a la societat i consegüentment la generació de residus sempre hi serà. Aquí és on es desplega el concepte d'economia circular. Cal que tots aquells residus puguin ser reciclats de manera adient per tal que es reincorporin a la cadena productiva. Això no treu que hi hagi certs materials que no poden ésser reciclats per la seva naturalesa i a dia d'avui no hem trobat cap substitut que els pugui desbancar. És imprescindible trobar-los una segona vida útil per tal que no esdevinguin residus.

A Catalunya, el 2019 es van generar un total de 12 872 125 tones de residus.<sup>[52]</sup> D'aquestes un 39 % eren residus de la construcció i la demolició.

## 2.2. Indústria de la construcció

El ciment és el material més utilitzat del món en la construcció. Això fa que el conjunt de processos relacionats amb la seva fabricació i aplicació acumulin el 5 % del total de CO<sub>2</sub> alliberat a l'atmosfera. D'aquest 5 %, la Xina sola n'és responsable del 3 %.<sup>[53]</sup> Tot i que la producció de ciment no és especialment contaminant, la gran quantitat de tones que es generen fan que en termes absoluts les emissions siguin elevades. Les seves bones propietats per la construcció i la manca d'una alternativa fan que any rere any les tones de ciment utilitzades vagin en augment. Tant és així, que es preveu que per al 2050 la seva producció quadrupliqui la de 1990.

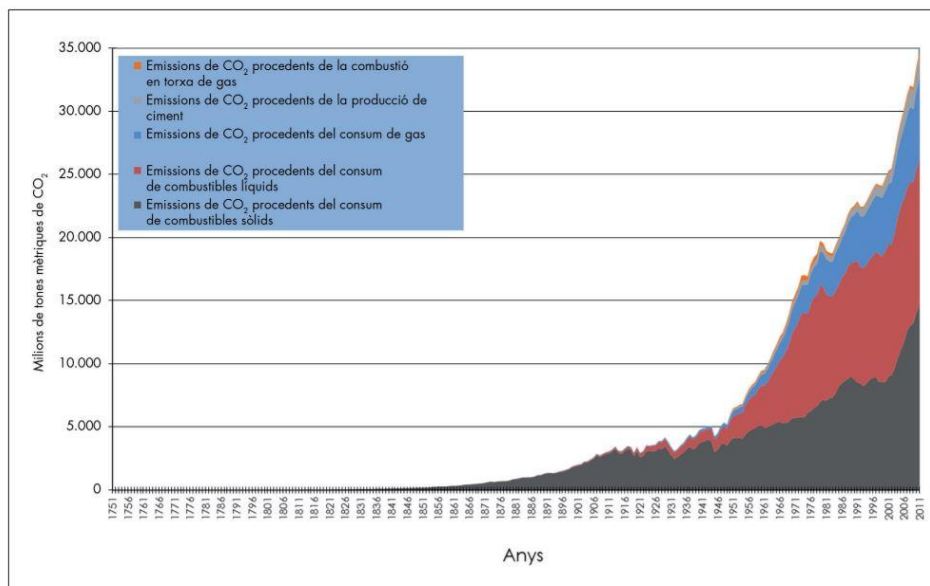


Figura 2.4. Evolució de les emissions de CO<sub>2</sub> mundials per al període 1751-2011 causades per la combustió de combustibles fòssils i la fabricació de ciment i torxes. Font: CDIAC.

A Catalunya, l'any 2012 les emissions directes fruit de l'activitat industrial van ser de 10,65 Mt CO<sub>2</sub> eq. de les quals un 37,5 % van ser causades per la indústria de fabricació del ciment. Les emissions van assolir un pic l'any 2005 i, a partir d'aquí, van anar disminuint com a conseqüència de la davallada de la construcció per la crisi econòmica.<sup>[49]</sup> Aquesta mateixa dinàmica s'observa també a nivell espanyol.<sup>[5]</sup>

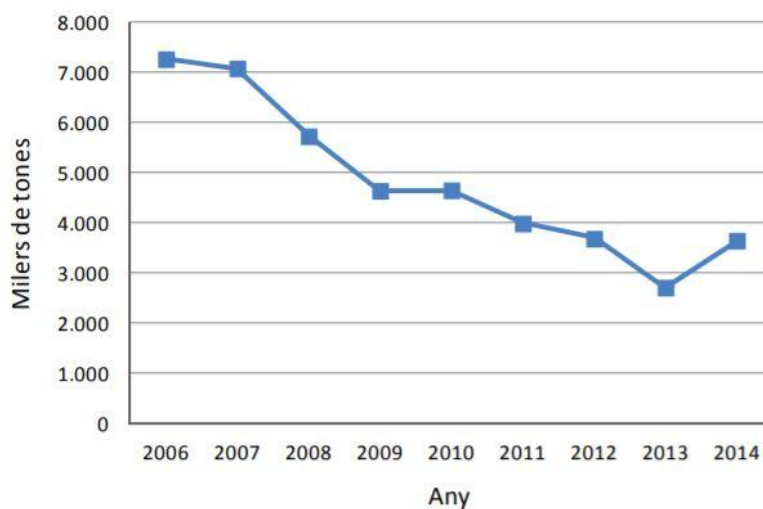


Figura 2.5. Evolució de la producció de clínquer a Catalunya. Font: Tercer Informe sobre el Canvi Climàtic a Catalunya, 2016.

Pel que fa a residus generats dins el sector de la construcció i la demolició, a nivell europeu signifiquen el 36 % del total (Figura 2.6), essent el sector que més residus genera.<sup>[55]</sup> A Catalunya el percentatge és força similar, un 39 %. Cal mencionar que dins el sector de la construcció i demolició no s'inclouen els residus derivats de la fabricació del ciment. Aquests estan inclosos dins els residus industrials. Per entendre la magnitud, a Espanya es produeix més d'una tona anual per habitant de residus de construcció i demolició.<sup>[56]</sup>

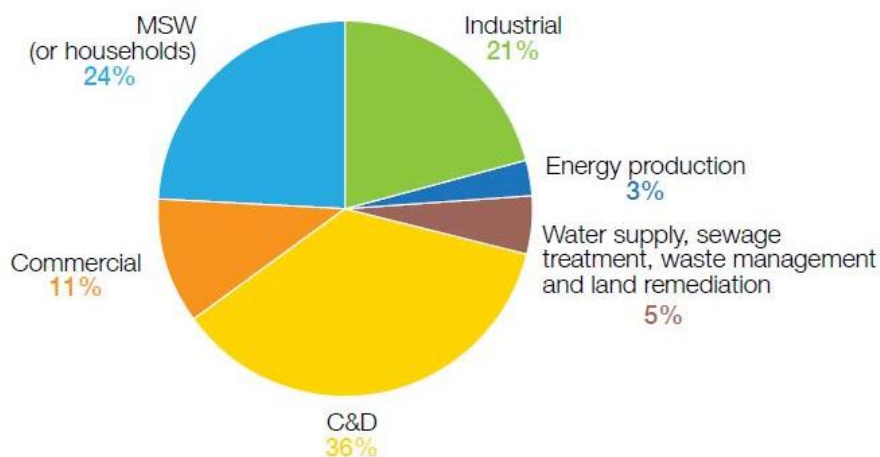


Figura 2.6. Percentatge de residus en funció de l'origen dels països de la OECD.  
Font: Global Waste Management

### 2.3. Indústria de la moda

La indústria de la moda és una de les indústries amb un model de producció més lineal. Això la converteix en una de les més contaminants. Aquest augment s'ha vist exagerat els darrers anys amb la introducció de la *moda ràpida* per la qual la producció, consum i descart de peces de roba ha augmentat considerablement. L'augment de la producció de teixits ha elevat el nombre de GEH emesos fins arribar a ser-ne responsables, segons les Nacions Unides, d'entre un 8 % i un 10 % del total. Això es deu a que es subministra principalment de fonts no renovables.<sup>[57]</sup> No obstant, aquest percentatge varia en funció de qui i com es calculen les emissions situant-se entre un 4 % i un 10 %. Per exemple, el Boston Consulting Group estima que les emissions de GEH de la indústria de la moda són inferiors al 5%.<sup>[58]</sup>



Ara bé, si en algun aspecte és especialment preocupant la contaminació que genera la indústria de la moda és l'elevat volum d'aigües residuals que genera i, sobretot, l'elevada contaminació d'aquestes. S'estima que n'és la responsable de vora el 20 % del total de les aigües residuals industrials contaminades. Aquestes es generen durant el procés de tinció i tractament de les fibres. Cal mencionar que els usuaris també contaminen les aigües a base d'anar rentant la roba. Vora mig milió de tones de microfibres de plàstic arriben al mar cada any.<sup>[59]</sup>

Com s'ha dit, la implementació de la *moda ràpida* ha comportat, com a conseqüència de l'augment de producció i consum, un increment dels residus generats. S'estima que més de la meitat de la *moda ràpida* produïda té una vida útil inferior a l'any. Així és que en els darrers quinze anys el nombre de vegades que es duu posada una peça de roba abans de ser llançada s'ha reduït en un 36 %. Si bé és cert que un 12 % de la roba usada es recicla per a altres usos, només un 1 % és reciclada en nova roba. Hi ha doncs un 87 % de la roba generada que no es recicla.<sup>[60]</sup>

Les previsions pel futur no són bones ja que l'emergent desenvolupament de països africans i asiàtics portarà a un creixement d'aquesta indústria que triplicarà les dades actuals. Així doncs, es fa necessària la implementació de noves estratègies per minimitzar l'impacte ambiental generat. En aquesta línia s'està investigant sobre els possibles beneficis de reforçar matrius pètries amb fibres tèxtils reutilitzades.<sup>[61]</sup>

### 3. Objectius

L'objectiu general del present treball de final de grau és determinar les propietats mecàniques de plaques de ciment Portland reforçat amb no teixits d'aramida procedent de residus tèxtils per tal de determinar si poden ser una alternativa competitiva amb els fibrociments actuals del mercat.

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

- Realitzar una caracterització del no teixit d'aramida obtingut, assajant-lo tant en direcció màquina (longitudinal) com en direcció transversal, així com calculant el seu gramatge.
- Definir la influència del nombre de capes de no teixit en les propietats mecàniques finals de la placa.
- Establir l'afectació dels processos d'envelliment forçat en les característiques de la placa.
- Estudiar la relació entre el gruix de les plaques i les característiques mecàniques d'aquestes.

## 4. Materials i mètodes

### 4.1. Materials

#### 4.1.1. Matriu

La matriu utilitzada per elaborar el material compost ha estat el 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.<sup>[62]</sup>

Taula 4.1. Característiques del ciment utilitzat proporcionades pel fabricant. Font: Cementos Molins Industrial S.A.

	Valor habitual	Especificacions segons norma
Clínquer (%)	98	mín. 95 – màx. 100
Component minoritari (%)	2	mín. 0 - màx. 5
<b>Propietats físiques</b>		
Superfície específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4600	-
Expansió Le Chatelier (mm)	0,5	màx. 10
Inici del fraguat (min)	110	mín. 45
<b>Propietats mecàniques</b>		
Compressió a 2 dies (MPa)	40	mín. 30
Compressió a 28 dies (MPa)	61	mín. 52,5

En l'Annex A es mostra la fitxa tècnica proporcionada pel fabricant.

### 4.1.2. Fibra

La fibra que es va utilitzar procedia dels polos que els treballadors del cos de Bombers de la Generalitat de Catalunya utilitzen durant les tasques d'extinció d'incendis. Un cop acabada la seva vida útil, es trituren i s'obté un producte semblant al que es mostra a la Figura 4.1. La seva composició és de 93 % meta-aramida, 5 % para-aramida i un 2 % agent antiestàtic.



*Figura 4.1. Triturat d'aramida procedent dels polos del cos de Bombers de la Generalitat de Catalunya. Font: pròpia.*

## 4.2. Mètodes

### 4.2.1. Elaboració dels no teixits

L'elaboració dels no teixits es va dur a terme al Departament d'enginyeria tèxtil i paperera de la ESEIAAT. Primer es varen pesar mostres de  $40,00 \text{ g} \pm 0,01 \text{ g}$  de triturat eliminant les restes de teixit no triturat. Un cop pesades es van passar per la màquina de carda per tal d'obtenir napes (Figura 4.2). La màquina de carda que es va utilitzar era un model de laboratori Platt's. Un cop obtinguda la napa, aquesta es tornava a introduir a la màquina de carda per tal d'obtenir napes més uniformes.



*Figura 4.2. Triturat de fibra a l'entrada i sortida de la màquina de carda. Font: pròpia*

Un cop cardades, per tal d'unir millor les fibres d'aramida i consolidar la napa, se les va punxonar dues vegades. La màquina, model DILO OUG-II-6 de doble agulla, tenia un ample de treball superior al de les napes motiu pel qual es van haver de col·locar dins de finestres d'un teixit guia (Figura 4.3).



*Figura 4.3. Napes entrant a la màquina punxonadora. A la fotografia de l'esquerra entrant per primera vegada, a la de la dreta per segona vegada. Font: pròpia.*

De cada napa cardada i punxonada es van poder tallar dos, o ocasionalment tres, quadrats de 29 cm x 29 cm. En total se'n van tallar noranta-dues. Es van aprofitar els trams sobrants per tal de caracteritzar el no teixit obtingut. Es van agafar dos trossos de no teixit diferents i de cada

un d'ells es van obtenir sis provetes dels quals tres van ser caracteritzades direcció màquina (longitudinal) i tres direcció transversal. Cada proveta tenia unes dimensions de 30 cm x 5 cm. Primer de tot es van fer mesures del gruix en tres punts diferents de cada proveta així com es va anotar el pes de cada una d'elles. Els resultats van ser d'un gramatge mitjà de 133,94 g/m<sup>2</sup> i un gruix mitjà de 1,68 mm.

Per als assajos de tracció dels no teixits es va utilitzar un dinamòmetre MTS de la ESEIAAT amb mordaces dentades de 60 mm x 40 mm. Tal com especifica la normativa UNE-EN ISO 13934-1, col·locar una cèl·lula de càrrega de 5 kN amb una velocitat de desplaçament de 100 mm/min (Taula 4.2).

Taula 4.2. Paràmetres de configuració de l'assaig de les napes.

Nom	Valor	Unitats
Amplada de la tira	50	mm
Cèl·lula de càrrega	5	kN
Distància entre pinces	200	mm
Precàrrega inicial	2	N
Velocitat d'assaig	100	mm/min

#### 4.2.2. Preparació de la matriu

Per a la preparació de la matriu es va pesar una quantitat de ciment en pols de 3 kg per a les plaques de quatre i cinc capes de no teixit i, una quantitat de 3,5 kg per a les de sis capes. En tots els casos la quantitat d'aigua introduïda inicialment va ser de 1,5 kg. Dins l'amassadora s'introduïa l'aigua i, progressivament, s'anava afegint el ciment procurant que no quedessin grumolls.

Un cop amassat el ciment, se'n retirava una petita quantitat (ciment espès). Al ciment restant s'hi afegia 0,5 kg d'aigua per a les plaques de quatre i cinc capes. Per a les plaques de sis capes, s'hi afegia 0,83 kg, assolint així una proporció final ciment - aigua propera a 3:2 (ciment fluid). Afegint aigua es pretenia que el ciment fos més líquid i afavorir així la penetració de la matriu dins el no teixit.<sup>[63]</sup>

### 4.2.3. Elaboració i curat de les plaques

Per a l'elaboració de les plaques es va fer servir una adaptació del sistema Hastchek. Aquesta va consistir en un motlle amb petits orificis a la part inferior que, encaixat a una cambra de buit, permetia extreure aigua durant el procés d'elaboració de la placa. Per garantir que pels orificis s'hi extragués només aigua i no ciment, entre el motlle i la primera capa de ciment s'hi va col·locar un teixit procedent de la indústria paperera que feia de filtre. Va ser important impregnar el teixit amb desencofrant per garantir que després es pogués treure la placa sense patir desperfectes o pèrdues. El desencofrant utilitzat va ser de la marca Sika.

El ciment espès es va usar per a fer les capes de ciment exteriors, superior i inferior. El ciment fluid es va col·locar dins una safata (Figura 4.4) on es van anar introduint els no teixits i es van anar impregnant de ciment. Un cop impregnats es van anar introduint dins el motlle de forma que la direcció de la fibra quedessin perpendiculars entre les capes de no teixit. Es va col·locar un nou teixit d'indústria paperera, prèviament impregnat en desencofrant, i es va posar a sobre una llosa metàl·lica.

Finalment es va introduir el motlle a la premsa 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 introduir a la cambra de curat a 100 % d'humitat relativa (HR) durant 28 dies. Tot i que l'actual normativa de ciments, UNE-EN\_196-1\_2018<sup>[64]</sup>, només permet el curat per immersió, la majoria de la bibliografia existent realitza el curat en armari, així doncs, seguint la bibliografia existent el curat es va realitzar en armari. Es va utilitzar un armari de la marca Matest, model E138.





*Figura 4.4. A dalt a l'esquerra safata amb el ciment diluït on es van impregnar les napes. A dalt a la dreta càmera de buit amb una capa de ciment a ja col·locada. A baix a l'esquerra premsa preparada per extreure l'aigua sobrant. A baix a la dreta serra amb que es van tallar les plaques. Font: pròpia.*

Un cop acabat el procés d'elaboració de la placa, es va pesar el ciment restant, diferenciant l'espès del fluid així com l'aigua recollida del buit i del premsat. Mitjançant la diferència de pes inicial i final es va poder calcular la quantitat de ciment i d'aigua a la placa i, consegüentment, es va saber la relació ciment – aigua (Annex B).

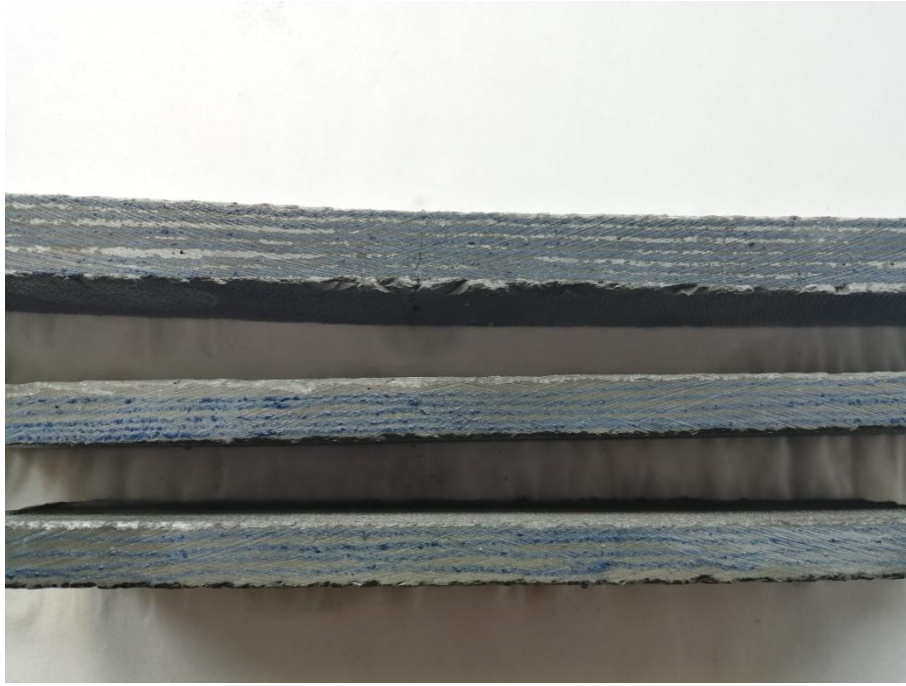
#### **4.2.4. Assaig de les plaques**

Es va plantejar assajar les plaques a tracció i flexió així com la possible degradació de les fibres després de patir un envelliment accelerat.

Totes les plaques un cop llestes per ser assajades havien de ser tallades en sis fragments d'amplada similar d'acord amb la norma UNE-EN 88412:2006<sup>[65]</sup>. Per fer-ho es va utilitzar una



serra de la marca Mecánica Científica S.A. model 27.0190 (Figura 4.4), la qual consta de dues fulles separades 10 cm. De les sis mostres obtingudes per placa, tres es van sotmetre a l'assaig de flexió i tres a l'assaig de tracció. A continuació es mostra una imatge amb tres provetes amb diferents nombre de capes (Figura 4.5).



*Figura 4.5. Provetes de 6, 5 i 4 capes, de dalt a baix respectivament, un cop tallades.  
Font: pròpia.*

#### **4.2.4.1. Tracció**

L'assaig de tracció es va dur a terme amb una màquina universal d'assaig (UTM) marca Metrotec de la sèrie SHM/CS2 de l'EETAC. La configuració de l'assaig es va fer d'acord amb la metodologia proposada pel comitè tècnic RILEM.<sup>[66]</sup>

Cada proveta es col·locava a la UTM amb l'ajuda d'unes mordasses per no relliscar (Figura 4.6). La distància entre pinces va oscil·lar entre 17,2 cm i 17,9 cm.



Figura 4.6. Provena col·locada a la UTM per ser assajada a tracció. Font: pròpia

Un cop obtingudes les dades es van calcular els següents paràmetres mecànics:

- Deformació

$$\delta = \frac{\text{posició (mm)}}{\text{llargada (mm)}} \quad (4-1)$$

- Tensió

$$T \text{ (MPa)} = \frac{\text{força (N)}}{\text{amplada (mm)} \cdot \text{gruix (mm)}} \quad (4-2)$$

- 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.
- 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.

$$E_{esp}(kJ/m^2) = \frac{1000 \cdot \sum 0,001 \cdot \text{força (N)} \cdot \text{posició (mm)}}{\text{amplada (mm)} \cdot \text{gruix (mm)}} \quad (4-3)$$

#### 4.2.4.2. Flexió

L'assaig de flexió es va dur a terme a la mateixa premsa usada per extreure l'aigua de les plaques (Figura 4.7). A diferència de la configuració anterior, en aquest cas la cèl·lula de càrrega que es va col·locar va ser la de 3 kN. Es va optar per l'assaig de quatre punts per la seva precisió com recomana el comitè RILEM.<sup>[67]</sup>



Figura 4.7. Provetta essent assajada a flexió. Font: pròpia.

Igual que en l'assaig de tracció, amb les dades obtingudes, es van calcular els diferents paràmetres. En aquest cas, el càlcul de la tensió i la deformació depenen de la configuració de l'assaig de flexió. Per un assaig de quatre punts les fórmules són les següents:

$$\delta = \frac{108 \cdot \text{posició (mm)} \cdot \text{gruix (mm)}}{23 \cdot \text{llargada (mm)} \cdot \text{llargada (mm)}} \quad (4-4)$$

$$T \text{ (MPa)} = \frac{1000 \cdot \text{força (kN)} \cdot \text{llargada (mm)}}{\text{amplada (mm)} \cdot \text{gruix (mm)} \cdot \text{gruix (mm)}} \quad (4-5)$$

#### 4.2.5. Tractament d'envelliment accelerat

Per determinar la durabilitat del material, les mostres es van sotmetre a un tractament d'envelliment accelerat. La norma UNE-EN 12467:2013+A2:2018 estableix quatre categories de materials en funció de l'exposició a fenòmens meteorològics que patiran al llarg de la seva vida útil.

- Categoria A: Exposades a calor, alta humitat i fortes gelades
- Categoria B: Exposades a calor, humitat i gelades esporàdiques
- Categoria C: Interiors.
- Categoria D: Plaques per aplicacions sobre capes rígides.

Les plaques estudiades en el present treball s'emmarquen dins la categoria B.

Les plaques es van dividir en tres blocs: control, envelliment accelerat amb cicles sec-humit i envelliment accelerat amb cicles gel-desgel.

L'envelliment sec-humit es va dur a terme mitjançant una cambra climàtica model arcón. D'acord amb la normativa UNE-EN 12467:2013+A2:2018<sup>[68]</sup>, l'envelliment sec-humit dels materials de categoria B consta de 25 cicles on, cada un, té una durada de 24 hores. Com el seu

nom indica, en el llarg d'aquestes 24 hores es poden diferenciar dues etapes: una de seca de 4 hores de durada, on la HR és del 20 % i la temperatura de 60 °C i, una d'humida de 18 hores de durada, on la HR és del 100 % i la temperatura es situa als 20 °C (Figura 4.8).

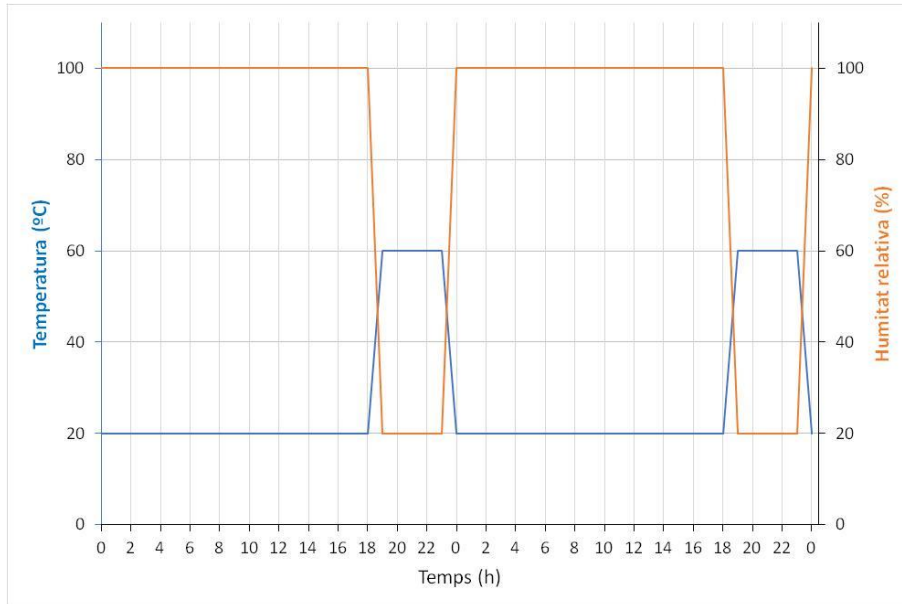


Figura 4.8. Composició de dos cicles sencers en l'envelliment sec-humit.

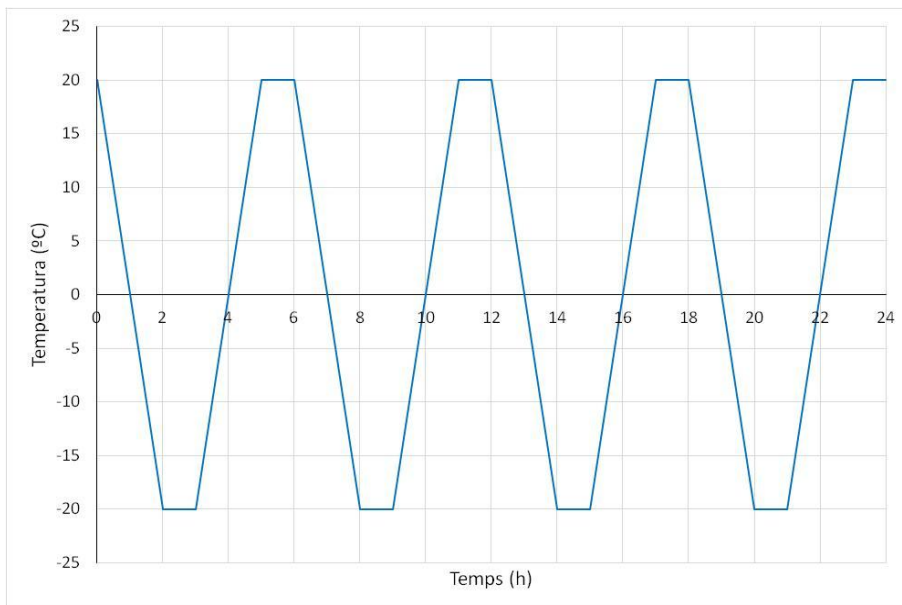


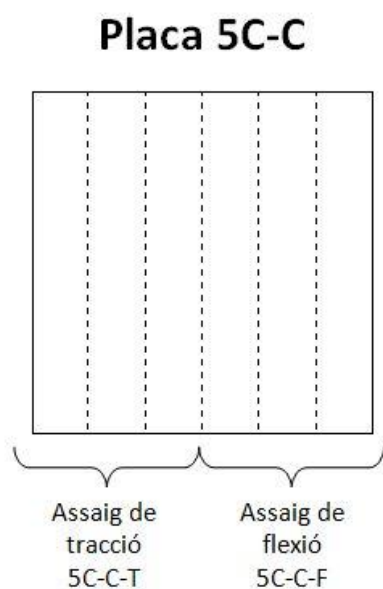
Figura 4.9. Composició d'un cicle sencer en l'envelliment gel-desgel.

Un cop es va acabar l'envelliment sec-humit i es va alliberar la cambra climàtica, es va procedir a realitzar l'envelliment gel-desgel. En el cas de les plaques de categoria B, igual que en el cas de sec-humit, la norma UNE-EN 12467:2013+A2:2018 especifica que el nombre de cicles és de 25. En aquest cas, a diferència de l'envelliment sec-humit, els cicles consten només de sis hores, completant-se així un total de quatre cicles cada dia. En cada cicle les plaques es sotmeten una hora a -20 °C i una hora a 20 °C, tal i com es pot veure a la Figura 4.9.

## 5. Disseny experimental

Es van fabricar un total de divuit plaques dividides en tres blocs de sis plaques cada un. De cada bloc hi havia dues plaques amb quatre capes de no teixit (4C), dues amb cinc capes (5C) i dues amb sis (6C).

El plantejament inicial era sotmetre el primer bloc a envelliment sec-humit (E), el segon bloc sense envelliment com a control (C) i el tercer bloc a envelliment gel-desgel (H). Així per a cada configuració de placa i tipus d'envelliment hi havia dues plaques.



*Figura 5.1. Esquema del tall de la placa 5C-C en sis provetes i de la destinació d'aquestes.*

El bloc destinat a sec-humit es va poder desenvolupar segons el plantejat inicialment. En canvi, a causa d'un problema amb la serra que tallava les plaques, es va alterar el nombre de plaques control i les destinades a gel-desgel. Finalment no es van poder assajar plaques 4C-C a flexió mentre que a tracció, només se'n va assajar una. En canvi, tres plaques 4C es van sotmetre a envelliment gel-desgel.

Taula 5.1. Nomenclatura de les provetes.

		Control	Sec-humit	Gel-desgel
<b>Tracció</b>	<b>4 capes</b>	4C-C-T	4C-E-T	4C-H-T
	<b>5 capes</b>	5C-C-T	5C-E-T	5C-H-T
	<b>6 capes</b>	6C-C-T	6C-E-T	6C-H-T
<b>Flexió</b>	<b>4 capes</b>	4C-C-F	4C-E-F	4C-H-F
	<b>5 capes</b>	5C-C-F	5C-E-F	5C-H-F
	<b>6 capes</b>	6C-C-F	6C-E-F	6C-H-F

Tal com s'ha explicat en l'apartat anterior, cada una de les plaques es va tallar a la serra en sis provetes (Taula 5.1). D'aquestes, tres es van assajar a tracció i tres a flexió. L'únic criteri a l'hora de determinar quines es destinaven a cada assaig era que cada extrem s'havia de destinar a un assaig diferent.



## 6. Resultats

Per als resultats de cada una de les mostres es va dibuixar la corba tensió-deformació. Amb aquesta informació es va poder determinar el mòdul de ruptura (MOR) i l'energia específica. De forma gràfica també es va determinar el mòdul d'elasticitat (MOE) i el límit de proporcionalitat (LOP). En aquest apartat es mostren les corbes representatives de cada configuració de placa i envelliment. Per l'elecció de la corba representativa es mirava d'escollir aquella que millor representava el conjunt del grup apropant-se més a les mitjanes dels quatre paràmetres calculats. Això, en molts casos feia que la corba representativa no reflectís perfectament el conjunt del grup. A l'Annex D es mostra el conjunt de corbes.

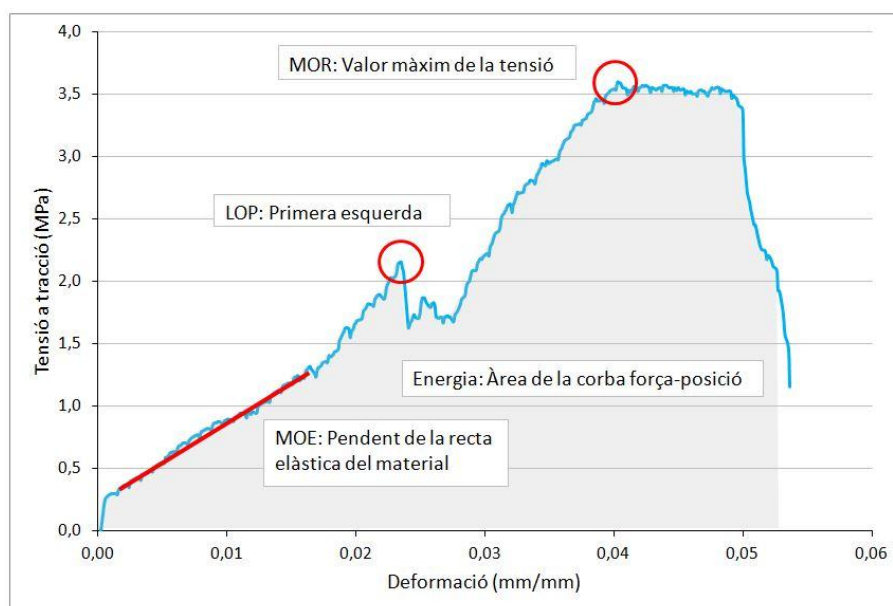


Figura 6.1. Esquema del càlcul per l'obtenció del MOR, LOP, MOE i energia.

Per a la comparació de mostres es va utilitzar el programa Minitab. En la comparativa entre nombre de capes es van realitzar test ANOVA per determinar si les diferències entre mitjanes eren significatives. En els casos afirmatius, assumint com a certa la hipòtesis d'homogeneïtat de les variàncies, es va utilitzar el test de Tukey per determinar quines eren les mitjanes significativament diferents. L'únic cas en que es va fer servir el test t-student va ser en la comparativa de les mostres sense envelliment (control) assajades a flexió, ja que només es

comparaven dues mitjanes. Per a la comparativa entre processos d'envelliment i grup control també es va utilitzar el test t-student. En tots els casos es va definir un interval de confiança del 95 %.

## 6.1. Caracterització dels no teixits

La Taula 6.1 recull les dades mitjanes obtingudes de la caracterització dels no teixits realitzada a l'ESEIAAT. La gran diferència entre la força màxima en direcció màquina i en direcció transversal indica una direcció preferencial de les fibres.

Taula 6.1. Caracterització del no teixit obtingut.

Paràmetre	Direcció màquina	Direcció transversal
Força màxima (N $\pm$ SD)	59,02 $\pm$ 6,52	18,22 $\pm$ 1,55
Allargament a força màxima (% $\pm$ SD)	40,23 $\pm$ 2,26	97,87 $\pm$ 7,38
Temps de ruptura (s $\pm$ SD)	51,58 $\pm$ 3,02	119,33 $\pm$ 10,74

## 6.2. Caracterització de les plaques control

### 6.2.1. Tracció

En la Figura 6.2 es mostren les corbes característiques per als diferents nombres de capes obtingudes en els assaig de tracció per a les plaques control. Com es pot veure, els valor del MOR entre diferent nombre de capes és proper als 3,5 MPa. Pel que fa al MOE, les tres gràfiques mostren un comportament similar. El LOP sí varia lleugerament, apreciand-se un valor superior en les plaques 4C essent superior als 2 MPa. En canvi, el LOP de les plaques 5C i 6C no supera els 1,5 MPa. Veiem també com el trencament de les plaques es produeix en valors similars propers a una deformació unitària de 0,05 mm/mm.

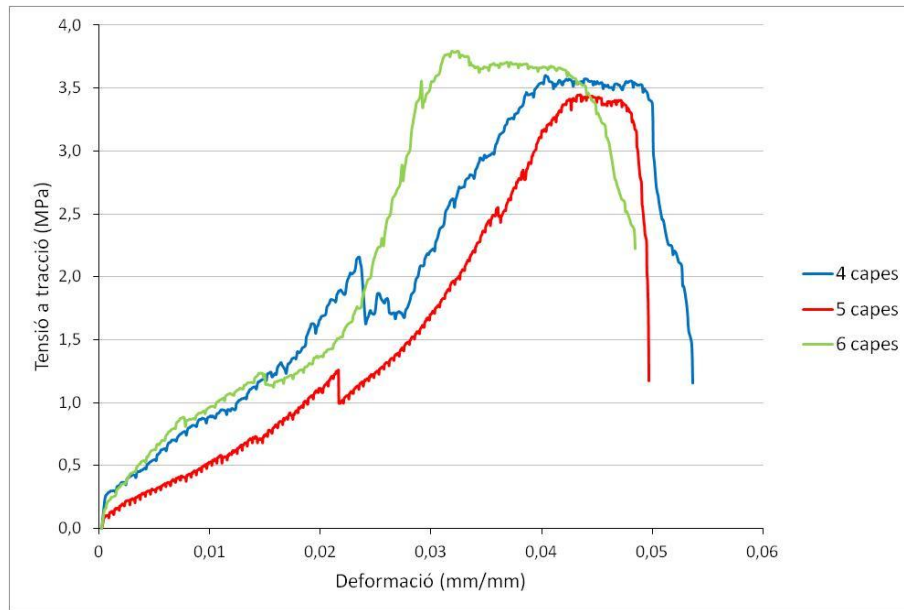


Figura 6.2. Corbes característiques per a les plaques control pels assaigs de tracció.

Si s'observen les mitjanes obtingudes per al conjunt de provetes control així com la desviació estàndard es poden veure possibles tendències (Figura 6.3). En el cas del MOR i de l'energia específica s'observen mitjanes creixents en augmentar el nombre de capes. No obstant, la dispersió dels resultats, sobretot en el cas de l'energia específica, no permet concloure que aquests augments siguin significatius. Cal destacar que la mitjana de les plaques 5C i 6C és superior al doble de la 4C. En el cas del LOP la tendència és decreixent però, igual que anteriorment, no hi ha diferències significatives. El MOE no presenta una tendència clara; ni creixent ni decreixent. La mitjana més baixa s'ha obtingut per les plaques 5C.

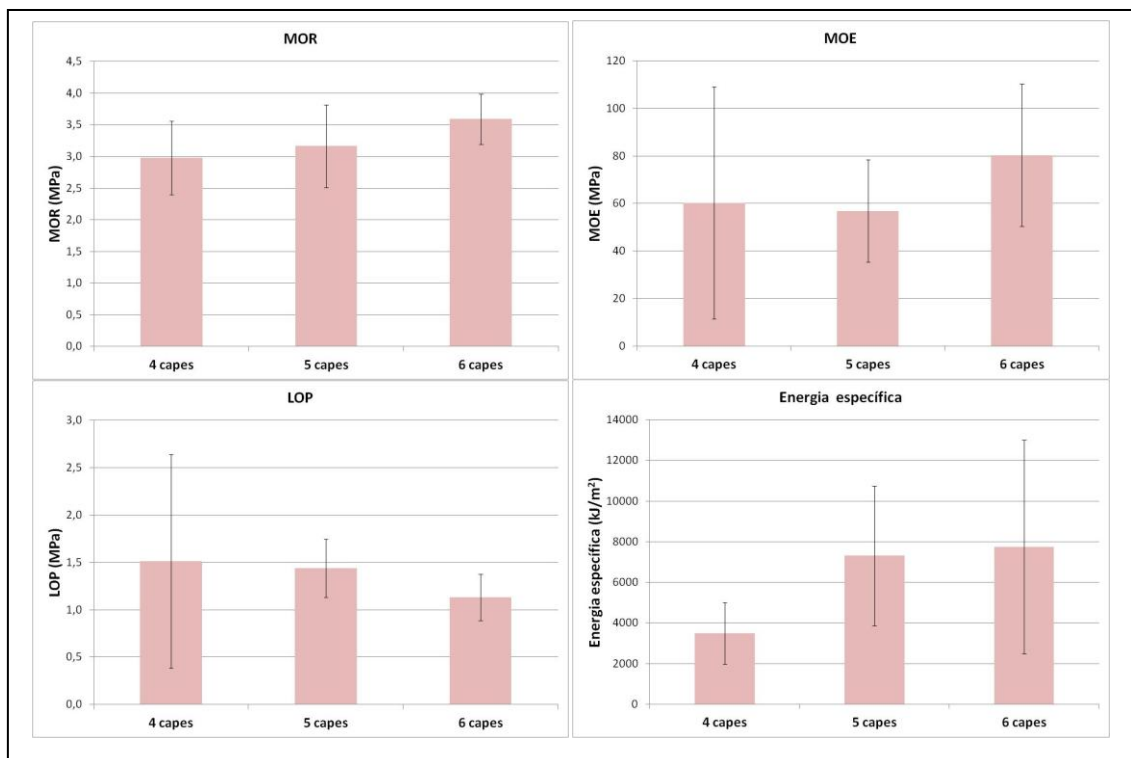


Figura 6.3. Mitjanes obtingudes per a les plaques control pels assaigs de tracció. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.

A la Taula 6.2 es poden observar els resultats del test de Tukey. Cap dels quatre paràmetres no ha presentat diferències significatives entre el nombre de capes de no teixit. Les plaques amb cinc i sis capes han absorbit de mitjana el doble d'energia que les plaques amb quatre. Tot i així, no podem afirmar que la diferència sigui significativa.

Taula 6.2. Resultats del test de Tukey per a les plaques control assajades a tracció. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una  $p = 0,05$ .

	4 capes	5 capes	6 capes
<b>MOR (MPa)</b>	2,98 <sup>a</sup>	3,16 <sup>a</sup>	3,59 <sup>a</sup>
<b>MOE (MPa)</b>	60,32 <sup>a</sup>	56,91 <sup>a</sup>	80,32 <sup>a</sup>
<b>LOP (MPa)</b>	1,51 <sup>a</sup>	1,44 <sup>a</sup>	1,13 <sup>a</sup>
<b>Energia específica (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	3489,75 <sup>a</sup>	7305,56 <sup>a</sup>	7743,19 <sup>a</sup>

## 6.2.2. Flexió

En els assaig de flexió de les plaques control, tal com s'ha explicat anteriorment, només es van assajar plaques 5C i 6C. Si es mira la Figura 6.4 s'observa com els valor de MOR són similars entre les dues plaques. En les plaques 5C, com és el cas de la de la Figura 6.4, el LOP coincideix amb el MOR. Això indica que, en aquestes plaques, la capacitat de càrrega no es deguda a les fibres sinó a la matriu. En els dos casos la corba corresponent a l'acció de la fibra no és on es presenten els valors de càrrega màxima. En el cas de la placa 5C la deformació unitària suportada per les fibres ha estat superior.

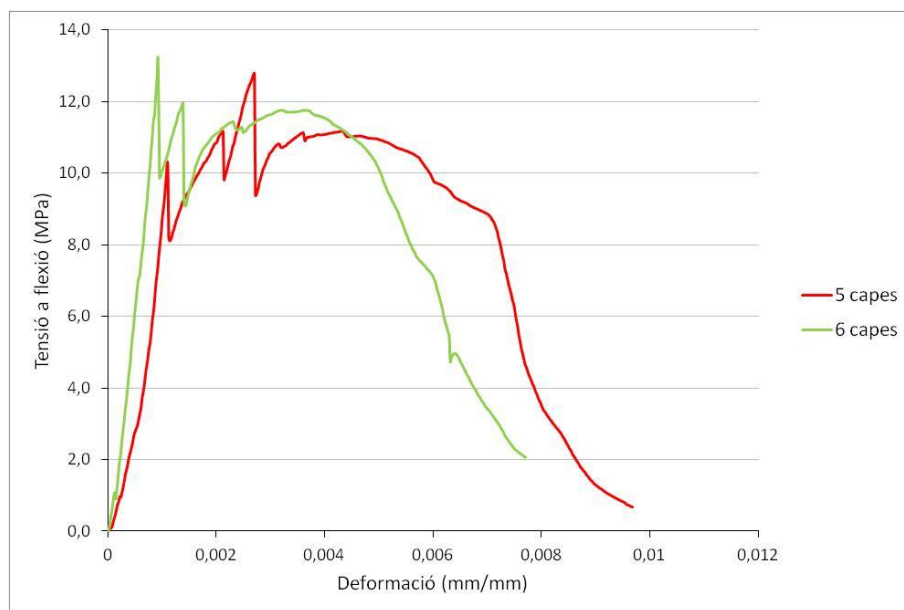


Figura 6.4. Corbes característiques per a les plaques control pels assaigs de flexió.

En els gràfics de barres (Figura 6.5) s'observa com la resistència als esforços de flexió de les plaques és quasi deu vegades superior als esforços de tracció. En tots els paràmetres, a excepció de l'energia específica, s'aprecia una lleugera tendència decreixent en augmentar el nombre de capes de no teixit. Tot i així no es pot confirmar amb certesa aquesta tendència. En el cas de l'energia específica la tendència és creixent.

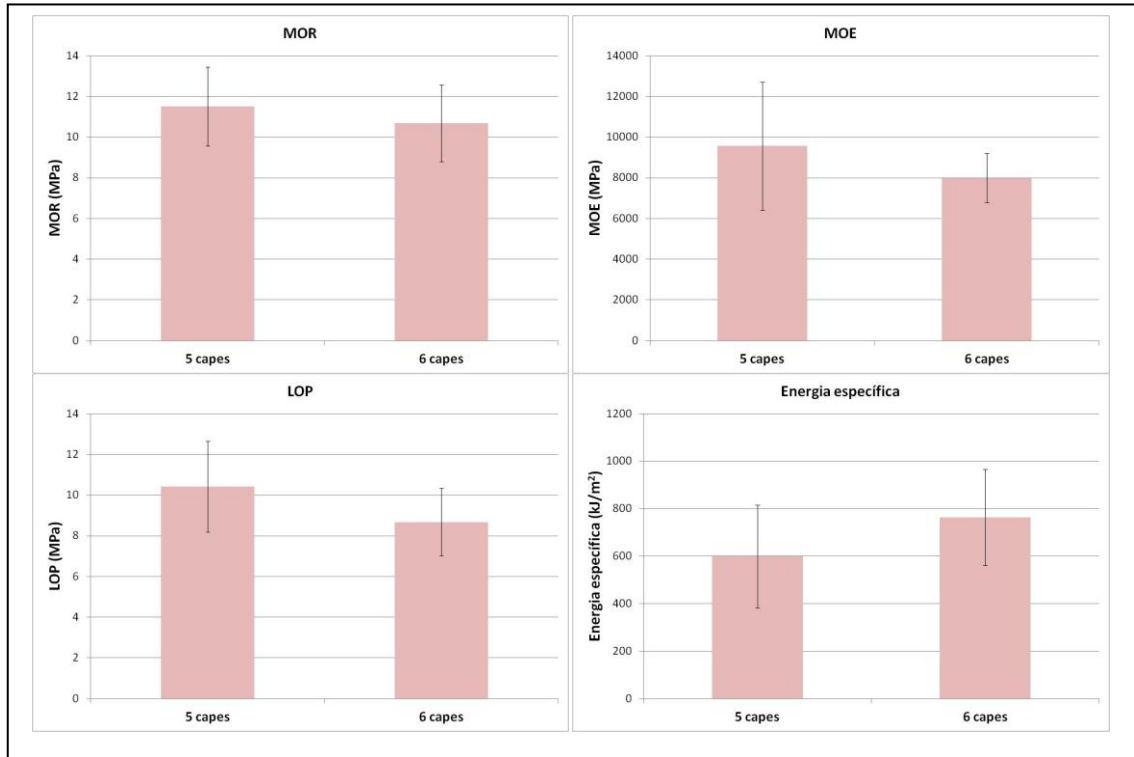


Figura 6.5. Mitjanes obtingudes per a les plaques control pels assaigs de flexió. Les barres d'error mostren la desviació estàndard.

Com es pot veure a la Taula 6.3, les mitjanes per a les plaques amb reforç de cinc capes de no teixit tenen mitjanes superiors. No obstant, els resultats del test de Tukey revelen, com es podia intuir en veure els gràfics de barres, que no hi ha diferències significatives entre 5C i 6C en cap dels quatre paràmetres estudiats. El no assaig de plaques amb quatre capes no permet la comparativa entre les tres configuracions.

Taula 6.3. Resultats obtinguts per a la prova t-student per a les plaques control assajades a flexió. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una  $p = 0,05$ .

	4 capes	5 capes	6 capes
MOR (MPa)	-	11,50 <sup>a</sup>	10,68 <sup>a</sup>
MOE (MPa)	-	9562,33 <sup>a</sup>	7979,40 <sup>a</sup>
LOP (MPa)	-	10,43 <sup>a</sup>	8,67 <sup>a</sup>
Energia específica (kJ/m <sup>2</sup> )	-	599,49 <sup>a</sup>	763,24 <sup>a</sup>

## 6.3. Durabilitat de les plaques

### 6.3.1. Cicles sec-humit

#### 6.3.1.1. Tracció

A continuació s'analitza l'efecte de l'envelliment amb cicles sec-humit (csh) en les propietats mecàniques de les plaques.

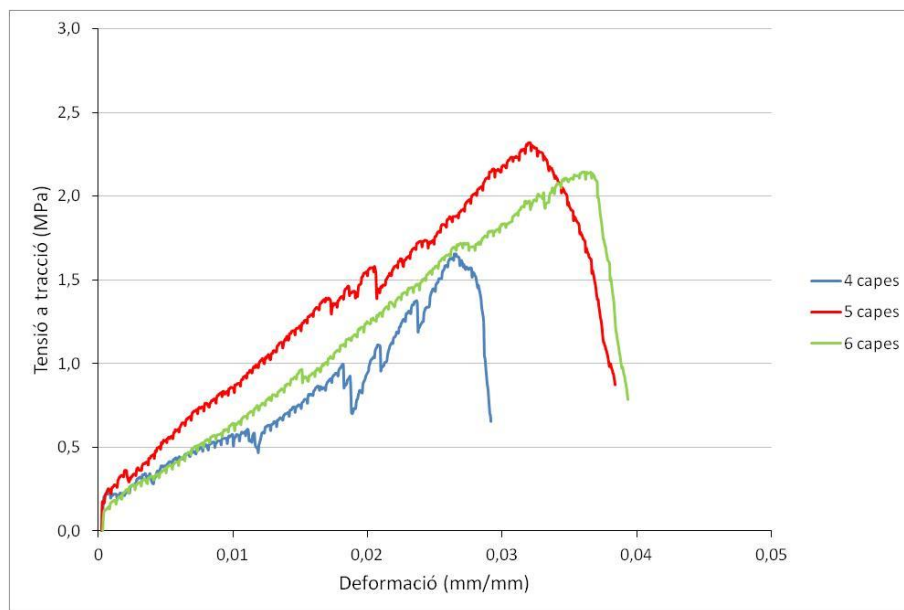


Figura 6.6. Corbes representatives per a les plaques csh en els assaigs de tracció.

La Figura 6.7 mostra les mitjanes de les plaques sotmeses a csh, en color fosc, juntament amb les de les plaques control, en color clar. En cap dels quatre paràmetres s'observa cap tendència de les plaques csh. El MOE de les plaques 5C-E presenta el valor més baix mentre que a la resta de paràmetres les plaques 5C-E presenten els valors més elevats. Si es comparen les mitjanes csh amb les control en destaca que la majoria de mitjanes observades en csh són inferiors a les control, especialment en el MOR (un 35 %) i en l'energia específica (un 50 %). La desviació estàndard es prou elevada com per no poder establir diferències significatives entre nombre de capes de no teixit (Taula 6.4).

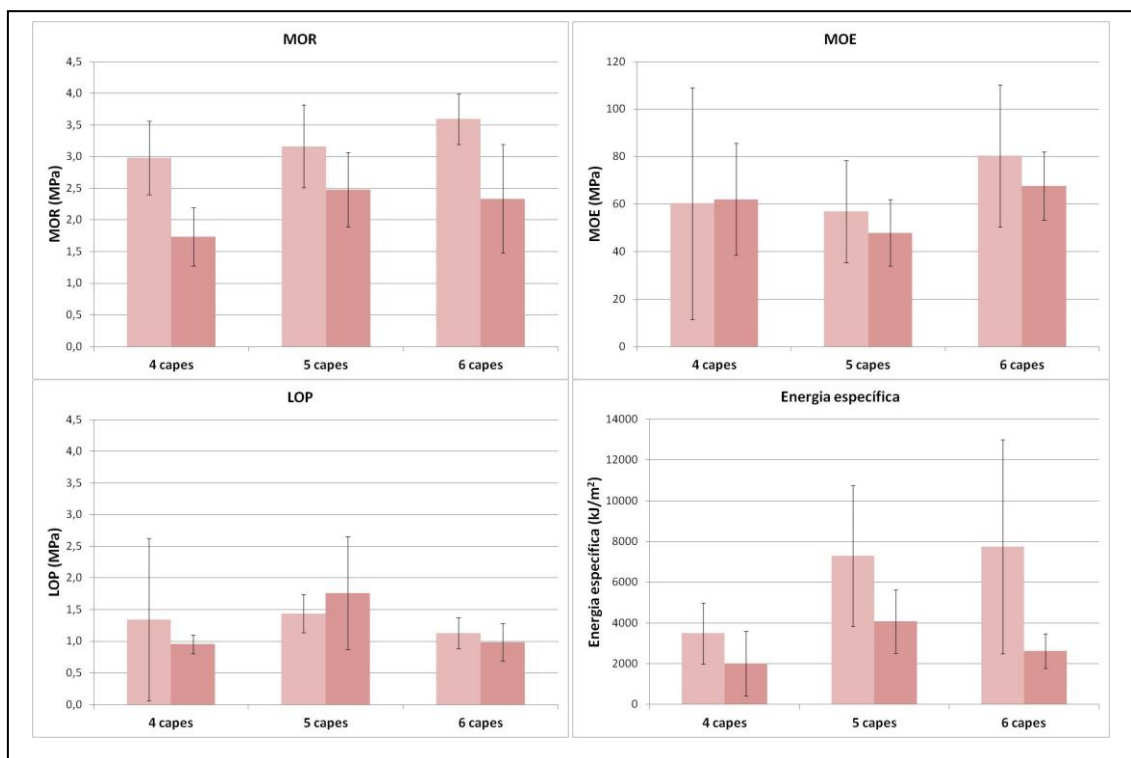


Figura 6.7. Mitjanes obtingudes per a les plaques csh (color fosc) i control (color clar) pels assaigs de tracció. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.

Taula 6.4. Resultats del test de Tukey per a les plaques csh assajades a tracció. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una  $p = 0,05$ .

	4 capes	5 capes	6 capes
<b>MOR (MPa)</b>	1,73 <sup>a</sup>	2,48 <sup>a</sup>	2,34 <sup>a</sup>
<b>MOE (MPa)</b>	62,02 <sup>a</sup>	47,93 <sup>a</sup>	67,65 <sup>a</sup>
<b>LOP (MPa)</b>	0,96 <sup>a</sup>	1,76 <sup>a</sup>	0,99 <sup>a</sup>
<b>Energia específica (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	2000,21 <sup>a</sup>	4071,88 <sup>a</sup>	2628,90 <sup>a</sup>

La Taula 6.5 recull els resultats del test t-student. Per a les plaques 4C existeixen diferències significatives en el MOR. El valor del grup control podem afirmar que és significativament superior. Les plaques 5C no presenten diferències significatives entre elles i les plaques control per a cap dels paràmetres. En el cas de les 6C, el MOR de les plaques control és significativament superior al de les csh.



Taula 6.5. Resultats obtinguts per a la prova t-student comparant les mitjanes dels assaigs de tracció de les plaques csh i les control per a cada nombre de capes de no teixit. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una  $p = 0,05$ .

	4 capes no teixit		5 capes no teixit		6 capes no teixit	
	Control	Sec-humit	Control	Sec-humit	Control	Sec-humit
<b>MOR (MPa)</b>	2,98 <sup>a</sup>	1,73 <sup>b</sup>	3,16 <sup>a</sup>	2,48 <sup>a</sup>	3,59 <sup>a</sup>	2,34 <sup>b</sup>
<b>MOE (MPa)</b>	60,32 <sup>a</sup>	62,02 <sup>a</sup>	56,91 <sup>a</sup>	47,93 <sup>a</sup>	80,32 <sup>a</sup>	67,65 <sup>a</sup>
<b>LOP (MPa)</b>	1,51 <sup>a</sup>	0,96 <sup>a</sup>	1,44 <sup>a</sup>	1,76 <sup>a</sup>	1,13 <sup>a</sup>	0,99 <sup>a</sup>
<b>Energia específica (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	3489,75 <sup>a</sup>	2000,21 <sup>a</sup>	7305,56 <sup>a</sup>	4071,88 <sup>a</sup>	7743,19 <sup>a</sup>	2628,90 <sup>a</sup>

### 6.3.1.2. Flexió

Les plaques csh assajades a flexió mostren corbes diferenciades (Figura 6.8). En primera instància destaca la diferència en l'allargament; s'observa com la corba dibuixada per la placa 4C té un allargament clarament superior a les plaques 5C i 6C. Totes elles mostren varis pics abans de la part corba indicant fractures de la matriu abans de que les fibres suportin l'esforç. La placa 4C presenta un pendent lleugerament inferior en la part plàstica així com un valor de MOR inferior.

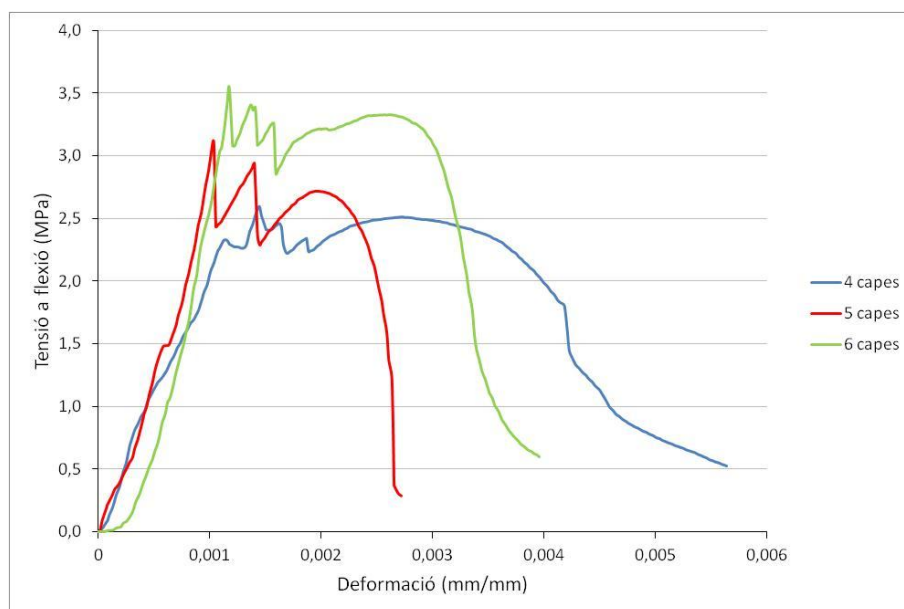


Figura 6.8. Corbes representatives per a les plaques csh en els assaigs de flexió.

Semblant al que passa amb els resultats de l'assaig de tensió, tal com mostra la Figura 6.9, la mitjana de les plaques 5C és la que presenta valors més elevats (en el MOE i en LOP) o valors més baixos (en l'energia específica). N'és excepció el MOR on la mitjana augmenta de forma correlativa amb el nombre de capes de no teixit.

No assajar plaques 4C en condicions control no permet la comparació per aquest nombre de capes. Sí es pot fer per a les plaques 5C i 6C. En totes elles es repeteix un mateix patró on els resultats obtinguts de les plaques csh són aproximadament un 70 % inferiors als de les plaques control.

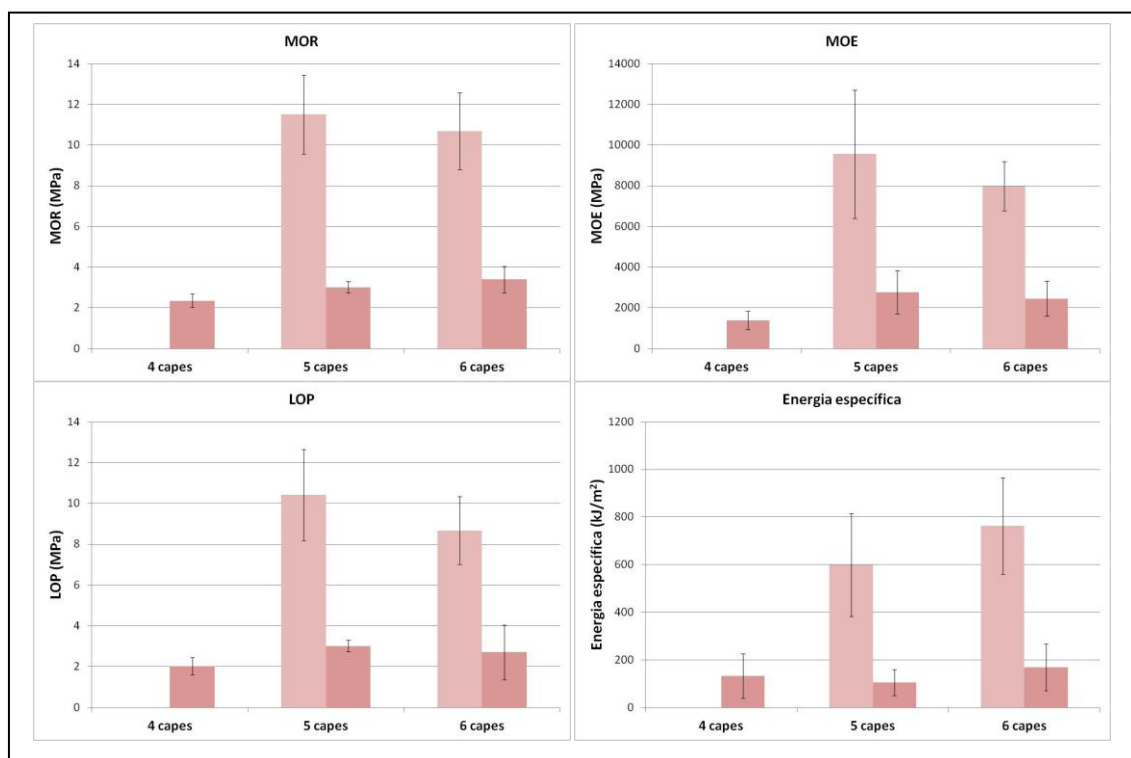


Figura 6.9. Mitjanes obtingudes per a les plaques csh (color fosc) i control (color clar) pels assaigs de flexió. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.

D'acord amb la Taula 6.6 existeixen diferències significatives en el MOR i en el MOE. El MOR, com s'ha dit, segueix una dinàmica ascendent i presenta diferències significatives entre les plaques 4C i les plaques 6C. El MOE, en canvi, les diferències esdevenen entre les plaques 4C i 5C. En la comparativa entre cicles, en tots els paràmetres les mitjanes del grup control són significativament superiors a les csh (Taula 6.7).

Taula 6.6. Resultats del test de Tukey per a les plaques csh assajades a flexió. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una  $p = 0,05$ .

	4 capes	5 capes	6 capes
MOR (MPa)	2,35 <sup>a</sup>	3,01 <sup>a,b</sup>	3,39 <sup>b</sup>
MOE (MPa)	1385,57 <sup>a</sup>	2766,75 <sup>b</sup>	2460,33 <sup>a,b</sup>
LOP (MPa)	2,02 <sup>a</sup>	3,01 <sup>a</sup>	2,70 <sup>a</sup>
Energia específica (kJ/m <sup>2</sup> )	133,12 <sup>a</sup>	105,10 <sup>a</sup>	168,38 <sup>a</sup>

Taula 6.7. Resultats obtinguts per a la prova t-student comparant les mitjanes dels assaigs de flexió de les plaques csh i les control per a cada nombre de capes de no teixit. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una  $p = 0,05$ .

	5 capes no teixit		6 capes no teixit	
	Control	Sec-humit	Control	Sec-humit
MOR (MPa)	11,50 <sup>a</sup>	3,01 <sup>b</sup>	10,68 <sup>a</sup>	3,39 <sup>b</sup>
MOE (MPa)	9562,33 <sup>a</sup>	2766,75 <sup>b</sup>	7979,40 <sup>a</sup>	2460,33 <sup>b</sup>
LOP (MPa)	10,43 <sup>a</sup>	3,01 <sup>b</sup>	8,67 <sup>a</sup>	2,70 <sup>b</sup>
Energia específica (kJ/m <sup>2</sup> )	599,49 <sup>a</sup>	105,10 <sup>b</sup>	763,24 <sup>a</sup>	168,38 <sup>b</sup>

### 6.3.2. Cicles gel-desgel

#### 6.3.2.1. Tracció

Seguint el mateix procediment que amb l'envelliment a cicles sec-humit, en el present apartat s'analitzen els resultats obtinguts per a les plaques sotmeses a gel-desgel.

La Figura 6.10 mostra les gràfiques característiques per a cada grup de plaques envellides amb cicles gel-desgel (cgd). La corba de la placa 5C és la que presenta el MOR més elevat, mentre que la placa 4C el més baix. La deformació unitària de les tres corbes és força similar essent lleugerament inferior en la placa 4C. La placa 6C presenta una part de la corba horitzontal símbol d'una major activitat de la fibra.

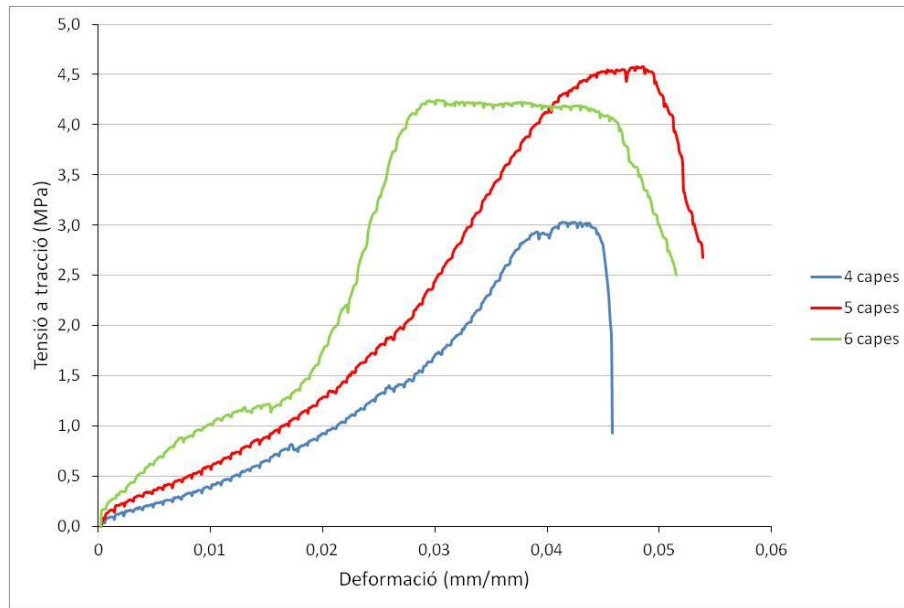


Figura 6.10. Corbes representatives per a les plaques cgd en els assaigs de tracció.

Les plaques 5C presenten un MOR, MOE i LOP superiors a les plaques 4C i 6C. L'energia específica de les plaques 5C i les 6C és pràcticament igual. No s'observa cap patró respecte la configuració que presenta valors més baixos. A diferència de les plaques csh, no hi ha diferències tant evidents entre les plaques cgd i les control. Les plaques 5C són les que difereixen més assolint valors més elevats les cgd.

El test de Tukey mostra com clarament les plaques 5C despunten respecte les altres dues (Taula 6.8). En el cas del MOR i del MOE les plaques 5C són significativament superiors a les 4C i en el cas del LOP són superiors a les 4C i les 6C.

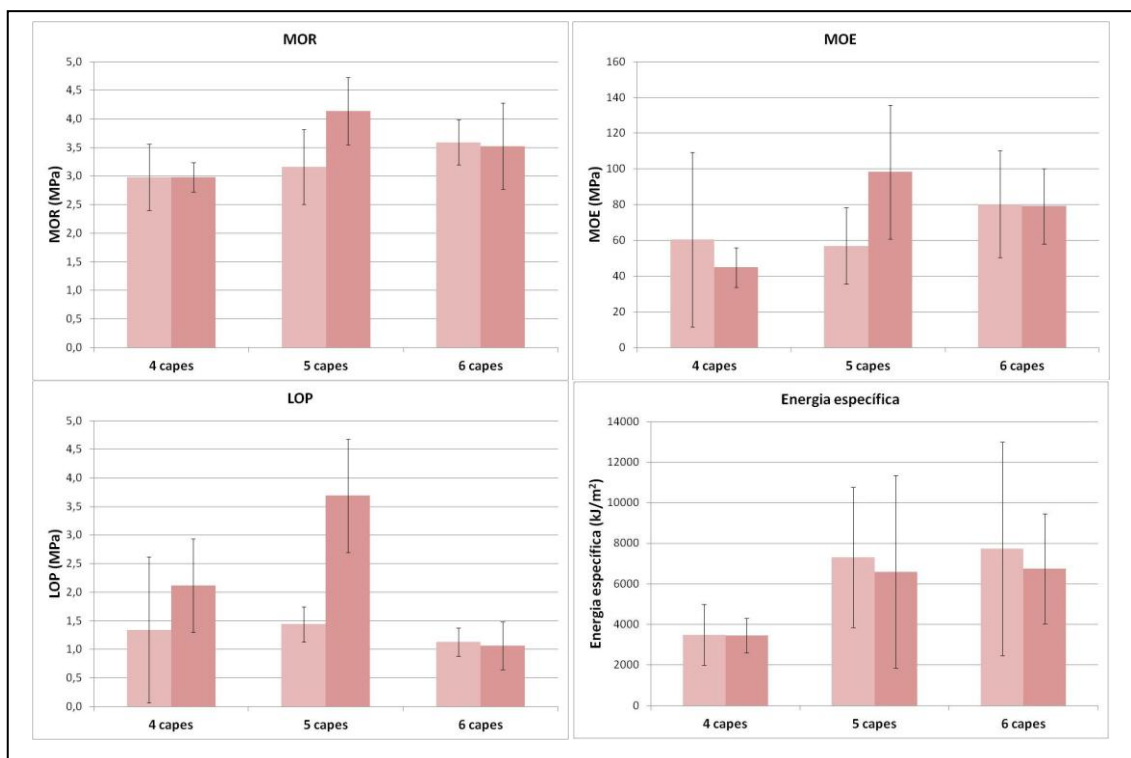


Figura 6.11. Mitjanes obtingudes per a les plaques cgd (color fosc) i control (color clar) pels assaigs de tracció. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.

Taula 6.8. Resultats del test de Tukey per a les plaques cgd assajades a tracció. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una  $p = 0,05$ .

	4 capes	5 capes	6 capes
<b>MOR (MPa)</b>	2,98 <sup>a</sup>	4,14 <sup>b</sup>	3,52 <sup>a,b</sup>
<b>MOE (MPa)</b>	44,88 <sup>a</sup>	98,35 <sup>b</sup>	79,21 <sup>a,b</sup>
<b>LOP (MPa)</b>	2,12 <sup>a</sup>	3,69 <sup>b</sup>	1,06 <sup>a</sup>
<b>Energia específica (kJ/m²)</b>	3447,60 <sup>a</sup>	6605,22 <sup>a</sup>	6760,30 <sup>a</sup>

En la comparativa entre plaques cgd i control de la Taula 6.9 es pot veure com l'única configuració de placa que presenta diferències respecte la control és la 5C. Tant en el MOR com en el LOP les plaques cgd presenten valors significativament superiors. Això constata que l'envelliment cgd no només no ha empitjorat les propietats mecàniques, sinó que en alguna configuració de placa les ha millorat.

Taula 6.9. Resultats obtinguts per a la prova t-student comparant les mitjanes dels assaigs de tracció de les plaques cgd i les control per a cada nombre de capes de no teixit. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una  $p = 0,05$ .

	4 capes no teixit		5 capes no teixit		6 capes no teixit	
	Control	Gel-desgel	Control	Gel-desgel	Control	Gel-desgel
<b>MOR (MPa)</b>	2,98 <sup>a</sup>	2,98 <sup>a</sup>	3,16 <sup>a</sup>	4,14 <sup>b</sup>	3,59 <sup>a</sup>	3,52 <sup>a</sup>
<b>MOE (MPa)</b>	60,32 <sup>a</sup>	44,88 <sup>a</sup>	56,91 <sup>a</sup>	98,35 <sup>a</sup>	80,32 <sup>a</sup>	79,21 <sup>a</sup>
<b>LOP (MPa)</b>	1,51 <sup>a</sup>	2,12 <sup>a</sup>	1,44 <sup>a</sup>	3,69 <sup>b</sup>	1,13 <sup>a</sup>	1,06 <sup>a</sup>
<b>Energia específica (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	3489,75 <sup>a</sup>	3447,60 <sup>a</sup>	7305,56 <sup>a</sup>	6605,22 <sup>a</sup>	7743,19 <sup>a</sup>	6760,30 <sup>a</sup>

### 6.3.2.2. Flexió

En el cas dels assaigs a flexió s'aprecien grans diferències entre les diferents corbes (Figura 6.12). Les plaques 5C tenen de mitjana valors de MOR i de LOP superiors a les 6C i 4C essent aquestes últimes les que presenten valors més baixos. El pendent de la corba en la part plàstica és força elevat en els tres casos. La deformació unitària de les plaques 4C i 6C és similar mentre que, la de les plaques 5C, és aproximadament el doble. Aquesta major deformació unitària juntament amb un major valor de càrrega suportat fa que l'energia específica per les plaques 5C sigui molt superior a les altres. A diferència de les plaques control i csh, a la zona corbada de les cgd, és on es registren els valors de càrrega màxima.

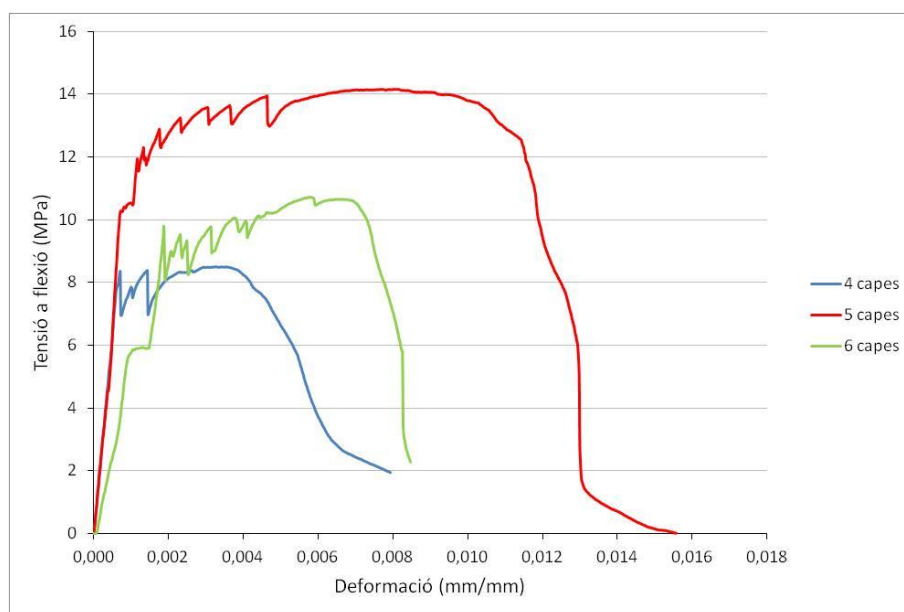


Figura 6.12. Corbes representatives per a les plaques cgd en els assaigs de flexió.

En els gràfics de barres de la Figura 6.13, es pot veure que les plaques 5C presenten per a tots els paràmetres mitjanes superiors a les altres configuracions. En destaca l'energia específica; tant per la diferència de mitjanes, com per l'elevada desviació estàndard de les mostres de les plaques 5C. A excepció del MOE de les plaques 6C, en la resta de paràmetres de les plaques 5C i 6C les mitjanes cgd són superiors a les control.

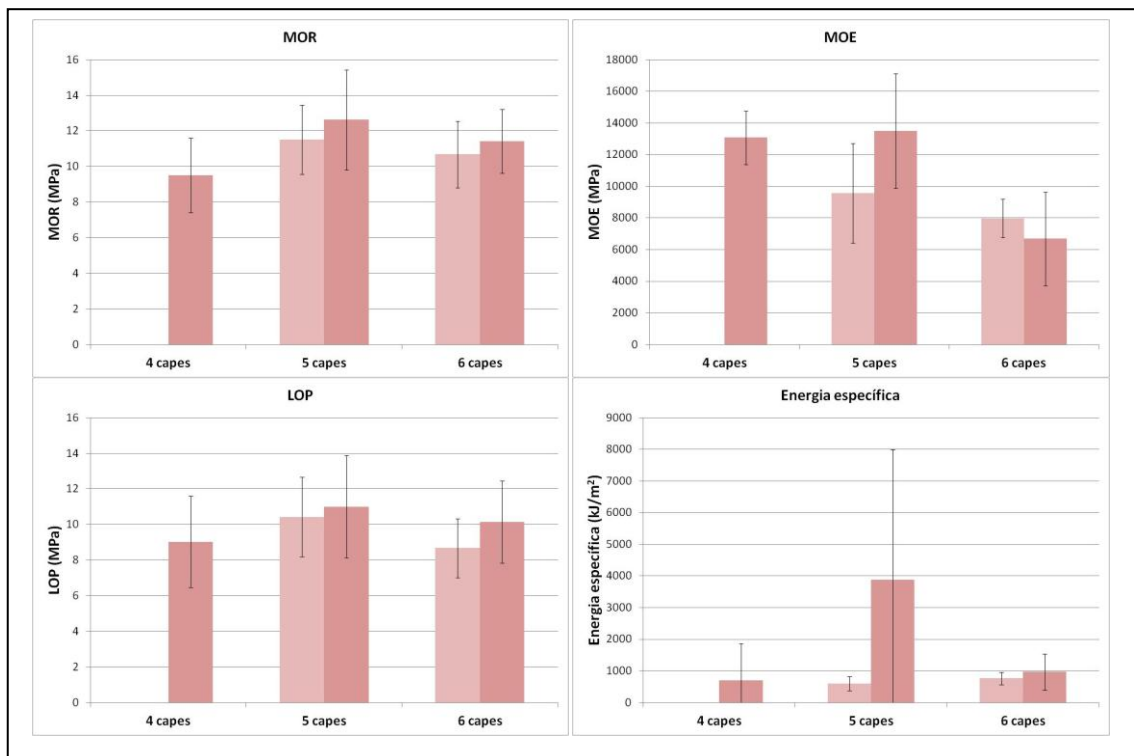


Figura 6.13. Mitjanes obtingudes per a les plaques cgd (color fosc) i control (color clar) pels assaigs de flexió. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.

El test de Tukey (Taula 6.10) assenjala dues diferències significatives: per un costat el MOE de les plaques 6C és significativament inferior a les altres dues configuracions. Per l'altre costat, l'energia específica per les plaques 5C, tot i l'elevada dispersió de les dades, és significativament superior a les 4C i 6C. Pel que fa a diferències entre cgd i el grup control, no s'ha observat cap diferència significativa ni per les plaques 5C, ni per les 6C (Taula 6.11).

Taula 6.10. Resultats del test de Tukey per a les plaques cgd assajades a flexió. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una  $p = 0,05$ .

	4 capes	5 capes	6 capes
MOR (MPa)	9,51 <sup>a</sup>	12,62 <sup>a</sup>	11,42 <sup>a</sup>
MOE (MPa)	13070,67 <sup>a</sup>	13497,25 <sup>a</sup>	6684,67 <sup>b</sup>
LOP (MPa)	9,04 <sup>a</sup>	11,01 <sup>a</sup>	10,15 <sup>a</sup>
Energia específica (kJ/m <sup>2</sup> )	695,54 <sup>a</sup>	3871,52 <sup>b</sup>	966,91 <sup>a,b</sup>

Taula 6.11. Resultats obtinguts per a la prova t-student comparant les mitjanes dels assaigs de flexió de les plaques cgd i les control per a cada nombre de capes de no teixit. Les mitjanes amb un mateix superíndex no presenten diferències significatives amb una  $p = 0,05$ .

	5 capes no teixit		6 capes no teixit	
	Control	Gel-desgel	Control	Gel-desgel
MOR (MPa)	11,50 <sup>a</sup>	12,62 <sup>a</sup>	10,68 <sup>a</sup>	11,42 <sup>a</sup>
MOE (MPa)	9562,33 <sup>a</sup>	13497,25 <sup>a</sup>	7979,40 <sup>a</sup>	6684,67 <sup>a</sup>
LOP (MPa)	10,43 <sup>a</sup>	11,01 <sup>a</sup>	8,67 <sup>a</sup>	10,15 <sup>a</sup>
Energia específica (kJ/m <sup>2</sup> )	599,49 <sup>a</sup>	3871,52 <sup>a</sup>	763,24 <sup>a</sup>	966,91 <sup>a</sup>

## 6.4. Gruix de les plaques

Per tal d'analitzar si existia relació entre les propietats mecàniques de les provetes i el seu gruix, es van dibuixar gràfiques per a cada configuració de placa i envelliment. A cada gràfica se li va agregar una recta de regressió amb el coeficient de determinació ( $R^2$ ). La majoria de les gràfiques presentaven valors de  $R^2$  propers o inferiors a 0,3, indicant la no linealitat de les mostres. En el cas de les plaques 5C-C-T (Figura 6.14) es veu com l'elevada dispersió de les dades no permeten un bon ajust de la recta de regressió, destacant el cas de l'energia específica on el valor  $R^2$  és inferior a 0,1.



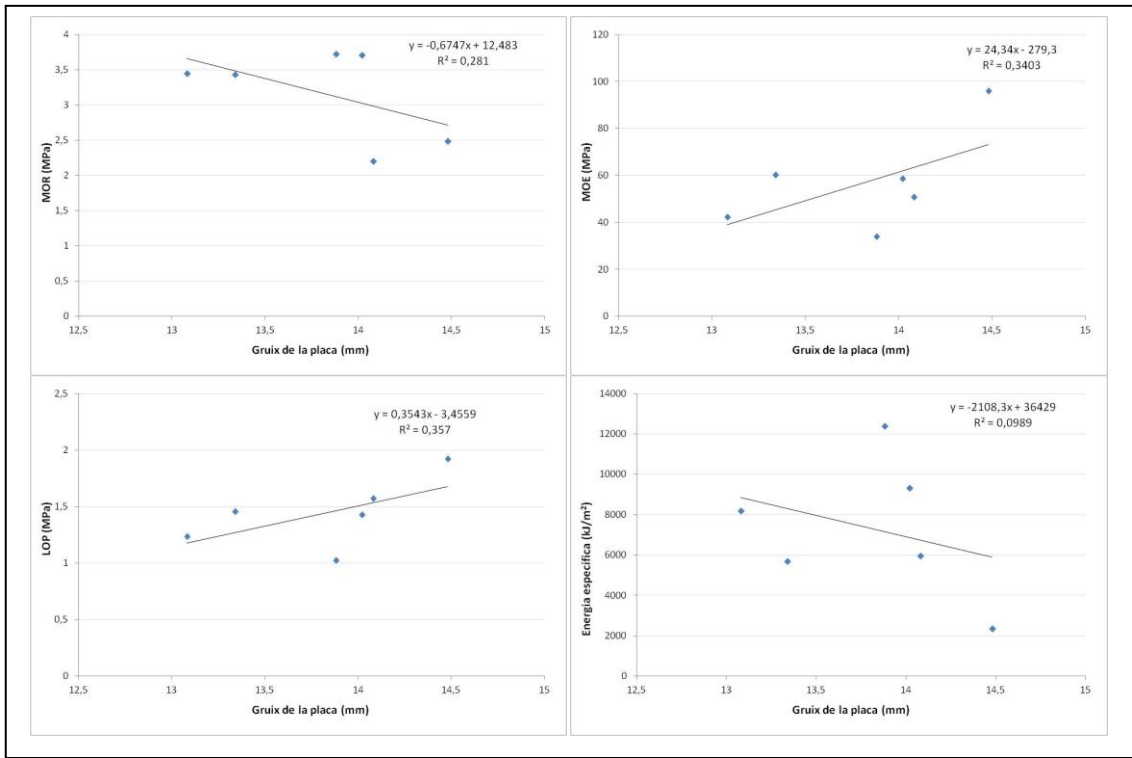


Figura 6.14. Valors obtinguts pels quatre paràmetres estudiats segons el gruix de les plaques 5C-C-T.

En el cas dels resultats dels assaigs de flexió la situació és similar als de tracció. No s'aprecia linealitat en les mostres més enllà de casos puntuals. En la Figura 16.5 es mostren les rectes de regressió per a les plaques 5C-C-F a tall d'exemple. Així doncs, queda descartada la relació entre el gruix de la placa i les propietats mecàniques. A l'Annex E es mostren totes les gràfiques.

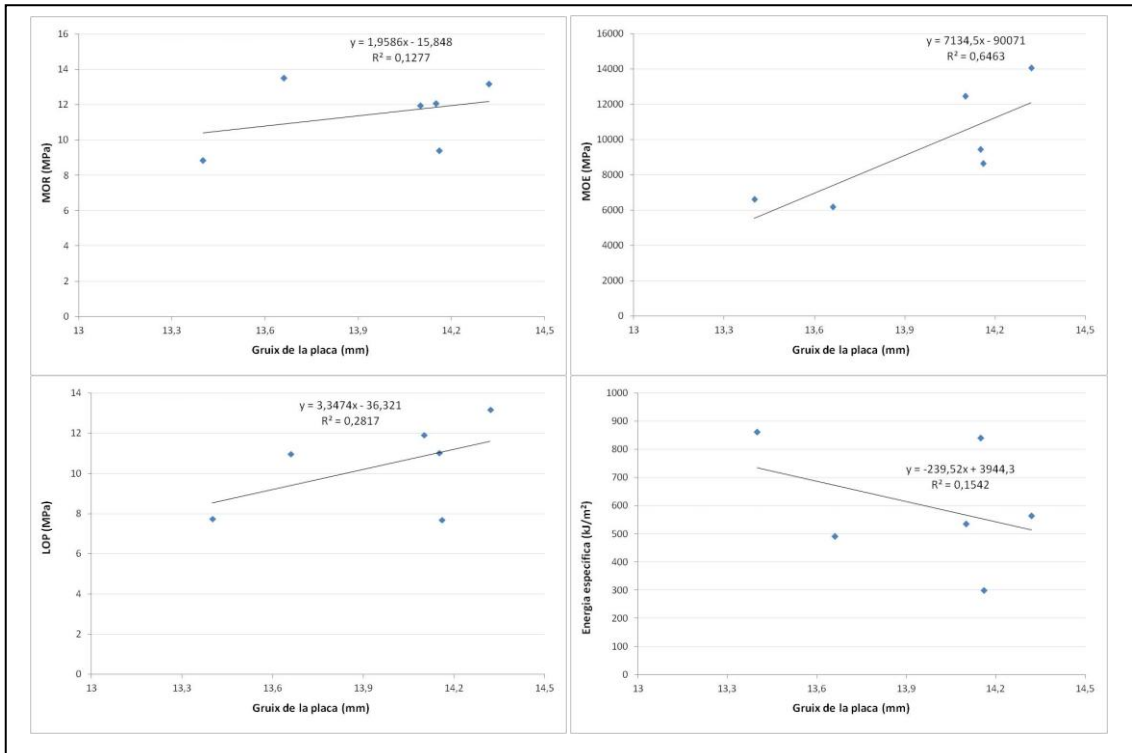


Figura 6.15. Valors obtinguts pels quatre paràmetres estudiats segons el gruix de les plaques 5C-C-F.

## 7. Discussió

### 7.1. No teixit

Els resultats indiquen una alta orientació preferencial de les fibres en la direcció màquina fruit del procés productiu de les napes. Aquesta diferència posa de manifest la necessitat d'intercalar les direccions de les napes en el moment de l'elaboració de les plaques.

P. Sadrolodabae (2021) en el seu article fabrica també plaques de ciment Portland reforçades amb no teixits de residus tèxtils.<sup>[69]</sup> En aquest cas, el residu està format un 31 % de polièster i un 69 % de cotó, que es barreja amb fibra llarga de lli per formar els no teixits. Els no teixits amb residu tèxtil suporten una força màxima de 28 N. També es fabriquen no teixits íntegrament de lli per poder comprar. Aquests, en canvi, suporten més de 120 N de força màxima. Cal mencionar que els no teixits de lli tenen una densitat de fibra molt més elevada. Els no teixits d'aramida fabricats en el present treball, ofereixen una resistència el doble de la dels no teixits de residus de polièster i cotó però molt inferior a la de lli. Cal doncs aprofundir en el procés de fabricació del no teixit per tal de crear napes més denses augmentant la quantitat de fibra.

### 7.2. Característiques mecàniques de les plaques

Les plaques no han mostrat una tendència clara en cap dels quatre paràmetres estudiats. Per a cada un d'ells la configuració de placa que ha assolit el valor més alt ha canviat. Això pot ser causat pel fet que s'ha treballat amb un residu tèxtil i la possible heterogeneïtat que això pot comportar.

En general hi ha hagut una elevada dispersió de resultats no esperada sobre la que no s'ha pogut determinar l'origen. Aquesta variabilitat ha estat més gran en els assaigs de tracció, especialment en el MOE i en l'energia específica. En el cas del MOE es pot deure al fet que s'ha calculat de forma gràfica agafant el pendent de la recta de regressió entre dos punts. Seria favorable, doncs,

un major nombre de repeticions de l'experiment. En aquesta línia, la poca quantitat de plaques per assaig fa que un possible error de fabricació en una placa infereixi molt en el resultat final.

La dispersió dels resultats es pot deure a diferents factors:

1. El fet que el no teixit sigui un residu el que comporta una heterogeneïtat intrínseca.
2. El caràcter hidrofòbic de la fibra del no teixit pot provocar que l'adherència entre la matriu i la fibra sigui molt sensible.
3. La fabricació manual de la placa pot fer que algunes diferències en el procediment es tradueixin en grans diferències en el comportament.
4. En els assaigs de tracció, les mordasses no agafaven bé la proveta i aquest a vegades relliscava obligant a repetir l'assaig.

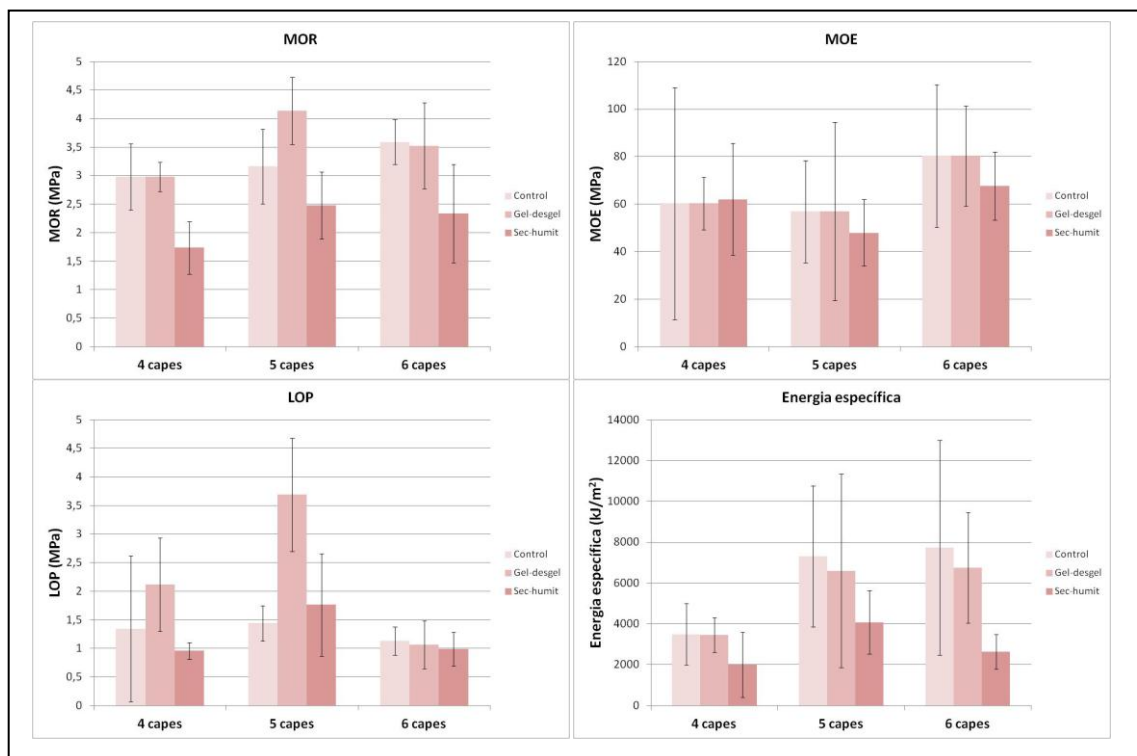


Figura 7.1. Resum de les mitjanes obtingudes en els assaigs de tracció. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.

Els resultats de l'envelliment a cicles sec-humit són la majoria de vegades inferiors als de gel-desgel i control. Això es deu a una destrucció de la fibra a causa de l'envelliment accelerat perjudicant les propietats del material compost. Aquest deteriorament s'aprecia, sobretot, en tots els paràmetres dels assaigs de flexió.

En canvi, l'envelliment a cicles gel-desgel lluny d'empitjorar els resultats en alguns casos les mitjanes han estat superiors. En el cicle gel-desgel es busca que l'aigua penetri en els porus i en la fase de congelació aquesta es dilati. D'aquesta manera es generen tensions en l'interior del material. Els cicles afecten més aquelles pastes que són rígides i amb porus petits. En aquest cas, el contingut de fibra ha fet augmentar la porositat del material així com ha aportat més flexibilitat. Això explicaria perquè les plaques no s'han vist afectades pels cicles gel-desgel.

D'altra banda, el fet que el material es vagi mullant al llarg dels cicles, provoca una major hidratació del ciment i un consegüent augment de la resistència assolint valors més elevats de MOR i LOP. No s'han observat canvis en el MOE i l'energia específica el que explicaria que l'adherència matriu-fibra no s'ha vist perjudicada. No obstant, aquestes petites diferències no permeten concloure que existeixin diferències significatives entre cicles gel-desgel i control.

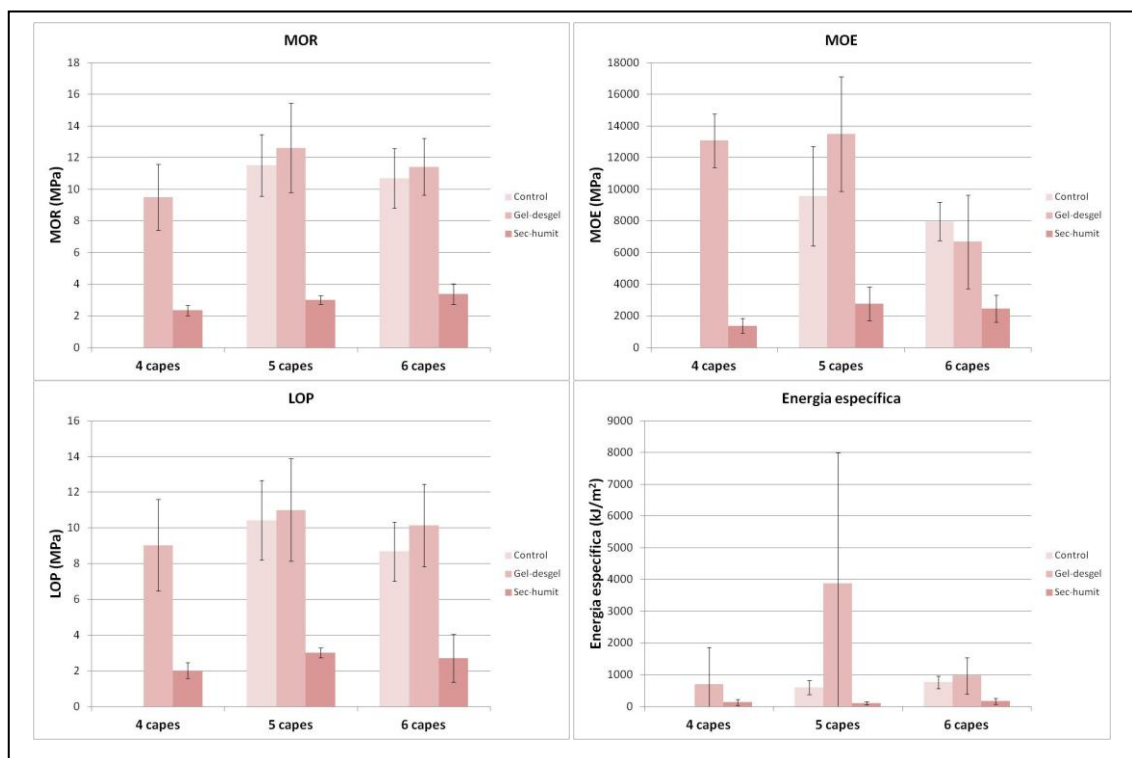


Figura 7.2. Resum de les mitjanes obtingudes en els assaigs de flexió. Les línies d'error mostren la desviació estàndard.

El funcionament d'un material compost depèn d'un equilibri entre quantitat de matriu i quantitat de fibra. Així, s'aconsegueix una bona relació entre resistència a compressió (proporcionada per la matriu), resistència a tracció (proporcionada per la fibra) i adherència entre fibra i matriu. Això pot explicar que les plaques reforçades amb cinc capes siguin millors que les reforçades amb quatre o sis.

En la Figura 7.3 es poden veure mostres de tres provetes 5C control, csh i cgd a la lupa. S'aprecia com en el cas de les plaques control i cgd les fibres no han estat malmeses i per tant, han pogut contribuir a suportar els esforços. Això es pot deduir ja que són més llargues i sobresurten del ciment en la zona del trencament. En canvi, en la placa csh les fibres es trenquen juntament amb la matriu quedant una superfície "llisa". En el cas de les fibres de la placa cgd es pot veure com les fibres tenen adherides petites partícules de color blanc, producte de la major hidratació del ciment.

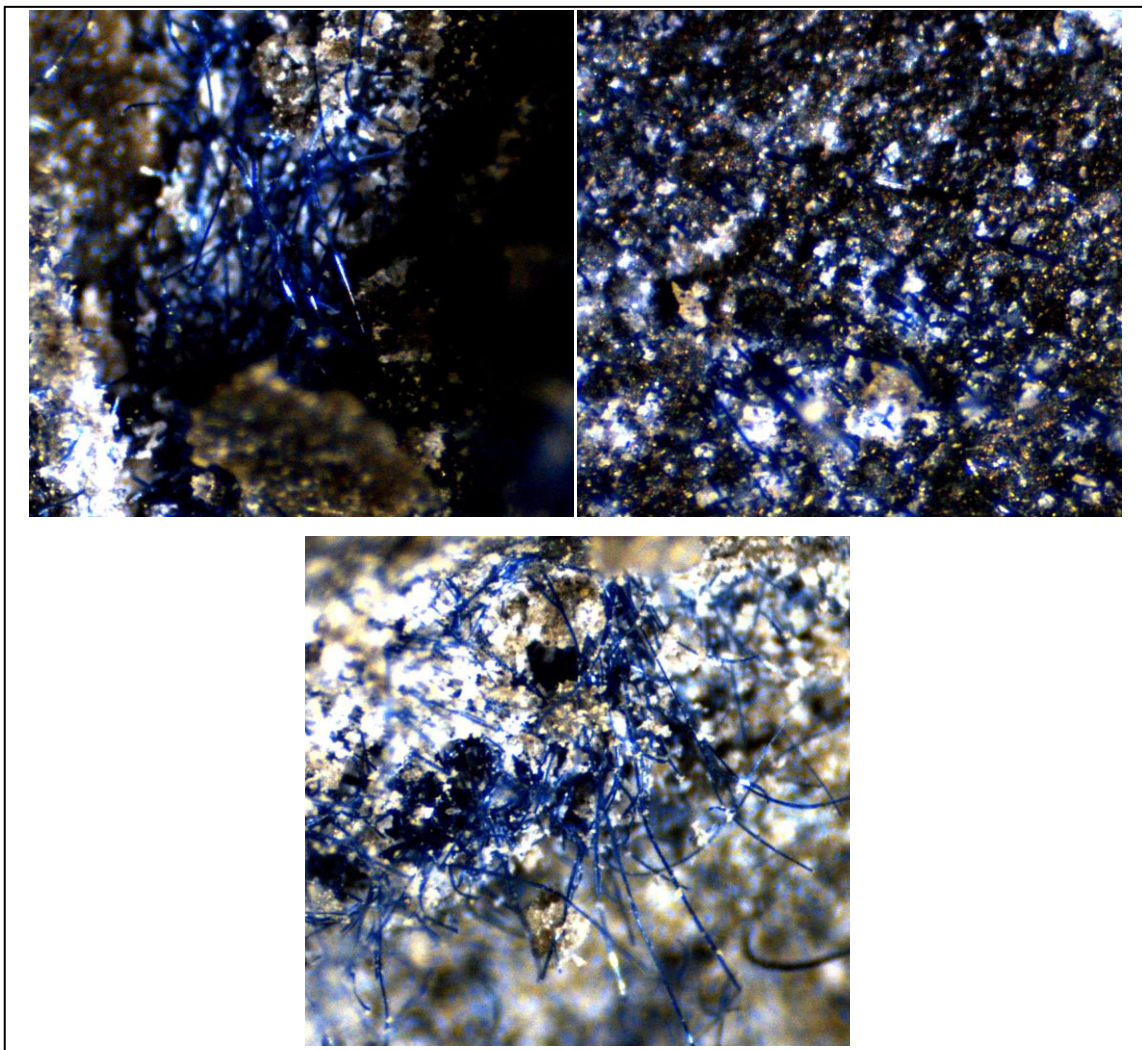


Figura 7.3. Imatges a lupa de les fibres. A l'esquerra control, a la dreta sec-humit i a baix gel-desgel.

Unes plaques de característiques similars, fabricades amb no teixits de residus tèxtils, s'analitzen el l' estudi de P. Sadrolodabae et al. (2021)<sup>[69]</sup> Els resultats obtinguts mostren que les plaques amb cinc i sis capes de no teixit assajades a flexió sense envelliment presenten un MOR mitjà de 13,9 MPa i 15,5 MPa respectivament; superiors als obtinguts en el present treball. En canvi, pel que fa al LOP, P. Sadrolodabae obté valors de 4,1 MPa per les plaques 5C i 4,4 MPa per les plaques 6C. Finalment, en el MOE no s'han observat diferències notables. Cal destacar que, a diferència del que s'exposa en aquest estudi, les plaques 6C reforçades amb no teixit de cotó, polièster i lli obtenen valors superiors a les 5C.

P. Sadrolodabae també sotmet les plaques a envelliment accelerat amb cicles sec-humit. El MOR i el LOP es veuen afectats. En el cas del MOR aquest passa a ser de 11,4 MPa i 12,0 MPa per les plaques 5C i 6C respectivament. Reducció menor a la patida per les plaques amb no teixits d'aramida.

Si es compara amb ciment reforçat amb no teixits íntegrament de fibres vegetals, J. Claramunt et al. (2017) en el seu article caracteritzen un fibrociment reforçat amb quatre capes de no teixits de lli.<sup>[70]</sup> Les propietats mecàniques obtingudes són molt superiors a les del ciment amb no teixit d'aramida. S'obtenen valors de MOR de 33 MPa en els assaigs de flexió i 7,75 MPa en els de tracció. En el cas del LOP aquests valors són de 18 MPa i 5 MPa respectivament i en el del MOE, 16 MPa i 18 MPa. Comparant-t'ho amb els resultats d'aquest treball es constata que els fibrociments reforçats amb lli són notablement més resistents als esforços així com un mòdul d'elasticitat inferior.

## Conclusions

En aquest treball s'han analitzat les característiques mecàniques de plaques de ciment reforçat amb residus de fibres d'aramida. S'han calculat els paràmetres mecànics per tal de comparar numèricament les propietats mecàniques en diferents configuracions de plaques.

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 calculades ha estat elevat. En el cas del mòdul d'elasticitat i de l'energia específica han presentat una variabilitat més elevada que en el cas del mòdul de ruptura i del límit de proporcionalitat. Es pot deure a factors com el fet que s'ha treballat amb un residu, el caràcter hidrofòbic de la fibra o la fabricació manual de la placa.

2. Respecte el nombre de capes de no teixit, el resultats han variat en funció del nombre de capes. Tot i això, en el conjunt d'assajos no es veu una tendència ni proporcional ni inversament proporcional entre les capes i els resultats. En la majoria d'assajos les plaques amb quatre capes presenten mitjanes inferiors però la dispersió no permet afirmar que les diferències són significatives. Entre les plaques amb cinc i sis capes no s'aprecia cap correlació.

3. La durabilitat del material ha estat diferent en funció de del mètode d'envelliment accelerat al que s'han sotmès les plaques. En aquest cas sí que s'observa una clara diferència entre un mètode i l'altre. Les plaques sotmeses a cicles sec-humit han presentat, de forma general, resultats significativament inferiors a les plaques control i les sotmeses a gel-desgel. En canvi, en els cicles gel-desgel no s'han observat millores en les propietats mecàniques respecte el grup control.

4. Pel que fa a la relació entre el gruix de les plaques i les propietats mecàniques, no s'ha detectat cap relació. Caldria, doncs, estudiar més en profunditat aquest aspecte.

Com a conclusió, aquest treball serveix com una primera aproximació a l'aplicació de fibres d'aramida a través de l'ús de no teixits. Els resultats es poden considerar esperançadors ja que el marge de millora en la tecnologia i en l'elaboració de les plaques permeten creure que els resultats poden millorar. La resistència del no teixit ha mostrat ser bona, per això cal centrar

esforços a millorar la durabilitat de la fibra a cicles sec-humit. Aquests resultats també obren la porta a l'ús d'altres fibres sintètiques residuals que ara no tenen cap reutilització. Aquest marge de millora podria fer que les plaques es consolidessin com una opció per a la construcció afavorint així a la revalorització d'aquest residu.



# Bibliografia

## Referències bibliogràfiques

- [1] Llerena Encalada, A., 2014. Estudio de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales: Evaluación previa del comportamiento de un panel de cemento blanco con adición de meta-caolín reforzado con un textil no-tejido de fibras largas de lino y cáñamo. A: [en línia]. Disponible a: <http://hdl.handle.net/2099.1/25365>.
- [2] Cooke, W.E., 1924. FIBROSIS OF THE LUNGS DUE TO THE INHALATION OF ASBESTOS DUST. A: *Br Med J* [en línia]. British Medical Journal Publishing Group, Vol. 2, núm. 3317, p. 147-140. ISSN 0007-1447. DOI 10.1136/BMJ.2.3317.147. [Consulta: 25 gener 2021]. Disponible a: <https://www.bmj.com/content/2/3317/147>.
- [3] Unión Europea. Directiva 1999/77/CE de la Comisión de 26 de julio de 1999 por la que se adapta al progreso técnico por sexta vez el anexo I de la Directiva 76/769/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros que limitan la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos (amianto). A: *Diario Oficial de las Comunidades Europeas* [en línia]. Brusel·les: Comissió Europea, 26 de juliol de 1999, núm 11, p.18-20. [Consulta: 25 gener 2021] Disponible a: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0077&from=ES>
- [4] Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE 197-1:2011: Cemento.Parte1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes* [En línia]. Madrid: AENOR, 2011 [Consulta: 25 gener 2021]. Disponibles a: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0048623>
- [5] Sanjuán, Á. i Chinchón, S., 2006. *Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland* [en línia]. ISBN 9788497173056. Disponible a: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/45347>.

- [6] Espanya. Real Decreto 256/2016, de 10 de junio, por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos (RC-16). A: *Boletín Oficial del Estado* [en línea]. Madrid: BOE, 25 junio 2016, no. 153, p. 45755 a 45824 [Consulta: 25 gener 2021]. Disponible a: [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2016-6167](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2016-6167).
- [7] GENERIC FIBRE NAMES | BISFA - The International Bureau Of Standardization Of Man-Made Fibres. [en línea]. [Consulta: 2 febrer 2021]. Disponible a: <https://bisfa.org/generic-fibre-names/>.
- [8] Wang, R.-M., Zheng, S.-R. i Zheng, Y.-P., 2011. Reinforced materials. A: *Polymer Matrix Composites and Technology*. núm. 4, p. 29-548. DOI 10.1533/9780857092229.1.29.
- [9] Miravete, A., 2002. Materiales compuestos. A: *Temes de disseny*. núm. 20, p. 123-139-139. ISSN 2385-7951.
- [10] McCarthy, B.J., 2016. An Overview of the Technical Textiles Sector. A: *Handbook of Technical Textiles: Second Edition*. Elsevier Inc., p. 1-20. ISBN 9781782424819. DOI 10.1016/B978-1-78242-458-1.00001-7.
- [11] Rulkens, R. i Koning, C., 2012. Chemistry and Technology of Polyamides. A: *Polymer Science: A Comprehensive Reference, 10 Volume Set*. Elsevier, Vol. 5, p. 431-467. DOI 10.1016/B978-0-444-53349-4.00147-3.
- [12] Matsumoto, N., Kitago, Y. i Sato, T., 2000. Restoration, seismic strengthening and seismic design for railway viaducts after Hyogoken-Nanbu earthquake. A: *Cement and Concrete Composites*. Vol. 22, núm. 1, p. 47-57. ISSN 09589465. DOI 10.1016/S0958-9465(99)00048-7.
- [13] Marques, A.T., 2011. 7 - Fibrous materials reinforced composites production techniques A2 - Fangueiro, R. BT - Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications. A: *Woodhead Publishing Series in Textiles* [en línea]. Woodhead Publishing, p. 191-215. [Consulta: 4 febrer 2021]. Disponible a: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845695583500077>.

- [14] Vega, G., 2016. Revisión del empleo de fibras de acero en hormigones autocompactantes = Review of the steel fibers use in concrete self-compacting. A: *Anales de Edificación*. Vol. 2, núm. 3, p. 279-286. ISSN 2444-1309. DOI 10.20868/ade.2016.3471.
- [15] Parra-Montesinos, G.J., Reinhardt, H.W. i Naaman, A.E., 2012. *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6*. ISBN 9789400724358. DOI 10.3151/coj.54.5\_565.
- [16] Cuartero, J. i Miravete, A., 2003. Morteros de cemento compuestos con fibras AR y puzolana procedente de catalizadores FCC usados: resultados preliminares. A: *Materiales Compuestos 03. Actas del V Congreso Nacional de Materiales Compuestos* [en línea]. p. 865-872. Disponible a: <http://www.aemac.org/wp/wp-content/uploads/2015/05/MATCOMP03.pdf>.
- [17] Sim, J., Park, C. i Moon, D.Y., 2005. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. A: *Composites Part B: Engineering*. Vol. 36, núm. 6-7, p. 504-512. ISSN 13598368. DOI 10.1016/j.compositesb.2005.02.002.
- [18] Kizilkanat, A.B. et al., 2015. Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study. A: *Construction and Building Materials* [en línea]. Elsevier Ltd, Vol. 100, p. 218-224. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.006. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.006>.
- [19] Pakravan, H.R. i Ozbakkaloglu, T., 2019. Synthetic fibers for cementitious composites: A critical and in-depth review of recent advances. A: *Construction and Building Materials* [en línea]. Elsevier Ltd, Vol. 207, p. 491-518. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.078. Disponible a: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.078>.
- [20] Kim, D. joo, Naaman, A.E. i El-Tawil, S., 2008. Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. A: *Cement and Concrete Composites* [en línea]. Elsevier Ltd, Vol. 30, núm. 10, p. 917-928. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2008.08.002. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.08.002>.

- [21] Mukhopadhyay, S. i Khatana, S., 2015. A review on the use of fibers in reinforced cementitious concrete. A: *Journal of Industrial Textiles*. Vol. 45, núm. 2, p. 239-264. ISSN 15308057. DOI 10.1177/1528083714529806.
- [22] Mohammed, B.S., Khed, V.C. i Liew, M.S., 2018. Optimization of hybrid fibres in engineered cementitious composites. A: *Construction and Building Materials* [en línia]. Elsevier Ltd, Vol. 190, p. 24-37. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.188. Disponible a: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.188>.
- [23] Ardanuy, M., Claramunt, J. i Toledo Filho, R.D., 2015. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. A: *Construction and Building Materials*. Vol. 79, p. 115-128. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035.
- [24] Jarabo, R., 2013. Efecto De La Sepiolita Y De Alternativas Celulósicas En El Comportamiento De Suspensiones De Fibrocemento. A: [en línia]. p. 221. Disponible a: <http://eprints.ucm.es/21586/1/T34508.pdf>.
- [25] Silva, F. de A. et al., 2010. Physical and mechanical properties of durable sisal fiber-cement composites. A: *Construction and Building Materials* [en línia]. Elsevier Ltd, Vol. 24, núm. 5, p. 777-785. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030>.
- [26] Mohr, B.J., Biernacki, J.J. i Kurtis, K.E., 2007. Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber-cement composites. A: *Cement and Concrete Research*. Vol. 37, núm. 11, p. 1531-1543. ISSN 00088846. DOI 10.1016/j.cemconres.2007.08.001.
- [27] Ramakrishna, G. i Sundararajan, T., 2005. Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. A: *Cement and Concrete Composites*. Vol. 27, núm. 5, p. 575-582. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.008.

- [28] Bilba, K., Arsene, M.A. i Ouensanga, A., 2003. Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. A: *Cement and Concrete Composites*. Vol. 25, núm. 1, p. 91-96. ISSN 09589465. DOI 10.1016/S0958-9465(02)00003-3.
- [29] Uday, V. S. i Jitha, B. A., 2017. Concrete Reinforced with Coconut Fibres. A: *International Journal of Engineering Science and Computing*. Vol. 7, núm 4, p. 10436-10439.
- [30] Khorami, M. i Ganjian, E., 2011. Comparing flexural behaviour of fibre-cement composites reinforced bagasse: Wheat and eucalyptus. A: *Construction and Building Materials* [en línia]. Elsevier Ltd, Vol. 25, núm. 9, p. 3661-3667. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.052. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.052>.
- [31] Gonzalez Castaño, C. et al., 2020. *Estudio de la aplicación de fibras extraídas de subproductos agrícolas en agrotexiles*.
- [32] Mobasher, B. et al., 2014. Correlation of constitutive response of hybrid textile reinforced concrete from tensile and flexural tests. A: *Cement and Concrete Composites* [en línia]. Elsevier Ltd, Vol. 53, p. 148-161. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2014.06.004. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.06.004>.
- [33] Peled, A. et al., 2008. Influences of textile characteristics on the tensile properties of warp knitted cement based composites. A: *Cement and Concrete Composites*. Vol. 30, núm. 3, p. 174-183. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2007.09.001.
- [34] Curosu, I. et al., 2017. Tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) made with high-performance polyethylene, aramid and PBO fibers. A: *Cement and Concrete Research* [en línia]. Elsevier, Vol. 98, núm. December 2016, p. 71-81. ISSN 00088846. DOI 10.1016/j.cemconres.2017.04.004. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.04.004>.

- [35] Park, S.H. et al., 2021. Improving serviceability of concrete railroad ties using prestressed AFRP strands. A: *Construction and Building Materials* [en línia]. Elsevier Ltd, Vol. 280, p. 122396. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.122396. Disponible a: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122396>.
- [36] Muthulakshmi, B., Rao, C.H. i Sharma, S. V., 2020. Application of non-woven aramid-polyimide composite materials for high reliability printed circuit boards for use in spacecraft electronics. A: *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd, p. S254-S257. DOI 10.1016/j.matpr.2021.02.221.
- [37] Yuan, B. et al., 2019. Improving impact resistance and residual compressive strength of carbon fibre composites using un-bonded non-woven short aramid fibre veil. A: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Elsevier Ltd, Vol. 121, p. 439-448. ISSN 1359835X. DOI 10.1016/j.compositesa.2019.04.006.
- [38] Yuan, B. et al., 2020. Flexure and flexure-after-impact properties of carbon fibre composites interleaved with ultra-thin non-woven aramid fibre veils. A: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Elsevier Ltd, Vol. 131, p. 105813. ISSN 1359835X. DOI 10.1016/j.compositesa.2020.105813.
- [39] Ni, N. et al., 2015. High damping and high stiffness CFRP composites with aramid non-woven fabric interlayers. A: *Composites Science and Technology* [en línia]. Elsevier Ltd, Vol. 117, p. 92-99. ISSN 02663538. DOI 10.1016/j.compscitech.2015.06.002. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.06.002>.
- [40] Wong, D.W.Y. et al., 2017. Interlaminar toughening of woven fabric carbon/epoxy composite laminates using hybrid aramid/phenoxy interleaves. A: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [en línia]. Elsevier Ltd, Vol. 101, p. 151-159. ISSN 1359835X. DOI 10.1016/j.compositesa.2017.06.001. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.001>.

- [41] ONU., 1972. Informe de la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano. A: *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano* [en línea]. p. 89. Disponible a: <http://www.dipublico.org/conferencias/mediohumano/A-CONF.48-14-REV.1.pdf>.
- [42] Broecker, W.S., 1975. Climatic change: Are we on the brink of a pronounced global warming? A: *Science*. Vol. 189, núm. 4201, p. 460-463. DOI 10.1126/SCIENCE.189.4201.460.
- [43] Organización de Naciones Unidas (ONU)., 2021. *El Protocolo De Montreal Relativo a Las Sustancias Que Agotan La Capa De Ozono* [en línea]. ISBN 9789966076618. Disponible a: <https://observatoriop10.cepal.org/es/tratados/protocolo-montreal-relativo-sustancias-que-agotan-la-capa-ozono>.
- [44] Unión Europea. Reglamento (CE) 3093/94 del Consejo, de 15 de diciembre de 1994, relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono. A: *Diario Oficial de la Unión Europea* [En línea]. L 333, 22 de diciembre de 1994, p. 1-20. Disponible a: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A31994R3093>.
- [45] Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. A: División de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas [en línea]. [Consulta: 23 març 2021]. Disponible a: <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/riodeclaration.htm>.
- [46] Di Pietro, S., 2017. Acuerdo de París. A: *Cooperativismo & Desarrollo*. Vol. 25, núm. 111. ISSN 0120-7180. DOI 10.16925/co.v25i111.1874.
- [47] World Meteorological Organisation., 2021. *State of the Global Climate 2020* [en línea]. ISBN 4146702018922. Disponible a: [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=21880#.YJfRi3VKiHt](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21880#.YJfRi3VKiHt).
- [48] Weather and climate change - Met Office. A: [en línea]. [Consulta: 4 abril 2021]. Disponible a: <https://www.metoffice.gov.uk/>.
- [49] Martín Vide, J. (coord. ., 2016. *Tercer Informe sobre el canvi climàtic de Catalunya*. ISBN 9788499653174.

- [50] Emissions de GEH a Catalunya. Canvi climàtic. A: [en línia]. [Consulta: 4 abril 2021].  
Disponible a:  
[https://canviclimatic.gencat.cat/ca/canvi/inventaris/emissions\\_de\\_geh\\_a\\_catalunya/](https://canviclimatic.gencat.cat/ca/canvi/inventaris/emissions_de_geh_a_catalunya/).
- [51] Servei Meteorològic de Catalunya., 2021. L'avanç del butlletí anual del 2020. A: [en línia].  
Disponible a: [https://static-m.meteo.cat/wordpressweb/wp-content/uploads/2021/01/13090832/Avançanual\\_2020.pdf](https://static-m.meteo.cat/wordpressweb/wp-content/uploads/2021/01/13090832/Avançanual_2020.pdf).
- [52] ARC., 2018. Dades de residus a Catalunya. A: [en línia]. p. 45. Disponible a:  
[http://residus.gencat.cat/web/.content/home/lagencia/publicacions/estadistiques/estadistiques\\_2018.pdf](http://residus.gencat.cat/web/.content/home/lagencia/publicacions/estadistiques/estadistiques_2018.pdf).
- [53] Crow, J.M., 2008. The concrete conundrum. A: *Chemistry World*. Vol. 5, núm. 3, p. 62-66.  
ISSN 14737604.
- [54] ESS-DIVE Data Archive. A: [en línia]. [Consulta: 8 abril 2021]. Disponible a:  
<https://data.ess-dive.lbl.gov/data>.
- [55] *Global Waste Management Outlook.*, 2016. ISBN 9789280734799. DOI 10.18356/765baec0-en.
- [56] Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya. *Guía general de buenas prácticas ambientales para el jefe de obra*. Barcelona: Servicio Editorial del ITeC, 2006.
- [57] Home - The UN Alliance for Sustainable Fashion. A: [en línia]. [Consulta: 5 maig 2021].  
Disponible a: <https://unfashionalliance.org/>.
- [58] Hoble, A. et al., 2021. Net-Zero Challenge: The supply chain opportunity. A: . núm. January, p. 1-46.



- [59] Ellen MacArthur Foundation., 2017. A new textiles economy: Redesigning fashion's future. A: *Ellen MacArthur Foundation* [en línia]. p. 1-150. Disponible a: [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/A-New-Textiles-Economy\\_Full-Report\\_Updated\\_1-12-17.pdf%0Ahttps://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/a-new-textiles-economy-redesigning-fashions-future](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/A-New-Textiles-Economy_Full-Report_Updated_1-12-17.pdf%0Ahttps://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/a-new-textiles-economy-redesigning-fashions-future).
- [60] Network, E.E. i Recycling, T. Expert Network on Textile Recycling (ENTeR), 2016 «STRATEGIC AGENDA ON TEXTILE WASTE MANAGEMENT AND RECYCLING». A: [en línia]. Disponible a: <https://www.interreg-central.eu/Content.Node/Strategic--Agenda.html>.
- [61] Kamble, Z. i Behera, B.K., 2021. Sustainable hybrid composites reinforced with textile waste for construction and building applications. A: *Construction and Building Materials* [en línia]. Elsevier Ltd, Vol. 284, p. 122800. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.122800. Disponible a: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122800>.
- [62] Cemento SUPER-DRAGON - Cementos Molins Industrial, S.A. — Cementos Molins. A: [en línia]. [Consulta: 17 maig 2021]. Disponible a: <https://www.cmi.cemolins.es/es/productos/super-dragon>.
- [63] Claramunt, J., Ventura, H. i Ardanuy, M., 2018. Rheology of CAC-based cement pastes and the relationship to penetrability through nonwoven fabric reinforcements. A: *Cement and Concrete Composites*. Elsevier, Vol. 94, p. 85-93. ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/J.CEMCONCOMP.2018.08.014.
- [64] Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE 198-1:2018: Métodos de ensayo de cementos. Parte1: Determinación de resistencias* [En línia]. Madrid: AENOR, 2018 [Consulta: 28 maig 2021]. Disponibles a: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060675>
- [65] Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE 88412: Productos de fibrocemento NT (sin amianto). Directrices para su corte y mecanizado en obra*. [En línia]. Madrid: AENOR, 2006 [Consulta: 28 maig 2021]. Disponibles a: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0035467>

- [66] RILEM Technical Committee 232-TDT (Wolfgang Brameshuber) et al., 2016. Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete. A: *Materials and Structures* 2016 49:12 [en línia]. Springer, Vol. 49, núm. 12, p. 4923-4927. ISSN 1871-6873. DOI 10.1617/S11527-016-0839-Z. [Consulta: 25 juliol 2021]. Disponible a: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-016-0839-z>.
- [67] Test for the determination of modulus of rupture and limit of proportionality of thin fibre reinforced cement sections - [PDF Document]. A: [en línia]. [Consulta: 25 juliol 2021]. Disponible a: <https://fdocuments.in/document/test-for-the-determination-of-modulus-of-rupture-and-limit-of-proportionality.html>.
- [68] Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE 12467:2013+A2:2018: Placas planas de cemento reforzado con fibras. Especificaciones del producto y métodos de ensayo*. [En línia]. Madrid: AENOR, 2018 [Consulta: 4 setembre 2021]. Disponibles a: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060625>
- [69] Sadrolodabae, P. et al., 2021. Characterization of a textile waste nonwoven fabric reinforced cement composite for non-structural building components. A: *Construction and Building Materials* [en línia]. Elsevier Ltd, Vol. 276, p. 122179. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.122179. Disponible a: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122179>.
- [70] Claramunt, J. et al., 2017. Tensile and Flexural Properties of Cement Composites Reinforced with Flax Nonwoven Fabrics. A: *Materials* 2017, Vol. 10, Page 215 [en línia]. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 10, núm. 2, p. 215. DOI 10.3390/MA10020215. [Consulta: 4 setembre 2021]. Disponible a: <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/2/215/htm>.

# 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	mín. 95 - máx. 100
Componente minoritario (%)	2	mín. 0 - máx. 5
<b>QUÍMICAS</b>		
Pérdida por calcinación (%)	2,5	máx. 5,0
Sulfato, SO <sub>3</sub> (%)	3,4	máx. 4,0
Cloruros, Cl (%)	0,04	máx. 0,10
Residuo insoluble (%)	0,7	máx. 5,0
<b>FÍSICAS</b>		
Superficie específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4600	-
Expansión Le Chatelier (mm)	0,5	máx. 10
Índice Fraguado (min.)	110	mín. 45
<b>MECÁNICAS</b>		
Compresión a 2 días (MPa)	40	mín. 30,0
Compresión a 28 días (MPa)	61	mín. 52,5

Si necesita más información, solicitenosla.

AENOR certifica el cumplimiento de este cemento con las especificaciones de la norma UNE-EN 197-1 (cementos comunes), evaluándolo según lo establecido en el Reglamento Particular RP 15.01 (Marca N). Por lo tanto, dispone también del correspondiente certificado de conformidad CE. Este cemento contiene un agente reductor del crono (VI). 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 desencofrado, descimbrado 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 molinera 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.



SERVICIO ATENCIÓN TÉCNICA  
 SAT +34 93 680 60 30  
 sat@cmi.cemolins.es



COMPROBADO

Figura A.1. Fitxa tècnica del ciment proporcionada pel fabricant.

## Annex B. Relació aigua ciment de les plaques

Taula B.1. Relació aigua ciment durant l'elaboració de les plaques.

Placa	Ciment inicial (kg)	Aigua inicial (kg)	Aigua afegida (kg)	Relació ciment espès/aigua	Relació ciment fluid/aigua
4C-C	3,00	1,50	0,50	2,00	1,50
5C-C	3,00	1,50	0,50	2,00	1,50
5C-C	3,00	1,50	0,50	2,00	1,50
6C-C	3,50	1,50	0,83	2,33	1,50
6C-C	3,50	1,50	0,83	2,33	1,50
4C-E	3,00	1,50	0,50	2,00	1,50
4C-E	3,00	1,50	0,50	2,00	1,50
5C-E	3,00	1,50	0,50	2,00	1,50
5C-E	3,50	1,50	0,83	2,33	1,50
6C-E	3,50	1,50	0,83	2,33	1,50
6C-E	3,50	1,50	0,83	2,33	1,50
4C-H	3,00	1,50	0,50	2,00	1,50
4C-H	3,00	1,50	0,50	2,00	1,50
4C-H	3,00	1,50	0,50	2,00	1,50
5C-H	3,00	1,50	0,50	2,00	1,50
5C-H	3,00	1,50	0,50	2,00	1,50
6C-H	3,50	1,50	0,83	2,33	1,50
6C-H	3,50	1,50	0,83	2,33	1,50

Taula B.2. Relació aigua ciment final de les plaques.

Placa	Ciment sobrant (g)	Aigua sobrant (g)	Ciment a la placa (g)	Aigua a la placa (g)	Relació ciment/aigua placa
4C-C	967,13	1414,69	2032,87	585,31	3,47
5C-C	762,94	1075,50	2237,06	924,50	2,42
5C-C	844,29	951,91	2155,71	1048,09	2,06
6C-C	1217,68	1381,76	2282,32	951,24	2,40
6C-C	1156,45	1450,90	2343,55	882,10	2,66
4C-E	484,17	805,03	2515,83	1194,97	2,11
4C-E	807,79	1101,87	2192,21	898,13	2,44
5C-E	592,66	879,10	2407,34	1120,90	2,15
5C-E	1203,99	512,98	2296,01	820,02	2,80
6C-E	870,04	1312,66	2629,96	1020,34	2,58
6C-E	990,47	1550,04	2509,53	782,96	3,21
4C-H	1232,82	1281,87	1767,18	718,13	2,46
4C-H	1046,36	1206,45	1953,64	793,55	2,46
4C-H	1234,19	1387,41	1765,81	612,59	2,88
5C-H	1371,66	1192,74	1628,34	807,26	2,02
5C-H	824,90	1147,49	2175,10	852,51	2,55
6C-H	1084,34	1425,18	2415,66	907,82	2,66
6C-H	1397,28	1413,50	2102,72	919,50	2,29
				<b>Mitjana</b>	<b>2,56</b>
				<b>SD</b>	<b>0,38</b>

## Annex C. Dimensions i pesos de les provetes

Taula C.3. Dimensions i pesos de les provetes control assajades a tracció.

Proveta	Amplada (mm)	Gruix (mm)	Pes (g)
4C-C-T-1	13,64	49,20	394,30
4C-C-T-2	11,75	44,32	335,40
4C-C-T-3	11,41	45,82	338,70
4C-C-T-4	11,42	49,50	354,80
4C-C-T-5	11,28	44,31	324,25
4C-C-T-6	12,55	45,40	344,05
5C-C-T-2	13,88	47,16	422,50
5C-C-T-2	14,02	44,34	392,85
5C-C-T-3	14,08	47,51	458,40
5C-C-T-4	13,34	46,68	402,20
5C-C-T-5	14,48	48,70	459,50
5C-C-T-6	13,08	45,25	387,50
6C-C-T-1	13,80	47,06	416,65
6C-C-T-2	14,30	47,89	434,05
6C-C-T-3	14,13	45,16	403,60
6C-C-T-4	14,21	45,69	416,65
6C-C-T-5	14,83	46,59	444,30
6C-C-T-6	14,41	45,55	437,80

Taula C.4. Dimensions i pesos de les provetes control assajades a flexió.

Proveta	Amplada (mm)	Gruix (mm)	Pes (g)
5C-C-F-1	14,16	46,72	427,55
5C-C-F-2	14,15	46,50	420,30
5C-C-F-3	14,32	42,75	385,35
5C-C-F-4	14,10	41,76	376,10
5C-C-F-5	13,66	48,05	427,05
5C-C-F-6	13,40	45,70	392,70
6C-C-F-1	14,75	45,81	433,60
6C-C-F-2	15,15	45,91	464,85
6C-C-F-3	15,23	47,32	421,55
6C-C-F-4	14,76	46,58	424,10
6C-C-F-5	14,85	45,09	434,65
6C-C-F-6	14,63	46,90	444,30

Taula C.5. Dimensions i pesos de les provetes sec-humit assajades a tracció.

Proveta	Amplada (mm)	Gruix (mm)	Pes (g)
4C-E-T-1	14,90	45,53	410,90
4C-E-T-2	14,62	47,57	431,30
4C-E-T-3	15,20	36,75	335,05
4C-E-T-4	14,02	46,21	392,00
4C-E-T-5	13,73	47,47	408,95
4C-E-T-6	14,11	47,50	406,90
5C-E-T-1	14,56	43,97	399,65
5C-E-T-2	14,64	49,78	448,65
5C-E-T-3	14,68	48,24	477,65
5C-E-T-4	13,74	44,99	409,80
5C-E-T-5	14,63	49,86	449,75
5C-E-T-6	14,08	47,51	458,40
6C-E-T-1	15,65	46,25	441,15
6C-E-T-2	15,72	47,41	464,45
6C-E-T-3	15,96	44,26	475,35
6C-E-T-4	15,28	45,77	450,05
6C-E-T-5	15,55	44,93	452,70
6C-E-T-6	15,79	46,75	473,65

Taula C.6. Dimensions i pesos de les provetes sec-humit assajades a flexió.

Proveta	Amplada (mm)	Gruix (mm)	Pes (g)
4C-E-F-1	15,07	49,37	472,90
4C-E-F-2	15,17	48,85	457,60
4C-E-F-3	14,50	50,20	468,80
4C-E-F-4	13,94	43,86	318,70
4C-E-F-5	13,49	45,72	378,40
4C-E-F-6	14,03	46,39	408,95
5C-E-F-1	14,92	44,76	395,20
5C-E-F-2	15,03	43,06	398,55
5C-E-F-3	14,57	48,28	444,10
5C-E-F-4	15,18	48,62	478,35
5C-E-F-5	14,43	45,83	422,65
5C-E-F-6	14,39	45,80	405,60
6C-E-F-1	16,20	43,54	458,45
6C-E-F-2	15,88	47,92	481,50
6C-E-F-3	16,11	46,90	474,65
6C-E-F-4	15,65	45,39	441,35
6C-E-F-5	15,52	48,59	481,80
6C-E-F-6	15,78	46,20	479,50

Taula C.7. Dimensions i pesos de les provetes gel-desgel assajades a tracció.

Proveta	Amplada (mm)	Gruix (mm)	Pes (g)
4C-H-T-1	10,91	43,11	291,20
4C-H-T-2	12,95	46,50	311,55
4C-H-T-3	10,96	48,19	349,00
4C-H-T-4	11,50	45,66	313,60
4C-H-T-5	11,70	47,32	356,55
4C-H-T-6	11,82	46,37	336,70
4C-H-T-7	10,86	46,89	370,30
4C-H-T-8	12,13	47,35	366,30
4C-H-T-9	12,85	44,86	371,95
5C-H-T-1	10,87	45,00	311,25
5C-H-T-2	10,90	47,90	313,55
5C-H-T-3	10,21	44,63	285,80
5C-H-T-4	14,23	45,05	405,45
5C-H-T-5	13,50	45,19	378,65
5C-H-T-6	13,40	47,38	408,60
6C-H-T-1	14,46	46,35	437,00
6C-H-T-2	14,39	45,48	420,70
6C-H-T-3	15,29	47,06	464,75
6C-H-T-4	12,59	50,88	404,80
6C-H-T-5	13,19	458,4	392,60
6C-H-T-6	15,08	42,85	390,45

Taula C.8. Dimensions i pesos de les provetes gel-desgel assajades a flexió.

Proveta	Amplada (mm)	Gruix (mm)	Pes (g)
4C-H-F-1	10,73	45,95	318,05
4C-H-F-2	10,81	46,80	310,60
4C-H-F-3	10,94	46,23	333,85
4C-H-F-4	12,12	44,66	339,05
4C-H-F-5	11,67	46,70	349,35
4C-H-F-6	11,30	45,11	306,10
4C-H-F-7	12,05	43,22	331,25
4C-H-F-8	12,65	46,41	369,50
4C-H-F-9	13,34	48,09	421,25
5C-H-F-1	11,04	45,88	311,90
5C-H-F-2	10,56	46,23	298,20
5C-H-F-3	11,36	46,45	329,05
5C-H-F-4	13,43	46,63	391,20
5C-H-F-5	13,66	49,04	423,10
5C-H-F-6	14,42	44,53	426,05
6C-H-F-1	14,51	44,22	412,25
6C-H-F-2	14,46	49,04	456,20
6C-H-F-3	14,91	44,09	415,85
6C-H-F-4	13,25	42,16	348,45
6C-H-F-5	13,85	47,91	432,20
6C-H-F-6	14,40	46,10	428,95



## Annex D. Corbes tensió-deformació

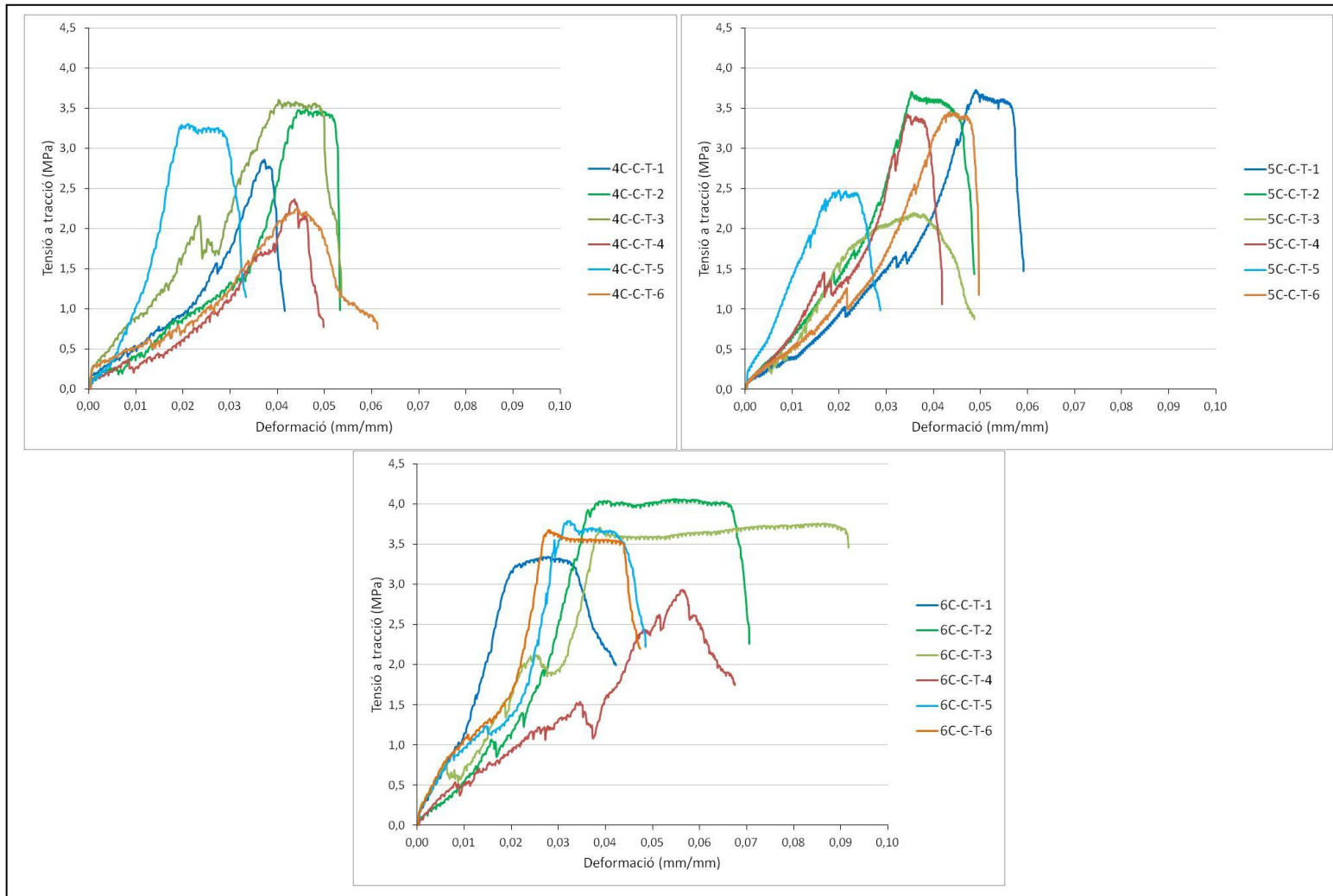


Figura D.2. Corbes tensió-deformació de les plaques control assajades a tracció.

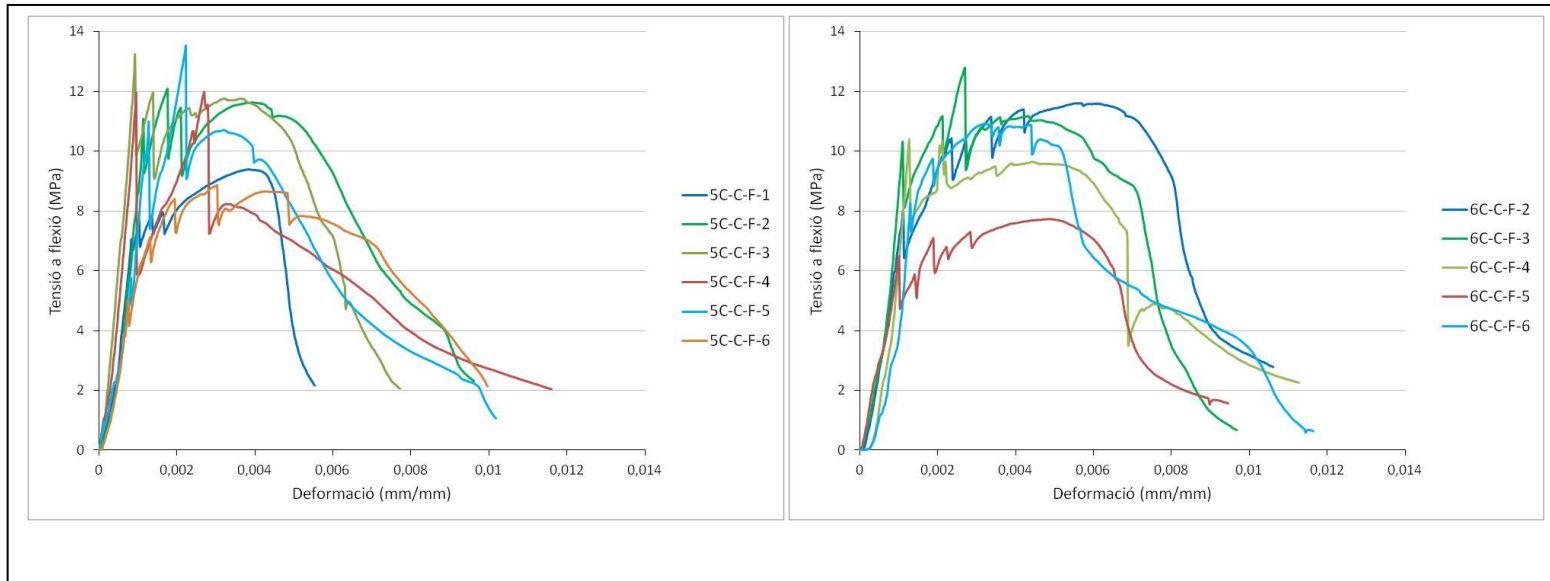


Figura D.3. Corbes tensió-deformació de les plaques control assajades a flexió.

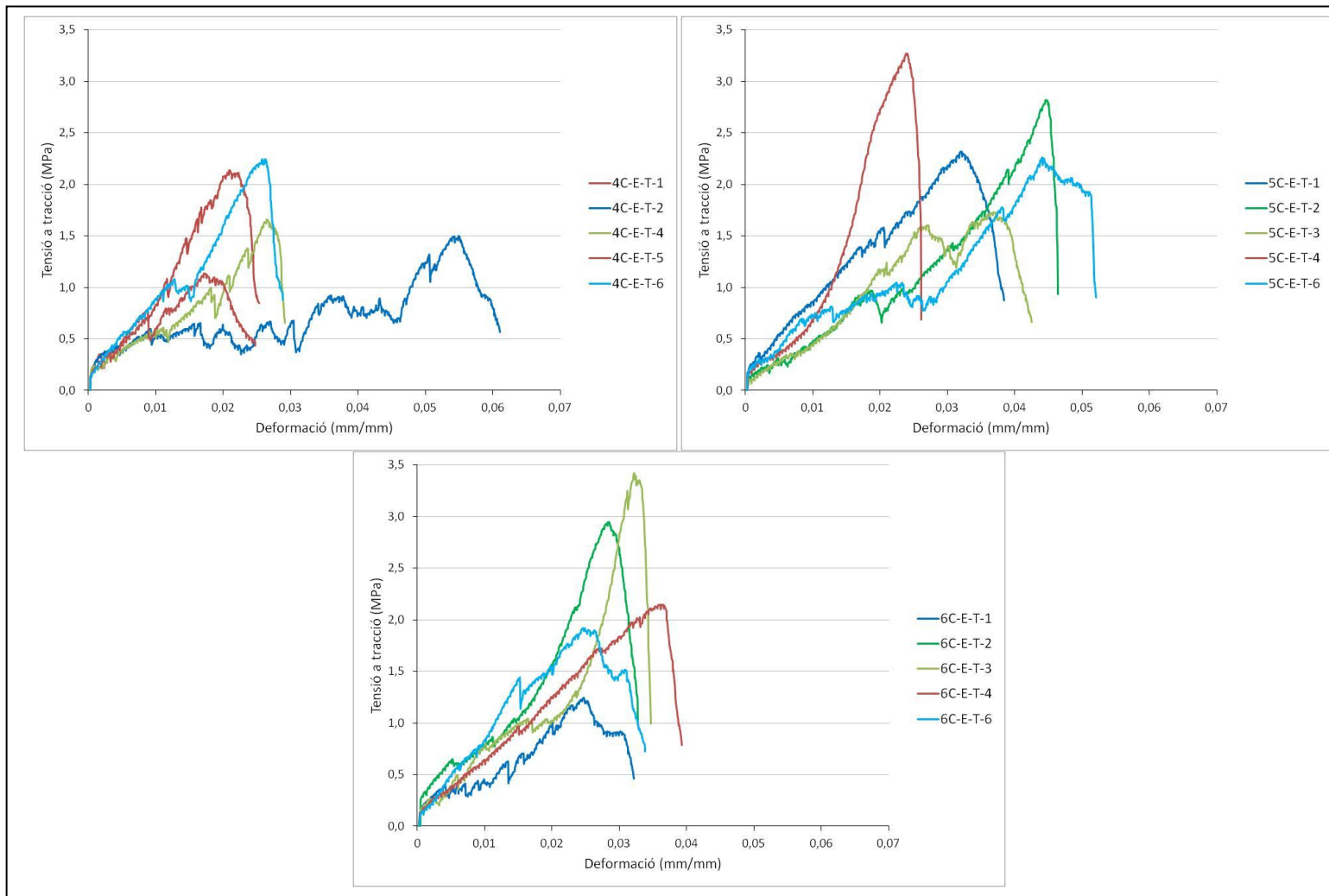


Figura D.4. Corbes tensió-deformació de les plaques sec-humit assajades a tracció.

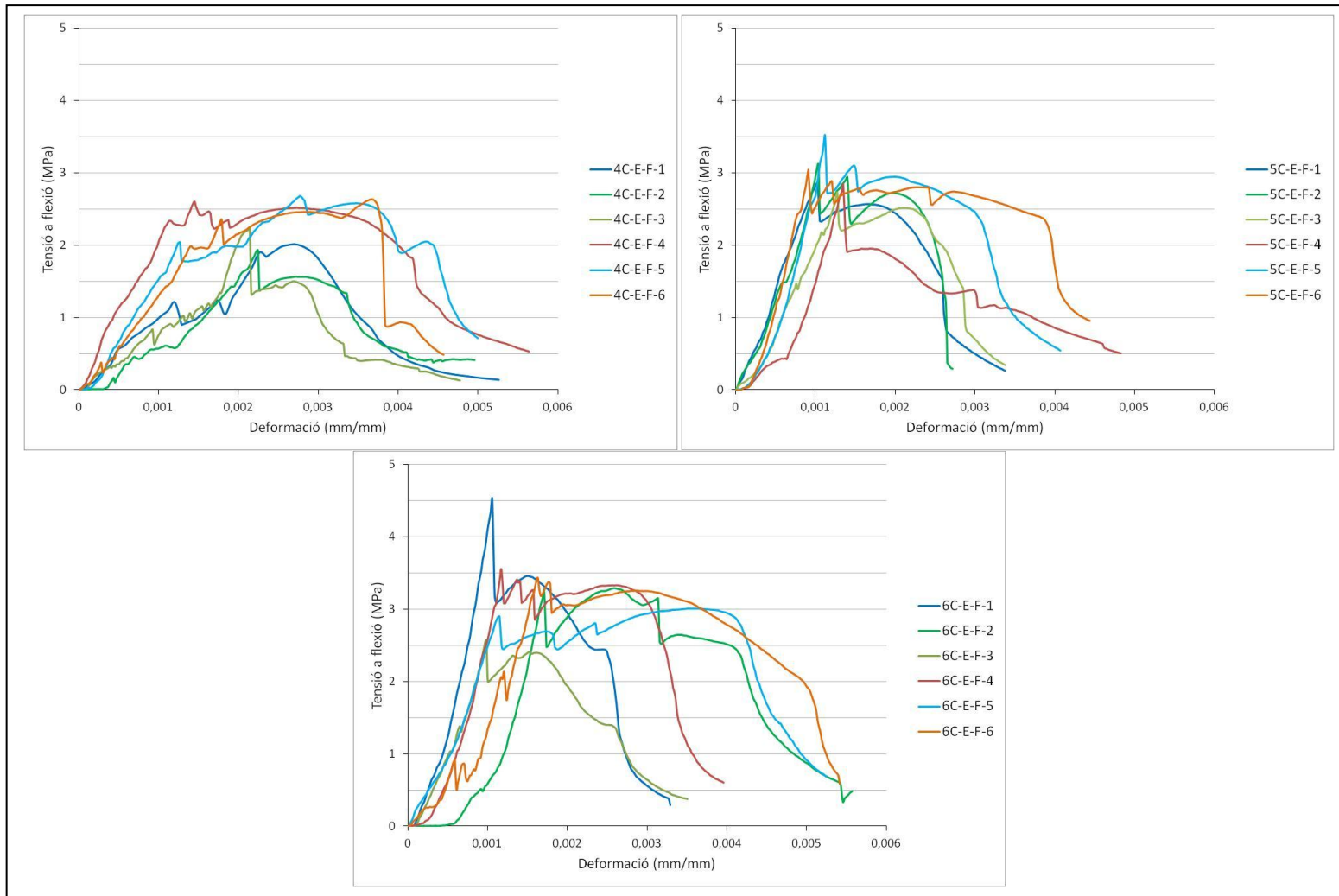


Figura D.5. Corbes tensió-deformació de les plaques sec-humit assajades a flexió.

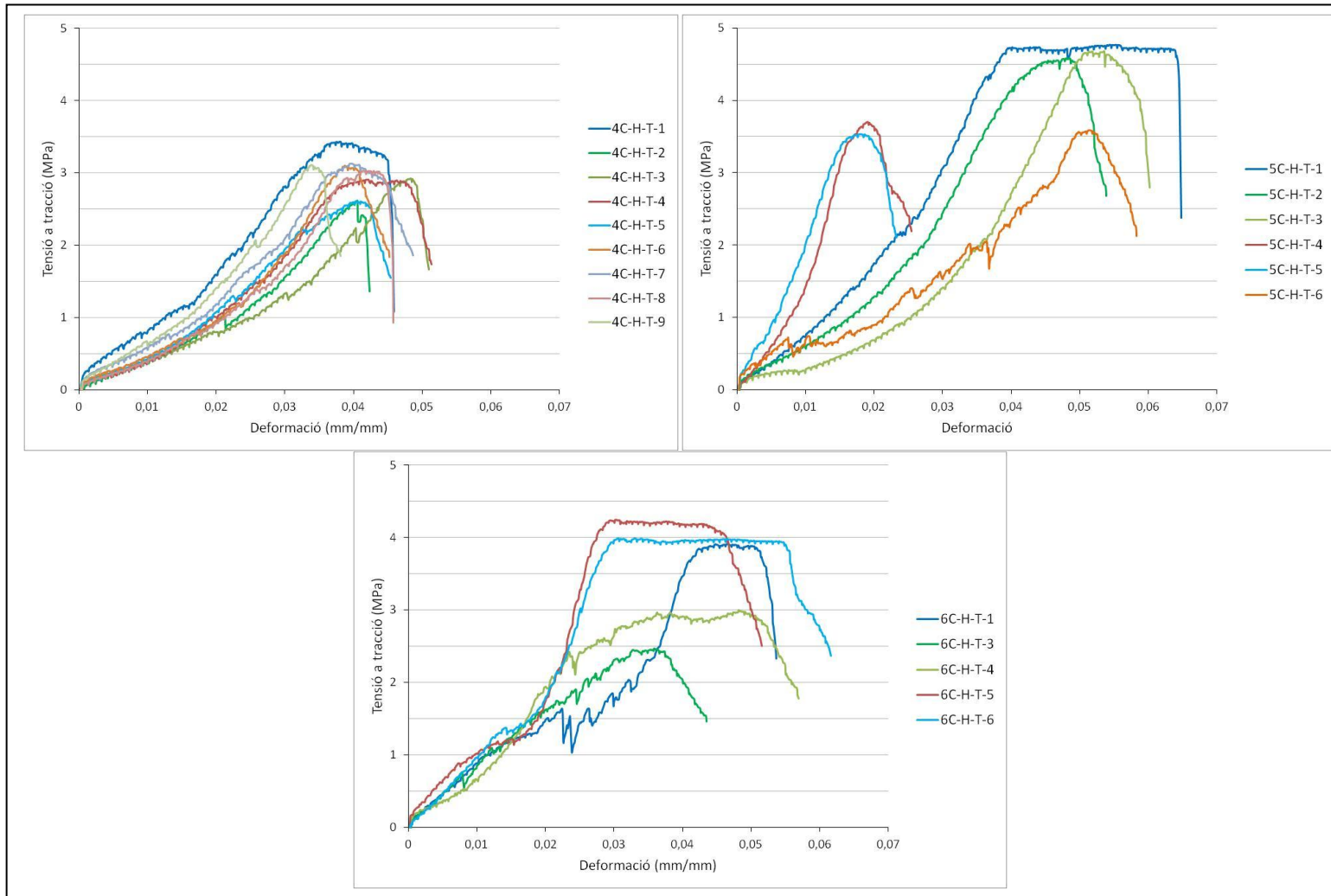


Figura D.6. Corbes tensió-deformació de les plaques gel-desgel assajades a tracció.

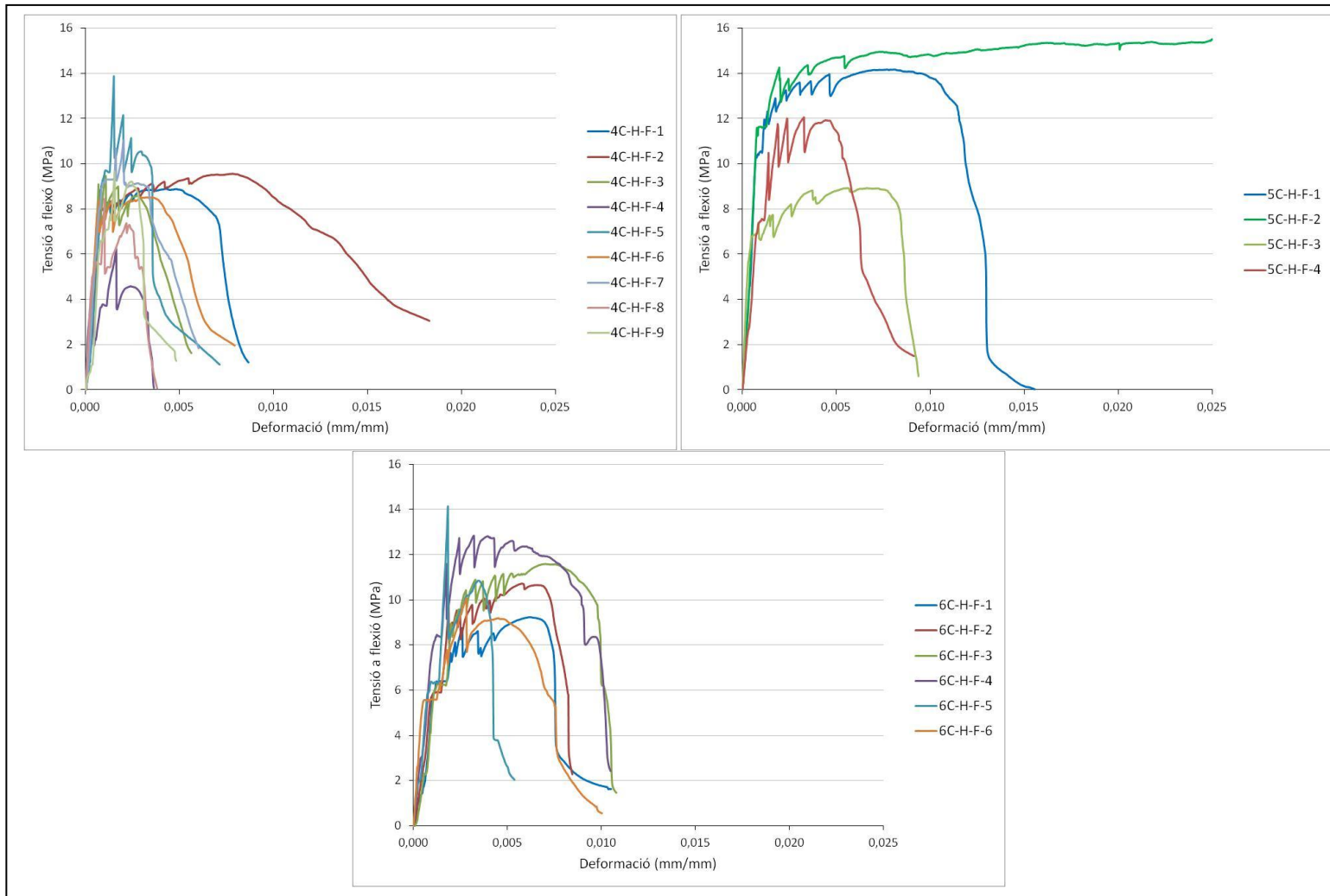


Figura D.7. Corbes tensió-deformació de les plaques gel-desgel assajades a flexió.

## Annex E. Corbes de gruix

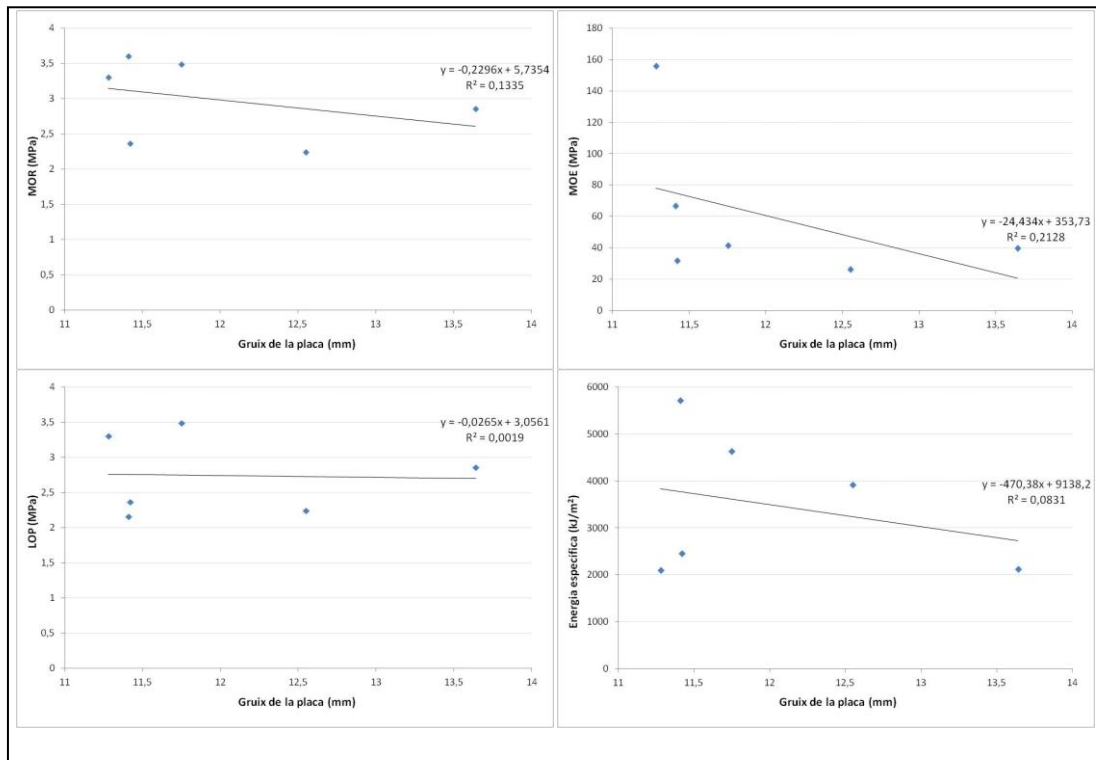


Figura E.8. Corbes de gruix de les plaques 4C-C-T.

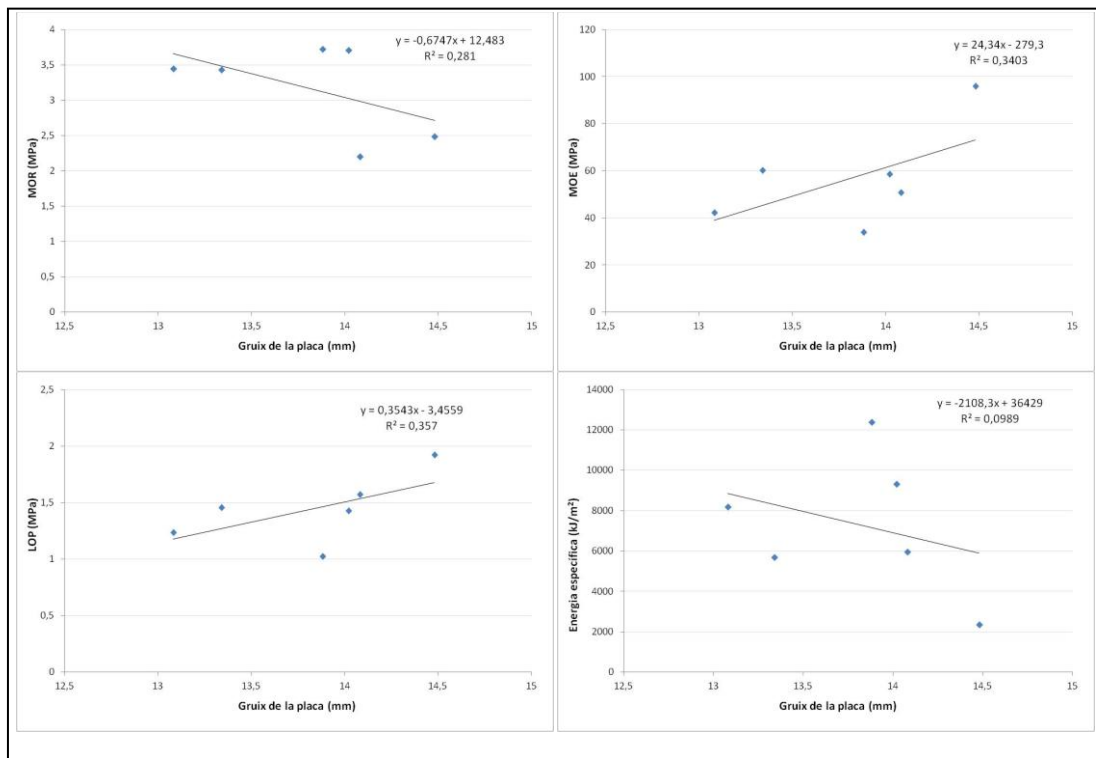


Figura E.9. Corbes de gruix de les plaques 5C-C-T.

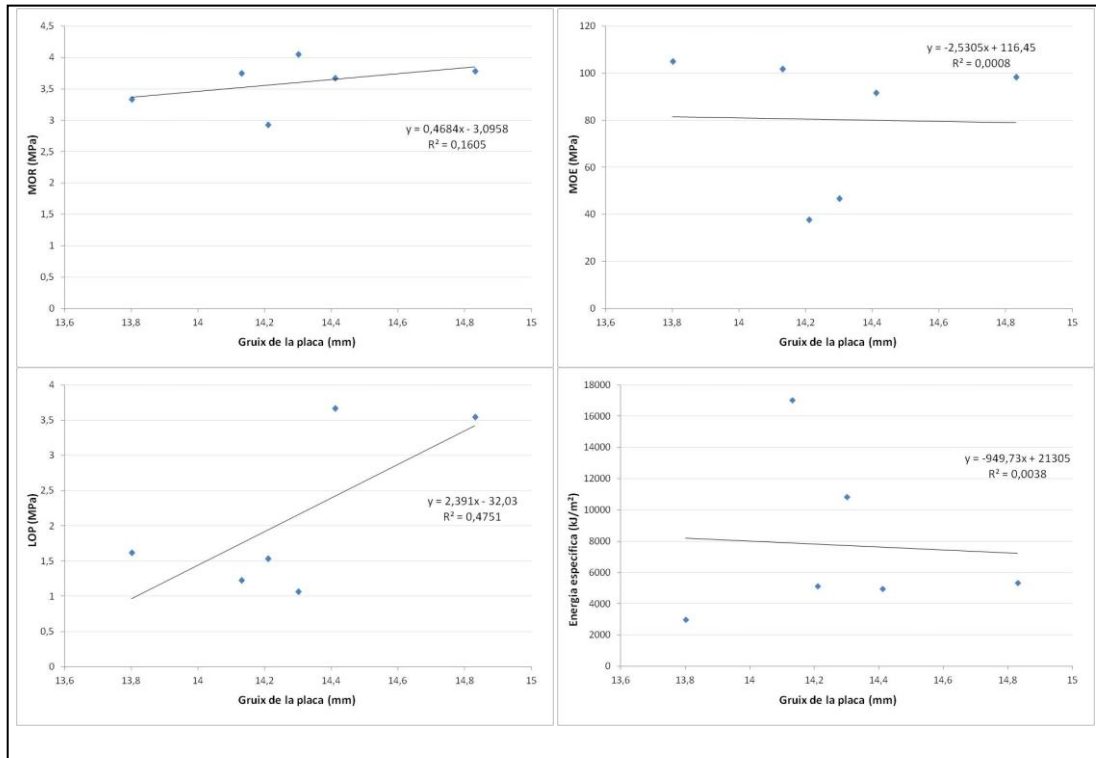


Figura E.10. Corbes de gruix de les plaques 6C-C-T.

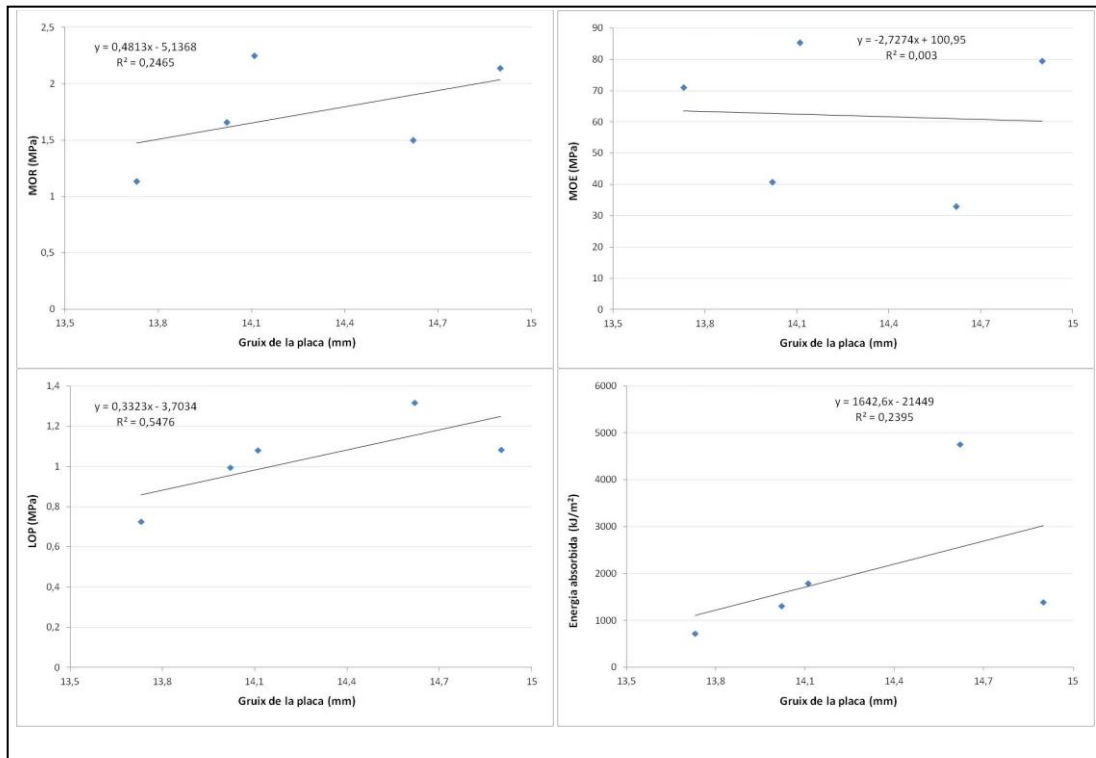


Figura E.11. Corbes de gruix de les plaques 4C-E-T.



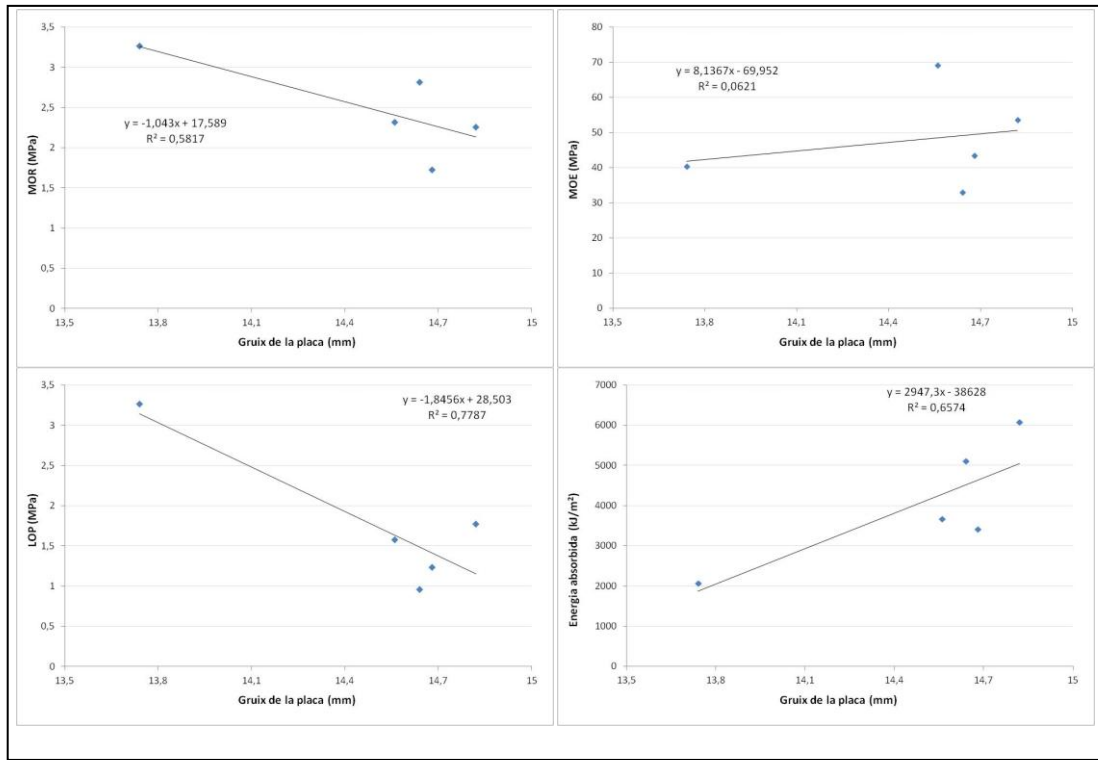


Figura E.12. Corbes de gruix de les plaques 5C-E-T.

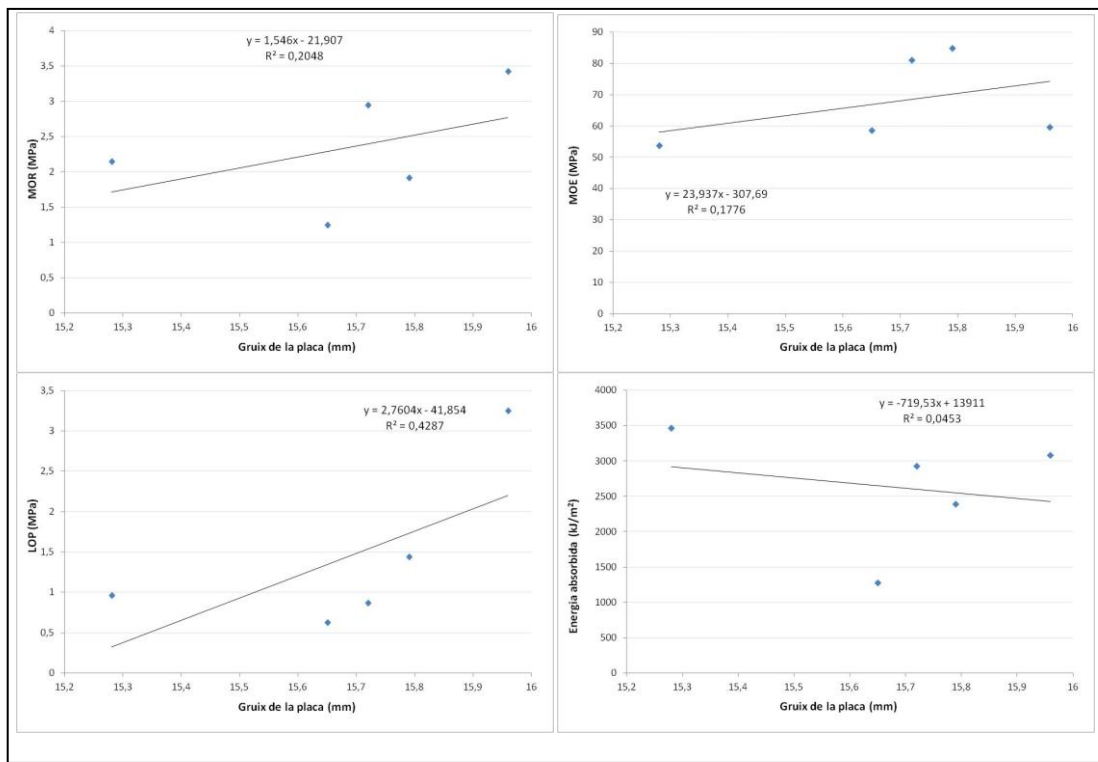


Figura E.13. Corbes de gruix de les plaques 6C-E-T.

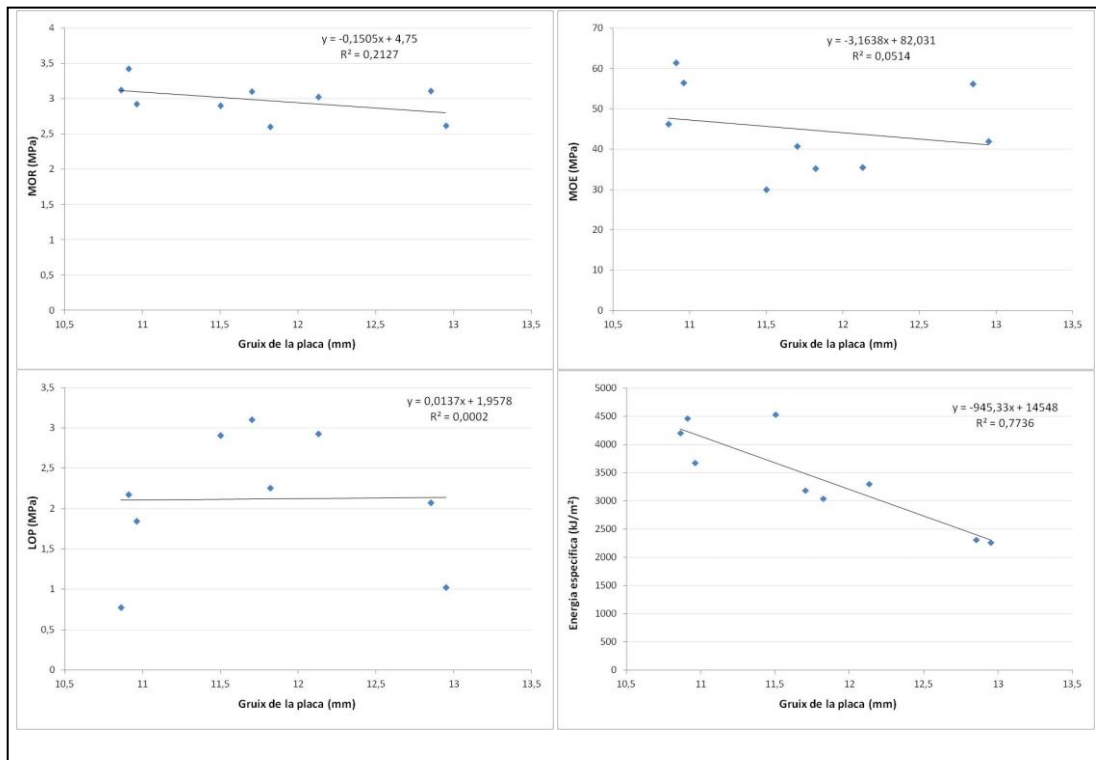


Figura E.14. Corbes de guix de les plaques 4C-H-T.

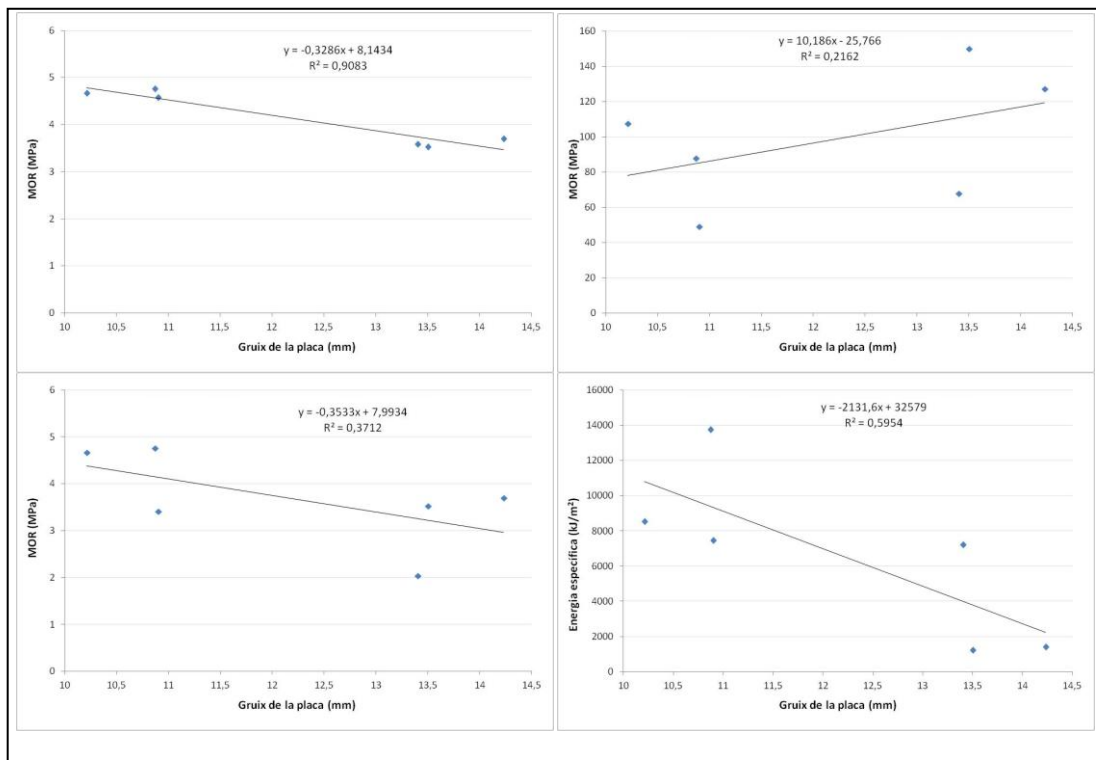


Figura E.15. Corbes de guix de les plaques 5C-H-T.

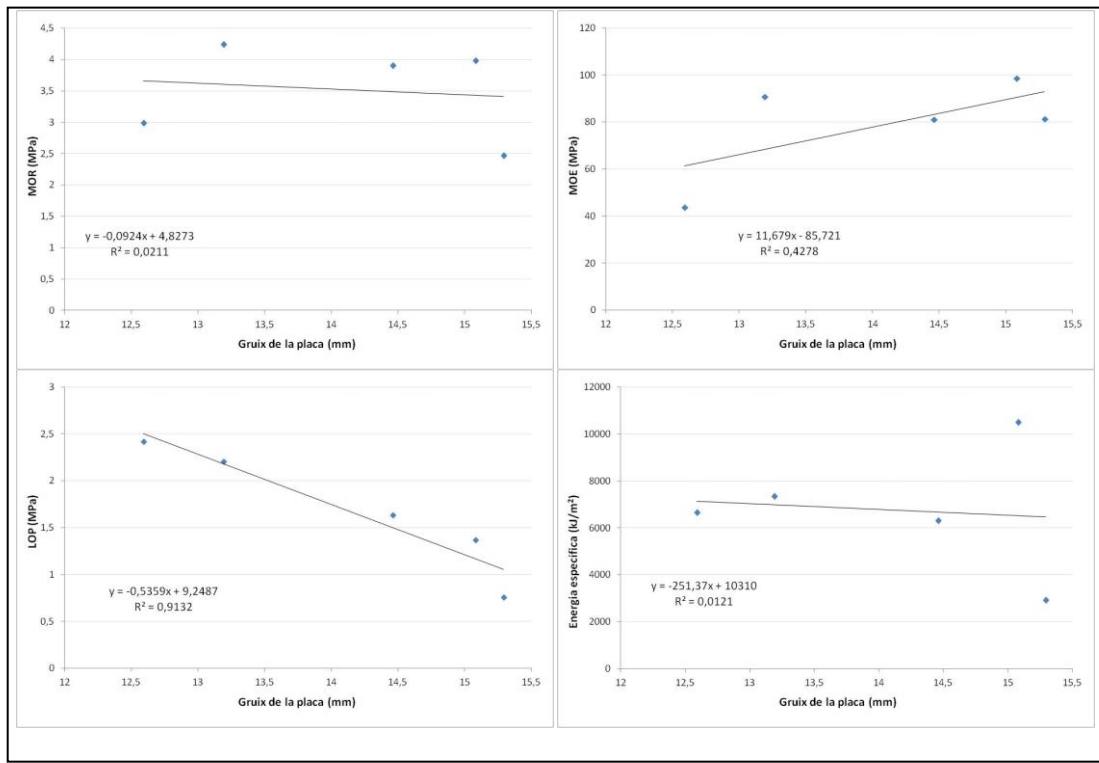


Figura E.16. Corbes de griux de les plaques 6C-H-T.

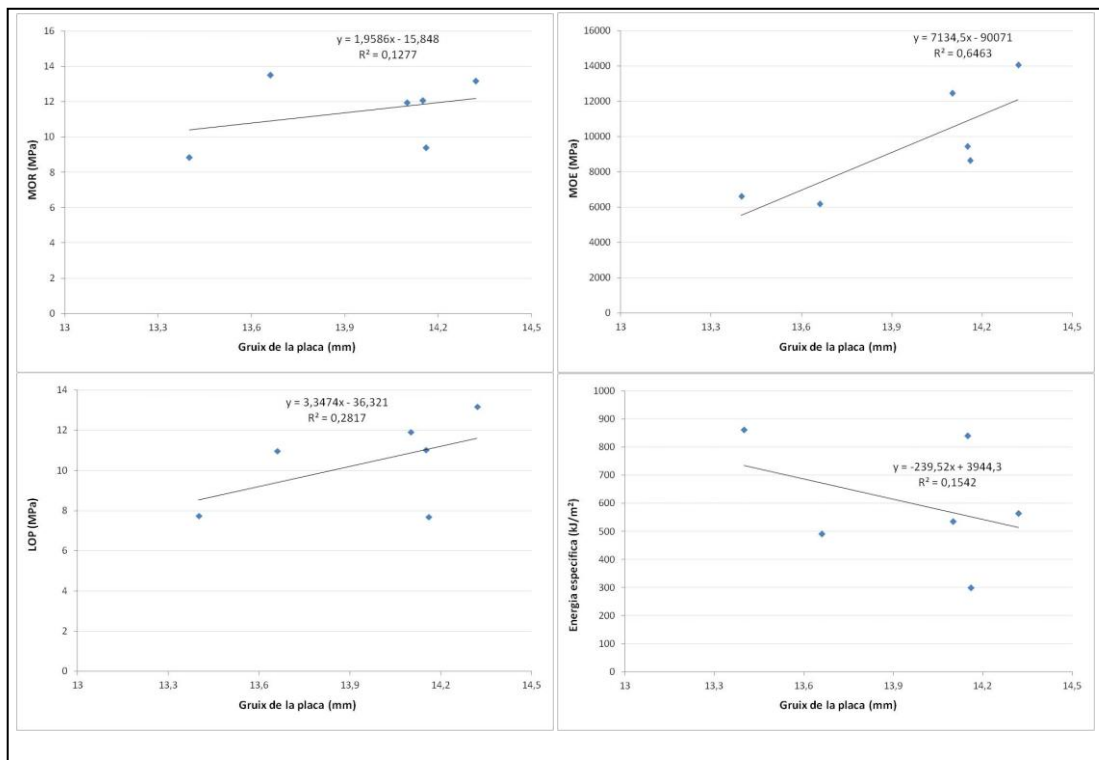


Figura E.17. Corbes de griux de les plaques 5C-C-F.

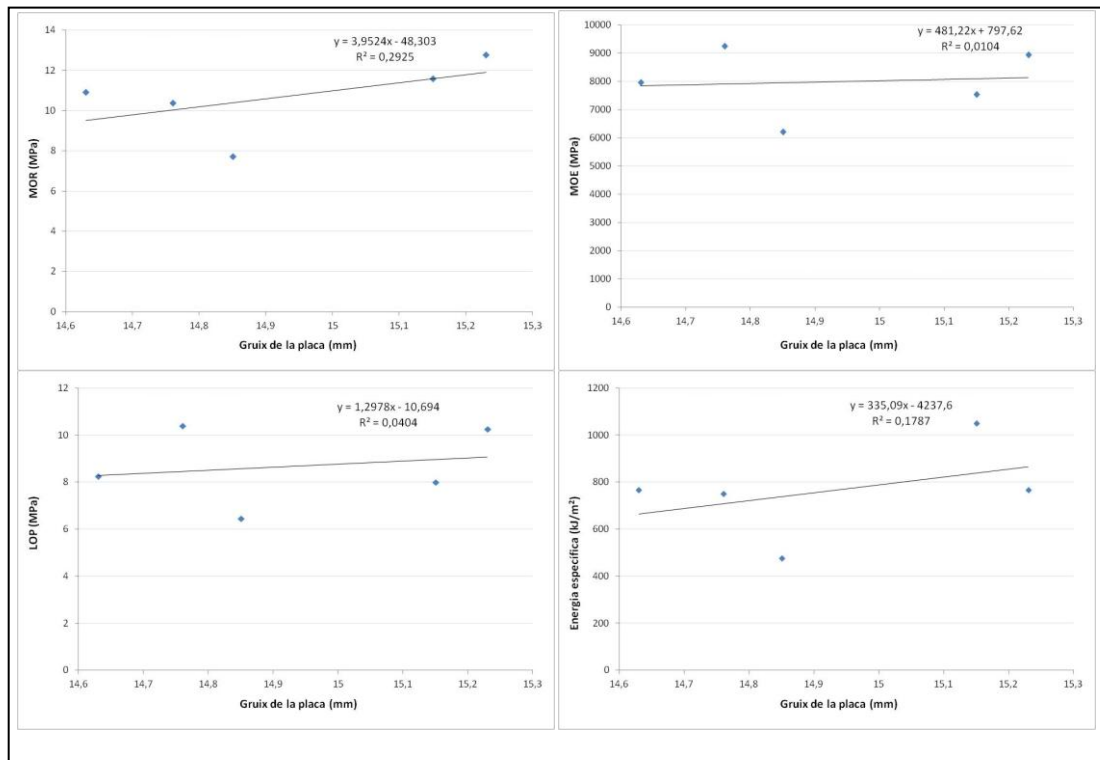


Figura E.18. Corbes de gruix de les plaques 6C-C-F.

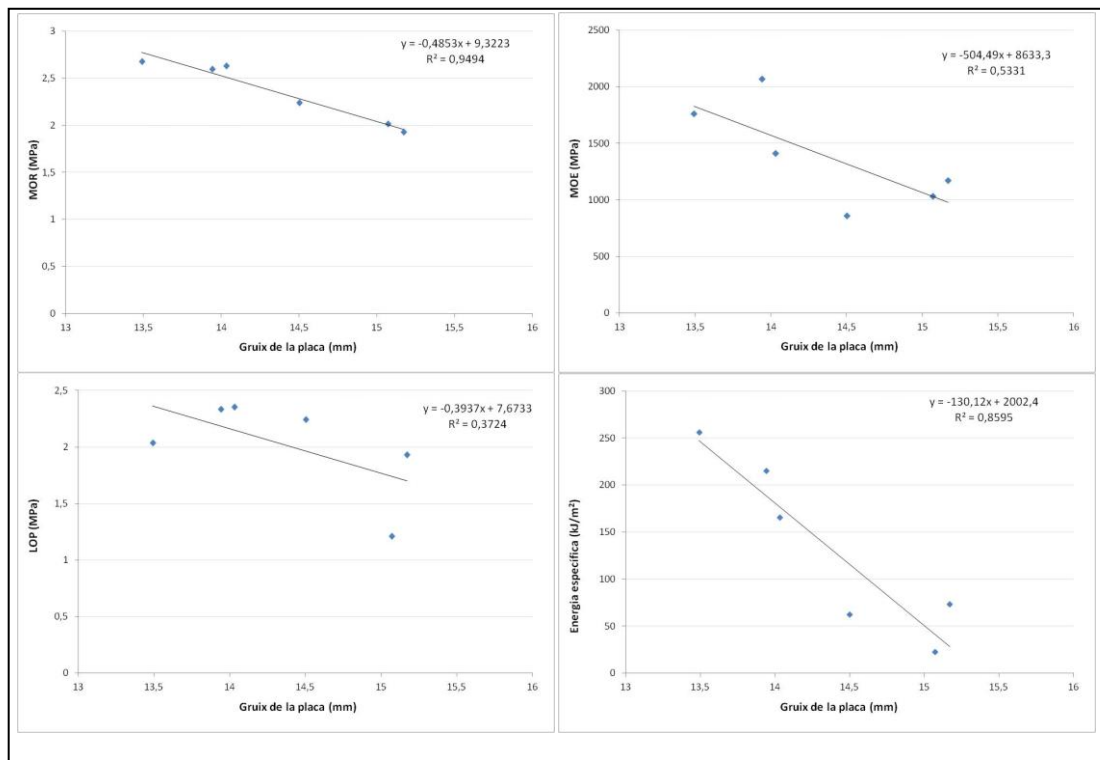


Figura E.19. Corbes de gruix de les plaques 4C-E-F.

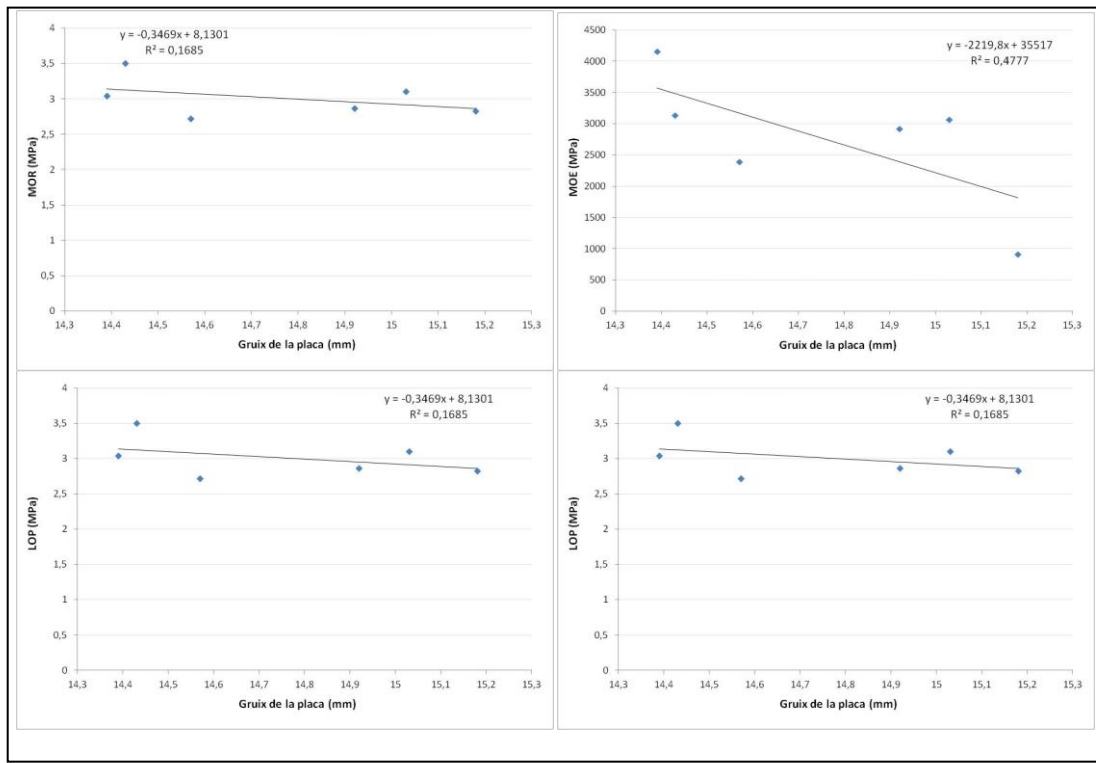


Figura E.20. Corbes de guix de les plaques 5C-E-F.

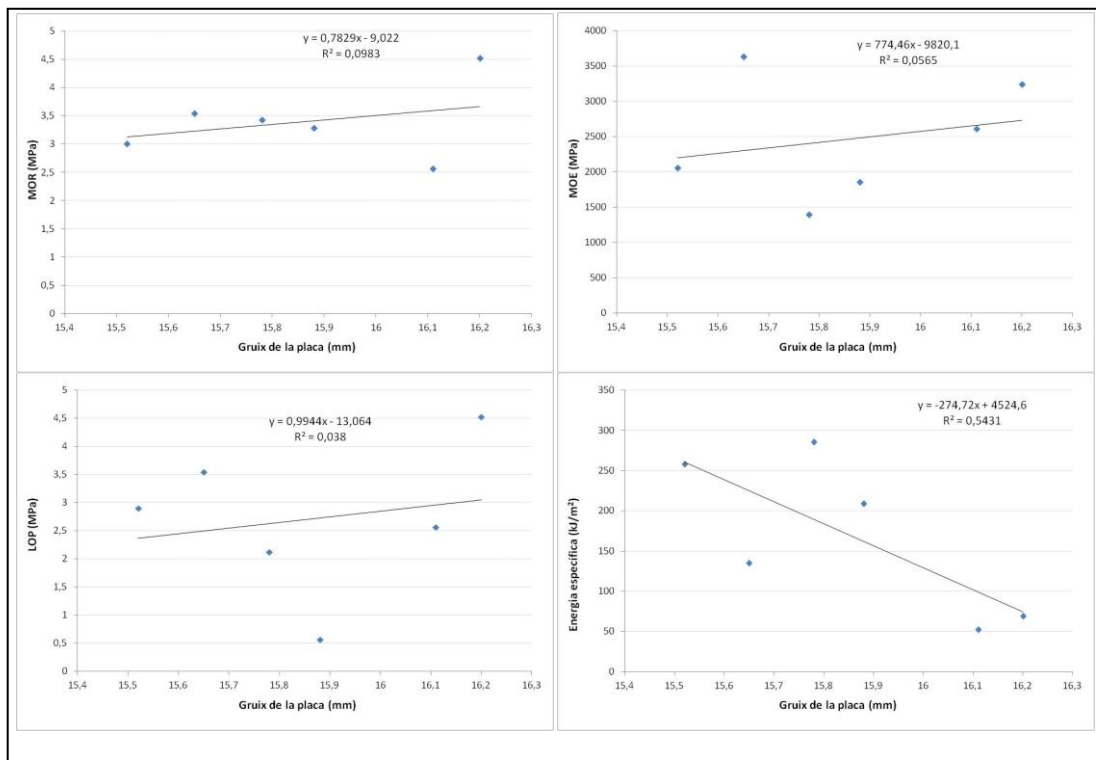


Figura E.21. Corbes de guix de les plaques 6C-E-F.

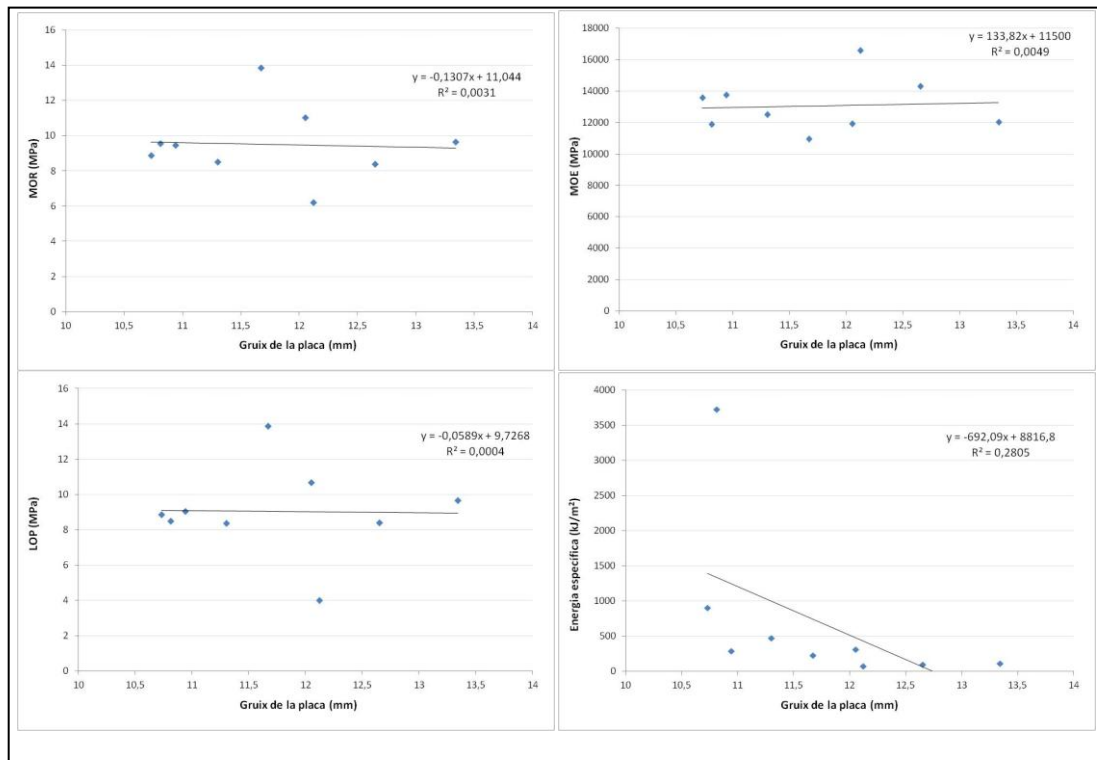


Figura E.22. Corbes de gruix de les plaques 4C-H-F

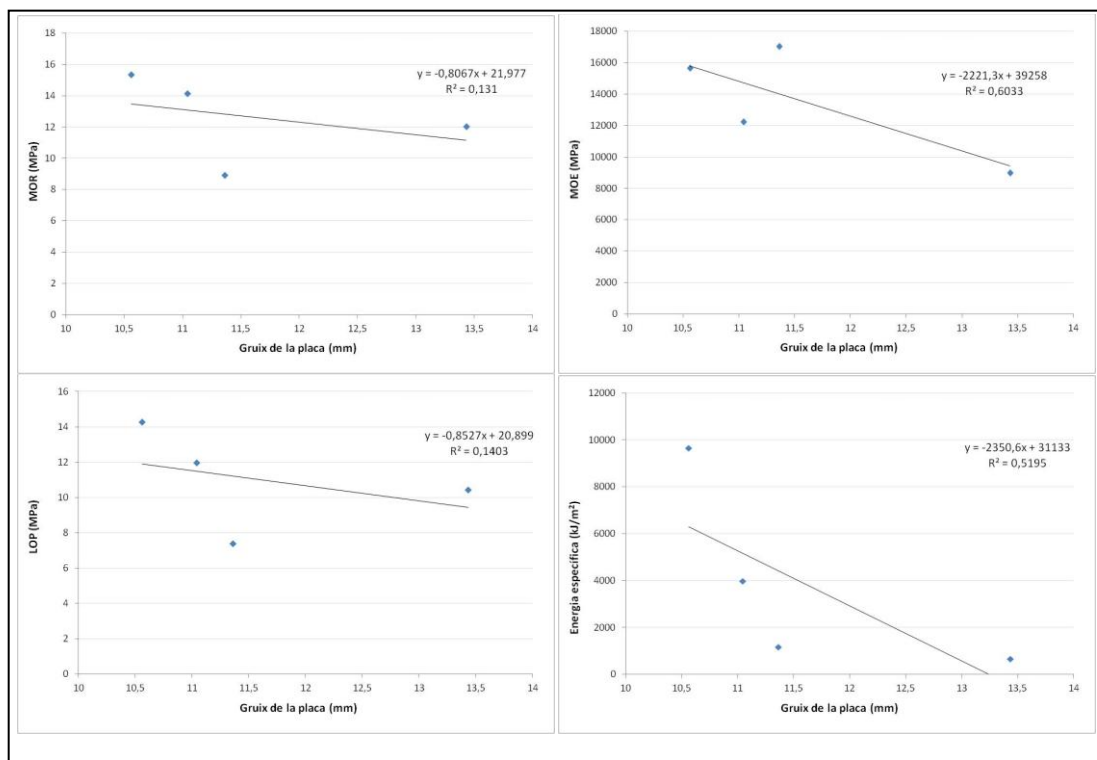


Figura E.23. Corbes de gruix de les plaques 5C-H-F.

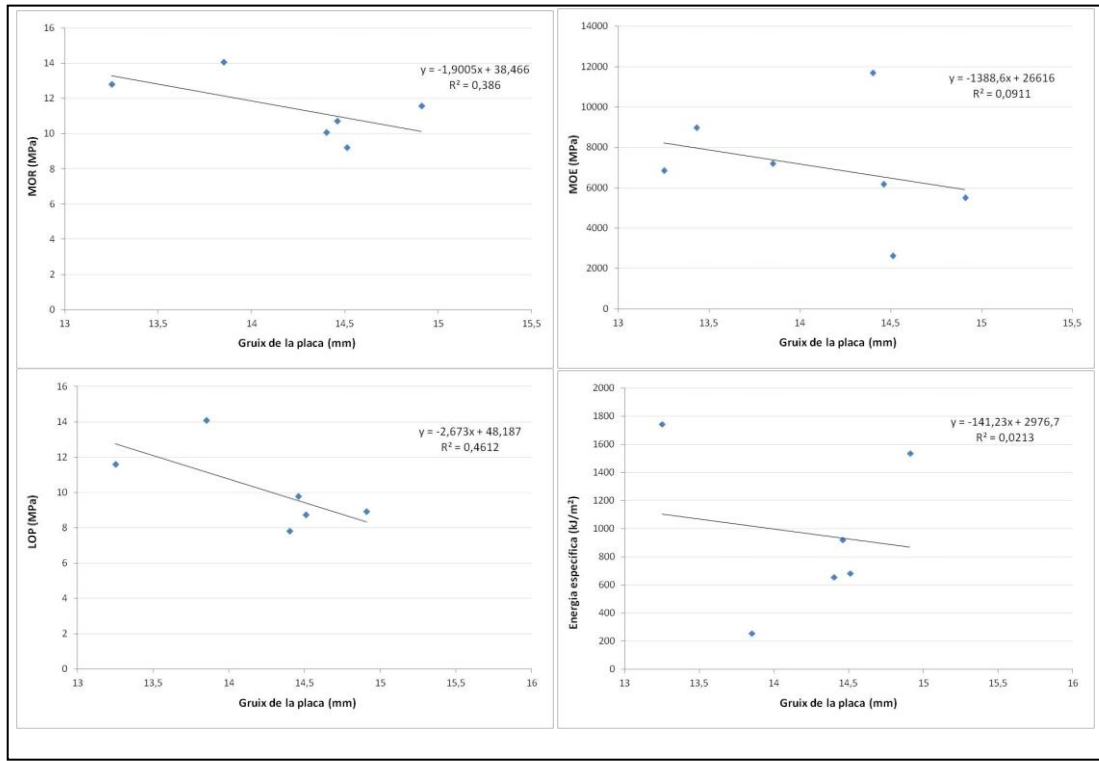


Figura E.24. Corbes de guix de les plaques 6C-H-F.