



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria Agroalimentària  
i de Biosistemes de Barcelona

# **APLICACIONS ESPECIALS DELS MATERIALS COMPOSTOS AMB FIBRES VEGETALS**

Treball final de grau

Enginyeria de Sistemes Biològics

Autora: Gemma Cruz Ortega

Tutor: Josep Claramunt Blanes

Tutora: Heura Ventura Casellas

9/ juny / 2022

## Resum

Actualment, l'impacte de la indústria de la construcció està sent una de les causes originàries de l'esgotament de recursos no renovables a més de la generació de grans quantitats de residus i de les emissions de diòxid de carboni a l'atmosfera. En interès d'una estratègia de construcció més sostenible, als darrers anys s'ha investigat exhaustivament l'ús de fibres vegetals, residus i materials reciclats. Com a una bona opció, les fibres de residus tèxtils juntament amb fibres vegetals es poden utilitzar com a reforç intern en materials amb una matriu de ciment amb la finalitat de millorar la seva ductilitat i la resistència a les esquerdes. No obstant, tots els estudis duts a terme fins ara han estat per a plaques planes, així doncs, també cal analitzar quines són les característiques en peces corbades.

L'objectiu d'aquest treball és definir les característiques mecàniques de peces corbades de ciment reforçades amb no teixits de residu tèxtil i fibres vegetals. A més de determinar la influència del nombre de capes de no teixit i el grau de curvatura en les seves propietats. També s'ha analitzat el comportament del material en simulacions numèriques.

Per arribar a l'objectiu es van elaborar peces amb quatre diàmetres diferents: 9, 16, 20 i 32 cm; i un reforçament amb quatre o sis capes de no teixit. Posteriorment, es van analitzar les seves propietats mecàniques amb un assaig de flexió. D'altra banda, es van comparar les tensions calculades amb les equacions descrites per a plaques planes i els resultats obtinguts amb simulacions numèriques tenint en compte la geometria de les peces.

Els resultats han indicat que les peces de ciment reforçades amb sis capes de no teixit presenten millors propietats mecàniques que les reforçades amb quatre capes. Respecte al grau de curvatura, s'han observat diferències significatives; les peces de diàmetre de 20 cm amb sis capes han donat les tensions més altes d'entre tot el conjunt. Pel que fa a la metodologia de càlcul de les tensions, els resultats en les simulacions són superiors als de les equacions.

## Resumen

Actualmente, el impacto de la industria de la construcción está siendo una de las causas originarias del agotamiento de recursos no renovables además de la generación de grandes cantidades de residuos y de las emisiones de dióxido de carbono en la atmósfera. En interés de una estrategia de construcción más sostenible, en los últimos años se ha investigado exhaustivamente el uso de fibras vegetales, residuos y materiales reciclados. Como una buena opción, las fibras de residuos textiles junto con fibras vegetales se pueden utilizar como refuerzo interno en materiales con una matriz de cemento con el fin de mejorar su ductilidad y resistencia a las fisuras. Sin embargo, todos los estudios llevados a cabo hasta ahora han sido para placas planas, así pues, también es necesario analizar cuáles son las características en piezas curvadas.

El objetivo de este trabajo es definir las características mecánicas de piezas curvadas de cemento reforzadas con no tejidos de residuo textil y fibras vegetales. Además de determinar la influencia del número de capas de no tejido y el grado de curvatura en sus propiedades. También se ha analizado el comportamiento del material en simulaciones numéricas.

Para lograr el objetivo se elaboraron piezas con cuatro diámetros diferentes: 9, 16, 20 y 32 cm; y un reforzamiento con cuatro o seis capas de no tejido. Posteriormente, se analizaron sus propiedades mecánicas con un ensayo de flexión. Por otra parte, se compararon las tensiones calculadas con las ecuaciones descritas para placas planas y los resultados obtenidos con simulaciones numéricas atendiendo a la geometría de las piezas.

Los resultados indicaron que las piezas de cemento reforzadas con seis capas de no tejido presentan mejores propiedades mecánicas que las reforzadas con cuatro capas. Respecto al grado de curvatura, se han observado diferencias significativas; las piezas de diámetro de 20 cm con seis capas han dado las tensiones más altas de entre todo el conjunto. Por lo que respecta a la metodología de cálculo de las tensiones, los resultados en las simulaciones son superiores a los de las ecuaciones.

## Abstract

Currently, the construction industry's impact is one of the causes of the exhaustion of non-renewable resources as well as the generation of large amounts of waste and carbon dioxide emissions into the atmosphere. For the sake of a more sustainable construction strategy, the usage of vegetal fibres, waste and recycled materials has been extensively researched in the recent years. As a good option, textile waste fibres along with vegetal fibres can be used as internal reinforcement in materials with a cementitious matrix to improve their ductility and crack resistance. However, all studies carried out so far have been for flat plates, so it is necessary to analyse the characteristics of curved pieces.

The aim of this work is to define the mechanical characteristics of curved concrete pieces reinforced with textile waste nonwovens and vegetal fibres. Moreover, it also aims to determine the influence of the number of nonwoven layers as well as the degree of curvature on their properties. The behaviour of the material has also been analysed in numerical simulations.

In order to reach the objective, there were prepared composites with four different diameters: 9, 16, 20 and 32 cm; and reinforced with four or six layers of non-woven. Subsequently, their mechanical properties were analysed with a bending test. On the other hand, stresses values were compared depending if they were calculated with the equations described for flat plates or with numerical simulations according to their geometry.

The results indicated that concrete pieces reinforced with six nonwoven layers have better mechanical properties than those reinforced with four layers. Significant differences were observed in relation to the degree of curvature; the pieces with a diameter of 20 cm with six layers gave the highest stresses among all the pieces. Regarding the methodology of stress calculation, the results of the simulations were superior to those of the equations.

## Sumari

<b>ÍNDIX DE FIGURES</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDIX DE TAULES</b>	<b>9</b>
<b>SÍMBOLS I ACRÒNIMS</b>	<b>12</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>13</b>
<b>1. INTRODUCCIÓ</b>	<b>14</b>
1.1. L'impacte de la indústria de la construcció.....	14
1.2. La petjada de carboni del ciment.....	15
1.3. Els materials compostos amb matèries primeres reciclades: una possible solució.....	17
1.3.1. La sostenibilitat .....	17
1.3.2. Els materials compostos.....	17
1.3.3. Els residus tèxtils .....	18
1.4. Prestacions del fibrociment amb residus tèxtils i fibres vegetals.....	19
1.4.1. Plaques planes.....	19
1.5. Models corbats.....	19
<b>2. OBJECTIUS</b>	<b>21</b>
<b>3. DISSENY EXPERIMENTAL</b>	<b>22</b>
<b>4. MATERIALS I MÈTODES</b>	<b>23</b>
4.1. Materials.....	23
4.1.1. Matriu.....	23
4.1.2. Fibres .....	24
4.1.2.1. Residu tèxtil.....	24
4.1.2.2. Lli.....	24
4.2. Mètodes .....	25
4.2.1. Elaboració dels no teixits.....	25
4.2.2.1. Caracterització del no teixit .....	27
4.2.2. Elaboració del material compost .....	28
4.2.3. Assaig de les peces .....	32
4.2.4. Simulacions.....	36

4.2.4.1. WinEva.....	36
4.2.5. Observacions del trencament de les provetes .....	39
<b>5. RESULTATS</b> .....	<b>40</b>
5.1. Caracterització dels no teixits .....	40
5.2. Caracterització de les peces .....	41
5.2.1. Flexió.....	41
5.2.2. Comparació de la deformació entre el model i l'assaig.....	47
5.2.3. Moments i tensions de les simulacions .....	48
5.2.4. Comparativa de càlcul de les tensions màximes .....	51
5.2.5. Observacions del trencament de les peces .....	52
5.2.6. Observacions amb la lupa .....	61
<b>6. DISCUSSIÓ</b> .....	<b>63</b>
6.1. No teixit .....	63
6.2. Caracterització de les propietats mecàniques de les peces .....	64
6.3. Simulacions.....	65
<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>66</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>68</b>
Referències bibliogràfiques .....	68
<b>ANNEXOS</b> .....	<b>75</b>
Annex A. Relació aigua-ciment de les peces .....	75
Annex B. Croquis dels rodets .....	77
Annex C. Corbes de tensió-deformació .....	78
Annex D. Resultats de les posicions de la simulació vs assaig.....	82

## Índex de figures

<b>Figura 1-1</b> Emissions mundials de CO <sub>2</sub> de la indústria de la construcció a l'any 2021. Font: Architecture 2030	14
<b>Figura 1-2</b> Model d'economia circular en el sector de la producció de ciment. Font: <i>Carbon Dioxide Uptake by Cement-Based Materials: A Spanish Case Study</i>	16
<b>Figura 1-3</b> Museu Guggenheim (Bilbao). Font: Pròpia	20
<b>Figura 1-4</b> MACBA. Font: Pròpia	20
<b>Figura 1-5</b> <i>Sponeck Chair</i> . Font: Pròpia	20
<b>Figura 4-1</b> (a) Residu tèxtil i visita en lupa (50x); (b) Fibra de lli i vista en lupa (50x). Font: Pròpia	24
<b>Figura 4-2</b> Procés de cardat: (a) Pesat de les fibres; (b) Introducció de les fibres a la cinta d'alimentació de la carda; (c) Cardat de les tres capes per uniformitzar i barrejar les fibres; (d) Napa finalitzada amb la barreja uniforme de fibra curta i llarga. Font: Pròpia	25
<b>Figura 4-3</b> Procés de punxonat: (a) Napes entrant a la punxonadora; (b) Sortida de la napa de la màquina; (c) Napa punxonada completament consolidades. Font: Pròpia	26
<b>Figura 4-4</b> Provetes per a la caracterització. Font: Pròpia	27
<b>Figura 4-5</b> Micròmetre tèxtil; Assaig amb el dinamòmetre (d'esquerra a dreta). Font: Pròpia	28
<b>Figura 4-6</b> Esquemes desglossats de les capes de les peces. Font: Pròpia	29
<b>Figura 4-7</b> Elaboració del material compost: (a) Procés de preparació de la matriu; (b) Introducció de la primera capa de ciment al motlle; (c) Impregnació de ciment al no teixit; (d) Buit de la peça al motlle; (e) Compressió de la peça a la premsa; (f) Placa final. Font: Pròpia	30
<b>Figura 4-8</b> Diàmetres: (a) 16 cm; (b) 20 cm; (b) 9 cm; (d) 32 cm. Font: Pròpia	31
<b>Figura 4-9</b> Procés de curat: (a) Armari de curat; (b) Immersió. Font: Pròpia	32

<b>Figura 4-10</b> La serra amb una placa; Tres provetes acabades de tallar (d'esquerra a dreta). Font: Pròpia	33
<b>Figura 4-11</b> Esquema de flexió a 4 punts.	33
<b>Figura 4-12</b> Sistema d'assaig de flexió: Imatge general de la proveta a la premsa amb la guia i els rodets; Detall dels rodets. (D'esquerra a dreta). Font: Pròpia	34
<b>Figura 4-13</b> Corbes de tensió-deformació típiques de compostos de ciment de cel·lulosa. També s'indica el MOR, el LOP, MOE i SE. Font: <i>Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: a review of recent</i> (Modificat)	35
<b>Figura 4-14</b> Estructura geomètrica dibuixada a l'AutoCAD. Font: Pròpia	37
<b>Figura 4-15</b> Pestanya d'accions de l'estructura al WinEva. Font: Pròpia	37
<b>Figura 4-16</b> 4-Vistes dels resultats del càlcul de l'acció sobre els nusos de l'estructura. Font: Pròpia	38
<b>Figura 4-17</b> Lupa amb una proveta trencada (20x). Font: Pròpia	39
<b>Figura 5-1</b> Corbes representatives per a les peces pels assaigs de flexió.	42
<b>Figura 5-2</b> Mitjanes obtingudes per a les peces pels assaigs de flexió de diàmetre 9 cm. Les línies d'error indiquen les desviacions estàndards del grup.	43
<b>Figura 5-3</b> Mitjanes obtingudes per a les peces pels assaigs de flexió de diàmetre 16 cm. Les línies d'error indiquen les desviacions estàndards del grup.	44
<b>Figura 5-4</b> Mitjanes obtingudes per a les peces pels assaigs de flexió de diàmetre 20 cm. Les línies d'error indiquen les desviacions estàndards del grup.	45
<b>Figura 5-5</b> Mitjanes obtingudes per a les peces pels assaigs de flexió de diàmetre 32 cm. Les línies d'error indiquen les desviacions estàndards del grup.	46
<b>Figura 5-6</b> Relació entre els resultats de posició a l'assaig i a la simulació.	48



<b>Figura 5-7</b> Mitjanes de tensió obtingudes per a les provetes segons el seu diàmetre. Les línies d'error a les barres mostren la desviació estàndard del grup. _____	50
<b>Figura 5-8</b> Mitjanes de les tensions màximes obtingudes amb l'equació de la configuració de quatre punts i les simulacions al WinEva. Les línies d'error indiquen les desviacions estàndards del grup. _____	51
<b>Figura 5-9</b> Morfologia de trencament per la part inferior de la placa: (a) Trencament de la primera capa de ciment (20x); (b) Primer trencament profund de fibres (20x); (c) Trencament de ciment i de fibres (20x). Font: Pròpia _____	61
<b>Figura 5-10</b> Estirament de les fibres de lli (20x). Font: Pròpia _____	61
<b>Figura 5-11</b> Trencaments de la part superior de les peces (20x). Font: Pròpia _____	62
<b>Figura 5-12</b> Buits d'aire entre les capes de no teixit i ciment: (a) 20x; (b) 50x. Font: Pròpia _____	62
<b>Figura 6-1</b> Transparència del no teixit. Font: Pròpia _____	63
<b>Figura B-1</b> Croquis dels rodets utilitzats a l'assaig de flexió. Font: Josep Claramunt _____	77
<b>Figura C-1</b> Corbes tensió-deformació de les peces de diàmetre de 9 cm. _____	78
<b>Figura C-2</b> Corbes tensió-deformació de les peces de diàmetre de 16 cm. _____	79
<b>Figura C-3</b> Corbes tensió-deformació de les peces de diàmetre de 20 cm. _____	80
<b>Figura C-4</b> Corbes tensió-deformació de les peces de diàmetre de 32 cm. _____	81

## Índex de taules

<b>Taula 3-1</b> Nomenclatura utilitzada per a designar les peces elaborades. _____	22
<b>Taula 4-1</b> Característiques del ciment Pòrtland Tipus I 52,5 R. Font: Cementos Molins _____	23
<b>Taula 4-2</b> Condicions del punxonat. Font: Guia ESEIAAT _____	26
<b>Taula 4-3</b> Paràmetres d'entrada de la configuració de l'assaig de tracció. _____	28
<b>Taula 5-1</b> Caracterització del no teixit. _____	41
<b>Taula 5-2</b> Resultats obtinguts de l'ANOVA i la comparativa amb el test de Tukey per a les peces de D=9 cm. Les mitjanes que no tenen la mateixa lletra són significativament diferents. ____	43
<b>Taula 5-3</b> Resultats obtinguts de l'ANOVA i la comparativa amb el test de Tukey per a les peces de D=16 cm. Les mitjanes que no tenen la mateixa lletra són significativament diferents. ____	44
<b>Taula 5-4</b> Resultats obtinguts de l'ANOVA i la comparativa amb el test de Tukey per a les peces de D=20 cm. Les mitjanes que no tenen la mateixa lletra són significativament diferents. ____	46
<b>Taula 5-5</b> Resultats obtinguts de l'ANOVA i la comparativa amb el test de Tukey per a les peces de D=32 cm. Les mitjanes que no tenen la mateixa lletra són significativament diferents. ____	47
<b>Taula 5-6</b> Moments i tensions màximes de les provetes. _____	49
<b>Taula 5-7</b> Resultats obtinguts de l'ANOVA i la comparativa amb el test de Tukey entre les peces de quatre capes i entre les peces de sis capes. Les mitjanes que no tenen la mateixa lletra són significativament diferents. _____	50
<b>Taula 5-8</b> Valors de tensió màxima obtingudes amb l'equació de la configuració de quatre punts i en les simulacions. Les mitjanes que no tenen la mateixa lletra són significativament diferents. _____	52
<b>Taula 5-9</b> Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 4C-9-A i 4C-9-B. _____	53
<b>Taula 5-10</b> Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 6C-9-C i 6C-9-D _____	53

---

<b>Taula 5-11</b>	Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 4C-16-A i 4C-16-B	_____	53
<b>Taula 5-12</b>	Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 6C-16-C i 6C-16-D	_____	53
<b>Taula 5-13</b>	Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 4C-20-A i 4C-20-B	_____	53
<b>Taula 5-14</b>	Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 6C-20-C i 6C-20-D	_____	53
<b>Taula 5-15</b>	Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 4C-32-A i 4C-32-B	_____	53
<b>Taula 5-16</b>	Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 6C-32-C i 6C-32-D	_____	60
<b>Taula A-1</b>	Relació aigua-ciment durant l'elaboració de les peces.	_____	75
<b>Taula A-2</b>	Relació aigua-ciment final de les peces.	_____	76
<b>Taula D-1</b>	El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 4C-9-A i 4C-9-B.	_____	82
<b>Taula D-2</b>	El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 6C-9-C i 6C-9-D.	_____	83
<b>Taula D-3</b>	El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 4C-16-A i 4C-16-B.	_____	84
<b>Taula D-4</b>	El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 6C-16-C i 6C-16-D.	_____	85
<b>Taula D-5</b>	El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 4C-20-A i 4C-20-B.	_____	86
<b>Taula D-6</b>	El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 6C-20-C i 6C-20-D.	_____	87
<b>Taula D-7</b>	El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 4C-32-A i 4C-32-B.	_____	88

**Taula D-8** El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 6C-32-C i 6C-32-D. \_\_\_\_\_ 89

## Símbols i acrònims

4C: Peces amb quatre capes de no teixit

6C: Peces amb sis capes de no teixit

CO<sub>2</sub>: Diòxid de carboni

D: Diàmetre

DXF: *Drawing Exchange Format*

EEABB: Escola d'Enginyeria Agroalimentària i de Biosistemes de Barcelona

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

ETSAV: Escola Tècnica Superior d'Arquitectura del Vallès

GEH: Gasos d'efecte hivernacle

HR: Humitat relativa

LCA: *Life Cycle Analysis*

LOP: Límit de proporcionalitat

MOE: Mòdul d'elasticitat

MOR: Mòdul de ruptura

PVC: Clorur de polivinil

R<sup>2</sup>: Coeficient de determinació

RAC: *Recycled Aggregate Concrete*

RILEM: *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux*

SAET-CEM: Secció d'Àmbit Enginyeria Tèxtil – Departament de Ciència i Enginyeria dels Materials

SD: Desviació estàndard

SE: Energia específica

TRM: *Textile Reinforced Mortar*

TW: *Textile Waste*

## Agraïments

Primer de tot, m'agradaria donar les gràcies als meus tutors del treball, per creure en aquest estudi i en mi des del primer dia. A en Josep Claramunt per tota l'ajuda i el suport que m'ha proporcionat. També li agraeixo totes les hores dedicades al laboratori (i fora), l'orientació proporcionada i el seu optimisme durant el procés de l'estudi. A l'Heura Ventura que des d'un inici aventurar-nos en un treball dins del món dels materials i per tota l'ajuda als laboratoris de Terrassa, fent-me sentir una més de l'equip.

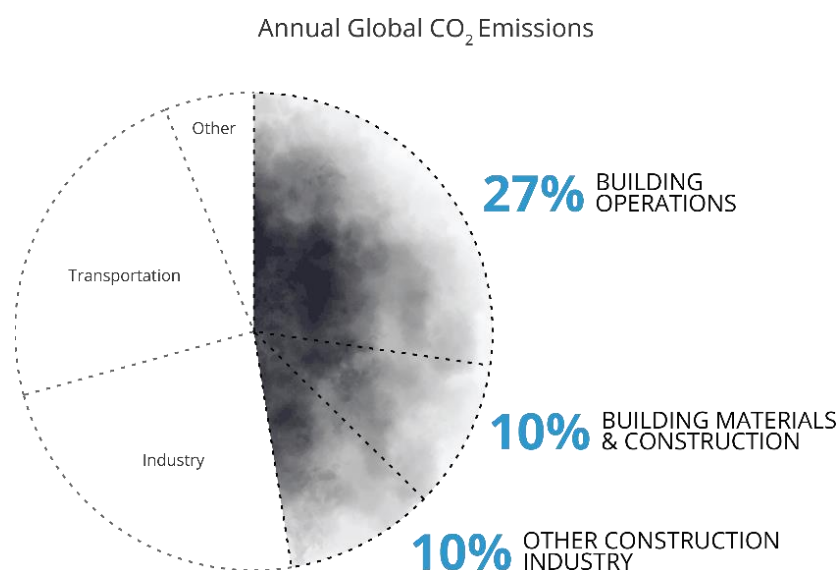
També m'agradaria agrair als meus pares i a la meva germana, ja que són els que m'han donat ànims des d'un principi, els que han tingut la paciència d'escoltar-me parlar cada dia de peces de ciment i de simulacions a l'ordinador. Especialment, també vull donar les gràcies als meus amics per la seva preocupació i interès davant un tema que majoritàriament només comprenien que sempre acabava bruta de ciment.

# 1. Introducció

## 1.1. L'impacte de la indústria de la construcció

La indústria de la construcció juntament amb les indústries dels materials de construcció són uns dels majors sectors explotadors de recursos naturals, tant minerals com biològics. Les seves activitats contribueixen a les alteracions del medi natural i a l'emissió de GEH a l'atmosfera<sup>[1]</sup>. Aquesta indústria genera gairebé el 50% de les emissions anuals de CO<sub>2</sub> mundials<sup>[2]</sup>. D'aquestes, les operacions de construcció representen el 27%, mentre que els materials i la construcció (referenciat com a *embodied carbon*) són responsables d'un 20% (**Figura 1-1**).

*Embodied carbon* (terme en anglès) és el diòxid de carboni associat als materials i processos de construcció al llarg de tot el cicle de vida d'una infraestructura. En conjunt, és la petjada de carboni d'un edifici; des de l'extracció de la matèria primera, la manufactura, el transport, el posterior enderrocament i el transport de residus i reciclatge<sup>[3]</sup>.



© Architecture 2030. All Rights Reserved.  
Data Sources: Global ABC Global Status Report 2021, EIA

**Figura 1-1** Emissions mundials de CO<sub>2</sub> de la indústria de la construcció a l'any 2021. Font: Architecture 2030

Des de la signatura de l'Acord de París l'any 2015, els nivells d'emissions de CO<sub>2</sub> causats per aquest sector no han assolit un descens notable fins al 2020 (10-25% comparat amb el 2019), principalment per la reducció de la demanda energètica a causa de la pandèmia de la COVID-19<sup>[4]</sup>.

D'altra banda, la Comissió Europa té el propòsit de reduir les emissions de diòxid de carboni fins a un 90% l'any 2050<sup>[5]</sup>. Per a aconseguir aquests objectius ambientals, s'ha plantejat dur a terme avaluacions del cicle de vida dels edificis (LCA)<sup>[6]</sup>, tant des de la perspectiva dels materials utilitzats com de l'ús de l'edifici; per exemple, el consum energètic<sup>[7]</sup>.

Per aquest fet, s'ha plantejat que les noves infraestructures han d'estar dissenyades de forma que el seu requeriment energètic sigui baix, que l'extracció de la matèria primera de construcció tingui el menor impacte possible i intentar prioritzar utilitzar combustibles de baix carboni (p. ex. energia eòlica, solar, hidràulica, etc.)<sup>[4]</sup>.

A més a més, la indústria de la construcció representa aproximadament el 50% de la demanda mundial de ciment i el 30% d'acer<sup>[8]</sup>. Aquests dos materials conjuntament amb l'alumini són els responsables del 23% de les emissions de carboni globals totals<sup>[2]</sup>. És per això que és important trobar alternatives de materials més sostenibles i reciclats, on es pugui substituir l'ús de materials primeres i reduir el consum d'energia, la contaminació, l'eliminació de residus i l'escalfament global<sup>[9]</sup>.

## 1.2. La petjada de carboni del ciment

Com s'ha esmentat abans, el ciment és el material més utilitzat a la construcció. Es tracta d'un material conglomerat hidràulic (descriu en la norma UNE-EN 197-1:2011) compost principalment per clínquer, en alguns casos pot contenir addicions (p. ex. sulfat de calci, fum de sílice, pedra calcària, etc.) i també additius per a millorar les seves prestacions. El ciment representa aproximadament el 10-15% de la composició del formigó (ciment+sorra+grava) i el 25-30% en el cas dels morters (ciment+aigua+sorra).

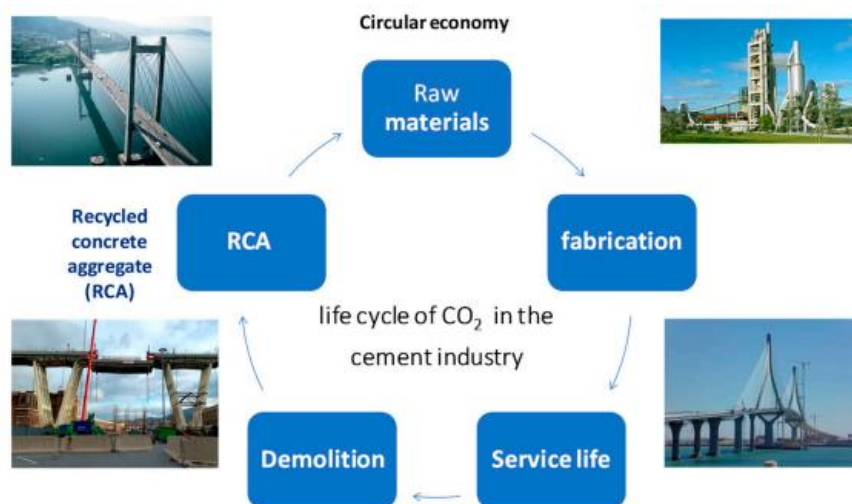
La versatilitat del ciment com a material de construcció radica en la seva alta resistència a la compressió, el baix cost de manteniment i l'alta resistència a la intempèrie. A més, és més econòmic que altres materials com l'acer i té un bon rendiment estructural<sup>[9]</sup>.



Tot i que els fabricants redueixen les emissions de CO<sub>2</sub> gràcies a nous processos de fabricació, l'augment del consum mundial d'aquest material l'ha convertit en un dels principals culpables de la petjada de carboni.

La indústria cimentera representa almenys un 8% de l'impacte global d'emissions<sup>[10]</sup>. La producció d'una tona de ciment genera aproximadament una tona de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera<sup>[11]</sup>, on aquest diòxid de carboni prové del resultat de la reacció química de síntesi del clínquer (principalment carbonats descomposts en monòxid de carboni i diòxid de carboni) i de la combustió dels combustibles fòssils per a escalfar els materials fins a més de 1.400 °C<sup>[10]</sup>.

Tot i això, avui en dia, existeixen alternatives a l'ús del ciment al formigó, però encara són en els primers estadis de desenvolupament i aplicació industrial. Per exemple, s'ha vist que compostos amb àrid reciclat - RAC (*Recycled Aggregate Concrete*) ofereixen l'oportunitat de disminuir els residus de construcció i demolició, basant-se així en un model d'economia circular (**Figura 1-2**). Tot i que els estudis realitzats exposen que les propietats mecàniques del RAC solen ser inferiors a les del formigó amb àrids naturals, s'han plantejat diferents solucions per a mitigar aquests resultats; com per exemple: reduir la porositat del residu, eliminar la capa de morter antic o millorar les propietats del material afegint fibres de reforç<sup>[12]</sup>.



**Figura 1-2** Model d'economia circular en el sector de la producció de ciment.

Font: *Carbon Dioxide Uptake by Cement-Based Materials: A Spanish Case Study*

## 1.3. Els materials compostos amb matèries primeres reciclades: una possible solució

### 1.3.1. La sostenibilitat

Els materials sostenibles són un recurs potencial per a mitigar l'impacte sobre el medi ambient i aportar beneficis socials i ambientals. Cal tenir en compte que seleccionar un bon material per a les prestacions desitjades és molt important perquè pot influir en el rendiment de l'edifici i l'assoliment dels objectius de sostenibilitat<sup>[6]</sup>.

En aquest sentit, els materials reforçats amb fibres com poden ser els morters de ciment reforçats amb fibra tèxtil o *Textile Reinforced Mortars* (TRM) han despertat un gran interès<sup>[13]</sup>. Aquests tipus de materials compostos ofereixen diferents qualitats sostenibles, ja que són potencials per a fabricar components amb una menor quantitat de material, tenen una vida útil més llarga que la del formigó convencional i allarguen la vida útil d'estructures ja existents que estan deteriorades o necessiten suportar càrregues estàtiques i dinàmiques més elevades<sup>[14]</sup>.

### 1.3.2. Els materials compostos

Els materials compostos són la barreja de dos o més materials que conjuguen les seves propietats per a obtenir un nou material amb unes característiques molt diferents de les dels materials d'origen. Aquests, estan formats per una matriu que pot ser *metàl·lica, polimèrica o pètria*, conjuntament amb un reforç que poden ser *fibres minerals*; metàl·liques com l'acer o no metàl·liques com l'amiant, o *fibres orgàniques*; naturals com la fusta i el lli o artificials com el polièster, la cel·lulosa o l'aramida.

En el cas concret dels TRM, el seu reforç pot estar compost per diversos materials com fibres curtes, llargues, teixits o no teixits dins d'una matriu de ciment que pot ser en forma de pasta, aglutinant de calç, morter o formigó<sup>[13]</sup>.

La funció principal del reforç és fer de pont en les esquerdes generades pels esforços i per a millorar la resistència, la capacitat d'absorció d'energia i el comportament de trencament de la matriu<sup>[15]</sup>.

Mentre que el paper de la matriu és transferir les tensions provocades per les accions externes a les fibres, fixar el reforç i protegir les fibres d'agressions externes.

Cal destacar que l'elecció d'una forma o una altra de fibres dins de la matriu implica diferències en el procés de fabricació, en les propietats mecàniques del material final i en la dispersió de la fibra en la matriu.

### **1.3.3. Els residus tèxtils**

Actualment, la indústria de la moda és una de les indústries més contaminants i el seu impacte s'ha vist augmentat a causa del patró de consum de la moda ràpida (*fast fashion*).

Concretament, aquesta indústria és responsable del 10% de les emissions mundials de carboni i segons l'Agència Europea del Medi Ambient, a la Unió Europea l'any 2017 les compres tèxtils van generar 645 kg de CO<sub>2</sub> per persona<sup>[16]</sup>. Però no únicament té un impacte en la generació de GEH, la producció de roba també requereix quantitats considerables d'aigua dolça<sup>[17]</sup> i s'estima que és la responsable d'aproximadament el 20% de la contaminació mundial<sup>[16]</sup> de l'aigua a més de l'alliberació d'aproximada de 0,5 milions de tones de microfibres a l'oceà per any<sup>[18]</sup>.

A més, a Europa i a Amèrica s'eliminen més de 10 milions de tones de productes tèxtils a abocadors mentre a la Xina és el doble<sup>[19]</sup>. Els residus tèxtils (TW) es distingeixen com a pre-consum, on s'inclouen romanents i restes de fibres, fils i teixits generats durant la producció de la roba, i com a post-consum, que es refereix principalment a les peces de roba descartades pels consumidors<sup>[20]</sup>.

Una alternativa per a disminuir la quantitat de residus tèxtils és la utilització de la fracció de fibra per a reforç en els materials compostos.

## 1.4. Prestacions del fibrociment amb residus tèxtils i fibres vegetals

### 1.4.1. Plaques planes

Segons la revisió bibliogràfica realitzada <sup>[13] [29] [30]</sup>, totes les investigacions dutes a terme sobre aquest tipus de material ha estat en forma de plaques planes. Això, ha limitat la possibilitat de poder observar moltes altres aplicacions del material, un cop ja s'ha estudiat el comportament de la fibra dins del ciment. Per exemple, la fabricació de plaques corbades pot oferir noves possibilitats d'aplicació, des de la construcció de mobiliari urbà, a façanes o dissenys arquitectònics.

No obstant, afegir un grau de curvatura en plaques que sempre s'han fet planes planteja la dificultat d'haver de desenvolupar noves metodologies de preparació i assaigs en un material que mai s'havia estudiat així.

## 1.5. Models corbats

Una de les característiques més importants al món de l'arquitectura moderna és la cerca de noves formes i superfícies. Per això, les estructures corbades ofereixen l'oportunitat de generar un dinamisme a l'espai. A més de qualitats estètiques, les estructures curvilínies han demostrat ser molt resistents al vent, menys susceptibles a patir desperfectes davant fenòmens meteorològics i augmenten el flux d'aire de l'estructura proporcionant una millor estabilitat<sup>[31]</sup>.

Són molts els arquitectes que al llarg de la història han creat edificis bastats en les formes curvilínies i fluides, els volums superposats i els embolcalls escultòrics. En destaca l'arquitecte Frank Gehry<sup>[32]</sup>, autor d'obres com el Museu Guggenheim a Bilbao (**Figura 1-3**) i el Walt Disney Concert Hall a Los Angeles. També els edificis neofuturistes de Zaha Hadid caracteritzats per les formes corbades amb múltiples punts de perspectiva i geometria fragmentada<sup>[33]</sup>.

El disseny orgànic, ple de formes complexes, obliqües presents als ponts i edificis de Santiago Calatrava o les formes geomètriques rectilínies i corbes juxtaposades de Richard Meier al Museu d'Art Contemporani de Barcelona (**Figura 1-4**), són altres exemples.

Però no només se'n realcen els edificis, el mobiliari també ha adoptat aquest model corbat. Com a l'empresa Swiss Pearl<sup>[34]</sup> que fabriquen cadires amb fibrociment (**Figura 1-5**) oferint una alternativa innovadora i sostenible.



**Figura 1-3** Museu Guggenheim  
(Bilbao). Font: Pròpia



**Figura 1-4** MACBA. Font: Pròpia



**Figura 1-5** *Sponeck Chair*.  
Font: Swiss Pearl®

## 2. Objectius

L'objectiu principal del present treball de fi de grau és determinar les propietats mecàniques de peces corbades de ciment Pòrtland reforçat amb no teixits de residu tèxtil i fibres vegetals per tal de saber si poden oferir bones prestacions comparades amb els estudis de plaques planes del mateix material compost.

Per tal d'assolir aquest objectiu, s'han desenvolupat els següents objectius específics:

- a) Realitzar una caracterització del no teixit de residu tèxtil i fibres vegetals, tant en direcció màquina (longitudinal) com en direcció transversal i determinar el seu gramatge.
- b) Determinar quina és la relació que hi ha entre el nombre de capes de no teixits i les propietats mecàniques finals de les peces.
- c) Definir la influència del grau de curvatura de les peces en les propietats mecàniques finals.
- d) Simular el comportament de les peces en assajos de flexió.
- e) Comparar els assajos amb simulacions numèriques.
- f) Relacionar la forma de trencament del material amb les propietats mecàniques de les peces.

### 3. Disseny experimental

Es van fabricar un total de setze peces dividides en quatre blocs diferents segons el seu diàmetre:  $D_1=9$  cm,  $D_2=16$  cm,  $D_3=20$  cm i  $D_4=32$  cm. Aquests diàmetres es van seleccionar per a representar graus de curvatura de més tancats a més oberts, prèviament acordats amb els tutors.

Dins de cada bloc es van elaborar dues peces amb quatre capes de no teixit (4C) i dues amb sis capes (6C). Es van triar aquests nombres de capes perquè s'ha vist que els materials amb sis capes són els que presenten millors propietats mecàniques conjuntament amb els de quatre capes<sup>[30]</sup>.

El procediment que es va dur a terme va ser:

- L'elaboració del material compost
- La maduració de les peces
- El tall de les provetes
- L'assaig de flexió
- Les simulacions amb un programa de càlcul d'estructures (WinEva)
- L'observació dels trencaments amb la lupa

La **Taula 3-1** presenta la nomenclatura utilitzada per a identificar les peces corresponent al codi: Nombre de capes – Diàmetre – Provena.

**Taula 3-1** Nomenclatura utilitzada per a designar les peces elaborades.

Nº capes	Diàmetre			
	D= 9 cm	D= 16 cm	D= 20 cm	D=32 cm
4 capes	4C-9-A	4C-16-A	4C-20-A	4C-32-A
	4C-9-B	4C-16-B	4C-20-B	4C-32-B
6 capes	6C-9-C	6C-16-C	6C-20-C	6C-32-C
	6C-9-D	6C-16-D	6C-20-D	6C-32-D

## 4. Materials i mètodes

### 4.1. Materials

#### 4.1.1. Matriu

La matriu del material compost ha estat elaborada amb un ciment Pòrtland Tipus I 52,5 R (SUPER DRAGON SD) subministrat per Cementos Molins Industrial, S.A. Es tracta del ciment més resistent a la compressió entre tots els ciments comercials<sup>[40]</sup> i presenta un enduriment ràpid, fins i tot en temps fred<sup>[36]</sup>. La composició química del material i les propietats físiques/mecàniques requerides d'acord amb la normativa UNE-EN 197-1:2011 s'indiquen a la **Taula 4-1**.

**Taula 4-1** Característiques del ciment Pòrtland Tipus I 52,5 R. Font: Cementos Molins

Contingut	Valor habitual	EN 197 – 1:2011
Clínquer (%)	98	mín. 95 – màx. 100
Component minoritari (%)	2	mín. 0 – màx. 5
Pèrdua per calcinació (%)	2,5	màx. 5,0
Sulfat, SO <sub>3</sub> (%)	3,4	màx. 4,0
Clorurs, Cl <sup>-</sup> (%)	0,04	màx. 0,10
Residu insoluble	0,7	màx. 5,0
Superfície específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4600	-
Expansió Le Chatelier (mm)	0,5	màx. 10
Inici de fixació (min)	110	mín. 45
Compressió a 2 dies (MPa)	40	mín. 30,0
Compressió a 28 dies (MPa)	61	mín. 52,5



#### 4.1.2. Fibres

Per a la fabricació d'un no teixit és necessari que les fibres siguin prou llargues per a consolidar el cos del teixit. És per això que un no teixit elaborat 100% de residu tèxtil no és possible a causa de la curtesa de les seves fibres<sup>[29]</sup>.

Per aquest motiu és necessari incorporar fibres llargues de lli juntament amb les fibres curtes provinents de residu tèxtil.

##### 4.1.2.1. Residu tèxtil

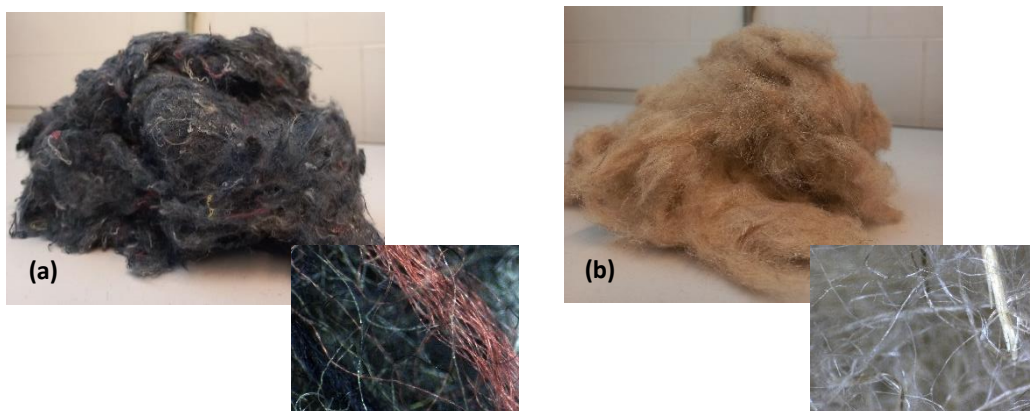
El residu tèxtil, també anomenat regenerat, va ser proporcionat per Triturats La Canya S.A. (Girona), amb una composició aproximada de 28% de polièster i 72% de cel·lulosa (cotó principalment).

El contingut d'humitat (HR) i la retenció d'aigua eren aproximadament de 7% i 85, respectivament. I la majoria d'aquestes fibres curtes tenien un diàmetre que oscil·lava entre 3,6 i 32,1  $\mu\text{m}$ , mentre que la resta era una barreja de fils i teixits<sup>[30]</sup>.

##### 4.1.2.2. Lli

Les fibres llargues de lli proporcionades per l'Institut Wlokiem Naturalnych (Polònia), eren 100% fibres cel·lulòsiques i tenien una llargada mitjana de 60 mm.

Ambdues fibres es poden observar a la **Figura 4-1**.



**Figura 4-1** (a) Residu tèxtil i vista en lupa (50x); (b) Fibra de lli i vista en lupa (50x). Font: Pròpia

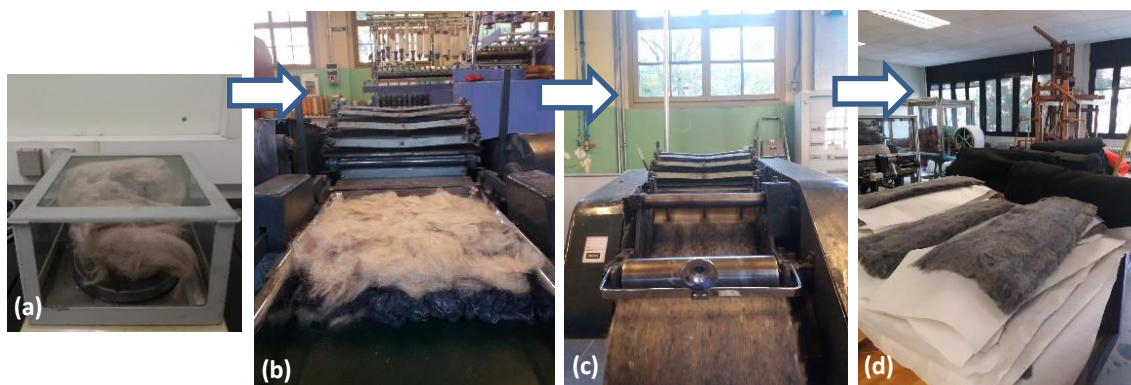
## 4.2. Mètodes

### 4.2.1. Elaboració dels no teixits

L'elaboració dels no teixits es va realitzar a l'Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa (ESEIAAT), concretament al Taller de Filatura i al Taller de Tissatge de la Secció d'Enginyeria Tèxtil del Departament de Ciència i Enginyeria dels Materials (SAET-CEM).

D'acord amb una guia d'elaboració de napes present al Departament es va fer una composició de 65% de residu + 35% de lli, distribuïdes en tres capes: lli + regenerat + lli.

Primer de tot, es van pesar  $52,00 \pm 0,01$  g de residu tèxtil i  $28,00 \pm 0,01$  g de lli. Posteriorment, es van obrir les fibres i es van passar un cop per la màquina de carda per a l'obtenció de napes (**Figura 4-2**). El cardat es va fer amb una carda de xapons de la marca Platt's (model *mini-filatura* TF004).



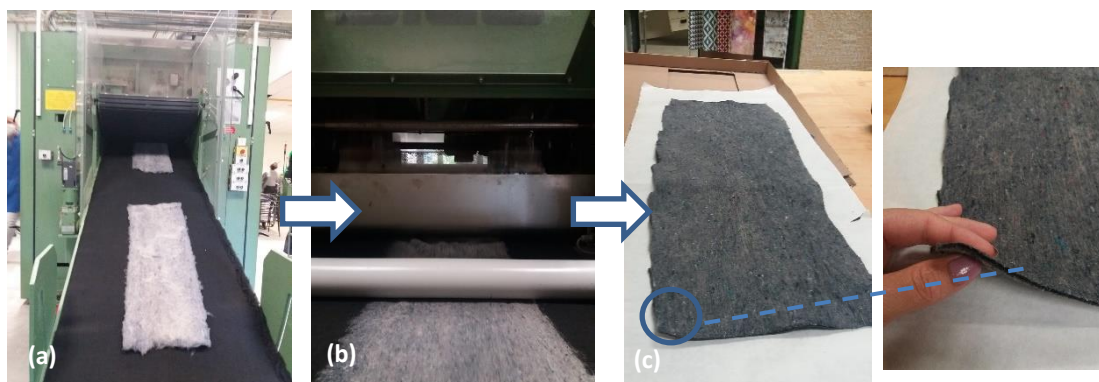
**Figura 4-2** Procés de cardat: (a) Pesat de les fibres; (b) Introducció de les fibres a la cinta d'alimentació de la carda; (c) Cardat de les tres capes per uniformitzar i barrejar les fibres; (d) Napa finalitzada amb la barreja uniforme de fibra curta i llarga. Font: Pròpia

Adicionalment, es va fer un control de tota la quantitat de borra (rebuig de filatures) obtinguda després de dues cardes. Generalment, en tots els casos es va generar  $15,0 \pm 0,1$  g de merma.

Per a enfortir les napes es va procedir a consolidar-les amb una punxonadora model DILO OUG-II-6 (**Figura 4-3**). Les condicions del punxonat es presenten a la **Taula 4-2**. En un inici, es van realitzar dues passades, però les napes es trencaven, per tant, es va decidir fer només una. A més a més, com que l'ample d'entrada de la punxonadora era més gran que les napes, es va emprar un teixit guia d'acompanyament en el que es va tallar unes finestres d'aproximadament 70 x 25 cm (**Figura 4-3**).

**Taula 4-2** Condicions del punxonat. Font: Guia ESEIAAT

Condicions del punxonat	
Número de carreres/minut	785
Condicions de separació (cm)	10/19/10
Entrada (m/min)	1,14
Sortida (m/min)	1,20



**Figura 4-3** Procés de punxonat: (a) Napes entrant a la punxonadora; (b) Sortida de la napa de la màquina; (c) Napa punxonada completament consolidades. Font: Pròpia

En total es van fer dos-centes quaranta no teixits (napes cardades i posteriorment punxonades), i de cadascuna d'elles es van tallar dos quadrats de 29 x 29 cm (un total de quatre-centes vuitanta mostres). Sempre es va intentar manipular el menys possible el no teixit per així no deformar-lo i evitar brutícies o la humitat de les mans de l'experimentador.

#### 4.2.1.1. Caracterització del no teixit

Les restes de no teixit disponibles es van aprofitar per a fer-ne la corresponent caracterització.

Es van caracteritzar un total de deu provetes: cinc amb el no teixit orientat en direcció màquina (longitudinal) i cinc en direcció transversal. Cadascuna de les provetes es van retallar amb unes dimensions de 30 x 5 cm (**Figura 4-4**).



**Figura 4-4** Provetes per a la caracterització.

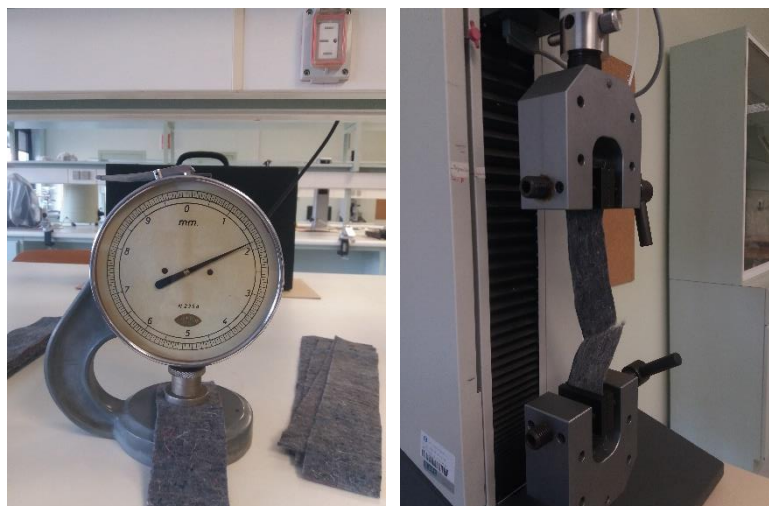
Font: Pròpia

En primer lloc, es van pesar les provetes i a continuació, es van fer mesures del gruix en tres punts diferents de cada proveta (inici, mig i final) amb un micròmetre tèxtil (**Figura 4-5**).

Per a realitzar l'assaig de tracció dels no teixits es va fer servir un dinamòmetre MTS amb mordaces especials per a teixits de 60 x 40 mm. Tal com especifica la normativa UNE-EN ISO 13934-1, es va col·locar una cèl·lula de càrrega de 5 kN amb una velocitat de desplaçament de 100 mm/min però sense considerar cap precàrrega inicial. Els paràmetres de configuració dels assajos es presenten a la **Taula 4-3**.

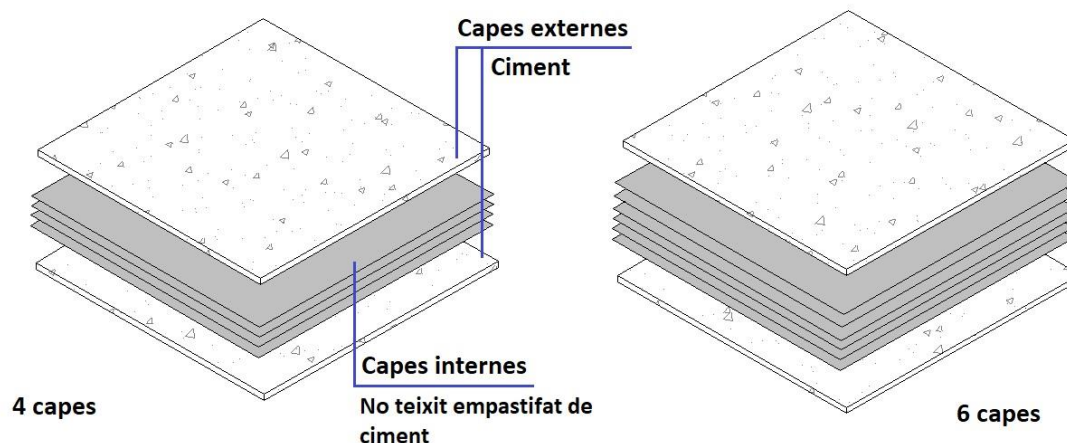
**Taula 4-3** Paràmetres d'entrada de la configuració de l'assaig de tracció.

Nom	Valor (unitats)
Amplada de la tira	50 mm
Distància entre pinces	200 mm
Pre-càrrega inicial	0 N
Velocitat d'assaig	100 mm/min

**Figura 4-5** Micròmetre tèxtil; Assaig amb el dinamòmetre (d'esquerra a dreta). Font: Pròpia

#### 4.2.2. Elaboració del material compost

L'elaboració del material compost es va realitzar al laboratori 105 de l'Escola d'Enginyeria Agroalimentària i de Biosistemes de Barcelona (EEABB). La metodologia que es va seguir va ser una adaptació del sistema o procés Hatschek<sup>[37]</sup>. Les peces del material compost que es van preparar estaven formades per diferents capes: dues externes fetes de ciment i quatre o sis capes internes de no teixits empastifats de pasta de ciment, a la **Figura 4-6** es mostra un esquema desglossat de la composició.



**Figura 4-6** Esquemes desglossats de les capes de les peces. Font: Pròpia

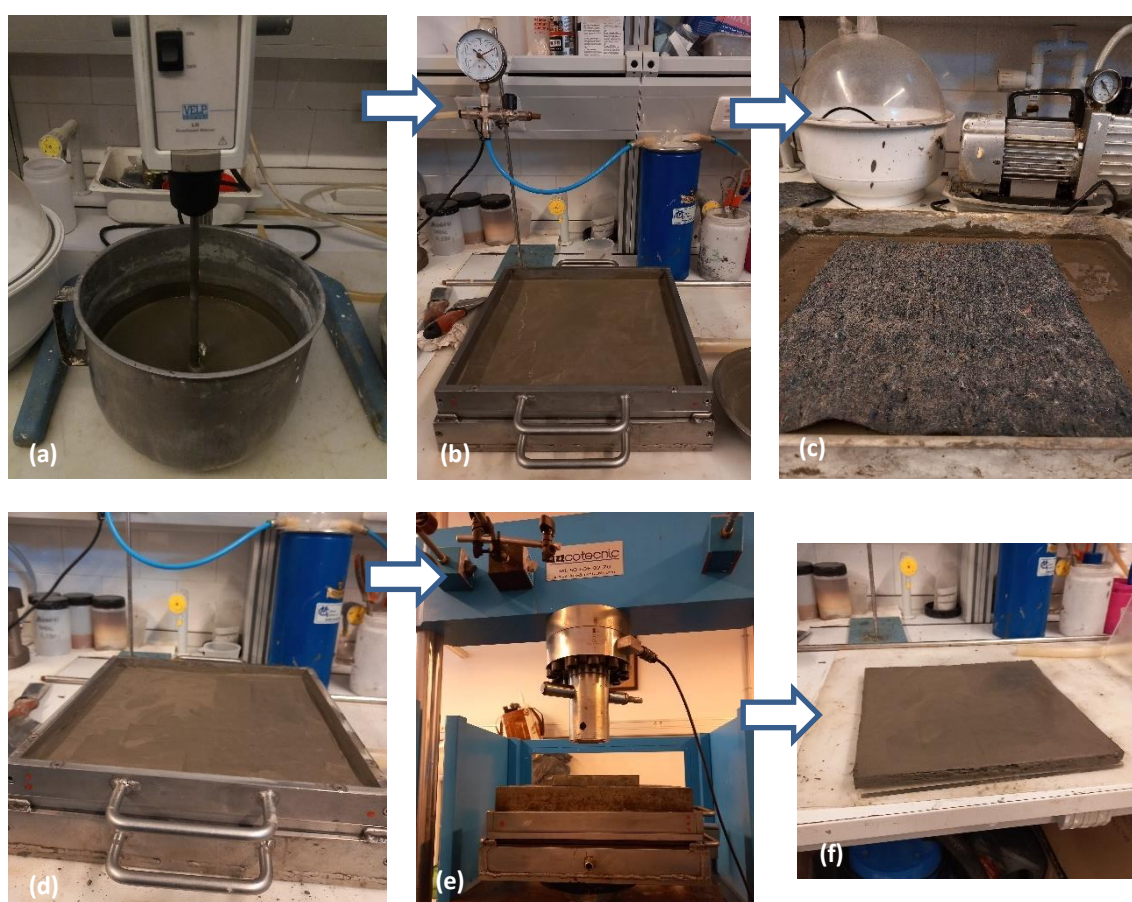
En primer lloc, es va preparar la matriu pesant una quantitat de 3 kg de ciment en pols i 2,55 kg d'aigua destil·lada, obtenint una relació inicial d'aigua/ciment de 0,85. Es va escollir aquesta relació perquè garantia una correcta penetració de la pasta de ciment dins del no teixit<sup>[38]</sup>.

Dins de l'amassadora s'introduïa l'aigua (**Figura 4-7**) i gradualment s'anava afegint el ciment per a evitar grumolls i precipitacions a la barreja. A continuació, es va utilitzar un motlle d'acer inoxidable amb dos compartiments per a fer les peces. Les dimensions interiors del motlle eren de 30 x 30 cm, a on el compartiment superior tenia la superfície perforada amb forats petits (diàmetre < 1 mm) i l'inferior funcionava com a cambra de buit per a extreure l'aigua durant el procés de l'elaboració del material compost. Abans de posar la primera capa de ciment, es va col·locar un teixit impregnat de desencofrant de la marca SIKA LN per a evitar perdre ciment durant el buit i per a posteriorment treure la placa amb facilitat.

Aproximadament es van pesar  $540 \pm 0,1$  g de ciment per a les capes exteriors. En el cas de les peces amb quatre napes, el pes global del teixit era de  $62,20 \pm 0,1$  g i les de sis napes de  $93,20 \pm 0,1$  g. Es va voler fer un previ control del pes dels teixits per a descartar que les possibles diferències de les propietats mecàniques del material compost fossin per un contingut divers en el material de reforç.

En conjunt, el procediment que es va seguir va ser posar una primera capa de ciment al motlle i després els no teixits es van anar impregnant de ciment amb l'ajuda d'una safata. Cadascuna de les napes es van anar integrant de forma en què la direcció de les fibres quedessin perpendiculars entre les capes de no teixit. Per a finalitzar, es posava l'última capa de ciment amb un altre teixit amb desencofrant per sobre. Tot el procés es pot observar a la **Figura 4-7**.

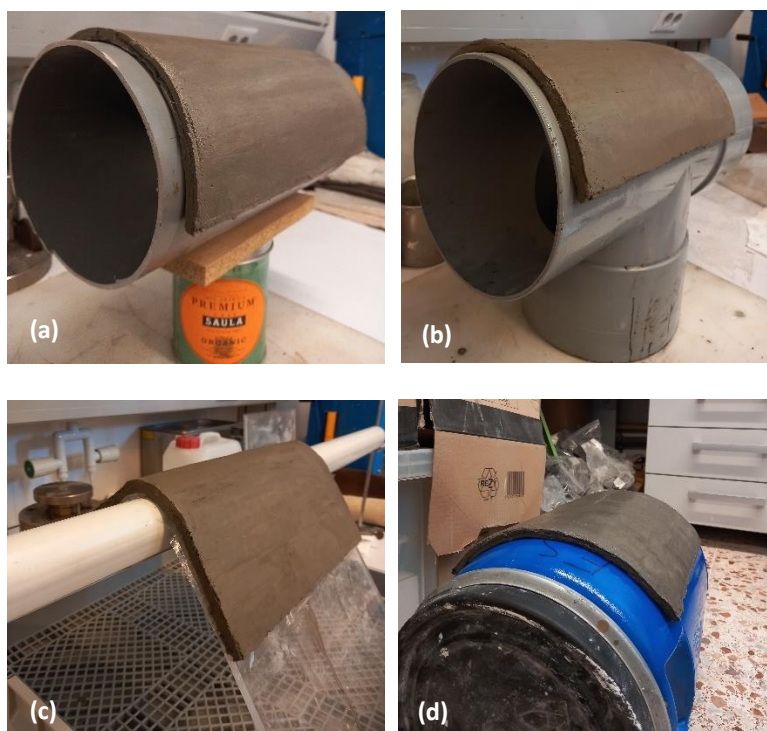
Finalment, es va introduir el motlle a la premsa multiassaig Incotècnic amb un mòdul de càrrega màxima de 300 kN. Es va premsar fins que es va exercir aproximadament una força de 10 tones, quan s'assolia aquesta càrrega, es retirava la placa de la premsa i es procedia a corbar-la.



**Figura 4-7** Elaboració del material compost: (a) Procés de preparació de la matriu; (b) Introducció de la primera capa de ciment al motlle; (c) Impregnació de ciment al no teixit; (d) Buit de la peça al motlle; (e) Compressió de la peça a la premsa; (f) Placa final. Font: Pròpia

Per a fer les curvatures de diàmetres de 16 cm i de 20 cm es van utilitzar tubs de PVC. Per al de 9 cm es va construir una estructura amb l'ajuda d'una guia de forma que proporcionava aquest diàmetre. I per al de 32 cm es va fer servir un bidó que tenia el mateix diàmetre. Tots els diàmetres es mostren a la **Figura 4-8**.

Les peces acabades de treure de la premsa es col·locaven als tubs o a l'estructura, fins a obtenir la curvatura desitjada. En el cas que sortissin esquerdes superficials, es van tapar amb una mica del ciment restant amb l'ajuda d'una espàtula.



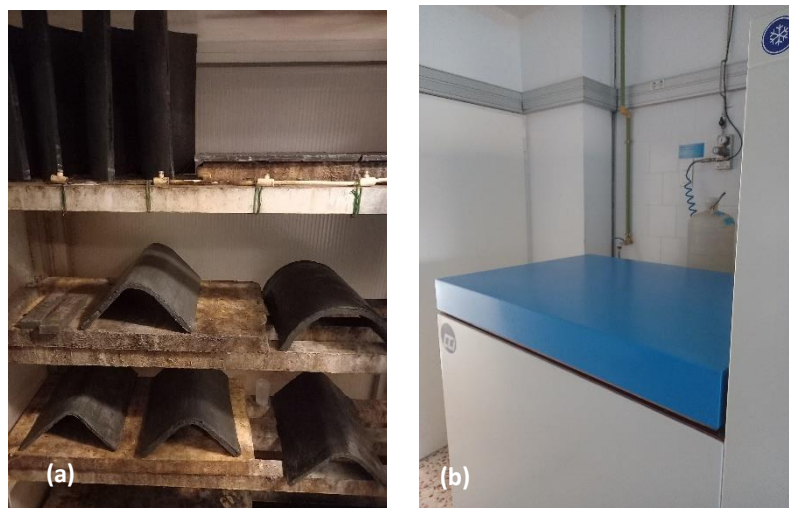
**Figura 4-8** Diàmetres: (a) 16 cm; (b) 20 cm; (b) 9 cm; (d) 32 cm.

Font: Pròpia

En acabar, les peces es van introduir a l'armari de cambra de curat (**Figura 4-9**) amb una humitat relativa del 95 % i una temperatura de  $20 \pm 1$  °C durant 28 dies continus. Malgrat això, les peces madurades del 20/01/2022 al 17/02/22, del 21/01/2022 al 18/02/2022 i del 24/01/2022 al 21/02/2022, es van fer amb un curat per immersió amb una temperatura de  $20 \pm 1$  °C (**Figura 4-9**) perquè la cambra es va espallar.



Segons la normativa UNE-EN 196-1:2018<sup>[39]</sup>, la qual dictamina els mètodes d'assaig de ciment, el curat de les peces s'ha de realitzar per immersió. No obstant, la versió anterior a aquesta normativa<sup>[40]</sup> admetia tant el curat per immersió com per armaris. Donada la dificultat de mantenir les condicions en els armaris de curat, la nova revisió ha conservat només el mètode d'immersió per seguretat. Tanmateix, si la cambra de curat manté les condicions d'humitat adequades, ambdós mètodes són equivalents.



**Figura 4-9** Procés de curat: (a) Armari de curat; (b) Immersió. Font: Pròpia

Durant tota l'elaboració del material compost es va fer un seguiment de la quantitat d'aigua que sortia del buit, de l'aigua que sortia de la compressió i tot l'excident de ciment. A més, mitjançant la diferència de pes inicial i final es va calcular la quantitat de ciment i d'aigua final de les peces, i la relació aigua-ciment (**Annex A**).

#### **4.2.3. Assaig de les peces**

Per a determinar i avaluar les propietats mecàniques del material i la relació que existeix amb el grau de curvatura, es va configurar un assaig de flexió.

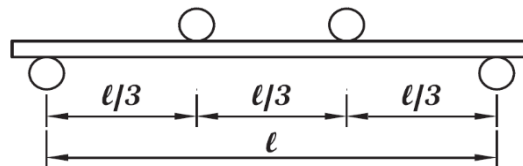
Després del període de curat, seguint la norma UNE 88412:2006<sup>[41]</sup>, es van tallar les peces en sis provetes abans dels assajos. Es va utilitzar una serra de tall de roques amb dos discos de tall separats a 10 cm de la marca Mecánica Científica S.A. (model 270/90). A la **Figura 4-10** es mostra una imatge d'una placa dins la serra i les provetes obtingudes.



**Figura 4-10** La serra amb una placa; Tres provetes acabades de tallar (d'esquerra a dreta). Font: Pròpia

L'assaig de flexió es va basar seguint el TFR 1 del RILEM<sup>[42]</sup>, l'esquema de quatre punts de flexió (**Figura 4-11**) i una posterior simulació numèrica realitzada al WinEva (apartat 4.2.4 *Simulacions*).

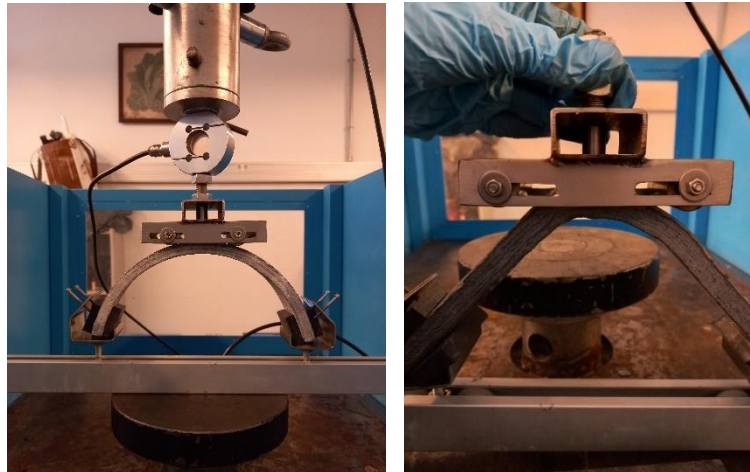
Per a l'assaig es va utilitzar la mateixa premsa que per a l'elaboració del material compost. En aquest cas equipada amb una cèl·lula de càrrega màxima de 3 kN a una velocitat de 2,00 mm/min. Les provetes es van assajar amb una longitud entre recolzaments (L) depenent del diàmetre de les peces (90, 160, 200 i 320 mm).



**Figura 4-11** Esquema de flexió a 4 punts.

Cada proveta es col·locava a la premsa amb l'ajuda d'un sistema format per uns rodets i una guia. Aquest, permetia que durant el temps d'aplicació de la càrrega, la proveta pogués moure's fins al punt de trencament. A la **Figura 4-12** es pot observar el sistema d'assaig de flexió elaborat.

A l'**Annex B** es mostra un croquis dels rodets.



**Figura 4-12** Sistema d'assaig de flexió: Imatge general de la proveta a la premsa amb la guia i els rodets; Detall dels rodets. (D'esquerra a dreta). Font: Pròpia

Amb les dades obtingudes de l'assaig, es va calcular la deformació amb l'**Equació (4-1)** i la tensió de flexió amb l'**Equació (4-2)**, segons la configuració de quatre punts. A on la  $b$  era l'amplada de la proveta, la  $h$  el gruix, la  $f$  la posició i la  $F$  la força màxima assolida en l'assaig.

$$\varepsilon \text{ (mm/mm)} = \frac{108 \cdot f \text{ (mm)} \cdot h \text{ (mm)}}{23 \cdot L^2 \text{ (mm)}} \quad (4-1)$$

$$\sigma \text{ (MPa)} = \frac{F \text{ (kN)} \cdot L \text{ (mm)}}{b \text{ (mm)} \cdot h^2 \text{ (mm)}} \cdot 1000 \quad (4-2)$$

Posteriorment, es van fer corbes de la tensió de flexió-deformació per a calcular els següents paràmetres mecànics (**Figura 4-13**):

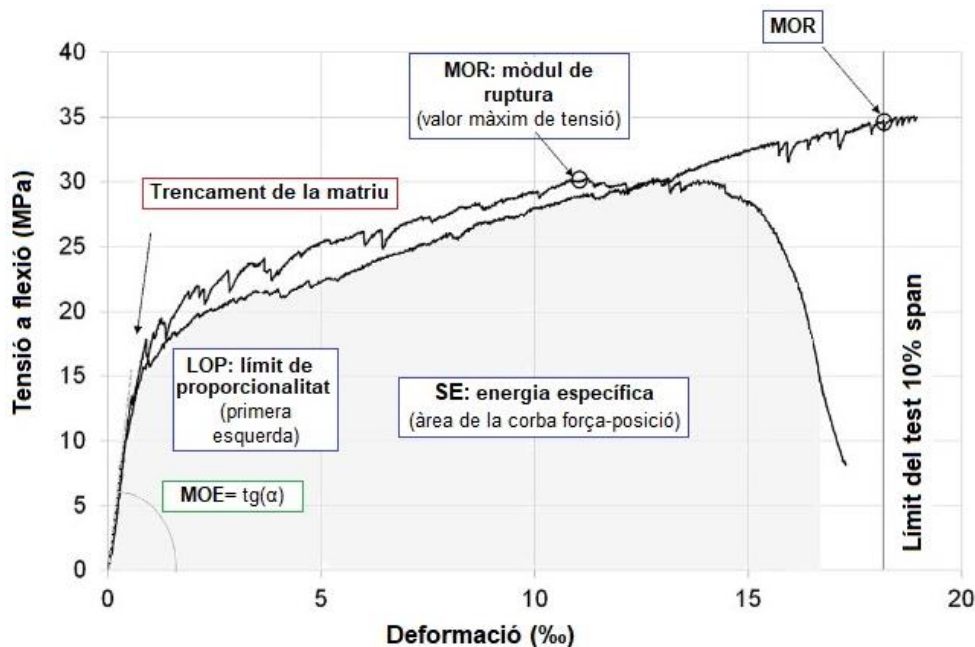
- El mòdul del mòdul d'elasticitat (MOE), també anomenat mòdul de Young mesura la rigidesa de la placa. És la pendent de la recta del diagrama tensió-deformació ( $R^2 = 1$ ). També es pot calcular amb l'**Equació (4-3)**.

$$E \text{ (MPa)} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (4-3)$$

Aquest valor va ser essencial per a poder realitzar les simulacions al WinEva (4.2.4) i obtenir els moments (M).

- El mòdul de ruptura (MOR), la tensió unitària màxima que pot resistir una placa abans de la ruptura.
- El límit de proporcionalitat (LOP), la tensió màxima que suporta un material sense patir cap mena de deformació permanent (deformació plàstica).
- L'energia específica (SE), és la quantitat d'energia que absorbeix la placa durant l'assaig de flexió dividida per l'àrea de la secció transversal. Està representada com l'àrea de la corba de força-posició per unitat de superfície (**Equació (4-4)**), concretament fins que la corba descendeix cap al 40 % de MOR.

$$SE \left( \frac{kJ}{m^2} \right) = \frac{\Sigma \text{Força (N)} \cdot \text{posició (m)}}{b \text{ (m)} \cdot h \text{ (m)}} \quad (4-4)$$



**Figura 4-13** Corbes de tensió-deformació típiques de compostos de ciment de cel·lulosa. També s'indica el MOR, el LOP, MOE i SE. Font: *Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: a review of recent research* (Modificat)

#### 4.2.4. Simulacions

Actualment, les equacions que existeixen per al càlcul de les tensions són per a plaques planes. Per això, es va decidir fer una simulació numèrica amb l'ajut del programa WinEva. Aquest, ens permet introduir el disseny geomètric de les peces i així poder determinar el valor del moment real i posteriorment calcular el valor de la tensió real.

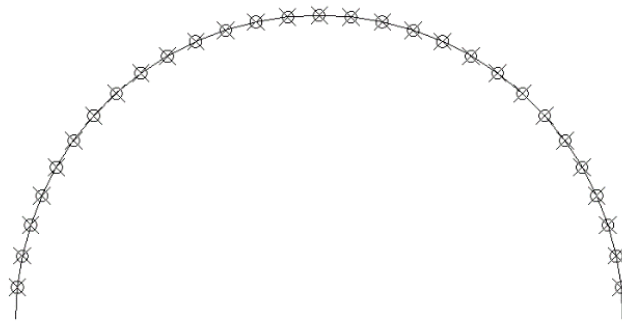
Específicament, es van fer dues simulacions per a cada proveta. Una primera amb el MOE del tram elàstic del comportament de la peça i una segona amb el MOE fins al punt de la força màxima. El propòsit era garantir que la deformació generada en el model del programa coincidia amb el real de l'assaig i així poder determinar la versemblança dels dos resultats.

##### 4.2.4.1. WinEva

El WinEva és un programa d'anàlisi d'estructures de barres en 2D creat l'any 1989 per Ramon Sastre i Sastre, docent de l'Escola Tècnica Superior d'Arquitectura del Vallès (ETSAV). El seu objectiu principal és el càlcul de les deformacions elàstiques i dels esforços (respostes produïdes) de les estructures quan s'apliquen accions sobre les barres.

Per a realitzar qualsevol simulació, caldrà tenir en compte diverses característiques<sup>[43]</sup>: (a) totes les barres han de ser rectes i de secció constant; (b) una barra només pot ser d'un únic material, tot i que poden haver-hi diferents barres amb diferents materials; (c) totes les barres han d'estar situades en un mateix pla; i (d) totes les accions sobre l'estructura estaran contingudes en el mateix pla.

El procés per a dur a terme la simulació s'inicia amb la introducció de les dades geomètriques de l'estructura. En aquest cas, com a representació de les peces es va dibuixar un semicercle (en metres) a AutoCAD, com es pot observar a la **Figura 4-14**. A més a més, es va subdividir en 31 nusos diferents perquè quan s'importés l'arxiu en format DXF al programa l'estructura no es deformés. Cadascun dels semicercles es van dibuixar amb el diàmetre de la placa d'estudi.



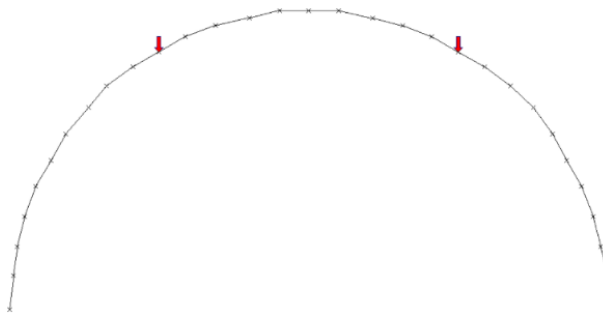
**Figura 4-14** Estructura geomètrica dibuixada a l'AutoCAD.

Font: Pròpia

A continuació, s'introdueix les *dades del material* corresponent al mòdul elàstic ( $T/m^2$ ) i es carrega la figura geomètrica al programa.

Posteriorment, es dimensionen les barres a on la base equival a l'amplada de la proveta i el cantell al gruix. Respecte als nusos, el nus número 1 se selecciona com a tipus 110 (només gira: articulació) i el nus 30 se selecciona com a 010 (es mou en l'eix X i gira).

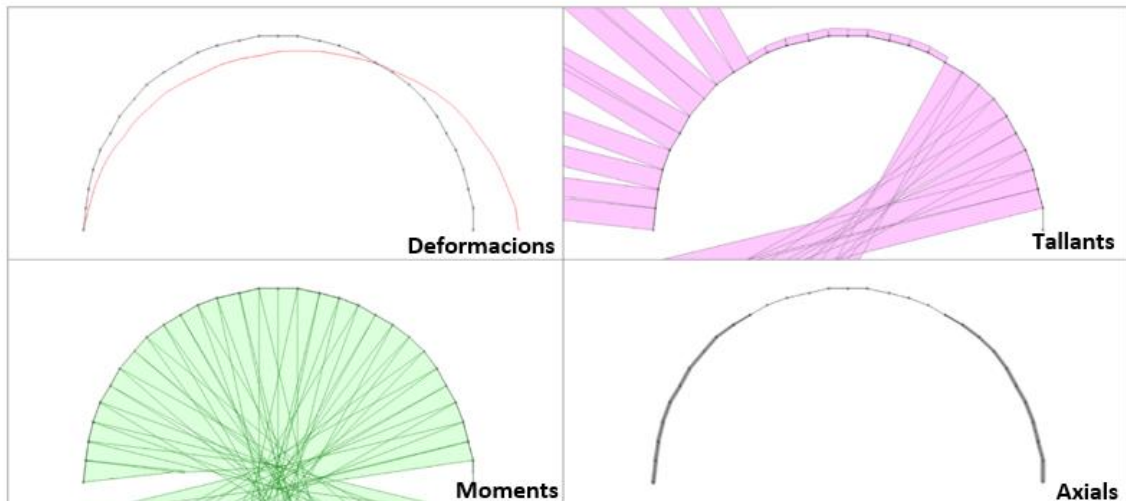
D'altra banda, les accions es fixen en els nusos que s'aproximen a la distància que es va posar als rodets, indicant la  $F_y$  (la força vertical) corresponent a la força resultant a l'assaig de flexió de la proveta (**Figura 4-15**).



**Figura 4-15** Pestanya d'accions de l'estructura al WinEva.

Font: Pròpia

Finalment, es procedeix a calcular la simulació, sense tenir en compte el pes propi. Com a resultat, s'obté pantalles gràfiques amb la deformació, els moments, els tallants i les axials generades per l'acció a l'estructura (**Figura 4-16**). Com a objecte d'estudi, només es va tenir en compte la vista de la deformació i els moments generats.



**Figura 4-16** 4-Vistes dels resultats del càlcul de l'acció sobre els nusos de l'estructura. Font: Pròpia

Amb el valor numèric màxim dels moments generats a l'estructura, es va calcular la tensió màxima suportada pel material, com s'indica a l'**Equació (4-5)**. A l'**Equació (4-6)** es mostra el moment d'inèrcia ( $I$ ) i la distància perpendicular des de l'eix neutre a un punt de la secció ( $y_{m\grave{a}x}$ ).

$$\sigma_{m\grave{a}x} (MPa) = \frac{M (N \cdot mm) \cdot y (mm)}{I (mm^4)} = \frac{M (N \cdot mm)}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 (mm^3)} \quad (4-5)$$

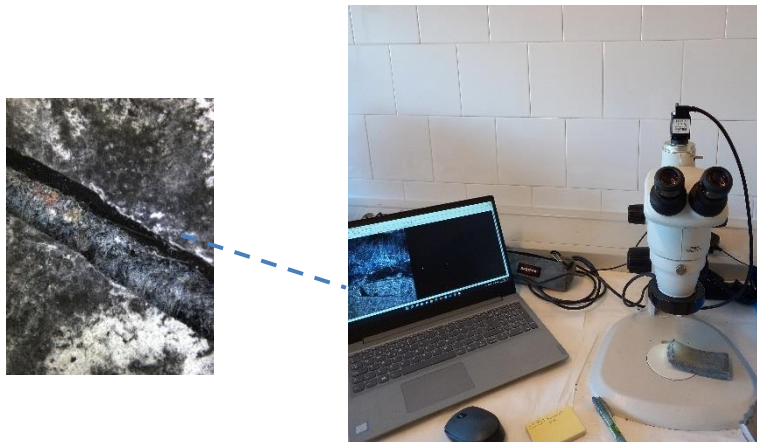
A on,

$$I (mm^4) = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \quad i \quad y_{max} (mm) = \frac{h}{2} \quad (4-6)$$

#### 4.2.5. Observacions del trencament de les provetes

Per a l'observació de la forma de trencament de les provetes, es va fer servir una lupa Nikon SMZ745T amb una càmera (Figura 4-17).

A més a més, es va descriure si els trencaments eren superficials o profunds, múltiples o simples, rectes o en ziga-zaga i si existien algun tipus d'anomalia en la proveta.



**Figura 4-17** Lupa amb una proveta trencada (20x). Font: Pròpia



## 5. Resultats

Per a la caracterització del comportament del material es va representar la corba de força-posició proporcionada per l'assaig de flexió i la corba tensió-deformació de les peces. Amb aquesta darrera, també es va determinar el mòdul d'elasticitat (MOE), el mòdul de ruptura (MOR), el límit de proporcionalitat (LOP) i l'energia específica (SE). A més a més, es mostren les corbes representatives de tensió-deformació per a cadascuna de les peces. Aquestes, es van escollir segons la representativitat més rigorosa a les mitjanes de grup dels quatre paràmetres mecànics. Cal considerar que només és una aproximació i en molts casos aquesta corba no representa tot el conjunt del grup. A l'**Annex C** es mostra tot el conjunt de corbes de les provetes. L'**Annex D** recull els resultats obtinguts a les simulacions del WinEva i la comparació amb els resultats dels assaigs.

Així mateix, en aquest apartat es presenten esquemes segons les formes de trencament de les provetes i les observacions amb la lupa.

Per a la comparació de les mostres es va realitzar un test ANOVA amb el programa Minitab per a comprovar si les diferències entre les mitjanes eren significatives o no. En els casos que si ho eren, es va fer un test de Tukey amb un nivell de confiança del 95% per a identificar específicament quines eren les provetes diferents.

### 5.1. Caracterització dels no teixits

La **Taula 5-1** recull els resultats mitjans amb les desviacions estàndards obtinguts de les dues repeticions de la caracterització dels no teixits a l'ESEIAAT, tant en direcció màquina com en direcció transversal. Es pot observar que la força màxima en direcció màquina és un 59,21% més gran que en direcció transversal. Aquesta diferència ens indica que existeix una direcció preferencial de les fibres dins del no teixit.

**Taula 5-1** Caracterització del no teixit.

Paràmetre	Direcció màquina	Direcció transversal
	(N±SD)	(N±SD)
Gruix (mm)	1,66 ± 0,21	1,68 ± 0,20
Gramatge (g/m <sup>2</sup> )	173 ± 10,60	164 ± 4,87
Força màxima (N)	4,83 ± 1,56	1,97 ± 0,95
Força màxima normalitzada (N/g)	1,9 ± 0,36	0,8 ± 0,30
Allargament a força màxima (%)	14,66 ± 2,74	38,98 ± 7,03
Temps de ruptura (s)	20,53 ± 3,59	53,18 ± 8,69

## 5.2. Caracterització de les peces

### 5.2.1. Flexió

La **Figura 5-1** correspon a les corbes de comportament de les provetes més representatives dins de les peces assajades.

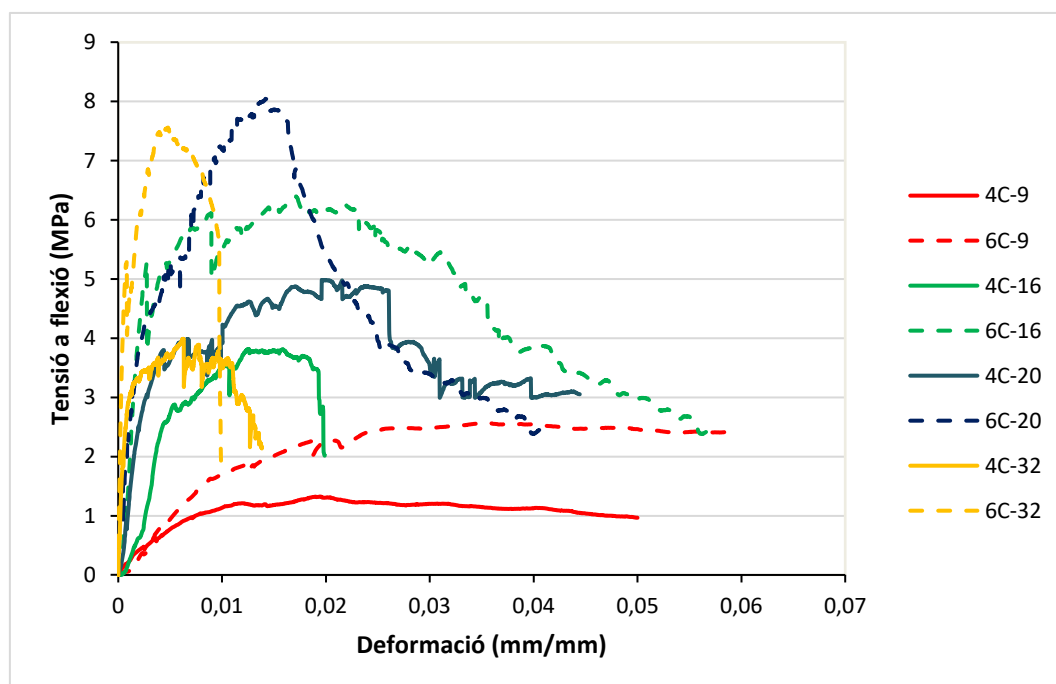
A les corbes, primer s'observa una part vertical, també anomenada període elàstic que generalment correspon al material sense esquerdes i mostra el comportament de la matriu. Després, la corba canvia de direcció de cop, el que ens indica que hi ha un trencament a la matriu i comença el període plàstic de reforç de la fibra. Tots els pics a les corbes indiquen noves obertures de fissures al material.

La peça de diàmetre 20 de sis capes és la que ha obtingut la corba més alta amb el MOR més gran, mentre que la de diàmetre 9 tant de quatre com de sis capes, ha proporcionat les més baixes. No obstant, existeix una clara tendència en què les peces fabricades amb sis capes assoleixen corbes més altes que les de quatre capes. Tanmateix, en els casos de les peces de sis capes la deformació unitària suportada per les fibres ha estat superior que les de quatre.

Les peces de diàmetre 9 no tenen quasi un període elàstic ni presenten molts pics, però la seva deformació és llarga. D'altra banda, les peces de diàmetre 16 presenten un període elàstic mig, molt semblant a les peces de diàmetre 32.

Pel que fa a les peces de diàmetre 20, la de quatre capes és la corba amb més pics de totes les representades i la de sis capes presenta un període elàstic gran.

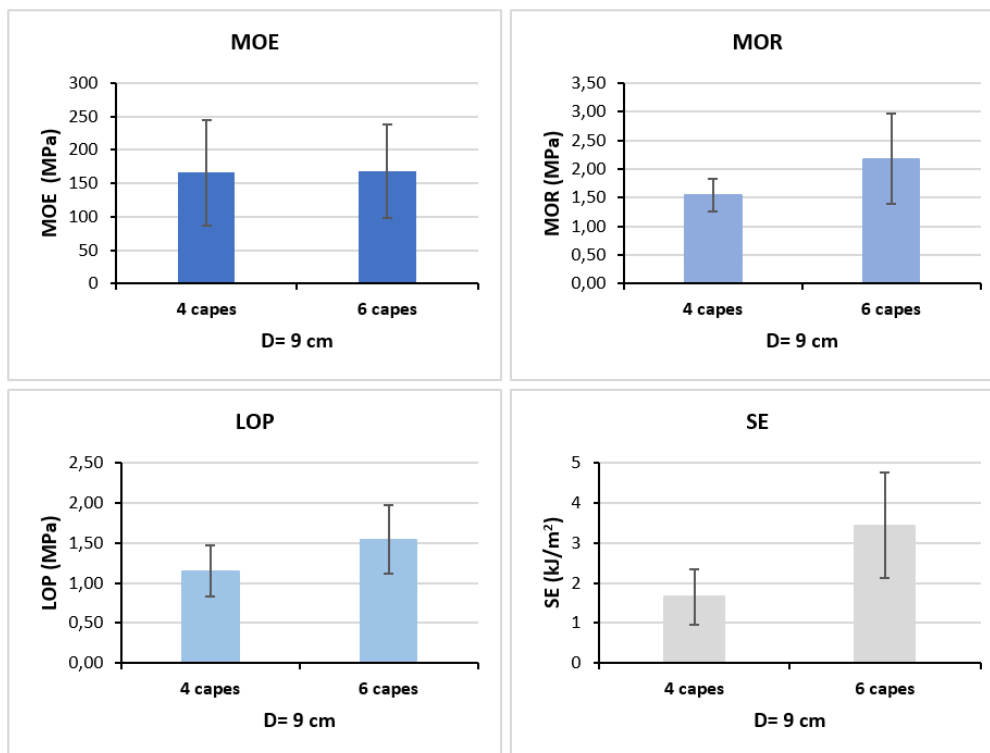
En quant a les peces de diàmetre 32, les dues tenen el període elàstic més gran. Però també presenten la menor deformació entre totes les peces assajades.



**Figura 5-1** Corbes representatives per a les peces pels assaigs de flexió.

A continuació, s'avaluen els quatre paràmetres mecànics en funció del nombre de capes dins de la placa.

Si observem els gràfics de barres de la **Figura 5-2** corresponents a les peces de diàmetre 9, en tots els paràmetres s'aprecia una tendència creixent en augmentar el nombre de capes de no teixit al material. En el cas de l'energia específica de les peces amb sis teixits la diferència és de més del doble.



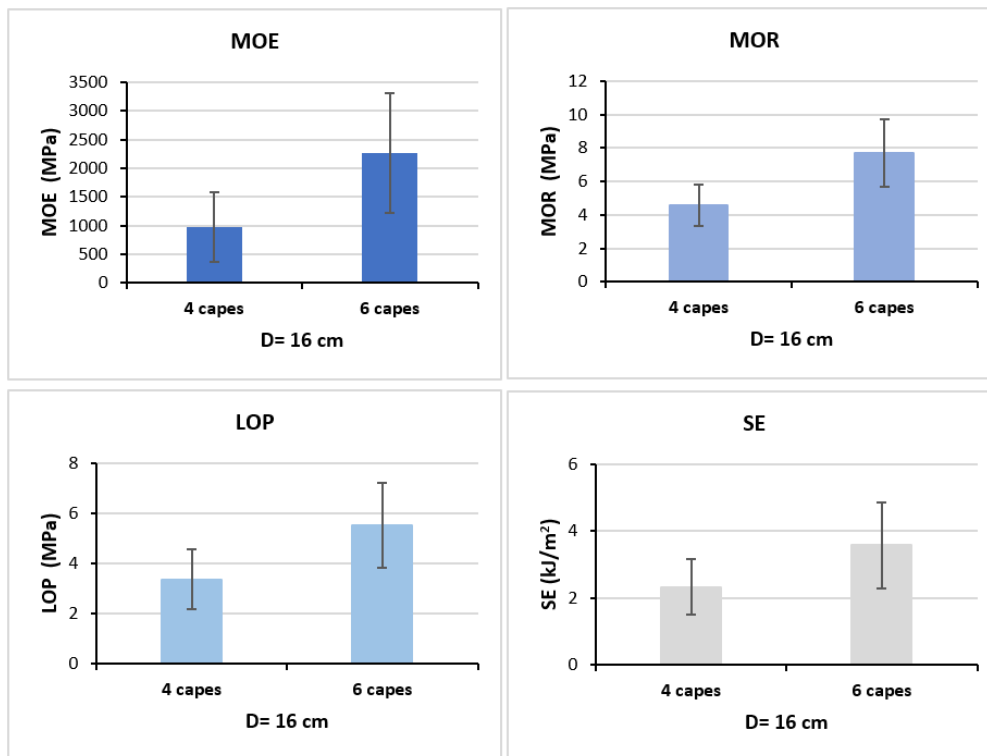
**Figura 5-2** Mitjanes obtingudes per a les peces pels assaigs de flexió de diàmetre 9 cm. Les línies d'error indiquen les desviacions estàndards del grup.

La **Taula 5-2**, recull els resultats obtinguts amb el test de Tukey. Com s'ha pogut observar anteriorment, les mitjanes per a les plaques amb reforç de sis capes de no teixits han estat superiors que per a les de 4 capes. En totes els paràmetres, s'han trobat diferències significatives entre el nombre de capes excepte en el MOE.

**Taula 5-2** Resultats obtinguts de l'ANOVA i la comparativa amb el test de Tukey per a les peces de D=9 cm. Les mitjanes que no tenen la mateixa lletra són significativament diferents.

Paràmetre	4 capes	6 capes
MOE (MPa)	166,4 <sup>a</sup>	167,3 <sup>a</sup>
MOR (MPa)	1,54 <sup>b</sup>	2,18 <sup>a</sup>
LOP (MPa)	1,15 <sup>b</sup>	1,54 <sup>a</sup>
SE (kJ/m <sup>2</sup> )	1,65 <sup>b</sup>	3,43 <sup>a</sup>

La següent figura (**Figura 5-3**) correspon a les peces de diàmetre 16 i també s'observa un creixement en les mitjanes en funció a l'augment del nombre de capes. En el cas del mòdul elàstic, la peça amb sis capes té una MOE que duplica al de les quatre capes.



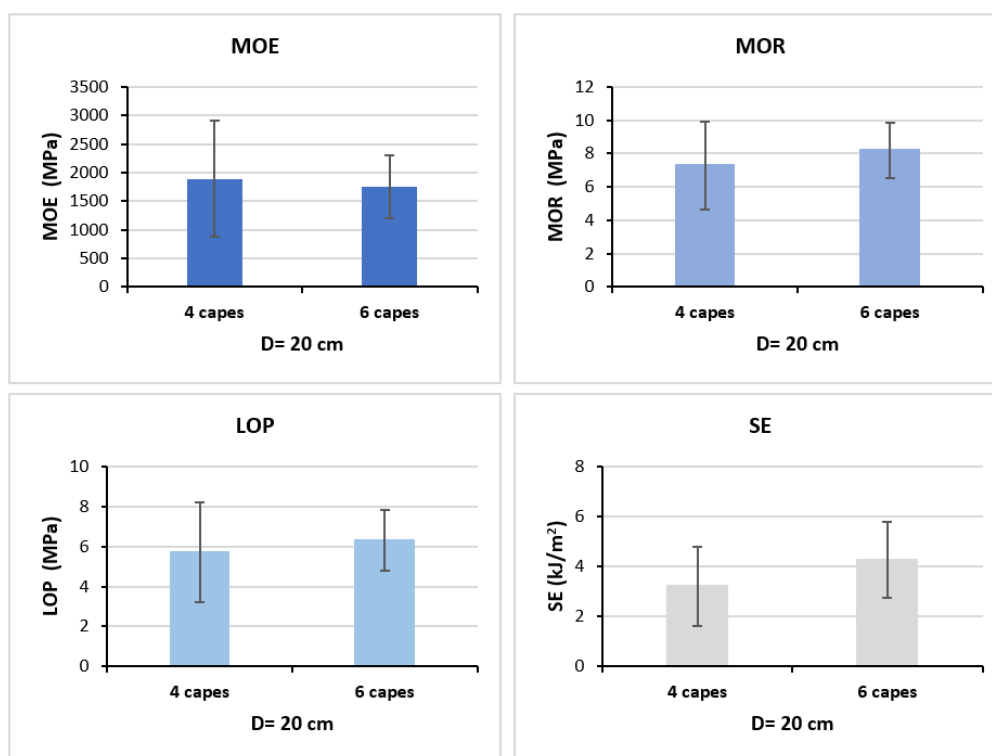
**Figura 5-3** Mitjanes obtingudes per a les peces pels assaigs de flexió de diàmetre 16 cm. Les línies d'error indiquen les desviacions estàndards del grup.

En quant a l'anàlisi amb l'ANOVA i el Test de Tukey (**Taula 5-3**), s'observen diferències significatives en tots els paràmetres, el que ens indica que existeixen diferències entre les dues peces segons el nombre de capes.

**Taula 5-3** Resultats obtinguts de l'ANOVA i la comparativa amb el test de Tukey per a les peces de D=16 cm. Les mitjanes que no tenen la mateixa lletra són significativament diferents.

Paràmetre	4 capes	6 capes
MOE (MPa)	970 <sup>b</sup>	2261 <sup>a</sup>
MOR (MPa)	4,59 <sup>b</sup>	7,68 <sup>a</sup>
LOP (MPa)	3,36 <sup>b</sup>	5,52 <sup>a</sup>
SE (kJ/m <sup>2</sup> )	2,34 <sup>b</sup>	3,58 <sup>a</sup>

En el cas de les peces amb un diàmetre de 20 cm (**Figura 5-4**), en tots els paràmetres es veu una tendència de creixement a excepció del MOE, en concret les peces de quatre capes té un mòdul d'elasticitat de 144 MPa més gran que el de sis capes.



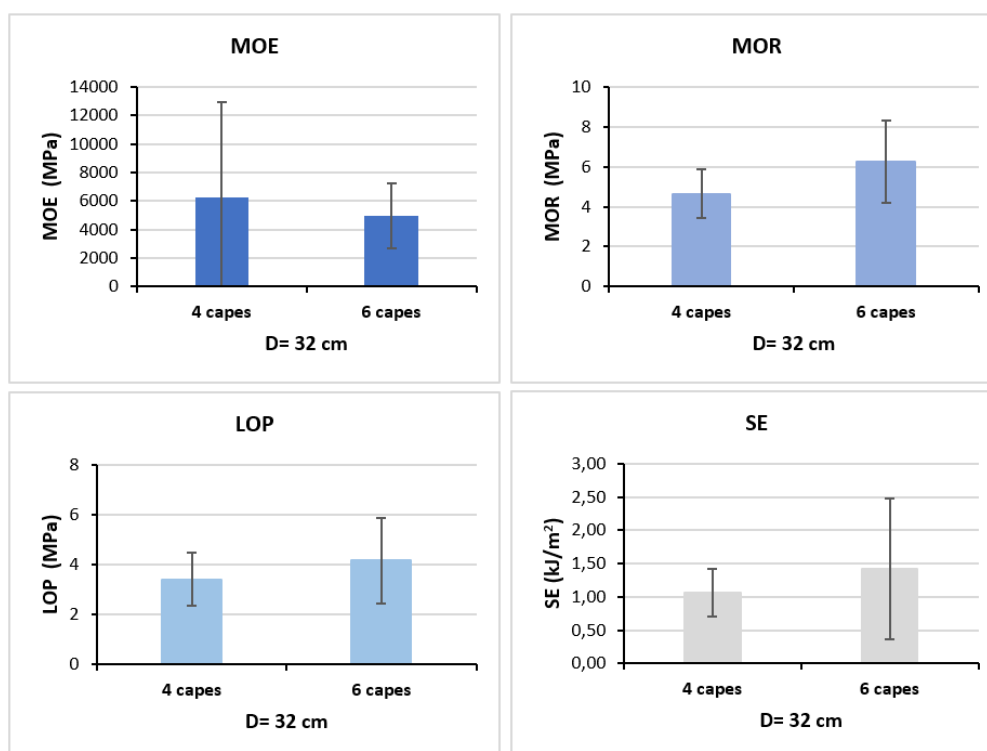
**Figura 5-4** Mitjanes obtingudes per a les peces pels assaigs de flexió de diàmetre 20 cm. Les línies d'error indiquen les desviacions estàndards del grup.

Com es pot veure a la **Taula 5-4** i a l'anterior figura, les plaques amb reforç de sis capes de no teixit tenen mitjanes superiors, excepció del MOE. No obstant, el test de Tukey mostra que no hi ha diferències significatives entre 4C i 6C en cap dels paràmetres mecànics.

**Taula 5-4** Resultats obtinguts de l'ANOVA i la comparativa amb el test de Tukey per a les peces de D=20 cm. Les mitjanes que no tenen la mateixa lletra són significativament diferents.

Paràmetre	4 capes	6 capes
MOE (MPa)	1890 <sup>a</sup>	1746 <sup>a</sup>
MOR (MPa)	7,28 <sup>a</sup>	8,20 <sup>a</sup>
LOP (MPa)	5,72 <sup>a</sup>	6,31 <sup>a</sup>
SE (kJ/m <sup>2</sup> )	3,21 <sup>a</sup>	4,28 <sup>a</sup>

En aquest últim diàmetre de 32 cm, només s'observa una tendència decreixent al MOE com en l'anterior diàmetre (**Figura 5-5**). En els altres tres paràmetres hi ha un creixement.



**Figura 5-5** Mitjanes obtingudes per a les peces pels assaigs de flexió de diàmetre 32 cm. Les línies d'error indiquen les desviacions estàndards del grup.

D'altra banda, existeixen diferències significatives en tots els paràmetres excepte en el LOP (**Taula 5-5**).

**Taula 5-5** Resultats obtinguts de l'ANOVA i la comparativa amb el test de Tukey per a les peces de D=32 cm. Les mitjanes que no tenen la mateixa lletra són significativament diferents.

Paràmetre	4 capes	6 capes
MOE (MPa)	6254,01 <sup>b</sup>	4959,26 <sup>a</sup>
MOR (MPa)	4,65 <sup>b</sup>	6,23 <sup>a</sup>
LOP (MPa)	3,41 <sup>a</sup>	4,16 <sup>a</sup>
SE (kJ/m <sup>2</sup> )	1,06 <sup>b</sup>	1,43 <sup>a</sup>

### 5.2.2. Comparació de la deformació entre el model i l'assaig

Per a la comparació entre els resultats de l'assaig de flexió i les simulacions es van contrastar els valors de posició entre la deformació obtinguda al programa i la real, segons el MOE introduït al WinEva. A la **Figura 5-6** es mostra dues gràfiques amb una recta de regressió, a on al tram elàstic la  $R^2$  és 0,95 i al tram de la força màxima la  $R^2$  és 0,98.

En els dos trams, els coeficients de determinació són molt propers a 1, indicant que el model lineal ajustat descriu de forma satisfactòria una forta relació entre els dos resultats. Per consegüent, validant el valor del MOE en els trams.



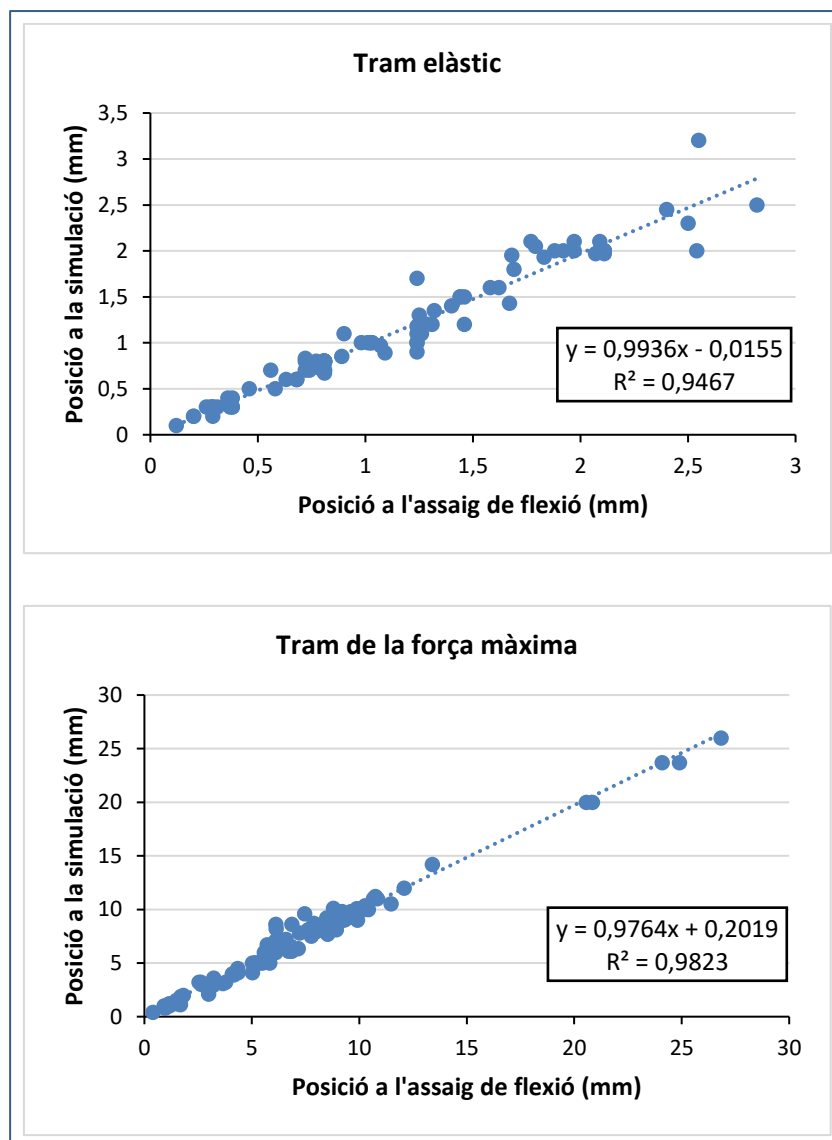


Figura 5-6 Relació entre els resultats de posició a l'assaig i a la simulació.

### 5.2.3. Moments i tensions de les simulacions

La Taula 5-6 recull les mitjanes dels moments generats en les simulacions dutes a terme al WinEva i les tensions màximes calculades amb les desviacions estàndard. Es pot observar que amb un major nombre de capes augmenta tant el valor del moment com el de tensió. La peça amb la tensió mitjana més gran ha estat la 6C-20 amb 13,53 MPa. Mentre que la peça amb el valor més baix ha estat la 4C-9 amb 1,22 MPa.

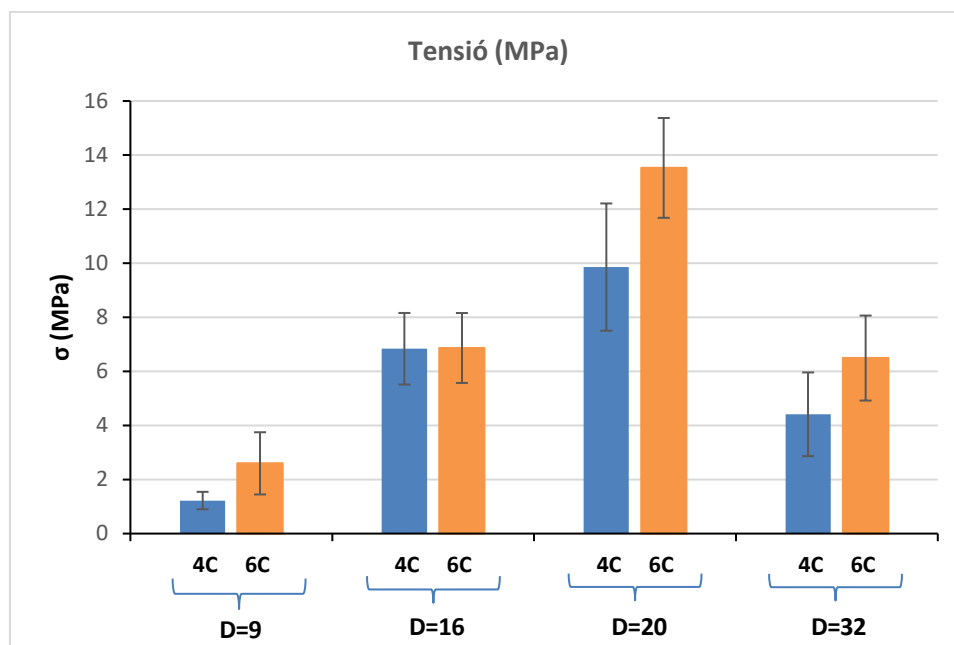
A les peces d'un diàmetre 9, la de sis capes de no teixit presenta el doble de tensió que la de quatre capes. En canvi, la diferència entre capes de les dues peces de diàmetre 16, no ha estat molt apreciable, ja que la de 6C només és un 3% més gran que la de 4C. Les peces de diàmetre 20, la 6C és superior a la 4C, amb una diferència de 3,67 MPa. I les peces de diàmetre 32, la 6C és també superior a la 4C, amb una diferència de 2,08 MPa.

**Taula 5-6** Moments i tensions màximes de les provetes.

<b>Proveta</b>	<b>M (kN·m)*</b>	<b><math>\sigma_{\text{màx}}</math> (MPa)</b> (N $\pm$ SD)
4C-9	0,0010	1,22 $\pm$ 0,32
6C-9	0,0036	2,60 $\pm$ 1,15
4C-16	0,0067	6,84 $\pm$ 1,32
6C-16	0,013	6,87 $\pm$ 1,29
4C-20	0,0087	9,86 $\pm$ 2,35
6C-20	0,023	<b>13,53 <math>\pm</math> 1,85</b>
4C-32	0,0044	4,41 $\pm$ 1,55
6C-32	0,0072	6,49 $\pm$ 1,57

\*La SD és <0,001

A més a més, a la **Figura 5-7** es mostren els mateixos resultats que a la taula anterior però amb un gràfic de barres. Aquí, es pot observar la clara tendència d'augment de tensió del diàmetre 9 al 20: de més petit al més gran, tant en les peces de quatre capes com les de sis capes. Però, les peces de diàmetre 32 han presentat valors de tensió menors a les de 20 i 16. Sent les peces de diàmetre 20, les que han donat els valors de tensió més gran en conjunt de tots els diàmetres.



**Figura 5-7** Mitjanes de tensió obtingudes per a les provetes segons el seu diàmetre. Les línies d'error a les barres mostren la desviació estàndard del grup.

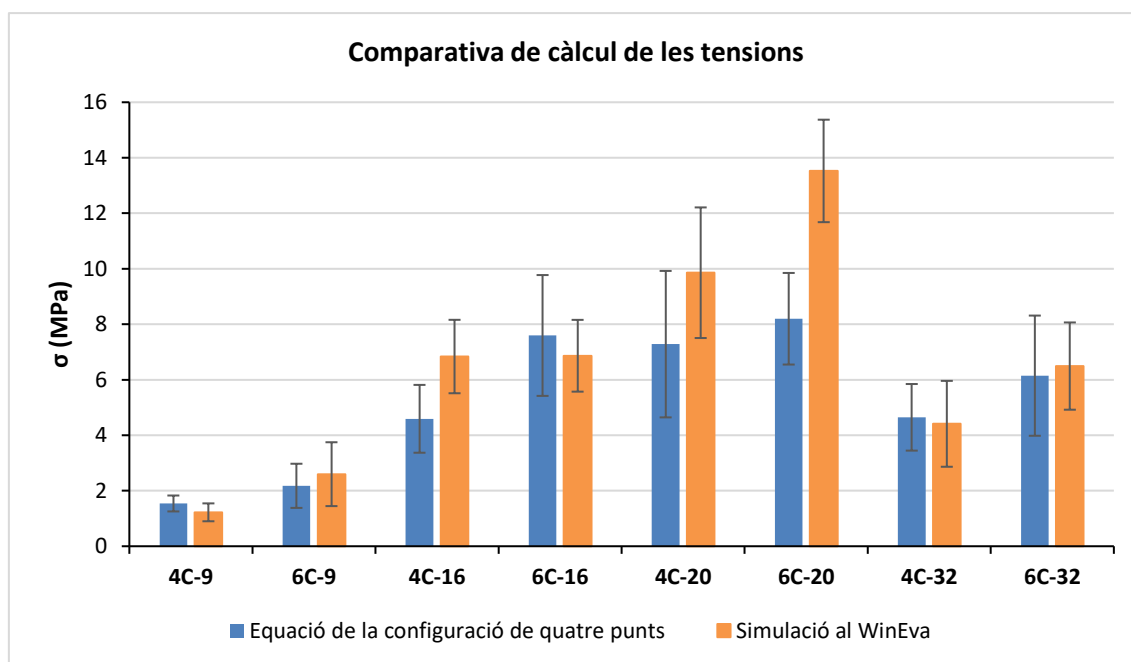
Com es pot veure tant al gràfic anterior com a la **Taula 5-7**, els resultats del test de Tukey revelen que existeixen diferències significatives entre les peces tant en funció del nombre de capes com en diàmetre.

**Taula 5-7** Resultats obtinguts de l'ANOVA i la comparativa amb el test de Tukey entre les peces de quatre capes i entre les peces de sis capes. Les mitjanes que no tenen la mateixa lletra són significativament diferents.

Nº capes	Diàmetre			
	D= 9 cm	D= 16 cm	D= 20 cm	D=32 cm
<b>4 capes</b>	1,22 <sup>d</sup>	6,84 <sup>b</sup>	9,86 <sup>a</sup>	4,41 <sup>c</sup>
<b>6 capes</b>	2,60 <sup>c</sup>	6,87 <sup>b</sup>	13,53 <sup>a</sup>	6,49 <sup>b</sup>

#### 5.2.4. Comparativa de càlcul de les tensions màximes

Per a avaluar les diferències entre els resultats de les tensions màximes obtingudes a partir de l'equació de la configuració de quatre punts (**Equació (4-2)**) i les simulacions al WinEva, en el gràfic de barres de la **Figura 5-8**, es pot veure que en la gran majoria de casos els valors de les simulacions són més grans. En destaca la peça 6C-20, ja que existeix una diferència del 65% entre la tensió calculada en la simulació i l'equació.



**Figura 5-8** Mitjanes de les tensions màximes obtingudes amb l'equació de la configuració de quatre punts i les simulacions al WinEva. Les línies d'error indiquen les desviacions estàndards del grup.

El test de Tukey (**Taula 5-8**) indica que en quatre peces (4C-9, 4C-16, 4C-20 i 6C-20) els valors de les tensions són significativament superiors en les simulacions que en el càlcul de les equacions. En concret les peces de diàmetre 20, tant les de quatre capes com de sis, els dos valors han donat significativament diferents. Mentre que en les peces de diàmetre 32, els dos tipus han donat significativament iguals.

**Taula 5-8** Valors de tensió màxima obtingudes amb l'equació de la configuració de quatre punts i en les simulacions. Les mitjanes que no tenen la mateixa lletra són significativament diferents.

Proveta	Tensió obtinguda amb l'equació (MPa)	Tensió obtinguda amb la simulació (MPa)
	(N±SD)	(N±SD)
4C-9	1,54 <sup>a</sup> ± 0,28	1,22 <sup>b</sup> ± 0,32
6C-9	2,18 <sup>a</sup> ± 1,15	2,60 <sup>a</sup> ± 1,15
4C-16	4,59 <sup>b</sup> ± 1,22	6,84 <sup>a</sup> ± 1,32
6C-16	7,60 <sup>a</sup> ± 2,18	6,87 <sup>a</sup> ± 1,29
4C-20	7,28 <sup>b</sup> ± 2,64	9,86 <sup>a</sup> ± 2,35
6C-20	8,20 <sup>b</sup> ± 1,65	13,53 <sup>a</sup> ± 1,85
4C-32	4,65 <sup>a</sup> ± 1,20	4,41 <sup>a</sup> ± 1,55
6C-32	6,14 <sup>a</sup> ± 2,17	6,49 <sup>a</sup> ± 1,57

### 5.2.5. Observacions del trencament de les peces

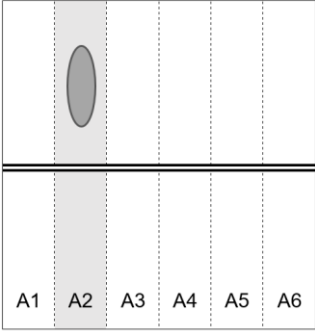

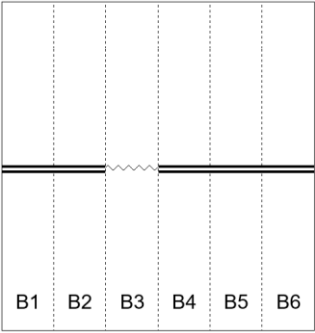

Per a avaluar les fissures generades a les peces durant l'assaig de flexió es presenten esquemes representatius de la morfologia de trencament. S'ha utilitzat el següent codi per a fer els esquemes:

- Les línies rectes en negreta representen trencaments profunds.
- Les línies en ziga-zaga representen trencaments amb aquesta forma.
- Les línies discontinües representen trencament superficials.
- Les separacions entre dues parts d'una mateixa proveta representen un trencament total.

Cal destacar que totes les fissures en diagonal que s'ha dibuixat no presenten cap grau concret de trencament, aquests, només són una aproximació.





La **Taula 5-9** mostra que les provetes de diàmetre 9 amb 4C, generalment tenen un únic trencament profund al mig. Es destaca la proveta 4C-9-A2 té un inflament a la part superior i 4C-9-B2 té un trencament en ziga-zaga.

**Taula 5-9** Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 4C-9-A i 4C-9-B.

Proveta	Esquema	Fotografia
<p><b>4C-9-A</b></p>		
<p><b>4C-9-B</b></p>		

En canvi, amb 6C (Taula 5-10), les provetes presenten múltiples trencaments superficials i un trencament profund al mig.

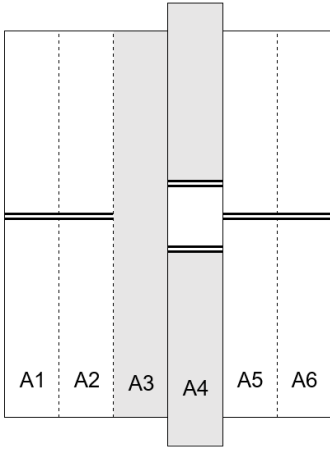

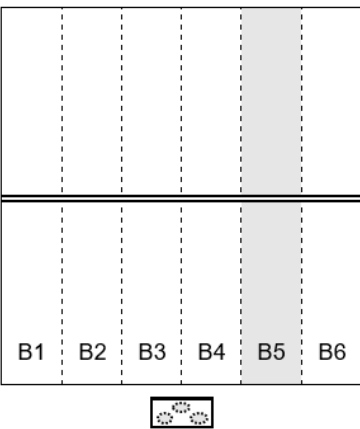

**Taula 5-10** Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 6C-9-C i 6C-9-D.

Proveta	Esquema	Fotografia
6C-9-C	 <p>C1 C2 C3 C4 C5 C6</p>	
6C-9-D	 <p>D1 D2 D3 D4 D5 D6</p>	

La **Taula 5-11** mostra que en general existeix un únic trencament profund, recte i al mig en les provetes de 4C de les peces de diàmetre 16. Amb algunes excepcions:

- 4C-16-A3 té múltiples trencaments superficials.
- 4C-16-A4 té un trencament complet.
- 4C-16-B5 té buits dins (errors instrumentals).

**Taula 5-11** Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 4C-16-A i 4C-16-B.

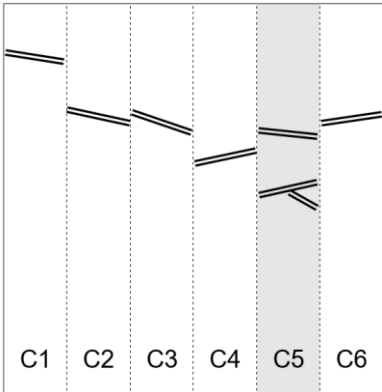

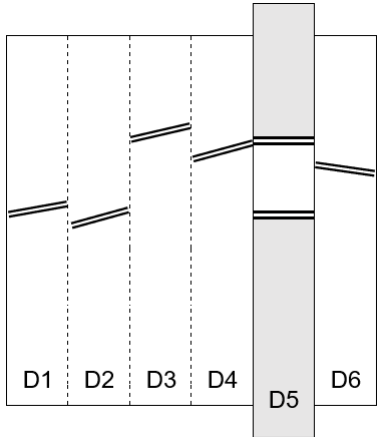

Proveta	Esquema	Fotografia
<b>4C-16-A</b>	 <p style="text-align: center;">A1 A2 A3 A4 A5 A6</p>	
<b>4C-16-B</b>	 <p style="text-align: center;">B1 B2 B3 B4 B5 B6</p>	



Pel que fa a les provetes de les peces de 6C de diàmetre 16 (**Taula 5-12**), es mostren un únic trencament profund, en diagonal i als extrems. Cal destacar algunes provetes:

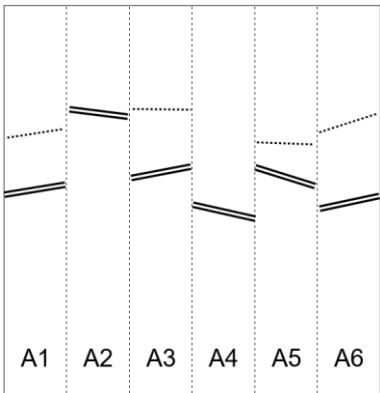
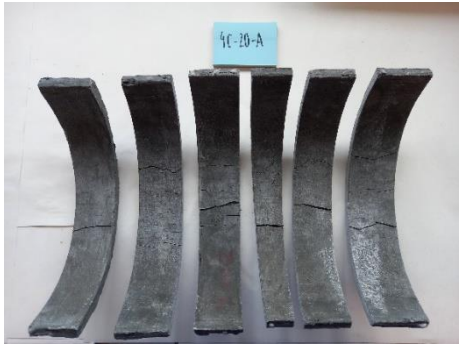
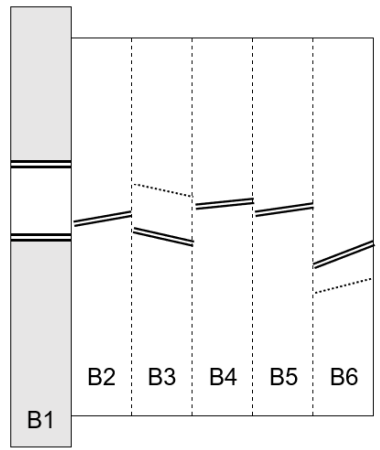

- 6C-16-C5 té múltiples trencaments profunds.
- 6C-16-D5 té un trencament complet.
- 6C-16-D3 es va trencar manualment per a observar-la en la lupa.

**Taula 5-12** Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 6C-16-C i 6C-16-D.

Proveta	Esquema	Fotografia
6C-16-C		
6C-16-D		

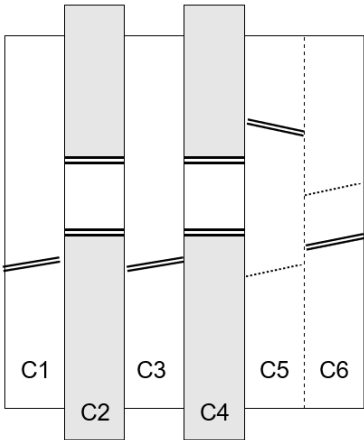

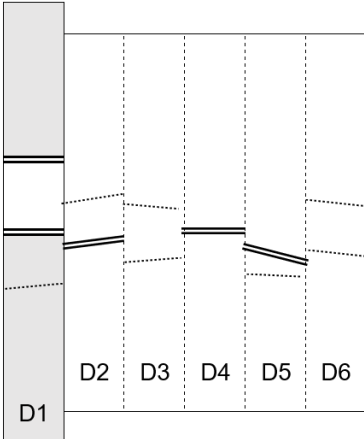

Les provetes de les peces de 4C de diàmetre 20 (**Taula 5-13**), mostren múltiples trencaments superficials amb un únic trencament profund, diagonals als extrems. Excepte la proveta 4C-20-B1 que té un trencament complet.

**Taula 5-13** Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 4C-20-A i 4C-20-B.

Proveta	Esquema	Fotografia
4C-20-A		
4C-20-B		

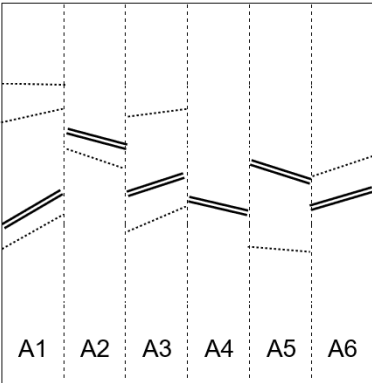

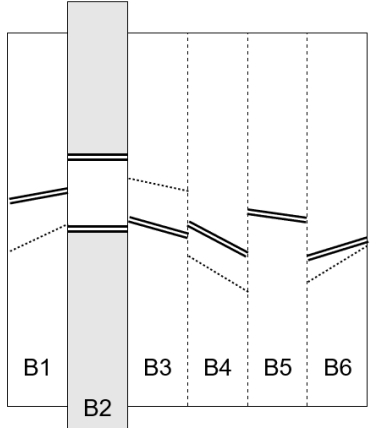

La mostra que les peces de 6C de diàmetre 20 (**Taula 5-14**), presenten múltiples trencaments superficials, en diagonal i als extrems. Excepte les provetes 6C-20-C2, 6C-20-C4 i 6C-20-D1 que tenen un trencament complet.

**Taula 5-14** Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 6C-20-C i 6C-20-D.

Proveta	Esquema	Fotografia
6C-20-C		
6C-20-D		

Les provetes de 4C de diàmetre 32 (**Taula 5-15**) tenen múltiples trencaments superficials amb un únic trencament, en diagonal al mig. La proveta 4C-32-B1 té un trencament complet.

**Taula 5-15** Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 4C-32-A i 4C-32-B.

Proveta	Esquema	Fotografia
4C-32-A		
4C-32-B		

Per últim, la **Taula 5-16** mostra que les provetes de 6C de diàmetre 32, tenen múltiples trencaments amb un únic trencament profund en diagonal a l'extrem. La proveta 6C-32-C1 té un trencament complet.

**Taula 5-16** Esquemes i fotografies dels trencaments de les provetes 6C-32-C i 6C-32-D.

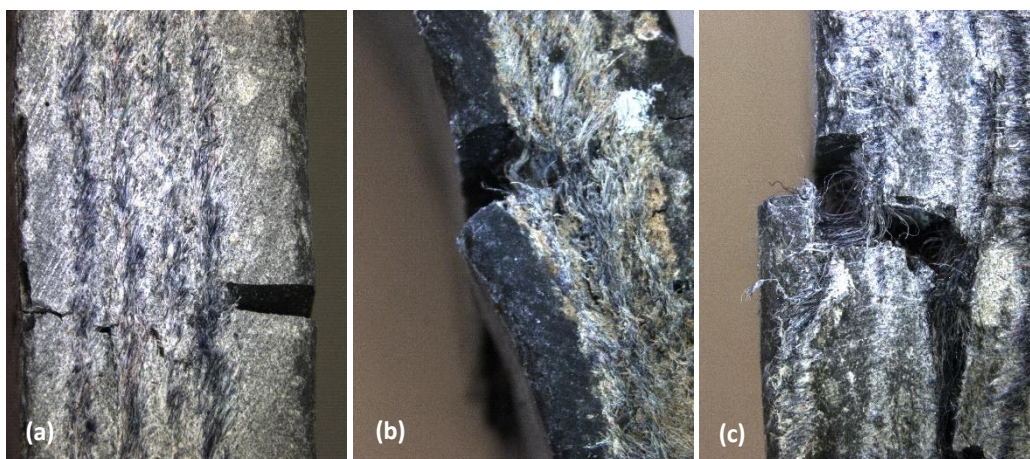
Proveta	Esquema	Fotografia
6C-32-C		
6C-32-D		

Globalment, s'observa una tendència de trencament cap a les provetes més externes que conformen la placa. Així mateix, les peces amb un diàmetre més gran ( $D=20$  i  $D=32$  cm) presenten més quantitat de fissures, però superficials. Mentre que les peces amb diàmetres més petits ( $D=9$  i  $D=16$  cm), predisposen a tenir un únic trencament profund.

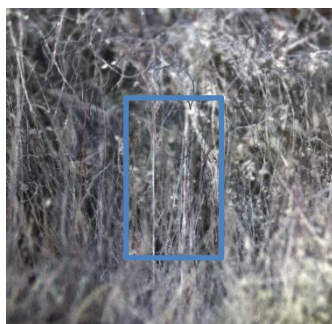
### 5.2.6. Observacions amb la lupa

Gràcies a les observacions amb la lupa es va poder observar la forma de trencament de les provetes i la forma de les dues fibres dins del material.

A la **Figura 5-9** es poden veure tres tipologies de trencament de la part inferior de les peces. La primera mostra la fissura inicial que presenten les peces amb l'aplicació d'una força: el trencament del ciment. S'observa com aquesta capa externa ha proporcionat no només fermesa al material sinó també una protecció per a les fibres interiors. A la segona es contempla un primer trencament de fibres a on les de residu tèxtil estan completament trencades i algunes fibres de lli encara romanen senceres (**Figura 5-10**). L'última mostra un trencament total tant de la capa de ciment com de les capes de no teixit.



**Figura 5-9** Morfologia de trencament per la part inferior de la placa: (a) Trencament de la primera capa de ciment (20x); (b) Primer trencament profund de fibres (20x); (c) Trencament de ciment i de fibres (20x). Font: Pròpia



**Figura 5-10** Estirament de les fibres de lli (20x). Font: Pròpia

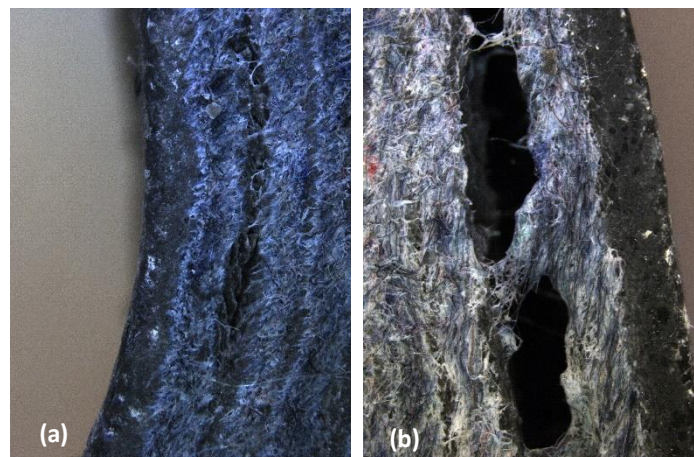
La **Figura 5-11** mostra les fissures generades a la part superior de la placa, concretament la que està en contacte directe amb els rodets durant l'assaig. Són trencaments totalment superficials i en molts casos part del ciment es va desprendre a causa del fregament amb els rodets.



**Figura 5-11** Trencaments de la part superior de les peces (20x).

Font: Pròpia

A la **Figura 5-12** es pot observar anomalies dins de la proveta 4C-9-A1. Existeixen buits d'aire entre les capes de no teixit i ciment causats per errors instrumentals durant l'elaboració de les peces. Segurament l'origen d'aquest error es deu a una falta de penetració entre ciment-fibra.



**Figura 5-12** Buits d'aire entre les capes de no teixit i ciment:

(a) 20x; (b) 50x. Font: Pròpia

## 6. Discussió

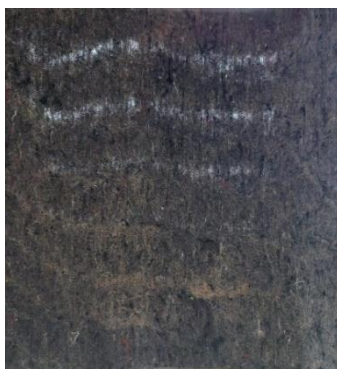
### 6.1. No teixit

Els resultats ens indiquen que l'orientació preferencial de les fibres per a elaborar les napes és en direcció màquina. Per això, durant l'elaboració de les peces de material compost és necessari intercalar les dues orientacions per intentar que tinguin les mateixes propietats en les dues direccions i eliminar una preferencial al reforç del material compost.

Comparant amb l'article *Characterization of a textile waste nonwoven fabric reinforced cement composite for non-structural building components* de P. Sadrolodabae et al. (2021), qui també van fer un estudi amb el mateix residu tèxtil que aquest treball, però amb una composició diferent: 31% de polièster i 69% de cotó, van obtenir a la caracterització del material una força màxima suportada de 2 N/g, en el nostre cas va ser de 1,9 N/g, ambdós resultats són molt semblants.

Si es contrasta amb els valors de força màxima dels no teixits fets només de lli, aquest és més de dues vegades més alt que el de TW. La raó podria ser perquè les fibres del residu tèxtil són curtes i les de lli són llargues i homogènies<sup>[30]</sup>.

Cal mencionar que tot i el procés productiu de les napes intenta garantir una certa conformació i unió entre les fibres, si s'observa el no teixit a contraluz, existeixen algunes parts translúcides (**Figura 6-1**), el que ha pogut derivar posteriorment afectacions tant a la caracterització del no teixit com a les propietats mecàniques del material compost.



**Figura 6-1** Transparència del no teixit.

Font: Pròpia



Per tant, és necessari profunditzar en millorar el procés d'elaboració dels no teixits i la seva regularitat per tal d'evitar buits entre fibres.

## **6.2. Caracterització de les propietats mecàniques de les peces**

Les peces en funció del nombre de capes i del seu diàmetre han mostrat diferències significatives entre elles. Respecte a les corbes de comportament, s'ha observat que les peces de diàmetre 9 no tenen un període elàstic molt gran, però la seva deformació és llarga. Quant a les de diàmetre 16, el període elàstic és més perpendicular i presenta una poca quantitat de trencaments al llarg de l'assaig. Pel que fa a les peces de diàmetre 20, la de quatre capes és la que més fissures ha patit i la de sis capes és la que presenta un període elàstic gran amb el màxim de tensió d'entre totes les peces. Finalment, les de diàmetre 32, tant la de quatre com la de sis capes són les que tenen el període elàstic més gran, però també les que tenen la menor deformació.

Respecte als quatre paràmetres estudiats, majoritàriament tant en el MOE, MOR, LOP i SE tenen una tendència clara de creixement a mesura que s'augmenta el nombre de capes de no teixit del material compost.

En general, ha existit una gran dispersió de resultats, encara que s'hagi dut a terme dues repeticions de la mateixa placa. Aquesta variabilitat ha pogut provocar afectacions en els paràmetres o en el propi comportament del material. L'origen d'aquestes desviacions poden provenir de:

- a) El nombre limitat de repeticions de l'experiment.
- b) La poca homogeneïtat del no teixit.
- c) La fabricació manual de les peces pot fer que algunes diferències en el procediment d'elaboració derivin a posteriors grans diferències en el material.
- d) Els buits observats en la proveta de diàmetre 9.
- e) No haver fet un control del temps de l'extracció d'aigua durant el buit.

Comparant els resultats amb l'article mencionat prèviament, en l'estudi de P. Sadrolodabae et al., les plaques planes amb sis capes de no teixit van presentar un MOR mitjà de 15,5 MPa; mentre que el MOR més elevat obtingut entre les peces assajades ha estat la de diàmetre 20 cm amb 13,53 MPa (en la simulació). Quant al LOP, l'estudi va obtenir 4,6 MPa, i en aquest cas de 6,31 MPa.

També es va observar que contra més gran era el diàmetre, més esquerdes superficials havien sorgit durant l'assaig de flexió. Però amb un grau de curvatura més petit, la fissió era més profunda i única. Així mateix, es va determinar que en la majoria de casos les esquerdes van sorgir a les provetes més externes de la peça. Això pot ser degut al fet que les fibres es van concentrar al mig i als extrems no hi havia la mateixa quantitat de no teixit.

Cal destacar, que durant el procés d'elaboració del material, es va intentar sempre tapar totes les possibles esquerdes que sorgien quan es disposava la placa tova a sobre del tub o l'estructura que li proporcionava el diàmetre corresponent.

### 6.3. Simulacions

Els resultats de les tensions durant l'assaig de flexió difereixen segons la metodologia de càlcul aplicada. Els valors han donat diferències significatives segons si s'ha utilitzat l'equació de configuració de quatre punts o la simulació numèrica amb el programa de càlcul d'estructures, excepte en les peces de diàmetre 32. La similitud dels valors en aquest darrer cas es deu a que els graus de curvatures grans tendeixen a ser molt semblants a una placa plana.

No obstant, en general les mitjanes de les tensions màximes obtingudes en les simulacions tendeixen a ser més grans que les calculades amb l'equació. Aquesta diferència pot veure's originada perquè el WinEva treballa amb l'estructura geomètrica real de les peces mentre que l'equació només és adaptada a plaques planes.

## Conclusions

En aquest treball s'han avaluat les característiques mecàniques de peces corbades de ciment reforçat amb residus tèxtils. S'ha realitzat un assaig de flexió al material per a poder comparar les propietats mecàniques de les peces segons el nombre de capes de no teixit i el diàmetre.

A continuació, s'exposen les principals conclusions i els resultats obtinguts:

- L'orientació preferencial de les fibres de residu tèxtil en els no teixits ha estat en direcció màquina. Resulta possible fer no teixits per al reforç de materials compostos amb residu tèxtils, però és important incorporar fibres més llargues (com les fibres vegetals emprades en aquest cas), per tal d'assegurar la resistència de la tela resultant.
- Respecte al nombre de capes de no teixit, els resultats han variat segons la quantitat de capes. En tots els casos, les peces amb sis capes han presentat mitjanes majors en les propietats mecàniques que en les de quatre. Tot i que en alguns casos la dispersió de resultats ha estat gran, en totes les peces excepte les de diàmetre 20, han donat diferències significatives.
- Pel que fa al grau de curvatura de les peces, existeixen diferències segons el diàmetre de les peces. En aquest cas, si s'ha vist una diferència significativa entorn als resultats de l'assaig de flexió. Les peces de diàmetre 9 han estat les que han proporcionat valors menors, seguides de les de diàmetre 32, diàmetre 16 i les que majors resultats han donat han estat les de diàmetre 20.
- Les simulacions amb el WinEva han proporcionat la possibilitat de realitzar un estudi més realista vers l'estructura geomètrica real de la peça.
- Les tensions màximes calculades en les simulacions numèriques han estat superiors a les de l'equació de configuració de quatre punts. A on la majoria de casos les diferències han estat significatives.

- Quant a la forma de trencament de les provetes, s'ha detectat que les que conformen els extrems de la peça són les que tenen més fissures a causa de la concentració de no teixit al mig de la peça. A més, quan el grau de curvatura és més petit, les fractures són més profundes i amb un de més gran, els trencaments són superficials.

Com a conclusió general, aquest treball de fi de grau ha ofert la possibilitat d'estudiar l'aplicació del residu tèxtil i fibres vegetals com a reforç en un material cimentós. Els resultats ens indiquen que amb una metodologia i una tecnologia més acurada es podrien obtenir millors prestacions d'aquest material. Ens ha corroborat que existeix la possibilitat de poder elaborar plaques corbades que ofereixen propietats mecàniques semblants a les plaques planes ja estudiades prèviament.

Per tant, aquest estudi permet l'oportunitat en un futur de dissenyar a gran escala estructures que estiguin conformades per formes curvilínies amb materials més sostenibles i reciclats.

## Bibliografia

### Referències bibliogràfiques

- [1] Spence, R. i Mulligan, H., 1995. Sustainable development and the construction industry. *Habitat International*, vol. 19, no. 3, pp. 279-292. ISSN 0197-3975. DOI 10.1016/0197-3975(94)00071-9.
- [2] Why The Building Sector? – Architecture 2030. [en línia]. [Consulta: 6 maig 2022]. Disponible a: <https://architecture2030.org/why-the-building-sector/>.
- [3] What is Embodied Carbon? - CarbonCure. [en línia], 2020. [Consulta: 6 maig 2022]. Disponible a: <https://www.carboncure.com/concrete-corner/what-is-embodied-carbon/>.
- [4] 2021 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. [en línia]. [Consulta: 10 maig 2022]. Disponible a: [www.globalabc.org](http://www.globalabc.org).
- [5] European Commission, "Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions: A roadmap towards a competitive low carbon economy in 2050," European Commission, Brussels, 2011. [en línia]. Disponible a: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0112:FIN:EN:PDF>.
- [6] Florez, L., Castro, D. i Irizarry, J., 2013. Measuring sustainability perceptions of construction materials. *Construction Innovation*, vol. 13, no. 2, pp. 217-234. ISSN 14714175. DOI 10.1108/14714171311322174/FULL/XML.
- [7] CSHUB@MIT. Quantifying building life cycle environmental impacts. [en línia], 2016. [Consulta: 10 maig 2022]. Disponible a: <http://cshub.mit.edu/>.

- [8] Global Alliance for Buildings and Construction 2020 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. [en línia], 2020. [Consulta: 10 maig 2022]. Disponible a: <http://www.un.org/Depts/>.
- [9] Behera, M., Bhattacharyya, S.K., Minocha, A.K., Deoliya, R. i Maiti, S., 2014. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 501-516. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.07.003.
- [10] Andrew, R.M., 2019. Global CO2 emissions from cement production, 1928-2018. *Earth Syst. Sci. Data* [en línia], vol. 11, pp. 1675-1710. [Consulta: 9 maig 2022]. DOI 10.5194/essd-11-1675-2019. Disponible a: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>.
- [11] Naidu, P.V. i Pandey, P.K., 2014. Replacement of Cement in Concrete. *International Journal of Environmental Research and Development* [en línia], vol. 4, no. 1, pp. 91-98. [Consulta: 9 maig 2022]. Disponible a: <http://www.ripublication.com/ijerd.htm>.
- [12] Wang, B., Yan, L., Fu, Q. i Kasal, B., 2021. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 171. ISSN 18790658. DOI 10.1016/J.RESCONREC.2021.105565.
- [13] Sadrolodabae, P., Claramunt, J., Ardanuy, M. i De La Fuente, A., 2021. A Textile Waste Fiber-Reinforced Cement Composite: Comparison between Short Random Fiber and Textile Reinforcement. *Materials*, vol. 14, Page 3742. [en línia]. [Consulta: 2 març 2022]. ISSN 1996-1944. DOI 10.3390/MA14133742. Disponible a: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/13/3742/htm>.
- [14] Alexander, A.E. i Shashikala, A.P., 2020. Sustainability of Construction with Textile Reinforced Concrete-A State of the Art. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [en línia], vol. 936, no. 1, pp. 12006. ISSN 1757-8981. DOI 10.1088/1757-899x/936/1/012006. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/936/1/012006>.

- [15] Ardanuy, M., Claramunt, J. i Toledo Filho, R.D., 2015. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials*, vol. 79, pp. 115-128. ISSN 09500618. DOI 10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.01.035.
- [16] The impact of textile production and waste on the environment (infographic) | News | European Parliament. [en línia]. [Consulta: 9 maig 2022]. Disponible a: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20201208STO93327/the-impact-of-textile-production-and-waste-on-the-environment-infographic>.
- [17] Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T. i Gwilt, A., 2020. The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 1, no. 4, pp. 189–200. DOI 10.1038/s43017-020-0039-9.
- [18] Textiles in Europe's circular economy — European Environment Agency. [en línia]. [Consulta: 11 maig 2022]. Disponible a: <https://www.eea.europa.eu/publications/textiles-in-europes-circular-economy/textiles-in-europe-s-circular-economy>.
- [19] Lu, J.J. i Hamouda, H., 2014. Current Status of Fiber Waste Recycling and its Future. *Advanced Materials Research* [en línia], vol. 878, pp. 122-131. [Consulta: 11 maig 2022]. ISSN 1662-8985. DOI 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.878.122. Disponible a: <https://www.scientific.net/AMR.878.122>.
- [20] Ribeiro, M.C.S., Meira-Castro, A.C., Silva, F.G., Santos, J., Meixedo, J.P., Fiúza, A., Dinis, M.L. i Alvim, M.R., 2015. "Re-use assessment of thermoset composite wastes as aggregate and filler replacement for concrete-polymer composite materials: A case study regarding GFRP pultrusion wastes," *Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier, vol. 104(PB), pages 417-426.
- [21] Mohammadhosseini, H., Tahir, M.M., Mohd Sam, A.R., Abdul Shukor Lim, N.H. i Samadi, M., 2018. Enhanced performance for aggressive environments of green concrete composites reinforced with waste carpet fibers and palm oil fuel ash. *Journal of Cleaner Production*, vol. 185, pp. 252-265. ISSN 09596526. DOI 10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.051.

- [22] A.S.M. Abdul Awal, Hossein Mohammadhosseini i M. Zakaria Hossain, 2021. STRENGTH, MODULUS OF ELASTICITY AND SHRINKAGE BEHAVIOUR OF CONCRETE CONTAINING WASTE CARPET FIBER. *International Journal of Geomate*, 1441–1446.
- [23] Wang, Y., Wu, H.C. i LI, V.C., 2000. Concrete Reinforcement with Recycled fibers: A Review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, [en línia], vol. 12, no. 4, pp. 314-319. [Consulta: 1 maig 2022]. ISSN 0899-1561. DOI 10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:4(314). Disponible a: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%2908991561%282000%2912%3A4%28314%29>.
- [24] Tran, N.P., Gunasekara, C., Law, D.W., Houshyar, S., Setunge, S. i Cwirzen, A., 2021. Comprehensive review on sustainable fiber reinforced concrete incorporating recycled textile waste. *J. Sustain. Cem. Mater* [en línia], vol. 11, no. 1, pp. 41-61. [Consulta: 12 maig 2022]. ISSN 21650381. DOI 10.1080/21650373.2021.1875273. Disponible a: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/21650373.2021.1875273>.
- [25] Booya, E., Gorospe, K., Ghaednia, H. i Das, S., 2019. Free and restrained plastic shrinkage of cementitious materials made of engineered kraft pulp fibres. *Construction and Building Materials*, vol. 212, pp. 236-246. ISSN 09500618. DOI 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.03.296.
- [26] Silva, F. de A., Filho, R.D.T., Filho, J. de A.M. i Fairbairn, E. de M.R., 2010. Physical and mechanical properties of durable sisal fiber-cement composites. *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 5, pp. 777-785. ISSN 09500618. DOI 10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.10.030.
- [27] Kawashima, S. i Shah, S.P., 2011. Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, no. 2, pp. 201-208. ISSN 09589465. DOI 10.1016/J.CEMCONCOMP.2010.10.018.
- [28] Meddah, M.S. i Bencheikh, M., 2009. Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials. *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 10, pp. 3196-3205. ISSN 09500618. DOI 10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.06.017.



- [29] Sadrolodabae, P., Claramunt, J., Ardanuy, M. i De La Fuente, A., 2021. Mechanical and durability characterization of a new textile waste micro-fiber reinforced cement composite for building applications. *Case Studies in Construction Materials*, [en línea], vol. 14, pp. e00492. ISSN 2214-5095. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00492>. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521000073>.
- [30] Sadrolodabae, P., Claramunt, J., Ardanuy, M. i Fuente, A. de la, 2021. Characterization of a textile waste nonwoven fabric reinforced cement composite for non-structural building components. *Construction and Building Materials*, [en línea] vol. 276, p. 122179. ISSN 09500618. DOI 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.122179. Disponible a: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122179>.
- [31] How has curve architecture evolved with time - RTF | Rethinking The Future. [en línea]. [Consulta: 12 maig 2022]. Disponible a: <https://www.re-thinkingthefuture.com/architectural-styles/a3649-how-has-curve-architecture-evolved-with-time/>.
- [32] Rodrigo, R. G. P., 2013. La Arquitectura De Frank Gehry: Espacialidad, Envoltorio Y yuxtaposición Radical. *Módulo Arquitectura CUC* 2013, 11, 171-182.
- [33] Cabas García, M., 2015. Zaha Hadid: Fluidez de Movimiento. *Revista Arte & Diseño*. 11, 2 (jul. 2015), 14 - 20. DOI:<https://doi.org/10.15665/ad.v11i2.373>.
- [34] Homepage - Swisspearl. [en línea]. [Consulta: 12 maig 2022]. Disponible a: <https://www.swisspearl.com/>.
- [35] Real Decreto 256/2016, de 10 de junio, por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos (RC-16). Real Decreto n.º 256/2016 de 10 de junio de 2016. *Boletín Oficial del Estado* [en línea], Madrid: BOE, 25 junio 2016, no. 153, p. 45755 a 45824 [Consulta: 10 març 2022]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2016-6167>.

- [36] Cemento SUPER-DRAGON- Cementos Molins Industrial, S.A. – Cementos Molins. [en línia]. [Consulta: 1 gener 2022]. Disponible a: <https://www.cmi.cemolins.es/es/productos/super-dragon>.
- [37] Van Acolleyen, B., 2014. A Hatschek for the production of fiber cement plates. *European patent application* [en línia]. Disponible a: <https://patentimages.storage.googleapis.com/1a/b6/54/2ebb184e80af30/EP2792461A1.pdf>.
- [38] Claramunt, J., Ventura, H. i Ardanuy, M., 2018. Rheology of CAC-based cement pastes and the relationship to penetrability through nonwoven fabric reinforcements. *Cement and Concrete Composites*, vol. 94, pp. 85-93. ISSN 09589465. DOI 10.1016/J.CEMCONCOMP.2018.08.014.
- [39] Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE 198-1:2018: Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias* [en línia]. Madrid: AENOR, 2018 [Consulta: 28 febrer 2021]. Disponibles a: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060675>.
- [40] Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE 196-1:2005: Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas* [en línia]. Madrid: AENOR, 2005 [Consulta: 28 febrer 2021]. Disponibles a: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0034791>.
- [41] 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 febrer 2021]. Disponibles a: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0035467>.

- [42] 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: 24 febrer 2021]. Disponible a: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-016-0839-z>.
- [43] «WinEva». [en línia]. [Consulta: 2 maig 2022]. Disponible a: <https://wineva.upc.edu/cat/InformacioGeneral.php>.

## Annexos

### Annex A. Relació aigua-ciment de les peces

Taula A- 1 Relació aigua-ciment durant l'elaboració de les peces.

Placa	Pes teixits (g)	Ciment inicial (g)	Aigua inicial (g)	Relació aigua/ciment inicial
4C-9-A	61,32	3000	2550	0,85
4C-9-B	62,07	3000	2550	0,85
6C-9-C	92,77	3000	2550	0,85
6C-9-D	93,43	3000	2550	0,85
4C-16-A	63,91	3000	2550	0,85
4C-16-B	62,72	3000	2550	0,85
6C-16-C	93,46	3000	2550	0,85
6C-16-D	92,92	3000	2550	0,85
4C-20-A	61,33	3000	2550	0,85
4C-20-B	60,91	3000	2550	0,85
6C-20-C	93,24	3000	2550	0,85
6C-20-D	92,98	3000	2550	0,85
4C-32-A	62,12	3000	2550	0,85
4C-32-B	63,21	3000	2550	0,85
6C-32-C	93,33	3000	2550	0,85
6C-32-D	93,45	3000	2550	0,85

**Taula A- 2** Relació aigua-ciment final de les peces.

Placa	Ciment sobrant (g)	Aigua sobrant (buit + compressió) (g)	Ciment a la peça (g)	Aigua a la peça (g)	Relació aigua/ciment final
4C-9-A	1461,3	712,3	1538,7	1837,7	1,19
4C-9-B	1385,6	652,34	1614,4	1897,66	1,18
6C-9-C	1285,65	660,34	1714,35	1889,66	1,10
6C-9-D	1312,15	534,82	1687,85	2015,18	1,19
4C-16-A	1345,12	560,99	1654,88	1989,01	1,20
4C-16-B	1454,32	514,44	1545,68	2035,56	1,32
6C-16-C	1375,68	502,55	1624,32	2047,45	1,26
6C-16-D	1331,58	475,5	1668,42	2074,5	1,24
4C-20-A	1340,5	899,96	1659,5	1650,04	0,99
4C-20-B	1382,21	694,38	1617,79	1855,62	1,15
6C-20-C	1355,8	401,85	1644,2	2148,15	1,31
6C-20-D	1331,099	393,76	1668,901	2156,24	1,29
4C-32-A	1375,16	637,42	1624,84	1912,58	1,18
4C-32-B	1295,6	796,75	1704,4	1753,25	1,03
6C-32-C	1315,32	545,01	1684,68	2004,99	1,19
6C-32-D	1342,15	551,02	1657,85	1998,98	1,21

Mitjana (N±SD): 1,09 ± 0,09

## Annex B. Croquis dels rodets

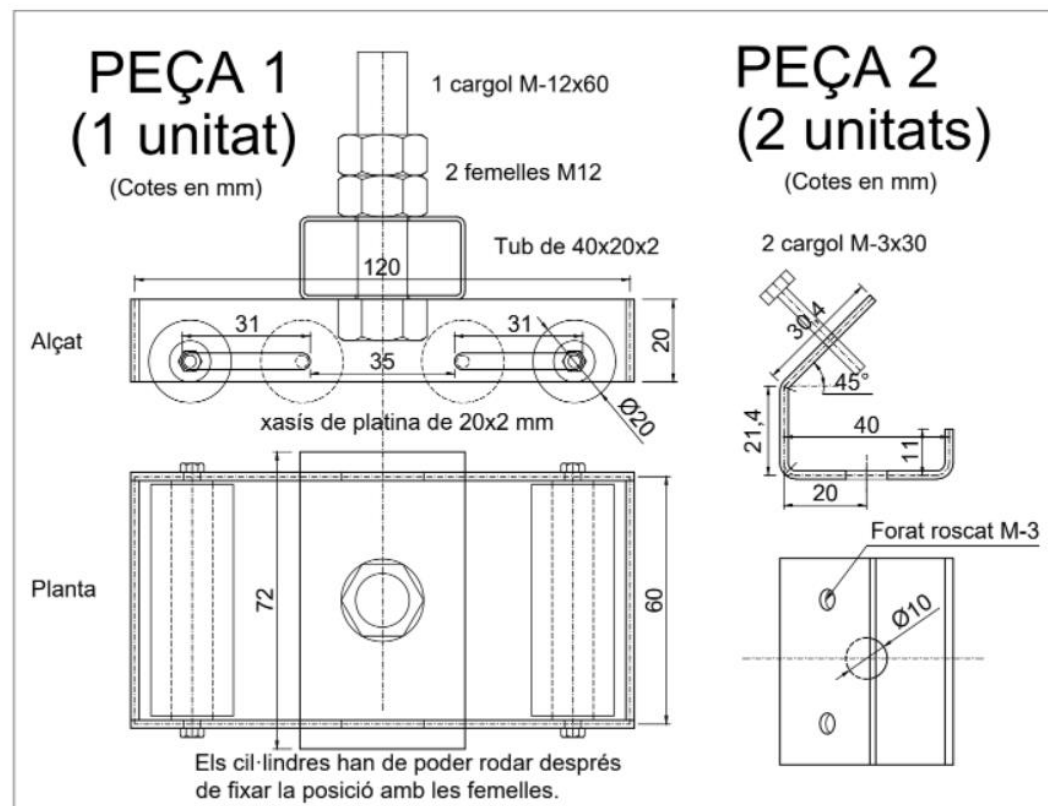


Figura B- 1 Croquis dels rodets utilitzats a l'assaig de flexió. Font: Josep Claramunt

## Annex C. Corbes de tensió-deformació

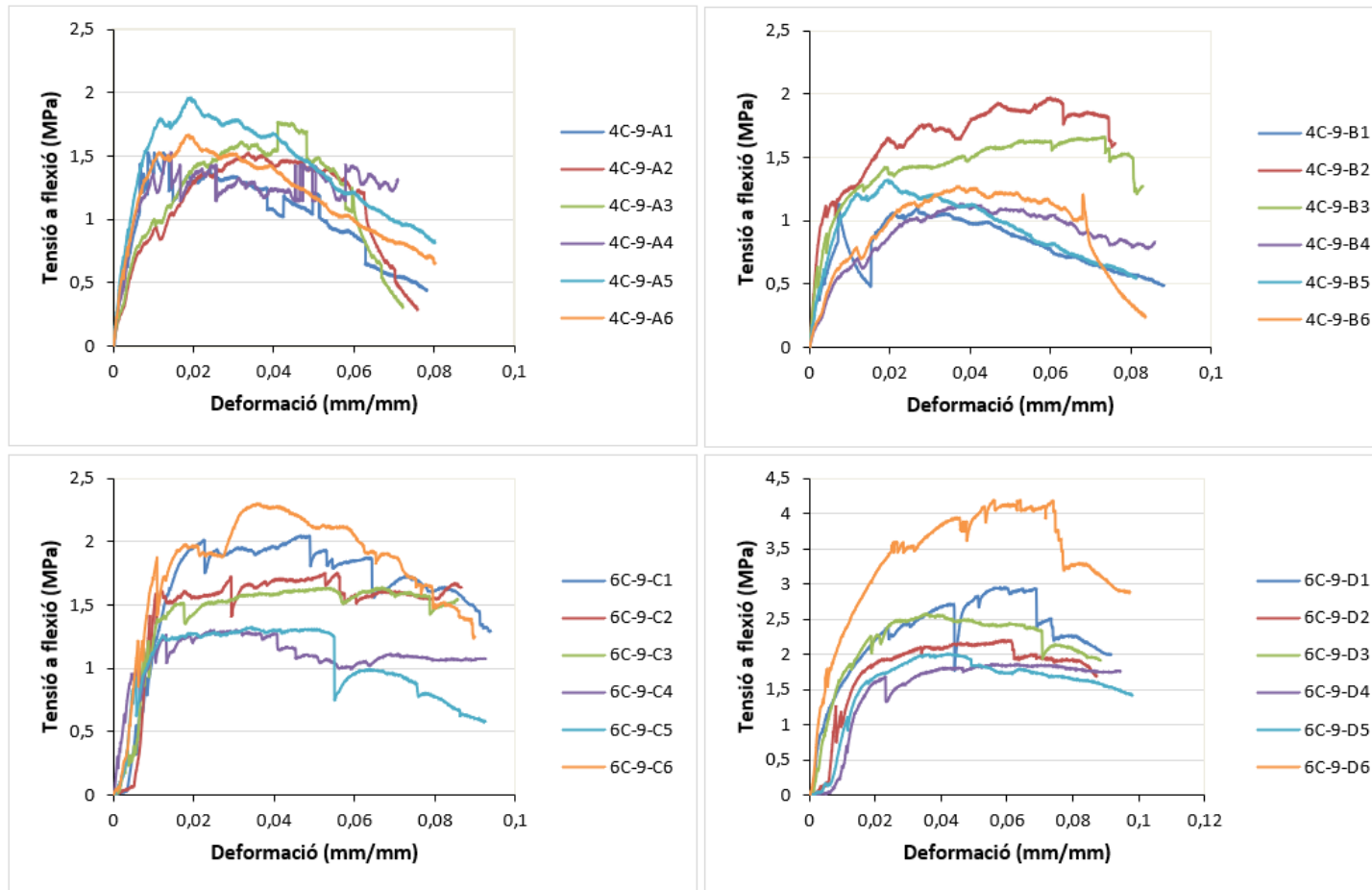


Figura C- 1 Corbes tensió-deformació de les peces de diàmetre de 9 cm.

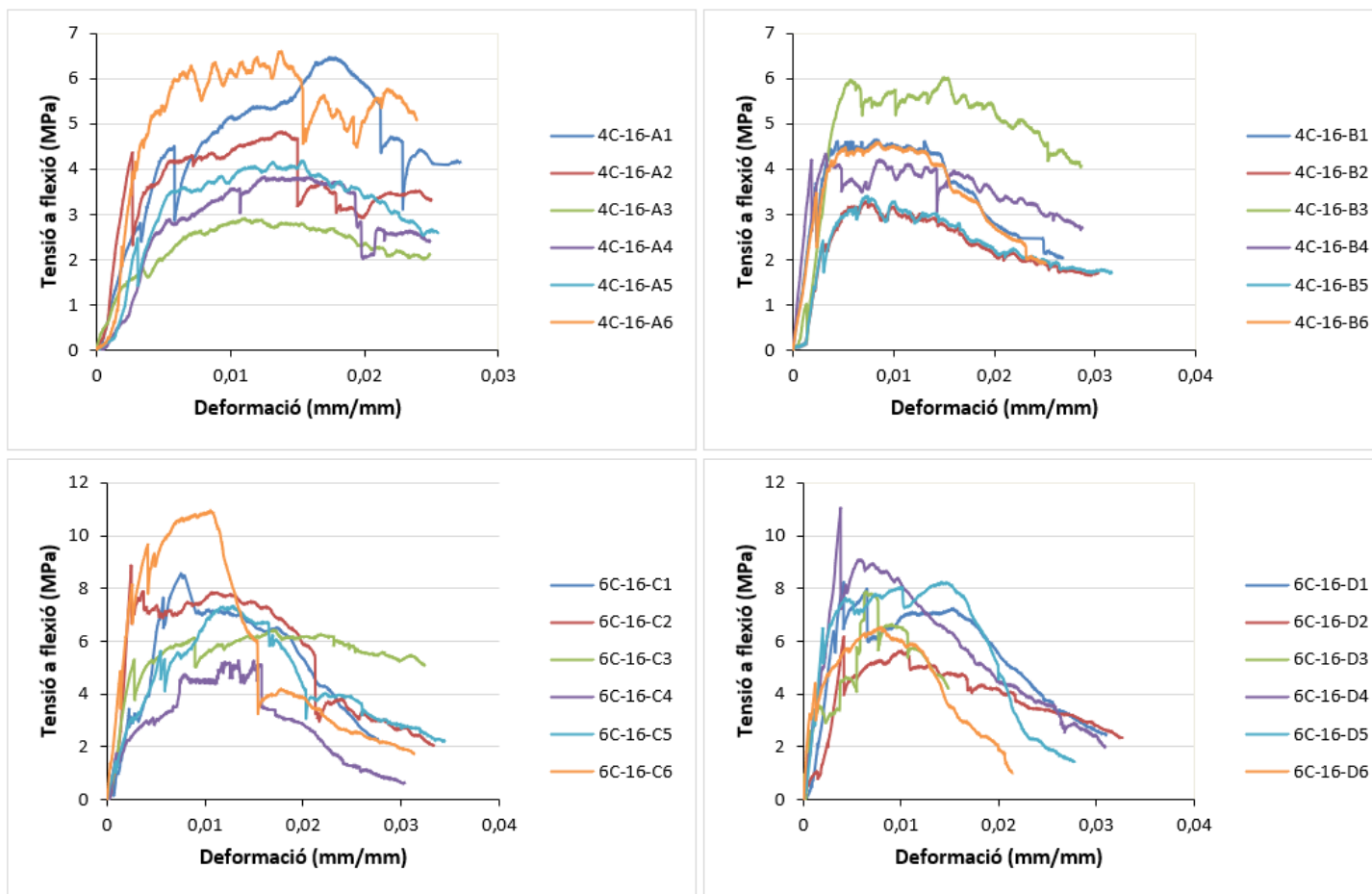


Figura C- 2 Corbes tensió-deformació de les peces de diàmetre de 16 cm.



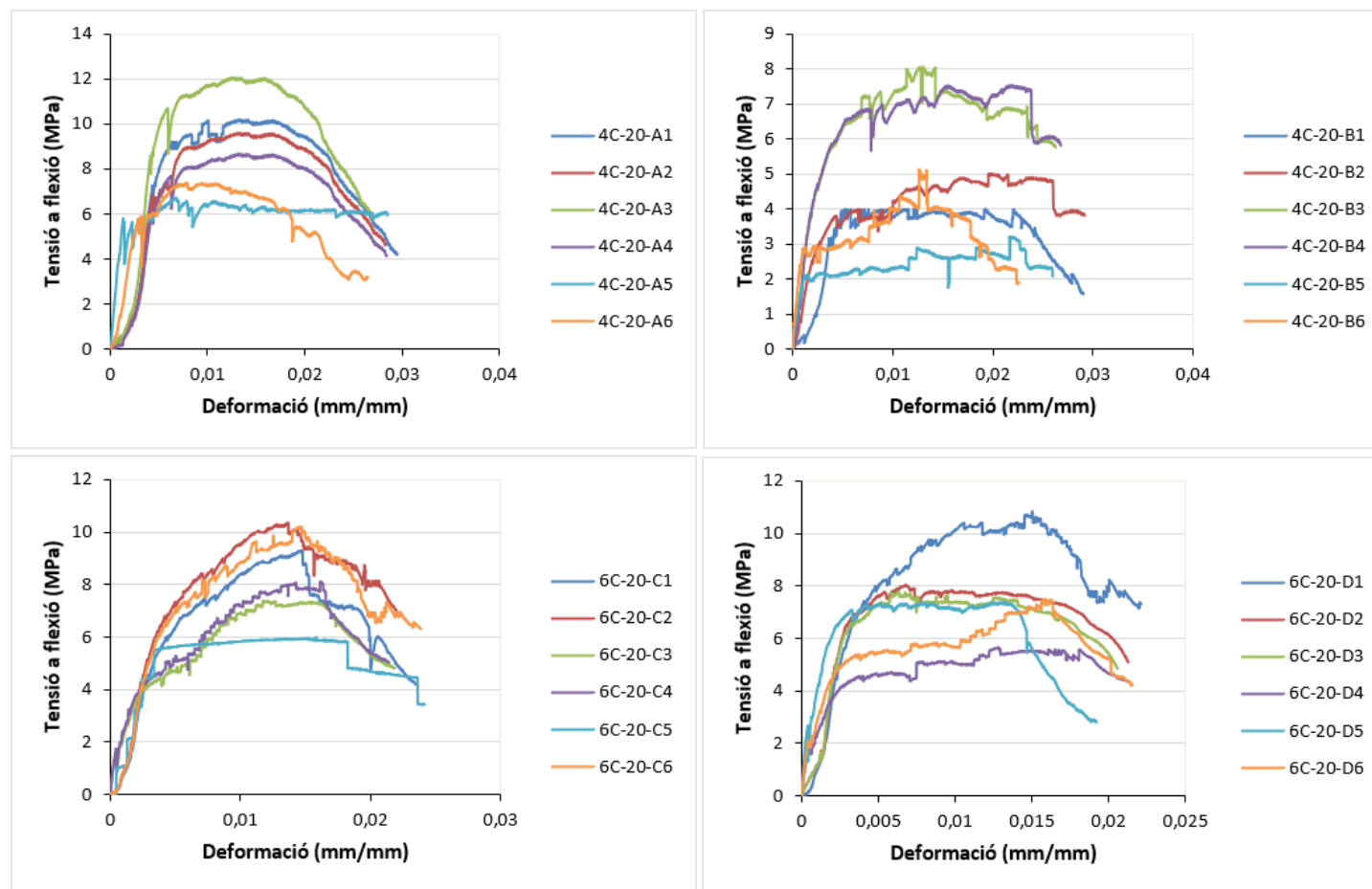


Figura C- 3 Corbes tensió-deformació de les peces de diàmetre de 20 cm.

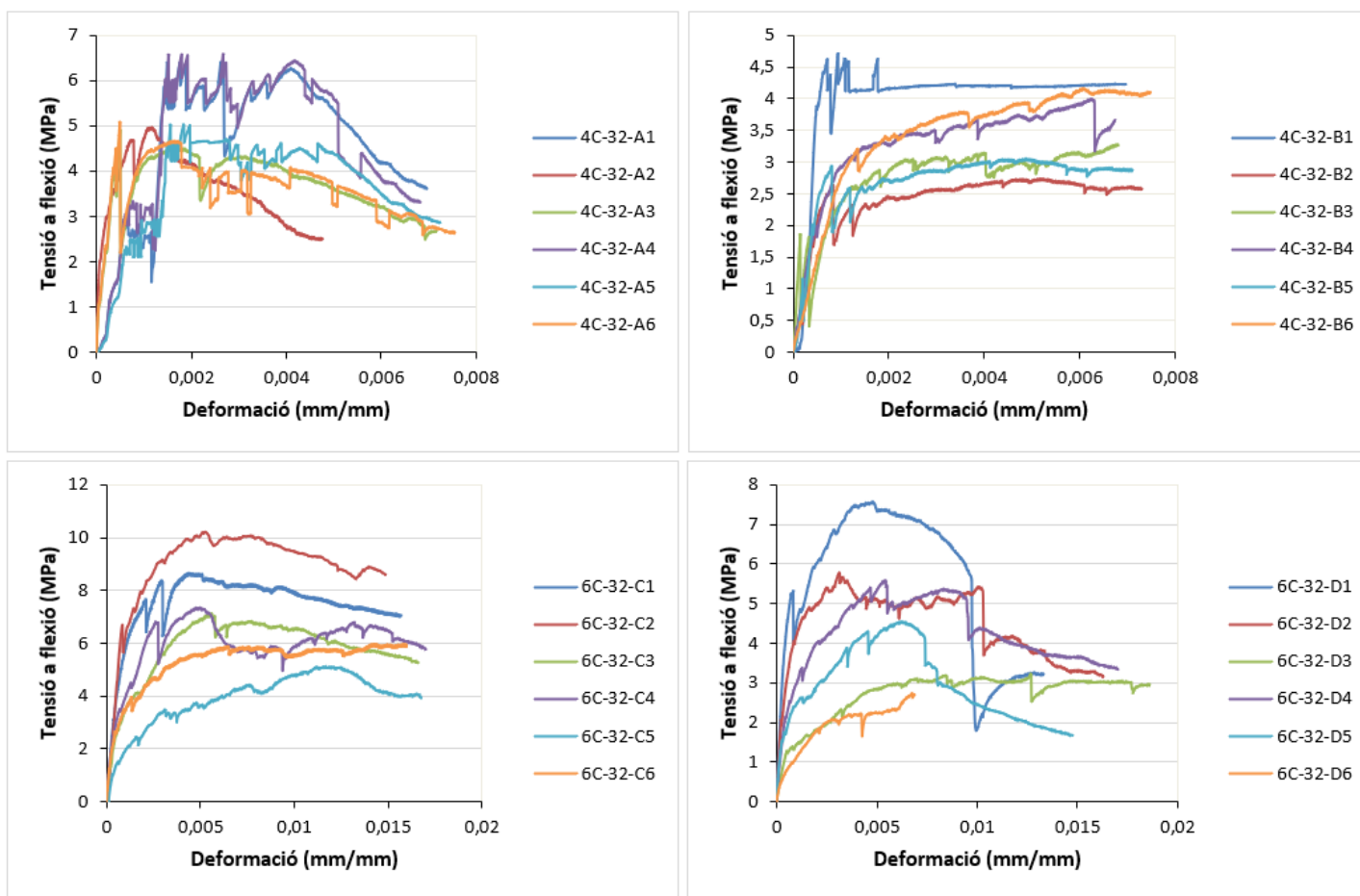


Figura C- 4 Corbes tensió-deformació de les peces de diàmetre de 32 cm.

## Annex D. Resultats de les posicions de la simulació vs assaig

**Taula D- 1** El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 4C-9-A i 4C-9-B.

Placa	MOE (MPa)	F elàstic (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	MOE (MPa)	F màx (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	Moment simulació (kNmm)
<b>4C-9-A1</b>	172,70	0,049	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>	156,86	0,0899	<b>1,48</b>	<b>1,5</b>	0,001
<b>4C-9-A2</b>	120,15	0,031	<b>0,81</b>	<b>0,8</b>	38,103	0,0762	<b>5,8</b>	<b>6,2</b>	0,001
<b>4C-9-A3</b>	133,89	0,031	<b>0,81</b>	<b>0,8</b>	31,06	0,0833	<b>7,46</b>	<b>9,6</b>	0,001
<b>4C-9-A4</b>	185,23	0,031	<b>0,81</b>	<b>0,8</b>	93,048	0,0534	<b>2,66</b>	<b>3</b>	0,001
<b>4C-9-A5</b>	193,60	0,065	<b>1,24</b>	<b>1,1</b>	84,561	0,0864	<b>3,23</b>	<b>3,4</b>	0,001
<b>4C-9-A6</b>	165,50	0,066	<b>1,28</b>	<b>1,2</b>	73,327	0,0864	<b>3,23</b>	<b>3,6</b>	0,001
<b>4C-9-B1</b>	117,64	0,075	<b>1,24</b>	<b>1</b>	112,78	0,0846	<b>1,15</b>	<b>1,2</b>	0,0009
<b>4C-9-B2</b>	267,77	0,055	<b>0,72</b>	<b>0,83</b>	17,414	0,103	<b>10,27</b>	<b>10,35</b>	0,001
<b>4C-9-B3</b>	338,09	0,041	<b>0,29</b>	<b>0,3</b>	11,012	0,1113	<b>11,47</b>	<b>10,53</b>	0,001
<b>4C-9-B4</b>	42,35	0,052	<b>2,4</b>	<b>2,45</b>	25,108	0,0762	<b>5,8</b>	<b>6,1</b>	0,001
<b>4C-9-B5</b>	166,75	0,040	<b>0,58</b>	<b>0,5</b>	56,063	0,0864	<b>3,23</b>	<b>3,1</b>	0,001
<b>4C-9-B6</b>	86,20	0,025	<b>0,63</b>	<b>0,6</b>	28,72	0,0762	<b>5,8</b>	<b>5,5</b>	0,001

**Taula D- 2** El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 6C-9-C i 6C-9-D.

Placa	MOE (MPa)	F elàstic (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	MOE (MPa)	F màx (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	Moment simulació (kNmm)
<b>6C-9-C1</b>	133,48	0,157	<b>2,11</b>	<b>2</b>	34,934	0,1948	<b>7,16</b>	<b>6,34</b>	0,002
<b>6C-9-C2</b>	142,14	0,092	<b>1,44</b>	<b>1,5</b>	23,14	0,1231	<b>8,43</b>	<b>8,5</b>	0,002
<b>6C-9-C3</b>	135,53	0,114	<b>1,88</b>	<b>2</b>	14,67	0,1336	<b>10,2</b>	<b>10</b>	0,003
<b>6C-9-C4</b>	178,94	0,106	<b>0,81</b>	<b>0,8</b>	25,687	0,1423	<b>4,34</b>	<b>4,5</b>	0,003
<b>6C-9-C5</b>	178,59	0,085	<b>0,81</b>	<b>0,8</b>	28,368	0,1231	<b>5,02</b>	<b>5</b>	0,003
<b>6C-9-C6</b>	187,66	0,113	<b>1,44</b>	<b>1,5</b>	53,12	0,1606	<b>5,57</b>	<b>6</b>	0,004
<b>6C-9-D1</b>	128,44	0,0099	<b>0,12</b>	<b>0,1</b>	35,261	0,2856	<b>8,65</b>	<b>9</b>	0,003
<b>6C-9-D2</b>	135,7	0,0823	<b>1,97</b>	<b>2</b>	31,78	0,1177	<b>8,78</b>	<b>9</b>	0,003
<b>6C-9-D3</b>	211,03	0,1031	<b>0,81</b>	<b>0,8</b>	63,88	0,2548	<b>5,22</b>	<b>5</b>	0,005
<b>6C-9-D4</b>	100,15	0,1655	<b>2,82</b>	<b>2,5</b>	33,93	0,1904	<b>7,77</b>	<b>7,5</b>	0,004
<b>6C-9-D5</b>	112,29	0,2083	<b>2,5</b>	<b>2,3</b>	52,649	0,2599	<b>5,81</b>	<b>5,5</b>	0,005
<b>6C-9-D6</b>	363,5	0,1114	<b>0,68</b>	<b>0,6</b>	53,016	0,2799	<b>8,04</b>	<b>8</b>	0,006

**Taula D- 3** El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 4C-16-A i 4C-16-B.

Placa	MOE (MPa)	F elàstic (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	MOE (MPa)	F màx (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	Moment simulació (kNmm)
<b>4C-16-A1</b>	1030,00	0,0759	<b>1,32</b>	<b>1,35</b>	300,43	0,2064	<b>9,19</b>	<b>9,8</b>	0,006
<b>4C-16-A2</b>	1890	0,1049	<b>1,25</b>	<b>1,3</b>	234,67	0,1261	<b>7,22</b>	<b>7,82</b>	0,006
<b>4C-16-A3</b>	546,76	0,0429	<b>1,58</b>	<b>1,6</b>	221,46	0,0762	<b>5,8</b>	<b>6,1</b>	0,005
<b>4C-16-A4</b>	640,04	0,0958	<b>2,55</b>	<b>3,2</b>	311,53	0,1392	<b>6,59</b>	<b>7,2</b>	0,005
<b>4C-16-A5</b>	792,37	0,0824	<b>1,62</b>	<b>1,6</b>	252,15	0,1419	<b>8,23</b>	<b>8,5</b>	0,006
<b>4C-16-A6</b>	586,49	0,0277	<b>0,98</b>	<b>1</b>	406	0,1458	<b>8,04</b>	<b>8</b>	0,005
<b>4C-16-B1</b>	117,64	0,075	<b>1,24</b>	<b>1</b>	112,78	0,0846	<b>1,15</b>	<b>1</b>	0,008
<b>4C-16-B2</b>	724,53	0,179	<b>2,11</b>	<b>2</b>	522,33	0,1964	<b>3,16</b>	<b>3</b>	0,008
<b>4C-16-B3</b>	1365,00	0,156	<b>2,09</b>	<b>2</b>	320,32	0,1725	<b>6,85</b>	<b>6,1</b>	0,007
<b>4C-16-B4</b>	2273,00	0,1317	<b>0,81</b>	<b>0,78</b>	1231,2	0,14	<b>1,48</b>	<b>1,2</b>	0,006
<b>4C-16-B5</b>	730,81	0,169	<b>2,11</b>	<b>2</b>	520,39	0,1964	<b>3,16</b>	<b>3</b>	0,009
<b>4C-16-B6</b>	946,40	0,2124	<b>2,11</b>	<b>2</b>	446,45	0,2212	<b>3,77</b>	<b>3,2</b>	0,009

**Taula D- 4** El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 6C-16-C i 6C-16-D.

Placa	MOE (MPa)	F elàstic (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	MOE (MPa)	F màx (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	Moment simulació (kNmm)
6C-16-C1	1347,1	0,2118	<b>0,81</b>	<b>0,67</b>	1209,1	0,644	<b>2,99</b>	<b>2,1</b>	0,013
6C-16-C2	3036,3	0,3951	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>	3632,4	0,5413	<b>0,96</b>	<b>0,78</b>	0,015
6C-16-C3	2195	0,3677	<b>1,07</b>	<b>0,97</b>	216,13	0,4564	<b>6,86</b>	<b>8,6</b>	0,012
6C-16-C4	853,61	0,1488	<b>1,24</b>	<b>0,9</b>	318,02	0,299	<b>5,48</b>	<b>5</b>	0,012
6C-16-C5	870,72	0,3304	<b>2,11</b>	<b>1,97</b>	513,34	0,4426	<b>5,08</b>	<b>4,93</b>	0,01
6C-16-C6	2318,2	0,6468	<b>1,67</b>	<b>1,43</b>	821,73	0,7416	<b>4,35</b>	<b>4,1</b>	0,015
6C-16-D1	2229,1	0,3258	<b>1,09</b>	<b>0,89</b>	2229,1	0,5097	<b>1,68</b>	<b>1,12</b>	0,011
6C-16-D2	982,68	0,2628	<b>1,31</b>	<b>1,2</b>	1364,6	0,4153	<b>1,65</b>	<b>1,35</b>	0,012
6C-16-D3	3615,3	0,1839	<b>0,29</b>	<b>0,2</b>	322,91	0,2993	<b>1,69</b>	<b>1,87</b>	0,012
6C-16-D4	2954,1	0,0802	<b>0,29</b>	<b>0,3</b>	2608,6	0,5017	<b>1,61</b>	<b>1,54</b>	0,011
6C-16-D5	3119,5	0,4376	<b>0,81</b>	<b>0,79</b>	2954,1	0,6795	<b>5,56</b>	<b>5,49</b>	0,014
6C-16-D6	3611,4	0,2117	<b>0,37</b>	<b>0,3</b>	3475,3	0,2225	<b>0,39</b>	<b>0,4</b>	0,015

**Taula D- 5** El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 4C-20-A i 4C-20-B.

Placa	MOE (MPa)	F elàstic (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	MOE (MPa)	F màx (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	Moment simulació (kNmm)
<b>4C-20-A1</b>	1500,80	0,204	<b>1,97</b>	<b>2,1</b>	844,83	0,2978	<b>6,12</b>	<b>7,09</b>	0,009
<b>4C-20-A2</b>	1179,60	0,169	<b>1,79</b>	<b>2,05</b>	817,51	0,2978	<b>6,12</b>	<b>8,6</b>	0,009
<b>4C-20-A3</b>	1448,60	0,164	<b>1,77</b>	<b>2,1</b>	1074,8	0,2987	<b>6,13</b>	<b>8,2</b>	0,009
<b>4C-20-A4</b>	1157,10	0,179	<b>1,83</b>	<b>1,93</b>	733,92	0,2977	<b>6,11</b>	<b>6</b>	0,009
<b>4C-20-A5</b>	4872,10	0,091	<b>0,31</b>	<b>0,3</b>	617,86	0,1865	<b>3,21</b>	<b>2,95</b>	0,009
<b>4C-20-A6</b>	2256,40	0,120	<b>1,26</b>	<b>1,1</b>	926,41	0,1625	<b>3,66</b>	<b>3,1</b>	0,009
<b>4C-20-B1</b>	1599,09	0,088	<b>1,46</b>	<b>1,2</b>	839,22	0,1499	<b>2,54</b>	<b>3,2</b>	0,008
<b>4C-20-B2</b>	1235,30	0,092	<b>1,24</b>	<b>1,7</b>	159,29	0,1499	<b>8,78</b>	<b>9,1</b>	0,008
<b>4C-20-B3</b>	1718,70	0,108	<b>1,68</b>	<b>1,95</b>	468,73	0,1599	<b>6,38</b>	<b>6,7</b>	0,009
<b>4C-20-B4</b>	2083,20	0,092	<b>1,24</b>	<b>1,18</b>	184,37	0,1468	<b>10,65</b>	<b>11,01</b>	0,009
<b>4C-20-B5</b>	1403,40	0,066	<b>0,68</b>	<b>0,6</b>	50,972	0,0998	<b>9,91</b>	<b>9</b>	0,0089
<b>4C-20-B6</b>	2221,80	0,066	<b>0,68</b>	<b>0,6</b>	108,69	0,117	<b>6,71</b>	<b>6,1</b>	0,0079

**Taula D- 6** El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 6C-20-C i 6C-20-C.

Placa	MOE (MPa)	F elàstic (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	MOE (MPa)	F màx (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	Moment simulació (kNmm)
6C-20-C1	1750,90	0,298	<b>2,09</b>	<b>2,1</b>	588,98	0,5277	<b>8,93</b>	<b>8,1</b>	0,026
6C-20-C2	1796,00	0,294	<b>2,07</b>	<b>1,97</b>	717,79	0,52	<b>8,52</b>	<b>7,7</b>	0,023
6C-20-C3	1732,30	0,137	<b>0,77</b>	<b>0,8</b>	454,96	0,3798	<b>7,61</b>	<b>8,1</b>	0,021
6C-20-C4	1917,10	0,131	<b>0,72</b>	<b>0,7</b>	383,44	0,3999	<b>9,88</b>	<b>10,09</b>	0,022
6C-20-C5	1374,70	0,061	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>	265,7	0,5277	<b>8,93</b>	<b>8,9</b>	0,026
6C-20-C6	1428,40	0,166	<b>1,26</b>	<b>1,2</b>	625,42	0,5277	<b>8,9</b>	<b>8,4</b>	0,026
6C-20-D1	1690,90	0,163	<b>1,25</b>	<b>1,2</b>	612,87	0,4999	<b>9,69</b>	<b>9,8</b>	0,025
6C-20-D2	1140,50	0,083	<b>0,81</b>	<b>0,7</b>	1277,9	0,422	<b>4,16</b>	<b>3,9</b>	0,024
6C-20-D3	1116,90	0,083	<b>0,81</b>	<b>0,7</b>	1116,9	0,4299	<b>4,09</b>	<b>4</b>	0,025
6C-20-D4	1607,10	0,188	<b>1,25</b>	<b>1,2</b>	234,54	0,2837	<b>7,88</b>	<b>8,7</b>	0,02
6C-20-D5	3156,90	0,150	<b>0,9</b>	<b>1,1</b>	550,98	0,2377	<b>5,71</b>	<b>6,7</b>	0,02
6C-20-D6	2240,20	0,131	<b>0,72</b>	<b>0,8</b>	244,13	0,3195	<b>10,74</b>	<b>11,2</b>	0,021



**Taula D- 7** El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 4C-32-A i 4C-32-B.

Placa	MOE (MPa)	F elàstic (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	MOE (MPa)	F màx (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	Moment simulació (kNmm)
<b>4C-32-A1</b>	1827,50	0,007	<b>0,38</b>	<b>0,4</b>	2455,5	0,1198	<b>5,14</b>	<b>5</b>	0,001
<b>4C-32-A2</b>	24854,00	0,017	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	2752,2	0,041	<b>2,63</b>	<b>3,2</b>	0,002
<b>4C-32-A3</b>	9292,40	0,075	<b>0,56</b>	<b>0,7</b>	8893,8	0,1122	<b>0,92</b>	<b>1</b>	0,004
<b>4C-32-A4</b>	1835,20	0,007	<b>0,38</b>	<b>0,3</b>	2412,5	0,1198	<b>5,14</b>	<b>4,8</b>	0,005
<b>4C-32-A5</b>	1370,50	0,007	<b>0,38</b>	<b>0,3</b>	2345,6	0,1197	<b>5,12</b>	<b>5</b>	0,004
<b>4C-32-A6</b>	10694,00	0,052	<b>0,36</b>	<b>0,4</b>	9258	0,1122	<b>5,02</b>	<b>4,1</b>	0,005
<b>4C-32-B1</b>	8718,80	0,086	<b>1,25</b>	<b>1,2</b>	5926,7	0,0917	<b>1,81</b>	<b>2</b>	0,005
<b>4C-32-B2</b>	2941,50	0,009	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	261,02	0,07	<b>9,29</b>	<b>9</b>	0,006
<b>4C-32-B3</b>	3453,00	0,030	<b>0,26</b>	<b>0,3</b>	185,05	0,054	<b>24,09</b>	<b>23,7</b>	0,006
<b>4C-32-B4</b>	3097,30	0,050	<b>1,69</b>	<b>1,8</b>	322,92	0,071	<b>12,08</b>	<b>12</b>	0,005
<b>4C-32-B5</b>	4481,80	0,016	<b>0,28</b>	<b>0,3</b>	308	0,07	<b>9,36</b>	<b>9,1</b>	0,005
<b>4C-32-B6</b>	2482,10	0,047	<b>2,54</b>	<b>2</b>	156,27	0,0715	<b>24,9</b>	<b>23,7</b>	0,005

**Taula D- 8** El mòdul d'elasticitat (MOE), força i posició de l'assaig, posició de la simulació i moments de les peces 6C-32-C i 6C-32-C.

Placa	MOE (MPa)	F elàstic (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	MOE (MPa)	F màx (kN)	Posició assaig (mm)	Posició simulació (mm)	Moment simulació (kNmm)
6C-32-C1	5753,80	0,110	1,92	2	1308,8	0,1643	8,48	9,2	0,009
6C-32-C2	8705,50	0,096	1,4	1,4	1433,3	0,1631	13,4	14,2	0,008
6C-32-C3	4512,60	0,052	1,01	1	1017,3	0,1415	10,13	10	0,007
6C-32-C4	5175,80	0,063	1,02	1	10108,5	0,143	8,76	9	0,007
6C-32-C5	2734,00	0,032	1,03	1	1304,48	0,1103	20,84	20	0,008
6C-32-C6	5493,30	0,056	0,81	0,8	1680,3	0,1309	26,83	26	0,007
6C-32-D1	8937,30	0,070	0,89	0,85	1052,5	0,1235	8,79	10,1	0,007
6C-32-D2	4591,80	0,072	1,46	1,5	1272,1	0,1077	5,83	5	0,0065
6C-32-D3	2539,90	0,028	0,74	0,7	152,21	0,0778	20,56	20	0,007
6C-32-D4	4078,60	0,056	1,02	1	742,63	0,1307	9,62	9,8	0,007
6C-32-D5	5690,20	0,042	0,46	0,5	513,29	0,1244	10,41	10	0,007
6C-32-D6	1298,30	0,024	1,03	1	274,28	0,0728	10,84	11	0,006

