



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

Escola Superior d'Agricultura de Barcelona

Utilització de no teixits de fibra vegetal per a materials compostos amb matriu de ciment

Treball final de grau

Enginyeria de Sistemes Biològics

Autor: Sergi Garcia Ferrero

Tutor: Josep Claramunt Blanes

Data: 24 / abril / 2015

Resum

Des de l'antiguitat s'han utilitzat materials compostos per a la construcció. Actualment, s'ha tornat a investigar el fibrociment a partir de fibres vegetals, un recurs proper, renovable, d'un cost econòmic baix i amb bones prestacions mecàniques, per tal de poder competir amb les fibres sintètiques.

L'objectiu d'aquest treball és trobar un fibrociment d'elevades característiques mecàniques i bona durabilitat.

Per la fabricació d'un fibrociment, s'han fet assajos previs tant, pel que fa la matriu, com pel que fa el tractament de les fibres.

Els assajos de la matriu han estat dos: s'han fabricat provetes de ciment amb diferents concentracions de fum de sílice i altres provetes amb única mescla mare afegint-hi metacaolin per tal d'assajar-les a compressió

Pel que fa a les fibres, s'han realitzat diferents tractaments de cornificació dels quals, s'han extret el valor d'absorció d'aigua i de la resistència a tracció, i s'han escollit els tractaments que han donat millors resultats.

Aquests assajos previs s'han dut a terme per confeccionar diversos fibrociments que s'han assajat a flexió abans i després d'un procediment d'envelliment accelerat.

S'ha pogut observar en aquest treball, que el fibrociment fabricat amb les fibres sense tractar ha obtingut els millors resultats de flexió a l'edat de 28 dies, mentre que el fabricat amb les fibres cornificades amb el cicle planxa i estufa a 160°C i aigua, han donat els millors resultats posteriors a l'assaig d'envelliment accelerat. El fibrociment fet amb les fibres tractades amb autoclau han donat unes corbes tensió-deformació amb valors més baixos que la resta de tractaments.

Resumen

Desde la antigüedad se han empleado materiales compuestos para la construcción. Actualmente se ha vuelto a investigar el fibrocemento a partir de fibras vegetales, un recurso cercano, renovable, con un coste económico bajo y con buenas prestaciones mecánicas para poder competir con las fibras sintéticas.

El objetivo de este trabajo es encontrar un fibrocemento de elevadas características mecánicas y una buena durabilidad.

Para la fabricación de un fibrocemento, se han hecho ensayos previos tanto para la matriz como para el tratamiento de las fibras.

Los ensayos de la matriz han sido dos: se han fabricado probetas de cemento con diferentes concentraciones de humo de sílice y otras probetas con una única mezcla madre añadiendo metacaolín para ensayarlas a compresión.

Respecto a las fibras, se han realizado diferentes tratamientos de cornificación, de los cuales se ha extraído el valor de absorción de agua y la resistencia a tracción, y se han seleccionado los tratamientos con mejores resultados.

Estos ensayos previos han sido realizados para confeccionar diferentes fibrocementos que se han ensayado a flexión antes y después de un proceso de envejecimiento acelerado.

Se ha podido observar en este trabajo que el fibrocemento fabricado con las fibras sin tratar ha obtenido los mejores resultados de flexión a la edad de 28 días, mientras que el fabricado con fibras cornificadas con un ciclo de plancha y estufa a 160°C y agua, han obtenido los mejores resultados posteriores en el ensayo de envejecimiento acelerado. El fibrocemento fabricado con las fibras tratadas con autoclave ha dado unas curvas tensión-deformación con valores más bajos que los demás tratamientos.



Abstract

Compound materials have been used in building sector since ancient times. Nowadays, in order to compete against synthetic fibres, scientists have come back to the study and reserach of fibre cement from vegetable fibres –an approachable, cheap and renewable source with excellent mechanical applications and results.

The aim of this work is to find a type of fibre cement with both excellent mechanical characteristics and great durability.

For fibre cement to be made, trials have been carried out, both in terms of the matrix and the treatment of the fibres. Trials on the matrix were as follows: on the one hand, cement test tubes with different concentration of silica smoke were manufactured; on the other hand, test tubes with inicial mixing only, by adding metacaoline with the aim of testing them under compression. As for the fibre trials, several cornification treatments have been made, out of which both the water absorption and the resistance to traction amounts were extracted. Treatments leading to best outcomes were the chosen ones.

These trials were carried out in order to create a series of fibre cements which have been tested under bending both before and after an accelerated ageing process.

In this study, we have proved how fibre cement made out of non-treated fibres obtained better outcomes under bending after 28 days, while the fibre cement made out of hornification-based treatment with cycles of pressing, water and heat of 160°C worked better after the accelerated ageing treatment.

Fibre cement made out of autoclave-treated fibres result in lower tension-deformity curves than the rest of the treatments.

Sumari

1. INTRODUCCIÓ	6
1.1. El ciment	7
1.1.1. Història del ciment	7
1.1.2. Reacció d'hidratació	8
1.1.3. Composició dels ciments	11
1.1.4. Característiques físico-mecàniques del ciment	17
1.2. Fibres vegetals	19
1.2.1. Fibres de lli	20
1.3. Fibrociment	22
1.3.1. Degradació de la matriu en contacte amb la fibra	23
1.3.2. Degradació de les fibres en medi alcalí	24
1.3.3. Reducció de l'adherència fibra-matriu per canvis de volum de la fibra	25
1.3.4. Cornificació de les fibres	26
1.3.5. Característiques de cada component en la fabricació del fibrociment	28
2. OBJECTIUS	30
3. MATERIALS I MÈTODES	31
3.1. Assajos realitzats amb el ciment	31
3.1.1. Materials	31
3.1.2. Fabricació de provetes i assaig de compressió variant la concentració de fum de sílice.	31
3.1.3. Fabricació de provetes i assaig de compressió amb la dosificació final	32
3.1.4. Assaig amb fenolftaleïna	33
3.2. Assajos realitzats amb les fibres	34
3.2.1. Fibres vegetals	34
3.2.2. Assaig de cornificació	34
3.2.3. Assaig de tracció de les fibres	35
3.2.4. Assaig de l'índex d'absorció d'aigua	35
3.3. Assajos realitzats amb el fibrociment	36
3.3.1. Fabricació de plaques de fibrociment	36
3.3.2. Tractament d'envelliment accelerat	39
3.3.3. Assaig a flexió	39
3.4. Anàlisi de resultats	39



4. RESULTATS I DISCUSSIÓ	42
4.1. Resultat dels assajos amb el ciment	42
4.1.1. Resultats a compressió de les provetes amb diferents concentracions de fum de sílice	42
4.1.2. Resultats de la prova de fenolftaleïna.....	43
4.1.3. Resultats a compressió de les provetes amb metacaolin.....	44
4.2. Resultats del assajos amb les fibres	45
4.2.1. Resultats de la cornificació de les fibres i del valor de retenció d'aigua.....	45
4.3. Resultats dels assajos amb el fibrociment	53
4.3.1. Resultats de l'assaig a flexió del fibrociment	53
4.3.2. Resultats de l'assaig d'envelliment accelerat del fibrociment	59
5. CONCLUSIONS	69
BIBLIOGRAFIA	70
Referències bibliogràfiques	70

1. Introducció

Els mètodes de construcció i materials han anat evolucionant des dels principis de la civilització. Començant per habitatges d'argila, fusta o pedra fins al desenvolupament actual. La integritat i durabilitat d'aquestes construccions ha estat un requisit important al llarg de la civilització.

Tots els materials emprats han anat canviant i produint-se innovacions que han estat clau en l'evolució de l'esser humà.

El primer desenvolupament de ciment com a material de construcció es data del 5600 aC a la península dels Balcans, tot i que el seu ús més extens data del voltat de l'any 3000 aC cap endavant.

Trobem a l'Egipte com a lloc clau en l'ús d'argila amb calç i guix on també aquesta barreja contenia palla com a reforç. A la Xina, un material semblant al del ciment de la gran muralla xinesa també conté fibres de bambú.

Com veiem doncs, la utilització de les fibres vegetals ha estat present al llarg de la història però, la innovació de materials i mètodes de construcció va rellevar les fibres vegetals guanyant importància les fibres sintètiques i altres com l'acer en la construcció del formigó armat, que fins a dia d'avui ha solucionat gran part de les necessitats actuals de construcció. ([Brueckner et al., 2012](#)).



1.1. El ciment

1.1.1. Història del ciment

Des dels voltants del 5000 aC. tenim referències en les quals diverses civilitzacions han utilitzat pedres amb conglomerants per a usos constructius. Un exemple són els egipcis, que posteriorment a aquesta data, més tard van utilitzar morters d'argila i guix per a les construccions monumentals.

Però, un pas important en la història dels ciments va ser gràcies a la civilització romana. Aquesta va descobrir una mena de ciment a través de la barreja de cendres volcàniques i calç viva. L'addició de cendra a la calç va iniciar una reacció d'hidratació per formar silicats de calç hidratats, formant el primer material putzolànic. El nom de "ciment de putzolana" ve del lloc d'origen on es trobava l'emplaçament de les cendres, Puteoli actualment conegut com Pozzuoli. L'edifici més emblemàtic va ser el Panteó de Roma.

Des d'aquest període fins el segle XVIII els conglomerants van ser el guix i la calç, que van evolucionar molt poc, però en aquest segle va començar un interès pels ciments gràcies a l'enginyer John Smeaton.

L'enginyer anglès, durant la construcció del far d'Eddystone, es va adonar que els morters formats amb calcària i una addició de putzolana amb diferents proporcions d'argila tenien diferents propietats davant les aigües marines. Funcionaven millor els morters que se'ls afegia argila fent-los endurir sota l'aigua i sent insolubles en aquesta. Era la primera ocasió en que es reconeixien les propietats de les calçs hidràuliques. Això va conduir a l'aparició dels primers ciments naturals, antecessors dels actuals ciments Portland. Al 1818, va ser Louis Joseph Vicat, enginyer francès, qui va obrir un nou camp als ciments al preparar una calç artificial calcinant una barreja de calcària i argila moltes conjuntament en humit.

Més tard, el constructor anglès Joseph Aspdin va patentar sota el nom de ciment Portland un material pulverulent que amasat amb aigua i sorra s'enduria formant un conglomerat d'aspecte a les calcàries de la península de Portland, al sud d'Anglaterra.

Però no va ser fins el 1845, quan Isaac Charles Johnson va produir el primer prototip de ciment Portland a escala industrial. Va millorar les dosificacions i va augmentar les temperatures de cocció fins arribar a la sinterització de les mateixes.

És doncs, a partir del 1900 quan els ciments Portland s'imposen en les obres d'enginyeria i s'inicia un descens important en el consum de ciments naturals.

Per tant, es denominen conglomerants hidràulics a aquells productes que, amasats amb aigua, s'adormen i endureixen tant, en ser exposats en l'aigua com submergits en ella i ser estables en aquestes condicions.

De tots el conglomerants hidràulics, el ciment portland i els seus derivats són els més utilitzats a la construcció degut a la seva composició de pedra calcària i argila que són minerals molt abundants a la natura amb un cost relativament baix en comparació amb altres materials. Aquests són interessants per el cost i per tenir unes propietats molt adequades per a l'ús final

Els ciments s'utilitzen, fonamentalment, per elaborar morters i formigons barrejant-los amb àrids.

Els ciments estan compostats per diferents materials que ben dosificats amb una metodologia concreta, li donen al ciment propietats físico-químiques i resistències molt bones per a les diferents finalitats constructives.

La preparació d'un ciment comercial requereix la fabricació d'un clínquer. El clínquer és el principal component del ciment Portland i es forma calcinant calcària i argila a unes temperatures d'entre 1350 i 1450 °C. Aquest constitueix el nucli del ciment. ([Instituto español del cemento y sus aplicaciones 2015](#))

1.1.2. Reacció d'hidratació

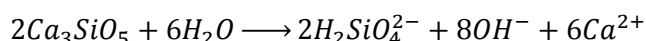
El ciment químicament parlant, està format de components anhídrids que al barrejar-se amb l'aigua formen compostos hidratats estables, que tenen la propietat d'adherir-se als grans dels àrids, donant un entramat resistent.



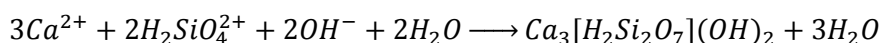
Les reaccions d'hidratació són complexes i actuen per a cada component, sent els més rellevants les reaccions del silicat tricàlcic i de l'aluminat tricàlcic, tot i que succeeixen en el mateix moment:

Reaccions amb el silicat tricàlcic

El silicat tricàlcic es dissol ràpidament en entrar en contacte amb l'aigua i genera ions H_2SiO_4 , ions OH^- , i ions Ca^{2+} , essent la reacció:

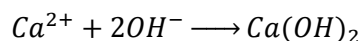


Tot seguit es forma el silicat càlcic hidratat (C-S-H), queda sobresaturat el medi i aquest precipita, essent la reacció:



El silicat tricàlcic, $Ca_3[H_2Si_2O_7](OH)_2$, es coneix també amb el nom de C_3S .

Obtenim doncs una acumulació d'ions OH^- a l'inici de la reacció que augmenten el pH de la pasta, i ions Ca^{2+} que augmenten la quantitat de calç en relació al ciment. Aquesta acumulació d'ions acabarà amb la precipitació de l'hidròxid de calç, sent així la seva reacció (Baron et al., 1992)



La portlandita provoca un subministrament constant de Ca^{2+} i facilita una dissolució més ràpida del C_3S generant una precipitació de C-S-H. Aquesta precipitació provoca l'aïllament de les partícules de ciment anhidre aïllant aquestes provocant una disminució en la velocitat d'hidratació fins que s'exhaureix l'aigua.

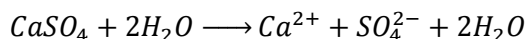
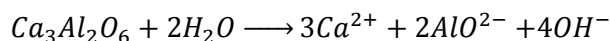
La presa del formigó es produeix per la capacitat del C-S-H de lligar-se entre a ell mateix o a les parts circumdants a través de ponts d'ions de calç o ponts d'hidrogen. Tot i ser relativament amorf, el C-S-H està organitzat en nanoestructures de cadenes de silicat de longitud variable que es mantenen unides per capes de calç. Així doncs, el C-S-H és pot considerar un gel que aglutina la resta de components del ciment.

El C-S-H és el producte més important de la hidratació del ciment pel volum que ocupa, situat entre el 50% i el 70% segons la naturalesa del ciment, i també per la seva resistència. (Gaitero et al., 2008)

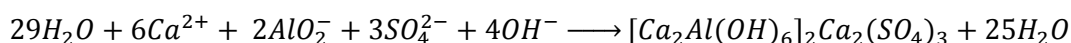
La formació de portlandita confereix al formigó una alcalinitat molt elevada que tampona l'aigua continguda en l'estructura porosa del formigó. La combinació de la portlandita amb el CO₂ atmosfèric produeix un carbonat càlcic que, per la seva menor solubilitat, redueix el contingut d'ions OH⁻ de les solucions i, en conseqüència, es redueix el pH. Aquesta reacció es produeix molt lentament des de la superfície en contacte amb l'aire cap a l'interior del material. Aquest retard, es deu a que la penetració de CO₂ es fruit de la difusió d'aquest gas per l'interior de la xarxa de porus.

Reaccions de l'aluminat tricàlcic (C3A) juntament amb el guix:

Inicialment, com en el cas anterior, el primer succés és el contacte i la posterior dissolució de l'aluminat tricàlcic i el guix en el medi aquós. Aquesta reacció produeix un gran despreniment de calor, produint les següents reaccions.

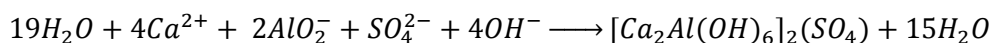


Els ions formen cristalls combinant-se amb la ettringita (trisulfoaluminat de calç hidratat, com s'observa a la reacció:



L'alumina tricàlcic, $[Ca_2Al(OH)_6]_2Ca_2(SO_4)_3$, es coneix també com a C₃A.

Entre les 10 i 24 hores posteriors a l'inici de l'amassat del ciment, aquesta es torna més lenta en funció de la quantitat de guix. L'excés d'aluminat provoca la redissolució de l'ettringita que es converteix en ió sulfat per generar monosulfoaluminat de calç hidratat (MSA), segons la següent reacció:



Al cap d'unes setmanes, l'ettringita s'ha transformat completament en MSA, i, a partir del mes, aquest compost es combina amb els excedents d'aluminat i ferritoaluminat per formar un ferritoaluminat de calç hidratat de manera definitiva. (Baron et al., 1992)

1.1.3. Composició dels ciments

A Espanya els ciments estan regulats per la "Instrucción para la Recepción de Cementos, RC-08".

Amb la normalització i estandardització dels components, es classifiquen segons la norma RC-08 en:(Fomento, 2009).

Component principal: Material inorgànic, especialment seleccionat, utilitzat en proporció superior al 5% en massa respecte a la suma de tots els components principals i minoritaris.

Component minoritari (o addicional): Qualsevol component principal utilitzat en una proporció igual o inferior al 5% en massa respecte la suma de tots els components principals i minoritaris.

Components principals

-Clínquer de ciment pòrtland (K)

Són els productes que s'obtenen al calcinar fins la fusió parcial barreges de calcària i argiles, preparades artificialment, fins aconseguir la combinació pràcticament total dels seus components.

-Clínquer de ciment d'aluminat de calci (K)

Són productes que s'obtenen per fusió d'una barreja de calcàries i bauxites amb una composició i granulometries adequades per aconseguir un contingut mínim d'alúmina del 36%.

-Escòria granulada de forns alts (S)

Són granulats que s'obtenen per temperat o refredat brusc, amb aigua o aire, provinents dels residus de processos siderúrgics.

-Putzolanes (P, Q)

Les putzolanes són substàncies naturals de composició silícia, silico-aluminosa o combinació d'ambdues.

Les putzolanes no endureixen per si mateixes però, mòltes i amassades amb aigua reaccionen amb l'hidròxid de calç dissolts a l'aigua a una temperatura ambient, per a formar compostos de silicats de calç i aluminat de calç capaços de desenvolupar resistència. Aquests compostos són similars als que es formen durant l'enduriment dels materials hidràulics.

Les putzolanes naturals (P) són generalment materials d'origen volcànic o roques sedimentàries amb l'adequada composició química i mineralògica.

Les putzolanes naturals calcinades (Q) són materials d'origen volcànic, argiles, pissarres o roques sedimentàries activades per tractament tèrmic.

-Cendres volants (V, W)

Les cendres volants s'obtenen per precipitació electrostàtica o mecànica de partícules pulverulentes arrossegades pels fluxos gasosos de forns de carbó polvoritzats.

Les cendres volàtils poden ser de naturalesa silícia (V) o calcària (W). Les primeres tenen propietats putzolàniques; les segones poden tenir, a més a més, propietats hidràuliques.

-Esquist calcinat (T)

L'esquist calcinat, concretament el bituminós, es produeix en un forn especial a temperatures al voltant dels 800°C. Degut a la composició del material natural i al procés de producció, l'esquist calcinat conté fases de clínquer i proporcions majors d'òxids amb capacitat de reacció putzolànica. En conseqüència, en l'estat mòlt, presenta propietats hidràuliques com les del ciment portland, així com propietats putzolàniques.

-Calcària (L, LL)



Són components principalment formats de carbonat càlcic en forma de calcita (superior al 85%) que mòlts conjuntament amb el clínquer pòrtland (en proporcions adequades) afecten favorablement a les propietats i el comportament dels morters i formigons, tant frescos com endurits. La seva acció principal és de caràcter físic: dispersió, hidratació, capacitat de ser treballada, retenció d'aigua, capil·laritat, permeabilitat, retracció i fissuració.

-Fum de sílice (D)

És un subproducte de l'obtenció del silici i del ferrosilice. El quars molt pur i carbó es redueixen a un forn elèctric, recollint-se el fum generat mitjançant un filtre electrostàtic, partícules d'un diàmetre molt petit formades principalment per sílice molt reactiva.

-Components addicionals minoritaris

Els components addicionals minoritaris són materials minerals naturals o derivats del procés de la fabricació del clínquer. També poden ser components addicionals especificats.

Aquests components no augmenten sensiblement la demanda d'aigua del ciment, no disminueixen la resistència del formigó o del morter i no afecten a la corrosió. Solen millorar les propietats físiques dels ciments, com la docilitat o la retenció d'aigua.

-Sulfat de calci

S'afegeix durant la fabricació del ciment per controlar l'enduriment. Aquest producte es pot obtenir, a més a més, com a subproducte de processos industrials concrets.

-Additius

Són els productes que poden fer-se servir en la fabricació del ciment per facilitar el procés de moltura o bé, per aportar al ciment o als seus derivats algun comportament específic. La dosificació dels additius ha de ser inferior al 1 per 100 en massa.

La tipologia de ciments amb les seves composicions es troben definits a la **Taula 1**.

Taula 1: Tipus de ciments segons la seva composició. (Fomento, 2009)

TABLA A1.1.1. Cementos comunes

Tipos	Denominación	Designación	Composición (proporción en masa) ⁽¹⁾														
			Componentes principales										Calizas ⁽⁴⁾			Componentes minoritarios	
			Clinker K	Escoria de horno alto S	Humo de sílice D ⁽²⁾	Puzolana		Cenizas volantes		Esquistos calcinados T	L	LL					
			Natural P	Natural calcinada Q	Silíceas V	Calciáreas W											
CEM I	Cemento pòrtland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Cemento pòrtland en escoria	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
Cemento pòrtland con humo de sílice	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
Cemento pòrtland con ceniza volante	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5	
Cemento pòrtland con esquistos calcinados	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5	
	CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5	
	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5	
	CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5	
Cemento pòrtland con caliza	CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5	
	CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5	
	CEM II/A-M	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5	
	CEM II/B-M	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5	
CEM III	Cemento con escorias de alto horno	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM IV	Cemento puzolánico ⁽³⁾	CEM IV/A	65-89	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM V	Cemento compuesto ⁽⁴⁾	CEM V/A	40-64	18-30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	

⁽¹⁾ Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios (núcleo de cemento).

⁽²⁾ El porcentaje de humo de sílice está limitado al 10%.

⁽³⁾ En cementos pòrtland mixtos CEM II/A-M y CEM II/B-M, en cementos puzolánicos CEM IV/A y CEM IV/B y en cementos compuestos CEM V/A y CEM V/B los componentes principales diferentes del clínker deben ser declarados en la designación del cemento (véase el apartado A1.1.2).

⁽⁴⁾ El contenido de carbono orgánico total (TOC), determinado conforme al UNE EN 19639, será inferior al 0,20% en masa para calizas LL, o inferior al 0,50% en masa para calizas L.

1.1.3.1. Metacaolin

L'element principal del metacaolin és la caolitina, un silicat d'alumini hidratat amb una composició aproximada de $2\text{H}_2\text{OAl}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. La caolitina és un mineral de l'argila que proporciona plasticitat i amb la cocció produeix un canvi permanent al material. Les propietats físiques i químiques del caolin determinen el seu ús. Aquests usos es determinen segons diferents factors, incloent la condició geològica. El caolins gruixuts s'utilitzen generalment com a argiles de farciment i, els materials més fins són utilitzats com a productes de revestiment.

El caolin és un dels materials industrials més utilitzats per les seves característiques. Les seves propietats com el color blanc, la suavitat, la grandària de la partícula i inèrcia química el fan adequat per a un gran nombre d'utilitzacions industrials com la producció de ceràmiques, porcellana i totxos tot i que té un gran ús en altres camps com la indústria paperera.

Al ser un fil·losilicat amb capes alternes de sílice i alumina elèctricament neutres amb una capa cristal·lina fa que la mida de partícula sigui fina i permet que es moguin les partícules per la seva disposició tetraèdrica i octaèdrica donant lloc a propietats físiques com suavitat, tacte sabonós, i de fàcil divisió. Sota condicions normals el caolí és bastant estable però es converteix en una putzolana natural amb un tractament tèrmic. (Rashad, 2013)

Les putzolanes són materials suplementaris afegits al ciment pòrtland per augmentar la resistència mecànica i la durabilitat de les estructures de formigó. Una putzolana és un material silici o silici-aluminós que per ell mateix no posseeix cap valor cimentós però, en forma dividida i en presència d'humitat reacciona químicament amb l'hidròxid de calç a temperatures ambientals per formar compostos amb propietats cimentoses. Existeixen mètodes tèrmics, mecànics i químics per activar el potencial reactiu dels materials putzolànics.

En el cas del caolin, aquest passa per un tractament tèrmic que va dels 600 als 900°C que trenca l'estructura trencant els enllaços entre les capes de sílice i alumina formant el metacaolin, un aluminosilicat amorf.

El metacaolin (MK) ha estat i és de gran interès per l'eliminació de l'hidròxid de calç Ca(OH)_2 , produït per la hidratació del ciment i s'associa a una baixa durabilitat. L'eliminació del Ca(OH)_2 va relacionat amb la resistència del ciment a l'atac del sulfat i a la reacció àlcali-sílíce (ASR). També proporciona una resistència millorada derivada de les fases de reacció de l'hidròxid de calç amb el MK gràcies a la reacció dels seus components (sílices i alúmines)

El tractament tèrmic augmenta l'activitat putzolànica que pot donar lloc a diversos compostos aluminats i silicats de calç hidratada.

La composició química dels productes de la reacció putzolànica amb l'hidròxid de calç en medi aquós depèn de molts factors, sobretot els que contenen alumina. Els productes depenen en gran part del contingut de calç en el sistema. (Vizcayno et al., 2010)

Avantatges de l'ús del metacaolin segons (Sabir et al., 2001)

Augment de la resistència a compressió i a flexió per la transformació de Ca(OH)_2 en C-S-H.

Reducció de la permeabilitat.

Augment de la resistència en front l'atac químic.

Major durabilitat de la matriu.

Redueix l'efecte de la reactivitat àlcali-sílíce (ASR).

Produeix una contracció reduïda degut al empaquetament de les partícules, fent més densa la matriu.

Millora la manejabilitat, l'acabat, el color i l'aparença.

Redueix la possibilitat d'eflorescències.

1.1.3.2. Fum de sílice

El fum de sílice està format majoritàriament per sílice amorfa i pertany a les putzolanes artificials.

El sílice és el segon material més abundant a la natura i és resistent a gran part d'agents químics. El dissolen les àlcalis molt forts i els carbonats de metalls alcalins.



El fum de sílice absorbeix la humitat i és ideal com agent anti-aglomerant. També fa d'agent espessant en els sistemes aquosos i no aquosos.

Pel que fa les característiques com a material putzolànic, trobem diferències entre el sílice soluble i l'insoluble i les diferències en quant a reactivitat segons el tipus es basen generalment en les seves propietats físiques (àrea específica i porositat). Està constituït per partícules esfèriques molt petites i d'aquí la seva elevada superfície específica.

El fum de sílice és un material que s'origina com a subproducte industrial en forns elèctrics dels processos metal·lúrgics, generant amb el seu ús una doble funció: revalorització d'un residu i disminució de la dispersió a l'atmosfera. El fum de sílice augmenta les resistències mecàniques dels ciments pòrtlands ja que provoca una densificació elevada a la pasta de ciment i una estimulació al procés d'hidratació.

L'activitat putzolànica del fum de sílice es deu principalment a la seva finor i també el seu contingut en sílice *víttria* (reactiva). Reacciona químicament amb el Ca(OH)_2 del ciment alliberada per la hidratació del ciment pòrtland accelerant la seva hidratació i donant una major formació de gel C-S-H.

Als 28 dies, la major part del fum acaba la reacció putzolànica donant lloc a compostos cimentants estables com silicats de calci hidratats (gel C-S-H). S'obté com a resultat una matriu de microporus molt densa (més que la del ciment pòrtland sol) donant majors resistències mecàniques i impermeabilitat. Aquesta última eleva les resistències químiques donant així durabilitat.(Trusilewicz, 2013)

1.1.4. Característiques físico-mecàniques del ciment

Segons(Fomento, 2009), les característiques físiques i mecàniques més importants són: l'enduriment, l'expansió, la finor de la mòlta i la resistència a compressió

-L'enduriment

La velocitat d'enduriment d'un ciment ve limitada per les normes establint un període de temps, des de l'amassat, dintre del qual s'ha de produir el principi i final de l'enduriment.

Tots dos conceptes es defineixen a partir d'un mètode convencional, mitjançant l'agulla de Vicat.

L'enduriment és més ràpid al seu començament, quan més elevada és la finor del ciment. La meteorització d'aquest (emmagatzemament prolongat) augmenta la duració de l'enduriment. La presència de matèria orgànica (que pot provenir de l'aigua o la sorra) alenteix l'enduriment i pot arribar a inhibir-lo. A menor quantitat d'aigua d'amassat, així com a major sequedat de l'aire de l'ambient, l'enduriment serà més ràpid.

-Expansió

Els assajos d'estabilitat de volum tenen per objectiu manifestar, a curt termini, el risc d'expansió tardana que pot tenir el ciment endurit degut a la hidratació de l'òxid de calç i/o òxid de magnesi lliures.

-Finor de la mòlta

És una característica lligada al valor hidràulic del ciment, ja que influeix decisivament en la velocitat de les reaccions químiques que tenen lloc durant l'enduriment.

Al entrar en contacte amb l'aigua, els grans de ciment s'hidraten només en una profunditat de 0,01 mm, pel que, si aquests grans fossin molt gruixuts, el seu rendiment disminuiria al quedar el seu nucli pràcticament inert. Però, si el ciment posseeix una finor excessiva i la retracció i el calor d'enduriment són molt elevats, el conglomerant resulta ser més susceptible a la meteorització després d'un llarg emmagatzematge i disminueix la seva resistència. Però, essent així, les resistències mecàniques augmenten amb la finor i s'ha d'arribar a un punt equilibrat de moltura.

-Resistències mecàniques

Segons la normativa la resistència d'un ciment s'entén com la resistència d'un morter normalitzat, amassat amb sorra, de característiques i granulometries determinades, amb una relació d'aigua/ciment de 0,5 en les condicions específiques per la Norma UNE 80.101, anàloga amb l'europea EN 196-1. Els trencaments s'efectuen normalment als 2, 7 y 28 dies.



1.2. Fibres vegetals

Després de les plantes de caire alimentari, les plantes productores de fibra tenen molta importància socio-econòmica, tant en els països desenvolupats com en vies de desenvolupament. L'obtenció de fibra a partir de vegetals s'ha realitzat des de temps molt remots per a usar-les en la fabricació de vestits i cordills.

Des de l'antiguitat el component fibrós de les plantes ha estat important per a la vida de l'home que, satisfent les necessitats primàries, ha utilitzat les fibres vegetals de diverses formes, en primer lloc per cobrir-se i després, amb l'avenç i el progrés, per a usos cada cop més especialitzats.

Existeixen una gran quantitat de plantes productores de fibra, que s'exploten tant en condicions de cultiu com de forma silvestre.

La fibra vegetal per a usos industrials s'obté majoritàriament de la fusta d'algunes espècies d'arbres. En menor mesura, també es poden obtenir fibres de plantacions específiques d'espècies herbàcies o arbustives, d'espècies silvestres de ràpid creixement, i és quasi testimonial l'obtenció de fibres a partir de residus forestals o agrícoles.

Des del punt de vista ambiental, les fibres vegetals procedents de plantes herbàcies tenen un gran interès considerant que són biodegradables, biocompatibles, renovables, i reciclables. Sota aquestes característiques, les fibres satisfan algunes demandes d'alguns consumidors que exigeixen un baix impacte ambiental en els productes i els seus processos. Aquestes demandes dels consumidors es van incrementant. La innovació tecnològica permet actualment, i amb una bona perspectiva de futur, l'ús de fibres vegetals. El seu ús es pot substituir i/o integrar-se en components d'origen mineral o bé obtinguts per la indústria petroquímica.

En definitiva, la producció de cultius de fibres, en certs casos, poden contribuir a fixar el nitrogen present en el sòl, evitant la contaminació, i constituir una defensa natural de la superfície agrària de l'acció dels agents climàtics.

En l'actualitat, l'ús de plantes productores de fibra s'ha vist molt ampliat per la possibilitat d'utilitzar tecnologies innovadores en sectors molt diversificats, tal i com es pot observar a la **Figura 1**. (Bellido, 2003)

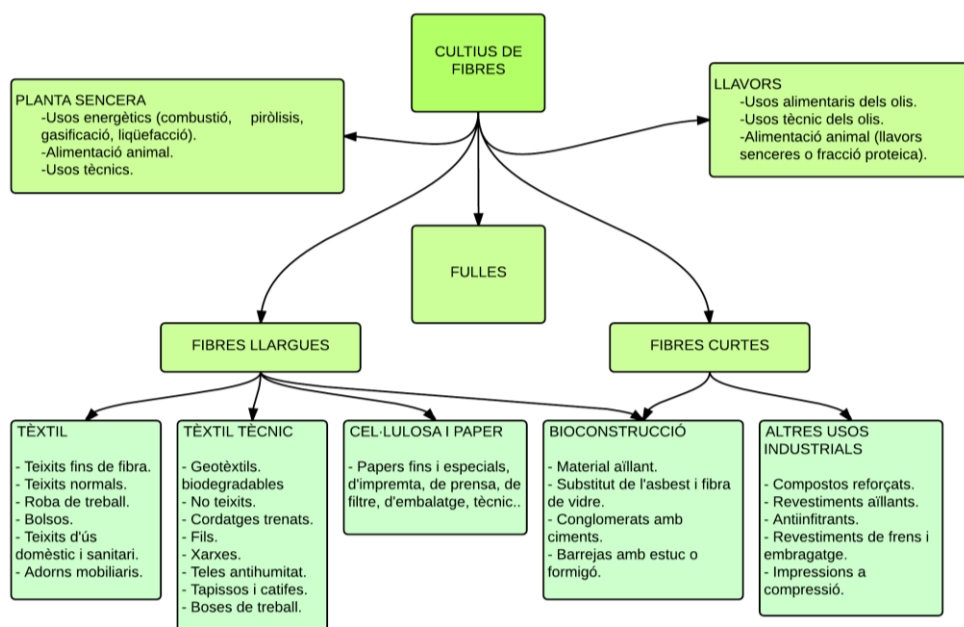


Figura 1: Organigrama amb les diverses utilitats dels cultius de fibres. Font: (Bellido, 2003)

1.2.1. Fibres de lli

En el nostre cas, les fibres utilitzades són de lli, *Linum usitatissimum*, provinents de Tolosa i fabricades a la Universitat Politècnica de Terrassa. La **Figura 2** ens mostra les fibres i la **Figura 3** ens mostra les fibres transformades en no teixit.



Figura 2: Mostra de les fibres de lli. Font pròpia.



Figura 3: No teixit fabricat a partir de fibres de lli. Font pròpia.

El lli és una planta de molta importància lligada a l'home en totes les etapes de la civilització com espècie d'interès agrícola, sobre tot per la utilització de l'oli i la fibra.

És una planta herbàcia anual dicotiledònia que pertany a la família de les Linàcies. La planta té una única tija prima i erecte, poc ramificada, d'entre 0,8 i 1,2 metres d'alçada.

Les fulles són senceres, lanceolades, lineals, glabres, sèssils, sense estípules i disposades en espiral a partir de la tercera. Els cultius de lli destinats per a fibra presenten tiges més llargues i rarament ramificades, contenint menys llavors. Aquesta tija doncs, comprèn una corona fibrosa pericíclica o liberiana, composta de 30-40 feixos de fibra més o menys units. El seu número i longitud depèn del diàmetre de la tija.

Els feixos elementals, també anomenats fibra tècnica, s'estenen des de l'axil·la de la fulla i acaben a la inserció foliar. Aquest espai és el que dona la longitud dels feixos elementals i pot explicar la importància tecnològica d'obtenir tiges no ramificades i de ràpid creixement. Els feixos elementals estan soldats entre ells i amb els altres teixits circumdants mitjançant compostos proteics. Les tiges estan formades per nombroses cèl·lules anomenades fibres elementals, anatòmiques o fibril·les. Aquestes són el resultat de la deposició de capes successives de cel·lulosa en les parets d'una cèl·lula inicial fins la desaparició del seu citoplasma i mort de la cèl·lula. Al centre subsisteix un espai buit. Cada fibra elemental està separada de la del costat per lamel·les de composició pèptica.

La seva arrel és pivotant i pot arribar a fer 1 metre de profunditat. Les flors s'agrupen en un raïm terminal o bé com cimes obertes. Són hermafrodites i tenen 5 sèpals i 5 pètals de color blanc o blau. El fruit és una càpsula globosa, normalment indehiscent en la maduració formada per 5 lòculs o carpels contenint 2 llavors separades per una falsa paret. Les llavors mesuren de 4 a 6 mm de longitud i de 2 a 3 mm d'ample, són ovals-

oblongues, aplanades, llises, brillants, amb l'apex corbat i de coloració variant del groc al vermell fosc. (Bellido, 2003)

El lli doncs, té una utilització preferentment tèxtil i paperera tot i que, també es cultiva per a la producció de llavors de les quals s'obtenen olis. Actualment però, també s'està experimentant amb aquestes fibres en el camp de la construcció.

La presència de fibres de lli en una matriu de ciment altera el comportament del ciment en estat fresc i el seu entorn. De fet, els compostos polisacàrids no cel·lulòsics (estimats entre el 5-15% de la massa seca de les fibres i depenent de la varietat de lli) alteren la hidratació del ciment. A més, les fibres absorbeixen una quantitat important d'aigua (fins a un 200% de la seva massa) generant un fibrociment extremadament sec que disminueix la capacitat de treball. A l'estat endurit, les fibres milloren la resistència a la flexió del material compost.

L'estructura de porus de la paret de la fibra, la caracterització de la superfície específica i la mida, el volum i la distribució dels porus és important per a la comprensió les propietats de la fibra. Les fibres són flexibles i tenen capacitat d'absorbir aigua i incrementar el seu volum. (Fu et al., 2015)

1.3. Fibrociment

Mentre que el ciment Portland és un dels materials manufacturats més utilitzats, aquests són fràgils i posseeixen una resistència baixa a la tracció abans de fallar. Aquest fet ha buscat mètodes per suplir aquestes deficiències amb la incorporació al material base, el ciment, altres materials amb major resistència a la tracció.

Els materials compostos amb no teixits milloren la tenacitat, ductilitat, capacitat de flexió i resistència a les esquerdes en comparació amb els ciments no reforçats amb fibres. De fet, des de l'antiguitat s'han afegit fibres naturals per reforçar materials fràgils, per exemple, palla amb fang per reforçar les propietats de les totxanes.

Més endavant, el concepte més rellevant i revolucionari de fibrociments van ser les fibres d'amiant, un mineral fibrós del qual s'extreuen uns filaments particulars molt apreciats en



la indústria del segle XX. La resistència a la calor, la resistència mecànica a la tracció són excepcionals i alhora resisteix bé l'alcalinitat del ciment. L'avenç tecnològic va venir al 1900 quan l'enginyer tèxtil Ludwig Hatschek (1856-1914) va crear una màquina que permetia obtenir làmines d'uns quants mil·límetres de gruix d'una barreja de pasta de ciment i fibra d'amiant i podia servir com a material de construcció. Però, a partir dels anys 70 la seva producció va anar disminuint com a conseqüència de l'evidència científica dels riscos sanitaris de l'ús de l'amiant fins que al 1985 va quedar prohibit el seu ús en productes quotidians i al 2001 la utilització d'amiant va quedar prohibida per la normativa espanyola.

Entre els diferents tipus de fibres usades en materials compostos a base de ciments, les fibres naturals ofereixen diferents avantatges com són la disponibilitat, el fet de ser materials renovables, de baix cost i amb tecnologies de fabricació corrents. Aquests materials compostos proporcionen una gran oportunitat en la construcció d'habitatges i pot generar grans incentius econòmics en particular en els països en vies de desenvolupament ja que la seva disponibilitat i producció requereixen un baix grau d'industrialització. A més a més, en comparació amb el sintètic, les fibres naturals requereixen menys energia per ser produïdes. (Toledo et al., 2009)

Per altra banda, l'actual necessitat d'habitatges econòmics, sostenibles i segurs és un problema global inherent i, actualment, hi ha moltes línies d'investigació obertes per a produir productes de construcció ecològics que siguin estructuralment segurs i duradors. Un dels grans desavantatges de les fibres naturals és la descomposició que presenta a l'ambient alcalí propi del ciment Portland. Un altre desavantatge important són els cicles humit i sec que pateixen a la intempèrie i això ha limitat el seu ús en la indústria. (Bensadoun et al., 2013)

Des del punt de vista comercial i tecnològic són poques les plantes productores de fibres, entre les quals destaquen el cotó, jute, lli, kenaf, cànem, sisal... (Bellido, 2003)

1.3.1. Degradació de la matriu en contacte amb la fibra

La pèrdua de resistència de la matriu és atribuïda principalment als danys causats en les fibres per l'efecte del material de cimentació. La porositat de la matriu permet variacions

en el contingut d'humitat de les fibres i, per tant, canvis importants en l'adhesió de la matriu-fibra.

Les fibres cel·lulòsiques poden modificar la quantitat de calor alliberat durant la reacció d'hidratació de la pasta de ciment. Aquest efecte varia en funció de la naturalesa i la puresa de les fibres utilitzades per fabricar el fibrociment. Unes fibres amb alts nivells components no cel·lulòsics, com poden ser lignina, midó o cera provoquen una disminució del calor d'hidratació, causant com a conseqüència una reducció de la resistència del fibrociment. ([Ardanuy et al., 2011](#))

1.3.2. Degradació de les fibres en medi alcalí

Les fibres es disposen dins de la matriu conjuntament amb el ciment i queden completament immerses. El ciment produeix un medi alcalí, la cel·lulosa és inestable en aquestes condicions i, per tant, es degradarà a compostos de baix pes molecular solubles en aigua. El tipus de degradacions formades depenen tant de la composició química de la solució en contacte amb la cel·lulosa com de l'estructura que prengui la cel·lulosa en la seva forma supramolecular (cristal·linitat o morfologia fibril·lar).

Si la cel·lulosa presenta una estructura supramolecular molt ordenada (índex de cristal·linitat elevat), la degradació és molt baixa. Per contra, la cel·lulosa amorfa té una reactivitat més elevada en l'ambient alcalí.

L'etapa limitant de la velocitat per un atac químic dependrà de la taxa d'escissió de la cadena o la reacció dels grups terminals "inaccessibles". Aquest procés és més ràpid en les regions amorfes en comparació amb les regions cristal·lines. Les taxes de degradació i estabilització depenen doncs de la naturalesa de la cel·lulosa i de l'alcalinitat i la temperatura. L'estabilització es veu afavorida per una concentració elevada d'alcalins juntament amb temperatures elevades. ([Knill et al., 2003](#))

La degradació segons la composició química ve donada per la presència de Ca^{2+} , que és el catió principal en els porus d'aigua del ciments. La cadena polimèrica de la cel·lulosa es degradarà principalment en àcid (gluco) isosacàric (ISA) (monosacàrid de sis carbonis formats pel contacte amb l'hidròxid de calç).



El mecanisme principal de degradació de la cel·lulosa en medis alcalins és una reacció de despreniment. Com a resultat una degradació parcial de la cel·lulosa en àcid isosacàric soluble en aigua. La fracció α - d'aquest àcid soluble forma una sal de Ca poc soluble en aigua de manera que la concentració màxima d'aquest component depèn directament de la concentració de Ca en l'aigua dels porus del ciment i que catalitzarà les reaccions de creació de noves sals $\text{Ca}(\text{ISA})_2$. Aquest procés trenca les cadenes de cel·lulosa reduint el seu grau de polimerització i la seva resistència. (Van Loon, et al., 1999)

Per tant, aquest medi alcalí causa una degradació de la cel·lulosa i aquest està relacionat amb una reducció de la resistència a la tracció. La degradació de la cel·lulosa pot donar problemes de durabilitat de les fibres al llarg del temps. (Palme et al., 2014)

1.3.3. Reducció de l'adherència fibra-matriu per canvis de volum de la fibra

Quan el fibrociment està sotmès a la intempèrie, es poden produir canvis d'humitat i de temperatura que es tradueixen en la saturació d'aigua o assecament dels porus del material. Aquesta aigua intersticial és absorbida per les fibres provocant augments de volum. En la fase d'assecament, la fibra cedeix la seva humitat, cosa que provoca una reducció del volum. Aquest procés es pot observar a la **Figura 4**.

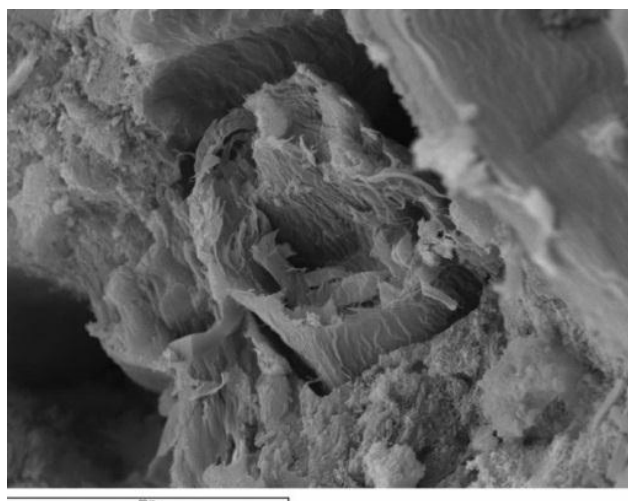


Figura 4: Desunió fibra-matriu. Font: DEAB (Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia)

Aquests processos de mullat i assecat successius de les fibres produeixen una desunió gradual entre la fibra-matriu. Els tractaments de superfície són llavors necessaris per evitar els canvis dimensionals i, per tant, la pèrdua d'adherència de les fibres. (Bellido, 2003)

1.3.4. Cornificació de les fibres

Tant en les indústries tèxtils com en les papereres ocorre aquesta cornificació i en aquesta última, en el cas concret del reciclatge de paper.

Pel que fa aquest cas, al fer un procés de cornificació per a reciclar les fibres de paper, aquest canvia irreversiblement la seva estructura i la retenció d'aigua. Aquest canvi ocorre durant el primer reciclatge (primers cicles de cornificació) i a mesura que es van reciclant aquests disminueixen més lentament. Aquest cas és un símil de les fibres de lli. (Brancato et al., 2007)

A la **Figura 5** podem observar, a nivell microscòpic, un exemple de fibres abans i després de la cornificació.

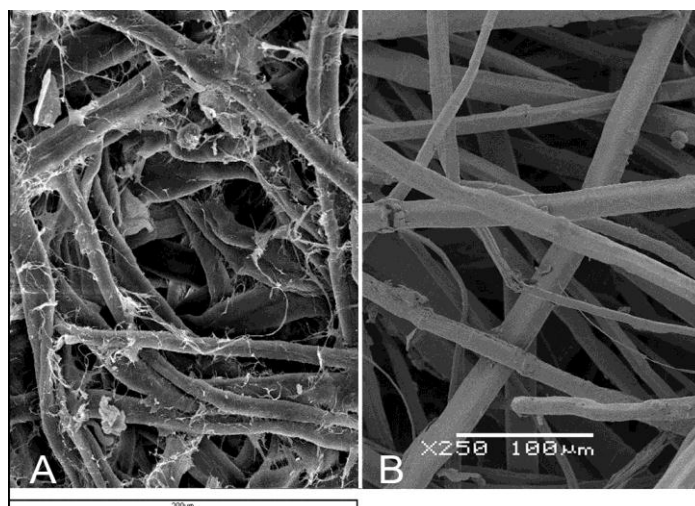


Figura 5: Exemple de fibres abans de la cornificació (esquerra) i després de la cornificació (dreta). Font DEA.

Al reciclatge de paper, els cicles sec-humit condueixen a una disminució de la capacitat d'absorció d'aigua de les fibres. Aquest canvi en el comportament d'absorció d'aigua ha estat definit com cornificació per Jayme al 1944. Actualment, aquest terme s'utilitza per a

descriure els canvis físico-químics en les fibres de cel·lulosa atribuïts a un assecatge, principalment en la contracció (donant fibres més rígides i menys confortables) i en la formació de nous enllaços d'hidrogen interns. Aquest canvis poden generar efectes irreversibles com és el cas de la pèrdua d'expansió física de la cèl·lula de la fibra en aquest procés.

Aquests canvis estan associats amb el tancament no reversible de porus de grandària nanomètrica a les fibres durant l'assecat degut a la coalescència d'agregats de fibril·les de cel·lulosa. La coalescència s'explica amb la formació d'enllaços d'hidrògens entre els agregats de fibril·les de cel·lulosa a les parets de les fibres però també, les reaccions d'entrecreuant que condueixen a la formació d'enllaços covalents. A més a més, el tancament dels petits porus i l'augment de la grandària dels agregats de les fibril·les dona lloc a la disminució de la superfície. (Palme et al., 2014)

Hi ha experiments que parlen sobre els efectes del reciclatge i dels cicles d'assecat i mullat que hi ocorren. L'assecat juga un paper clau en les dimensions de les fibres de seccions transversals. En aquests estudis s'observa que la pasta de paper amb un procés de cornificació sota un medi innocu (aigua) no pateix cap disminució en la seva amplada, inclòs en cicles d'assecatge i humectació elevats. A més a més, no s'observa cap disminució en el gruix de la paret de la fibra.

Basant-se en els resultats obtinguts en estudis sobre la contracció de la fibra i cornificació, s'ha proposat que aquesta contracció de la fibra es produeix en dues fases diferents. En la primera, aquesta contracció és causada per la deshidratació dels porus de la paret cel·lular de la fibra. L'eliminació de l'aigua dels porus fa que aquests porus es tanquin de forma tangencial. Això genera una contracció laminar ortogonal al pla. Pel que fa la segona fase, la contracció s'inicia al final de l'assecatge, quan l'aigua de constitució surt de la microestructura de la fibra. Allà, els porus de la paret cel·lular s'han tancat ja i la resta d'aigua, que està més o menys unida, es situa en les parts amorfes de la cel·lulosa. L'eliminació d'aquesta aigua restant genera una contracció en la direcció de l'amplada de la fibra. (Weise et al., 1999)

1.3.5. Característiques de cada component en la fabricació del fibrociment

En la fabricació del fibrociment, cada component té una funció específica. Segons (Fordos et al., 1988):

La matriu de ciment és la responsable de:

- Transferir les tensions provocades per les accions externes a les fibres.
- Fixar les fibres en la seva posició.
- Protegir les fibres de l'ambient extern.

Les fibres són les responsables de:

- Millorar la resistència a tracció o flexió del la matriu de ciment
- Reduir o eliminar la propagació de les fissures
- Modificar la densitat de la matriu de ciment

Per que cada component acompleixi la seva funció, és necessari que la zona de transició entre matriu i fibra sigui capaç de:

- Desenvolupar una adherència adequada per transmetre les tensions entre els components.
- Protegir la fibra de les agressions mecàniques internes.
- Evitar el contacte directe entre fibres.

Les propietats i paràmetres de cada component que més determinen el comportament dels fibrociments són:

En el cas de la matriu de ciment:

- Propietats mecàniques: la resistència i el mòdul d'elasticitat a compressió i a esforços tangencials.
- Paràmetres geomètrics: la longitud crítica d'immersió de les fibres, el valor de la qual està relacionada amb la granulometria de la matriu.
- Propietats reològiques: la modificació de la plasticitat per la inclusió de les fibres, que també està molt relacionada amb la granulometria de la matriu.

En el cas de les fibres:

- Propietats mecàniques: la resistència, el mòdul d'elasticitat i tipus de trencament a tracció.



Paràmetres geomètrics: l'esveltesa, la curvatura i la rugositat de la seva superfície.

Propietats reològiques: l'afecció a l'aigua i la sensibilitat dimensional a la humitat.

Pel que fa a la zona de transició:

L' adherència fibra-matriu.

La porositat.

La interacció química entre la fibra i la matriu.

El procés de fabricació dels fibrociments també pot modificar les característiques del producte resultant en funció de:

El procediment de formació del producte: emmotllat, extrusió, laminació, ...;

L'orientació de les fibres: aleatòria, orientada en una o dos direccions;

La distribució de les fibres: homogènia, laminar, ...;

La compactació: cops, compressió, vibració, vuit, ...,

El curat: natural, humit, al vapor, ...

2. Objectius

L'objectiu d'aquest treball és trobar un fibrociment d'elevades característiques mecàniques i bona durabilitat. Per tal d'assolir aquest objectiu, s'han desenvolupat els següents subobjectius:

- a) Obtenció de fibres amb les millors característiques físico-mecàniques després d'aplicar diferents tractaments. El tractament triat consisteix en sotmetre la fibra a cicles sec-humit en diferents condicions.
- b) Obtenció d'un ciment compatible amb les fibres i amb bones característiques mecàniques eliminant l'hidròxid de calç. El mètode d'obtenció seguit ha estat la barreja del ciment amb addicions putzolàniques a diferents concentracions.
- c) Obtenció d'un fibrociment durable a partir de les fibres més adequades i d'una matriu compatible.

3. Materials i mètodes

3.1. Assajos realitzats amb el ciment

En aquest assaig s'ha procedit a analitzar la compressió del ciment variant les composicions de les mescles. S'ha realitzat un assaig inicial amb diferents concentracions de fum de sílice i un assaig posterior, també amb fum de sílice però, afegint-hi metacaolin.

3.1.1. Materials

Per a la fabricació del ciment s'han utilitzat:

- Ciment Portland del tipus I (segons la norma UNE-EN 197-1:2000 "*Cemento, Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*", subministrat per l'empresa CIMENCAT).
- Fum de Sílice com a material putzolànic (subministrat per l'empresa SIKA).
- Metacaolin comercial amb un pretractament tèrmic de 800°C durant 2 hores(subministrat per ARCILLAS REFRACTARIAS S.A.).
- Superfluidificant, producte de l'empresa Sika Viscocrete-3425 a base de Policarboxilato modificat en base aquosa, dosificat al 0,4% del pes del ciment.
- Aigua desionitzada.

3.1.2. Fabricació de provetes i assaig de compressió variant la concentració de fum de sílice.

A partir dels materials anteriors, es van realitzar un seguit de provetes amb diferents de concentracions de fum de sílice. Les dosificacions es mostren a la **Taula 2**:

Taula 2: Dades dels diferents materials utilitzats en les diferents mesclades per a l'assaig.

*El fluïdificant es troba en funció de la quantitat de ciment afegit.

Provetes	Ciment (g)	FS (g)	FS (%)	Aigua (g)	FI (g)*
1	940,8	0	0	329,28	11,76
2	705,6	35,134815	5	260	8,82
3	705,6	52,7022	7,5	260	8,82
4	705,6	70,26965	10	260	8,82
5	705,6	87,83705	12,5	260	8,82
6	705,6	105,40445	15	260	8,82

S'han realitzat 12 provetes de cadascuna de les 6 dosificacions per realitzar els assajos de les compressions. En aquests assajos s'han trencat 3 provetes de cada dosificació a l'edat de 14, 28, 42 i 56 dies.

Les provetes s'han fabricat aprofitant unes glaçoneres com a motlle. Com que el motlle té una forma lleugerament irregular, abans d'assajar-les, s'ha procedit a tallar i polir les bases superior i inferior. D'aquesta manera s'obté una figura de con trucat, amb bases paral·leles de manera que la compressió es produeix de manera uniforme en totes les parts de la peça.

Un cop fabricades s'han deixat madurar a la cambra d'humitat, a una humitat <95% i una temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

L'assaig a compressió d'aquestes provetes s'ha dut a terme una premsa multiassaig Incotècnic, amb una cèl·lula de carrega 300 kN seguint la norma EN-196-1 "*Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas*" a una velocitat de 10mm/min, aplicant-hi una pre-càrrega prèvia de 5 kg.

3.1.3. Fabricació de provetes i assaig de compressió amb la dosificació final

Tal i com s'explicarà en l'apartat 4. *Resultats i discussió*, cap de les dosificacions anteriors ha estat satisfactòria per fabricar el fibrociment. Per aquest motiu s'ha decidit canviar la



dosificació de la matriu per un altre obtinguda de la bibliografia que incorpora, a més a més, del fum de sílice, metacaolin.

Per a realitzar aquest assaig s'ha fabricat una única barreja amb els components que es mostren a la **Taula 3**:

Taula 3: Barreja utilitzada per fabricar l'assaig de les provetes amb metacaolin i l'assaig del fibrociment

MESCLA MARE		
ELEMENTS	PES (g)	
Ciment	1250	
MK	875	
FSH	FS	375
	Aigua	375
Fluidificant	10	
Aigua	1400	

Les provetes s'han fabricat seguint el mateix procediment que amb les provetes de l'assaig anterior. Les mostres s'han conservat en les mateixes condicions d'humitat i s'han trencat a l'edat de 7, 14 i 21 dies.

3.1.4. Assaig amb fenolftaleïna

Aquest assaig s'ha dut a terme inicialment amb les provetes fabricades amb fum de sílice. Com es va observar una alcalinitat elevada, es van realitzar posteriorment unes altres provetes amb una mescla mare, on també s'ha assajat amb fenolftaleïna.

S'ha utilitzat una solució d'alcohol amb fenolftaleïna fins a saturació com a indicador d'alcalinitat del ciment. És un tipus de marcador que s'utilitza molt en el món de la construcció i enginyeria civil que tenyeix els materials amb un pH superior a 8,2 amb un color violaci.

3.2. Assajos realitzats amb les fibres

3.2.1. Fibres vegetals

Per aquests assajos s'han utilitzat fibres de lli (*Linum usitatissimum*). La fibra procedeix de Tolosa i l'elaboració del no teixit ha estat efectuada per l' Universitat Politècnica de Catalunya al Departament d'Enginyeria Tèxtil i Paperera (DETP).

3.2.2. Assaig de cornificació

El no teixit s'ha tallat en mostres de 35x35cm, amb un total de 12 mostres, 2 per a cadascun dels 6 tractaments que s'han realitzat. S'ha diferenciat el sentit de fabricació (ordit i trama) per a cadascuna de les 2 mostres de cada tractament.

Per cada tractament s'ha analitzat si el sentit de fabricació del no teixit té algun resultat rellevant i quins dels dos dona millors resultats de tracció.

El primer tractament ha consistit en assecar les peces de no teixit a una estufa a una temperatura de 60°C (cicle sec). Després s'han mullat fins la total absorció d'aigua (cicle humit).

El segon tractament ha consistit en assecar les peces a 160°C en estufa (cicle sec). Després del total assecament, s'han deixant en remull fins l'absorció total d'aigua (cicle humit).

El tercer tractament s'ha combinat un assecatge de 160°C (on s'ha assecat la part més important d'aigua absorbida per les fibres) i un planxat manual de les mostres (amb una planxa d'usuari) on se li aplica pressió. Després s'han mullat fins a la total absorció d'aigua (cicle humit).

Al quart tractament, s'ha fet en estufa a 60°C (cicle sec), i després les fibres s'han autoclavat durant 1 hora a 121°C (cicle humit)

Al cinquè, s'ha posat en una estufa a 160°C (cicle sec) i, s'ha autoclavat durant 1 hora a 121°C (cicle humit)



Per últim, el sisè tractament s'ha posat en una estufa a 160°C i s'ha passat la planxa (cicle sec). Després s'ha posat en un autoclau també durant 1 hora a 121°C (cicle humit). La nomenclatura utilitzada per a cada tractament s'ha especificat en la **Taula 4**:

Taula 4: Nomenclatura i tractaments de les fibres

Nomenclatura	Nº cicles	Cicle sec (temperatura)	Cicle humit	Sentit de fabricació
EAUT_160_T	5	estufa (160°C)	autoclau	Trama
EAUT_160_U	5	estufa (160°C)	autoclau	Ordit
EAUT_60_T	5	estufa (60°C)	autoclau	Trama
EAUT_60_U	5	estufa (60°C)	autoclau	Ordit
EA_160_T	5	estufa (160°C)	aigua	Trama
EA_160_U	5	estufa (160°C)	aigua	Ordit
EA_60_T	5	estufa (60°C)	aigua	Trama
EA_60_U	5	estufa (60°C)	aigua	Ordit
PAUT_160_T	5	planxa + estufa (160°C)	autoclau	Trama
PAUT_160_U	5	planxa + estufa (160°C)	autoclau	Ordit
PA_160_T	5	planxa + estufa (160°C)	aigua	Trama
PA_160_U	5	planxa + estufa (160°C)	aigua	Ordit

3.2.3. Assaig de tracció de les fibres

Un cop realitzats aquests tractaments, les mostres de no teixit s'han tallat en trossos de 5x30cm i se'ls ha realitzat un anàlisi a tracció.

Aquests assajos s'han realitzat en una màquina MTS, amb una cèl·lula de càrrega de 5 kN, amb l'amplada de la tira de no teixit de 50mm, una distància entre les pinces de 200 mm, un nombre de fils de 50, una pre-càrrega inicial de 5N i a una velocitat d'assaig de 100 mm/min.

3.2.4. Assaig de l'índex d'absorció d'aigua

L'assaig de l'índex de retenció d'aigua de les mostres s'ha realitzat posant les diferents mostres en un ambient de laboratori on les peces han pogut absorbir la humitat de l'ambient fins l'estabilització del seu pes. Un cop passat aquest temps, les diferents

mostres s'han posat en una estufa a 105 ± 2 °C fins a pes constant. Un cop assecades s'ha calculat l'absorció d'aigua. Aquest valor s'obté dividint la diferència de pes entre la mostra en ambient de laboratori i el pes de la mostra seca pel pes de la mostra seca, utilitzant la següent equació:

$$WRV, \% = \left(\frac{m1 - m2}{m2} \right) \times 100$$

On "m1" és el pes inicial de la fibra i "m2" és el pes de la fibra un cop seca.

3.3. Assajos realitzats amb el fibrociment

En aquest assaig s'ha procedit a analitzar a flexió diverses plaques de fibrociments fabricats amb la matriu de l'apartat 3.2.3 amb els millors no teixits assajats als apartats 3.1.3 i 3.1.4 Aquests assajos s'ha realitzat amb provetes amb i sense tractament d'envelliment accelerat, segons les normes UNE-EN 12467 "*Placas planes de centro reforzado con fibras. Especificaciones del producto y métodos de ensayo*" i TFR-1 "*Test for the determination of modulus of rupture and limit of proportionality of thin fibre reinforced cement sections,*"

3.3.1. Fabricació de plaques de fibrociment

La matriu utilitzada és la mateixa que la definida en l'apartat 3.2.4 però, amb una relació ciment-aigua de 0,74. Aquesta relació s'ha obtingut fent proves de consistència amb diferents concentracions d'aigua i s'ha escollit a vista la que oferia millors resultats de penetració en els no teixits per fabricar les diferents plaques de fibrociment.

Els no teixits seleccionats han estat dos més un de control. Els tractaments escollits han estat el PA_160 i PAUT_160.

En total, s'han elaborat 6 plaques de fibrociment, 2 per a cada tipus de no teixit seleccionat. Cada placa s'ha dividit en 6 provetes, tres de les quals s'assagen sense cap



tractament i la resta s'assagen després d'un tractament d'envelliment accelerat. La nomenclatura utilitzada es mostra en la **Taula 5**.

Taula 5: nomenclatura dels tractaments escollits per la fabricació del fibrociment

Nomenclatura plaques	Tractament cicle sec	Tractament cicle humit
ST	Cap tractament	Cap tractament
PA_160	Planxa-estufa 160°C	Aigua
PAUT_160	Planxa-estufa 160°C	Autoclau

Les plaques de fibrociment s'han fabricat en un motlle metàl·lic de 30x30 cm amb unes perforacions a la base per eliminar l'excedent d'aigua mitjançant una bomba de buit. El motlle també inclou unes plaques metàl·liques superior i inferior per compactar a compressió el fibrociment, a una pressió de 40 MPa. Per facilitar el desemmotllat de les plaques s'ha aplicat un desencofrant al motlle i s'ha afegit un paper de filtre a la base

Un cop realitzat això, s'inicia la confecció de la placa col·locant a la base una petita capa de mescla (al voltant de 1 mm) per tal de protegir i separar el no teixit de l'exterior. Aquesta capa s'ha aplicat a totes les superfícies de la peça.

Amb l'ajuda d'un rodet, s'ha anat aplicant la mescla a les diferents mostres de no teixit per ambdues cares i col·locant-les una a una al motlle, alternades segons el sentit de fabricació. En total s'han aplicat 5 capes de no teixit a cada placa de fibrociment.

Aquest procediment s'observa a la **Figura 6**.

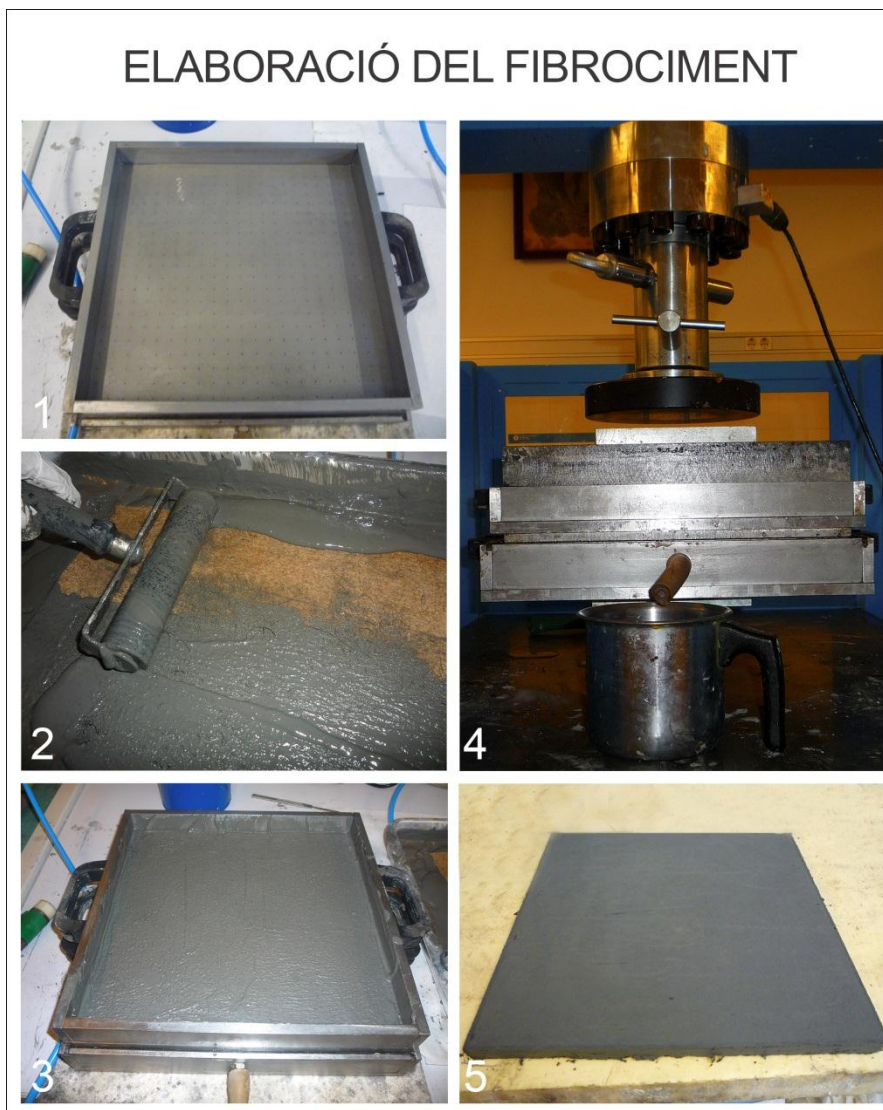


Figura 6: Procés d'elaboració d'una placa de fibrociment. 1) Motlle 2) Impregnació de fibres amb la mescla 3) Fibres incorporades al motlle 4) Prensat de la placa 5) Placa finalitzada.

Un cop fabricades les provetes s'han desemmotllat i deixat madurar durant 28 dies seguint la norma EN-196-1 "*Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas*" a una cambra humida amb unes condicions d'humiditat $\geq 95\%$ a una temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

3.3.2. Tractament d'envelliment accelerat

El tractament d'envelliment accelerat segueix la norma UNE-EN 12467 "Placas planes de centro reforzado con fibras. Especificaciones del producto y métodos de ensayo" i consisteix a aplicar a les provetes 20 cicles sec-humit. Durant el cicle sec, la proveta s'introdueix a una estufa a una temperatura de 60°C durant 6 hores. Pel que fa al cicle humit, les provetes es submergeixen en aigua durant 18 hores.

3.3.3. Assaig a flexió

L'assaig a flexió s'ha dut a terme seguint el TFR-1 del RILEM amb una premsa multiassaig Incotècnic, amb una cèl·lula de carrega 3 kN a una velocitat de 5mm/min seguint la norma EN-196-1 "Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas" seguint l'esquema de 4 punts de flexió per a una longitud entre recolzaments de 26 cm, tal i com es mostra a la **Figura 7**.

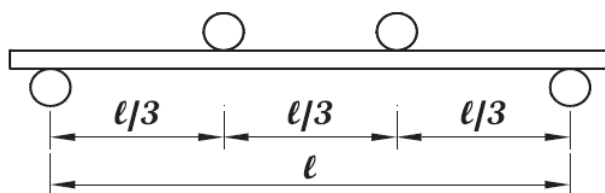


Figura 7: Esquema de la flexió a 4 punts on " l " té un valor de 26 cm.

Aquesta configuració permet que hi hagi una part de la proveta entre les dues carregues sotmesa a un esforç de flexió constant i alhora els punts de descans de la proveta es mantinguin allunyats dels punts d'aplicació de força, el que garanteix que s'obtinguin els resultats correctes.

3.4. Anàlisi de resultats

La caracterització del comportament dels materials s'ha obtingut a partir de l'anàlisi de les corbes força-deformació adquirides directament de les màquines d'assaig. En el cas de les fibres, per minimitzar l'heterogeneïtat del no teixit, es va calcular el paràmetre

força/pes de la mostra assajada. Per cada grup format per 6 mostres (n=6) es va determinar la mitjana aritmètica i la desviació típica.

En el cas dels ciments, es va calcular la tensió a partir de la fórmula $\sigma = \text{força}/\text{area}$. Per a cada grup de ciments es va elaborar la tensió mitjana i la seva desviació típica.

Pel que fa al fibrociment s'han calculat els següents paràmetres mecànics després de transformar la corba força-desplaçament en tensió-deformació: el límit de proporcionalitat (LOP), el mòdul de ruptura (MOR), el mòdul d'elasticitat (MOE), l'absorció d'energia.

El LOP es defineix com el valor de la tensió màxima abans del moment del trencament de la matriu i s'obté directament de la corba tensió-deformació. El MOR és la tensió màxima del material i s'obté a partir de la fórmula [1]. El MOE és la tangent de l'angle de la corba tensió-deformació, al 80% del LOP i s'obté de la fórmula [2]. L'energia absorbida és l'àrea sota la corba tensió-deformació des del principi fins a la finalització de la prova, dividida per l'àrea transversal de la proveta. La norma TFR-1 del RILEM recomana que la prova conclouï quan es doni el primer dels dos successos següents: o bé, quan el valor MOR durant l'assaig decaigui un 40% respecte el màxim, o bé, quan el valor de la deformació arribi al 10% de la distància entre recolzaments.

Les equacions depenen de la configuració de flexió, les distàncies entre els recolzaments de les peces i la seva relació amb les forces. I són les següents:

$$MOR = \frac{F \times l}{b \times h^2} \quad [1]$$

$$MOE = \frac{23 \times F \times l^3}{108 \times f \times b \times h^3} \quad [2]$$

On,

F=Força màxima (kN)

l=Longitud entre els recolzaments (mm)

f=Deformació màxima (mm)

b=Amplada de la peça (mm)



h =Alçada de la peça (mm)

Per cada grup format per 6 mostres ($n=6$) s'ha obtingut la mitjana aritmètica i la desviació típica.

En tots els cassos s'ha considerat que la mitjana aritmètica matisada amb la desviació típica és suficient per a determinar les diferències entre els diferents materials.

4. Resultats i discussió

4.1. Resultat dels assajos amb el ciment

4.1.1. Resultats a compressió de les provetes amb diferents concentracions de fum de sílice

Els resultats obtinguts en l'assaig de compressió de les provetes amb diferents concentracions de fum de sílice ha donat les següents tensions per a cadascun dels assajos i dies analitzats:

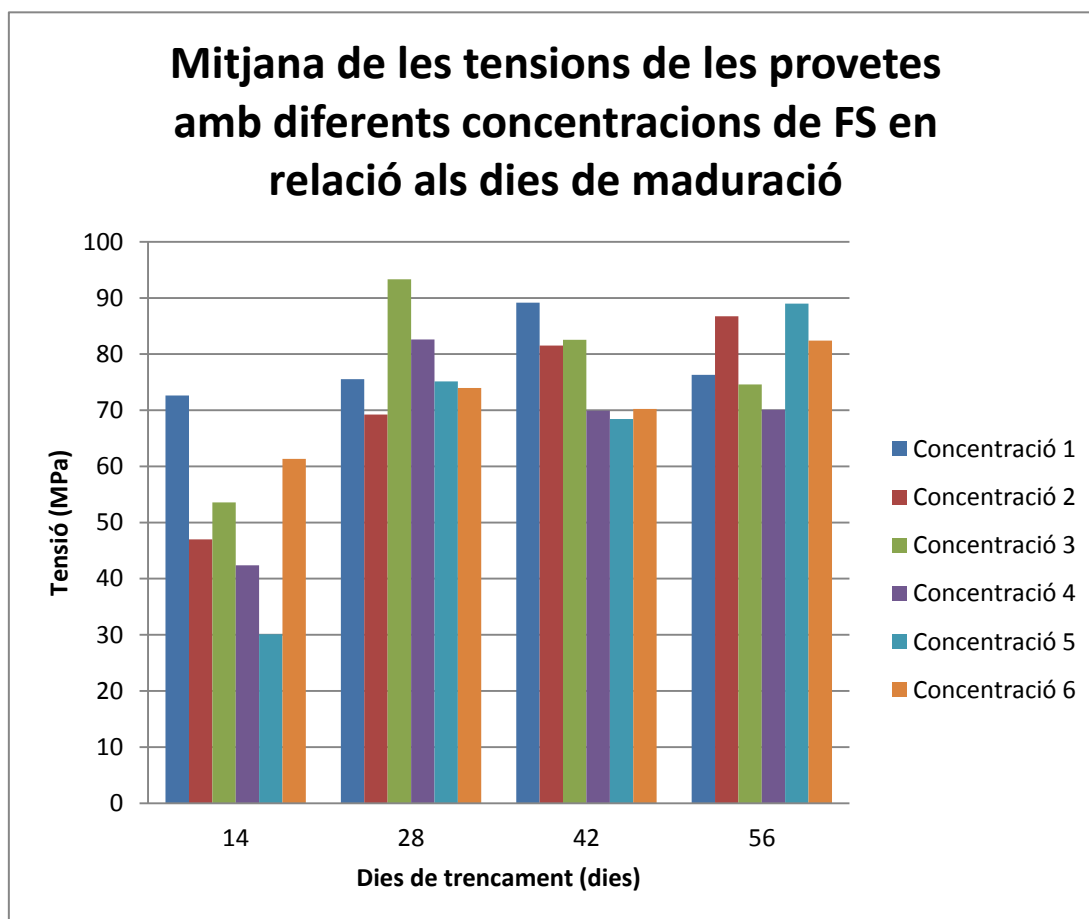


Figura 8: Tensio-deformació de l'assaig amb metacaolin a l'edat de 14, 28, 42 i 56 dies.

Taula 6: Desviacions estàndard de les diferents concentracions de fum de sílice a diferents dies de maduració.

Concentracions de fum de sílice	Dies de maduració			
	14	28	42	56
1	16,720	14,748	25,683	10,761
2	8,872	6,490	11,196	16,314
3	1,958	52,716	11,751	14,033
4	6,719	9,907	10,627	10,627
5	2,861	7,932	15,190	18,793
6	4,489	15,559	15,232	2,214

Com podem observar a la **Figura 8** i a la **Taula 6**, els resultats varien molt al llarg del temps entre les mateixes concentracions i tenen una desviació estàndard bastant elevada. La tendència de la resistència hauria de ser creixent en totes les concentracions al llarg del temps però, en la majoria de les provetes trobem augments i disminucions de la tensió. La conseqüència pot ser deguda a la metodologia de l'assaig. Al no ser un motlle calibrat i malgrat el procediment de tallar les cares paral·leles és difícil assegurar la perfecció del mètode i, per tant, els problemes venen donats per tensions puntuals a les provetes donant lloc a aquestes variacions.

4.1.2. Resultats de la prova de fenolftaleïna

Un cop aplicada la fenolftaleïna, s'ha procedit a escanejar-les per obtenir imatges amb les mateixes condicions lumíniques. Com es pot observar a la **Figura 9**, hi ha una clara diferència en la densitat de color que ha marcat la fenolftaleïna al llarg del temps. Observem un excés d'alcalinitat, el qual perjudica les propietats del ciment, havent-hi massa Ca^{2+} al medi sense reaccionar.

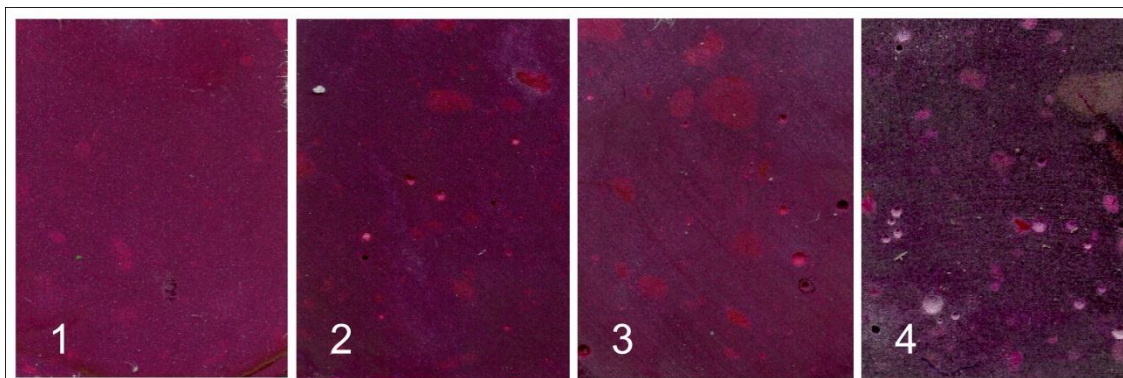


Figura 9: Tinció amb fenolftaleïna a l'assaig amb diferents concentracions de fum de sílice als llarg del temps, la concentració d'aquestes 4 imatges correspon a 10% de FS: 1) 14 dies 2) 28 dies 3) 44 dies 4) 56 dies.

En l'assaig amb metacaolin, com es mostra a la **Figura 10**, s'observa una disminució de la densitat de color al llarg del temps, i es veu clarament que la densitat de coloració a l'edat de 21 dies és inferior a la del fum de sílice a l'edat de 54 dies. La mostra està en un medi amb una alcalinitat molt baixa. Aquest succés és degut a la incorporació de metacaolin.

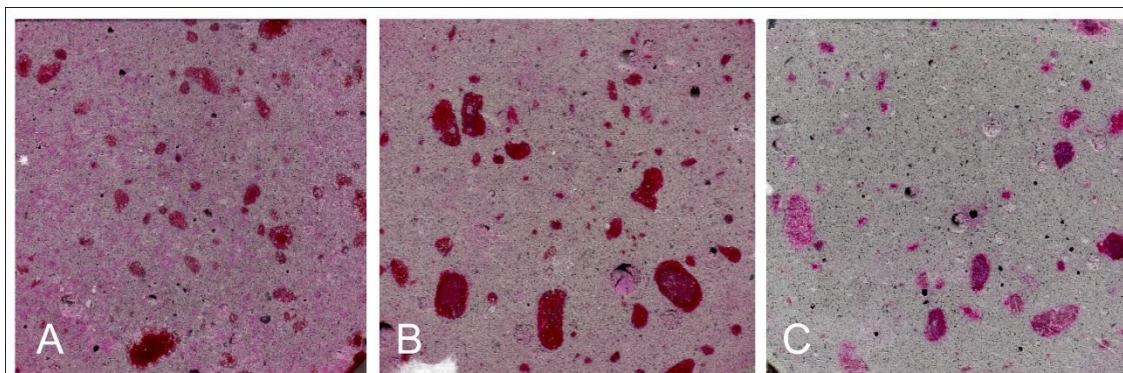


Figura 10: Tinció de fenolftaleïna a l'assaig amb metacaolin al llarg del temps. A) 7 dies B) 14 dies C) 21 dies.

4.1.3. Resultats a compressió de les provetes amb metacaolin

En l'assaig de provetes amb metacaolin els resultats de les tensions a l'edat de 7, 14 i 21 dies han estat:

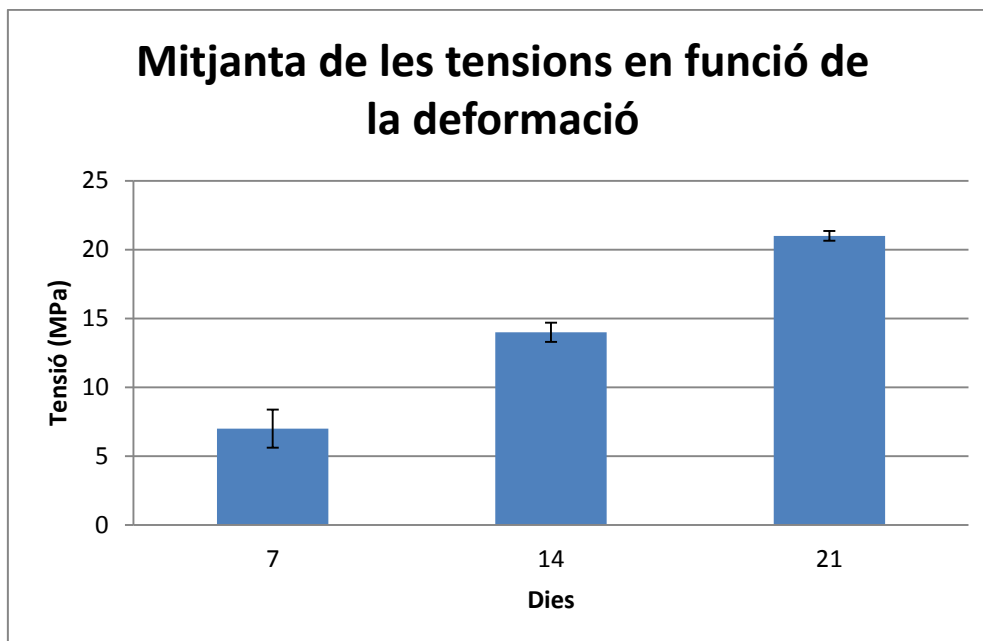


Figura 11: Tensions a l'assaig amb metacaolin a l'edat de 7,14 i 21 dies.

Com podem veure a la **Figura 11**: aquest trencament ha tingut una dinàmica d'enduriment normal i aquest ha anat augmentant fins arribar a uns valors al voltant dels 20 MPa als 21 dies d'edat.

4.2. Resultats del assajos amb les fibres

4.2.1. Resultats de la cornificació de les fibres i del valor de retenció d'aigua.

Un cop s'han fet els assajos de tracció, es presenten les següents figures, de les gràfiques tensió-deformació, obtingudes directament del programa de control de l'assaig.

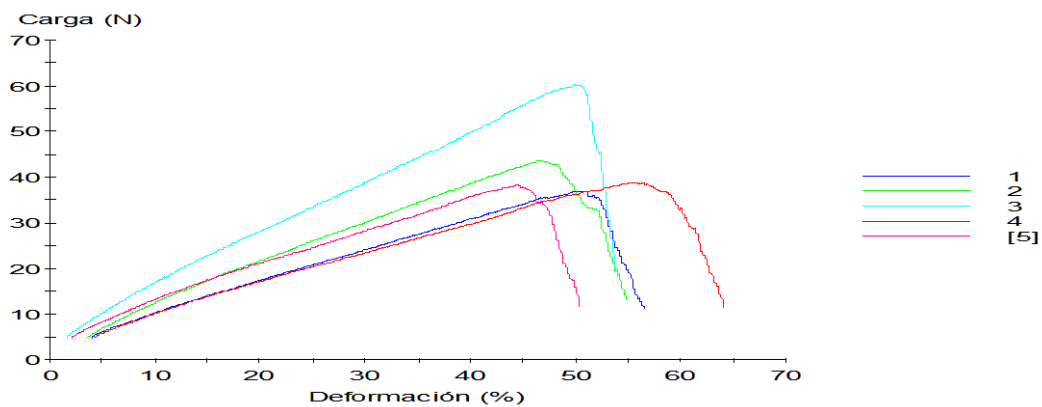


Figura 12: Representació de la corba tracció-deformació per a EA_60_T

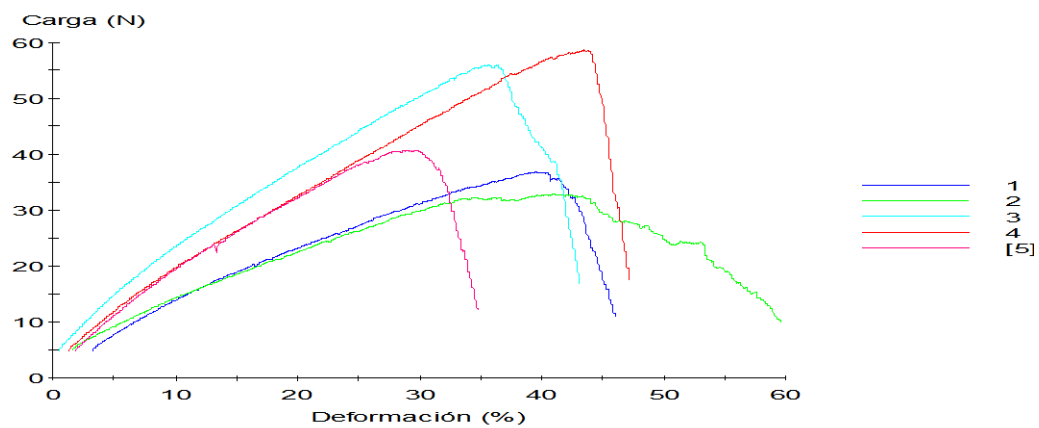


Figura 13: Representació de la corba tracció-deformació per a EA_60_U

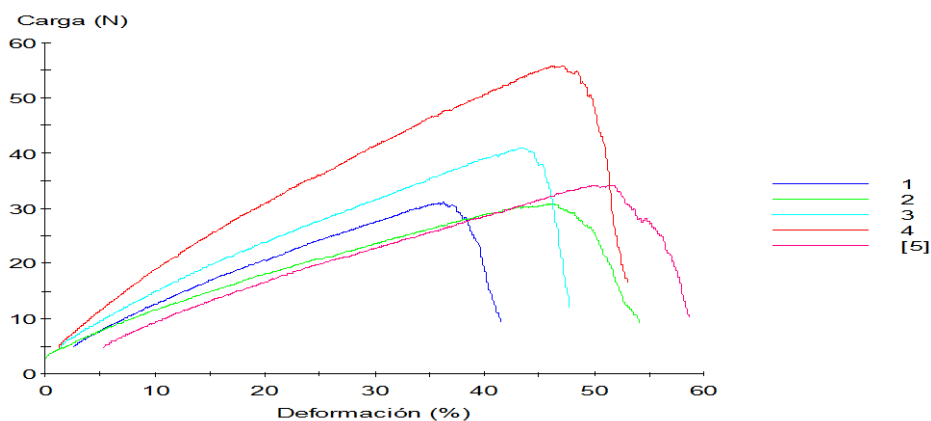


Figura 14: Representació de la corba tracció-deformació per a EA_160_T

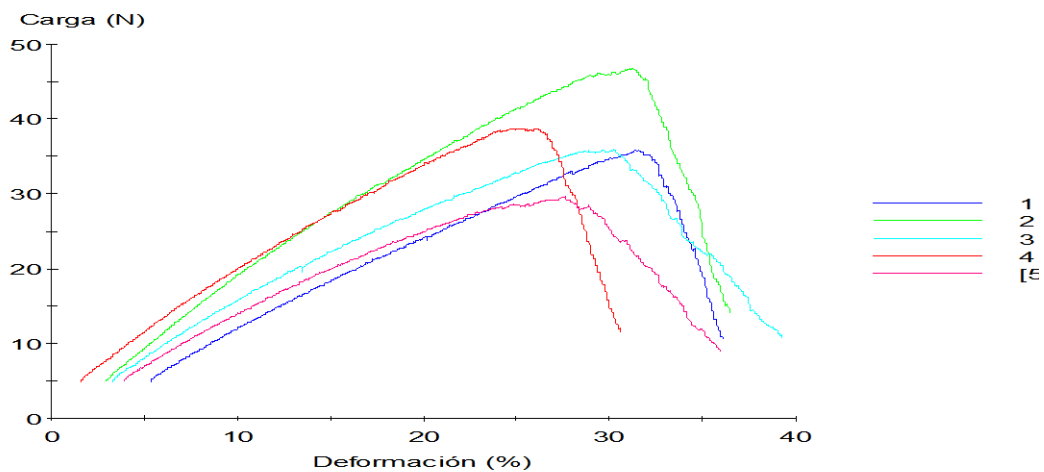


Figura 15: Representació de la corba tracció-deformació per a EA_160_U

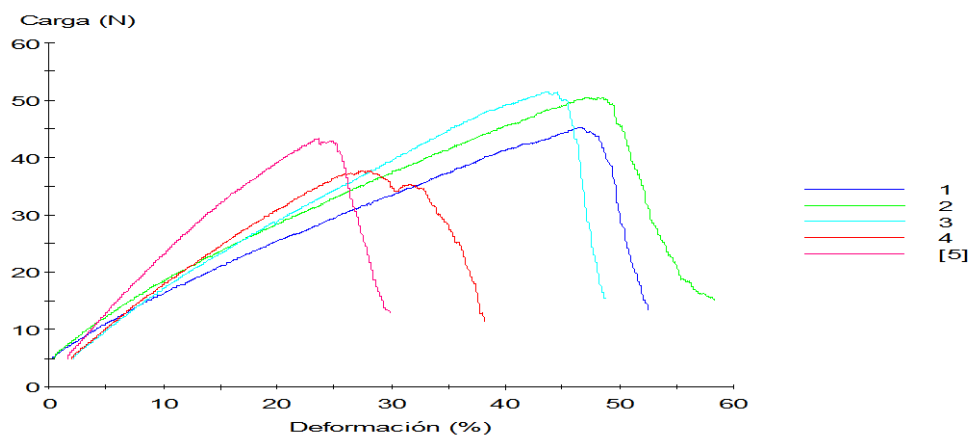


Figura 16: Representació de la corba tracció-deformació per a EAUT_60_T

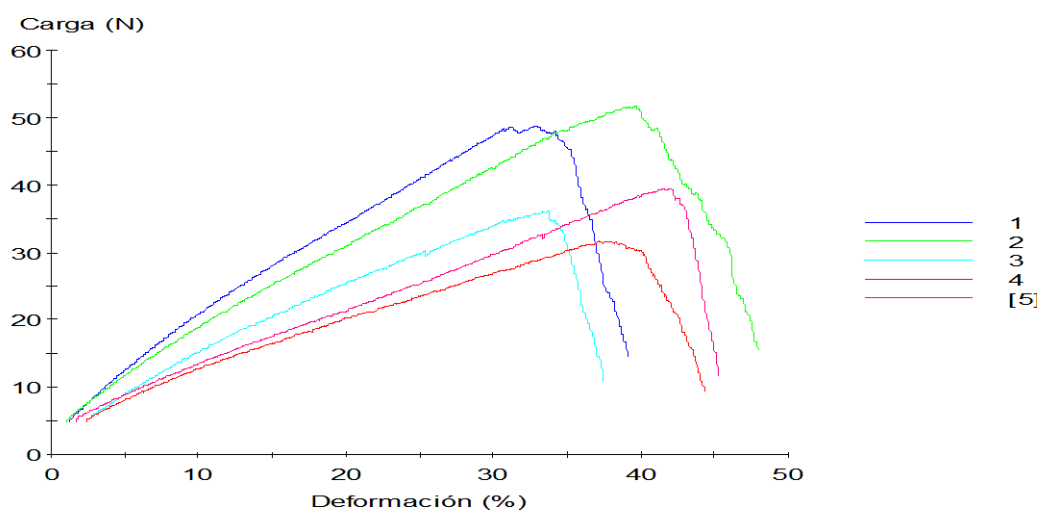


Figura 17: Representació de la corba tracció-deformació per a EAUT_60_U

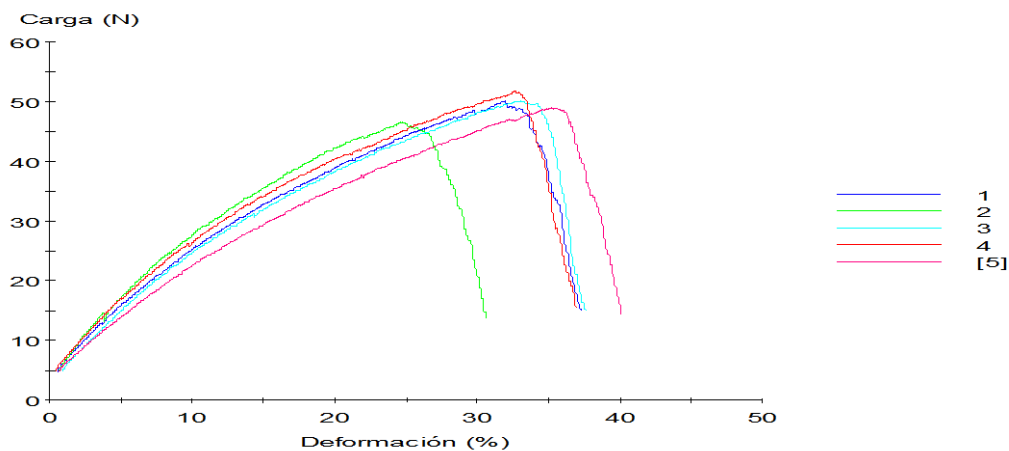


Figura 18: Representació de la corba tracció-deformació per a EAUT_160_T

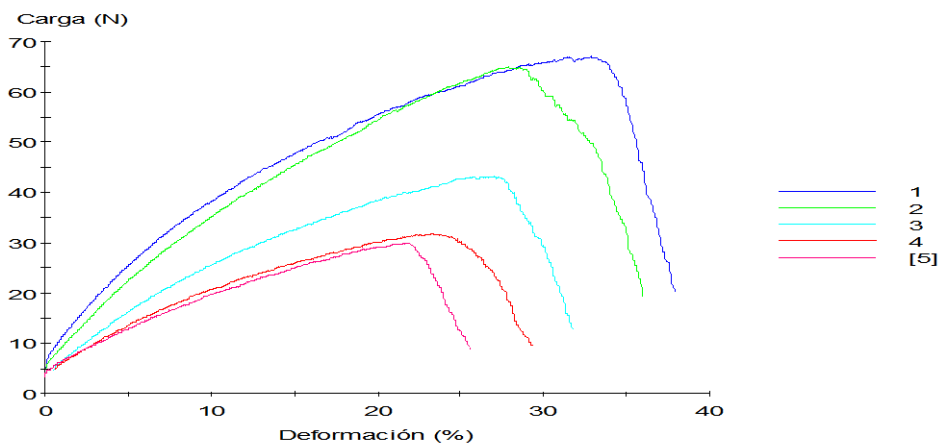


Figura 19: Representació de la corba tracció-deformació per a EAUT_160_U

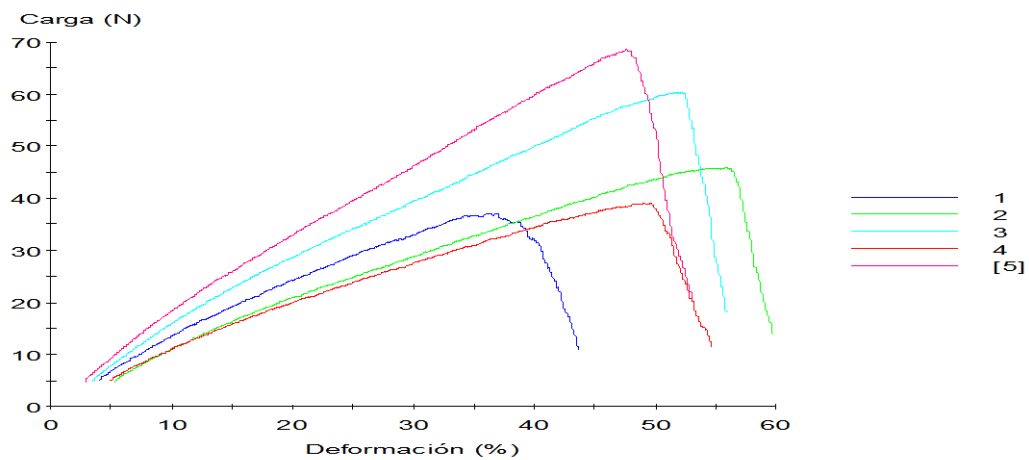


Figura 20: Representació de la corba tracció-deformació per a PA_160_T

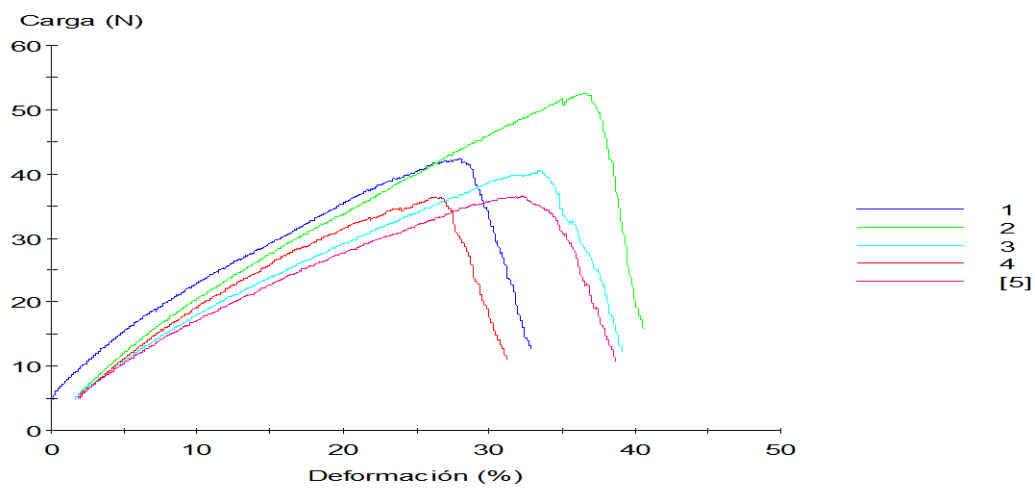


Figura 21: Representació de la corba tracció-deformació per a PA_160_U

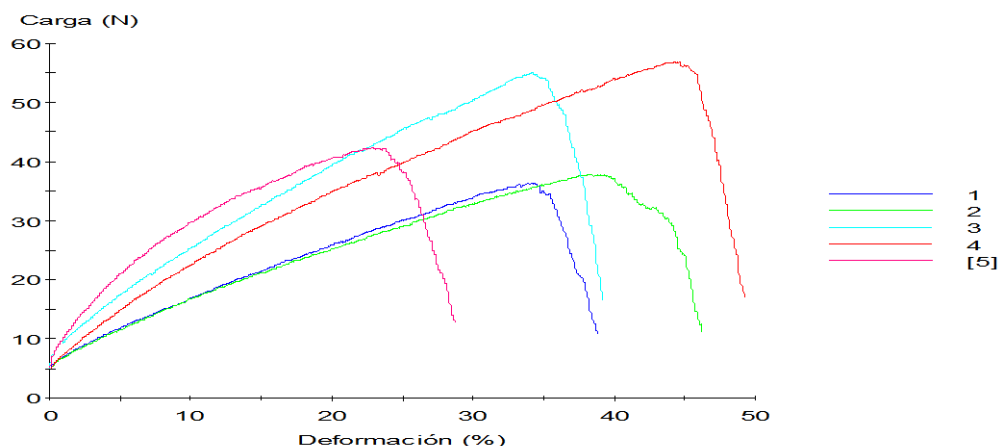


Figura 22: Representació de la corba tracció-deformació per a PAUT_160_T

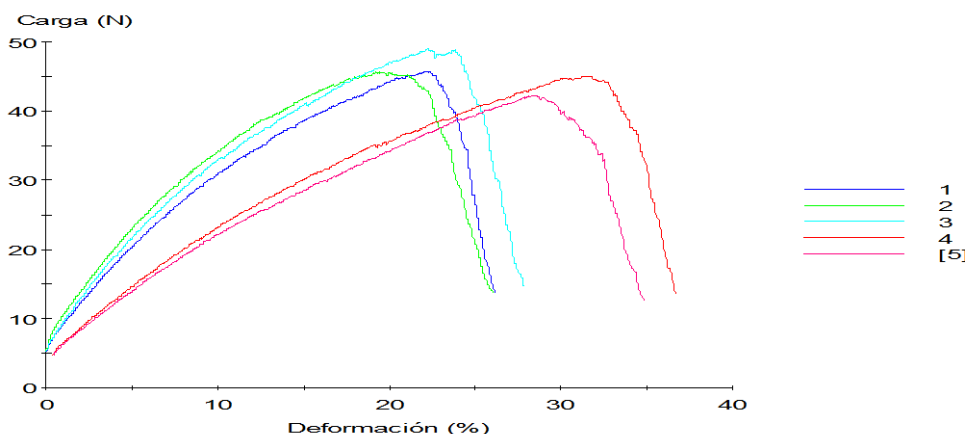


Figura 23: Representació de la corba tracció-deformació per a PAUT_160_U

En general, a les gràfiques mostrades anteriorment (**Figures 11-23**) s'observa una heterogeneïtat en el conjunt de repeticions del mateix tractament que no estan relacionades amb les direccions de fabricació, sinó amb les característiques pròpies de fabricació del no teixit que genera diferències de gruix i de quantitat de fibra en les mostres.

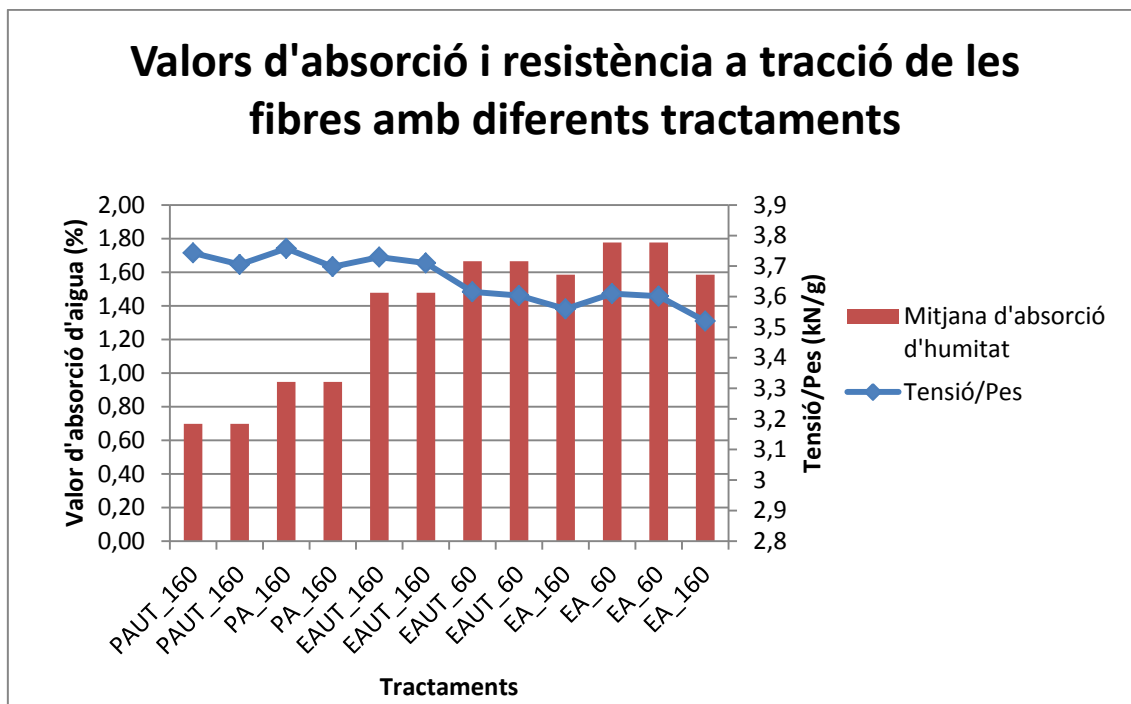


Figura 24: Valors d'absorció i resistència a tracció de les fibres amb diferents tractaments.

Taula 7: Pesos, direcció de fabricació, tensió promig, tensió entre el pes, mitjana d'absorció d'humitat i les desviacions estàndard de l'absorció i de la tensió promig de les mostres cornificades

Nom de la mostra	Pes (g)	Direcció	Tensió promig (N)	SD	Tensió/Pes	Mitjana d'absorció d'humitat	SD
PAUT_160	26,66	Trama	45,7	9,7	1,71	3,184	0,258
PAUT_160	27,7	Urdimbre	45,6	2,4	1,65	3,184	0,258
PA_160	28,84	Trama	50,2	14	1,74	3,321	0,044
PA_160	25,48	Urdimbre	41,6	6,6	1,63	3,321	0,044
EAUT_160	28,05	Urdimbre	47,4	18	1,69	3,613	0,103
EAUT_160	29,92	Trama	49,5	1,9	1,65	3,613	0,103
EAUT_60	27,98	Urdimbre	41,5	8,5	1,48	3,716	0,059
EAUT_60	31,27	Trama	45,7	5,6	1,46	3,716	0,059
EA_160	27,95	Trama	38,6	10	1,38	3,672	0,2
EA_60	30,56	Urdimbre	45	12	1,47	3,777	0,037
EA_60	29,92	Trama	43,6	9,7	1,46	3,777	0,037
EA_160	28,495	Urdimbre	37,3	6,2	1,31	3,672	0,2

Mirant la **Figura 24**, i la **Taula 7** s'ha observat un menor coeficient d'absorció d'humitat juntament amb una major tensió/pes a les mostres tractades amb planxa-autoclau a 160°C, amb planxa-aigua a 160°C i amb estufa-autoclau a 160°C. S'han escollit les dues primeres com a millors per a fer les plaques finals de fibrociment.

4.3. Resultats dels assajos amb el fibrociment

4.3.1. Resultats de l'assaig a flexió del fibrociment

Un cop s'ha fet l'assaig s'han obtingut les dades de tensió-deformació. Amb aquestes dades s'ha procedit a avaluar les gràfiques en funció dels tractaments de les fibres.

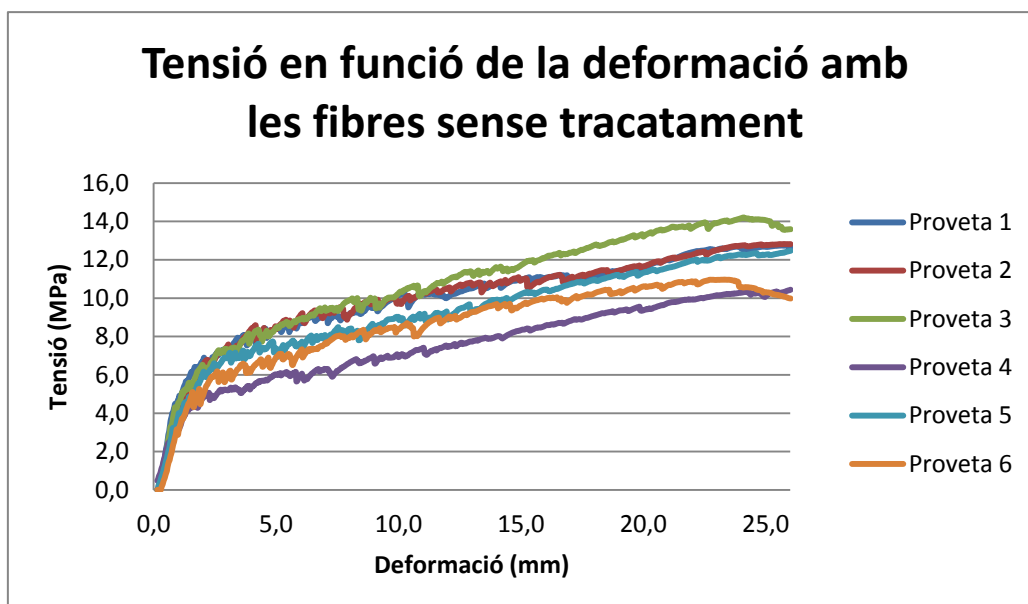


Figura 25: Tensió en funció de la deformació de les 6 provetes amb les fibres sense tractar.

A la **Figura 25** s'ha observat una homogeneïtat en el trencament de les provetes, sent similar la forma de les corbes. En totes elles, l'assaig ha finalitzat pel valor de la deformació (>10% de la mesura entre els recolzaments) i no per trencament (o reducció de la resistència >40%) volent dir així que, les fibres han realitzat el seu treball. S'han assolit uns valors màxims de tensió que van dels 10 als 15 kN.

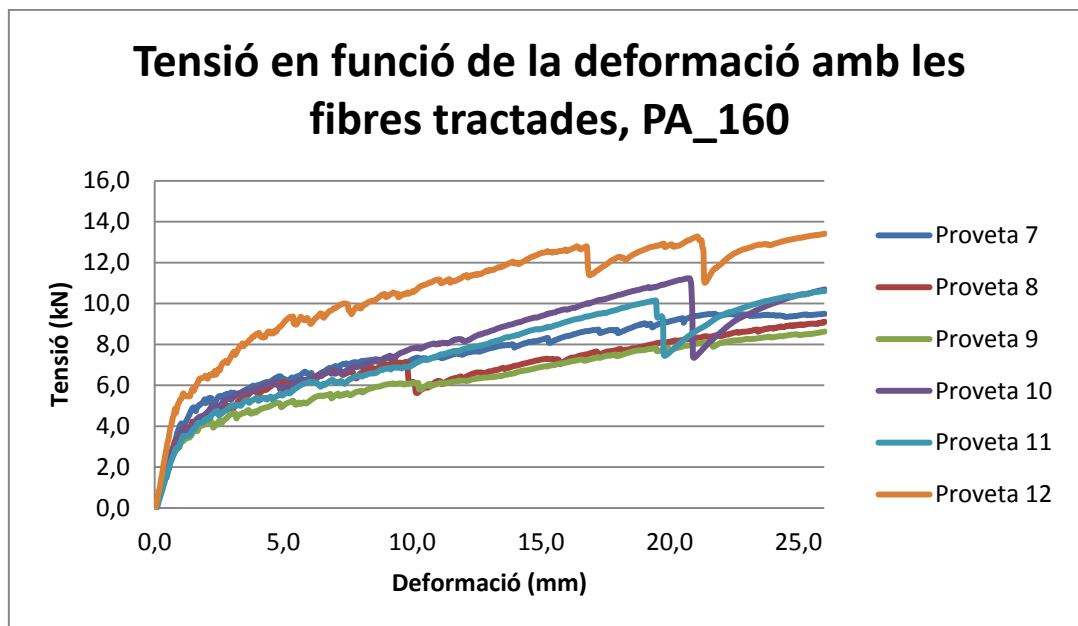


Figura 26: Tensió en funció de la deformació de les 6 provetes amb el tractament PA_160.

Pel que fa la **Figura 26**, en el material tractat amb la planxa i estufa a 160°C i aigua, s'ha observat una homogeneïtat en les corbes assolint valors màxims de tensió d'entre 8 i 14. L'experiment també ha estat finalitzat per deformació i no per trencament.

Per últim, en la **Figura 27** s'han observat corbes també homogènies pel que fa la similitud de la forma, donant tensions màximes d'entre 3 i 6 kN. L'experiment també ha finalitzat quan la deformació ha arribat al 10% de la mesura entre recolzaments.

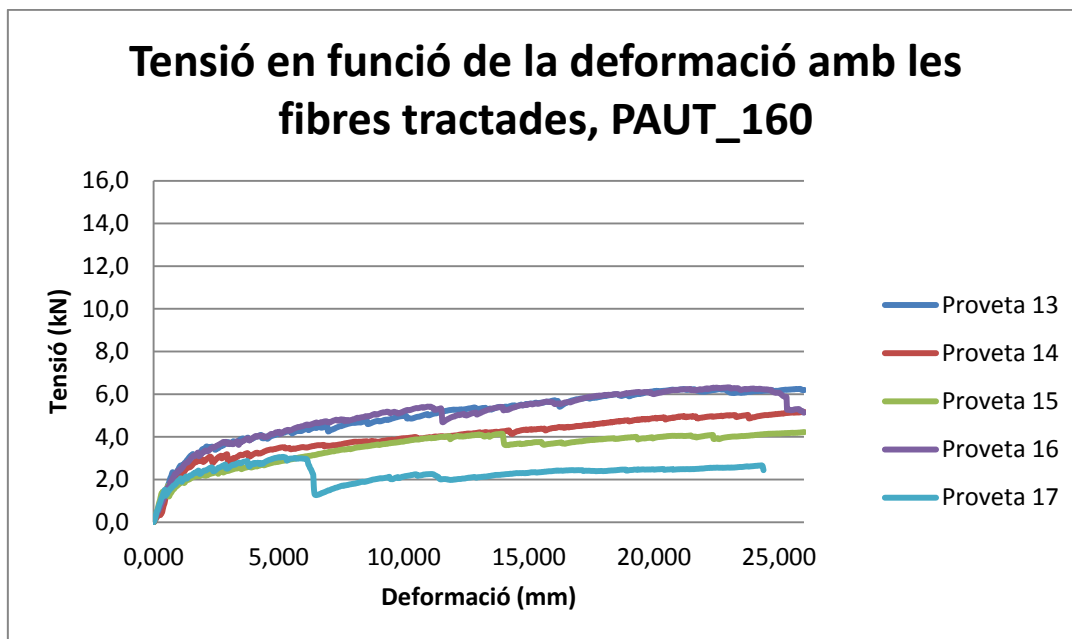


Figura 27: Tensió en funció de la deformació de les 6 provetes amb el tractament PAUT_160

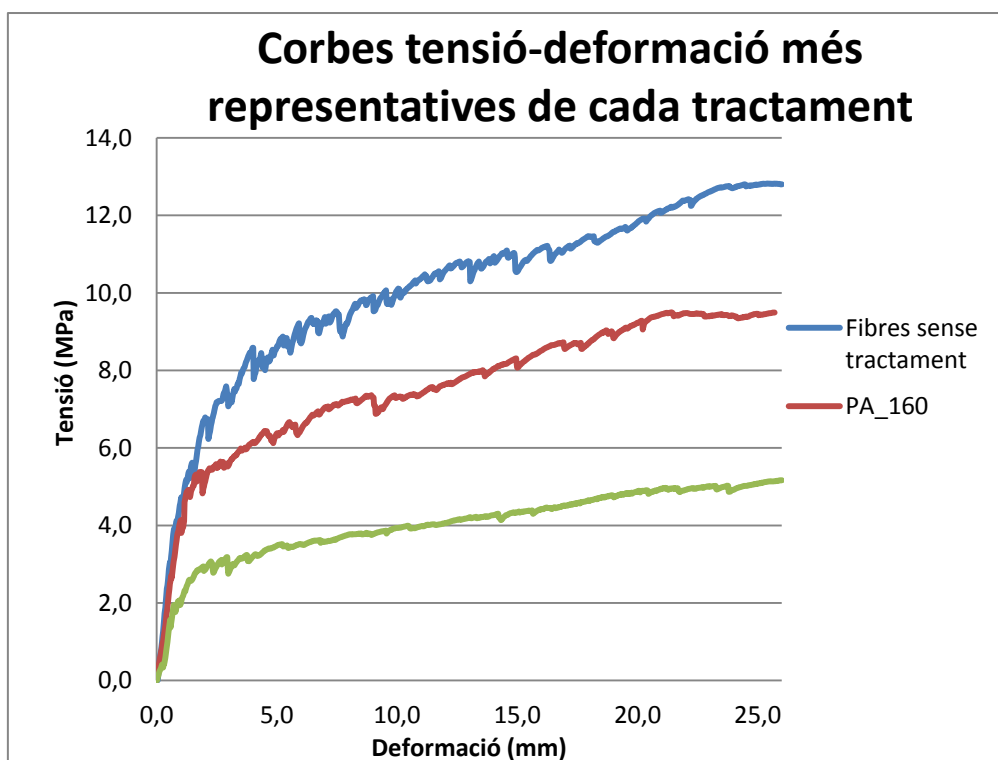


Figura 28: Comparacions dels diferents fibrociments amb les corbes representatives de cada placa.

A la **Figura 28** s'han dibuixat les corbes més representatives de cada fibrociment entenent com a tals, aquelles que s'acosten més a la mitjana de resultats de cada sèrie. En aquest assaig a flexió s'ha observat que el fibrociment que dona la corba més ampla és aquell en el que les fibres no han tingut cap tractament, mentre que el de pitjor resultat ha estat el de la fibra tractada amb autoclau i planxa a 160, i aigua.

De les corbes anteriors s'han obtingut les **Figures 29, 30, 31 i 32** que contenen les mitjanes del mòdul de ruptura (MOR), energia absorbida, límit de proporcionalitat (LOP) i el mòdul d'elasticitat (MOE)

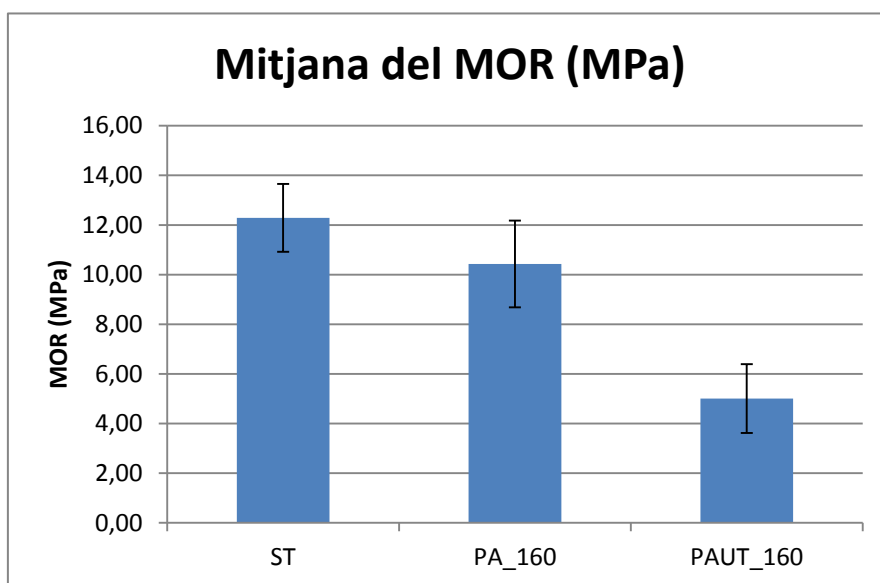


Figura 29: Mitjana del MOR per a cada tipus de fibrociment

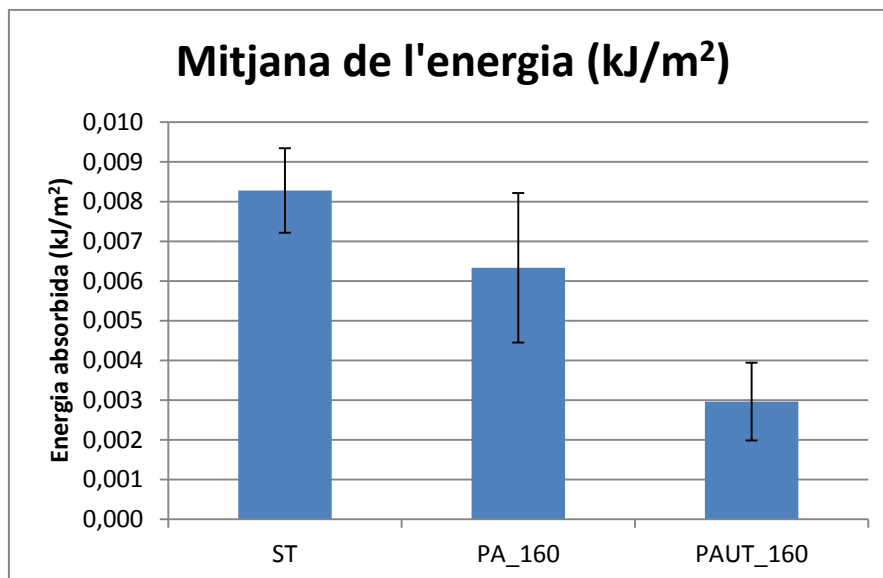


Figura 30: Mitjana de l'energia per a cada tipus de fibrociment.

Tant en el MOR com en l'energia absorbida són paràmetres mecànics que tenen en compte la resistència del material en conjunt.

Com s'observa en la **Figura 29**, el valor mitjà màxim del MOR en el punt de deformació del 10% és de 12,29 MPa al fibrociment amb fibres sense tractar, superior en els fibrociments tractats amb PA_160 i PAUT_160, en un 15% i 59% respectivament. La mateixa tendència s'observa en la **Figura 30**, on el valor mitjà màxim de l'energia de 0,0083 kJ/m² en les fibres sense tractar. Amb una diferència d'un 24% respecte el PA_160 i un 64% respecte el PAUT_160.

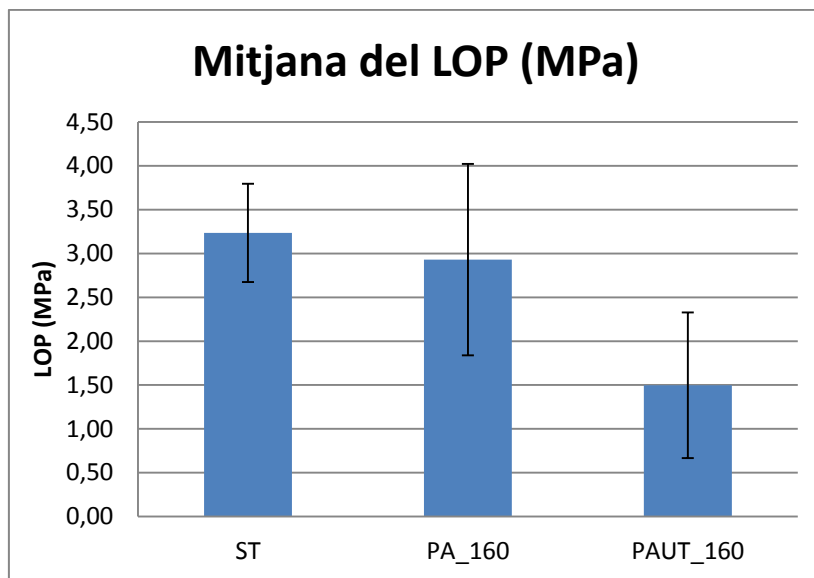


Figura 31: Mitjana del LOP per a cada tipus de fibrociment

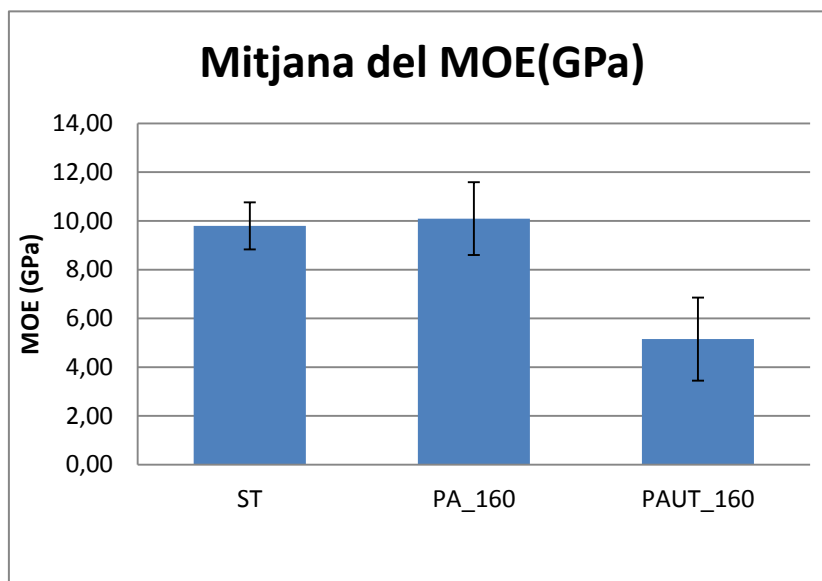


Figura 32: Mitjana del MOE per a cada tipus de fibrociment.

Tant el LOP com el MOE, defineixen característiques mecàniques que corresponen més a la matriu. En aquest sentit s'observa com tant al LOP, a la **Figura 31**, com al MOE, a la **Figura 32**, que els dos primers tractaments no han afectat ni a la resistència ni a la rigidesa de la matriu mentre que el tercer tractament han reduït el LOP un 46,3% i el MOE en un 51,1% respecte el màxim.

En quant els resultats del MOE i LOP, tenint en compte que les fibres són les més resistents, podem considerar que la baixa absorció d'humitat pot ser la responsable d'una reducció en l'adherència fibra-matriu que ha comportat una reducció de la resistència global i de l'energia absorbida pel material compost.

Això pot ser atribuïble al canvi de coloració de les fibres tractades que suggereixen una migració d'alguna substància a la superfície que ha afectat a la resistència de la matriu. El canvi de coloració es pot observar a la **Figura 33**.



Figura 33: Canvi de coloració en els diferents tractaments de cornificació. De baix a amunt: PAUT_160, PA_160, Fibres sense tractar. Font pròpia.

4.3.2. Resultats de l'assaig d'envelliment accelerat del fibrociment

Un cop s'ha fet l'assaig d'envelliment accelerat s'ha procedit a assajar les provetes a flexió i s'han obtingut les dades de tensió-deformació. Amb aquestes dades s'ha procedit a avaluar les gràfiques en funció dels tractaments de les fibres.

Les provetes amb les fibres no tractades han donat les següents corbes de flexió

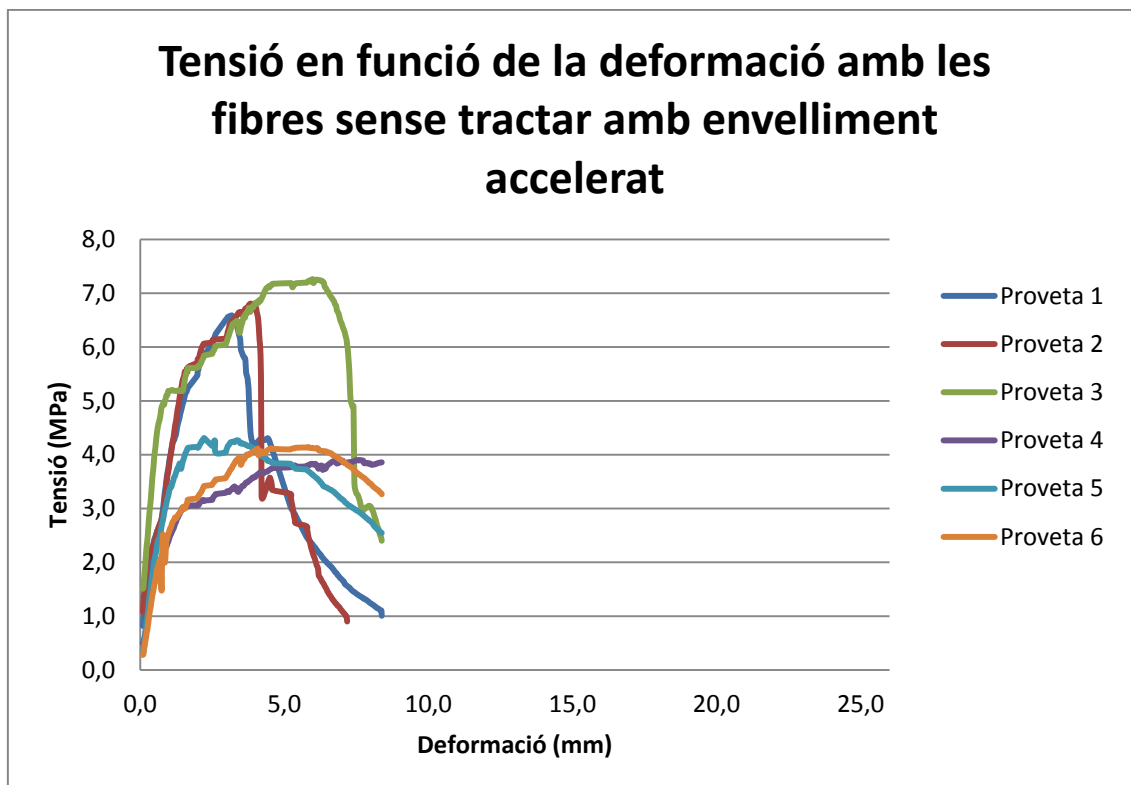


Figura 34: Representació de les corbes tensió-deformació del fibrociment amb fibres sense tractament després de l'envelliment.

A la **Figura 34** s'ha observat una heterogeneïtat en el trencament de les provetes. Totes elles han finalitzat l'assaig per trencament (o reducció de la resistència >40%) arribant a uns valors màxims al voltant dels 8 mm. Amb això, s'ha observat doncs, que les fibres han patit el tractament d'envelliment accelerat i han perdut propietats. Les provetes després de l'envelliment han donat uns valors màxims al voltant de 7 MPa.

Podem diferenciar dos grups de gràfiques, i s'ha suggerit que les diferències es basen en errors produïts en el procés de fabricació de les plaques.

Els resultats obtinguts per les provetes cornificades amb el procés d'estufa-planxa(160°) i aigua han estat:

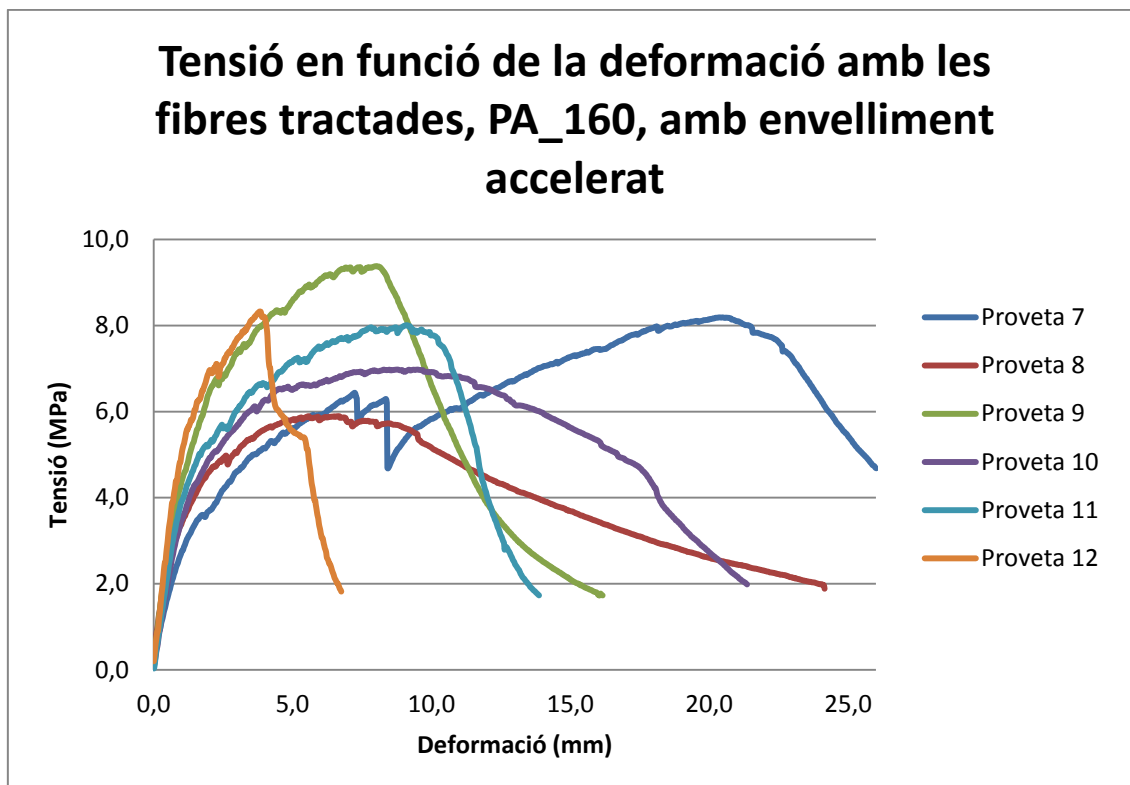


Figura 35: Representació de les corbes tensió-deformació del fibrociment amb fibres tractades amb el procés PA_160 després de l'envelliment.

A la **Figura 35** s'han observat uns valors de tensió màxims que passen lleugerament de 9 MPa. Algunes d'elles han finalitzat l'assaig per trencament i d'altres per deformació però, pel general, amb valors elevats. Hi ha hagut doncs una bona interacció entre la matriu i les fibres i el procés d'envelliment no ha estat tant perjudicial per a les fibres.

Els resultats del tractament de fibres amb planxa estufa a 160°C i autoclau ha estat el que es poden veure a la **Figura 36**. S'observen unes corbes, en conjunt homogènies, amb valors màxims propers als 3 MPa. Totes elles han finalitzat l'assaig per trencament. S'ha observat doncs, que les fibres actuen molt poc després del trencament de la matriu, degut a la degradació de la fibra i la seva adherència amb la matriu, després del tractament d'envelliment accelerat.

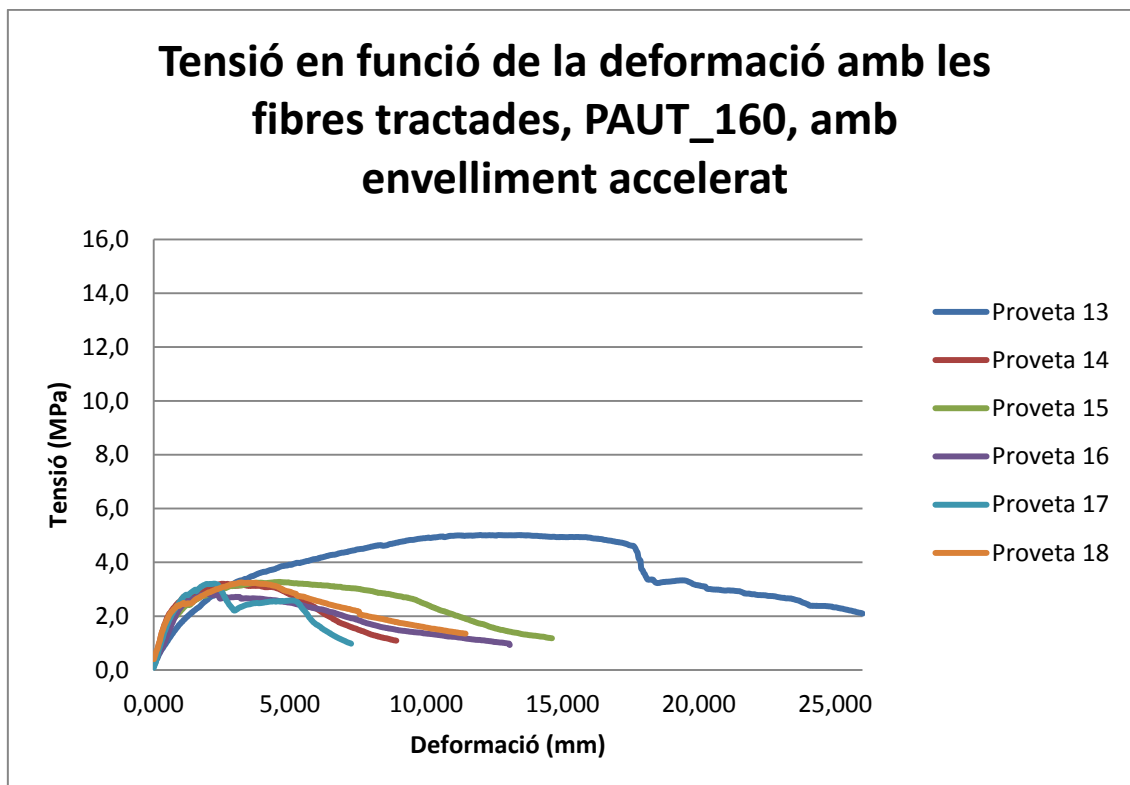


Figura 36: Representació de les corbes tensió-deformació del fibrociment amb fibres tractades amb el procés PAUT_160 després de l'envelliment.

Finalment, com s'observa a la **Figura 37**, trobem la comparació de la corba representativa de cada tractament amb envelliment. S'observa que tots han finalitzat l'assaig per trencament. El tractament amb les fibres que més ha suportat l'envelliment accelerat ha estat el PA_160. Tot i haver acabat l'assaig per trencament, s'observa una gran diferència respecte a les altres dos, ja que les fibres actuen durant més temps amb una resistència més elevada. Aquest fibrociment ha donat una resistència propera als 8 MPa.

La matriu del fibrociment amb les fibres sense tractar ha donat uns resultats de resistència aproximats al PA_160 però, les fibres no han realitzat el seu treball de reforç ja que la caiguda de la corba ha estat molt ràpida. Per últim, el tractament PAUT_160 ha estat el que pitjors resultats ha donat. Tot i que manté un cert treball de les fibres, la matriu s'ha vist molt afectada, suportant en conjunt valors al voltant dels 3 MPa.

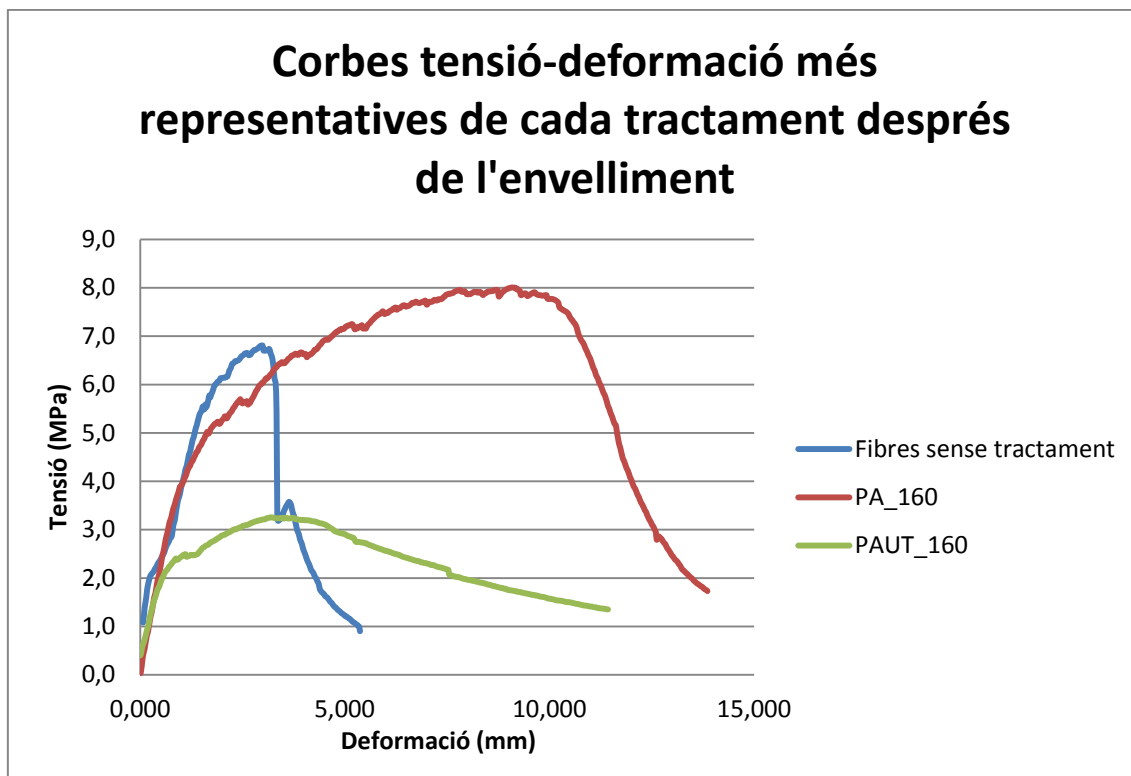


Figura 37: Dibuix de les corbes més representatives de cada tractament de fibres amb envelliment accelerat.

Com s'observa en la **Figura 38** el valor màxim del MOR és 7,79 MPa i correspon al tractament PA_160. Aquest valor és un 29,5% superior al de la mostra amb les fibres sense tractament i un 56% superior que al fibrociment amb el tractament PAUT_160. La mateixa tendència s'observa en la **Figura 39**, on el valor mitjà de l'energia al tractament PA_160 és de 0,0028 kJ/m², superior en els fibrociments amb fibres sense tractament i amb fibres tractades amb PAUT_160, en un 62% i un 64% respectivament.

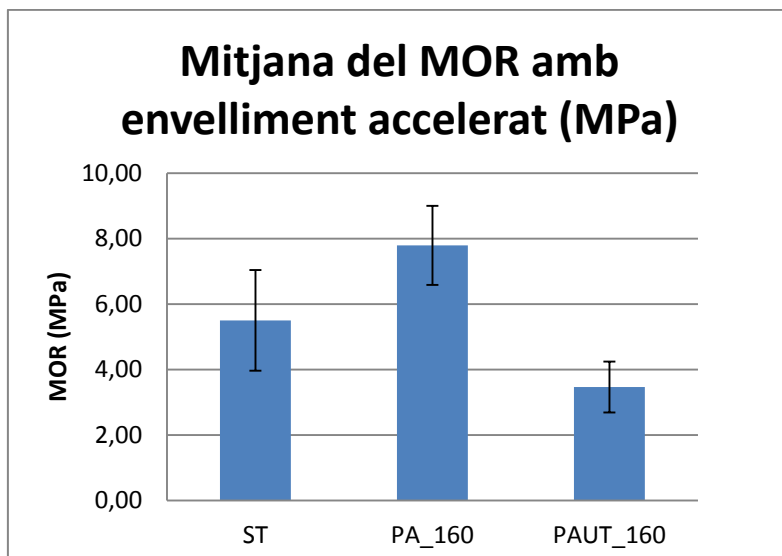


Figura 38: Mitjana del MOR dels diferents tractaments amb envelliment accelerat.

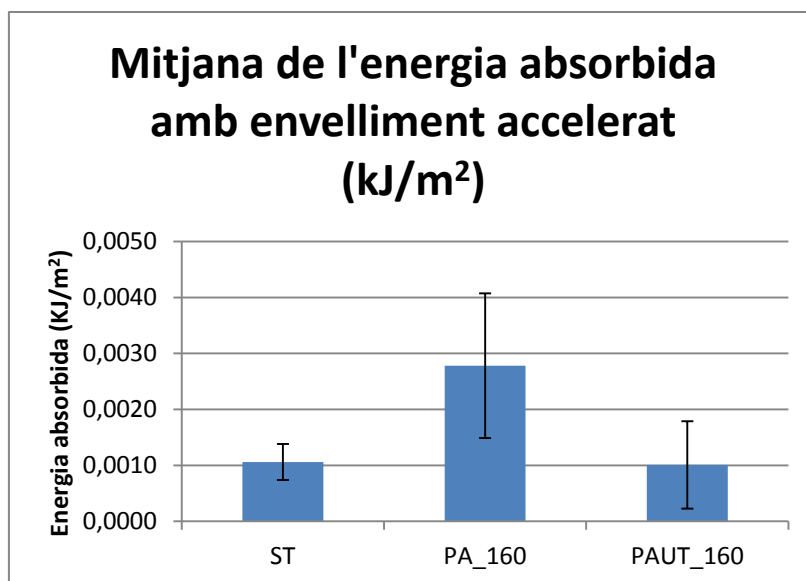


Figura 39: Mitjana de l'energia absorbida dels diferents tractaments amb envelliment accelerat.

Respecte els assajos sense tractament d'envelliment accelerat, no s'observen grans diferències, ja que la matriu no es veu afectada pel tractament d'envelliment accelerat.

Aquesta pot ser la responsable d'una reducció en l'adherència fibra-matriu que ha comportat una reducció de la resistència global i de l'energia absorbida pel material compost.

Per una altra banda, dels resultats del LOP i del MOE, **Figures 40 i 41** respectivament, s'observa com el tractament PA_160 no ha afectat a la matriu. Els fibrociments fets amb les fibres sense tractar han reduït el LOP molt poc i en canvi el MOE augmenta. En l'últim tractament, el PAUT_160 redueix el LOP en un 42,4% i el MOE en un 52,8%.

Pel que respecta l'assaig amb les fibres no tractades, aquestes han patit una davallada més important en les fibres. Pel fibrociment PAUT_160, com aquest ja ha vingut condicionat pel tractament de les fibres, l'envelliment accelerat l'ha perjudicat encara més.

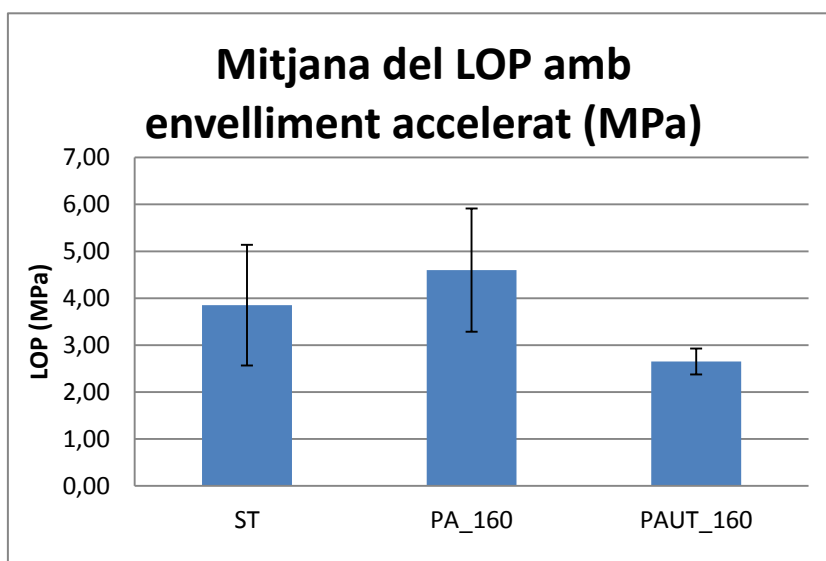


Figura 40: Mitjana del LOP dels diferents tractaments amb envelliment accelerat.

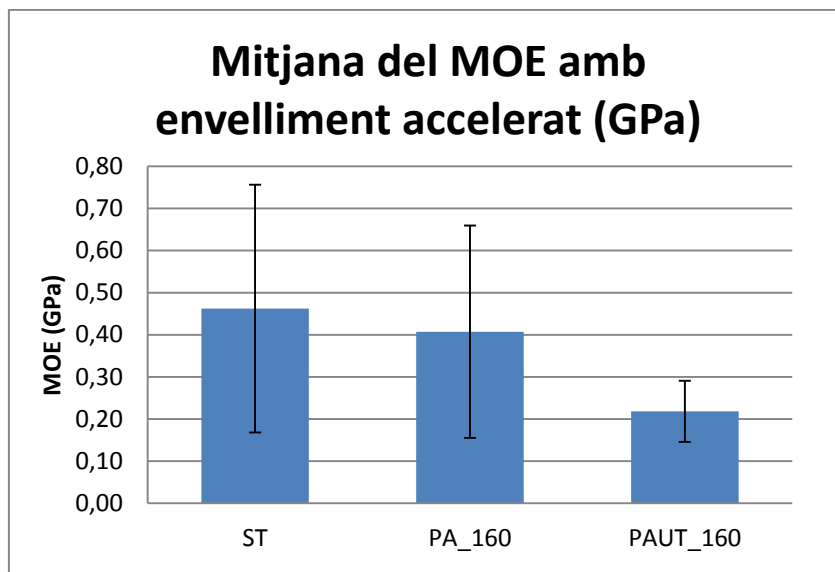


Figura 41: Mitjana del MOE dels diferents tractaments amb envelliment accelerat.

Per acabar, s'han comparat les diferents corbes representatives de cada fibrociment abans i després del tractament d'envelliment accelerat, com s'observa a la **Figura 42**. La primera diferència que s'ha trobat és que, en les fibres sense tractament, la finalització de l'assaig s'ha dut amb el paràmetre de deformació mentre que, en les que han estat envellides, ha finalitzat amb el trencament.

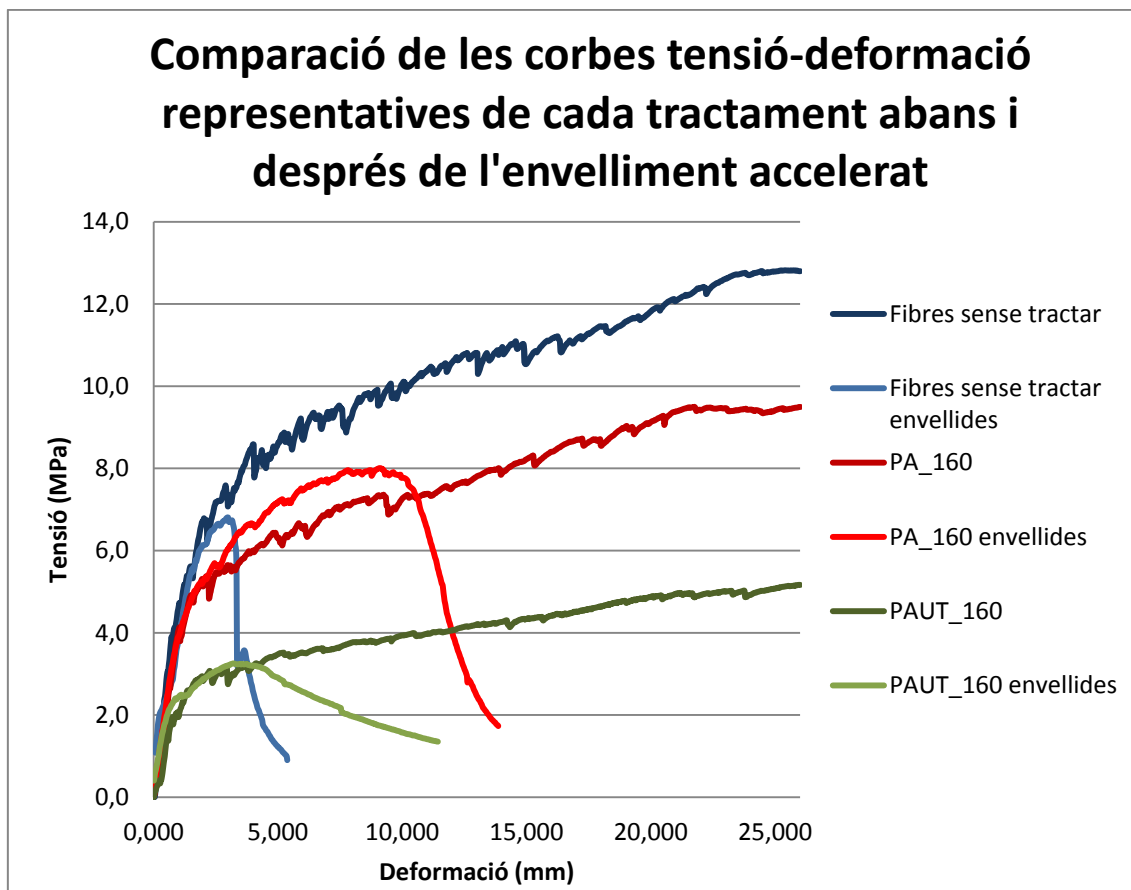


Figura 42: Comparació de les corbes tensió-deformació representatives de cada tractament abans i després de l'envelliment accelerat.

S'ha observat que les fibres sense tractar han donat els millors resultats de tot l'experiment. No obstant això, un cop envellit el material, les fibres han perdut propietats mecàniques i han deixat d'actuar. Això pot ser degut tant a la degradació de les fibres per culpa de la seva capacitat d'absorció d'humitat en el medi alcalí com a la pèrdua d'adherència provocada pels canvis de volum de les fibres amb els canvis d'humitat generats en els cicles del tractament d'envelliment.

Les provetes amb les fibres amb el tractament de planxa-estufa i aigua a 160°C han donat uns resultats més baixos que les provetes de les fibres sense tractar. És possible que la disminució de la capacitat d'absorció d'aigua de les fibres provocades pel tractament de cornificació hagi disminuït l'adherència amb la matriu. No obstant això, són les provetes que han obtingut els millors resultats un cop envellit el material. Pot ser degut a que la reducció d'absorció d'humitat ha limitat la degradació de les fibres en medi

alcalí i al mateix temps, al disminuir els canvis de volum, s'hagi mantingut certa adherència amb la matriu.

Finalment, les provetes amb les fibres amb el tractament de planxa-autoclau i aigua a 160°C són les que han donat els pitjors resultats tant abans com després del tractament. Creiem que és degut a la degradació de la matriu provocada per la migració de determinades substàncies (que caldria analitzar) a la superfície de les fibres que han afectat l'enduriment de la matriu. No obstant això, s'observa que les fibres mantenen la seva capacitat de reforç tot i que amb menor valor que en el tractament anterior. Això pot ser degut a que la falta de residència de la matriu hagi reduït l'adherència amb la fibra.

5. Conclusions

Un cop elaborat l'experiment i analitzat els resultats, podem concloure que:

- La incorporació de material putzolànic redueix l'alcalinitat del medi però, la dosificació utilitzada no ha estat suficient per evitar del tot la degradació de la fibra.
- Sotmetre les fibres a processos de cornificació com els emprats en l'experiment modifiquen les seves característiques físico-mecàniques. La utilització de l'autoclau i de la planxa en el procés de cornificació redueix l'absorció d'humitat i augmenta la resistència de la fibra.
- El tractament de cornificació per fibres, a més de millorar les seves propietats, no ha de generar substàncies o productes que alterin la resistència de la matriu.
- Per aconseguir que el fibrociment de fibres vegetals sigui durable, és necessari fer un tractament previ a les fibres que redueixi la capacitat d'absorció d'humitat, ja que milloren la seva resistència a l'alcalinitat i manté l'adherència amb la matriu a llarg termini.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- Ardanuy, Mònica, Josep Claramunt, José Antonio García-Hortal, and Marilda Barra. 2011. "Fiber-Matrix Interactions in Cement Mortar Composites Reinforced with Cellulosic Fibers." *Cellulose* 18 (2): 281–89. doi:10.1007/s10570-011-9493-3.
- Bellido, Luis Lopez. 2003. *Cultivos Industriales*. Edited by Ediciones Mundi-Prensa. 1^o edition.
- Bensadoun, F, D Depuydt, J Baets, A W Van Vuure, and I Verpoest. 2013. "Influence of Fibre Architecture on Impact and Fatigue Behaviour of Flax Fibre-Based Composites." *The 19 International Conference on Composite Materials*.
- Brancato, Adam, Frances L. Walsh, Ronald Sabo, and Sujit Banerjee. 2007. "Effect of Recycling on the Properties of Paper Surfaces." *Industrial and Engineering Chemistry Research* 46 (26): 9103–6. doi:10.1021/ie070826a.
- Brueckner, R, and P Lambert. 2012. "Present Day Problems with Historic Innovations" 123: 81–92. doi:10.2495/DSH.
- Fomento, D E. n.d. *RC-08 Instrucción Para La Recepción de Cementos*.
- Fu, Yingjuan, Rongrong Wang, Dejuan Li, Zhaojiang Wang, Fengshan Zhang, Qinglin Meng, and Menghua Qin. 2015. "Changes in the Microstructure and Properties of Aspen Chemithermomechanical Pulp Fibres during Recycling." *Carbohydrate Polymers* 117. Elsevier Ltd.: 862–68. doi:10.1016/j.carbpol.2014.10.036.
- Gaitero, J. J., I. Campillo, and a. Guerrero. 2008. "Reduction of the Calcium Leaching Rate of Cement Paste by Addition of Silica Nanoparticles." *Cement and Concrete Research* 38 (8-9): 1112–18. doi:10.1016/j.cemconres.2008.03.021.
- Glaus, M.a, L.R van Loon, S Achatz, a Chodura, and K Fischer. 1999. "Degradation of Cellulosic Materials under the Alkaline Conditions of a Cementitious Repository for Low and Intermediate Level Radioactive Waste." *Analytica Chimica Acta* 398 (1): 111–22. doi:10.1016/S0003-2670(99)00371-2.
- Knill, Charles J, and John F Kennedy. 2003. "Degradation of Cellulose under Alkaline Conditions." *Carbohydrate Polymers* 51 (3): 281–300. doi:10.1016/S0144-8617(02)00183-2.
- Palme, Anna, Alexander Idström, Lars Nordstierna, and Harald Brelid. 2014. "Chemical and Ultrastructural Changes in Cotton Cellulose Induced by Laundering and Textile Use." *Cellulose* 21 (6): 4681–91. doi:10.1007/s10570-014-0434-9.



- Rashad, Alaa M. 2013. "Metakaolin as Cementitious Material: History, Scours, Production and Composition-A Comprehensive Overview." *Construction and Building Materials* 41: 303–18. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001.
- Sabir, B., S. Wild, and J. Bai. 2001. "Metakaolin and Calcined Clays as Pozzolans for Concrete: A Review." *Cement and Concrete Composites* 23 (6): 441–54. doi:10.1016/S0958-9465(00)00092-5.
- Toledo Filho, Romildo Dias, F. D a Silva, E. M R Fairbairn, and J. D a M Filho. 2009. "Durability of Compression Molded Sisal Fiber Reinforced Mortar Laminates." *Construction and Building Materials* 23 (6): 2409–20. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.10.012.
- Trusilewicz, Lidia Natalia. 2013. "Determinación Del Contenido de Alúmina Reactiva de Las Adiciones Puzolánicas Naturales Y Artificiales, Por Termogravimetría Y Por El Método de Rietveld." Universidad Politécnica de Madrid.
- Vizcayno, C., R. M. de Gutiérrez, R. Castello, E. Rodriguez, and C. E. Guerrero. 2010. "Pozzolan Obtained by Mechanochemical and Thermal Treatments of Kaolin." *Applied Clay Science* 49 (4). Elsevier B.V.: 405–13. doi:10.1016/j.clay.2009.09.008.