



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

**Escola Superior d'Agricultura de Barcelona**

# **Utilització de no teixits de fibres vegetals per al seu ús com a reforç de materials cimentosos**

Treball final de grau

Enginyeria Agrícola

Autor: Ingrid Gaitan Romagosa

Tutor: Josep Claramunt Blanes

25 / Setembre / 2015

## **RESUM**

Des de anys immemorables s'han utilitzat diferents materials per a la construcció, i fins els anys 50 el fibrociment era el material més empleat per la fabricació de cobertes de naus industrials i elements de sanejament (desguassos). Però degut a la relació de l'amiant present en aquest material amb el càncer, van aparèixer un seguit de normatives amb la prohibició d'ús d'aquest material, fent-lo gairebé inexistent al voltant de l'any 2.000. Així, aquest material va ser substituït en les cobertes per xapes d'acer, i en els desguassos per materials plàstics. Actualment, quasi la única empresa a Europa que fabrica aquest material, està intentant tornar a fer fibrociment de nou, però amb fibres tant naturals com sintètiques, tot i que encara queda molt camí per fer. Els principals problemes d'aquests fibrociments amb fibres vegetals són: una degradació de la cel·lulosa de la fibra degut al contingut de  $\text{Ca(OH)}_2$  del ciment, i una pèrdua d'adherència matriu-fibra per les variacions de volum que experimenten les fibres a causa dels canvis d'humitat.

Per tant, en aquest treball realitzarem dos estudis diferents per tal de poder solucionar els problemes anomenats anteriorment, i poder valorar l'adherència fibra-matriu. Així, utilitzarem substàncies putzolanes per tal de reduir l'hidròxid de calç ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) i una aplicació de diferents tractaments a les fibres per tal de millorar l'estabilitat volumètrica d'aquestes.

Pel primer estudi, s'han realitzat 7 matrius de diferents concentracions de ciment i materials putzolànics, per tal de dur-les posteriorment a un assaig de flexió, compressió i infrarojos, per tal d'escollir aquella matriu amb més reducció d'hidròxid de calç i amb més resistència. D'altre banda, en quant als tractaments de les fibres, s'han realitzat fins a 5 tractaments diferents: planxa, autoclau, ambos dues o amb plasma d'argó.

## **RESUMEN**

Desde años inmemorables se ha utilizado diferentes materiales para la construcción, y hasta los años 50 el fibrocemento era el material más empleado para la fabricación de cubiertas de naves industriales y elementos de saneamiento (desaguaces). Pero debido a la relación del amianto presente en este material con el cáncer, aparecieron una serie de normativas con la prohibición de uso de este material, haciéndolo casi inexistente alrededor del año 2000. Así, este material fue sustituido en las cubiertas por chapas de acero, y en los desaguaces por materiales plásticos. Actualmente, casi la única empresa en Europa que fabrica este material, está intentando volver a hacer fibrocemento de nuevo, pero con fibras tanto naturales como sintéticas, aunque todavía queda mucho camino por hacer. Los principales problemas de estos fibrocementos con fibras vegetales son: una degradación de la celulosa de la fibra debido al contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$  del cemento, y una pérdida de adherencia matriz-fibra por las variaciones de volumen que experimentan las fibras debido a los cambios de humedad.

Por lo tanto, en este trabajo realizaremos dos estudios diferentes para poder solucionar los problemas mencionados anteriormente, y poder valorar la adherencia fibra-matriz. Así, utilizaremos sustancias puzolanas para reducir el hidróxido de cal ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) y una aplicación de diferentes tratamientos en las fibras para mejorar la estabilidad volumétrica de éstas.

En el primer estudio, se han realizado 7 matrices con diferentes concentraciones de cemento y materiales puzolánicos, para llevarlas posteriormente a un ensayo de flexión, compresión e infrarrojos, para escoger aquella matriz con más reducción de hidróxido de cal y con más resistencia. Por otro lado, en cuanto a los tratamiento de las fibras, se han realizado hasta 5 tratamientos diferentes: plancha, autoclave, ambos dos o con plasma de argón.



## **Abstrac**

Since ancient years it has used different building materials, and even the 50's cement was the most commonly used material for the manufacture of roofs of industrial buildings and sanitation items (desaguaces). But because the relationship of asbestos present in the material with cancer, appeared a series of regulations to ban use of this material, making almost nonexistent around 2000. Thus, this material was replaced in those covered by steel plates and in desaguaces plastic materials. Currently, almost the only company in Europe that manufactures this material, is trying again to cement again, but with both natural and synthetic fibers, although much remains to be done. The main problems of these fiber cement plant fibers are: degradation of cellulose fiber due to the content of Ca (OH) 2 cement, and a loss of matrix-fiber adhesion by the volume variations experienced by fibers due to changes in humidity.

Therefore, this paper will make two different studies to solve the problems mentioned above, and to assess the fiber-matrix adhesion. Thus, we use pozzolans substances to reduce lime hydroxide (Ca (OH) 2) and application of different treatments on the fibers to improve the volume stability thereof.

In the first study, seven matrices have been made with different concentrations of cement and pozzolanic materials, to carry subsequently to a bending test, compression and infrared, to decide on the array with more reduction hydroxide lime and more resistance. Furthermore, regarding the treatment of fibers, they have been made up to 5 different treatments: iron, autoclave, both two or argon plasma.

## Símbols

- **Ca(OH)<sub>2</sub>**: hidròxid de calci
- **CaO**: òxid de calci
- **SiO<sub>2</sub>**: diòxid de silici
- **MgO**: òxid de magnesi
- **CaOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** : aluminat monocàlcic
- **CaCO<sub>3</sub>**: carbonat calci
- **C<sub>3</sub>S**: Silicat tricàlcic (alitea)
- **C<sub>2</sub>S**: Silicat bicàlcic (belitea)
- **CSH**: silicat de calci hidratat
- **CH**: calç hidratada o hidròxid de calç o portlandita
- **H<sub>2</sub>O**: aigua
- **C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>**: cel·lulosa
- **KBr**: Bromur
- **Mk**: metakaolin, substància putzolànica
- **Fs**: Fum de sílice, substància putzolànica
- **kN**: kilo newtons (unitat de força)
- **m**: metres
- **mm**: milimetres
- **σ**: Tensió
- **M**: moment
- **F**: força en N
- **L**: longitud en mm<sup>2</sup>
- **W**: treball
- **b**: base en mm<sup>2</sup>
- **h**: altura en mm<sup>2</sup>
- **A**: àrea en mm<sup>2</sup>
- **MPa= N/mm<sup>2</sup>**: Mega pascals, unitat de tensió
- **E**: tractament de les fibres amb estufa



- **EP:** tractament de les fibres amb estufa i planxa
- **N:** fibres sense tractament, neutres, control
- **AP:** tractament de les fibres amb autoclau i planxa
- **PL:** tractament de les fibres amb plasma
- **AE:** tractament de les fibres amb autoclau i estufa
- **Cem:** matriu de ciment control
- **1:** primera matriu amb 0.7% ciment, 0.1% fs i 0.2% mk
- **2:** segona matriu amb 0.6% ciment, 0.1% fs i 0.3% mk
- **3:** tercera matriu amb 0.5% ciment, 0.1% fs i 0.4% mk
- **4:** quarta matriu amb 0.6% ciment, 0.2% fs i 0.2% mk
- **5:** cinquena matriu amb 0.5% ciment, 0.2% fs i 0.3% mk
- **6:** sisena matriu amb 0.4% ciment, 0.2% fs i 0.4% mk

**INDEX**

<b>1. INTRODUCCIÓ</b>	<b>8</b>
<b>1.1. El ciment</b>	<b>11</b>
<b>1.1.1. Composició del ciment</b>	<b>12</b>
<b>1.1.1.1. Components principals</b>	<b>12</b>
<b>1.1.1.2. Components minoritaris o addicionals</b>	<b>15</b>
<b>1.1.1.3. Substàncies putzolàniques</b>	<b>15</b>
<b>1.1.1.3.1. Metacaolin (mk)</b>	<b>16</b>
<b>1.1.1.3.2. Fum de sílice (Fs)</b>	<b>17</b>
<b>1.1.2. Característiques del ciment</b>	<b>19</b>
<b>1.1.2.1. Adormiment i enduriment</b>	<b>19</b>
<b>1.1.2.2. Finor</b>	<b>20</b>
<b>1.1.2.3. Resistència mecànica</b>	<b>20</b>
<b>1.1.3. Reacció d'hidratació</b>	<b>21</b>
<b>1.1.3.1. Reacció silicats tricàlcics (C<sub>3</sub>S)</b>	<b>21</b>
<b>1.1.3.2. Reacció aluminats tricàlcics (C<sub>3</sub>A)</b>	<b>22</b>
<b>1.1.4. Tipus de ciment</b>	<b>24</b>
<b>1.2. Les fibres</b>	<b>27</b>
<b>1.2.1. Fibres químiques</b>	<b>27</b>
<b>1.2.2. Fibres naturals</b>	<b>28</b>
<b>1.2.2.1. Fibres vegetals de lli</b>	<b>29</b>
<b>1.2.3. No teixit</b>	<b>31</b>
<b>1.3. El fibrociment</b>	<b>32</b>
<b>1.3.1. Matriu de ciment</b>	<b>33</b>
<b>1.3.2. Les fibres</b>	<b>33</b>
<b>1.3.3. Degradació de la matriu-fibra</b>	<b>34</b>
<b>2. OBJECTIUS</b>	<b>35</b>
<b>2.1. Matriu de ciment</b>	<b>35</b>
<b>2.2. Fibrociment</b>	<b>35</b>



<b>3. MATERIALS I MÈTODES</b>	<b>36</b>
3.1. Preparació del material	36
3.2. Assaig amb les matrius de ciment	37
3.2.1. Materials	37
3.2.2. Preparació de provetes	38
3.3. Assaig IR de les matrius de ciment	41
3.3.1. Preparació de la mostra	42
3.3.1.1. Materials	42
3.3.1.2. Procediment	42
3.3.2. Preparació de la mostra per ser analitzada	44
3.4. Assaig dels fibrociments	45
3.4.1. Tractament de les fibres	45
3.4.2. Materials	48
3.4.3. Fabricació de les provetes de fibrociment	48
3.4.3.1. Cicles d'envelliment	50
<b>4. RESULTATS I DISCUSSIONS</b>	<b>51</b>
4.1. Resultats dels assajos amb matrius de ciment	51
4.1.1. Resultats de l'estudi a flexió	51
4.1.2. Resultats de l'estudi a tracció	53
4.2. Resultats Infrarojos	55
4.3. Resultats de l'assaig del fibrociment	57
4.3.1. Sense envelliment	57
4.3.2. Amb envelliment	58
<b>5. CONCLUSIONS</b>	<b>61</b>
5.1. Matriu de ciment	61
5.2. Fibrociment	61
<b>6. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>62</b>
6.1. Bibliografia complementaria	63
<b>ANNEXA</b>	<b>66</b>



## 1. Introducció

Per a la construcció s'han utilitzat diferents materials des de l'antiguitat, ja sigui des d'argiles, palla, pedra, fusta... i aquests han anat evolucionant al llarg del temps, degut a les necessitats i sobretot de les investigacions i descobriments.

La principal causa de la gran varietat de materials i la innovació dins d'aquests depèn de la integritat, resistència i sobretot la durabilitat del material

Des del segle XIX el material més utilitzat en la construcció és el ciment, ja que la seva demanda va augmentant any rere any, duplicant la seva demanda en els últims 10 anys, com podem observar a la Figura 1. Evolució

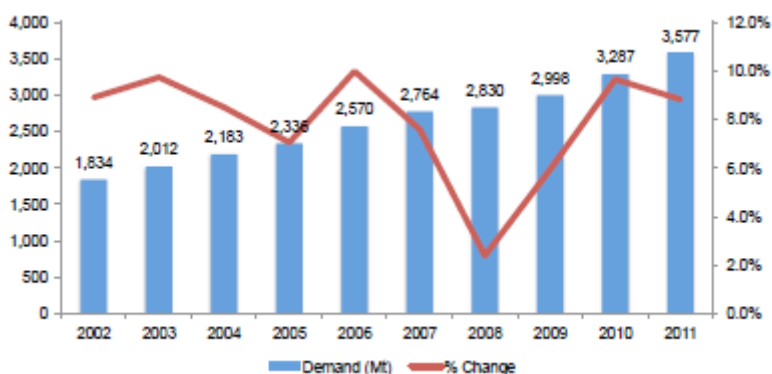


Figura 1. Evolució del ciment

El principal consumidor de ciment és Xina amb gran diferència respecte el segon país amb més consum: l'Índia. Els altres 13 grans consumidors estan molt diferenciats d'aquests, i entre ells no està situat Espanya.

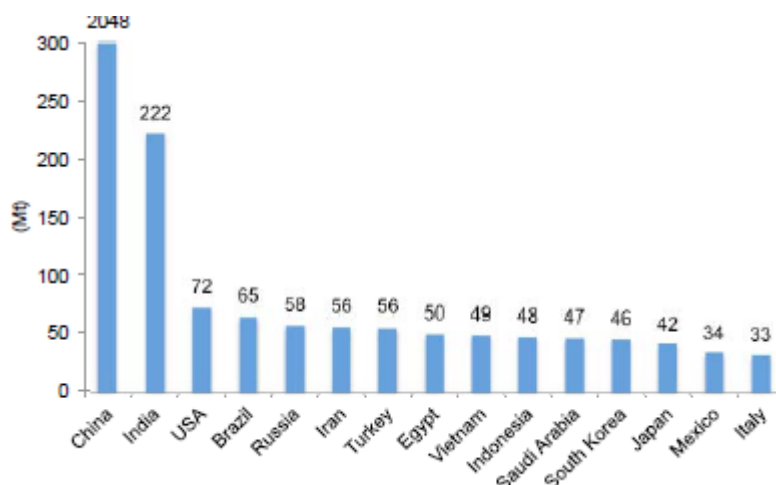


Figura 2. Consum de ciment dels 15 principals països

En quant a la producció, els dos primers països segueixen mantenint la seva posició i amb gran diferència respecte la resta. En canvi, trobem que Iran és el tercer país productor de ciment mentre que és el sisè en quant al consum. En canvi, Brasil és el quart màxim consumidor i en canvi el cinquè productor. Per altre banda, trobem que Itàlia (15e consumidor) no està dins dels 15 màxims productors de ciment. [1]

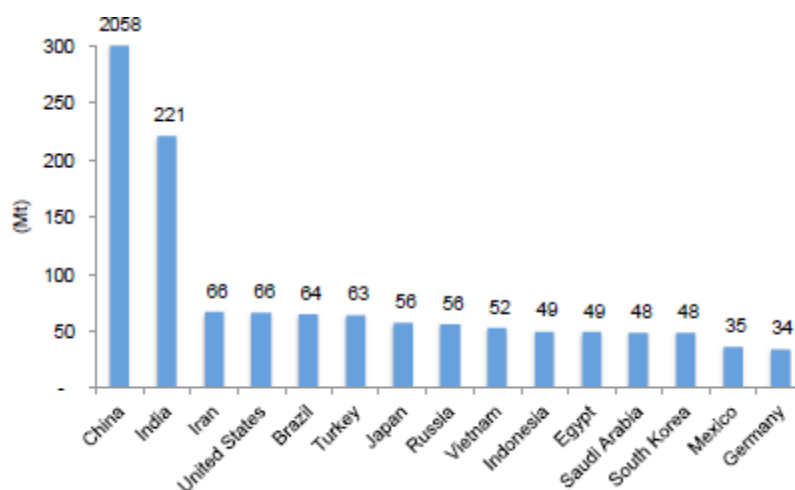


Figura 3. Els 15 grans productors de ciment

A la segona meitat del segle XX i el segle XXI es va incloure la utilització de productes sintètics per a la construcció, com els plàstics, les fibres artificials i els materials compostos. Actualment s'està estudiant la utilització del ciment reforçat amb fibres vegetals per tal d'eliminar i/o reduir la utilització de fibres sintètiques, i per tant utilitzant fibres renovables i més econòmiques. [2]

Entre els diferents materials utilitzats en l'àmbit de la construcció, hi ha alguns que tenen una funció de lligants. És a dir, són aquells que mitjançant una transformació física i/o química són capaços d'adherir-se els uns als altres, i per tant unir-se entre si a d'altres materials, per obtenir un únic conjunt en estat sòlid i resistent. Aquest materials poden ser Aglomerants o Conglomerants.

-Aglomerants: són materials en pols que barrejat amb aigua adquireixen plasticitat, i després d'un temps de presa endureixen, adquirint una resistència degut a canvis físics i químics. Exemples: ciment, guix i la calç.

-Conglomerants: són materials en pols i aigua (aglomerant) que se'ls hi afegeix sorra i/o grava, i adquireixen plasticitat i posteriorment s'endureixen adquirint així una resistència. Aquest poden ser:

\*C. Aeris: endureixen només amb l'aire, donant lloc a pastes no resistents a l'aigua. Poden ser: Calç grassa, escaiola comercial i ciments metàl·lics.

\*C. Hidràulics: són una barreja de calcària i argila calcinades i després moltes, que obtenen la capacitat d'endurir al contactar amb l'aigua, formant una barreja uniforme, plàstica i mal·leable.

Podem trobar: escaiola hidràulica, calç hidràulica i ciments. [3]



### 1.1. **El ciment**

La utilització de materials aglomerants, com la calç, fang, guix, ciment, en construcció s'utilitzava des de l'antiguitat. Així com a l'antiga Grècia o Egipte s'utilitzava escaiola i calç sotmeses a tractaments tèrmics. Però aquest materials tenien una resistència i adhesió baixa, així com possibles males resistències amb l'aigua.

Però els Romans van descobrir l'aplicació de materials putzolònics, per obtenir materials estables i insolubles. Aquests materials putzolònics eren cendres volcàniques, que amb la calç provocaven una reacció d'hidratació formant silicats de calç hidratats. Així, es va obtenir el ciment de putzolana, que va ser el conglomerant més utilitzat.

Al 1756, John Smeaton va desenvolupar un seguit de investigacions per tal de trobar un ciment capaç d'endurir sota l'aigua. Així va descobrir que els millors morters eren aquells que estaven formats per argila i calcaria amb l'addició d'una putzolana que s'enduria sota l'aigua, i un cop enfortit la calç era insoluble. Al 1792, James Parker va descobrir que podia obtenir un ciment a través de la calcinació de la pedra calcària-argilosa "septaria". Així, amb una barreja d'aquesta pols amb aigua obtenia un ciment sòlid i dur, més que qualsevol ciment anterior.

Però al 1817, J.L. Vicat va iniciar uns estudis sobre els material que componen el ciment, confirmant la teoria de Smeaton. D'aquesta manera va anomenar hidràulics a aquest tipus de barreges de calcaria i argila que en proporcions convenientes i moltes juntament, endurien sota l'aigua. Per tant va concloure que la sílice i alúmina eren els elements, que procedents de l'argila, donaven aquestes propietats hidràuliques.

Però no va ser fins al 1824, Joseph Aspdin va patentar un ciment d'un material pulverulent que amasat amb aigua i sorra enduria i formava un conglomerat d'aspecte similar a una pedra calcària de la península de Portland. Així va sorgir el ciment Portland.

Però al 1845, Isaac Johnson va obtenir el prototip de ciment Portland a escala industrial amb una barreja d'argila i pedra calcària calcinada a altes temperatures.

Però, no va ser fins al segle XX on va sorgir l'auge de la indústria del ciment Portland, degut a obtenció d'un ciment de qualitat homogènia. [3-4]

### **1.1.1. Composició del ciment**

Els ciments estan regulats per la "*Institucion par la Recepcion de Cementos, RC-08*" a Espanya. I aquest es classifiquen segons la norma RC-08 en components principals i components minoritaris o addicionals: [5]

#### **1.1.1.1. Components principals**

Aquest són materials inorgànics seleccionats utilitzats en una proporció superior al 5% en massa respecte tots els components.

- **Clínquer de ciment portland (K):**

És un material hidràulic obtingut per sinterització d'una barreja homogènia de matèries primeres (cru, pasta o farina) que contenen elements en forma d'òxids i petites quantitats d'altres matèries. Així, la relació en massa de CaO i SiO<sub>2</sub> no serà menor de 2 i el contingut en MgO no superarà el 5%.

- Clínquer de ciment d'aluminat de calci  
És un material hidràulic obtingut per fusió o sinterització d'una barreja homogènia de materials aluminosos i calcaris, que contenen principalment òxids d'alumini, calci i ferro i petites quantitats d'altres òxids. El component mineralògic fonamental és l'aluminat monocàlcic ( $\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ ).
- Escòria granulada de forns alts (S)  
Sobte per un refredament ràpid d'una escòria fosa d'un mineral de ferro en un forn alt, i constituïda amb almenys 2/3 de la seva massa per escòria vitrea, que és la suma de òxid de calci, de magnesi i diòxid de silici.
- Putzolana natural (P)  
Substàncies naturals d'origen volcànic o de roques sedimentaries, que un cop mòltes i amb presència d'aigua, reaccionen amb l'hidròxid de calç dissolt per formar compostos de silicat calci i aluminats càlcics capaços de desenvolupar resistència.
- Putzolana natural calcinada (Q)  
Materials d'origen volcànic, d'argiles, pissarres o roques sedimentaries activades per un tractament tèrmic.
- Cendres volants (V, W)  
Són materials putzolànics artificials de residus sòlids, recollits per precipitació electrostàtica o per captació mecànica de la pols dels gasos de combustió dels cremadors. Aquestes estan compostes per sílice reactiva i alumina i òxid de ferro i d'altres òxids.

- Esquist calcinat (T)  
Aquest material és produït en un forn especial, a una temperatura de 800°C aproximadament, i finalment mòlt, obtenint propietats hidràuliques i putzolanes.
- Calcaria (L, LL)  
El contingut en carbonat calci ( $\text{CaCO}_3$ ) > 75% massa. Segons la norma UNE-EN 933-9 el contingut en argila < 1.20g/100g i segons UNE-EN 13639 el contingut en carboni orgànic total (TOC) < 0.5 o 0.2% en massa segon sigui Calcaria L o LL respectivament .
- Fum de sílice (D)  
Material originat per una reducció de quars, d'elevada puresa en carbó en forns elèctrics, per la producció de sílice i aliatges de ferrosilici.  
La pèrdua de calcinació amb un temps d'una hora, no superarà el 4% en massa segons la norma UNE-EN 196-2. La superfície específica sense tracta serà almenys de 15m<sup>2</sup>/g segons la norma SO 9277.
- Components addicionals minoritaris  
Són materials minerals naturals o derivats del procés de fabricació del clínquer, que modifiquen propietats físiques del ciment com la docilitat o la retenció d'aigua.

- Sulfat de calci  
Material obtingut com a subproducte de processos industrials que s'afegeix durant la fabricació de ciment per controlar l'enduriment del ciment. Aquest pot ser guix, sulfat de calci dihidratat, hemihidrat o anhidrita.
- Additius  
Components que s'afegeixen per millorar la fabricació o las propietats del ciment. La seva quantitat total no pot excedir el 1% en massa del ciment, però els additius orgànics no poden excedir del 0,5% en massa sobre el residu sec.

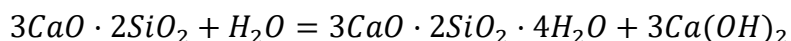
#### **1.1.1.2. Components minoritaris o addicionals**

Són els mateixos components principals, però utilitzats en una proporció igual o inferior a un 5% en massa respecte tots els components.

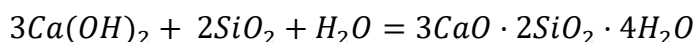
#### **1.1.1.3. Substàncies putzolòniques**

Són materials silícics o silici-aluminosos que per ells mateixos no posseeixen propietats, però molts i en medi aquos, reaccionen amb l'hidròxid de calç del clinker del ciment, donant lloc a fases hidratades anàlogues a las formades durant el forjat del ciment. [4]

- Reacció durant el forjat del ciment



- Reacció amb materials putzolònics





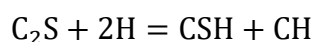
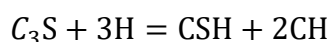
### 1.1.1.3.1. Metacaolin (mk)

El metacaolin és un additiu del ciment, que procedeix d'una deshidroxilada forma de la caolinita, un mineral de l'argila amb la següent composició química:  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ .

La caolinita és un silicat alumínic laminar de color blanc mate, amb un ús principal en la producció de paper, tot i que també té usos en la producció de ceràmica, pasta dental, esprai per cultius en agricultura ecològica...

Per l'obtenció del metacaolin, la caolinita es escalfada durant una hora entre 600-900°C, on es produeix un trencament dels enllaços entre les diferents capes de sílice i alumina. I un cop formada aquesta substància putzolana, podrà ser afegida al ciment i ajudarà a l'eliminació del hidròxid de calç.

El ciment pòrtland està format per un 80% de silicat de calci: Alitea ( $\text{C}_3\text{S}$ ) i belitea ( $\text{C}_2\text{S}$ ), que aquests reaccionen amb l'aigua segon les següents reaccions:



Un cop reaccionat s'obtindrà una composició final del 75% CSH (silicat de calci hidratat) i un 25% CH (calç hidratada o hidròxid de calç o portlandita). Posteriorment, aquest hidròxid de calç reacciona amb el metacaolin per transformar-se en CSH. En el nostre cas, es convenient intentar reduir al màxim l'hidròxid de calç en silicat de calci hidratat perquè és un element molt estable i millor pel ciment, ja que el fa molt durable.

Tot i això, no sempre és perjudicial la presència d'hidròxid, ja que en formigons armats amb acer proporciona molta alcalinitat, i el fet de ser molt soluble fa que una solució d'hidròxid amb  $\text{pH} > 13$  sigui tamponada, sense deixar disminuir aquest valor, fent que a reacció d'oxidació de l'acer quedi bloquejada i les armadures no es rovellin.



Figura 4. Substància putzolana: Metacaolin

#### 1.1.1.3.2. **Fum de sílice (Fs)**

És un additiu d'alta reactivitat, sent un subproducte procedent del rebuig de la fabricació de silici metàl·lic i d'aliatges de ferrosilici. Aquest és obtingut per un procés de reducció del quars amb carbó en forns elèctrics, a una temperatura superior a  $2.000^{\circ}\text{C}$ . Un cop finalitzat aquest procés, obtenim unes partícules esfèriques molt petites amb una gran superfície específica.

Aquest additiu és utilitzat per tal d'augmentar la resistència mecànica del ciment, provocant una densificació elevada a la pasta del ciment i una estimulació del procés d'hidratació.

El contingut en sílice d'aquesta substància reacciona químicament amb l'hidròxid de calç accelerant la reacció d'hidratació del ciment i formant CSH, que donarà lloc a una matriu més densa i amb una major resistència mecànica i impermeabilitat, aportant més durabilitat.



---

Figura 5. Substància putzolana: Fum de sílice

## 1.1.2. Característiques del ciment

### 1.1.2.1. Adormiment i enduriment

L'adormiment del ciment és la pèrdua de plasticitat de la pasta obtinguda un cop afegida l'aigua i els additius corresponents amb la posterior consolidació de la pasta, augmentant la duresa del ciment (enduriment).

Aquest procés està mesurat per l'assaig de l'agulla de Vicat, on es mesura l'inici i el final d'aquest procés degut a penetracions de l'agulla en la pasta.

L'inici de l'adormiment és el temps entre l'inici del pastat fins que l'agulla no travessa 35mm. Y el final s'estableix quan l'agulla ja no deixa marques a la superfície del ciment, donant a entendre que enduriment d'aquest està finalitzat. [4]

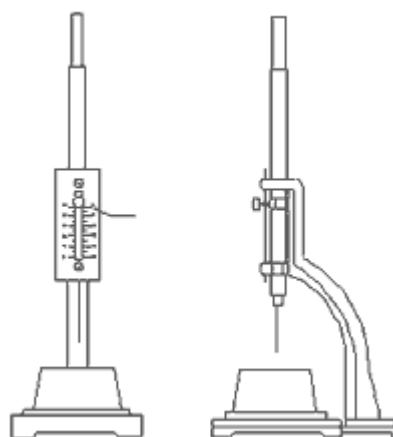


Figura 6. Agulla de Vicat

- **Fals adormiment:** Al pastar el ciment amb aigua es pot observar que la pasta comença a adormir-se, però si es segueix pastant, aquesta consistència es trenca i es torna a tenir fluïdesa. Això és degut a que en el procés de molta del ciment es produeix un augment de la temperatura que pot superar els 150°C, fent que el sulfat càlcic es transformi en guix, que endureix molt més ràpid que el ciment. Però com el seu contingut és molt baix, de seguida es trenquen els enllaços i es torna a tenir una pasta amb fluïdesa.

### **1.1.2.2. Finor**

La mida del ciment influeix en la velocitat de les reaccions químiques durant el forjat, influint així de manera indirecte en la resistència final que obtindrà aquest. Així, els grans de ciments al entrar amb contacte amb l'aigua, són hidratats a una profunditat de 0,01mm. Per tant, si la mida d'aquests fos molt elevada, el seu rendiment es veuria disminuït ja que el nucli quedaria pràcticament inert.

Per altre banda, si les partícules fossin excessivament fines, la calor d'hidratació seria molt elevada.

Així, el rendiment dels grans de ciment és directament proporcional a la seva superfície, i indirectament al seu volum.

### **1.1.2.3. Resistència mecànica**

La qualitat d'un ciment ve donada per la resistència que es capaç de desenvolupar un cop adormir i endurit, segons la cohesió dels grans de ciment i l'adherència als elements agregats. Per altre banda, la velocitat d'enduriment del ciment depèn tant de les seves propietats físiques com químiques, així com les condicions externes com la temperatura i la humitat durant el procés de curat.

Segons la normativa, la resistència d'un ciment és la resistència del morter normalitzat, amassat amb sorra de característiques i granulometries determinades, amb una relació aigua/ciment de 0,5.

### **1.1.3. Reacció d'hidratació**

La hidratació del ciment és el procés pel qual l'aigua del pastat es combina amb substàncies anhidriques que s'hidraten formant nous components amb l'alliberació de calor. Així, obtenim el pas d'una substància líquida a un estat sòlid. Aquestes reaccions d'hidratació són complexes i actuen en cada component, sent les més rellevants les reaccions dels silicats tricàlcics i aluminat tricàlcics que succeeixen en el mateix moment i espai, però a velocitats diferents.

[6]

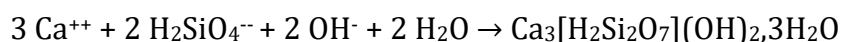
#### **1.1.3.1. Reacció silicats tricàlcics (C<sub>3</sub>S)**

És el mineral més importat del clínquer (35-70%), i determina la rapidesa del forjat i la resistència mecànica, amb una reacció molt exotèrmica.

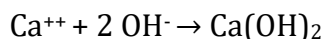
Al contacte amb l'aigua, aquest silicat es dissolt ràpidament seguint aquesta reacció:



On ràpidament es forma silicat càlcic hidratat (C-S-H) i el medi queda sobresaturat provocant la precipitació següent:



Així, en les primeres reaccions obtenim la precipitació del silicat càlcic i una acumulació de ions OH que augmenten el pH, i una acumulació de ions Ca<sup>++</sup> que augmenten la quantitat de calç en relació al ciment, que provocarà la precipitació d'hidròxid de calç o Portlandita:

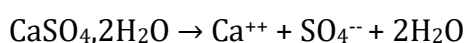
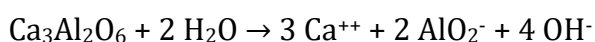


La portlandita provoca una “bomba de calç” que augmenta la dissolució del  $\text{C}_3\text{S}$ , per tant, generant més precipitació de C-S-H. Això, provoca l'aïllament d'aquestes substàncies, i per tant una disminució de la reacció d'hidratació, fins a esgotar l'aigua. Per altre banda, la formació d'hidròxid de calç provoca una alcalinitat molt elevada, tamponant així l'aigua continguda en el formigó. La combinació de la portlandita amb el  $\text{CO}_2$  atmosfèric produeix carbonat càlcic que redueix el contingut de ions  $\text{OH}^-$ , és a dir, el pH, però és una reacció molt lenta.

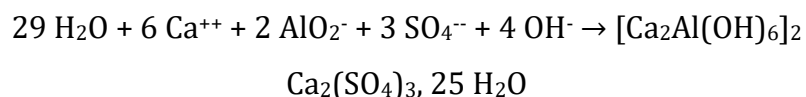
C-S-H és el producte més important d'aquest procés, pel seu volum i la seva resistència. Així, gracies a aquesta substància i la seva capacitat per lligar-se a ella mateixa o a les parets circumdants amb ponts de ions de calç o ponts d'hidrogen, es produeix la presa del formigó

### **1.1.3.2. Reacció aluminats tricàlcics ( $\text{C}_3\text{A}$ )**

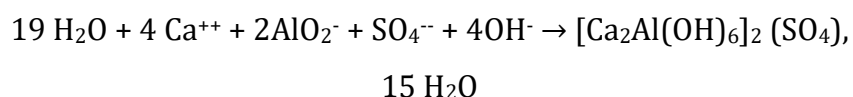
Te una presència del 0-17% en el clínquer, i la seva hidratació produeix molta calor a una velocitat molt elevada al entrar amb contacte amb l'aigua. Es per aquest fet, que per impedir un enduriment molt ràpid de la massa, s'introdueix calç perquè actuï com a regulador del forjat reduint la solubilitat dels aluminats.



Els ions resultants es combinen per formar cristalls de trisulfoaluminat de calç hidratat, anomenats ettringita:



Aquest cristalls generen cert enduriment de la pasta però sense la formació d'enllaços iònics permanents amb altres components dels formigó. Amb el temps, la reacció es torna més lenta i la limitació adhesió de calç provoca esgotament dels ions sulfat. Però l'excés d'aluminat provoca la redissolució de l'ettringita que es converteix en font del ió sulfat i genera monosulfoaluminat calç hidratat o MSA:





#### 1.1.4. Tipus de ciment

En l'actualitat es fabriquen i comercialitzen diferents tipus de ciment, que es diferencien per la composició, el procés de fabricació, la velocitat d'enduriment o la calor d'hidratació. La classificació dels ciments està marcada pel "Real Decreto 956/2008 en la *"Instrucción para la recepción de Cementos RC-2008"*: [\[5, 7\]](#)

- Ciment Portland

Ciment obtingut per trituració d'una roca mare (clínquer) elaborada per una barreja de carbonat càlcic (80%) i argila (20%) cuita a 1.450°C en forns rotatoris on els elements químics es recombinen formant compostos anhídrids com: silicat tricàlcic i bicàlcic, aluminats càlcics i ferrito-aluminat de calç. En el ciment s'afegeix una petita quantitat de guix per evitar la hidratació total de l'aluminat tricàlcic. El clínquer està format un 90% d'òxid calç(C), òxid alumínic(A), òxid fèrric(F) i anhídrid sílice (S), que donen lloc als components mineralògics principals. També podem trobar petites quantitats de components secundaris

- Ciment Portland (CEM I)

Ciment de més qualitat i resistència degut al seu grau de puresa, que s'utilitza en obres de construcció quan no es pot utilitzar cap altre tipus de ciment degut a les necessitats de resistència i durabilitat requerides. (estructures de formigó pretensat, obra pública grans dimensions)

- Ciment Portland amb addicions (CEM II)  
És un ciment amb resistència moderada als sulfats i destinat a obres de caràcter general i obres exposades a l'acció de sulfats o on es requereix una moderada calor d'hidratació. (ponts, canonades)
- Ciment amb escòries d'alt forn (CEM III)  
Ciment compost per una barreja homogènia de clínquer, guix, escòria granulada d'alts forns i altres components minoritaris, i té un moderat calor d'hidratació, baixa retracció i és sensible a temperatures baixes.
- Ciments putzolònics (CEM IV)  
Ciments que degut a la seva lenta hidratació no generen calor, i per tant no es contrauen durant l'adormiment, fent un enduriment més lent. Així, és un ciment útil per regions amb climes calorosos i per element amb alta necessitat d'impermeabilitat i durabilitat.
- Ciments compostos (CEM V)  
Ciment amb característiques intermèdies entre ciments III i IV, i s'utilitzen quan es necessita una alta resistència als atacs de sulfats (canals, obres portuàries, clavegueram).
- Ciment aluminós (CEM VI)  
Producte industrial obtingut per combinació a una temperatura de fusió, de la calç i l'alúmina de matèries primes de calcària, dosificades en un cru d'aluminós. I un cop obtingut el clínquer molt i refredat.

Taula 1. Taula de classificació i components dels tipus de ciments [normativa RC-08]

Tipus	Denominació	Designació	Composició (proporció en massa %)											Components minoritaris			
			Components principals														
			Clinker K	Escoria de horno alto S	Humo de sílice D <sup>2</sup>	Puzolana		Cenizas volantes		Esquistos calcinados T	Caliza <sup>6</sup>						
			Natural P	Natural calcinada Q	Silíceas V	Calcareas W		L	LL								
CEM I	Cemento pórtland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		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
		CEM III/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento pórtland con ceniza volante	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
		CEM III/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
		CEM III/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5	
		CEM III/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
		CEM III/A-M	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B-M	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM III	Cemento con escorias de horno alto	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/A	65-89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Cemento puzolánico <sup>3</sup>	CEM IV/B	45-64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM V/A	40-64	18-30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM V	Cemento compuesto <sup>3</sup>	CEM V/B	20-38	31-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	

## 1.2. Les fibres

Després de les plantes alimentaries, la plantes productores de fibra són les de major importància econòmica i social. La obtenció de fibra a partir de vegetals és una tècnica utilitzada per l'home des de temps molt remots per usos tèxtils. Però des de els anys 50, l'ús de cultius productors de fibra a disminuït degut al progres de les fibres derivades de polímers de cadena llarga (fibres químiques).

En l'actualitat, podem trobar fibres naturals o químiques que es diferencien entre elles degut a la seva procedència, ja siguin obtingudes del medi ambient o creades químicament a traves de matèries primeres.

[8]

### 1.2.1. Fibres químiques

- Fibres artificials o semi-sintètiques

Són fibres tèxtils manufacturades a partir de matèria prima natural com la cel·lulosa o proteïna animal o vegetal. Aquestes van ser creades gràcies a la necessitat d'obtenir filaments llargs i resistents, i es classifiquen en tres tipus segons la matèria prima de la que s'obtinguin: cel·lulòsica, proteica i algínica.

- Fibres sintètiques

Són fibres tèxtils manufacturades on la matèria prima es un producte de síntesis química.

### 1.2.2. Fibres naturals

- Fibres animals

Són les fibres utilitzades des de l'antiguitat, ja siguin pels de diverses espècies animals, secrecions i cuirs. Les més destacades són: Llana, Cachemir, Mohair...

- Fibres vegetals

Les fibres vegetals provenen majoritàriament de la fusta d'espècies vegetals, tot i que també poden provindré de les fulles, tiges o llavors de planes herbàcies, silvestres o de residus agrícoles o forestals. Aquestes estan compostes bàsicament per cel·lulosa. La longitud, gruix i el contingut d'aquesta depèn del tipus d'arbre o de planta.

La cel·lulosa ( $C_6H_{10}O_5$ ) està constituïda per una llarga cadena de carbohidrats polisacàrids. La seva estructura lineal és la unió de molècules  $\beta$ -glucosa amb enllaç  $\beta$ -1,4 glicosídic. Gràcies els ponts d'hidrògens formats entre els grups hidroxils de diferents cadenes de glucosa, fent així aquestes insolubles en aigua i formant fibres compactes que construeixen la paret cel·lular de les cèl·lules vegetals, donant-li mola rigidesa.

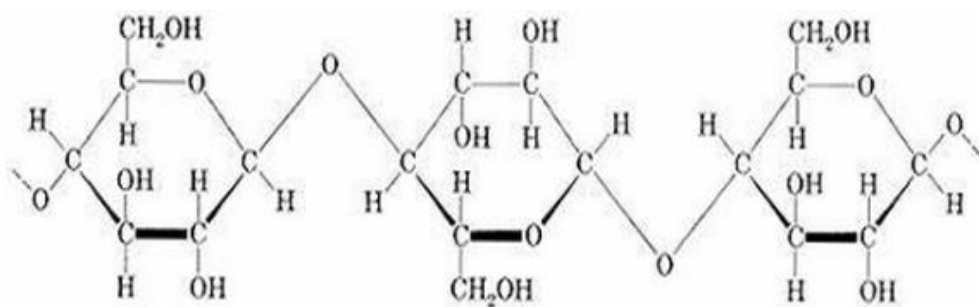


Figura 7. Estructura de la cel·lulosa

### **1.2.2.1. Fibres vegetals de lli**

Les fibres vegetals de lli són fibres vegetals molt allargades obtingudes de la planta de lli, *Linum usitatissimum*.

La planta de lli és una planta herbàcia anual dicotiledònia, de la família de les Linàcies, amb arrels curtes i una tija d'on s'extreuen les fibres. Aquesta planta té una única tija fina i recta, poc ramificada i amb una altura entre 0.8-1.2m. Les fulles són alternes, lanceolades, lineals, estretes i senceres, sense



Figura 8. Planta de lli

estípules i disposades en espiral a partir de la tercera. Les flors s'agrupen en un raïm terminal, són hermafrodites i contenen 5 estams i 5 pètals de color blanc o blau.

El fruit és una càpsula punxeguda que comprèn 10 llavors petites de color fosc, brillants i aixafades i allargades, les quals són utilitzades per extreure farina (llinosa). La tija està formada per un tub interior poligonal (a medul·la) rodejat per dos capes llenyoses: una dura i l'altre tova (albeca). Tot està envoltat per un envoltat que conté les fibres (liber), on té a la perifèria una escorça fina i prima que cal despendre.

El lli és una planta important cultivada per una utilització de la seva fibra i olis. És un cultiu prehistòric ja que 5.000 a.C. ja es produïa per l'obtenció de fibra en zones de Israel, Síria, Iran i Iraq. Així com també era importat per la cultura egípcia, ja que aquest a sigut trobat en algunes piràmides per embolicar les mòmies. El fenicis, van difondre el cultiu del lli per Europa per ser utilitzar per les veles de les seves embarcacions. Així mateix, els celtes, grecs i romans utilitzaven aquest cultiu per la producció de teixits i vestits. Però no va ser fins el segle XVIII i XIX que aquest va tenir un gran desenvolupament a Europa. Tot i que a la meitat del segle XIX, el cultiu va patir un retrocés degut a l'expansió del cultiu de cotó, la introducció de la maquinaria tèxtil i el desenvolupament de fibres sintètiques.

Així, actualment el cultiu de lli està destinat a la producció tèxtil i paperera, així com a la producció de llavors per usos medicinals o alimentaris. Però actualment, s'està experimentat amb aquestes fibres en el camp de la construcció. Ja que les fibres de lli en una matriu de ciment alteren el comportament i la hidratació d'aquest. Així, aquestes fibres també absorbeixen una gran quantitat d'aigua (fins 200% de la seva massa) generant un fibrociment més sec, que un cop endurit, millora la seva resistència a flexió.

La fibra de lli és una fibra forta i flexible, molt resistent i brillant, encara que amb una elasticitat menors a la del cotó. Aquesta, juntament amb la fibra de cànem, jute i rami formen les fibres liberianes. La majoria d'elles de naturalesa forta per lo que tenen usos industrials Així, la fibra de lli és la més suau i s'utilitza per confecció de teles. Aquesta està composta de cel·lulosa (60%), hemicel·lulosa i lignina.



### 1.2.3. **No teixit**

Els no teixits són teles de fibra que no han sigut filades i estan unides per mitjà de diferents processos mecànics, tèrmics o químics, que poden tenir una vida llarga o curta segons la seva composició. La utilització dels no teixits aporta propietats com porositat, elasticitat, lleugeresa i duresa entre d'altres, i per altre banda, representa una alternativa econòmica viable ja que els costos de producció disminueixen considerablement al evitar el procés de filatura. [7]



Figura 9. Fibres de lli (Esquerra) i no teixit de lli (dreta)



### 1.3. El fibrociment

L'intent de millorar les característiques resistents de les pastes hidràuliques va ser la barreja de ciment amb amiant, obtenint així l'anomenat fibrociment, amiant ciment o asbest ciment.

L'amiant o asbest és un mineral fibrós molt resistent al foc, que va començar a utilitzar-se a finals del segle XIX. Però des de 1900 diversos estudis mèdics van començar a relacionar aquesta fibra amb malalties respiratòries que afectaven els treballadors de les fàbriques. Però un problema afegit era que aquestes carències mèdiques, no apareixien fins els 10, 20 o 30 anys d'haver respirat aquest material.

A l'inici dels anys 80 es va instaurar una seguretat a les fàbriques, però tot i així aquesta seguretat no existia pels manipuladors, aplicadors i mantenidors d'aquest producte. Es va descobrir, que la procedència de malalties per l'amiant es produïa degut a un trencament o desgast del fibrociment, que podia provocar l'alliberació de les fibres d'amiant, que eren respirades i causaven malalties, com el càncer de pulmó.

Per tant, des dels anys 80, l'ús del amiant era controlat, però no va ser fins el 1985 que es va produir la prohibició l'ús d'amiant en productes quotidians i joguines. Però al 2001, la normativa espanyola va prohibir la utilització total de l'amiant. [9]

Un cop prohibida la utilització d'amiant, es va començar a desenvolupar estudis per la utilització d'altres tipus de fibres, com fibres de cel·lulosa, fibres de vidre o fibres viníliques, per la fabricació de fibrociment.

Els primers estudis, es basaven en la utilització de fibres naturals, ja que eren materials renovables, amb gran disponibilitat i econòmics. Però un dels principals problemes observat era la poca durabilitat de les fibres a causa de l'elevat medi alcalí del ciment. Així, es va passar a la creació de fibres sintètiques que van obtenir uns bons resultats amb el ciment, per obtenir fibrociments d'altres prestacions.

Perquè els components dels fibrociment compleixin amb la seva funció, és necessari que en la zona de transició pugui desenvolupar una adherència adequada per transmetre les tensions entre fibra-matriu, protegir la fibra de les agressions mecàniques internes i evitar el contacte directe entre les fibres. Per altre banda, l'adherència i la interacció química entre fibra-matriu i la porositat són propietats que determinaran el comportament del fibrociment. [6]

### 1.3.1. **Matriu de ciment**

És la responsable de transferir tensions provocades per les accions externes a les fibres, fixar les fibres i protegir-les de l'ambient extern.

- Propietats mecàniques: resistència i mòdul d'elasticitat a compressió i a esforços tangencials.
- Paràmetres geomètrics: longitud d'immersió de les fibres, que esta relacionat amb la granulometria de la matriu.
- Propietats reològiques: modificació de la plasticitat

### 1.3.2. **Les fibres**

Són responsables de millorar la resistència a tracció o flexió de la matriu, reduir o eliminar les fissures i modificar la densitat de la matriu de ciment.

- Propietats mecàniques: resistència, mòdul d'elasticitat i el tipus de trencament a tracció.
- Paràmetres geomètrics: l'esveltesa, la curvatura i la rugositat de la superfície
- Propietats reològiques: l'afecció a l'aigua i la sensibilitat dimensional a la humitat

### **1.3.3. Degradació de la matriu-fibra**

En el moment en que les fibres vegetals contacten amb la matriu de ciment, les reaccions químiques pròpies de l'aglomerant afecten les fibres, descomponent i dissolent alguns dels seus components químics, que podran modificar la velocitat de reacció i d'hidratació del ciment.

Element majoritari és la portlandita (o hidròxid de calç) provinent del ciment, provocant una alcalinitat del medi molt elevada, que causarà la dissolució de la hemicel·lulosa i la descomposició de la lignina a llarg termini. Si les fibres utilitzades contenen alts nivells de components no cel·lulòsics, com la lignina, el mido o la cera, es podria provocar una disminució de la calor d'hidratació, que causaria una reducció de la resistència del fibrociment.

D'altre banda, podem trobar una disminució de l'adherència degut a canvis de volum de la fibra. Aquests canvis vindran donats per canvis d'humitat i de temperatura del fibrociment degut a la seva exposició a la intempèrie, que provocaran una saturació d'aigua o assecament dels porus d'aquest material. Així, podríem tenir una absorció d'aigua per la fibra i posteriorment un assecament, provocant una disminució del volum. Aquests processos absorció-assecat produeixen la desunió gradual de la fibra-matriu, provocant així la pèrdua d'adherència afectant a la durabilitat d'aquest material.

## 2. **Objectius**

L'objectiu d'aquest treball és poder comprovar que els fibrociments poden estar formats amb fibres vegetals, aportant una resistència mecànica adequada i una bona durabilitat, per tal de poder fabricar materials sost4enibles per la construcció.

Per tal de dur a terme aquest objectiu hem realitzat diferents estudis, classificats en els següents subapartats:

### 2.1. **Matriu de ciment**

L'objectiu d'aquest subapartat és valorar la resistència i el contingut d'hidròxid de calç final de les diferents matrius de ciment, per tal d'escollir aquella amb una major resistència i amb una menor quantitat d'hidròxid de calç final.

Per fer això, hem elaborat diferents matrius de ciment amb diferents concentracions de materials addicionals, i una matriu control.

### 2.2. **Fibrociment**

L'objectiu és estudiar/valorar l'adherència de la fibra-matriu.

Per poder valorar la força exercida per la fibra, primerament se li han aplicat diferents tractaments, i per a cada un d'ells, s'han estudiat naturalment i amb un previ cicle d'envelliment. I d'altre banda, s'ha escollit la millor matriu en quant a contingut d'hidròxid de calç i de resistència total.

### 3. Materials i mètodes

#### 3.1. Preparació del material

Primerament, es va realitzar la preparació del fum de sílice, ja que aquest materials és necessari tenir-lo en forma de pols per obtenir una reacció adequada. Per obtenir un grau de finor major, es va procedir a una molta en un moli de boles, obtenint així una suspensió líquida.



Figura 10. Preparació del fum de sílice

Per tal de dur a terme aquests procés, es van realitzar uns

càlculs previs, observables a la Taula 2. Càlculs per l'elaboració del fum de sílice per tal de determinar les quantitats adequades dels components d'aquesta suspensió.

Posteriorment, es van introduir aquestes quantitats calculades de FS i aigua dins d'un moli de boles durant 15min. Finalment vam obtenir una pasta líquida negra de fum de sílice, la qual va ser emmagatzemada en un pot per la seva conservació.

Un cop obtinguda la pasta, per conèixer la quantitat d'aigua d'aquesta solució líquida, es va procedir a extreure una petita quantitat coneguda de la pasta, i es va dipositar a l'estufa fins els seu enduriment. Un cop retirada, va tornar-se a pesar, i aquesta diferencia de massa va ser atribuïda a l'aigua continguda en la pasta.

Taula 2. Càlculs per l'elaboració del fum de sílice

<b>Pes màxim total</b>	<b>Pes jerra + tapa</b>	<b>Pes boles</b>	<b>Relació A/FS</b>	<b>Pes FS</b>	<b>Pes aigua</b>
<b>3900</b>	2200	600	0,5	733	367

### 3.2. Assaig amb les matrius de ciment

En aquest assaig hem procedit a realitzar matrius de ciment amb diferents concentracions de materials addicionals, per tal d'efectuar posteriorment un estudi de resistència mecànica.

#### 3.2.1. Materials

- Ciment Portland tipus I
- Fum de Sílice
- Metacaolin
- Superfluidificant (additiu)
- Aigua desionitzada
- Motlle

### 3.2.2. Preparació de provetes

Amb els materials anomenats en el punt anterior, es van realitzar 7 tipus diferents de matrius amb diferents concentracions d'aquests materials mostrades a la Taula 3 amb les relacions d'aquests components mostrades a la Taula 4.

Taula 3. Concentracions dels materials per la fabricació de les diferents matrius de ciment

	<b>ciment</b>	<b>fs</b>	<b>mk</b>	<b>Aigua</b>	<b>Additiu (0.4%)</b>
<b>Cim</b>	2150	0	0	752,5	8,6
<b>1</b>	1350	135	270	558,9	7,02
<b>2</b>	1625	162,5	487,5	729,625	9,1
<b>3</b>	1550	155	620	750,2	9,3
<b>4</b>	1600	320	320	652,8	8,96
<b>5</b>	1550	310	465	686,65	9,3
<b>6</b>	1300	260	520	621,4	8,32

Taula 4. Relacions de concentracions dels components

	<b>ciment</b>	<b>fs</b>	<b>mk</b>
<b>1</b>	0,7	0,1	0,2
<b>2</b>	0,6	0,1	0,3
<b>3</b>	0,5	0,1	0,4
<b>4</b>	0,6	0,2	0,2
<b>5</b>	0,5	0,2	0,3
<b>6</b>	0,4	0,2	0,4
<b>Cim</b>	1	0	0

Per a cada una de les diferents matrius fabricades, es van realitzar 9 provetes de 16x4x2cm que van ser estudiades a flexió i a compressió després de 7, 28 i 56 dies.

Mentre no s'assolien aquest dies, les provetes estaven dipositades en una cambra de vapor d'aigua a una temperatura de  $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$  i a una humitat  $<95\%$ .

- Assaig de flexió

Un esforç a flexió és aquell que exerceix una força sobre un material contra el seu eix longitudinal fins a trencar-lo.

Per realitzar l'estudi de flexió es va procedir primerament a polir les provetes, per tal d'eliminar imperfeccions i deixar-les amb una superfície regular i a mesurar-les amb un peu de rei. Seguidament, es van col·locar en una premsa multiassaig Incotècnic amb una cèl·lula de carrega de 3kN. Així, amb l'ajuda d'un programari específic es van prendre diferents mesures de força de flexió, fins el trencament de la peça.



Figura 11. Maquinaria per la realització del  
assaig de flexió



- Assaig a compressió

Un esforç a compressió és aquell que es produeix quan les forces que actuen sobre un objecte tenen la mateixa direcció per sentit oposat, i el material tendeix a ser aixafat o escurçat.

Per realitzar aquest assaig, es va procedir a tallar les provetes estudiades amb anterioritat a flexió, en cubs de 2x2, obtenint un total de 9cubs per cada una de les diferents matrius. Un cop tallades i mesurades amb un peu de rei, van ser dipositades a la premsa multiassaig Incotècnic, amb una cèl·lula de carrega de 30kN on van rebre una força fins a trencar-se.



Figura 13. Inici de l'assaig de compressió



Figura 12. Final de l'assaig de compressió

### 3.3. Assaig IR de les matrius de ciment

Per estudiar la composició química de les diferents matrius de ciments creades vam dur aquestes a ser analitzades amb espectroscòpia infraroja (FTIR-*Fourier transform infrared spectroscopy*). Aquest assaig es va dur a terme a la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial, concretament en el departament "*Centre for research in NanoEngineering (CRNE)*".

Aquesta maquinaria està dotada d'un làser infraroig amb un rang espectral entre 225 i 6.400  $\text{cm}^{-1}$  (freqüència).

L'energia de la llum infraroja provoca vibracions en les molècules, creant estiraments i flexions dels seus enllaços.

Gràcies a estudis fets amb anterioritat per professionals de molècules i els seus canvis segons la longitud d'ona dels infrarojos, poder conèixer la freqüència corresponen a una banda d'absorció de la regió infraroja, de cada una de les vibracions. Per tant, podem situar i diferenciar el comportament de les molècules del material examinat.



Figura 14. Distribució de les longitud d'ona i colors dels espectres

### **3.3.1. Preparació de la mostra**

Per tal d'analitzar amb IR les diferents matriu, primerament es va procedir a una modificació de la mostra, ja que es necessari tenir aquesta en estat en pols.

Aquest procés de desmiculació de la mostra es realitzava un com finalitzats els assajos de compressió i flexió, però l'estudi dels IR és va dur a terme un cop obtingudes totes les mostres a estudiar. Per tant, per evitar alteracions de les mostres per hidratació, aquestes patien un procés de congelació. Un cop aplicat aquests procés, que es detallarà a continuació, aquestes eren emmagatzemades amb una camara de buit fins el seu posterior assaig d'IR.

#### **3.3.1.1. Materials**

- Kitasato
- Embut filtrant
- Paper de filtre
- Morter de ceràmica
- Acetona
- Alcohol isopropil
- Martell

#### **3.3.1.2. Procediment**

Primerament es va procedir a un esmicolat de la mostra en bocins molt petits amb l'ajut del martell, on seguidament amb l'ajut del morter de ceràmica es va procedir a una moltura manual fins a obtenir la mostra en un estat de pols, és a dir, sense la presencia de partícules. (Figura 15. Moltura del ciment fins obtenció de pols)





Figura 16. Esmicolat de les mostres de ciment



Figura 15. Moltura del ciment fins obtenció de pols

Un cop obtinguda la mostra en pols, es va procedir a aplicar el tractament de congelació de la hidratació de les mostres.

Aquest consistia en col·locar la mostra en un paper de filtre situat en el kitasato, i aplicar-hi acetona, tot sense deixar de remoure, fins a obtenir una saturació d'aquesta pols. Seguidament, es procedia a calcular 30 segons per passar a encendre una màquina de buit connectada al kitasato, on des de aquest instant s'anava abocant alcohol isopropil sense deixar de remoure la mostra. Un cop la mostra obtenia una textura seca, és a dir, ja no era humida, s'apagava la màquina del buit i la mostra era introduïda en una bossa de plàstic hermètica que era etiquetada i emmagatzemada en una cambra de buit per tal de mantenir-se sense modificacions, és a dir, en estat de congelació.

Aquest procediment va ser repetit per cada una de les mostres de les diferents matrius de ciment, tant als 7, 28 i 56 dies.

### 3.3.2. Preparació de la mostra per ser analitzada

Per poder analitzar les diferents mostres en la maquina dels IR,, aquestes no podien estar en format pols, sinó que es va tenir que fabricar una pastilla per a cada una de les mostres a analitzar.

Per la creació d'aquesta pastilla, es va pesar en una bàscula de precisió (pas 1 de la Figura 17) 300mg de Bromur (KBr) i 1mg de la mostra de ciment, que posteriorment van ser triturats amb l'ajut d'un petit morter, fins a obtenir una pasta homogènia. Aquesta va ser introduïda en un motlle (pas 2, Figura 17) i seguidament en una premsa de 5tn durant 1min aproximadament (pas 3, Figura 17).

Un cop finalitzat aquest temps, el motlle era desmuntat i ja obteníem la pastilla (pas 4, Figura 17), per ser dispositada a la màquina per ser analitzada (pas 5, Figura 17).

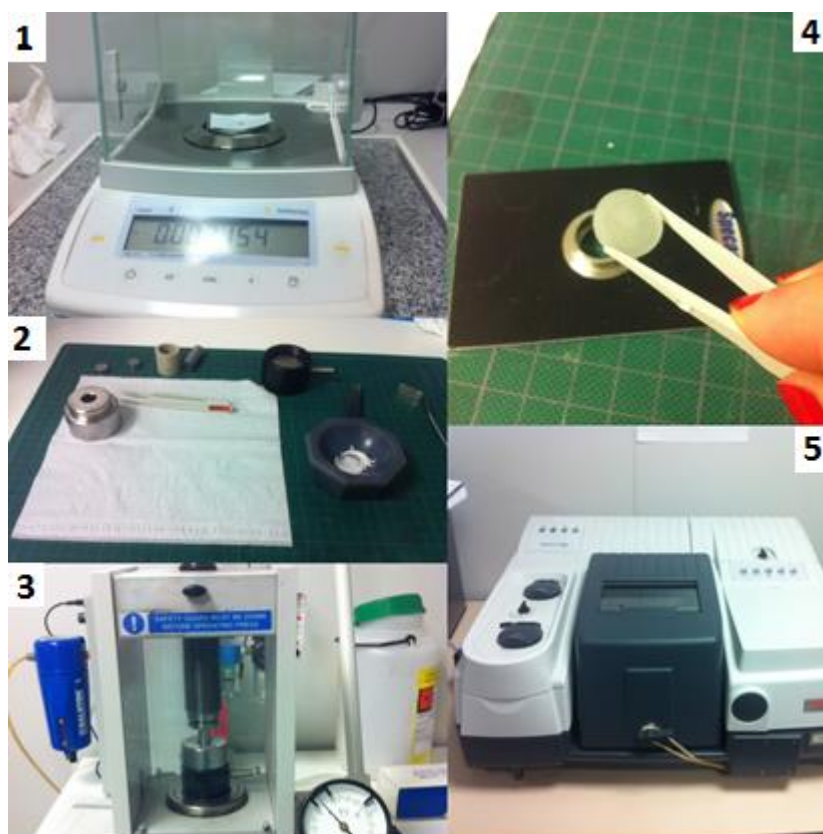


Figura 17. Passos a seguir per la preparació de mostres per l'assaig IR

### 3.4. Assaig dels fibrociments

El fibrociment va ser fabricat amb la matriu amb millors resultats de duresa i amb totes les fibres tractades per tal d'estudiar diferències entre els diferents tractaments, per obtenir el fibrociment amb millor adherència fibra-matriu. Per tal d'estudiar aquesta adherència, es va realitzar un estudi de tracció del fibrociment amb i sense tractament d'envelliment accelerat, amb una premsa d'alta resolució: DMA (dynamic mechanical analysis).



Figura 18. dynamic mechanical analysis

El DMA es va utilitzar com a premsa estàtica amb una força creixent entre 0 i 18N, amb una velocitat de carrega de 6-18N/min i a una temperatura de 30°C.

#### 3.4.1. Tractament de les fibres

Les fibres utilitzades van ser fibres de lli. Aquestes procedían 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).

Les fibres van ser tallades en quadrats de 30x30, obtenint dos quadrats per cada un dels 5 tractaments a realitzar.



Figura 19. No teixit de les fibres de lli

- Primer tractament

Aquestes fibres s'utilitzaran com a referència sense patir cap tractament

- Segon tractament

Les dues peces de fibres van ser mullades i posteriorment assecades a una estufa a 160°C. Aquest procediment va ser repetit en 5 cicles.

- Tercer tractament

Les dues peces de fibres van ser mullades i posteriorment assecades a una estufa a 160°C. Posteriorment van ser planxades manualment amb una planxa d'usuari. Repetint aquestes accions 5 cicles.



Figura 20. Tractament de fibres amb planxat manual

- Quart tractament

Les dues mostres de fibres van ser dipositades a l'autoclaui durant 1h a 120°C i 1atm de pressió. Posteriorment es van dipositar a l'estufa a 160°C fins el seu assecat. Aquests procediments es van repetir 5 vegades.

- Cinquè tractament

Les dues mostres de fibres van ser dipositades a l'autoclaui durant 1h a 120°C i 1atm de pressió. Posteriorment es van dipositar a l'estufa a 160°C fins el seu assecat. I per últim, vam procedir a planxar aquestes mostres amb una planxa d'usuari. El procés es va repetir durant 5 cicles.



Figura 21. Autoclaui, utilitzat pel tractament de les fibres

- Sisè tractament

Aquest tractament va ser realitzar a la Universitat Politècnica de Catalunya al campus de Terrassa, pel departament de "*Textile and paper*".

El no teixit primerament va ser tractat per 4 cicles sec/humit. En el cicle humit aquesta era submergida en aigua destil·lada a 60°C durant 70minuts. Posteriorment, el cicle sec consistia en assecat aquest no teixit en un forn de recirculació d'aire a 105°C durant 16 hores. Un cop realitzats aquests cicles, es va procedir al tractament de plasma a la fibra. Primerament, la fibra era dipositada a una cambra de reactor on s'aplicava un buidat de 50mtorr.



Seguidament es va procedir a la introducció constant a 20sccm d'un gas Ar, mantenint la pressió dins del reactor al voltant de 150mtorr. I és en aquest moment quan s'inicia el proces mitjançant radiofreqüència *Europlasma Junior* (RF) a 13.56 MHz, mantenint la fibra durant 10min amb Ar.

### 3.4.2. Materials

- Ciment Portlad tipus I
- Fum de Sílice
- Metacaolin
- Superfluidificant
- Aigua desionitzada
- Fibres de lli
- Motlle

### 3.4.3. Fabricació de les provetes de fibrociment

Es va preparar una matriu amb els components de la barreja 1, de l'apartat assaig de les matrius de ciment.

Les fibres van ser tallades en tires de 16x1cm. Posteriorment vam procedir a omplir la meitat de motlle amb la pasta, per tal de poder dipositar correctament la fibra i poder continuar omplint el motlle, com s'observa a la Figura 22.



Figura 22. Preparació en el motlle del fibrociment

Un cop omplert, es va deixar 24h amb uns pesos a la superfície abans de procedir el desmuntatge del motlle.

Un cop obtingudes 6 provetes (2 motlles) per cada un dels sis tractament de les fibres (és a dir, un total de 36 provetes), unes van ser estudiades a tracció (18 provetes), mentre que les altres 18 van sotmetre's a uns cicles envelliment accelerat i posteriorment a l'estudi de tracció.

Per tal de poder estudiar a tracció aquest fibrociment, primerament es van tallar cada una de les provetes en peces de 2cm d'allargada, una amplada d'1cm i un gruix de 4mm aproximadament, quedant la fibra envoltada per una petita capa de ciment (Figura 23. Proveta de fibrociment talla pel posterior anàlisi de tracció en aquesta peça, es va realitzar un tall en el ciment de la part superior de la peça, per tal de poder facilitar la introducció de la peça a la màquina.



Figura 23. Proveta de fibrociment talla pel posterior anàlisi de tracció

### **3.4.3.1. Cicles d'envelliment**

El procés d'envelliment accelerat consisteix una repetició successiva d'un seguit d cicles sec-humit que experimenta la proveta.

En el nostres cas, es van repetir fins a 7 cicles sec-humit. Aquest procés es realitza per tal simular que aquestes estan sotmeses a períodes de sol, pugues, vents i canvis bruscos de temperatura de la vida actual, per tal de poder valorar la durabilitat que tindrien.

El cicle sec correspon a deixar les peces durant 3 dies en una estufa a 60°C; mentre que en el cicle humit, aquestes són submergides durant 4 dies en aigua.

#### **4. Resultats i discussions**

##### **4.1. Resultats dels assajos amb matrius de ciment**

Per tal de poder determinar amb quina de les 7 matrius elaborades obteníem unes millors condicions, es van realitzar unes corbes de força-deformació gràcies a les dades enregistrades pel programa durant l'estudi de flexió i de compressió. A partir d'aquestes corbes i les mesures de les provetes, es va realitzar el càlcul de la tensió exercida per a cada una d'elles. Seguidament, per a cada repetició de la mateixa barreja, vam calcular el màxim, la mitjana i la desviació típica, i a partir d'aquests valors es va determinar la corba representativa de cada grup de provetes

##### **4.1.1. Resultats de l'estudi a flexió**

Primerament vam calcular la tensió de cada una de les provetes segons:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{FL}{4}}{\frac{1}{6}bh^2} = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Seguidament es va calcular el màxim, la desviació típica i la mitjana de cada una de les provetes, d'on es va extreure la mitjana de les tensions de cada una de les diferents mostres. Un cop realitzat això per totes les provetes segons les diferents concentracions i diferents dies, es va elaborar la Figura 24 on es mostren les mitjanes de les tensions de totes les provetes segons els dies de maduració i les concentracions.

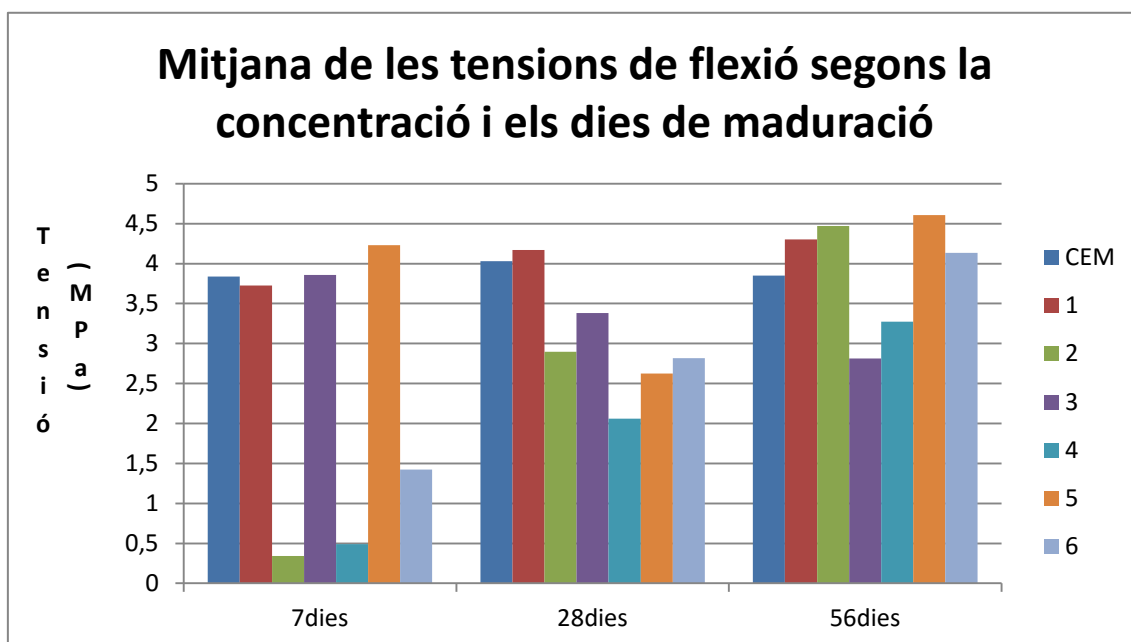


Figura 24. Mitjana de tensions segons les concentracions i dies de maduració del ciment estudiat a flexió

Observant el gràfic, podem extreure que la concentració nº 5, tant a 7 com a 56 dies és la que obté la tensió més elevada, però que a 28 dies és una de les que té menys tensió (2.5 MPa), per tant aquesta matriu no serà escollida degut a irregularitats durant la maduració de la mostra .

En canvi, la matriu nº 1 manté una tensió elevada des de el principi fins al final i amb augment. Comparant aquesta matriu amb la control (cem), observem que és la que des de l'inici té tensions semblants, i amb el transcurs dels dies va augmentant, fins a obtenir una tensió els 56 dies de casi 4.5MPa, sent així una de les que obté una tensió més elevada i amb més regularitat, ja que la matriu nº 5 obté una tensió superior a 4,5Mpa, però amb irregularitats als 28 dies, ja que obté un valor olt baix.

#### 4.1.2. Resultats de l'estudi a tracció

Vam estudiar la tensió de cada una de les peces segons:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Després vam calcular el màxim, la desviació típica i la mitjana de cada una de les provetes, per tal de poder extreure la mitjana de les tensions de cada una de les matrius. Un cop realitzat això per totes les provetes de les diferents concentracions i els diferents dies, es va elaborar la següent Figura 25 on és mostren les mitjanes de les tensions de totes les provetes segons els dies de maduració i les concentracions.

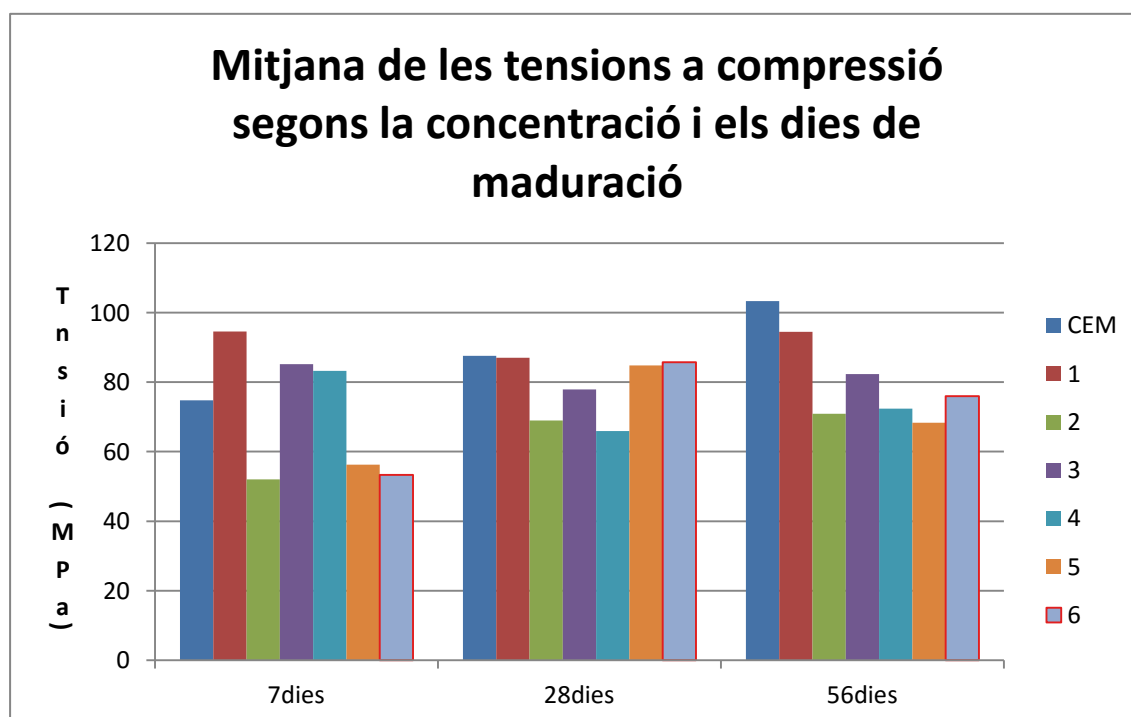


Figura 25. Mitjanes de les tensions segons les concentracions i els dies de maduració del ciment estudiat a compressió

En el gràfic podem observar que tant a concentració nº 1 com la control (cem) obtenen les tensions més elevades al llarg dels dies. D'altre banda, la matriu nº 5, que en l'assaig de flexió a 56 dies donava la millor tensió, en aquest assaig observem que es la pitjor, per tant quedarà descartada.

En canvi, la matriu nº 6, que en els estudis de flexió ha anat augmentant la tensió a mesura que passaven els dies, en l'estudi de compressió observem que també va augmentant, per tant lo podríem considerar com la tercera matriu amb més tensió després de la nº 1 i la control.



#### 4.2. Resultats Infrarojos

De les millor provetes de l'apartat anterior es van realitzar els IR, on es van obtenir les següents corbes, representades a la Figura 26. Aquesta correspon a les mostres analitzades després de 28 dies, ja que es el temps entremig del assaig. [10-11]

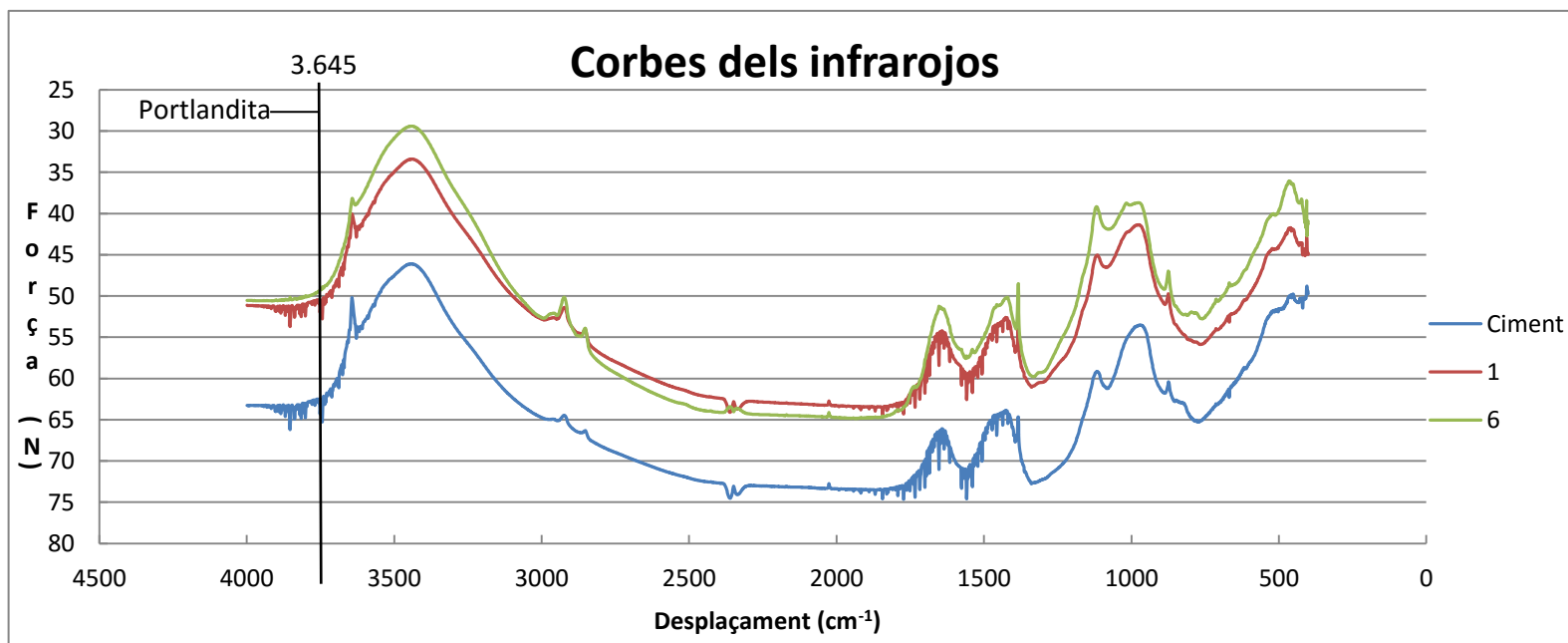


Figura 26. Corbes dels infrarojos

Observant el gràfic, i sabent que l'hidròxid de calç (portlandita) està situat al pic  $3.645\text{cm}^{-1}$  i que quan es tracta d'utilització de fibres vegetals volem que la seva presència estigui reduïda al màxim possible, podem determinar que la millor barreja és la n<sup>o</sup>6 en relació a la barreja de ciment, que és la mostra patró (sense substàncies putzolàniques) perquè té el pic més reduït.



Aquest resultat correspon amb la composició de les matrius, ja que la barreja nº6 té un percentatge superior de materials putzolànics (0,6%), fent que a una major presència d'aquestes determina una major reducció d'hidròxid de calç (portlandita).

Per altre banda, d'aquest gràfic podem extreure que tota aplicació amb més o menys percentatge de substàncies putzolàniques millora la reducció de l'hidròxid de calç, ja que la matriu nº 1 també conté un pic menor a la matriu només amb ciment.

Comparant els resultats obtingut dels assajos a flexió i compressió amb l'assaig dels infrarojos, obtenim que en els primer assajos la millor matriu és la corresponent a la nº1, mentre en l'altre assaig es la nº 6. Aquestes dues matriues es diferencien en el percentatge de substàncies putzolàniques i de ciment, sent aquests:

Taula 5. Percentatges dels components de les matrius amb resultats més bons

	<b>ciment</b>	<b>Fs</b>	<b>mk</b>
<b>1</b>	0,7	0,1	0,2
<b>6</b>	0,4	0,2	0,4

### 4.3. Resultats de l'assaig del fibrociment

#### 4.3.1. Sense envelliment

Un cop tallades les peces de fibrociment adequadament, es van col·locar en el DMA per tal de procedir a una força de tracció per calcular l'adherència màxima de la fibra a la matriu abans de trencar-se. De cada un dels 6 tipus diferents de fibrociment segons el tractament de les fibres es van obtenir tres provetes, donant un seguit de gràfiques observables a l'[Annexa](#)

A partir d'aquestes gràfiques i un seguit de càlculs realitzats i explicats també en aquest mateix annexa, es va obtenir una corba representativa per a cada fibrociment.

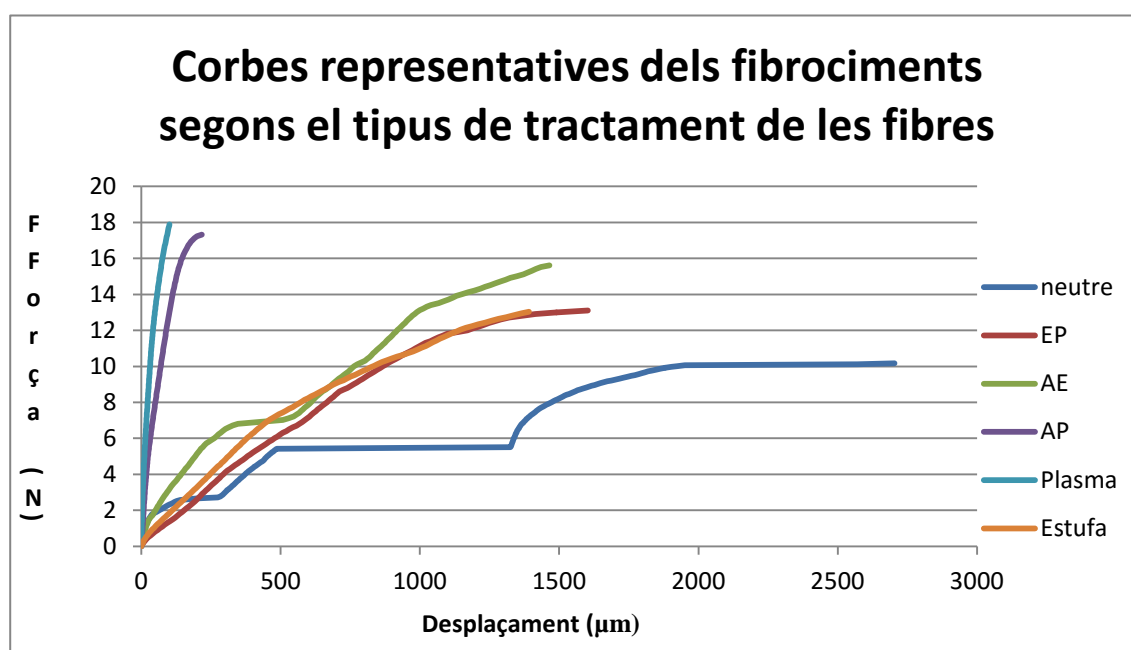


Figura 27. Corbes respresentatives dels fibrociments segons el tipus de tractament de les fibres

Segons aquesta figura, podem observar que el fibrociment més resistent és aquell que conte les fibres tractades amb plasma d'argó, seguit del tractament d'autoclau més planxa ja que obtenen una força superior a la resta.

#### 4.3.2. Amb envelliment

Segons Figura 28 podem observar que entre els 6 tipus de fibrociments sotmesos a un tractament d'envelliment accelerat, només es van poder estudiar 3.

Els fibrociments que fan referència als tractaments de les fibres amb estufa (E), estufa i planxa (EP) i neutre (N) són els tractaments que després de realitzar-los els cicles sec-humit, les provetes no van ser aptes per poder analitzar-se en el DMA. Per tant, donant a entendre, que aquests tres tractament de les fibres no són bons ja que no suporten cicles sec-humit, per tant, al llarg del temps serien fibrociments perjudicial en la vida real ja que no obtindríem durabilitat.

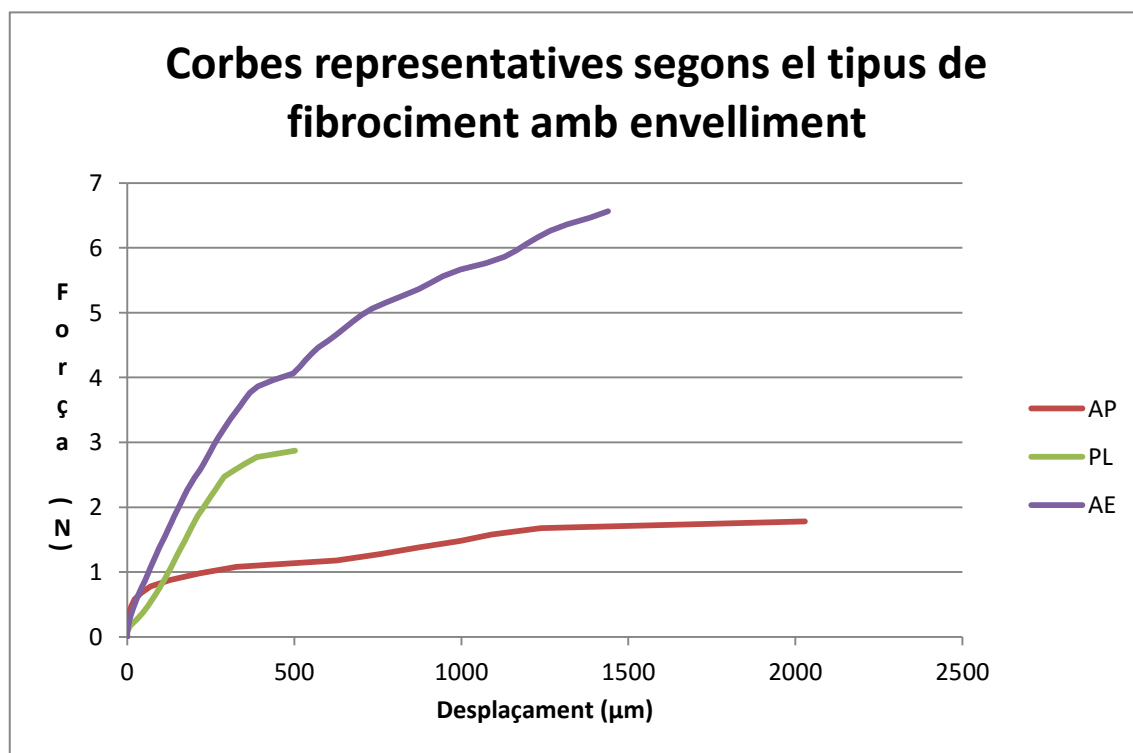


Figura 28. Corbes representatives segons el tipus de fibrociment amb enelliment

Per altre banda, dels fibrociments que si s'han pogut analitzar, podem observar, que el que obté una força més elevada és aquell que conté un tractament de les fibres amb Autoclau més estufa (AE), ja que arribem a obtenir una resistència aproximada a 7N, mentre els altres dos fibrociments no superen els 3N.

Taula 6. Resum del la força màxima exercida a tracció dels fibrociments segons el tractament de la fibra

Tractaments	Sense envelliment	Amb envelliment
<b>Estufa</b>	13,77	-
<b>Autoclau + Estufa</b>	12,85	6,56
<b>Autoclau + Planxa</b>	10,73	2,36
<b>Neutre</b>	10,51	-
<b>Plasma</b>	14,35	2,87
<b>Estufa + Planxa</b>	11,96	-

Observant la Taula 6 podem veure que dels fibrociments sense envelliment el més resistent és el de Plasma, mentre amb envelliment el més resistent és l'autoclau + estufa.

Així mateix, també observem que aquells fibrociments sense envellir que generen més resistència (plasma, Estufa) un cop envellits són molt poc resistents o ni s'han pogut avaluar, donant a entendre que aquests tractaments generen molta resistència inicial, però després no tenen durabilitat en el temps. D'altre banda, aquells que sense envellir donen resistències inferior, un cop envellits tenen durabilitat, sent així tractament amb poca resistència però més durabilitat en el temps.

Per altre banda, observem que tot tractament aplicat a les fibres millora la seva força, ja que les fibres control (neutre) són les que obtenen el valor més baix.

Finalment, comparant els resultats dels fibrociments amb envelliment accelerat o sense, determinem que el millor tractament de la fibra és l'aplicació d'autoclau i estufa, ja que amb aquest tractament hem obtingut una resistència bastant elevada en el fibrociment sense envellir, i en el fibrociment envellit ha sigut el tractament que més resistència ha obtingut.



## 5. Conclusions

Finalment podem aprovar amb aquest estudis realitzats, que la creació de fibrociments amb fibres vegetals seria possible, però s'hauria de continuar estudiat ja que hem obtingut una disminució de l'hidròxid de calç amb l'ús de substàncies putzolàniques, però alhora obtenim una disminució de la tensió. I d'altra banda, encara no estan resolts els problemes de variació de volum de les fibres, afectant així l'adhesió fibra-matriu, tot i que podem descartar alguns tractaments no útils per millorar aquest aspecte.

### 5.1. Matriu de ciment

Segons els resultats dels estudis de tensió i compressió, i l'anàlisi del infrarojos, podem determinar que les millors matrius de ciment són les corresponents a la n<sup>o</sup> 1 i la n<sup>o</sup>6, diferenciant-se entre elles el percentatge de substàncies putzolàniques (0.3% i 0.6%). Respecte a la tensió, els 56 dies la matriu n<sup>o</sup> 1 té una tensió superior, mentre que respecte a la concentració d'hidròxid, la que conté menys quantitats és la matriu n<sup>o</sup> 6.

### 5.2. Fibrociment

Primerament, en quant als tractaments de les fibres podem concloure que tota aplicació d'un tractament, millora la seva força. Així, s'ha pogut observar que els tractaments d'estufa i estufa + planxa no són adients, ja que després dels cicles d'envelliment, no han pogut ser estudiats degut a la seva degradació.

Per tant, podem concloure que el millor fibrociment ha sigut l'elaborat per la fibra tractada amb autoclau i estufa amb la matriu n<sup>o</sup> 1, ja que suporta una força superior a la resta, per tant, tindrà una adhesió fibra-matriu millor.

## 6. **Bibliografia**

[1] Armstrong, Thomas. *The cement industry in figures: An overview of global cement sector trends*. International cement review, 2012.

[2] Miravete, Antonio. Zaragoza 1994. *Los nuevos materiales en la construcción*. Editado por Centro Politecnico Superior, Universidad de Zaragoza. 2ª edicion

[3] Galan Gutierrez, Luis; Amador Blanco, Juan José. *Cementos*.

[4] Orús, Félix. 1973. *Materiales de construcción*. Editorial Dossat S. A, Madrid. 7ª edicion.

[5] Fomento, D E. n.d. *RC-08 Instrucción Para La Recepción de Cementos*.

[6] Claramunt Blanes, Josep. *Utilització de fibres vegetals per a l'elaboració de morters de ciment d'altas prestacions (SHCC)*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria de la construcció. Barcelona, 2011. 299fulles.

[7] Sabanes Hernández, María Alethia. *Uso de no Tejidos de fibras vegetales en matrices de cemento para materiales de construcción*. Máster en sostenibilidad. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2013. 60fulles.

[8] Bellido, Luis Lopez. 2003. *Cultivos Industriales*. Editado por Ediciones Mundi-Prensa. 1º edicion.

[9] Graus, Ramon. Barcelona, 1998. *Manual per a la diagnosi i el tractament de l'amiant a a construcció*. Editat per Col·legi d'Apareadors i Arquitectes Tècnics de Barcelona. 1ª edició.



[10] Fernandez-Carrasco, Lucía; Claramunt, Josep; Ardanuy, Mònica. *Autoclaved cellulose fibre reinforced cement: effects of silica fume*. Construction and Building materials, 2014.

[11] Theophanides, Theophile. 2012. *Infrared Spectroscopy: Materials science, engineering and technology*. Editat: Intech

### 6.1. **Bibliografia complementaria**

- Stulz, Roland; Mukerji, Kiran. 1981. *Materiales de construcción apropiados: Catálogo de soluciones potenciales. Revisado. Edición Ampliado*. Editat per: SKAT & IT Publication.
- Barr, B. I. G. *Formigons Fibres Compendiu*. University of Wales college of Cardiff, UK.
- 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.
- 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.



- Holmer Savastano, Júnior. *Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo*. Tese apresentada a Concurso de Livre-Docência. Departamento de Engenharia de construção civil, escola politécnica da universidade de Sao Paulo. Sao Paulo, 2000. 152fulles.
- Mohr, B.J. ; Biernacki, J.J; Kurtis, K.E. 2007. *Supplementary cementitious materials for mitigatint degradation of kraft pup fibre-cement composites*. Editat per: ELSEIVER.
- *IECA: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones* [en línea]. Disponible a: [https://www.ieca.es/default.asp?id\\_cat=3](https://www.ieca.es/default.asp?id_cat=3)
- Bloggeer: *Fibroemento. Que es el fibroemento. Características*. [en línea] Disponible a: <http://elfibroemento.blogspot.com.es/2011/08/que-es-el-fibroemento.html>
- Red textil Argentina. *Producción de Fibra de Line*. [en línea]. Disponible a: [http://redtextilargentina.com.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=211&Itemid=1](http://redtextilargentina.com.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=211&Itemid=1)
- Universiat Politècnica de Catalunya. *Research Equipment at CRnE: Fourier Transform Infrared spectroscopy*. [en línea]. Disponible a: <http://www.upc.edu/crne/infrastructure>
- *Metakaolin.info*. [en línea]. Disponible a: <http://www.metakaolin.info/>

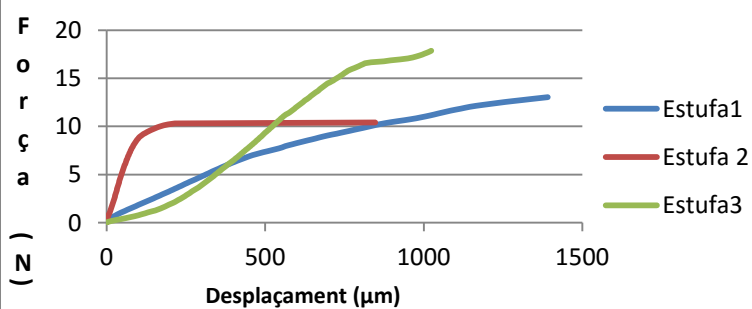


- In, SlideShare. *Universidad privada del Norte*. [en línia]. Disponible a:  
<http://es.slideshare.net/alexisjhosepbarbozanavarro/la-caolinita>
- *Capacidad puzolánica*. [en línia, pdf]. Disponible a:  
[http://www.uclm.es/organos/vic\\_empresas/pdf/catedras/jornada/4b.pdf](http://www.uclm.es/organos/vic_empresas/pdf/catedras/jornada/4b.pdf)
- Monografias.com. *Características e historia del cemento*. [en línia].  
Disponible a:  
<http://www.monografias.com/trabajos94/caracteristicas-historia-del-cemento/caracteristicas-historia-del-cemento.shtml>
- Monografias.com. *Evolución històrica de los materiales de construcción para viviendas (Venezuela)*. [en línia] Disponible a:  
<http://www.monografias.com/trabajos94/evolucion-historica-materiales-construccion-viviendas/evolucion-historica-materiales-construccion-viviendas.shtml>

## Annexa

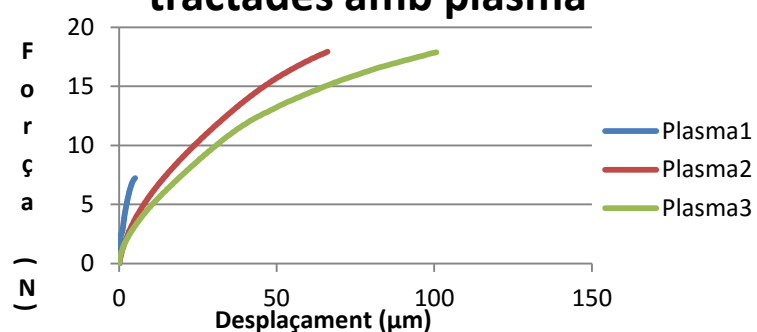
En aquest annexa es mostren les gràfiques obtingudes per cada un dels fibrociments segons els tractaments de les fibres, un cop estudiats a tracció. A partir d'aquestes gràfiques, es van calcular els màxims de cada una de les provetes (observables a les taules de sota els gràfics), i a través de la mitjana d'aquests és va seleccionar la proveta més representativa del tractament (marcat amb vermell a la taula). Un cop seleccionada la corba representativa de cada tractament, es va elaborar un únic gràfic per tal de poder comparar els fibrociments segons el seu tractament. (Figura 27).

### Fibrociments amb fibres tractades a l'estufa



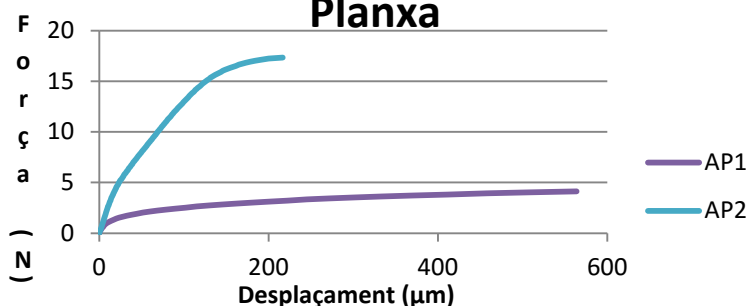
max estufa 1	max estufa 2	max estufa 3	MITJ. MAXIM
13,036	10,406	17,856	13,766

### Fibrociment amb fibres tractades amb plasma



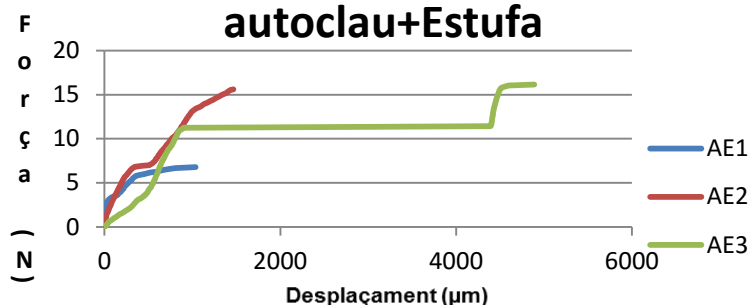
màx plasma 1	màx plasma 2	màx plasma 3	MITJ. MAXIM
7,223616	17,93349	17,89631	14,3511387

### Fibrociment amb fibres tractades amb Autoclau+ Planxa



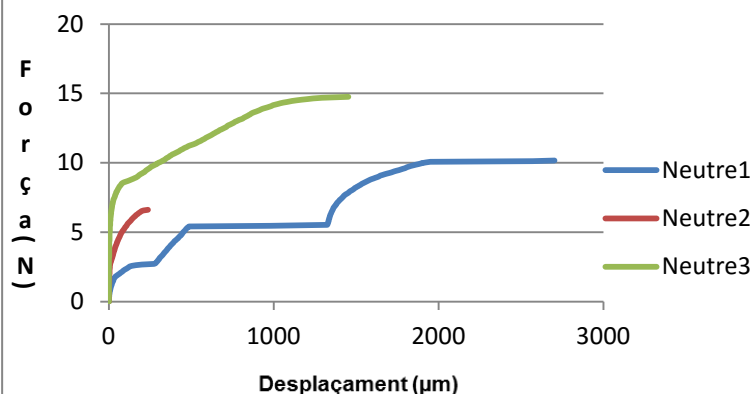
màx AP 1	màx AP 2	MITJ. MAXIM
4,125998	17,3263	10,726149

### Fibrociment amb fibres tractades amb autoclau+Estufa



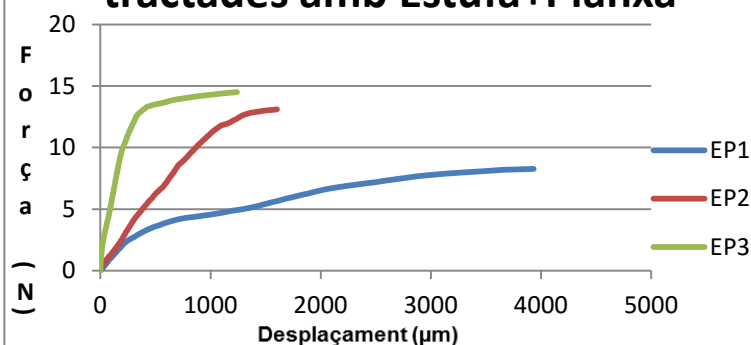
max AE 1	max AE 2	max AE 3	MITJ. MAXIM
6,776	15,616	16,146	12,846

### Fibrociment control



max neutre 1	max neutre 2	max neutre 3	MITJ. MAXIM
10,169	6,609	14,74379	10,507

### Fibrociment amb fibres tractades amb Estufa+Planxa



max EP 1	max EP 2	max EP 3	MITJ. MAXIM
8,276	13,106	14,496	11,960

Aquestes gràfiques són dels fibrociments sense envellir, ja que dels fibrociments envellits vam obtenir directament un sol gràfic, ja que per cada fibrociment amb un tractament diferents només vam poder estudiar una única proveta.