

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Arquitectura Tècnica

**Títol:** REVISIÓ DE LA METODOLOGIA D'ASSAIG A TRACCIÓ DE FORMIGÓ AMB FIBRES NATURALS

**Document:** Treball final de grau

**Alumne:** Laura Campins Garcia

**Tutor:** Joan Llorens Sulivera

**Departament:** Arquitectura i Enginyeria de la Construcció

**Àrea:** Construccions Arquitectòniques

**Convocatòria (mes/any):** Juny 2019

# ÍNDEX

1.	INTRODUCCIÓ .....	2
2.	OBJECTIUS.....	4
3.	ESTAT DE L'ART .....	6
4.	TIPUS ASSAIGS .....	11
4.1	ASSAIG A COMPRESSIÓ.....	11
4.2	ASSAIG BARCELONA .....	12
4.3	ASSAIG A TRES PUNTS O DE CÀRREGA CENTRADA.....	15
4.4	ASSAIG A QUATRE PUNTS O DE CÀRREGA A TERÇOS.....	19
5.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	21
5.1	PREPARACIÓ MATERIALS .....	21
5.2	FABRICACIÓ PROVETES.....	29
5.3	PREPARACIÓ UTILLATGE .....	36
5.3.1	ASSAIG COMPRESSIÓ .....	36
5.3.2	ASSAIG BARCELONA.....	36
5.3.3	ASSAIG A TRES PUNTS O DE CENTRADA.....	37
5.3.4	ASSAIG A QUATRE PUNTS DE CÀRREGA A TERÇOS .....	38
5.4	REALITZACIÓ ASSAIG .....	39
5.4.1	ASSAIG COMPRESSIÓ .....	39
5.4.2	ASSAIG BARCELONA O DOUBLE PUNCH TEST (DPT).....	40
5.4.3	ASSAIG A TRES PUNTS O DE CÀRREGA CENTRADA .....	41
5.4.4	ASSAIG A QUATRE PUNTS O DE CÀRREGA A TERÇOS .....	43
5.5	RESULTATS .....	44
5.5.1	RESULTATS ASSAIG COMPRESSIÓ.....	44
5.5.2	RESULTATS ASSAIG TRACCIÓ.....	45
5.5.3	DISCUSSIÓ DELS RESULTATS .....	50
6.	CONCLUSIONS .....	54
7.	REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES .....	57

# 1. INTRODUCCIÓ

El formigó tradicional pot definir-se, en la seva concepció més simple, com a un material de construcció constituït per la mescla d'un aglomerant hidràulic, ciment, aigua i pedres de diferent mida, el que anomenem com àrids. El formigó en massa ja s'utilitzava en les construccions de l'imperi romà.

Durant les últimes dècades, la indústria de la construcció s'ha anat desenvolupant de manera que no només els càlculs i les tècniques han millorat, sinó que també el propi formigó ha patit canvis. Avui en dia, gràcies al desenvolupament tecnològic del formigó, a aquesta composició bàsica s'han anat afegint nous components, en la seva majoria d'origen químic, amb l'objectiu de millorar alguna de les seves propietats.

A efectes de càlcul estructural, el formigó té baixa resistència i un comportament fràgil a tracció. Amb la introducció de fibres dins la matriu de formigó, no augmenta significativament la resistència a tracció del formigó, almenys en les quantitats habituals, però sí millora el seu comportament fràgil, a més a més de millorar altres propietats del formigó, com la resistència a impacte o la durabilitat entre d'altres, controlant el seu procés de fissuració i donant al material una certa capacitat d'absorbir tensions de tracció una vegada ha fissurat, propietat coneguda com tenacitat a tracció.

El formigó reforçat amb fibres pot definir-se com un formigó fabricat a partir de ciment hidràulic, aigua i àrids de diferents mides, al qual s'afegeix un reforç a partir de fibres discretes, és a dir, curtes, separades i distribuïdes uniformement a l'interior de la matriu i, generalment, orientades a l'atzar. El concepte de reforç amb una sèrie d'elements discontinus i discrets en materials fràgils i de baixa resistència a tracció no és una novetat: la utilització de palla per reforçar l'atovó o l'ús de cabells de cavall pel reforç del guix són algunes aplicacions d'aquesta tècnica.

Existeixen diferents tipus de fibres que s'utilitzen per reforçar morters o formigons. Les sintètiques orgàniques, com són les de propilè o el carbó; sintètiques inorgàniques, com les d'acer o vidre; naturals orgàniques, com la cel·lulosa, el sisal o el cànem; naturals inorgàniques, com és l'amiant.

La tenacitat és la propietat que diferencia els formigons reforçats amb fibres respecte als no reforçats, dels s'han incrementat els estudis i investigacions al voltant de la forma de poder caracteritzar-los, destacant el seu comportament post-fissuració, és a dir, una vegada el material ha fissurat, ja que és la propietat de major interès. La tenacitat es considera com la seva capacitat d'absorció d'energia que és tradicionalment calculada com l'àrea sota la corba càrrega-deformació obtinguda experimentalment per a qualsevol tipus d'assaig: compressió, tracció,

flexió, tallant o torsió. En general, les tipologies d'assaig en les que la mostra d'assaig estan sotmeses a esforços de tracció, tracció directe i flexotracció principalment, són les més utilitzades. La majoria d'aquests procediments requereixen màquines d'assaig tecnològicament molt desenvolupades, equipades amb dispositius servohidràulics i de control per bucle tancat, aspectes que l'encareixen limitant, moltes vegades, la seva adquisició a centres universitaris i d'investigació que disposen d'ajuts suficients per a la seva compra.

## 2. OBJECTIUS

L'objectiu d'aquest projecte és estudiar els diferents assaigs a tracció del formigó reforçat amb fibres naturals. Per fer-ho, es fa una recerca dels assaigs més freqüents utilitzats en el món científic i les normatives que fan referència.

El segon objectiu és reproduir aquest assaig al laboratori per tal de comprovar si la metodologia utilitzada és correcte. Es proposa repetir un assaig dels proposats en la literatura i validar-ho a través dels resultats.

Per assolir el objectius esmentats, és necessari desenvolupar una `sèrie de tasques:

- Recerca dels diferents assaigs de formigó existents.
- Fer una recerca àmplia del assaigs que es porten a terme per estudiar la resistència a tracció del formigó. Per fer aquesta recerca primer es necessita saber quins són els assaigs més habituals.
- Per saber quins són els assaigs més habituals, es fa una recerca d'articles científics on s'estudiï o es portin a terme els assaigs anteriors. En aquest moment no importa quin tipus de formigó utilitzen o quin tipus de fibres utilitzin, en cas que sigui així.
- En determinen les variables que necessita cada assaig, com són les dimensions, el número de provetes a realitzar, quines normatives o estudis regulen aquests assaigs, tipus d'equip a fer servir durant l'assaig i utilitatge necessari, velocitats de càrrega, quan es dona l'assaig per acabat, quins valors són els gravats, etc.
- Del llistat anterior, es fa una tria per identificar quins són regulats per normes europees o espanyoles i, en cas que no sigui així, tornar a fer una recerca per trobar l'equivalent a l'estat espanyol o europeu.
- Començar a fer una tria dels articles que fabriquin formigó amb fibres naturals, assagin el formigó mitjançant els procediments més freqüents i regulats per normes nacionals.
- Fer una recerca d'articles que compleixin només els requisits anteriors en cas que no es tingui molts exemples a seguir.
- Dels articles finals, fer un anàlisi i estudi de quin article es vol mimetitzar. Per escollir l'article, es necessiten paràmetres importants com referències o dades de com fabricar el formigó, de les mides de les provetes, referències bibliogràfiques completes per tal d'ampliar la informació donada, informació de quins assaigs es fan servir, dels resultats finals i de les conclusions que s'arriba.

Un paràmetre important és trobar si els mateixos autors tenen altres articles publicats, ja que a vegades hi ha articles més complets que altres essent dels mateixos autors.

Difícilment un article reunirà tots els paràmetres per recrear tota la metodologia. Per això es recorrerà als articles trobats prèviament en cas que estudiïn o expliquin paràmetres que l'article escollit no explica.

- Finalment es decidirà la campanya experimental a realitzar definint els tipus d'assaigs a fer, el número de provetes per assaig i les seves mesures, si es necessita provetes de control. El formigó es fabricarà seguint la dosificació establerta a l'article i l'abocat i curat seguint les normes necessàries.
- Es procedirà a executar els assaigs i, una vegada completats, a l'anàlisi. Durant l'anàlisi es validarà o no la metodologia comparant els resultats obtinguts amb els de l'article. En cas que es validi, és quan es podrà fer una comparació de resultats entre assaigs.
- Fer les recomanacions que es creguin oportunes.

### 3. ESTAT DE L'ART

El formigó en massa és un material fràgil i amb una escassa resistència a tracció. És per això que es combina amb altres materials dúctils per a conferir-li una major resistència a tracció.

A efectes de la EHE (Instrucció del Hormigón Estructural, 2008[1]), el formigó reforçat amb fibres es defineix com aquell formigó que inclou en la seva composició fibres curtes, discretes i aleatòriament distribuïdes en la seva matriu. Els formigons reforçats amb fibres estan formats essencialment per un conglomerat hidràulic, generalment ciment pòrtland, àrids, aigua i fibres. Però aquesta matriu de formigó canvia segons la dosificació de cada material, i amb el canvi de la dosificació, també canvien les propietats mecàniques finals del formigó.

La incorporació de fibres a la matriu del formigó pot ser per raons estructurals o no estructurals. En el primer cas, les fibres aporten una millora en ductilitat i per tant es millora l'energia de fractura. En el segon cas, l'objectiu de l'addició de fibres és per aconseguir una millora en la resistència al foc, a l'abradió, a la fissuració per retracció, a impacte, entre d'altres.

Així doncs en funció de les propietats que se li vulgui atribuir al formigó reforçat amb fibres, aquestes hauran de ser d'un material i dimensions determinats. En quant al material, els tres grans grups són les fibres d'acer, polimèriques i orgàniques. Totes elles es defineixen per la seva longitud, diàmetre equivalent i esveltesa. Al llarg dels anys, diferents articles científics han estat escrits estudiant el comportament del formigó, sent el formigó diferent en cada estudi ja que, com s'ha dit anteriorment, existeixen múltiples variables que fan el formigó diferent.

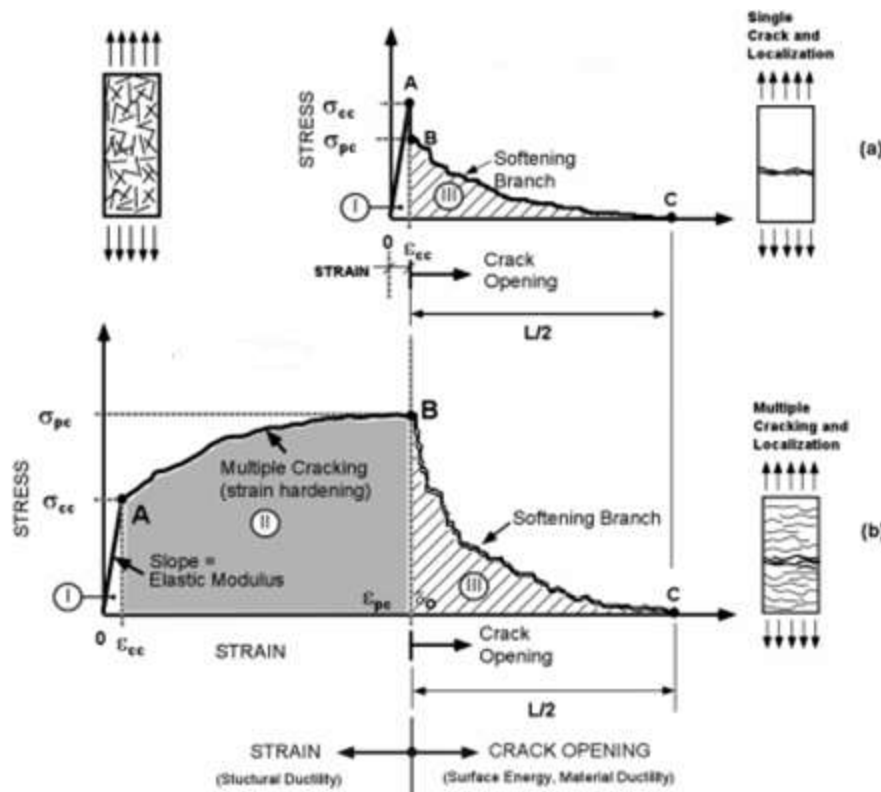
Quan un formigó sense reforç està subjecte a una tensió de tracció, aquest trenca de manera fràgil i el mode de trencament és per mitjà d'una sola fissura. En canvi, quan es forma una fissura en un formigó reforçat amb fibres, les fibres que puntegen la fissura aporten una certa resistència a tracció i permeten que el formigó es comporti de manera diferent a la d'un formigó en massa.

Aquest comportament pot ser de deformació amb enduriment (strain hardening) o de deformació amb reblaniment (strain softening) en funció del volum de fibres que tingui i de si la sol·licitació és de tracció uniaxial o bé de flexotracció.

Pel que fa als assaigs, existeixen varis. L'assaig de tracció directe s'utilitza per caracteritzar el comportament del FRF en tracció uniaxial. L'assaig de tracció uniaxial és considerat universalment com el mètode més directe per obtenir les propietats de fractura de materials fràgils, però és un assaig difícil de realitzar pels seus inconvenients en la subjecció de la proveta i la dificultat d'assegurar l'estabilitat de l'assaig. Els problemes i dificultats que apareixen en els assaigs uniaxials, descarten el seu ús rutinari, essent el seu ús exclusiu en l'àmbit científic. Com a conseqüència,

s'han proposat d'altres assaigs menys directes però també més simples. D'aquests mètodes indirectes destaca pel seu ús i simplicitat l'assaig Brasiler.

Quan un formigó reforçat amb fibres convencional se'l sotmet a una sol·licitació de tracció uniaxial, experimenta una deformació. Aquest comportament està caracteritzat per una branca elàstica lineal (I), regida pel mòdul de Young, en la qual el formigó està sotmès a una tracció sense que fissuri.



Aquesta branca finalitza quan la matriu del formigó fissura per primera vegada (punt A) i s'assoleix la tracció de primera fissura ( $\sigma_{cc}$ ) anomenada també resistència a primera fissura o límit de proporcionalitat (limit of proportionality, LOP).

Un cop la matriu ha fissurat la tensió disminueix fins a la tensió de post-fissuració ( $\sigma_{cp}$ ). No apareix cap més fissura perquè les fibres que causen la primera fissura no són capaces de suportar cap increment de tracció. S'inicia la branca de deformació amb reblaniment (III) on es localitza tota la deformació en la única fissura apareguda, la tensió va disminuint, l'obertura de fissura va augmentant i s'arriba al punt C moment en el qual el formigó ja no admet més tensió.

L'assaig de flexotracció és, sens dubte, l'assaig més utilitzat per a la caracterització dels formigons reforçats amb fibres. A l'assaig una proveta de forma prismàtica és carregada a flexió registrant-se simultàniament amb la càrrega, com a paràmetres de sortida, la fletxa de l'element o l'obertura de fissura segons la configuració de l'assaig. Tot i ésser un assaig que requereix d'un equipament



sofisticat, la seva execució no és tan crítica com a l'assaig de tracció directe, per la qual cosa el seu ús està més generalitzat com a mètode de control dels materials.

Com s'ha comentat abans, per trobar l'article a mimetitzar per validar o no la metodologia d'assaig a tracció, es necessita d'una recerca. Alguns dels articles científics que formen part d'aquesta recerca són:

- H. Goiaz, *Quality Evaluation Tests for Tensile Strength of Reactive Powder Concrete*, vol. 30. 2018[2]. compara els diferents assaigs per determinar la resistència a tracció del formigó reactiu. Els assaigs que fan servir són els de compressió, el de flexió a tres punts, splitting test, tracció directe i l'assaig Barcelona o de doble punxonament.
- Merta y E. K. Tschegg, «Fracture energy of natural fibre reinforced concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 991-997, 2013.[3] que estudia la resistència a tracció del formigó reforçat amb fibres de cànem, amb typha i rostolls de blat. Les provetes de mesures 150x150x150mm són assajades mitjançant l'assaig splitting test.
- Mechanics, «Direct Tensile Strength Measurement of Concrete Mohammad Iqbal Khan», pp. 9-14, 2012.[4] compara els resultats del formigó a tracció directe amb els resultats de tracció indirecte mitjançant provetes de dimensions 76x76x305mm amb entalla. La norma que fa servir per la fabricació de les provetes és la ASTM (American Society for Testing and Materials).
- H. Wen, D. Ph, M. Asce, S. Bhusal, y X. Li, «Double Punch Test : A Simple Performance Test to Evaluate the Fatigue and Double Punch Test : Simple Performance Test to Evaluate the Fatigue and Rutting Potential of Asphalt Concrete», n.º November 2014, 2012[5] estudia la fatiga del formigó asfàltic mitjançant l'assaig de doble punxonament.
- R. V Balendran, F. P. Zhou, A. Nadeem, y A. Y. T. Leung, «Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete», vol. 37, pp. 1361-1367, 2002. [6] estudia la millora de les propietats mecàniques del formigó amb la inclusió de fibres dins la matriu de formigó i com aquestes propietats canvien depenent del tipus de formigó i les mesures de les provetes. Els assaigs que porta a terme són els de compressió, l'assaig de quatre punts i l'assaig de tres punts.
- Y. Dong-suk, P. Sun-Kyu, y W. N. Kenneth, «Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams», *Compos. Struct.*, vol. 1, n.º 1, pp. 497-508, 2009, [7] es fa una recerca per obtenir materials de construcció més barats utilitzant fibres naturals. Estudien el formigó amb fibres de cànem al ser aquest una possible font de recursos renovables. Per estudiar el comportament mecànic d'aquest formigó, porten a terme l'assaig de quatre punts seguint la norma IS (Indian Standard).
- B. Çomak, A. Bideci, y Ö. Salli, «Effects of hemp fibers on characteristics of cement based

- mortar», vol. 169, pp. 794-799, 2018.[8] estudia diferents ratis i diferents llargades de fibres naturals dins la matriu de morter i sotmet les provetes a diferents mecànics com són el de compressió i el de tracció. Aquest últim mitjançant l'assaig de flexió i l'assaig de tracció directe.
- A. Alam y K. Al, «Shear strengthening of reinforced concrete beam using natural fibre reinforced polymer laminates», *Constr. Build. Mater.*, vol. 162, pp. 683-696, 2018 [9] investiga si un formigó amb una dosificació alta de fibres naturals és possible per crear estructures de formigó reforçades amb una alta resistència a l'esforç tallant. L'estudi es basa en l'assaig a quatre punts de formigó reforçat amb diferents fibres naturals com ara el kenaf, el jute o corda i diferents tractaments químics per cada fibra.
  - K. Sandin, C. Nilsson, P. Brigitte, y D. Bruijn, «Mechanical properties of lime – hemp concrete containing shives and fibres», vol. 103, pp. 474-479, 2009. [10] proposa la utilització de llavors i fibres de cànem per fabricar un material de construcció de recursos renovables i pur, des del punt de vista de la agricultura. L'estudi es basa en determinar les propietats mecàniques d'aquest nou material com són les propietats a compressió, les resistències a tracció, l'absorció de l'aigua i la resistència al gel.
  - D. Sedan, C. Pagnoux, A. Smith, y T. Chotard, «Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement : Influence of the fibre / matrix interaction», vol. 28, pp. 183-192, 2008[11] estudia els resultats físics i químics de la interacció de fibres de cànem dins la matriu de formigó i de la importància dels tractaments previs a les fibres.
  - S. C. Malatesta, A. A. De Cea, C. M. Borrell, M. C. Contreras, U. Técnica, y F. Santa, «Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo barcelona) », vol. 24, pp. 119-140, 2009[12] determina les propietats mecàniques del formigó reforçat amb fibres mitjançant l'assaig Barcelona, argumentant que els assaigs de tracció directe són difícil d'executar i, generalment, es necessita maquinària que no es disposa als laboratoris comuns.
  - E. Awwad, B. S. Hamad, y H. Khatib, «Sustainable concrete using hemp fibres», n.º May 2016, 2012 [13] es centra en la fabricació de formigó amb fibres naturals per comprovar que un material sostenible és possible. Porta a terme provetes cúbiques, cilíndriques i bigues amb diferents ratis de fibres i diferents reduccions d'àrids. Per definir les propietats mecàniques, porta a terme els assaigs de tres punts i el de compressió utilitzant la norma ASTM de referència.
  - I. O. P. C. Series y M. Science, «Effect of kenaf fiber in reinforced concrete slab», 2018[14] basa l'estudi en el formigó reforçat amb kenaf fabricant provetes en forma de llosa de diferents gruixos. Aquestes provetes s'assagen a quatre punts i a compressió.
  - C. Molins, Æ. A. Aguado, y Æ. S. Saludes, «Double Punch Test to control the energy

dissipation in tension of FRC ( Barcelona test )», pp. 415-425, 2009[15] utilitza les fibres de cànem per estudiar si la possibilitat d'utilitzar recursos renovables per fabricar formigó és possible. Per fer-ho fabrica formigó amb diferents ratis de fibres i sotmet les provetes a l'assaig de quatre punts d'acord amb la norma *Indian Standard*.

Com s'ha comentat anteriorment, l'objectiu principal d'aquest treball és mimetitzar l'article científic més complet pel que fa a la fabricació de formigó amb fibres i a l'estudi del comportament a tracció del formigó amb fibres de naturals. Dels articles analitzats durant la recerca, el més complet i que es mimetitzarà, és l'article «Properties of hemp fibre reinforced concrete composites», vol. 37, pp. 497-505, 2006.[16]. Per tal de mimetitzar-lo s'adaptaran els materials als existents al nostre país i s'equipararà la normativa americana que utilitzen a la europea.

Awwad, en aquest article, fa un anàlisi del formigó reforçat amb fibres variant el rati de fibres dins el formigó i fent una reducció d'àrids per comprovar si un formigó més lleuger és possible mantenint les propietats mecàniques desitjades. Per analitzar les propietats mecàniques, porta a terme l'assaig a compressió, l'assaig de tres punts, l'assaig de tracció directe i els assaigs per determinar el mòdul de l'elasticitat, la conductivitat tèrmica i la densitat. Tots aquests assaigs es porten a terme seguint les normes ASTM.

Per tant, agafant aquest article com a referència, es seguirà la dosificació del formigó utilitzada, s'escollirà el rati de fibres i la reducció de graves que obtingui més bons resultats, i s'assajaran les provetes seguint l'assaig de tres punts tal com es fa a l'article. Per tal de poder fer una comparació de resultats, es realitzaran altres assaigs a tracció a part del de tres punts..

## 4. TIPUS ASSAIGS

Els assaigs més freqüents per determinar la resistència a tracció del formigó són els assaigs a tracció indirecte. Els més comuns i més utilitzats són el de càrrega centrada (conegut també com a assaig a 3 punts) i assaig que es porta a terme a l'article que es té com a referència, el de càrrega a terços (conegut també com assaig a 4 punts) i l'assaig Barcelona. Aquests són els assaigs que es porten a terme en aquest treball.

A més es realitza l'assaig a compressió, un assaig més senzill que, a part de determinar la resistència a compressió del formigó, també ens serveix per relacionar el formigó entre diferents amassades.

### 4.1 ASSAIG A COMPRESSIÓ

La UNE-EN 12390-3[17] especifica el mètode per la determinació de la resistència a compressió per provetes d'assaig de formigó. Les provetes poden ser cúbiques o cilíndriques o altres mesures sempre i quan compleixin les especificacions d'acord amb les normes EN 12350-1 o EN 12390-2.

L'objectiu de l'assaig és aplicar càrrega fins arribar a la ruptura mitjançant una màquina de compressió, d'acord amb la norma UNE-EN 12390-4. Durant aquest procés es registren la màxima càrrega i es calcula la resistència a compressió del formigó.

El procediment, segons la normativa, és netejar els plats de càrrega de la màquina, eliminant restes de formigó o altres materials d'assaigs anteriors. Es col·loca la proveta a dins la màquina, entre els plats de càrrega i es centra de manera que la càrrega s'apliqui perpendicularment a la direcció del formigonat.

Es selecciona una velocitat de càrrega constant dins l'interval de 0,6-0,2N/mm<sup>2</sup>s. S'aplica una càrrega inicial i es va incrementant, a una velocitat constant, fins que la proveta no pugui suportar més càrrega i es trenqui. Es registra la càrrega màxima iniciada en kN.

La norma UNE-EN 12390-3 facilita exemples de ruptures de provetes satisfactòries i de no satisfactòries.

La resistència a compressió es calcula de la següent manera:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

On  $f_c$  és la resistència a compressió en N/mm<sup>2</sup>

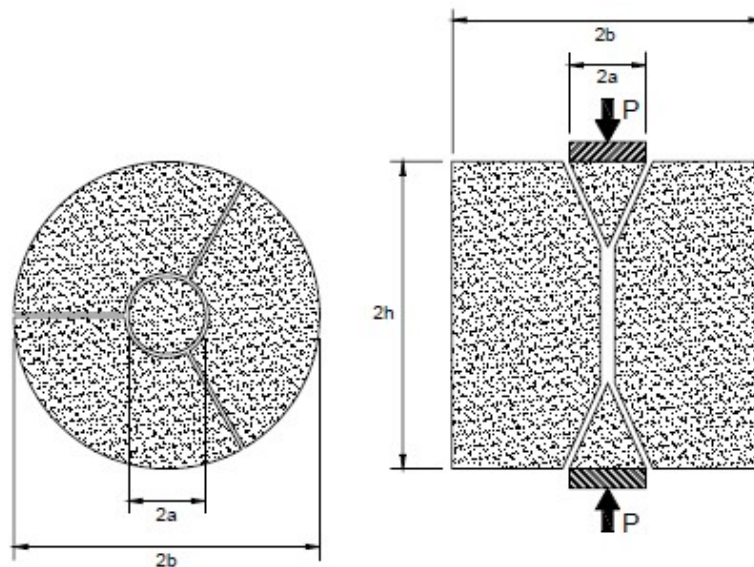
$F$  és la càrrega màxima de ruptura en N

$A_c$  és l'àrea transversal de la proveta sobre la que actua la força a compressió.

## 4.2 ASSAIG BARCELONA

L'assaig de doble punxonament, actualment regulat per la norma UNE 83515:2010[18], és un assaig dissenyat inicialment per determinar la resistència a la tracció indirecta del formigó convencional com alternativa a l'assaig brasiler. Aquest assaig inicialment va ser presentat per Chen (1970) a principis de la dècada dels 70 i des de llavors s'han realitzat nombroses investigacions. A l'assaig de doble punxonament, es disposa d'una proveta cilíndrica de formigó de 150mm de diàmetre i 150mm d'altura de manera vertical entre les plaques de càrrega a compressió uniaxial, utilitzant dos punxons circulars d'acer de  $\varnothing 37.5$  mm posats concèntricament a dalt i a baix de la mostra a assajar.

Al realitzar l'assaig de doble punxonament, la càrrega aplicada produeix un increment de la tracció sobre els plans que contenen l'eix del cilindre i la mostra es trenca al llarg d'aquest plans. Generalment apareixen tres fissures radials a  $120^\circ$  a la mostra assajada, tot i que poden ser des quatre. Aquesta formació de fissures radials esdevé com a mínim en una de les cares de la proveta, apareixent un número de fissures superior a la cara que està en contacte amb el plat de càrrega actiu (el que realitza el moviment de compressió). Sota la càrrega de ruptura  $P$ , es formen dues cunyes situades a sota els punxons d'acer. Aquestes cunyes aproximen a ésser dos cons circulars. Els cons penetren dins el cilindre, el que provoca un desplaçament lateral dels segments de formigó de la proveta separades per les fissures radials.



Existeixen estimacions de la càrrega de ruptura. El tipus de ruptura de la proveta es pot concretar mitjançant dos tipus de ruptura diferenciades. Una ruptura per lliscament, que tenen lloc en les superfícies entre els dos fragments cònics i els segments de formigó exteriors; i una ruptura de separació que es produeix en les superfícies radials fissurades entre els segments exteriors. Per a que el con format sota els plans de càrrega pugui desplaçar-se, es necessita físicament de l'aparició de les fissures radials.

La formació dels plans de fissura radials comencen amb l'aparició d'una primera fissura radial. L'estat de tensions que esdevé la ruptura a causa de la formació de les fissures correspon a l'últim valor de P, arribant així al límit de resistència a tracció

El control de l'assaig es pot realitzar per posició registrant-se de forma continua la càrrega aplicada sobre la proveta i el recorregut del plat de càrrega. Realitzant aquest control s'assegura la estabilitat de l'assaig. També es pot utilitzar pel control de l'assaig de l'obertura radial de la proveta, mesurada mitjançant una cadena situada en la part central de la proveta a mitja altura.

L'expressió de resultats més directe és amb la gràfica força-posició, on els valors de la premsa estan relacionats amb el recorregut dels discs de càrrega.

El que es vol aconseguir tanmateix, és la comparació entre els assaigs de flexió i el Barcelona. Per fer-ho es necessita determinar la força a tracció de la proveta durant l'assaig.

Al llarg dels anys, diferents estudis han desenvolupat expressions per poder estimar la tensió a tracció en funció de la força aplicada, l'alçada i diàmetre de la proveta i el diàmetre del disc de càrrega. Saludes et al (2008) proposa una expressió per determinar la resistència a que no depèn del nombre de fissures. L'expressió és la següent:

$$f_{ct} = \frac{4 \cdot P_f}{9 \cdot \pi \cdot a \cdot H}$$

On  $P_f$  càrrega de ruptura

$H$  altura de la proveta en mm

$a$  diàmetre del disc sobre el que s'aplica la càrrega

En canvi Blanco [19] estima la tensió a tracció ( $\sigma$ ) basant-se en que la força de càrrega ( $F_p$ ), aplicada a través del cilindre d'acer, en contacte amb la superfície de la proveta, genera una força de fricció i una força normal. Com a conseqüència, una força radial apareix, però es nul·la ella mateixa al ser distribuïda al llarg del lateral de la superfície. L'expressió que estima és:

$$\sigma = \frac{F_p}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \sin \beta}{\sin \beta + \mu_k \cdot \cos \beta}$$

$$A = \frac{d \cdot h}{4} - \frac{d^2}{4 \cdot \tan \beta}$$

On  $F_p$  càrrega aplicada en N

$A$  àrea de la ruptura radial en mm<sup>2</sup>

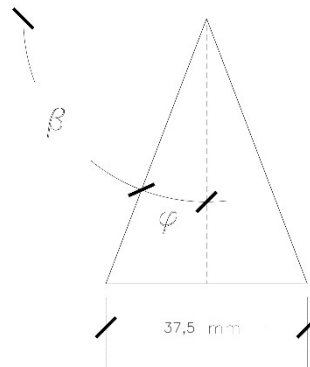
$h$  alçada de la proveta en mm

- $d$  diàmetre proveta en mm
- $\beta$  és l'angle de ruptura del material
- $\mu_k$  és el coeficient de fricció cinètica

El valor de  $\beta$  l'angle de ruptura del material, és determinat a través de  $\varphi$  que és l'angle de fricció interna.

$$\beta = 90 - \varphi$$

$$l = \frac{d'}{2} \cdot \tan \varphi$$



- On  $l$  alçada del con resultant
- $d'$  diàmetre cilindre disc de càrrega
- $\varphi$  angle de fricció interna del material

L'assaig de doble punxonament presenta una sèrie d'avantatges sobre la resta d'assaigs utilitzats per determinar la resistència a tracció:

- L'assaig es realitza mitjançant una presa convencional (de ruptura de provetes a compressió), la qual es disposa en la majoria de laboratoris.
- Es requereix una magnitud de càrrega baixa per arribar a la ruptura de la mostra, pel que es pot utilitzar una màquina de menor capacitat a diferència d'altres assaigs en els que es necessiten una càrrega major.
- El procés a seguir és senzill, el pot fer una persona, i no necessita ajuda auxiliar de maquinària.
- No es limita la ruptura de la mostra en un pla predeterminat. Gràcies a la existència de varis plans de ruptura es permet establir una resistència mitja a la tracció a partir d'una major superfície, reduint-se dràsticament la dispersió dels resultats,
- Es requereix d'una mostra menor en volum en comparació amb altres mètodes d'assaigs, com per exemple els que utilitzen biguetes o panells. Això comporta un estalvi en material i més facilitat en a l'hora de treballar amb les mostres.
- Les provetes són circulars i es poden utilitzar motlles convencionals d'assaig de compressió. També es poden treure testimonis d'obres ja executades.
- Les provetes no s'han de refrentar, s'evita l'ús de morter de sofre i les conseqüències mediambientals que això suposa.

### **4.3 ASSAIG A TRES PUNTS O DE CÀRREGA CENTRADA**

La EN 14651[20] especifica el mètode per mesurar la resistència a tracció per flexió del formigó amb fibres metàl·liques, de no més de 60mm de llargada, o per la combinació de fibres metàl·liques amb altres fibres. De moment no existeix altra normativa específica per només fibres naturals, per tant es fa servir aquesta norma com a referència.

El comportament a tracció del formigó amb fibres s'avalua en termes de valors de la resistència residual a la tracció per flexió determinats a partir de la corba càrrega-desplaçament, que s'obtenen per la càrrega centrada sobre un prisma amb entalla només recolzat sobre suports.

La característica principal d'aquest assaig és la utilització de bigues entallades, es a dir, amb una entalla a la cara inferior

Les provetes de formigó, han d'estar fabricades d'acord amb la norma EN 12390-1 amb una secció de 150x150 i una llargada L, on  $550 \leq L \leq 700$  mm. Pel que fa al tipus de formigó, els àrids no poden ser majors a 32mm i les fibres no més de 60mm.

Per l'abocat i curat del formigó, s'ha de complir la norma EN 12390-2.

Les provetes han de ser entallades a la cara inferior. L'entalla ha de ser de 5mm de gruix, al centre i al llarg de l'amplada de la cara amb una profunditat de 25mm.

Abans de l'assaig a flexió, la distància entre els suports s'ha de mesurar. La distància entre suports ha de ser de 500mm i la distància entre el suport i l'entalla de 250mm. Aquests suports han de ser de  $\varnothing 30$ mm i com a mínim, han de ser 10mm més amples que la proveta. Dos d'aquests suports, incloent el de dalt, han de ser capaç de rodar lliurement, mentre que un dels de sota, ha de tenir el moviment fixe.

Es necessita d'un transductor a la cara inferior centrat a l'eix longitudinal, de manera que es pugui mesurar l'obertura de la fissura.

Els primers dos minuts d'assaig, les dades s'han d'obtenir almenys a 5Hz, i després es pot baixar fins 1Hz.

L'assaig de 3 punts a flexió o de càrrega centrada regulat per la UNE-EN 14651 és molt utilitzat per la seva senzillesa. La biga es recolza en dos suports separats entre si 500 mm i a la meitat de la separació la proveta presenta l'entalla esmenada. L'assaig es realitza sota el control del CMOD (Crack Mouth Opening Displacement). A més del CMOD i la càrrega, també existeix la possibilitat de mesurar la deflexió en els costats del prisma.

Els resultats es poden expressar en relació a la càrrega amb les gràfiques: càrrega-CMOD, càrrega-flexió. La norma EN 14651 proposa una relació entre el CMOD i la deflexió.



$$\delta = 0,85 \cdot CMOD + 0,04$$

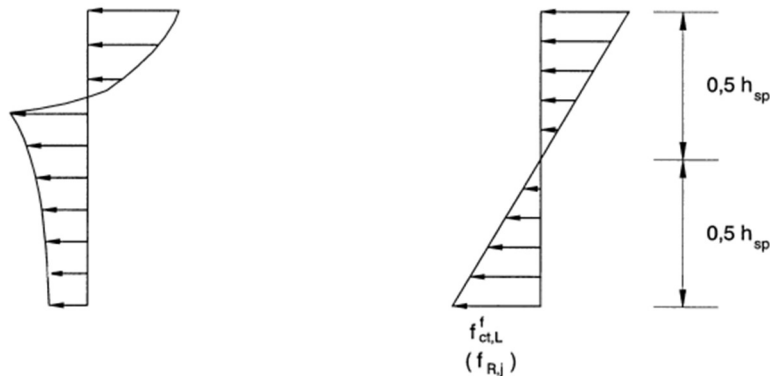
On CMOD és el valor en mil·límetres, mesurat de manera que la distància entre la línia de mesura i la cara inferior de la proveta és igual a 0.

En cas que no sigui així, el CMOD es pot calcular utilitzant l'expressió:

$$CMOD = CMOD_y \frac{h}{h + y}$$

On  $h$  amplada de la proveta

El límit elàstic o límit de proporcionalitat (LOP) és la tensió de tracció a la qual apareix la primera fissura i que per tant el comportament del material deixa de ser elàstic lineal. Per al càlcul de la resistència a flexotracció del LOP i els diferents valors de la resistència residual a flexotracció s'assumeix un diagrama de tracció lineal com el que es mostra a la figura.



Així doncs, el límit de proporcionalitat es calcula amb l'equació:

$$f_{ct,L}^f = \frac{3 \cdot F_L \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

On  $f_{ct,L}^f$  és el LOP en N/mm<sup>2</sup>

$F_L$  és la força corresponent al LOP, en N

$l$  distància entre recolzaments, en mm

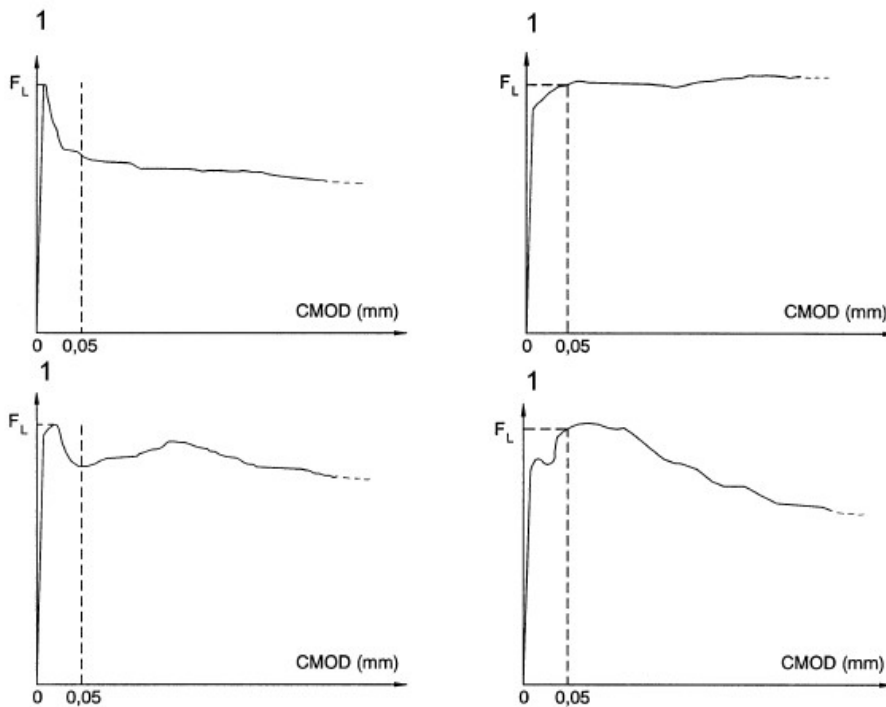
$b$  profunditat de la proveta

$h$  distància entre entalla i la cara de la proveta

Per al cas dels diferents valors de resistència residual a flexotracció,  $f_{Ri}$

$$f_{Ri} = \frac{3 \cdot F_i \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

El valor corresponent a  $F_L$  es determina dibuixant una línia a la distància de 0,05mm i paral·lela a l'eix de les càrregues i agafant  $F_L$  com el valor més alt entre l'interval 0-0,05mm.



El mòdul de ruptura (MOR) és el valor de la tensió màxima en el diagrama càrrega-desplaçament, el qual determina el la ruptura del material, expressat en N/mm<sup>2</sup> es calcula:

$$MOR = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

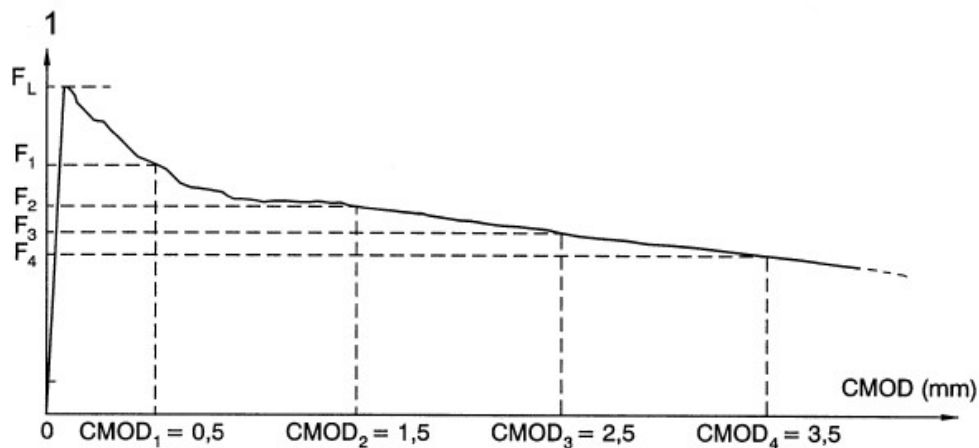
On  $F$  és la càrrega, en N

$l$  distància entre recolzaments, en mm

$b$  profunditat de la proveta en mm

$h$  distància entre entalla i la cara de la proveta en mm

Per dissenyar en estat límit últim, el formigó reforçat amb fibres es caracteritza utilitzant els paràmetres de la resistència residual, on  $F_L$  és la tensió a tracció del formigó i  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ , i  $F_4$  s'obtenen a partir de les càrregues residuals a obertures de fissura (CMOD) de 0,5 mm, 1, mm, 2,5mm i 3,5 respectivament, obtingudes durant l'assaig.



Durant l'assaig a flexió, quan la mostra de formigó es comença a carregar, aquest experimenta un comportament elàstic fins que apareix la primera fissura (fcc), a partir d'aquest moment, poden passar tres comportaments diferents.

- Si el formigó no conté fibres, es comporta de manera fràgil, no hi ha cap mecanisme que mantingui la fissura tancada i per tant la càrrega disminueix mentre augmenta la deformació.
- Si el formigó té fibres inferior al crític de flexotracció, el comportament serà de deformació amb reblaniment a flexotracció (deflection softening).
- Si finalment el volum de fibres és superior al crític de flexotracció, el comportament serà de deformació amb enduriment a flexió (deflection hardening), es produirà una branca dúctil on apareixerà múltiple fissuració i s'arribarà a una resistència pic (fr) a partir de la qual hi haurà localització de la fissura i branca de reblaniment a causa de la resistència a tracció de les fibres.

L'avantatge d'utilitzar aquest mètode és que és senzill i que el control del CMOD assegura una propagació estable de la fissura, inclòs pel formigó en massa. La corba càrrega-CMOD o bé la corba càrrega-deflexió poden ser utilitzades per calcular les relacions tensió-deformació o tensió-amplada de la fissura.

#### 4.4 ASSAIG A QUATRE PUNTS O DE CÀRREGA A TERÇOS

L'assaig a 4 punts és utilitzat per determinar el mòdul de ruptura d'una biga, el qual és obtingut mitjançant el procediment indirecte per determinar la resistència a la tensió del formigó per l'assaig a flexió d'una biga.

Aquest assaig és regulat per la norma NBN B 15-238 o, fora de l'estat europeu, per la ASTM C109. L'assaig es basa en aplicar verticalment una càrrega, repartida en dos punts, a la biga de formigó. Aquesta biga de formigó està recolzada sobre uns rodets d'entre Ø20-40mm, dels quals un té moviment lliure i l'altre no.

Pel càlcul del mòdul de ruptura, s'utilitza l'expressió següent sempre i quan les fissures surtin en el terç del mig de la proveta.

$$MOR = \frac{3 \cdot F \cdot l}{b \cdot h^2}$$

Si pel contrari les fissures no apareixen en el terç central, el mòdul de ruptura es calcula amb l'expressió:

$$MOR = \frac{3 \cdot F \cdot a}{b \cdot h^2}$$

On  $F$  és la càrrega, en N

$l$  distància entre recolzaments, en mm

$b$  profunditat de la proveta en mm

$h$  distància entre entalla i la cara de la proveta en mm

$a$  distància mitja entre la línia de ruptura i el suport més proper, mesurat en la superfície de tensió de la biga en mm

Les normatives assenyalen que per determinar la part plàstica de la corba del diagrama, es necessiten de tres punts: el punt de tensió màxima on el desplaçament a flexió és  $\delta_1$ , el punt on  $\delta=l/600$  i el punt on  $\delta=l/150$ .

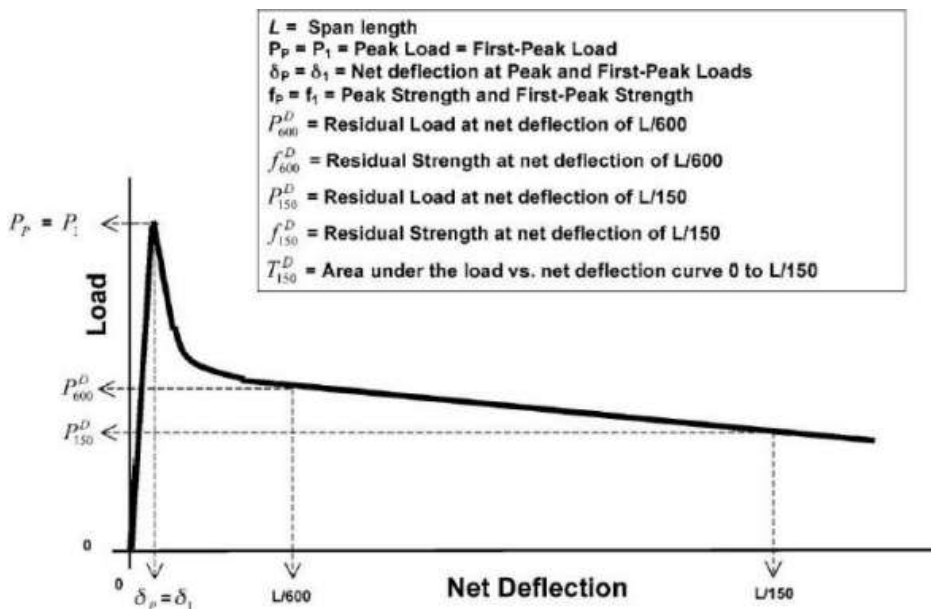
$$\delta_1 = \frac{23 \cdot P_1 \cdot L^3}{1296 \cdot EI} \cdot \left[ 1 + \frac{216 \cdot d^{2n}(1 + \mu)}{115 \cdot L^2} \right]$$

On  $\delta_1$  primera deflexió màxima en mm

$P_1$  càrrega del primer punt en N

- L longitud del tram en mm
- E el mòdul d'elasticitat de l'elasticitat del formigó en N/mm<sup>2</sup>
- I moment de la secció transversal de la inèrcia en mm
- D profunditat mitja de la mostra en mm
- $\mu$  coeficient de Poisson=1.25 segons la norma

Per relacionar la deformació a tracció del formigó amb la deflexió, existeixen varies propostes. En aquest cas, es destaca la proposta on la tensió  $P_p$  és la tensió a tracció del formigó i  $P_{600}$  i  $P_{150}$ , s'obtenen a partir de les càrregues residuals amb flexions  $L/600$  i  $L/150$ , on  $L$  és la distància entre suports.



## 5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 5.1 PREPARACIÓ MATERIALS

Per la fabricació del formigó es tindrà en compte una única dosificació, la utilitzada per Awwad en l'article que ens basem [21].

Dosificació	Quantitat per 1 m <sup>3</sup> de formigó
Graves	880 kg
Sorra	810 kg
Ciment (GU Tipus)	400 kg
Aigua	272 litres
Relació a/c	0.68

Awwad estudia el percentatge de fibres que té millor comportament dins la matriu del formigó, per això fa dosificacions de formigó amb 0.5%, 0.75% i 1% de fibres en relació al volum de formigó. Junt amb les diferents dosificacions de fibres, estudia si es pot fer una reducció de graves en el formigó. Per això fa diferents reduccions de graves per veure si un formigó més lleuger, combinat amb fibres, és possible. Amb cada dosificació de fibres fabrica formigó sense reducció de graves, amb una reducció de 10%, de 20% i 30%.

Arriba a les conclusions que el formigó amb un 0.75% de fibres i una reducció de graves de 20% té millor comportament a flexió, encara que perd resistència a compressió. Per tant, per la realització dels assaigs es fabricarà formigó amb la dosificació esmenada anteriorment però amb una reducció de graves de 20% i un 0.75% de fibres.

#### Formigó

Per un millor control del formigó i del comportament de les fibres es fabricaran provetes blanques de cada assaig. Per tant les dimensions i quantitat de provetes a realitzar són:

Assaig	Tipus	Quantitat	Mides	Pes
Assaig Barcelona	Blanques	3	Ø150 x 300 mm	12.72 kg/unitat
Assaig Barcelona	Fibres	3	Ø150 x 300 mm	12.72 kg/unitat
Flexió 3 punts	Blanques	3	150 x 150 x600 mm	32.40 kg/unitat
Flexió 3 punts	Fibres	3	150 x 150 x600 mm	32.40 kg/unitat
Flexió 4 punts	Fibres	3	150 x 150 x600 mm	32.40 kg/unitat

S'organitza per fabricar les provetes en tres dies diferents: un dia per provetes blanques, i els altres dos dies per les provetes amb fibres. A cada amassada s'afegiran tres provetes cúbiques per assajar a compressió. Com s'ha explicat anteriorment en el punt 4, l'assaig a compressió és dels assaigs més senzills, i ens permetrà obtenir una relació més directe del formigó i veure si hi ha grans diferències entre amassades.

Assaig	Tipus	Quantitat	Mides	Pes
Compressió	Blanques	3	150 x 150 x 150 mm	8.10 kg/unitat
Compressió	Fibres	6	150 x 150 x 150 mm	8.10 kg/unitat

Seguint la dosificació de Awwad i afegint un 25%, la dosificació del formigó que es fabricarà és:

Dosificació	Quantitat
Graves	176.61 kg
Sorra	203.21 kg
Ciment (GU Tipus)	100.35 kg
Aigua	68.23 litres
Fibra	1.68 kg
Relació a/c <sup>1</sup>	0.68

Assaig	Tipus	Quantitat	Mides	Pes
Compressió	Blanques	3	150 x 150 x 150 mm	8.10 kg/unitat
Compressió	Fibres	6	150 x 150 x 150 mm	8.10 kg/unitat

El ciment equivalent al tipus GU (general use) d'Amèrica, és el CEM I 42.5<sup>2</sup>. Els àrids a utilitzar són graves d'entre 5 i 10mm i sorra.

Tant les graves com la sorra venen brutes, per tant es necessita rentar-ho abans de fer les amassades per tenir uns resultats més precisos.

Pel rentat de les graves s'utilitza un recipient del laboratori, es posen graves i s'omple d'aigua. Es barregen per treure la majoria de la pols i es retira l'aigua. Es passen les graves a dins un tamís, i a

<sup>1</sup> La relació a/c de 0.68 és per les provetes amb fibres. És tant alta perquè les pròpies fibres necessiten aigua per hidratar-se. Awwad no especifica la relació a/c de les provetes blanques, però ja que aquest treball es tracta d'adaptar el procediment a les normes espanyoles i/o europees, s'agafarà la EHE de referència i s'aplicarà un 0.5 com a relació a/c per a les provetes blanques.

<sup>2</sup> El tipus de ciment equivalent al GU és el CEM I. Però dins el CEM I existeixen el de 32.5, 42.5 i 52.5N/mm<sup>2</sup>. Per determinar quin tipus de CEM I es farà servir, s'ha fet una recerca de quina resistència a compressió es fabriquen el GU en el mercat americà.

l' hora dins un recipient amb forats a la part de baix. D'aquesta forma s'omple el recipient d'aigua i mentre es van barrejant les graves, amb el propi fregament de les graves entre elles juntament amb l'aigua es van netejant. Els fins i l'aigua bruta marxen per la part inferior. ´

Es segueix el procediment per obtenir almenys 176.61 kg de graves rentades.

### Imatge 5.1.1: Procés rentat fibres



Pel rentat de la sorra es segueix un procediment semblant al de les graves. Es posa la sorra a dins un recipient i s'omple d'aigua. Aquesta vegada no es té cap tamís o material semblant pel que es pugui passar per decantar la sorra. El que es fa es posar la mànega a la part baixa del recipient i a sobre es posa tota la sorra. La pròpia aigua fa el procés de decantació amb la sorra. Per facilitar-ho es proven diferents pressions d'aigua. Poca pressió fa que es tardi molt i que no hi hagi suficient pressió per afavorir la decantació. Molta pressió tampoc ajuda perquè fa que tota la sorra pugui a la superfície i marxi. Per tant una pressió mitja és la que s'utilitza.



Al principi es forma una mena d'escuma a la superfície, que mostra la quantitat de brutícia que porta la sorra. A mesura que va avançant el procés l'aigua que cau torna més neta. Així i tot es va barrejant la sorra cada 3-4 minuts.

Fins i tot es prova si barrejant amb la batedora de morter ajuda a que la sorra es netegi més ràpid i millor, però no es veuen diferències amb la utilització o no de la batedora. Un cop donat per rentat, s'aboca a sobre un palet i es deixa assecar.

Aquest procés es repeteix fins tenir més de 203.21 kg de sorra rentada.

### Imatge 5.1.2: Rentat de la sorra



És difícil interpretar el moment en que la sorra està rentada. Però el criteri que es fa servir és agafar una mostra de l'aigua que cau. La primera foto és del principi del rentat, on l'aigua és completament marró. La segona foto és durant el procediment, on l'aigua està considerablement més neta que l'anterior, però així i tot segueix estant bruta. I la tercera és després de uns 20min del rentat, on l'aigua és quasi transparent completament i es dona la sorra per neta.

### Imatge 5.1.3. Criteri per donar la sorra per rentada



Aquest procediment de rentat no és exacte, si que s'ha treu molta brutícia que porta la sorra, però per obtenir una sorra rentada 100% s'haurien de fer servir altres procediments com ara el rentat mitjançant aire a pressió. A més, tant el procediment fet servir per rentar la sorra com les graves són uns procediments que utilitzen molta aigua i, amb la intenció principal de fer un formigó més sostenible per el medi ambient, no té sentit que durant el procés es malgasti tanta aigua. Per tant un altre tipus de rentat utilitzant menys aigua o utilitzant altres mitjans serien recomanables.

Els materials mai estaran assecats completament, sempre tindran aigua absorbida. Per intentar tenir resultats més precisos s'intenta calcular aquest percentatge d'aigua absorbida de la grava i de la sorra.

Per poder calcular la quantitat d'aigua absorbida del material a temperatura ambient, el que es fa es pesar un volum conegut de material abans i després d'estar totalment assecat per estufa. És a dir, s'omple un cilindre de volum conegut de graves rentades, es pesen i es col·loquen a l'estufa a 50C. Dies després es treuen de l'estufa i es pesen i es repeteix el procediment fins que la diferència dels últims pesos sigui igual o inferior a 1%.

El pes del volum del cilindre quan les graves estan rentades és de 7,855 kg (balança tarada). I el pes de les graves després d'uns dies a l'estufa és de 10,274kg i de 10,272kg (dels quals 2,578kg són el pes de la safata) uns dies després. La diferència entre 10.474 i 10.472 és de 0.99%.

Per tant el pes sec del volum de grava és de  $10,272 \text{ kg} - 2,578\text{kg} = 7,694 \text{ kg}$

El dia de formigonar s'agafarà el mateix volum però amb les graves que es volen utilitzar i es calcularà la quantitat d'aigua absorbida del material. La quantitat resultant, serà la quantitat d'aigua a restar del total.

#### Imatge 5.1.4. Aigua absorbida de les graves



El mateix procediment es farà servir amb la sorra.

El pes inicial de la sorra rentada i humida és de 10,402 kg. Dies després pesa 9,118kg i després 9,102kg (dels quals 2,578kg són el pes de la safata). La diferència entre els dos últims pesos és de 0.99%.

El dia de formigonar s'agafarà el mateix volum però amb sorra que es vol utilitzar i es calcularà la quantitat d'aigua absorbida del material. La quantitat resultant, serà la quantitat d'aigua a restar del total.

#### Imatge 5.1.5. Aigua absorbida de la sorra



## Fibres

Les fibres són subministrades pel departament de LEPAMAP de la Universitat de Girona.

Les fibres són un material natural orgànic i per tant una primera neteja manual és necessària per treure totes les restes de fusta o altres elements que són perceptibles a l'ull. El rendiment mitjà per la neteja de les fibres és de 150 gr/h. Després de la neteja, es tallen manualment en llargades de 30mm mitjançant una cisalla.

Per poder utilitzar les fibres en el formigó i perquè tinguin una major interferència amb el formigó, es realitza un tractament químic. La majoria dels articles que experimenten amb fibres de cànem arriben a la conclusió que sense un tractament previ per eliminar totes les impureses orgàniques, el formigó o el morter amb fibres de cànem no és efectiu.

El tractament que es fa servir és el tractament adoptat per Sedan[11] el qual els mateixos autors de l'article que es mimetitza fan servir. El tractament consisteix en deixar en remull les fibres en solució de hidròxid de sodi (NaOH) al 6% del pes durant 48h.

En total es tracten 2,012kg de fibres en 3 dies diferents.

	<b>Pes fibres</b>	<b>% Pes</b>	<b>Pes en sec fibres</b>	<b>6% NaOH</b>
Dia 1	671,55	85,68%	575,38 gr	34,52 gr
Dia 2	451,62	88,59%	400,09	24 gr
Dia 3	888,94	87,95%	781,82	46,90gr

Per començar el tractament es necessita saber la quantitat d'aigua absorbida del material. Per fer-ho es posa algunes fibres dins la termobalança i després d'uns minuts assecant el material, la pròpia màquina t'indica el percentatge del pes sec del material, respecte el pes inicial.

Pel tractament químic, primer es posa aigua destil·lada i l'hidròxid de sodi en un recipient i es barreja. Un cop barrejat s'hi posen les fibres i es deixen en remull 48h. Pel que fa a la quantitat d'aigua Sedan[11] no en fa referència i com la quantitat d'aigua no ens modifica res en la solució química ja que depèn del pes de les fibres i no del líquid, es posa suficient aigua per tapar les fibres, els 3 dies s'hi posa la mateixa proporció pel que fa al pes de les fibres.

Una vegada passades les 48 hores en remull, es renten. Pel rentat, primer es passen les fibres per un tamís, es tornen a posar a dins un recipient amb aigua destil·lada neta, es barregen i es tamisen. Aquest procés es repeteix 5-6 vegades fins que es veu que no hi ha restes de producte químic (es veu com petites bombolles de sabó a la superfície).

Un cop tractades químicament i rentades, es posen a assecat 48h dins estufa a 60°C. Passades les 48h estan preparades per ser utilitzades, només necessiten ser desfilades per facilitar la barreja dins el formigó, ja que amb el rentat i l'assecat es queden monyons de fibres.

**Imatge 5.1.6: Procés tractament fibres**



Termobalança



NaOH dia 1



Fibres amb NaOH i aigua



Rentat fibres



Fibres rentades



Fibres dins l'estufa

## 5.2 FABRICACIÓ PROVETES

Inicialment es pensava fabricar el formigó amb la formigonera de 100 litres que la Universitat de Girona havia encarregat. Un cop arribada la formigonera i, durant el dia de proves pel funcionament de la màquina, es comprova que la màquina no té prou potència ja que un cop afegida la grava, deixa de barrejar. Aquest imprevist a falta de una dia per començar a formigonar, obliga a fer canvis en les amassades.

### Imatge 5.2.1. Preparació



Formigonera nova



Formigonera tradicional

En lloc de la formigonera nova amb capacitat de 100 litres, s'utilitza una formigonera tradicional, però amb menys capacitat. Si abans es tenia previst 3 amassades en 3 dies, ara s'hauran de fer 3 amassades per dia durant 3 dies. És a dir, cada amassada inicial es divideix en 3.

<b>Dia 1</b>	<b>Graves</b>	<b>Sorra</b>	<b>Ciment</b>	<b>Aigua</b>	<b>Fibres</b>	<b>Litres</b>
3 punts	31,15 kg	35,84 kg	17,70 kg	12,03 l	-	40,50 l
Barcelona	12,23 kg	14,07 kg	6,91 kg	4,72 l	-	15,90 l
Compressió	7,78 kg	8,96 kg	4,42 kg	3,09 l	-	10,12 l
Total	51,18 kg	58,88 kg	29,07 kg	19,77 l	-	66,52 l
<b>Total +15%</b>	<b>58,85 kg</b>	<b>67,71 kg</b>	<b>33,44 kg</b>	<b>22,74 l</b>	-	<b>76,51 l</b>
<b>Amassada 1.1</b>	<b>19,61 kg</b>	<b>22,57 kg</b>	<b>11,14 kg</b>	<b>7,57 l</b>	-	<b>25,50 l</b>
<b>Amassada 1.2</b>	<b>19,61 kg</b>	<b>22,57 kg</b>	<b>11,14 kg</b>	<b>7,57 l</b>	-	<b>25,50 l</b>
<b>Amassada 1.3</b>	<b>19,61 kg</b>	<b>22,57 kg</b>	<b>11,14 kg</b>	<b>7,57 l</b>	-	<b>25,50 l</b>

Dia 2	Graves	Sorra	Ciment	Aigua	Fibres	Litres
3 punts	31,15 kg	35,84 kg	17,70 kg	12,03 l	0,465 kg	40,50 l
Barcelona	12,23 kg	14,07 kg	6,91 kg	4,72 l	0,182 kg	15,90 l
Compressió	7,78 kg	8,96 kg	4,42 kg	3,09 l	0,116 kg	10,12 l
Total	51,18 kg	58,88 kg	29,07 kg	19,77 l	0,763 kg	66,52 l
<b>Total +25%</b>	<b>63,97 kg</b>	<b>73,60 kg</b>	<b>36,35 kg</b>	<b>24,72 l</b>	<b>0,954 kg</b>	<b>76,51 l</b>
<b>Amassada 2.1</b>	<b>21,32 kg</b>	<b>24,53 kg</b>	<b>12,11 kg</b>	<b>8,23 l</b>	<b>0,318 kg</b>	<b>25,50 l</b>
<b>Amassada 2.2</b>	<b>21,32 kg</b>	<b>24,53 kg</b>	<b>12,11 kg</b>	<b>8,23 l</b>	<b>0,318 kg</b>	<b>25,50 l</b>
<b>Amassada 2.3</b>	<b>21,32 kg</b>	<b>24,53 kg</b>	<b>12,11 kg</b>	<b>8,23 l</b>	<b>0,318 kg</b>	<b>25,50 l</b>

Dia 3	Graves	Sorra	Ciment	Aigua	Fibres	Litres
4 punts	31,15 kg	35,84 kg	17,70 kg	12,03 l	0,465 kg	40,50 l
Compressió	7,78 kg	8,96 kg	4,42 kg	3,09 l	0,116 kg	10,12 l
Total	38,94 kg	44,80 kg	22,12 kg	15,05 l	0,581 kg	50,62 l
<b>Total +25%</b>	<b>48,68 kg</b>	<b>56,01 kg</b>	<b>27,66 kg</b>	<b>18,80 l</b>	<b>0,726 kg</b>	<b>63,28 l</b>
<b>Amassada 3.1</b>	<b>24,33 kg</b>	<b>28,00 kg</b>	<b>13,82 kg</b>	<b>9,40 l</b>	<b>0,363 kg</b>	<b>31,64 l</b>
<b>Amassada 3.2</b>	<b>24,33 kg</b>	<b>28,00 kg</b>	<b>13,82 kg</b>	<b>9,40 l</b>	<b>0,363 kg</b>	<b>31,64 l</b>

### Imatge 5.2.2. Preparació



Motlles 150x150x600mm



Motlles 150x150x150 i  
Ø150x300mm



Preparació materials

En un principi s'havia augmentat el tota necessari de material un 15%, ja que a l'hora de formigonar es perd material i també se n'utilitza per fer el con d'Abrams. El primer dia de formigonat, després

de la primera amassada, la qual s'havia augmentat un 15%, es veu com es va molt just de material i es decideix incrementar fins al 25%.

El procés i temps de barreja dels materials amb les fibres tenen gran importància. No hi ha normatives que regulin el procés de barreja del formigó amb fibres naturals però si hi ha articles científics que n'han estudiat la seva importància. Wang[16] es dedica precisament a això, a estudiar el comportament de les fibres amb el formigó segons les variables del procés de barreja, el contingut de fibra, la mida dels àrids i la llargada de la fibra. Proposa dos processos de barreja: barreja en sec i barreja en humit.

Barreja en humit consta de:

- Posar les fibres assecades en remull amb l'aigua que s'utilitzarà per el formigó
- Abocar les graves, sorra i ciment a la formigonera i barrejar 3 minuts
- Afegir les fibres i l'aigua a poc a poc a la formigonera i barrejar 4 minuts tot junt
- Deixar reposar la barreja 2 minuts
- Tornar a barrejar 3 minuts abans d'abocar el formigó

Barreja en sec consta de:

- La meitat de les graves i la meitat de les fibres s'aboquen a la formigonera
- S'afegeix la resta de les graves
- S'afegeix la resta de les fibres
- S'afegeix aigua per l'absorció de les fibres i es barreja 5 minuts
- S'afegeix la sorra a la formigonera i es barreja durant 3 minuts
- S'afegeix el ciment i la meitat de l'aigua i es barreja 3 minuts
- S'afegeix la resta d'aigua
- Deixar reposar 2 minuts
- Tornar a barrejar 3 minuts abans d'abocar el formigó

Wang arriba a la conclusió que la barreja en humit influeix més positivament al formigó pel que fa a les propietats de flexió en comparació amb el la barreja en sec i suggereix que es degui a la millor unió de les fibres amb la matriu.

Per tant el procediment de barreja que es fa servir per aquest formigonat és el de barreja en sec seguint les recomanacions de Wang ja que Awwad no menciona quin procés de barreja fa servir.

Per tant el procediment a seguir serà igual per cada amassada, i per la fabricació de les provetes blanques simplement es saltarà el pas de les fibres.



Procés formigonat:

<b>Formigó sense fibres</b>	<b>Formigó amb fibres</b>
1. Posar les fibres assecades en remull amb l'aigua que s'utilitzarà per el formigó	1. Posar les fibres assecades en remull amb l'aigua que s'utilitzarà per el formigó
2. Abocar les graves, sorra i ciment a la formigonera i barrejar 3 minuts	2. Abocar les graves, sorra i ciment a la formigonera i barrejar 3 minuts
3. Afegir l'aigua a poc a poc a la formigonera i barrejar 4 minuts tot junt	3. Afegir les fibres i l'aigua a poc a poc a la formigonera i barrejar 4 minuts tot junt
4. Deixar reposar la barreja 2 minuts	4. Deixar reposar la barreja 2 minuts
5. Tornar a barrejar 3 minuts abans d'abocar el formigó	5. Tornar a barrejar 3 minuts abans d'abocar el formigó

Per cada amassada es realitza l'assaig del Con d'Abrams per determinar la consistència del formigó. Aquest assaig consisteix en emplenar el con a capes per terços 3 i donant 25 cops a cada capa mitjançant una vareta per així compactar la capa de formigó. Quan s'ha compactat l'última capa, s'enrasa el motlle i s'aixeca. La diferència entre l'altura total del motlle i l'altura resultant del formigó una vegada tret el motlle és el que determinem com a assentament. Les diferents consistències i valors límits del assentament del con són determinats per la EHE-08[1]:

<b>Tipus de consistència</b>	<b>Assentament en cm</b>
Seca (S)	0-2
Plàstica (P)	3-5
Tova (T)	6-9
Fluïda (F)	10-15
Líquida (L)	16-20

Els resultats obtinguts amb el con d'Abrams són:

<b>Amassada</b>	<b>Assentament en cm</b>
Amassada 1.1	16 cm (F)
Amassada 1.2	14 cm (F)
Amassada 1.3	6,5 cm (T)
Amassada 2.1	4 cm (P)
Amassada 2.2	2 cm (P)
Amassada 2.3	3,5 cm (P)
Amassada 3.1	4,5 cm (P)
Amassada 3.2	11,5 cm (F)

La diferència de consistència entre amassades poden ser a causa de la humitat de la sorra. Un cop rentada la sorra, es deixa aixecar en un palet i això no garanteix que la sorra de la part baixa, tingui la mateixa humitat que la part superior. Per evitar les diferències de humitat al fabricar cada amassada s'agafa sorra de totes les capes.

Aquests resultats podrien explicar una possible dispersió de dades durant l'anàlisi dels assaigs.

### Imatge 5.2.3. Con d'Abrams



Con Abrams 1.1



Con Abrams 1.3



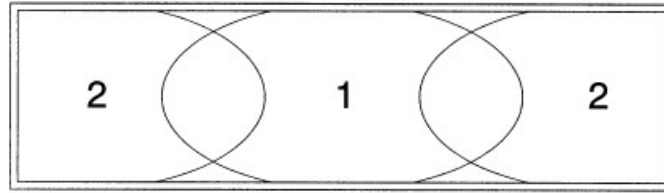
Con Abrams 3.2

Una vegada fabricat el formigó i determinació de la seva consistència s'aboca el formigó dins els motlles. La UNE-EN 14390-2[22] [17] regula el procediment de preparació dels motlles, de l'abocat del formigó, de la compactació i el curat.

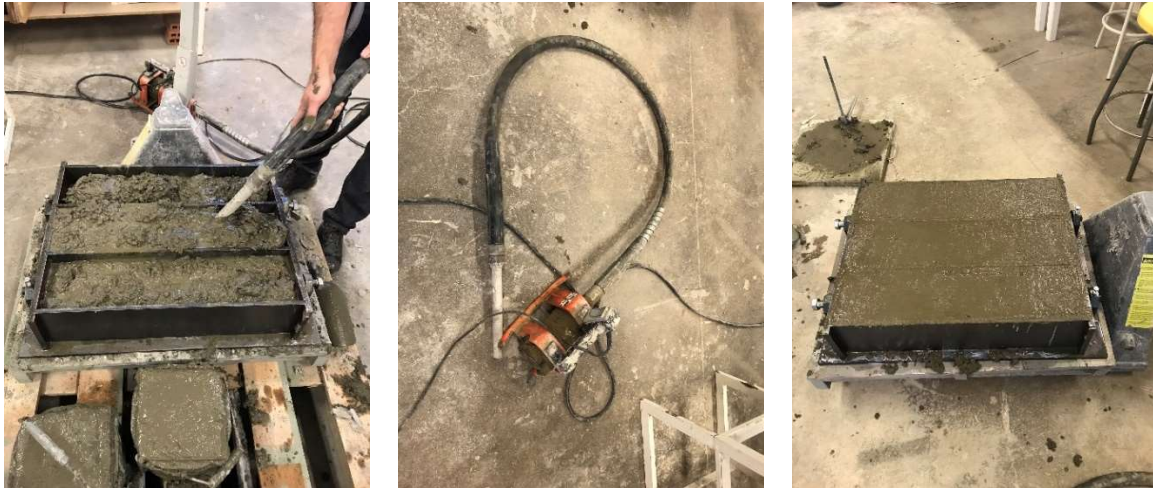
Abans de l'abocat del formigó es preparen els motlles amb una capa d'oli per evitar que el formigó s'enganxi i es deteriori en el posterior desemmotllat.

Per cada amassada, s'emplena un motlle cúbic, un cilíndric i una tercera part dels prismàtics. Els motlles cúbics i els motlles cilíndrics s'emplenen de la mateixa manera: s'aboca formigó fins una tercera part del motlle, es compacta manualment amb una barra d'acer i es pica 25 cops, s'emplena fins dos terços, i es repeteix el mètode de compactació, s'aboca formigó fins emplenar-lo del tot, es torna a compactar mitjançant 25 cops amb la barra d'acer i finalment s'enrasa.

Els motlles prismàtics, en canvi, s'emplenen diferent. S'emplena primer la part central, i després els laterals, d'acord amb la imatge. Segons la EN 14651 el vibrat ha de ser extern, però com no disposem de plat de vibrat que pugui carregar tant de pes, es vibrarà amb el vibrador tradicional.

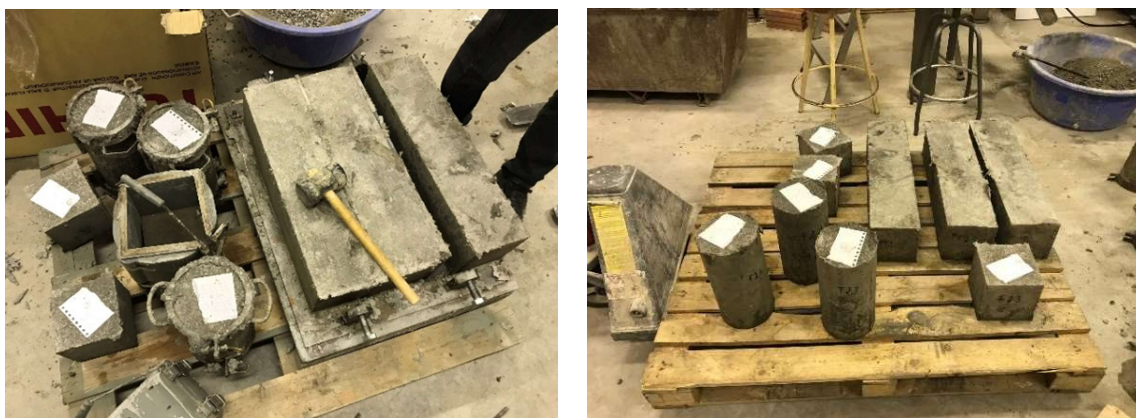


**Imatge 5.2.4. Abocat i vibrat provetes prismàtiques**



D'acord amb la UNE EN 12390-2 es desemmotllen les provetes als tres dies de formigonat, i s'han de protegir d'impactes, vibracions i deshidratacions. Per això es tapen amb un plàstic per mantenir-les hidratades i es guarden, després del desemmotllat, dins una càmera a temperatura de 20° i una humitat relativa de 95% fins el moment de l'assaig.

**Imatge 5.2.5. Curat i desemmotllat**



Les provetes, al moment de ser fabricades, són identificades amb un codi. Aquests codis depenen de la geometria, del dia de fabricació i de quina amassada.

	<b><i>Amassades dia 1</i></b>			<b><i>Amassades dia 2</i></b>			<b><i>Amassades dia 3</i></b>		
<b><i>Compressió</i></b>	CB1.1	CB1.2	CB1.3	CF2.1	CF2.2	CF2.3	CF3.1	CF3.2	CF3.3
<b><i>DPT</i></b>	DB1.1	DB1.2	DB1.3	DF2.1	DF2.2	DF2.3	-	-	-
<b><i>Flexió 3P</i></b>	PB1.1	PB1.2	PB1.3	PF2.1	PF2.2	PF2.3	-	-	-
<b><i>Flexió 4P</i></b>	-	-	-	-	-	-	PF3.1	PF3.2	PF3.3

CB / CF: provetes a compressió de formigó en massa (CB) i de formigó amb fibres (CF). Existeixen tres provetes per cada dia de fabricació de formigó.

DB / DF: provetes assajades mitjançant el Doble Punxonament de formigó en massa (DB) i de formigó amb fibres (DF).

PB / PF: provetes prismàtiques assajades a flexió de formigó en massa (PB) i de formigó amb fibres (PF). Les provetes de formigó en massa (PB1.1, PB1.2, PB1.2) i les de formigó amb fibres (PF2.1, PF2.2 i PF2.3) són assajades a tres punts. Mentre que les provetes prismàtiques amb fibres fabricades el tercer dia (PF3.1, PF3.2 i PF3.3) són assajades a quatre punts.

## 5.3 PREPARACIÓ UTILLATGE

### 5.3.1 ASSAIG COMPRESSIÓ

Per a l'assaig a compressió, s'utilitzarà la premsa que hi ha al laboratori de construcció, i no requereix d'altre utillatge.

### 5.3.2 ASSAIG BARCELONA

L'assaig Barcelona requereix provetes de  $\varnothing 150 \times 150$  mm. Per tant les provetes fabricades originalment es tallen amb una radial per la meitat, obtenint així un total de 6 provetes blanques i 6 provetes amb fibres de  $\varnothing 150 \times 150$  mm aprox.

#### Imatge 5.3.1: Assaig Barcelona



Tall de les provetes

Abans del tall, s'identifica quina és la part superior de la proveta i quina és la part inferior. Es fa aquesta identificació perquè no es sap si les fibres estan ben repartides o no, i aquesta identificació ens pot ajudar a les conclusions posteriors.

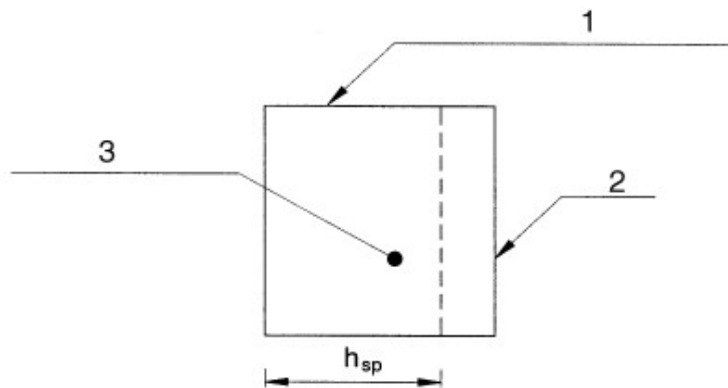
Per la realització d'aquest assaig, s'utilitzarà la mateixa màquina que l'assaig de compressió però amb la diferència que, necessitem dos discs d'acer de  $\varnothing 37.5$  mm x 24 mm que es col·loquen a la cara superior i inferior i que actuaran com a elements de càrrega. Per assegurar que els discs de càrrega estan ben centrats sobre la proveta, s'utilitza una plantilla de fusta de balsa.

#### Imatge 5.3.2. Utillatge assaig Barcelona



### 5.3.3 ASSAIG A TRES PUNTS O DE CENTRADA

Les provetes prismàtiques de dimensions 150x150x600 necessiten d'una entalla, d'acord amb la norma UNE-EN 14651[20]. Per realitzar l'entalla, s'agafa la proveta i es gira 90°, sent el número 1 (veure imatge) els laterals de la proveta durant la fabricació i el número 2, la cara on es fa l'entalla i la que, posteriorment, es col·locaran els transductors. L'entalla ha d'estar situada a l'eix central, de gruix 5mm i de profunditat 25mm, ja que  $h_{sp}$  ha de ser 125mm segons la norma.



Per mesurar l'obertura de desplaçament de les vores de la fissura(CMOD), s'utilitza transductors de desplaçament juntament amb la platina com a punt de referència i on es recolza la punta del transductor. Es col·loquen a una distància de 25mm des de l'entalla.

#### Imatge 5.3.3: Utilatge assaig 3 punts



Entalla



Col·locació transductors

Per recollir les dades de l'assaig, es necessita un equip d'adquisició, en aquest cas un quantum de la casa HBM, on aniran connectats tots els transductors i la premsa. Cada transductor està format

per 5 cables de diferents colors i el cable de terra. Aquests van sempre amb el mateix ordre, entrats a la plantilla per després, connectar aquesta al quantum.

L'ordre que es segueix és:

Color blau      numero 2

Color verd      numero 3

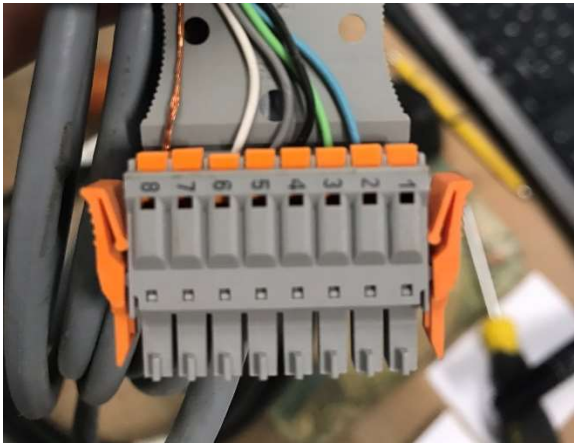
Color negre    número 4

Color gris      número 5

Color blanc    número 6

Terra            número 8

#### Imatge 5.3.4: Utiltatge assaig 3 punts



Col·locació del cablejat



Quantum

Després de fer l'assaig a flexió de les provetes blanques, col·locant els transductors a la cara inferior com indica la norma, també s'opta per col·locar-ne als costats del prisma per obtenir obtenir la fletxa com a dades de suport.

#### 5.3.4 ASSAIG A QUATRE PUNTS DE CÀRREGA A TERÇOS

L'utiltatge que es fa servir per l'assaig de quatre punts és el mateix que el de tres punts. La norma només demana transductors per gravar la fletxa durant l'assaig, però ja que es disposa del material, es col·locaran també els transductors a la cara inferior per determinar l'obertura a la cara inferior. Possiblement no es faci cap lectura, o alguna lectura que no sigui vàlida, ja que en aquest assaig la fissura no necessàriament sortirà a l'eix central.

Per tant la col·locació de transductors serà la mateixa tant per l'assaig a tres punts com per l'assaig a quatre punts.

## 5.4 REALITZACIÓ ASSAIG

### 5.4.1 ASSAIG COMPRESSIÓ

Les provetes cúbiques de 150x150x150mm, realitzades segons la norma UNE-EN 12390-1 es comprimeixen fins arribar a la ruptura en una màquina d'assaig de compressió segons la norma UNE-EN 12390-4. Durant l'assaig es registra la càrrega màxima que arriba la proveta i es calcula la resistència a compressió del formigó.

El procediment és netejar els plats de càrrega eliminant restes de formigó o altres materials d'anteriors assaigs, es col·loca la proveta entre els plans de càrrega amb la cara rugosa en l'eix horitzontal. Tal com diu la norma d'aplicació, la càrrega s'ha d'aplicar perpendicularment a la direcció del formigonat.

La velocitat de la càrrega és de  $0,2613/\text{mm}^2\text{s}$ , que és l'equivalent a  $0,6\text{Tn/s}$ , unitats que treballa la màquina de compressió.

#### Imatge 5.4.1: Assaig compressió



Màquina de compressió



Col·locació i centrat de la proveta entre els plans de càrrega.



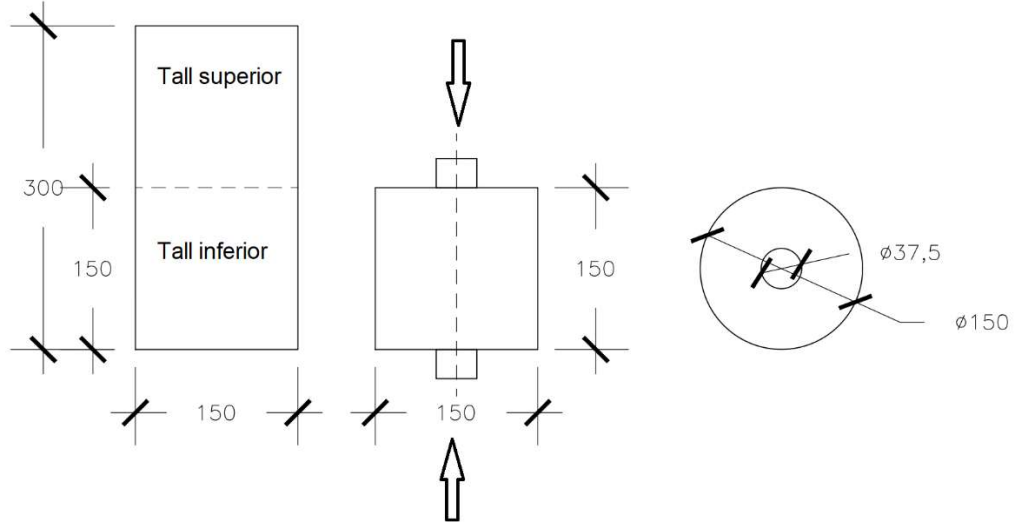
Ruptura de la proveta a compressió



### 5.4.2 ASSAIG BARCELONA O DOUBLE PUNCH TEST (DPT)

L'assaig es basa en la compressió uniaxial al cilindre mitjançant dues plaques de càrrega cilíndriques d'acer de diàmetre 37.5 mm, situades concèntricament a dalt i a baix de la proveta.

DIMENSIONAT I DISTÀNCIES



El procediment és similar al de compressió, ja que s'utilitza la mateixa màquina. Primer s'eliminen restes de materials de dins la màquina, es situa el primer cilindre d'acer i a sobre es col·loca la proveta. Amb una plantilla de fusta de balsa es centra el cilindre d'acer. Un cop centrat es col·loca el segon cilindre a la cara superior i es centra.

La norma EN 83515 senyala que la velocitat de càrrega ha de ser de 0,5mm/min, la qual és 0,0083mm/s. Com la màquina a utilitzar no accepta tants decimals, s'aplicarà una velocitat de càrrega de 0,01mm/s, equivalent a 0,6mm/min.

#### Imatge 5.4.2. Assaig Barcelona



Col·locació i centrat de la proveta



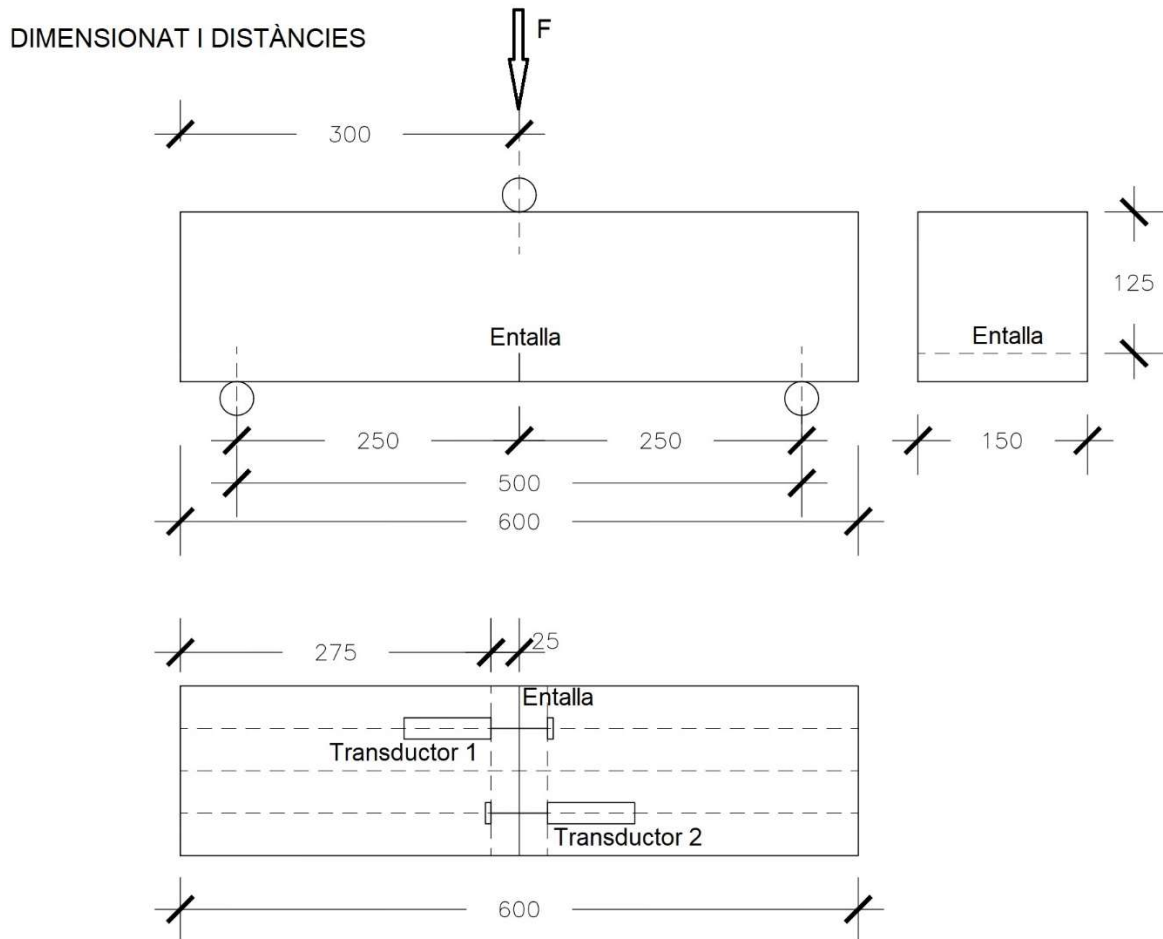
Ruptura provetes blanques



Ruptura provetes amb fibres

### 5.4.3 ASSAIG A TRES PUNTS O DE CÀRREGA CENTRADA

Les provetes prismàtiques de dimensions 150x150x600 amb entalla es situen a sobre els rodets de  $\varnothing 30\text{mm}$ , separats 500 mm. Un rodet està lliure al moviment, l'altre fixe. A sobre es col·loca l'altre rodet de  $\varnothing 30\text{mm}$  per on s'aplicarà la càrrega.



Abans de posar la proveta a sobre els rodets, es col·loquen els transductors com s'ha explicat anteriorment a la cara inferior de la proveta, els quals obtindran tota la informació del desplaçament horitzontal al llarg de l'assaig. Encara que no calen més transductors segons la norma, després de trencar dues provetes blanques es prova d'afegir dos transductors verticalment, un a cada cotat, per obtenir les dades de la fletxa. La velocitat de càrrega utilitzada és de 0,005mm/s. Les dades de l'assaig primer es determinen a 1Hz, i després es canvia a 5Hz per obtenir més dades.

### Imatge 5.4.3: Assaig de tres punts

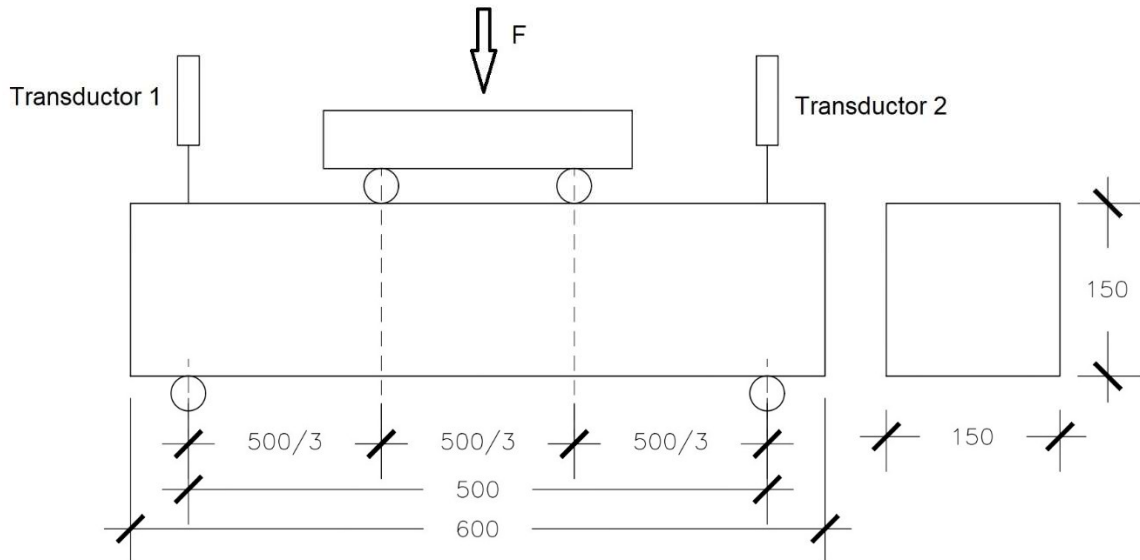


A les imatges es poden veure la col·locació dels transductors als extrems del prisma per gravar la fletxa de la proveta i els transductors a la cara inferior per obtenir l'obertura de fissura.

#### 5.4.4 ASSAIG A QUATRE PUNTS O DE CÀRREGA A TERÇOS

Les provetes prismàtiques de dimensions 150x150x600 es situen a sobre els rodets de  $\varnothing 30\text{mm}$ , separats 500mm. Un rodet està lliure al moviment, l'altre fixe. A sobre es col·loca una biga repartidora recolzada sobre dos rodets, ambdós amb moviment lliure. L'esquema seria el següent:

DIMENSIONAT I DISTÀNCIES



I, com s'ha comentat anteriorment, la col·locació dels transductors és la mateixa que a l'assaig de tres punts. La velocitat de càrrega utilitzada és de 0,005mm/s. Les dades de l'assaig es graven a 5Hz.

Imatge 5.4.4: Assaig de 4 punts



## 5.5 RESULTATS

### 5.5.1 RESULTATS ASSAIG COMPRESSIÓ

Per cada proveta es calcula la resistència a compressió i, per cada dia, es fa una mitja. Les provetes blanques arriben a una resistència a compressió mitja de 36,39 N/mm<sup>2</sup>. Pel que fa a les amassades amb fibres, els valors de compressió són més baixos degut a la incorporació de les fibres. Les fibres són conegudes per ser dèbils davant l'esforça a compressió.

<i>Tipus</i>	<i>Compressió</i> <i>N/mm<sup>2</sup></i>	<i>28 Dies</i> <i>C.V.<sup>3</sup> %</i>
CB1	36.39	0.05
CF2	20.33	0.15
CF3	17.13	0.04

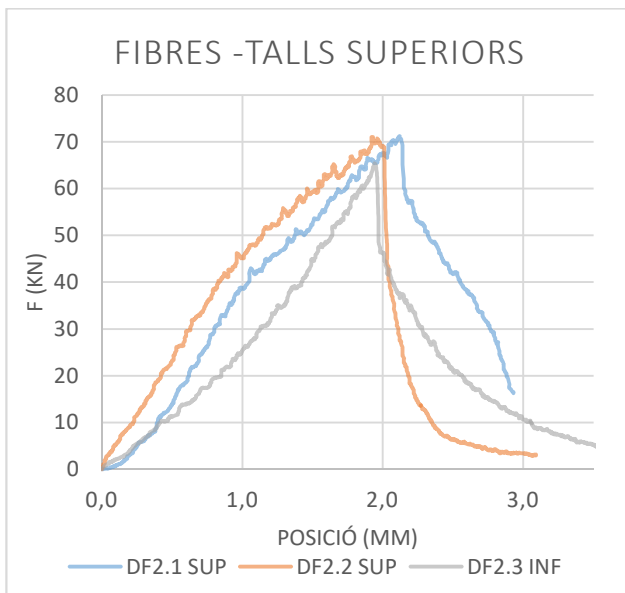
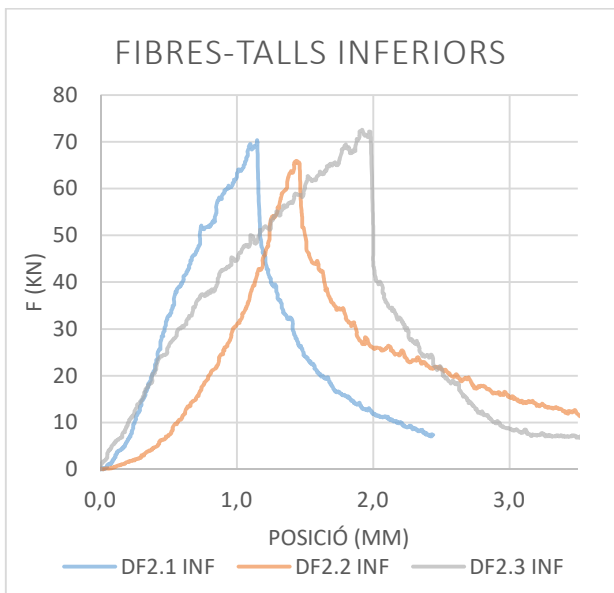
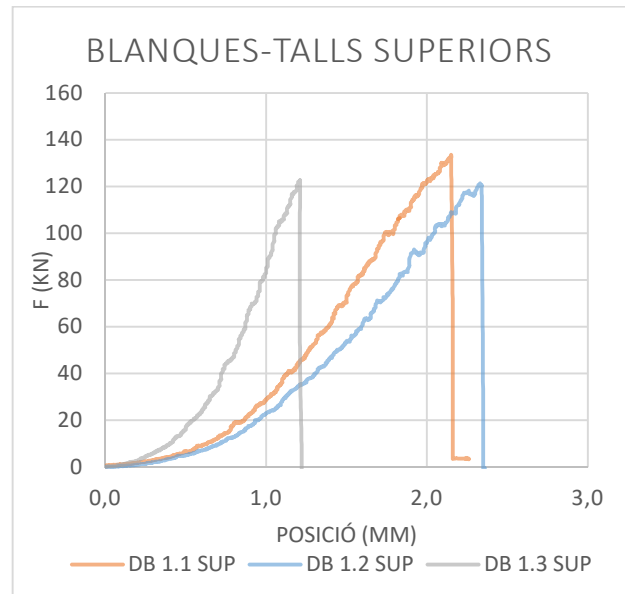
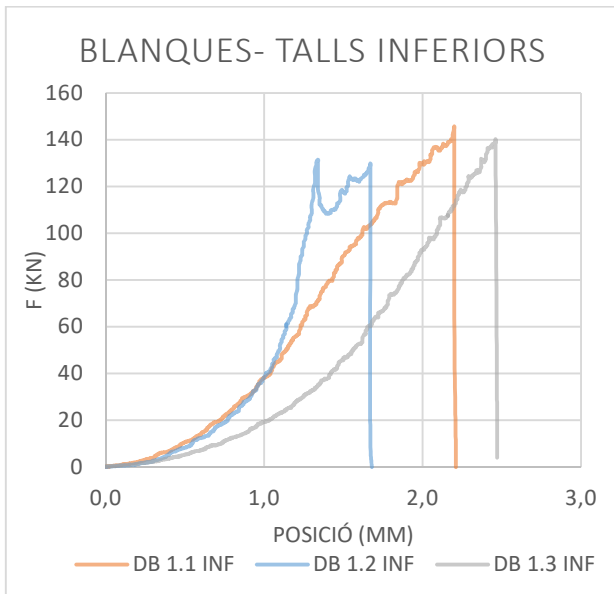
Els resultats de compressió mostren com el formigó amb fibres té una baixada de resistència a respecte al formigó sense. Coincidint així, amb els resultats de l'article, on el formigó reforçat amb fibres també pateix una baixada de resistència a compressió.

---

<sup>3</sup> C.V. per coeficient de variació.

## 5.5.2 RESULTATS ASSAIG TRACCIÓ BARCELONA O DOUBLE PUNCH TEST (DPT)

Les provetes, durant l'assaig, són carregades fins a la seva ruptura. L'equip d'assaig grava les dades càrrega-posició durant l'assaig. Les provetes o bé es trenquen després d'arribar a la càrrega màxima, com les provetes blanques, o pel contrari, les provetes amb fibres, suporten càrrega més temps i més deformació.



Pel càlcul dels resultats a tracció de l'assaig Barcelona, es necessita l'altura dels cons formats a causa de la força aplicada i dels discs de càrrega de 37.5 mm de diàmetre.

<i>Tipus</i>	<i>Posició tall</i>	<i>Num. fissures</i>	<i>Altura mm</i>	
			<i>Con superior</i>	<i>Con inferior</i>
DB1.1	Inferior	3	50	-
DB1.1	Superior	3	55	60
DB1.2	Inferior	3	70	70
DB1.2	Superior	2	-	68
DB1.3	Inferior	3	60	-
DB1.3	Superior	3	50	55
DF2.1	Inferior	3	-	80
DF2.1	Superior	3	-	60
DF2.2	Inferior	3	70	-
DF2.2	Superior	3	50	-
DF2.3	Inferior	3	65	50
DF2.3	Superior	3	55	-

Els resultats desglossats per cada proveta, diferenciant les parts inferiors de les parts superiors, calculats segons les expressions anomenades al punt 4.2, són:

<i>Tipus</i>	<i>Posició tall</i>	<i>F<sub>p</sub> (N)</i>	<i>σ (N/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>E(MPa)</i>	<i>ε</i>
DB1.1	Inferior	145.678,50	3,98	15.763,93	3,64E-04
DB1.1	Superior	133.023,60	3,63	13.440,82	3,61E-04
DB1.2	Inferior	131.454,00	3,83	16.784,42	3,36E-04
DB1.2	Superior	120.761,10	3,74	15.859,42	3,12E-04
DB1.3	Inferior	140.184,90	4,34	13.969,99	3,12E-04
DB1.3	Superior	122.723,10	3,11	16.811,35	3,97E-04
DF2.1	Inferior	70.337,70	1,64	14.459,00	4,36E-04
DF2.1	Superior	71.220,60	2,08	14.909,06	3,36E-04
DF2.2	Inferior	65.923,20	2,16	13.729,54	2,91E-04
DF2.2	Superior	71.024,40	1,65	12.631,81	4,36E-04
DF2.3	Inferior	72.594,00	1,84	16266,29	3,97E-04
DF2.3	Superior	65.432,70	2,03	12.268,18	3,12E-04

Per un millor anàlisi dels resultats, el resum de l'assaig Barcelona:

<i>Tipus</i>	<i>Posició tall</i>	$F_p$ (N)	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E$ (MPa)	$\varepsilon$
Blanques	Inferior	139.105,80	4,05	15.506,11	3,37 E-4
		(5,16%)	(6,49%)	(9,19%)	(7,72%)
Blanques	Superior	125.502,60	3,49	15.370,53	3,57 E-4
		(5,25%)	(9,65%)	(11,30%)	(11,99%)
Fibres	Inferior	69.618,30	1,88	14.818,27	3,75 E-4
		(4,87%)	(13,9%)	(8,81%)	(20,07%)
Fibres	Superior	69.225,90	1,92	13.269,68	3,61 E-4
		(4,75%)	(12,03%)	(10,79%)	(18,31%)

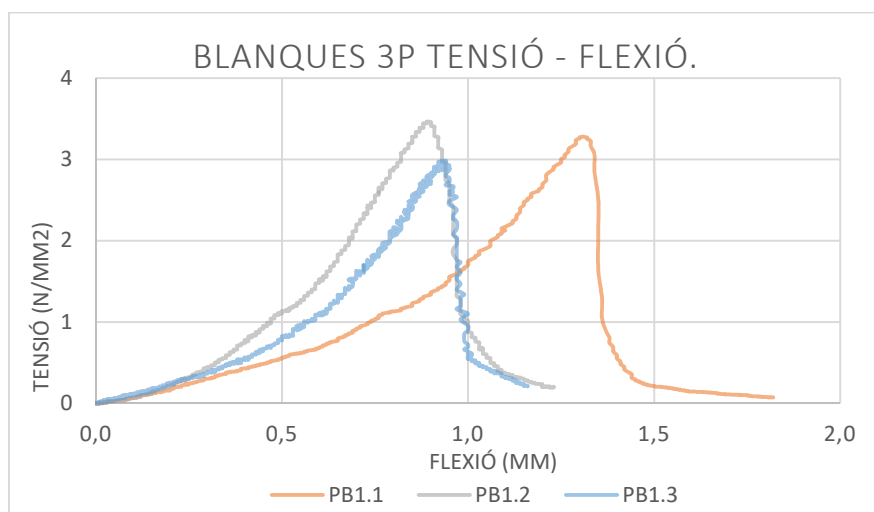
\* Els valors entre parèntesis corresponen als coeficients de variació.

### RESULTATS ASSAIG A FLEXIÓ

Amb les expressions anomenades al punt 4.3 es calculen els valors de del límit de proporcionalitat (LOP) i del mòdul de ruptura (MOR).

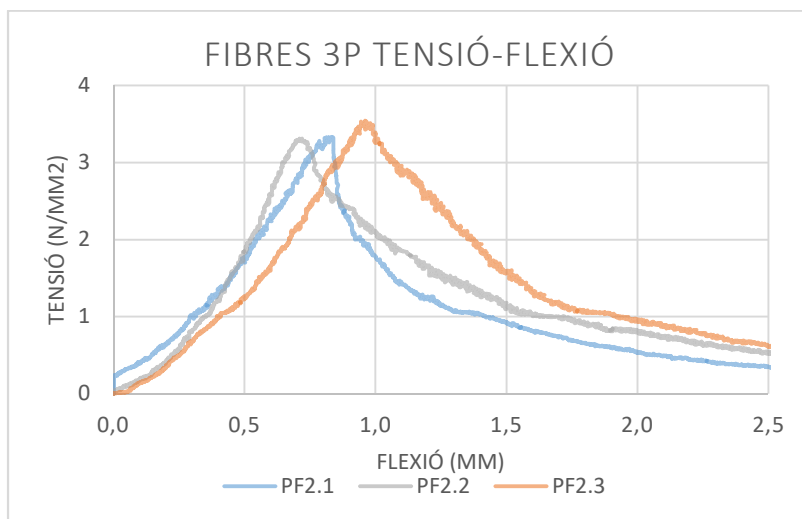
#### Assaig a tres punts

<i>Tipus</i>	$F_L$ (N)	$LOP$ (N/mm <sup>2</sup> )	<i>Promig LOP</i>	$F$ (N)	$MOR$ (N/mm <sup>2</sup> )	<i>Promig MOR</i>
PB1.1	10.249,49	3,28	3,18 (7,03%)	10.249,49	3,28	3,24 (7,46%)
PB1.2	10.407,53	3,33		10.831,61	3,47	
PB1.3	9.126,93	2,92	9.330,68	2,986		
PF2.1	9.455,37	3,03	3,22 (8,85%)	10.582,15	3,33	3,40 (3,44%)
PF2.2	9.613,31	3,08		10.348,96	3,31	
PF2.3	11068,43	3,54		11.068,43	3,54	



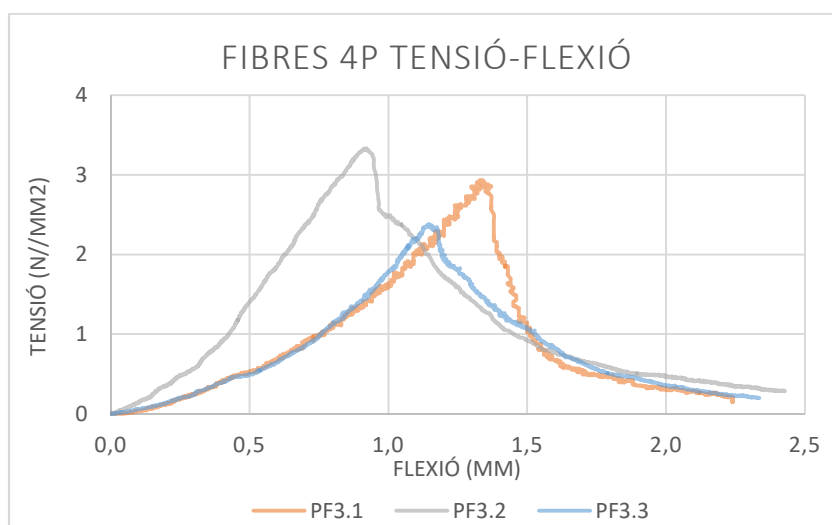


En el diagrames de l'assaig a tres punts es pot veure que les corbes referents al formigó amb fibres, comença a ascendir a una deformació menor que les corbes del formigó en massa. Aquesta diferència coincidiria amb els resultats a compressió, on es pot veure que el formigó reforçat amb fibres té pitjor comportament que un formigó en massa. En canvi, després del punt de ruptura, el formigó amb fibres té una baixada molt més suau.



#### Assaig a quatre punts

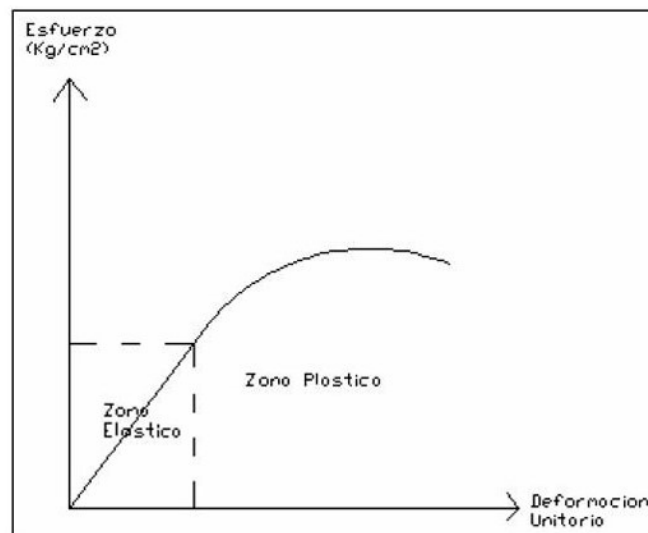
<b>Tipus</b>	<b>F (N)</b>	<b>MOR (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Promig MOR (N/mm<sup>2</sup>)</b>
PF3.1	19.805,11	2,93	2,88 (16,73%)
PF3.2	22.490,90	3,33	
PF3.3	16.062,40	2,38	



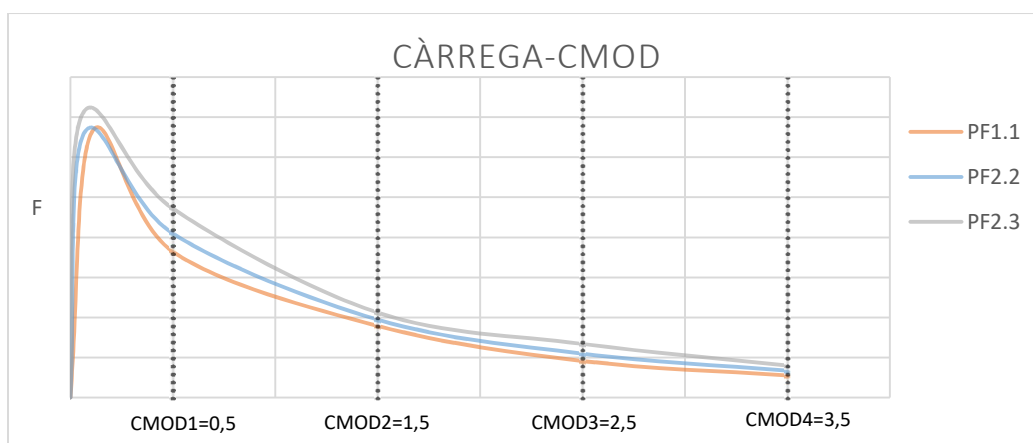
En l'assaig de quatre punt, es pot veure que una mostra de tres bigues és una campanya petita, ja que hi ha una dispersió de dades major que als altres assaigs.

Per la posterior comparació dels resultats entre els assaigs de flexió i l'assaig Barcelona, es necessita calcular el mòdul d'elasticitat (E). El mòdul d'elasticitat és la variable que tenen en comú els tres assaigs, sent una recta lineal que defineix el pendent de la primera part de la gràfica, la zona elàstica.

Després de la recta lineal, en el diagrama, apareix una branca que es manté, ascendeix o descendeix en funció del tipus de formigó. Aquesta branca és el que determina cada assaig.



L'assaig a flexió de tres punts, per relacionar la deformació a tracció del formigó amb l'obertura de fissura (seguint la proposta de la norma UNE 14561) i obtenir així la segona branca del diagrama, obté els valors de la tensió per obertures de CMOD igual a 0,5, 1,5, 2,5, i 3,5 mm, obtenint un diagrama que aproxima la corba.



Per fer la relació amb l'assaig de quatre punts, la norma estableix obtenir valors de  $\delta$  quan arriba a la tensió màxima, i quan és igual  $l/600$  i  $l/150$ . En els assajos però, s'arriba a una tensió màxima

amb una flexió superior a la associada a  $l/600$ , per tant el diagrama de càrrega-fletxa que es proposa a la norma no es pot fer.

I pel contrari, l'assaig Barcelona, no determina com obtenir aquesta segona branca.

Els resultats del mòdul d'elasticitat pels assaigs a flexió:

<b>Tipus</b>	<b>Assaig</b>	<b><math>F_p</math> (N)</b>	<b><math>\sigma</math> (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>E (MPa)</b>	<b><math>\varepsilon</math></b>
Blanques	3 Punts	10.137,26 (47,46%)	3,24 (7,46%)	14.163,38 (8,11%)	2,29 E-04
Fibres	3 Punts	10.666,51 (3,44%)	3,40 (3,44%)	19.488,04 (5,90%)	1,74 E-04
Fibres	4 Punts	19.473,57 (16,57%)	2,88 (16,73%)	19.004,83 (7,56%)	1,52 E-04

\* La tensió màxima en el cas de les provetes a flexió, és el valor anomenat MOR a les taules anteriors.

Aquests valors del mòdul d'elasticitat es calculen per obtenir el pendent de cada corba. Com es veu en les gràfiques, tenen un recorregut similar quan arriben més o menys al 50% del valor de la càrrega. Per tant els valors de E es calculen en un interval de 5 valors per sota i 5 valors per sobre el 50% de la càrrega.

### 5.5.3 DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

Awwad, per a provetes de formigó amb un 0.75% de fibres i una reducció de 20% de graves, obté els resultats següents:

Resistència a compressió:

<b>Tipus</b>	<b>3 Dies (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>7 Dies (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>28 Dies (N/mm<sup>2</sup>)</b>
Blanques	11.90	19.4	23.4
0.5% Polipropilè	11.5	16.1	20.4
0.5% Cànem	12.9	15.6	18.9
0.5% Cànem - 10% àrids	9.8	14.3	17.5
0.5% Cànem - 20% àrids	8.9	12.6	16.7
0.5% Cànem - 30% àrids	8.3	11.4	17.8
0.75% Cànem - 10% àrids	10.2	12.7	20.1
0.75% Cànem - 20% àrids	8.7	12.2	17.1
0.75% Cànem - 30% àrids	7.6	11.9	17.9

1% Cànem - 10% àrids	9.1	12.6	18.9
1% Cànem - 20% àrids	9.4	13.4	18.2
1% Cànem - 30% àrids	9.6	14.0	16.8

Arriba a la conclusió que, generalment, la resistència a compressió del formigó reforçat amb fibres tendeix a baixar amb la presència de fibres. Això succeeix perquè la addició de fibres resulta amb un increment del volum del formigó, on l'espai addicional és ocupat per les fibres, les quals són dèbils sota l'esforç a compressió.

Resistència a tracció:

<i>Tipus</i>	<i>7 Dies</i>	<i>28 Dies</i>
	<i>MOR (N/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>MOR (N/mm<sup>2</sup>)</i>
Blanques	2.6	3.4
0.5% Polipropilè	2.6	2.6
0.5% Cànem	2.3	2.3
0.5% Cànem - 10% àrids	2.2	2.9
0.5% Cànem - 20% àrids	2.1	2.7
0.5% Cànem - 30% àrids	2.2	2.7
0.75% Cànem - 10% àrids	2.6	3.1
0.75% Cànem - 20% àrids	2.3	2.6
0.75% Cànem - 30% àrids	2.4	2.5
1% Cànem - 20% àrids	2.3	2.2
1% Cànem - 30% àrids	2.4	2.8
1% Cànem - 10% àrids	2.9	3.0

Argumenta que, amb els resultats que obté, és evident que les fibres de cànem actuen millor amb el formigó amb una matriu amb quantitats majors de fibres i menys presència d'àrids.

Tal com es comenta al principi, l'objectiu principal del treball és determinar si al mimetitzar la dosificació i fabricació del formigó s'obtenen resultats semblants als resultats de Awwad i, en cas que així sigui, validar la metodologia.

Comparació resultats assaig flexió a tres punts entre Awwad i els obtinguts a 28 dies del treball:

<b>Tipus</b>	<b>Awwad MOR (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Treball MOR (N/mm<sup>2</sup>)</b>
Blanques	3.4	3.24
0.75% Cànem - 20% àrids	2.6	3.40

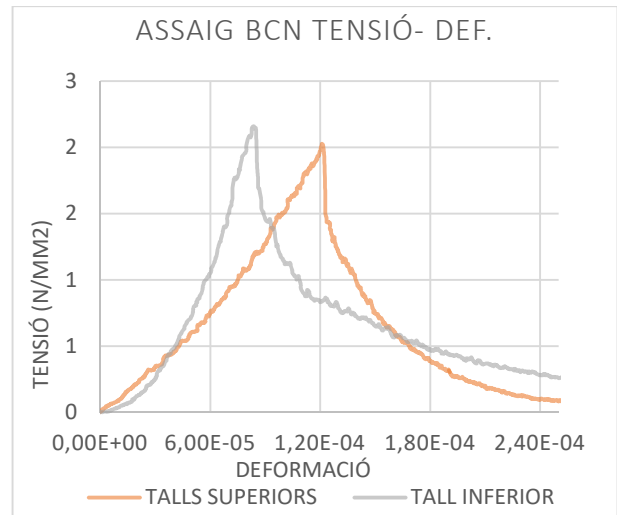
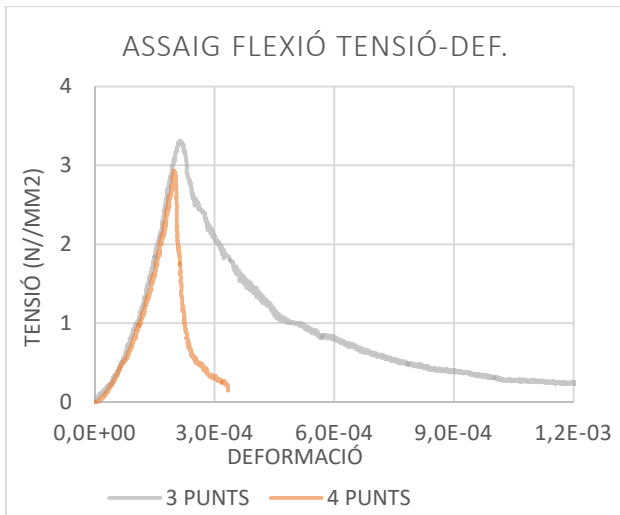
En l'assaig experimental s'obté més bons resultats que els que obté Awwad en el mateix assaig i amb el mateix tipus de formigó. Això significa que s'ha sabut adaptar la metodologia de la fabricació i producció del formigó.

Com la metodologia és vàlida i, com sempre s'ha seguit el mateix mètode, es pot comparar els resultants entre els diferents assaigs.

Per la comparació entre assaigs, s'exposa un resum del promig dels valors de tensió màxima, el mòdul d'elasticitat i la deformació.

<b>Assaig</b>	<b>Tipus</b>	<b><math>\sigma</math> (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>E(MPa)</b>	<b><math>\varepsilon</math></b>
Bcn	Blanca	3,77 (10,81%)	15.438,32 (9,22%)	3,47E-04 (9,68%)
3 Punts	Blanca	3,24 (7,46%)	14.163,38 (8,11%)	2,29 E-04
Bcn	Fibra	1,90 (11,71%)	14.043,98 (10,61%)	3,68E-04 (17,33%)
3 Punts	Fibra	3,40 (3,75%)	19.488,04 (5,90%)	1,74 E-04
4 Punts	Fibra	2,88 (16,60%)	19.004,83 (7,56%)	1,52 E-04

Pel que fa al comportament de tensió-deformació, veient les gràfiques es veu que arriben a valors similars. La corba ascendent de l'assaig a tres punts té una pendent similar a l'assaig de quatre punts, si s'obvia la primera part de la corba.



L'assaig de tres punts i el de quatre punts tenen una diferència de MOR de un 10%, que coincidiria amb la diferència de resistència a compressió. També cal destacar que durant la fabricació del formigó dels primers assajats a tres punts, s'obté una consistència líquida amb el con d'Abrams.

Els diagrames tenen la corba esperada. El formigó en massa es comporta de manera fràgil ja que no hi ha cap mecanisme que mantingui la fissura tancada i per tant la càrrega disminueix fins que el formigó peta.

En canvi pel formigó amb fibres, un cop la matriu ha fissurat, la tensió disminueix i s'inicia corba de deformació reblaniment (strain softening), on és localitza la fissura apareguda. La tensió va disminuint i l'obertura va augmentant fins el moment el qual el formigó no admet més tensió.

## 6. CONCLUSIONS

L'estudi dels assaigs es basa en una campanya petita. Una campanya experimental de tres provetes per assaig és orientativa qualitativament però no és quantitativa.

Una vegada analitzats els resultats i les gràfiques pertinents, s'arriba a les conclusions següents.

### Respecte al procediment

- El mètode seguit per la barreja del formigó aconsegueix una barreja homogènia, i per tant les fibres queden ben repartides i distribuïdes dins la matriu de formigó.



- La preparació dels materials per la fabricació del formigó necessita dedicació i, en el cas de les fibres, moltes hores de treball manual. A més, la neteja del l'àrid i de la sorra impliquen la utilització de gran quantitats d'aigua, el que s'hauria de millorar per no gastar-ne tanta.
- La utilització d'una formigonera amb cubicatge reduït augmenta el número d'amassades i, com a conseqüència, augmenta la dispersió de dades. Una formigonera amb cubicatge suficient per fabricar la quantitat suficient per emplenar totes les provetes seria necessari per garantir que el formigó té les mateixes propietats.

### Respecte a les semblances i diferències dels diferents assaigs realitzats

- Els tres assaigs realitzats per determinar la resistència a tracció del formigó no tenen un grau de dificultat alt.
- L'assaig Barcelona és senzill i ràpid ja que no necessita de més utilitatge que els cilindres d'acer per l'aplicació de la càrrega i l'equip necessari és comú en tots els laboratoris

d'estructures i construcció. L'inconvenient de l'assaig Barcelona és la lectura de les mesures dels cons formats després de la ruptura, ja que no són cons perfectes.

- L'assaig de tres punts o càrrega centrada és l'assaig que necessita més dedicació i temps per preparar. La proveta de formigó necessita una entalla de dimensions determinades, necessita transductors a la cara inferior, els quals s'han de marcar prèviament, enganxar una platina per la subjecció del transductor i, un cop acabat l'assaig s'ha de netejar aquesta per repetir el procés amb la proveta següent. L'avantatge de l'assaig a tres punts, és que el lloc de la fissura és previsible i que es poden gravar més variables que les que diu la norma si es necessita, com per exemple la flexió.
- L'assaig a quatre punts o de càrrega a terços té l'inconvenient que la fissura no és previsible com a l'assaig a tres punts i que, per tant, és difícil gravar les dades de l'obertura de la cara inferior. En canvi el set-up de l'assaig és ràpid i senzill, el que és una avantatge.
- Pel que fa a les màquines utilitzades durant l'assaig, l'equip utilitzat per l'assaig de flexió és l'equip més complex, ja que s'han de connectar els transductors i la premsa al quàntum.
- Les variables definides en cada assaig són diferents entre elles, fent que la comparació entre resultats sigui més difícil. El valor del mòdul d'elasticitat es pot calcular en els tres assaigs, valor que determina la primera franja de la corba.
- Després del primer tram de la gràfica, definida pel mòdul d'elasticitat, es dibuixa el comportament plàstic del formigó, el qual l'assaig a tres punts determina mitjançant el CMOD i l'assaig a quatre punts mitjançant la flexió dibuixant la corba amb el punt màxim, el punt  $l/600$  i el punt  $l/150$ . L'assaig Barcelona, en canvi, no determina cap variable per dibuixar el comportament plàstic del formigó, el que necessitaria d'estudis posteriors a aquest per completar aquesta comparació entre assajos.

#### Respecte a les propietats mecàniques

- El formigó en massa té una resistència a compressió molt més alta que el formigó amb fibres. Les fibres són conegudes per ser dèbils davant l'esforç a compressió, per això, al introduir les fibres dins la matriu de formigó, juntament amb la reducció de graves, la resistència baixa.
- El formigó amb fibres naturals de cànem arriba a valors de resistència a tracció iguals o gairebé iguals al formigó sense fibres, amb la diferència que el formigó reforçat té un comportament més plàstic post-fissura. No suporta més càrrega, però sí més temps.

#### Altres consideracions

- Un formigó més sostenible per al medi ambient amb característiques mecàniques favorables és possible.



- Encara que en aquest treball s'arriba a la conclusió que les fibres naturals de cànem tenen bona resistència a tracció, un estudi de com actuen al llarg del temps seria necessari. En aquest treball s'han trencat les provetes a 28 dies des de la seva fabricació, però per la utilització del tipus de formigó en el món de la construcció, s'ha d'estudiar com es desenvolupen les fibres naturals dins la matriu a llarg termini.

## 7. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- [1] D. E. Fomento, «Instruccion de Hormigón Estructural (EHE-08)».
- [2] H. Goiaz, *Quality Evaluation Tests for Tensile Strength of Reactive Powder Concrete*, vol. 30. 2018.
- [3] I. Merta y E. K. Tschegg, «Fracture energy of natural fibre reinforced concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 991-997, 2013.
- [4] A. Mechanics, «Direct Tensile Strength Measurement of Concrete Mohammad Iqbal Khan», pp. 9-14, 2012.
- [5] H. Wen, D. Ph, M. Asce, S. Bhusal, y X. Li, «Double Punch Test : A Simple Performance Test to Evaluate the Fatigue and Double Punch Test : Simple Performance Test to Evaluate the Fatigue and Rutting Potential of Asphalt Concrete», n.º November 2014, 2012.
- [6] R. V Balendran, F. P. Zhou, A. Nadeem, y A. Y. T. Leung, «In uence of steel ýbres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete», vol. 37, pp. 1361-1367, 2002.
- [7] Y. Dong-suk, P. Sun-Kyu, y W. N. Kenneth, «Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams», *Compos. Struct.*, vol. 1, n.º 1, pp. 497-508, 2009.
- [8] B. Çomak, A. Bideci, y Ö. Salli, «Effects of hemp fibers on characteristics of cement based mortar», vol. 169, pp. 794-799, 2018.
- [9] A. Alam y K. Al, «Shear strengthening of reinforced concrete beam using natural fibre reinforced polymer laminates», *Constr. Build. Mater.*, vol. 162, pp. 683-696, 2018.
- [10] K. Sandin, C. Nilsson, P. Brigitte, y D. Bruijn, «Mechanical properties of lime – hemp concrete containing shives and fibres», vol. 103, pp. 474-479, 2009.
- [11] D. Sedan, C. Pagnoux, A. Smith, y T. Chotard, «Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement : Influence of the fibre / matrix interaction», vol. 28, pp. 183-192, 2008.
- [12] S. C. Malatesta, A. A. De Cea, C. M. Borrell, M. C. Contreras, U. Técnica, y F. Santa, «Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento ( ensayo barcelona ) Quality control of fiber reinforced concretes by mean of double punshing test ( barcelona test )», vol. 24, pp. 119-140, 2009.
- [13] E. Awwad, B. S. Hamad, y H. Khatib, «Sustainable concrete using hemp fibres», n.º May 2016, 2012.
- [14] I. O. P. C. Series y M. Science, «Effect of kenaf fiber in reinforced concrete slab», 2018.

- [15] C. Molins, Æ. A. Aguado, y Æ. S. Saludes, «Double Punch Test to control the energy dissipation in tension of FRC ( Barcelona test )», pp. 415-425, 2009.
- [16] Z. Li, X. Wang, y L. Wang, «Properties of hemp fibre reinforced concrete composites», vol. 37, pp. 497-505, 2006.
- [17] AENOR, «UNA-EN 12390-3. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas», pp. 0-1, 2011.
- [18] AENOR, «UNE 83515 Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona.», 2010.
- [19] A. Blanco, P. Pujadas, S. Cavalaro, A. De Fuente, y A. Aguado, «Cement & Concrete Composites Constitutive model for fibre reinforced concrete based on the Barcelona test», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 53, pp. 327-340, 2014.
- [20] E. Standard, «EN 14651. Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength ( limit of proportionality ( LOP ), residual )», 2005.
- [21] E. Awwad, M. Mabsout, B. Hamad, M. Talal, y H. Khatib, «Studies on fiber-reinforced concrete using industrial hemp fibers», vol. 35, n.º 2012, pp. 710-717, 2020.
- [22] AENOR, «UNE-EN 12390-2. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia», 2015.