

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Arquitectura Tècnica

**Títol:** ANÀLISI I DISSENY D'UNA BIGA DE FORMIGÓ D'ALTES PRESTACIONS.

**Document:** Memòria

**Alumne:** Pere Font Puigdevall

**Tutor:** Dr. Miquel Llorens Sulivera

**Departament:** Enginyeria Mecànica de la construcció industrial.

**Àrea:** MMCTE

**Convocatòria:** (setembre/2019)



## PREÀMBUL

En primer lloc, vull donar les gràcies als meus pares. Ells són qui m'han donat l'oportunitat de perseguir els meus somnis i m'han donat el suport necessari durant tots els anys a la universitat. També són la base de les persones que tinc en aquest moment, i estic segur que em seguiran donant suport en els propers passos de la meva vida.

En segon lloc vull expressar el meu agraïment al meu supervisor, el Dr. Miquel Llorens, per donar-me l'oportunitat de fer un treball sota la seva supervisió. Agraïxo la seva ajuda i consells durant el desenvolupament del treball i sobretot per passar el seu valuós temps aconsellant-me i per ajudar-me amb qualsevol problema que m'hagi trobat.

A continuació, també vull felicitar el responsable del laboratori, Pere Bellvehi, per la seva ajuda i experiència durant les proves dels preparatius fins a l'execució de la biga. El seu coneixement pràctic és indescriptible, sense ell hauria estat totalment diferent.

Finalment un últim agraïment a tot el professorat que m'ha ensenyat i format durant el transcurs de la meva trajectòria de formació com a graduat en arquitectura tècnica i edificació. Ells són qui m'han marcat les bases i pautes a seguir per continuar aprenent i millorant. Sense tots ells aquest treball i la meva actual feina professional no hauria estat possible.

Desitjo que tingueu una bona i agradable lectura.

Pere Font Puigdevall, Girona, setembre del 2019.

## RESUM

Avui dia s'estan realitzant extenses investigacions arreu del món enfocades en l'anàlisi i estudi del formigó d'alt rendiment reforçat amb fibres (UHPFRC). A diferència d'altres formigons convencionals, les seves propietats depenen en gran manera de la rigidesa aportada per la contribució de les fibres després del trencament inicial de la matriu de formigó.

Aquest treball es centra principalment en l'estudi, disseny i anàlisi del comportament d'un prototip de biga fet amb formigó amb fibres, així com aprofundir i conèixer més sobre aquest tipus de formigó i les seves propietats bàsiques.

Prèviament es farà una recerca d'informació dirigida a l'estudi del formigó barrejat amb fibres, les seves característiques principals, les diferències més genèriques envers els formigons tradicionals, la normativa que el regula i alguns casos reals on s'hagi utilitzat.

A continuació es pretén aprofitar al màxim les propietats que ofereix aquest tipus de formigó, com són els esforços a tallant i a compressió, dissenyant una biga que permeti evitar l'esforç a flexió. Per a fer-ho possible, s'ha utilitzat el procediment gràfic anomenat Polígon Funicular, obtenint un model de biga en forma geomètrica cònca. Tot seguit, en base al model de biga obtingut es decideix col·locar dues bigues creuades en forma de "X", i també un taulell a la part superior que les uneix, per així evitar el possible vinclament que es pogués produir a causa de la secció reduïda que li és pròpia.

Posteriorment s'introdueix el model generat al programa informàtic ANSYS. S'obtenen els primers resultats i es generen les primeres hipòtesis.

A continuació es procedeix al disseny i muntatge de l'encofrat per a ser formigonat d'una sola pastada. S'ha portat a terme a través de tall mecanitzat controlat per ordinador, amb grau de precisió elevat. Es formigona la peça amb la següent dosificació: 90 Kg de morter *SIKAGROUT 213*, 1 Kg de fibres polimèriques *MASTERFIBER 400* i 13,5 l d'aigua. Es desencofra tot l'element i es pinta de color blanc per veure amb més claredat les fissures generades durant l'assaig.

Finalment s'ha realitzat un assaig a flexió a 4 punts obtenint uns resultats molt satisfactoris. Es compara en diversos aspectes el model numèric fet amb ordinador, i el model experimental real fet al laboratori. Sorprenentment el model experimental ha resistit més càrrega que la prevista en el model numèric, però per altra banda el model experimental ha sofert més deformacions de les

esperades, a causa de que el model numèric ha estat modelitzat tenint en compte les deformacions inicials del model experimental. ANSYS treballa generant un model de prototip lineal, amb un comportament que no té en consideració els desperfectes de la geometria ni les fissures que es produeixen.

Cal dir, que el prototip realitzat en aquest treball a estat un primer model experimental per veure com podria funcionar un element de dimensions superiors. L'objectiu en un futur seria utilitzar aquesta peça amb majors dimensions, com a un element estructural prefabricat, amb la funció de biga i forjat al mateix temps, tot ell recolzat per les seves potes o per un encaix a les jàsseres o murs de càrrega.

Dirigit a futures investigacions per a una millora de la peça en qüestió, es recomana dissenyar un model amb una secció del nucli central amb majors dimensions que l'actual, i que aquesta contingui les arestes de les entregues arrodonides per disminuir i distribuir millor les tensions que es puguin generar.

# ÍNDEX

PREÀMBUL.....	3
RESUM.....	4
ÍNDEX.....	6
NOMENCLATURA.....	8
1. INTRODUCCIÓ .....	9
1.1. Introducció.....	9
1.2. Objectius.....	9
1.3. Full de ruta.....	9
2. ESTAT DE L'ART .....	11
2.1. El formigó UHPFRC.....	11
2.2. Diferència entre l'UHPFRC i altres formigons: .....	23
2.3. Normativa d'aplicació:.....	23
2.4. Designació del formigó: .....	24
2.5. Tipus de fibres: .....	24
2.6. Aplicacions de l'UHPFRC: .....	29
3. DESENVOLUPAMENT:.....	34
3.1. Disseny i geometria del prototip:.....	34
3.2. Preparació i muntatge de l'encofrat:.....	38
3.3. Materials utilitzats i dosificació: .....	42
3.4. Formigonat de la peça: .....	50
3.5. Assaig i trencament del prototip:.....	55
4. CONCLUSIONS: .....	68
Índex d'imatges:.....	70
Índex de gràfics: .....	71
Índex de taules: .....	71
5. BIBLIOGRAFIA.....	72
6. ANNEX .....	74

6.1.	Exposició del prototip (Revit): .....	74
6.2.	Exposició del prototip (Lumion):.....	77

## NOMENCLATURA

fck	Resistència a la compressió
l1	Longitud
d1	Diàmetre equivalent
$\lambda$	Esveltesa
$\epsilon_c$	Tensió a compressió
$E_c$	Mòdul elàstic
$\alpha$	Desviació lineal
$\gamma_C$	Factor parcial per al formigó
$\alpha_{cc}$	Coeficient resistència a compressió
fctfm	Màxima tensió post-fissuració
fcm	Estrès mitjà màxim en compressió
Ecm	Mòdul secant
$E_{c,eff}$	Mòdul efectiu
$\varphi$	Coeficient de fluència
FL i fR,3,K	Límit de proporcionalitat
F1 i F3	Obertures de fissura
fct,fl	Resistència a flexotracció
fR,1 i fR,3	Resistència residual a flexotracció
fR,1;k	Resistència residual a tracció per flexió
Zf Act fctR,d	Contribució de les fibres
Zf	Braç mecànic de la tracció del formigó
Act	Àrea traccionada del formigó
fctR,d	Resistència residual a tracció
lcs	Longitud crítica en metres
x	Profunditat de l'eix neutre
h - x	Distància eix neutre a extrem més traccionat
$\sigma_f$	Rendiment post-fissura aportat per les fibres
lf	Longitud fibra
VRd, Max	Resistència formigó amb puntuals compressives
VRd, c	Capacitat de cisallament
sm	Distància mitja entre fissures



# 1. INTRODUCCIÓ

## 1.1. Introducció

El formigó d'altres prestacions reforçat amb fibres, conegut internacionalment com a UHPC, o més recentment com a UHPFRC (**Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete**), és un material de construcció bastant nou. Consisteix en una mescla de ciment millorada amb fibres, amb una resistència a la compressió (fck) superior a 150 MPa fins a un màxim de 250 MPa.

A causa de la seva composició i alt contingut d'aglomerant presenta poca porositat capil·lar, donant com a resultat una bona durabilitat de les fibres contingudes en la massa del formigó. L'addició de fibres a la mescla de ciment principalment significa un reforç per evitar que les esquerdes que es produeixin al formigó es facin més grans. La seva capacitat de trencament garanteix una retenció de la resistència a tracció a llarg termini.

## 1.2. Objectius

- Aprofundir en el coneixement del comportament del formigó reforçat amb fibres UHPFRC, especialment a esforços de compressió i tallant.
- Dissenyar, investigar i analitzar un model compost amb formigó d'alt rendiment reforçat amb fibres (UHPFRC).
- Definir una geometria que garanteixi un comportament generalitzat a compressió de tota la peça.
- Definir criteris per a dissenyar aquest tipus d'estructura.
- Comparar i avaluar els resultats obtinguts d'un prototip experimental fet al laboratori amb un model numèric fet amb ordinador.

## 1.3. Full de ruta

Per assolir els objectius s'han previst les següents activitats:

- Estudi acurat del formigó reforçat amb fibres.
- Recopilació d'informació de la tècnica utilitzada en proves realitzades a través d'elements semblants d'UHPFRC.
- Valoració i anàlisi de l'ús del formigó d'altres prestacions en casos reals.
- Disseny i realització d'un model numèric fet amb ordinador.
- Disseny i construcció d'un model experimental de formigó reforçat amb fibres.

- Assaig de la biga.
- Anàlisi de resultats i redacció de conclusions.
- Recomanacions per a futurs desenvolupaments.

Segons els resultats obtinguts, es donaran directrius per a futurs desenvolupaments.

## 2. ESTAT DE L'ART

### 2.1. El formigó UHPFRC

#### 2.1.1. Propietats bàsiques:

El formigó d'altres prestacions barrejat amb fibres (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete) es distingeix de la resta de formigons d'alt rendiment principalment per:

- Gran resistència a la compressió superior a 150 MPa.
- Fabricat amb fibres polimèriques, orgàniques o metàl·liques, àrids silícis amb una mida màxima d'1 mm i altres dosis de contingut superiors al 2% en volum per obtenir un comportament de tracció dúctil i per superar el reforçament passiu.
- Gran resistència a la flexió, tracció postfissura i desgast.
- Consistència fluida/líquida.
- Forta dosificació aglutinant ( $> 700 \text{ kg} / \text{m}^3$ ).
- Contingut de fums de sílice per augmentar la compacitat (25% de la dosi de ciment).
- Alta dosificació de superplastificant a causa del baix volum d'aigua.

#### 2.1.2. Resistència a compressió:

El formigó Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) pot apropar-se fàcilment a una resistència a la compressió de 150 MPa, o sigui uns  $1.500 \text{ kg/cm}^2$ . Les investigacions actuals sobre aquest tema demostren que fins i tot pot arribar fins a un valor de 250 MPa, i el trencament ha de produir-se més enllà del límit de proporcionalitat tensió-deformació, o sigui amb certa ductilitat.

La fórmula a continuació representa l'equació de tensió-deformació definida com una funció de la desviació de la resposta elàstica lineal<sup>1</sup>. L'esforç a compressió,  $f_c$ , es defineix pel producte de la tensió a compressió,  $\epsilon_c$ , el mòdul elàstic,  $E_c$ , i  $1 - \alpha$ . Aquest paràmetre de desviació lineal representa la magnitud de quant es desvia la corba de tensió real de la corba lineal-elàstica. La gràfica posterior mostra el comportament real de la tensió-deformació per compressió de l'UHPFRC en comparació a la resposta elàstica lineal.

$$f_c = \epsilon_c E_c (1 - \alpha)$$

---

<sup>1</sup> Aquesta expressió va ser proposada per primera vegada per Graybeal (2007)

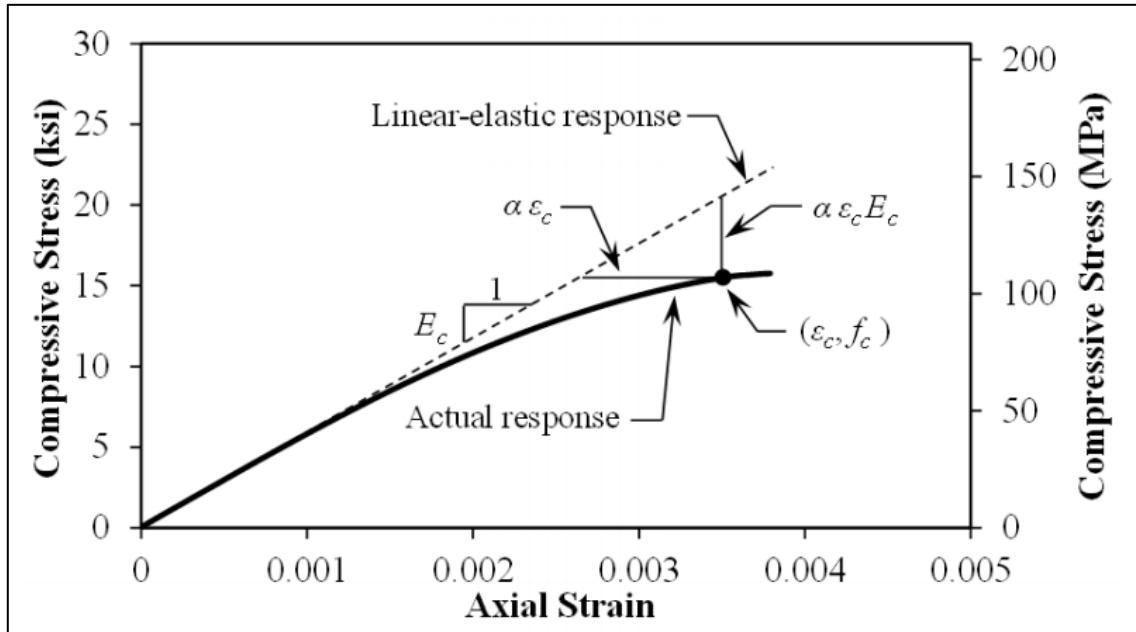
On:

$f_c$ = esforç a compressió

$\epsilon_c$ = tensió a compressió

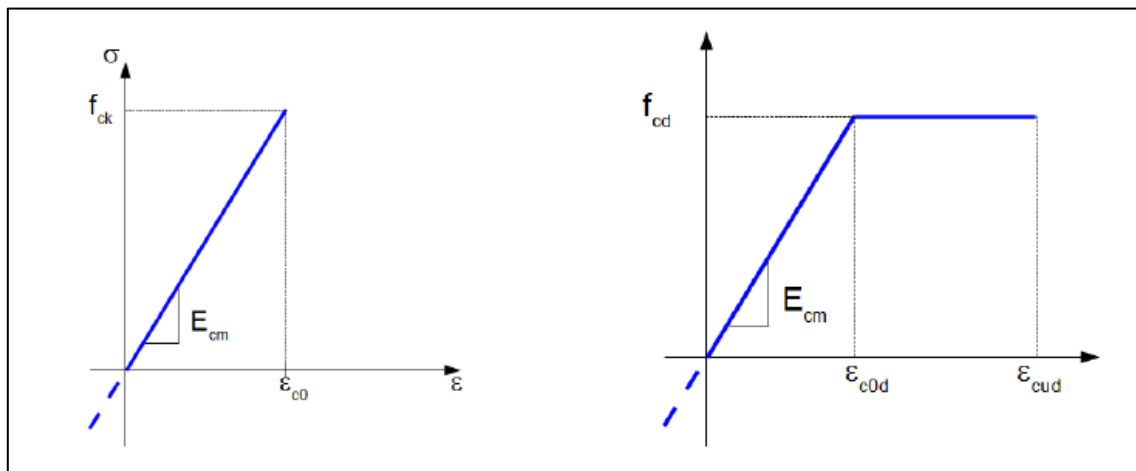
$E_c$ = mòdul elàstic

$\alpha$ = paràmetre desviació lineal



Gràfic 1: Comportament real de la tensió-deformació per compressió de l'UHPRFC.

En sol·licitacions de compressió, el diagrama tensió-deformació no es modifica, pel fet que es pot considerar que l'addició de fibres no varia de forma significativa el comportament del formigó.



Gràfic 2: A l'esquerra Lleis ELS/SLS, a la dreta Lleis ELU/ULS.

$$\epsilon_{c0} = f_{ck}/E_{cm}$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_C$$

$$\epsilon_{c0d} = f_{cd}/E_{cmc}$$

$\gamma_C$  és el factor parcial per al formigó de la norma EN 1992-1.1.

$\alpha_{cc}$  és un coeficient que té en compte els efectes a llarg termini de la força a compressió i els efectes negatius resultants de la manera com s'aplica la càrrega. El valor recomanat és 1 en formigons normals i 0,85 per a formigons reforçats amb fibres.

En el cas del disseny preliminar, es recomana  $f_{cm} = 180$  MPa,  $f_{ck} = 150$  MPa i, per tant,  $f_{cd} = 85$  MPa.

Es pot utilitzar el següent valor de  $\epsilon_{c0d}$ :

$$\epsilon_{c0d} = [1 + 14 (f_{ctfm} / f_{cm})]. \epsilon_{c0d}$$

$f_{ctfm}$  és la màxima tensió post-fissuració mitjana en tensió.

$f_{cm}$  és l'estrès mitjà màxim en compressió.

En el cas del disseny preliminar, es recomana  $\epsilon_{c0d} = 2,7 \cdot 10^{-3}$  (prenent  $f_{ctfm} = 9$  MPa).

### 2.1.3. Mòdul de Young:

Per calcular l'estrès, es pot considerar directament el mòdul secant  $E_{cm} = 50$  GPa.

Pel càlcul de les deformacions en ELS, es pot tenir en compte la fluència mitjançant l'ús directe del mòdul efectiu  $E_{c,eff}$  definit per una càrrega aplicada en el temps  $t_0$  com:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi}$$

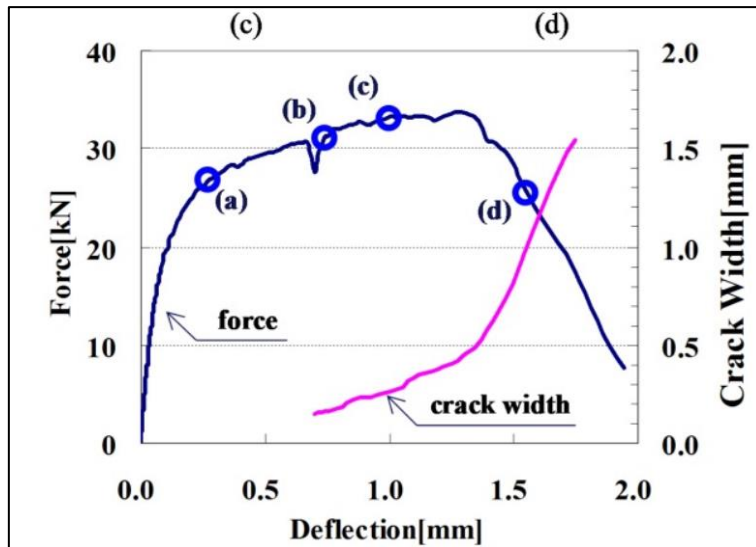
On  $\varphi$  és el coeficient de fluència

### 2.1.4. Resistència a flexió:

Una de les millors maneres de determinar la resistència a la flexió d'una biga UHPFRC és realitzar una prova de flexió de tres o quatre punts i representar les corbes de càrrega-desviació per veure el comportament. La prova es desenvolupa amb un indicador CMOD (desplaçament d'obertura de la boca esquerdada), també es podria analitzar el comportament de craqueig<sup>2</sup>.

---

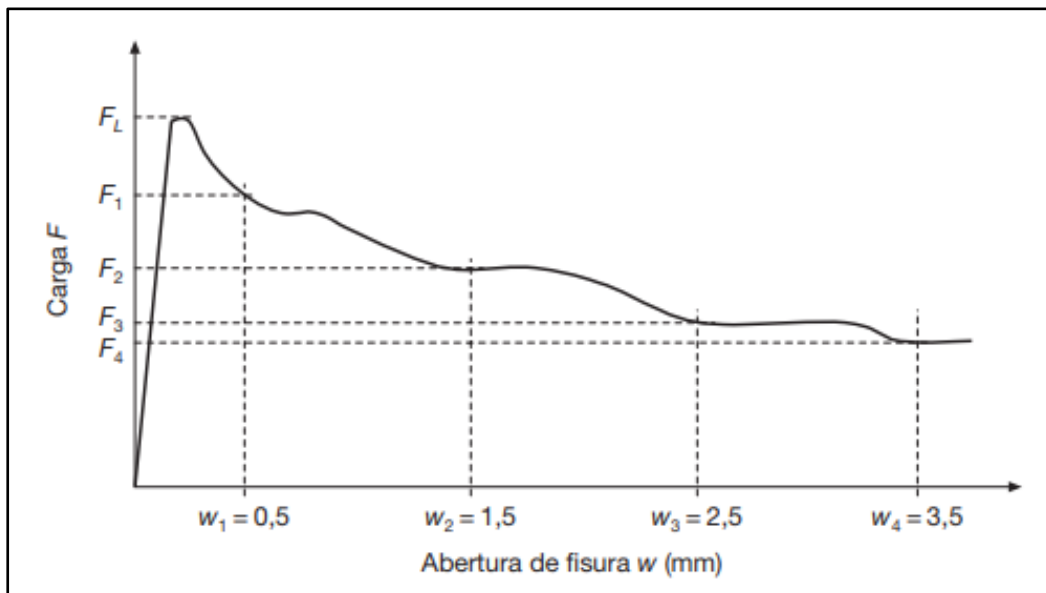
<sup>2</sup> Shin & Jang, 2015



Gràfic 3: Càrrega-desviació d'assaig a flexió.

A partir l'assaig proposat a la UNE-EN 14551 s'obté el diagrama càrrega-obertura de fissura del formigó. Utilitzant els valors de càrrega corresponents al límit de proporcionalitat ( $F_L$ ) i a les obertures de fissura 0,5 mm i 2,5 mm ( $F_1$  i  $F_3$ ), s'obté el valor de resistència a flexotracció ( $f_{ct,fl}$ ) i els valors de resistència residual a flexotracció corresponents:  $f_{R,1}$  i  $f_{R,3}$ .

Els valors de resistència a flexotracció i de resistència residual a flexotracció segons la norma UNE-EN 14651 es realitza assumint una distribució elàstica lineal de tensions en la secció de trencament.



Gràfic 4: Diagrama càrrega-obertura de fissura.

Per considerar les fibres com a funció estructural, la resistència característica residual a tracció per flexió  $f_{R,1,k}$  no hauria de ser inferior al 40% del límit de proporcionalitat i  $f_{R,3,K}$  inferior al 20% del límit de proporcionalitat.

Les fibres amb funció estructural com és en el nostre cas, o soles han de complir la següent limitació:

$$A_p f_{pd} \frac{d_p}{d_s} + A_s f_{yd} + \frac{z_f}{z} A_{ct} f_{ctR,d} > \frac{W_1}{z} f_{ctm} + \frac{P}{z} \left( \frac{W_1}{A} + e \right)$$

On:

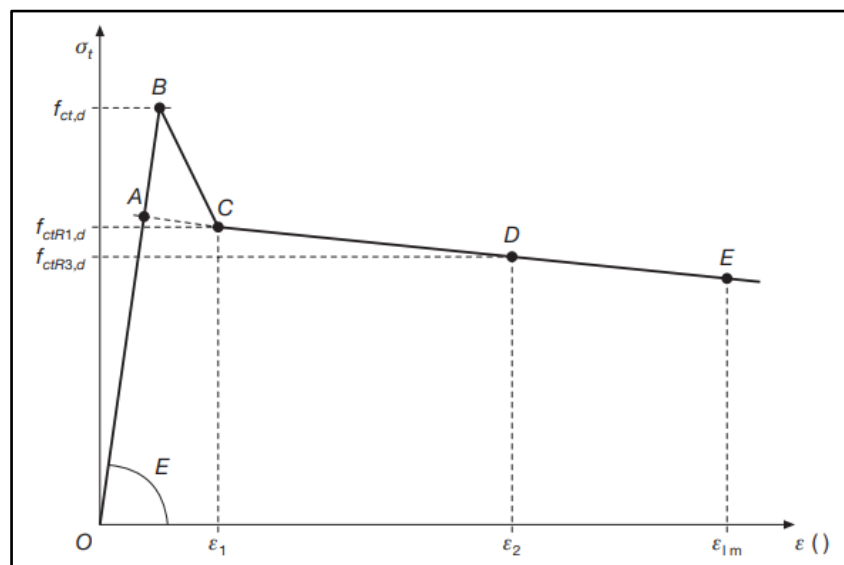
$Z_f A_{ct} f_{ctR,d}$  és la contribució de les fibres.

$Z_f$  és el braç mecànic de la tracció del formigó.

$A_{ct}$  L'àrea traccionada del formigó.

$f_{ctR,d}$  La resistència residual a tracció.

Pel càlcul de la secció sotmesa a sol·licitacions normals, en els Estats Límits Últims es prendrà el següent diagrama multilinear tensió ( $\sigma$ )-deformació ( $\epsilon$ ) definit per una resistència a tracció de càlcul  $f_{ctR1,d}$ ,  $f_{ctR3,d}$ , associades a les deformacions  $\epsilon_1$  i  $\epsilon_2$ , on:



Gràfic 5: Diagrama de càlcul multilinear tensió-deformació.

$f_L$  = Càrrega corresponent al límit de proporcionalitat.

$f_{ct,d} = 0,6 f_{ct,fl,d}$

$f_{ctR1,d} = 0,45 f_{R,1,d}$

$$f_{ctR3,d} = K_1 (0,5 f_{R,1,d} - 0,2 f_{R,1,d})$$

$K_1 = 1$  per seccions sotmeses a flexió i  $0,7$  per seccions sotmeses a tracció.

$$\epsilon_1 = 0,1 + 1.000 f_{ct,d} / E_{c,0}$$

$$\epsilon_2 = 2,5 / l_{cs}$$

$\epsilon_{lim} = 20\text{‰}$  per seccions sotmeses a flexió i  $10\text{‰}$  per seccions sotmeses a tracció.

$l_{cs}$  = Longitud crítica (en metres) de l'element calculat que pot determinar-se per l'expressió:

$$l_{cs} = \min (s_m \cdot h - x)$$

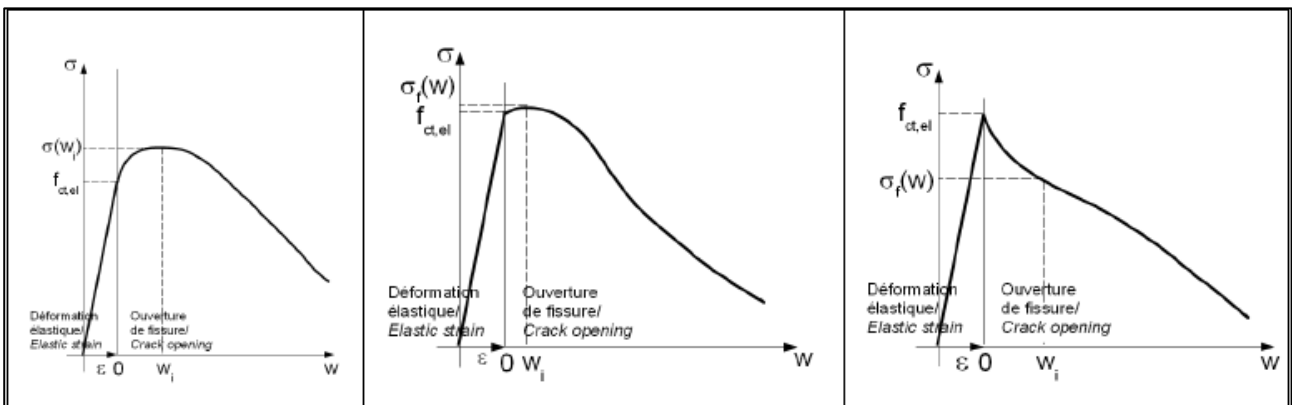
On:

$x$  = profunditat de l'eix neutre

$h - x$  = distància entre eix neutre a l'extrem més traccionat.

$s_m$  = distància mitjana entre fissures.

### 2.1.5. Resistència a tracció:



Gràfic 6: Exemple del comportament a tracció d'un UHPFRC.

El formigó UHPFRC, de la mateixa manera que els formigons ordinaris, té un comportament lineal elàstic en tracció fins a un valor límit  $f_{ct}$ . No obstant això, a diferència del normal, l'estrès no esdevé nul després d'aquest límit, a causa de l'efecte de les fibres. Això és causat per les fibres, que s'apoderen de la matriu de ciment després de produir-se el trencament. La resistència a la tracció equilibrada per les fibres es tradueix convencionalment en estrès igual al quocient de la força i de la superfície de la secció transversal del formigó.

La quantitat de fibres, la seva longitud i la seva relació longitud-diàmetre condueixen a diferents tipus de tracció. Per exemple, l'enduriment de l'estrès pot produir-se quan la resistència post-trencament és més alta que la resistència de la matriu. O bé, la suavització pot produir-se quan la resistència al post-trencament és inferior a la resistència de la matriu.



La llei constitutiva a tracció de l'UHPRFC és important per dissenyar o verificar les estructures d'aquest tipus. Aquesta es caracteritza per:

- Una etapa elàstica lineal limitada per una tensió  $f_{ct,el}$ .
- Una etapa post-fissuració generalment caracteritzada per una llei d'estrès-fissura amb  $\sigma - w$  o una llei estrès-tensió  $\sigma - \epsilon$ . La tensió  $\sigma_f$  és igual a la tensió de tracció dividida per l'àrea del formigó.

Tot i que el temps de barreja suficient i les condicions de col·locació assegurin una dispersió baixa de la resistència al rendiment  $f_{ct,el}$ , el rendiment post-fissura aportat per les fibres,  $\sigma_f$ , depèn en gran manera del procés de col·locació d'aquestes en l'element de formigó UHPFRC.

Qualsevol flux durant la col·locació de formigó tendeix a alinear les fibres en la direcció del flux, a causa del comportament natural de les fibres en la fase viscosa-líquida del formigó abans de fixar-se.

Les fibres properes a les parets d'encofrat estan alineades de forma natural paral·lela a l'encofrat. Això només es produeix quan la distància des de l'encofrat és menor o igual a la longitud de les fibres. Així, com més s'acosta el gruix de l'estructura a la dimensió de les fibres, major serà l'efecte sobre la resistència a la tracció efectiva de les parts.

La corba de comportament a la tracció (esforç de tracció - deformació) està sotmesa a tres etapes diferents<sup>3</sup>:

1. Un estat elàstic que acaba amb un valor determinat per a la tensió. Aquest valor s'anomena resistència a la tracció de la matriu de ciment. Un cop aconseguit aquest límit elàstic, el material comença a esquerdar-se i el comportament canvia. Amb aquesta tensió, passa d'un estat elàstic a un de plàstic.
2. Una etapa d'enduriment de la deformació. Aquesta etapa no ha de passar. Això depèn de les fibres mateixes. És en aquest moment que comencen a aparèixer les micro-esquerdes. La màxima resistència a la tracció acaba en aquesta fase. Si no hi ha una etapa d'enduriment de la deformació, el valor màxim de la resistència a la tracció és igual a l'estrès que acaba la fase elàstica.

---

<sup>3</sup> Eide & Hisdal, 2012

3. Un estat suavitzant de la tensió. En aquesta fase es produeixen macro-fissures. Després de l'estrès màxim, les esquerdes comencen a ampliar-se i les fibres comencen a desfer-se (extracció de fibra).

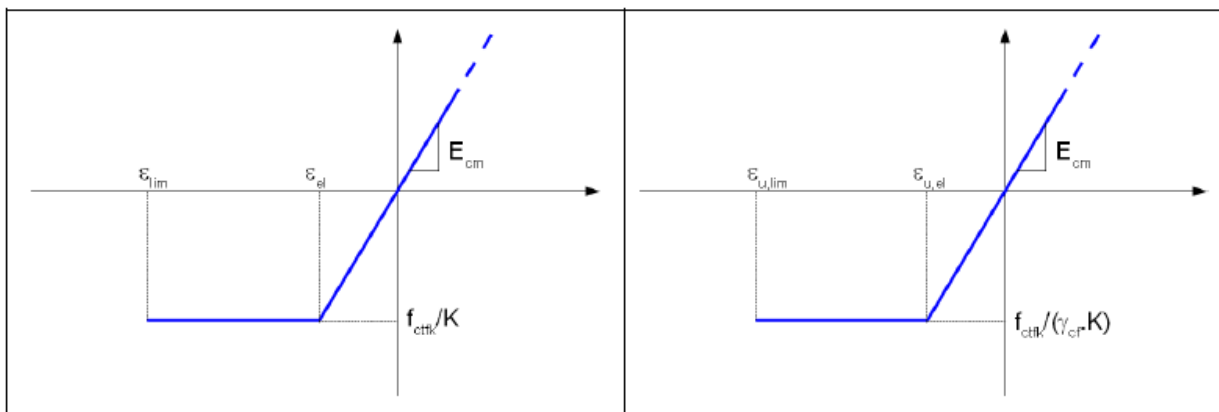
### 2.1.6. Lleis per a elements de secció prima:

Les plaques primes són elements que tenen un gruix tal que:

$$e \leq 3 l_f$$

On:

$l_f$  = longitud d'una fibra.



Gràfic 7: A l'esquerra Lleis ELS/SLS simplifiades, a la dreta Lleis ELU/ULS simplifiades

Es recomana prendre per a  $f_{ctfk} = 9 \text{ MPa}$  i  $\epsilon_{lim} = \epsilon_{u,lim} = 2,5 \cdot 10^{-3}$

### 2.1.7. Resistència al tall:

La resistència al tall és igual a la menor dels dos valors  $VR_d$  i  $VR_{d,Max}$ .

On  $VR_{d, Max}$  és la resistència del formigó amb puntals compressives.  $VR_d$  és la resistència a la tracció dels llaços en el formigó.

$$VR_d = VR_{d, c} + VR_{d, s} + VR_{d, f}$$

$VR_{d, c}$ : formigó

$VR_{d, s}$ : reforç de cisalla

$VR_{d, f}$ : fibres

Els termes  $V_{ccd}$  i  $V_{td}$ , que són els valors de disseny del component de cisalla de la força en la compressió l'àrea en el cas d'un acord de compressió inclinat i d'un acord de tracció inclinada,

respectivament, no s'utilitzen recomanacions perquè no són específiques per a un formigó UHPFRC. No obstant, es poden utilitzar de la mateixa manera en els càlculs de disseny.

Terme VRd,c:

Per a una secció reforçada, el valor del disseny per a la capacitat de cisallament VRd, c ve donada per:

$$V_{Rd,c} = \frac{0,21}{\gamma_{cf} \gamma_E} k f_{ck}^{1/2} b_w d$$

On:

$$k = 1 + \begin{cases} 3 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck}} & \sigma_{cp} \geq 0 \\ 0,7 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{ctk,0.05}} & \sigma_{cp} < 0 \end{cases}$$

Per a una secció pretensada (reforçada o no), el valor VRd,c és:

$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_{cf} \gamma_E} k f_{ck}^{1/2} b_w h$$

or

$$V_{Rd,c} = \frac{0,21}{\gamma_{cf} \gamma_E} k f_{ck}^{1/2} b_w 0,875h$$

## 2.1.8. Característiques mecàniques

### 2.1.8.1. Força d'impacte:

L'UHPFRC té com la majoria de formigons reforçats amb fibra una alta capacitat de dissipació d'energia. A més, es pot controlar la fissuració i la integritat estructural a causa de la seva gran resistència a la tracció, fins i tot en el cas d'un impacte relativament fort.

Sempre que la matriu d'UHPFRC es vegi afectada, experimentarà una taxa d'esforç localitzada elevada. Això provocarà un augment de la resistència a la tracció i a la compressió. Aquest fenomen té com a resultat una resistència a la tracció fins a dues vegades més gran que el valor original i un augment d'1,5 per a la resistència a la compressió.

### **2.1.8.2. Durabilitat:**

L'UHPFRC té unes qualitats destacables en termes de durabilitat. Això fa que UHPFRC esdevingui molt interessant per a aplicacions específiques, com ara estructures en entorns altament agressius (mar), emmagatzematge de residus (centrals nuclears), etc.

Aquesta propietat també implica que es poden fer elements estructurals primers, el guany de durabilitat compensa la reducció de gruix.

### **2.1.9. Components de l'UHPFRC**

Una composició típica d'UHPFRC consisteix principalment en ciment, aigua, granulats, aglomerants, plastificants, fum de sílice i, per descomptat, una quantitat de fibres de reforç. En comparació amb el formigó convencional, es poden distingir els fets següents:

- 1) La relació aigua/ciment és notable.
- 2) Els agregats són aparentment més petits que 1 mm.
- 3) L'addició de fibres.

#### **2.1.9.1. Ciment:**

La quantitat de ciment utilitzada en un disseny de mescla d'UHPFRC és alta en comparació amb el formigó regular. Representa al voltant del 20 al 30% del contingut de l'aglutinant. Això té com a conseqüència un augment de la hidratació tèrmica i la contracció autògena. Per aquesta raó, de vegades es recomana realitzar un tractament tèrmic per evitar les contraccions.

Es poden utilitzar diferents tipus de ciment, però els més utilitzats són CEM I-42.5 i CEM I 52.5.

#### **2.1.9.2. Aigua:**

L'aigua és necessària per a la hidratació del ciment. Pel que fa a la quantitat d'aigua utilitzada, el principi és tenir-ne el menys possible quan acabi la hidratació. Perquè la porositat capil·lar i la seva connexió serà mínima, cosa que augmenta la resistència i la durabilitat del formigó. A més, un alt contingut d'aigua augmenta el risc de sedimentació dels agregats i fibres gruixudes.

La densitat dels àrids gruixuts és superior a la densitat del formigó fresc, així com la densitat de les fibres de polímer és inferior a la densitat del formigó fresc. Això podria tenir com a conseqüència que totes les fibres anessin a la part superior i els agregats toscos s'enfonsessin a la part inferior.

Una quantitat baixa d'aigua inclou el perill que no totes les partícules de ciment puguin contraure's amb les molècules d'aigua per hidratar-se. També disminueix la força de treball del formigó i l'aire retingut a la mescla lluitarà per arribar a la superfície.

### **2.1.9.3. Relació aigua/ciment:**

La relació aigua/ciment ( $a/c$ ) és un valor que caracteritza la resistència matricial de l'UHPFRC. Un canvi en la relació  $a/c$  influenciarà en la corba de desviació de càrrega en el valor de la primera tensió de fissura i la resistència màxima de l'UHPFRC. Tanmateix, la forma de la corba de desviació de càrrega no canviarà tan dràsticament.

El formigó convencional té una relació  $a/c$  d'aproximadament 0,45 - 0,65. Pel que fa a l'UHPFRC, s'assoleix una relació  $a/c$  de 0,15 - 0,25. Una relació  $a/c$  més baixa condueix a una gran reducció de la porositat de la matriu de ciment endurit. La mida mitjana dels porus capil·lars es redueix i ja no estan interconnectats. Això significa que els grans de ciment no es poden hidratar completament i actuaran en la matriu d'UHPFRC com a farcit d'alta qualitat. Tot plegat suposarà que la capacitat de resistència i la durabilitat del material augmentarà.

Per tal d'assegurar la funcionalitat d'aquest material, ja que una relació  $a/c$  més baixa augmenta la viscositat. Cal afegir plastificants (reductors d'aigua) a la mescla.

### **2.1.9.4. Fibres:**

Les fibres entre d'altres s'afegeixen a la mescla d'UHPFRC bàsicament per generar una ductilitat molt elevada i garantir una certa resistència després de les primeres esquerdes. La quantitat de fibres pot anar des de l'1% fins al 6% del seu volum.

En general hi ha tres tipus de fibres reconegudes per l'EHE i utilitzades per aquests tipus de formigons: metàl·liques, polimèriques i inorgàniques. Aquests tipus de fibres s'expliquen amb més detall en aquest treball de fi de grau.

### **2.1.9.5. Addició de fibres:**

Les propietats dúctils del material UHPFRC són força interessants en comparació amb el formigó convencionalment ordinari. El formigó convencional és conegut per la seva baixa resistència a la tracció i la baixa capacitat de tensió. Tot i això, el formigó és un material trencadís. Es pot aconseguir fàcilment una resistència a la tracció directa de 7-8 MPa, però afegir fibres a la barreja pot duplicar aquesta força. La capacitat de deformació sense fissures importants d'aquest material augmenta i assegura una resistència típica després de la ruptura. L'eficàcia que funcionen les

fibres aplicant una càrrega sobre una mostra de formigó depèn de molts factors. Depèn de la dosificació, del material en si, de la geometria i de l'orientació de les fibres. El percentatge addicional de fibra o el contingut de volum de fibra és el factor més determinant de les propietats mecàniques.

Per complir al màxim aquesta propietat dúctil, cal tenir en compte que les fibres adopten una orientació específica a la matriu en relació amb la forma d'introduir-les a la batedora i també en abocar-les. Significa que, a l'hora de realitzar la mescla, s'ha de prioritzar l'atenció en l'aplicació de les fibres.

#### **2.1.9.6. Additius:**

En general, hi ha diferents tipus d'additius, però els més freqüents que s'utilitzen per a la producció d'UHPFRC són el fum de sílice (SF), les cendres volants (FA) i la farina de quars (QF).

#### **2.1.9.7. Superplastificants:**

Els superplastificants s'utilitzen en la mescla d'UHPFRC per reduir el contingut d'aigua fins a un 40%. Els més coneguts amb un contingut sobre el pes de l'aglutinant normalment oscil·len al voltant del 2 i el 3,5%.

#### **2.1.9.8. Àrids:**

En general, els àrids es divideixen en agregats grossos ( $D > 4$  mm) i agregats fins o sorres.

Com més petits són els àrids, més gran és la superfície que s'embolica amb la pasta de ciment, que inclou un contingut de ciment més elevat i, en conseqüència, un cost més elevat i una contracció autògena.

L'avantatge dels agregats gruixuts és la seva baixa superfície específica (menor contingut de ciment), però això implica una afectació de l'orientació de la fibra i la reologia de la barreja. Per això, en la majoria de les situacions es combinarà una sorra fina i una sorra gruixuda.

La resistència a la compressió és més elevada quan la proporció d'àrids i ciment és d'1,1, en particular quan hi ha una taxa de 70% a 30% de sorra gruixuda i sorra fina.

## 2.2. Diferència entre l'UHPFRC i altres formigons:

En general, l'UHPFRC s'utilitza principalment com a material d'acabat com a conseqüència de tenir un cost elevat per metre cúbic. Ambientalment en comparació amb el formigó tradicional, és més perjudicial perquè es necessita més energia per produir-lo i l'emissió de CO<sub>2</sub> és més gran. No obstant això, l'UHPFRC presenta molts avantatges:

- A causa de l'alta resistència a la tracció-compensió, cal un volum menor per complir els requisits dels components estructurals.
- Un volum menor també ens proporciona menys massa associada al pes propi, cosa que redueix a més el volum de material utilitzat.
- Innecessarietat de reforçar-lo amb armadures d'acer.
- Permet dissenyar i produir formes complexes de gran resistència, lleugeres i esveltes.
- Muntatge in situ ràpid.
- Transport fàcil.
- Llarga vida útil i menys manteniment, a causa d'una alta durabilitat gràcies a la inferior porositat.

## 2.3. Normativa d'aplicació:

La normativa que és d'aplicació al formigó reforçat amb fibres és la «Instrucció del Formigó Estructural» EHE 08, aprovada el 28 de juliol de 2008 pel Real Decret 1247.

- UNE 83500-1 1989, que parla dels formigons reforçats amb fibres d'acer, la seva classificació, definicions i el seu reforç. Sobre la conformitat de les fibres, les seves característiques geomètriques i la seva classificació.
- UNE 83500-2 1989, dirigida als formigons reforçats amb fibres de propilè, la seva classificació, definicions i el seu reforç. Sobre la conformitat de les fibres, les seves característiques geomètriques i la seva classificació.
- UNE 83460-2 2005, enfocada a les adicions de fum de Sílice al formigó; les recomanacions generals per al seu us.
- UNE 83512-1 2005, dirigida als formigons amb fibres i la determinació del contingut de fibres d'acer.
- UNE 83512-2 2005, dirigida també als formigons amb fibres i la determinació del contingut de fibres de polipropilè.
- UNE-EN 14889-1 2008, enfocada a les fibres d'acer pel formigó; definicions, especificacions i conformitat d'aquestes.

- UNE-EN 14889-2 2008, enfocada a les fibres polimèriques pel formigó; definicions, especificacions i conformitat d'aquestes.
- Annex 14, EHE-08, que ens parla de recomanacions per a la utilització de formigó amb fibres.

## 2.4. Designació del formigó:

Els formigons es denominaran segons el format T-R / f-R1-R3 / C / TM-TF / A on:

T: Indicatiu que serà HMF en el cas de formigó en massa, HAF en el cas de formigó armat i HPF en el cas de formigó pretensat.

R: Resistència característica a compressió especificada, en N/mm<sup>2</sup>.

f: Indicatiu del tipus de fibres que serà A en el cas de fibres d'acer, P en el cas de fibres polimèriques i V en el cas de fibra de vidre.

R1, R3: Resistència característica residual a flexo-tracció especificada  $f_{R,1,K}$  , i  $f_{R,3,K}$ , en N/mm<sup>2</sup>.

C: Lletra inicial del tipus de consistència.

TM: Mida màxima de l'àrid en mil·límetres.

TF: Longitud màxima de la fibra, en mil·límetres.

A: Designació de l'ambient.

La resistència depèn en gran manera de la relació aigua / aglutinant (que pot variar en el cas de les fibres orgàniques) i de qualsevol tractament tèrmic dut a terme.

## 2.5. Tipus de fibres:

Les fibres per al formigó consisteixen en elements de curta longitud i secció petita que són incorporats a la seva massa amb l'objectiu de millorar algunes de les seves prestacions, tant en estat fresc com una vegada endurit.

Tenint en compte la seva naturalesa, la normativa EHE distingeix els tres següents tipus de fibres per al formigó reforçat amb fibres:

- Fibres metàl·liques.
- Fibres plàstiques o polimèriques.
- Fibres inorgàniques (fibra de vidre).



Les fibres tenen la finalitat de reforçar la massa del formigó incrementant la resistència a tracció, disminuint la fissuració i augmentant la tenacitat, mitjançant la transmissió d'esforços a través de la secció fissurada. Una vegada amassades fins a aconseguir una distribució discreta i uniforme creen un material més homogeni, augmentant la seva resistència a tracció i a la fatiga en comparació al formigó tradicional.

L'addició de fibres també disminueix els efectes de la retracció per "fraguat" i augmenta la resistència a l'impacte.

L'eficàcia d'aquestes solucions depèn bàsicament del tipus de fibres utilitzat.

### **2.5.1. Fibres metàl·liques:**

Les fibres metàl·liques més comunes són les d'acer per ser eficaces i econòmiques, així com pel seu elevat mòdul d'elasticitat, 10 vegades superior al del formigó, i una bona adherència a la pasta.

Les fibres d'acer al carboni s'utilitzen en formigons que requereixen millorar la seva resistència a tracció, flexió, la seva capacitat d'absorció d'energia i el control de la fissuració. Les d'acer inoxidable s'utilitzen per millorar aquestes mateixes propietats en formigons refractaris.



Imatge 1: Fibres metàl·liques

Segons el seu procés de fabricació, les fibres d'acer es podrien classificar de la següent manera:

- Encenalls d'acer
- Fibres d'acer foses
- Fibres tallades a làmines
- Fibres trefilades

- Fibres d'acer segons la seva forma

Tenint en compte la seva forma es podrien classificar com:

- Fibres rectes
- Fibres corrugades
- fibres ondulades
- fibres conformades (forma segons requeriments)

La incorporació de fibres d'acer produeix:

1. Un augment de la resistència a flexo tracció y tracció.
2. Un lleuger augment de la resistència a compressió.
3. Un augment de la resistència a fatiga i tenacitat.

El formigó reforçat amb fibres d'acer s'utilitza en prefabricats, tubs, canals, arquetes, revestiments de túnels, estructures de seguretat, etc.

#### **2.5.1.1. Dosificació, amassat i posta en obra de les fibres metàl·liques:**

Les fibres redueixen la docilitat de la barreja a causa de la seva forma i rigidesa, de manera que la proporció d'elements fins i gruixuts ha de ser l'adequada. Aquests formigons són difícils de treballar quan la dosificació de fibres sobrepassa el 2% en el volum de formigó o del 4% del morter. Per assegurar la dispersió de les fibres treballar amb relacions aigua / ciment compreses entre 0,5 i 0,6 amb dosificacions de ciment altes, fins als 400 kg per m<sup>3</sup>.

L'amassat pot efectuar-se a la central o a la mateixa obra. Si es realitza a la mateixa central, només cal afegir les fibres a la barreja i pastar el conjunt. D'altra banda, si el pastat es realitza a peu d'obres, les fibres s'afegeixen a la formigonera i es manté girant el dipòsit.

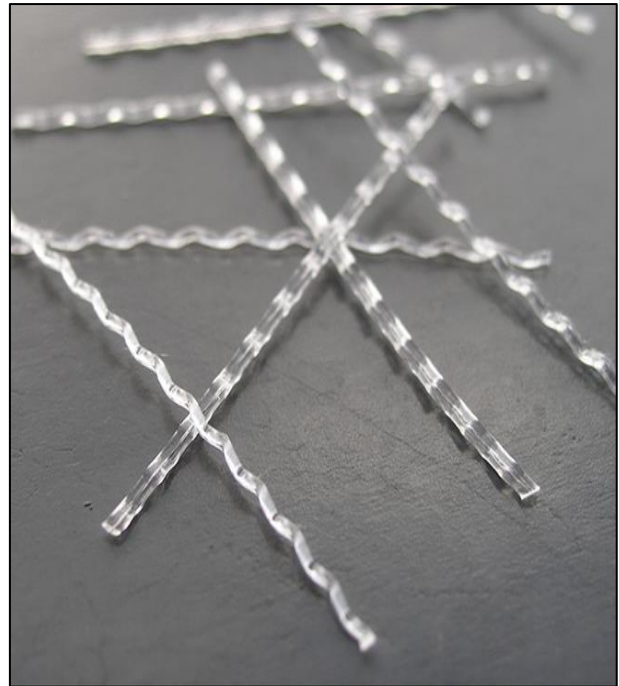
La posta en obra del formigó reforçat amb fibres es realitza amb els sistemes tradicionals, inclòs el bombejat. Pel que fa a la compactació, se segueixen les mateixes directrius que amb el formigó convencional, tot i que cal destacar que el vibrat té l'inconvenient que en el buit que deixen al treure'ls del formigó no solen entrar fibres amb la qual cosa es produeixen heterogeneïtats en la massa.

### 2.5.2. Fibres de polipropilè:

Les fibres de polipropilè són molt lleugeres, per la qual cosa redueixen el pes afegit a la barreja que normalment és d'uns 600 g per cada m<sup>3</sup> de formigó. Tenen forma de multi filaments i actuen com a reforç en totes les direccions de forma tridimensional, dissipant els esforços. Redueixen eficaçment la fissuració per retracció en les primeres fases de l'enduriment del formigó i ajuden a evitar esquerdes per temperatura en estat endurit.



Imatge 2: Fibres de polipropilè (1).



Imatge 3: Fibres de polipropilè (2).

Al contrari que les fibres d'acer, el mòdul d'elasticitat d'aquestes fibres és baix el que provoca que la resistència a flexió del formigó no augmenti de manera significativa i que les deformacions un cop fissurat siguin elevades.

Aquest inconvenient s'elimina emprant fibres en forma de xarxes que s'obren en el formigó i utilitzant grans proporcions de fibres. Amb un 0,6% de fibres es pot incrementar la resistència a flexió en un 25%. No obstant això, cal tenir en compte que la resistència a compressió, disminueix tant en com més gran és la dosificació de fibres i la longitud d'aquestes.

Pel que fa al control de la fissuració, si el volum de fibres és superior al 2,3%, la fissuració que es produeix és múltiple. Per contra, si és reduït, només apareix una fissura. També millora molt la resistència del formigó davant impactes (de 2 a 10 vegades superior a la del formigó tradicional).

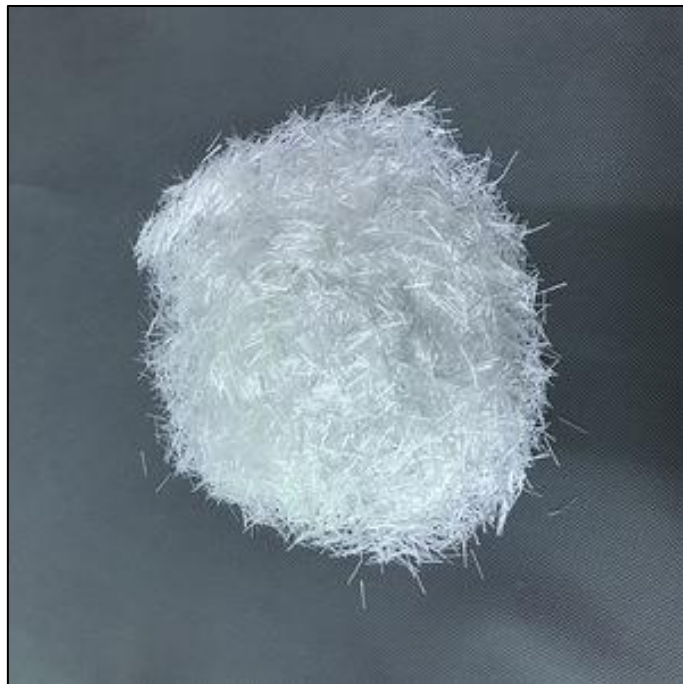
Les fibres de polipropilè es barregen sense problema en formigoneres tradicionals. Aquest tipus de fibres funciona molt bé en formigons bombejats i posseeixen l'avantatge de no ser atacades per la corrosió. Els seus inconvenients principals són el seu baix mòdul d'elasticitat, que les fa molt deformables, i la poca adherència amb el formigó.

Avantatges:

- Millora la resistència del formigó a l'abradió i l'impacte proporcionant major durabilitat.
- Augmenta la cohesió de la barreja cimentosa i la seva resistència als cicles gel-desgel.
- Es pot utilitzar com a alternativa a la malla superficial per al control d'esquerdes i fissures.
- És resistent als àcids i els àlcals.

### 2.5.3. Fibres inorgàniques (fibra de vidre):

La seva utilització és menys habitual que les fibres de polipropilè que ofereixen prestacions equivalents. Els formigons barrejats amb fibra de vidre ofereixen una alta resistència al foc, a la corrosió i a l'atac biològic de microorganismes. Ofereixen bons resultats en mitjans alcalins en ser molt resistents als àlcals. S'utilitzen en moltes aplicacions com suports que suportin càrregues directes, bigues, columnes, murs principals de càrrega, lloses, sostres, construccions marines, contenidors d'aigua, peces subjectes a esforços prolongats de càrrega. Molt utilitzades per a l'elaboració de peces amb gruixos prims d'entre 3 i 12 mil·límetres.



Imatge 4: Fibres de vidre.

Aquestes fibres no s'utilitzen en forma de filaments solts, sinó formant conjunts de filaments o cordons. Per aconseguir una bona dispersió de fibres en el pastat, sol utilitzar-se un additiu a base d'òxid de polietilè barrejat amb l'aigua. El percentatge de fibres sol variar entre el 2 i el 5% en pes dels materials secs. La resistència a compressió decreix depenent de la relació aigua / ciment. Quant aquesta relació és baixa, la resistència a compressió baixa fins a un 20%, i per a altes fins a un 30%.

## 2.6. Aplicacions de l'UHPFRC:

A causa de les investigacions realitzades a les últimes dècades enfocades en la investigació i millora en el tipus, components i additius del formigó com a element de construcció, es va desenvolupar el formigó d'alt rendiment reforçat amb fibres UHPFRC.

Aquest material que té una gran capacitat a tallant i a compressió, amb major durabilitat que el formigó al qual estàvem acostumats, ha generat que el trobem utilitzat en l'actualitat en construccions com poden ser ponts, estructures, elements prefabricats, en condicions agressives o medis marins, estructures contra explosius, rehabilitacions, reforçaments, i moltes altres tipologies diferents en el món de la construcció i l'enginyeria civil.

Tot seguit algunes de les aplicacions es discutiran una mica més en detall, descrivint les principals característiques i els motius que van provocar l'ús de l'UHPFRC, començant amb alguns exemples generals d'ús de l'UHPFRC i acabant amb alguns exemples detallats d'aplicacions basades en lloses d'UHPFRC.

### 1. Reforç del Pont d'Illzach, França, 2011



Imatge 5: Reforç del Pont d'Illzach, França, 2011



Imatge 6: Pont d'Illzach, França, 2011

Pont situat al canal de Huningue, a Illzach (Haut-Thin) de 105 metres de llargada i 11,20 metres d'amplada. Format amb bigues laterals recolzades i unides entre si (estructura tipus Warren) a través de la triangulació.

Aquest pont havia de ser enderrocat perquè l'estructura patia una patologia relacionada amb la fissuració de diversos elements que posaven en perill la seva estabilitat. Amb l'anomenat projecte d'investigació Orthoplus, es va procedir a equipar amb una llosa de formigó amb fibres d'ultra alt rendiment (UHPRFC) de 5 cm de gruix, connectada a la superfície ja existent amb tacs. La llosa consistia en elements prefabricats formant elements de 3,45 metres x 2,70 metres. Les àrees de connexió (vores dels elements prefabricats) es van crear in situ per sobre dels connectors.

## 2. Pont Passarel·la de Glenmore, Canadà, 2008



Imatge 7: Passarel·la de Glenmore, Canadà, 2008

Pont format per un únic tram de 53 metres de llarg i que travessa al llarg de 8 carrils de circulació. Va ser la segona passarel·la d'Amèrica del Nord amb les mateixes característiques que el primer pont<sup>4</sup> i realitzada per la mateixa empresa *Ductal*.

Consta de dos contraforts en voladissos fets de formigó d'alt rendiment i un eix principal més petit de secció en forma de T. L'eix principal té una llargada de 33,6 metres i 1,1 metres de profunditat, amb una amplada de 3,6 metres. Aproximadament pesa 100 tones, i es post-tensiona per 42 fils de 15 mil·límetres.

El feix principal es va sotmetre a tractament tèrmic. Es van realitzar assajos de càrrega total i parcial amb càrregues distribuïdes uniformement. La seva alta resistència a la penetració de clorur (a causa de salar freqüentment les carreteres durant els mesos d'hivern), el seu aspecte estèticament agradable (superfície llisa) el converteixen en una estructura sostenible i amb un manteniment mínim.

<sup>4</sup> Primer pont peatonal d'UHPC construït a Canadà, Sherbrooke, Quebec, al 1997.

### 3. Renovació de la coberta de l'estació de Saint Jean, França, 2008



Imatge 8: Coberta de l'estació de Saint Jean, França, 2008 (1).



Imatge 9: Coberta de l'estació de Saint Jean, França, 2008 (2).

Coberta formada per 48 panells d'1,6 x 4,66 x 0,095 metres, amb blocs de vidre i una façana de 47 panells calats d'1,6 x 4,7 x 0,07 metres. Amb un volum total de formigó UHPFRC de 40 m<sup>3</sup>.

Aquesta estructura realitzada amb formigó d'altres prestacions amb fibres metàl·liques va ser seleccionat per la seva estanquitat, resistència als cops i la seva gran capacitat per fer formes complexes i primes.

### 4. Passarel·la Seon Yu, Corea (Seoul) 2002



Imatge 10: Passarel·la Seon Yu, Corea, Seoul, 2002.

El pont de l'arquitecte Rudy Ricciotti situat a Seoul, consta d'un arc de 120 metres de llargada i 15 metres d'alçada format per 6 segments corbs. Els segments estan pretensats de manera transversal i post-tensats en direcció longitudinal.

La bona resistència de torsió del formigó UHPFRC va fer possible la realització dels segments pretensats sense reforçament passiu.

#### 5. Passarel·la de Sakata Mirai, Japó 2002

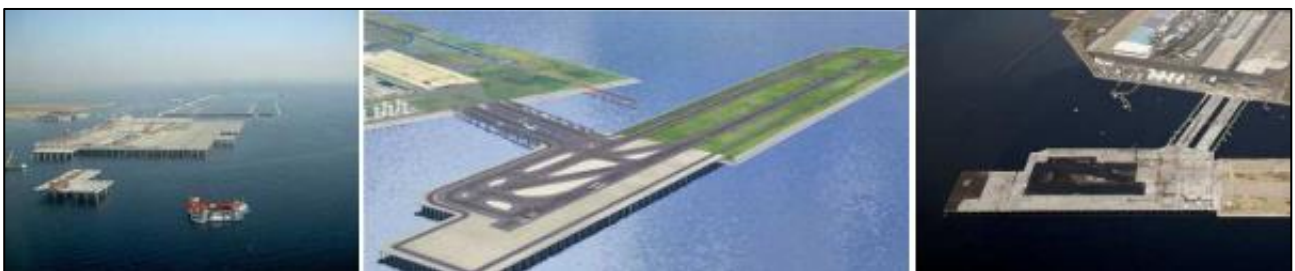


Imatge 11: Passarel·la de Sakata Mirai, Japó, 2002.

Un pont únic de 50 metres de llarg per 2,4 metres d'amplada. La base està construïda a partir d'elements prefabricats que coincideixen amb la corba del moment flector i amb forats a les xarxes. Això redueix la massa de l'estructura i la sensibilitat al vent.

La llosa superior té 5 cm de gruix. La naturalesa gairebé autocompactadora del formigó permet desenvolupar elements amb geometries i seccions complexes donant aquí un pont prim i lleuger.

#### 6. Pista d'aterratge de l'aeroport de Haneda, Japó (Tokyo) 2007-2010



Imatge 12: Pista d'aterratge aeroport Haneda, Japó, Tokyo, 2007-2010.

Aquest moll es va construir exclusivament per a vols internacionals. S'estén sobre una gran superfície de 520.000 m<sup>2</sup> recuperats del mar. Es compon de dues estructures: una part submergida de fins a 70 m de profunditat formada per pilars d'acer i una part de 6.139 plaques de formigó amb fibres.



El formigó UHPFRC és extremadament resistent a l'atac de l'entorn marí. Es van fabricar 7.000 forjats de 8 x 4 m i es van utilitzar per suportar el pes dels avions a la pista. La lleugeresa d'aquest formigó ha contribuït a reduir a la meitat el pes de les plaques d'una solució de formigó convencional que genera una reducció significativa de costos per a aquesta estructura única subjecta a riscos de terratrèmols.

### 3. DESENVOLUPAMENT:

#### 3.1. Disseny i geometria del prototip:

L'estudi s'ha iniciat amb el disseny i anàlisi d'una geometria estructuralment eficaç. Bàsicament el que es pretén és modelar i perfilar una forma de biga adient per rebatre l'esforç a flexió, que és on flaqueja més el formigó UHPFRC.

Per a l'obtenció de la forma geomètrica de la biga i que aquesta sigui adient s'ha utilitzat el procediment gràfic anomenat Polígon Funicular.

El polígon funicular pot utilitzar-se per algunes operacions bàsiques de l'estàtica gràfica com determinar el punt de pas de la força resultant d'un conjunt de forces. També es pot utilitzar per determinar la forma ideal d'un arc o estructura porticada que garanteix que tots els trams d'aquest treballin a compressió.

Per entendre les estructures funiculars cal imaginar-se les formes d'estructures generades per un fil en equilibri sotmès a l'acció d'una o varies forces com es pot observar en la següent imatge:



Imatge 13: Formes geomètriques generades a partir de cordills i pesos (polígon funicular).

Aquestes formes generades automàticament adquireixen la forma d'una estructura viable i també molt eficaç.

Basant-nos en aquest mètode, si tensem un fil pels dos extrems obtenim una estructura amb dues peculiaritats:

1. És necessari que els suports proporcionin una component horitzontal (H) de reacció o bé que existeixi una barra comprimida que les uneix.
2. La forma del funicular varia si varien les magnituds relatives a les accions del sistema, és a dir que varia la forma de l'estructura generada.

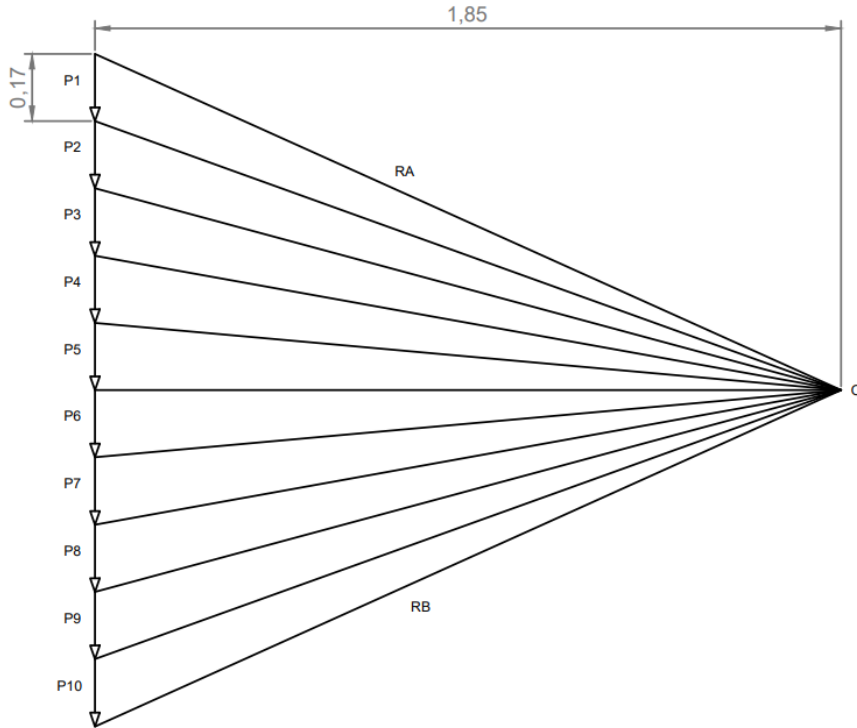
Si s'inverteix el traçat d'un polígon funicular, s'obté un polígon antifunicular amb les mateixes propietats. La força horitzontal H és aleshores de compressió. Si es realitza una estructura segons l'esquema antifunicular, s'obté un arc comprimit que ha d'estar dotat d'una sustentació que resisteixi empentes o bé tenir un tirant traccionat com el que hi havia previst en el nostre cas, a la part inferior de la base de la biga, entre suports.

Així doncs, utilitzant aquest mètode gràfic, tracem una forma geomètrica en forma d'arc que serà la nostra biga i la dotem amb un gruix suficient de marge perquè la línia marcada per l'antifunicular (resultant) passi per dins seu, i també tenint en compte les variacions de càrregues que puguin haver-hi i produir-se.

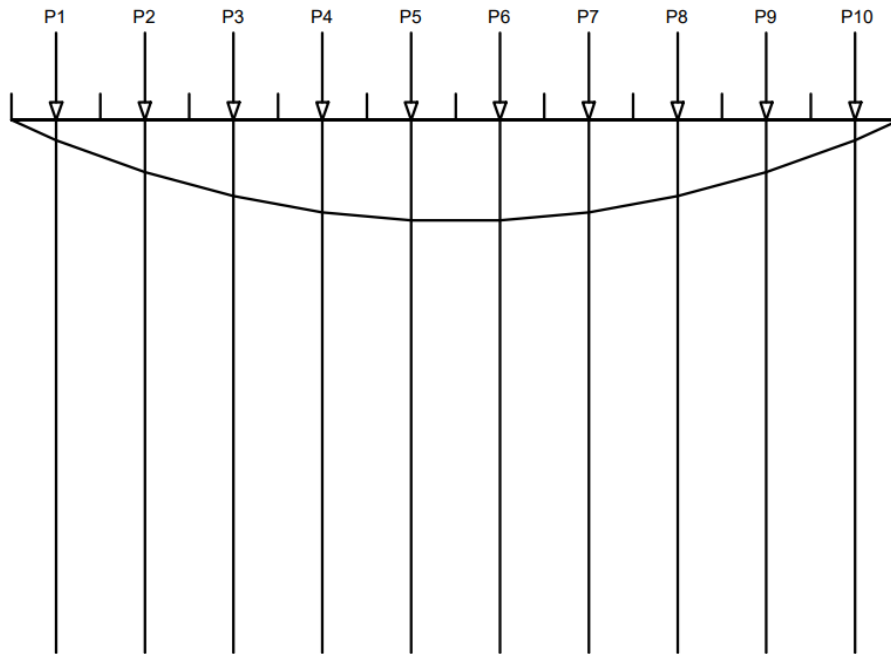
Per a la realització d'aquest estudi s'ha considerat una longitud de biga entre eix i eix d'un metre. Posteriorment s'ha considerat un estat de càrrega d'1,5 KN/m<sup>2</sup> de càrregues permanents i 1,5 KN/m<sup>2</sup> de càrregues variables, formant un conjunt total de 3 KN/m<sup>2</sup>. A continuació s'ha dividit una línia d'1 m amb 10 trossos i hem repartit 10 càrregues puntuals a cada tros, i s'ha seguit el procediment gràfic segons el càlcul d'un polígon funicular per trobar la línia de pas de la força resultant.

El procediment emprat per traçar el polígon funicular és el següent:

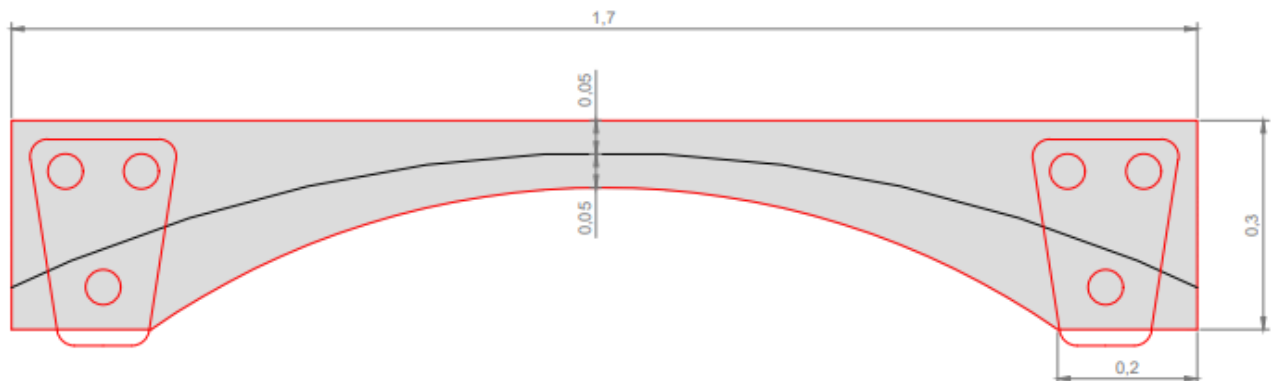
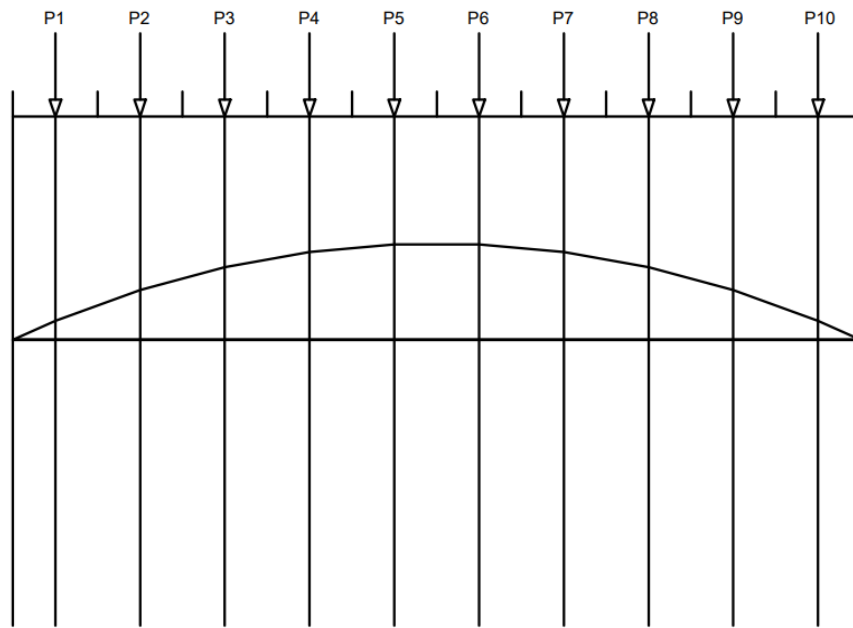
1. Dibuix del diagrama de forces.
2. Selecció d'un punt arbitrari 0 del diagrama de forces que serà el focus.
3. Col·locació en línia vertical, una al damunt de l'altra i seguides les diverses forces resultants aplicades a la biga.
4. Unió dels extrems de cada força al focus 0 generant així un seguit de línies cap a aquest.



5. Col·locació de les diferents línies que van en direcció al focus una a una amb la seva corresponent inclinació en el diagrama de forces, generant un arc invers.

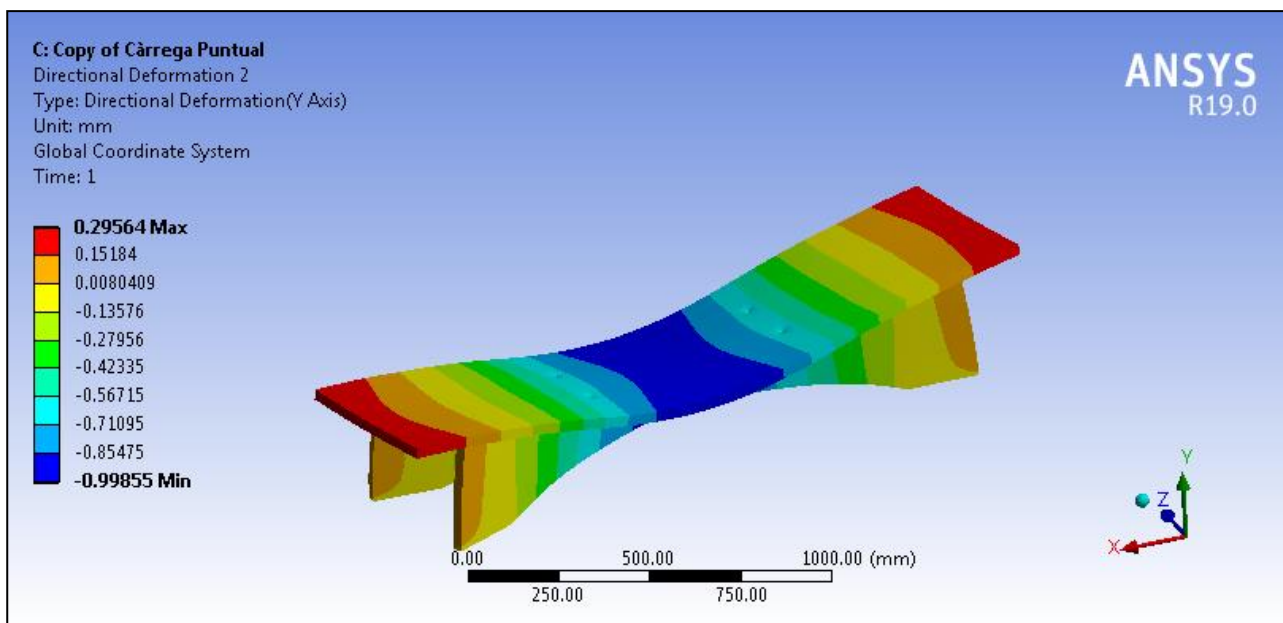


6. S'inverteix l'arc anterior i s'obté la línia de pas de la força resultant.



Imatge 14: Predimensionat de la biga.

7. Amb la línia de pas obtinguda ja podem perfilar la geometria que tindrà la peça essent sempre de gran importància que aquesta quedi al centre de l'element i ben recoberta, garantint que la biga presenti un comportament generalitzat a compressió.
8. Modelem i perfillem el model numèric a través del programa informàtic "ANSYS" i comprovem que els valors obtinguts s'adeqüen als resultats que volem aconseguir.



Imatge 15: Model numèric realitzat amb el programa ANSYS (deformacions en l'eix Y).

### 3.2. Preparació i muntatge de l'encofrat:

El primer que s'ha fet abans de començar a fer l'encofrat és una petita anàlisi de com es muntarà aquest, i quina solució és la més adient per formigonar i posteriorment desencofrar. Tot sense malmetre la peça de formigó. Un cop decidit, es procedeix al tall de la fusta.

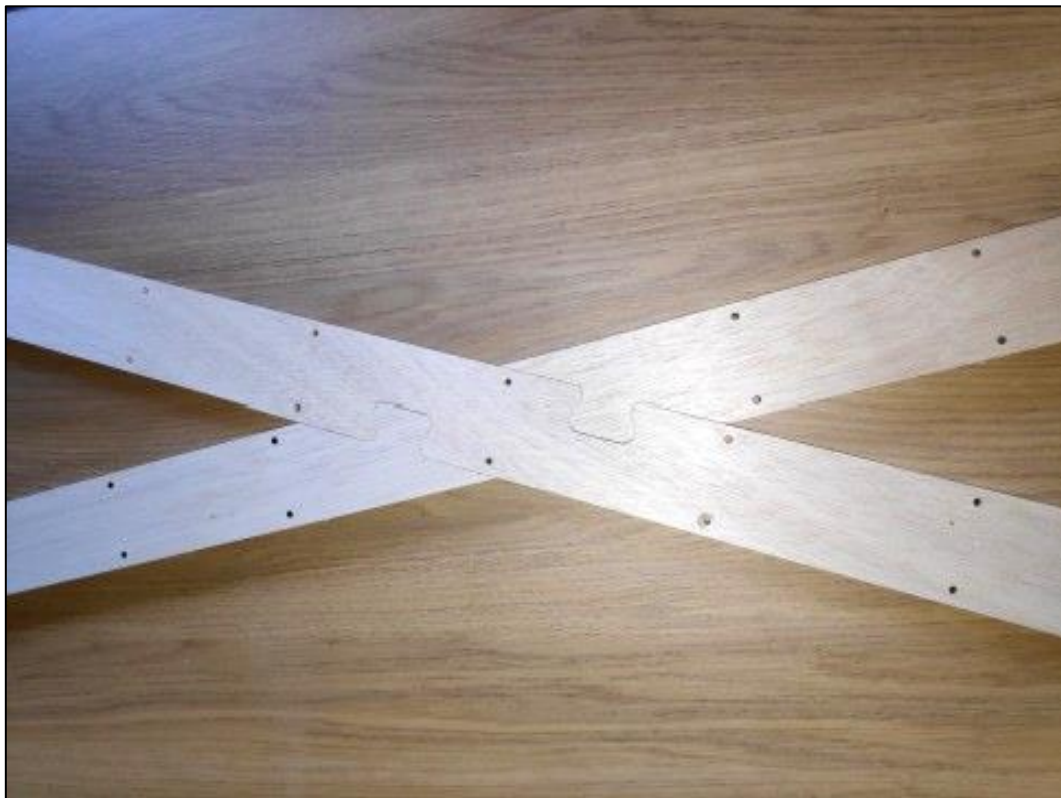
L'objectiu principal era realitzar tot el formigonat d'una sola peça. Això ens obligava a muntar també tot l'encofrat conjuntament d'una sola peça amb un grau de precisió elevat. També es podia haver separat el taulell de sobre amb les bigues creuades de sota, i unir-les mitjançant connectors, però dificultava tot el procés. Per altra banda, la geometria de la peça i els angles de més de 45° la feien molt difícilosa a l'hora de tallar mecànicament.

Finalment per fer-ho possible, s'ha utilitzat maquinària especialitzada amb control digital que permet talls i formes complexes amb una precisió elevada.

Tot l'encofrat a estat compost de fusta contraxapada de 15 mm de gruix.



Imatge 16: Tall mecanitzat de les diverses peces que formen l'encofrat.



Imatge 17: Encaix cua d'oreneta a la part central.



Imatge 18: Muntatge de l'encofrat (1).



Imatge 19: Muntatge de l'encofrat (2).





Imatge 20: Muntatge de l'encofrat (3).



Imatge 21: Muntatge de l'encofrat (4).

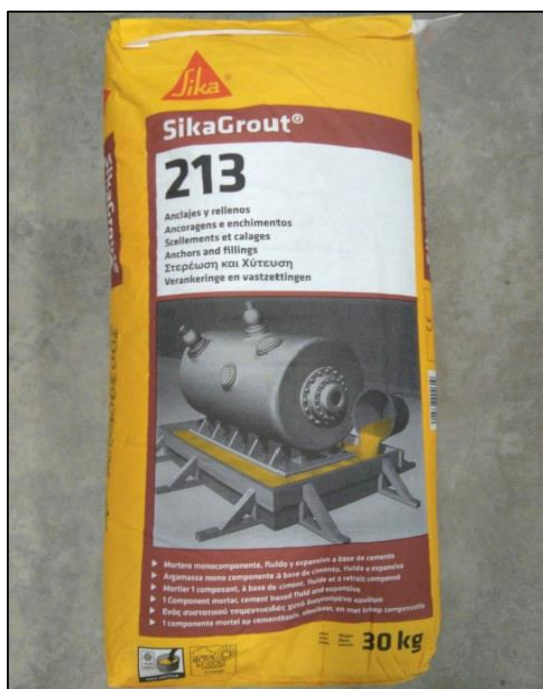


Imatge 22: Muntatge de l'encofrat finalitzat.

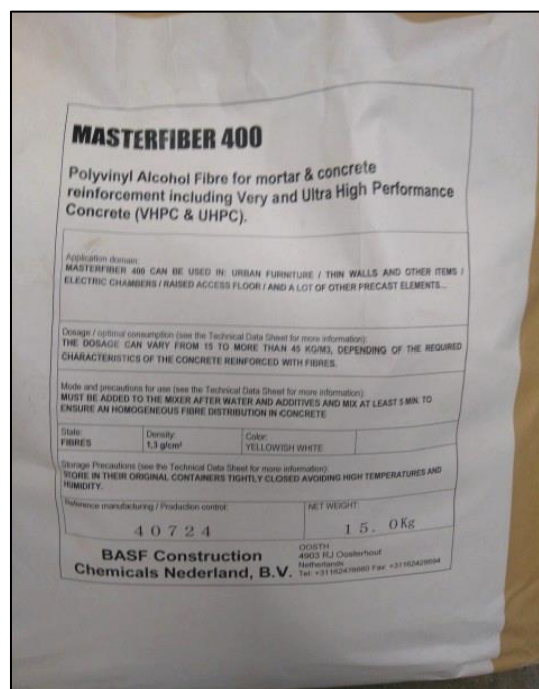
### 3.3. Materials utilitzats i dosificació:

Per a la realització del model experimental s'ha utilitzat la següent dosificació per a l'elaboració de la mescla de formigó amb fibres:

- 90 kg de morter SIKAGROUT 213 (3 sacs).
- 1 kg de fibres de PVC MASTERFIBER 400.
- 13,5 l d'aigua.



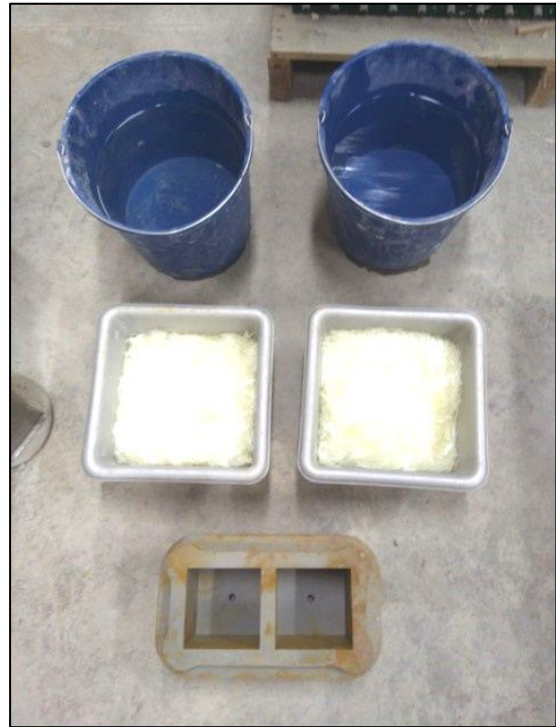
Imatge 23: Morter utilitzat (SikaGrout 213)



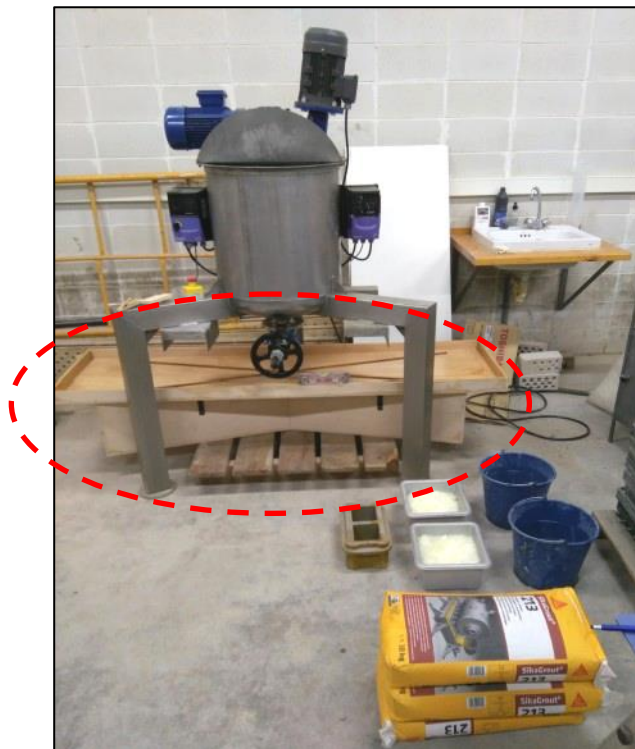
Imatge 24: Fibres utilitzades (Masterfiber 400)



Imatge 25: Fibres de polipropilè (Masterfiber 400)



Imatge 26: Aigua, fibres i motlle utilitzats.




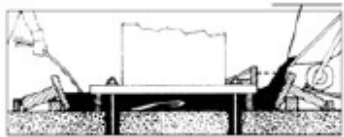
Imatge 27: Mescladora, conjunt de materials utilitzats i motlle d'encofrat.

<b>SikaGrout 213</b>	
<b>Base química:</b>	Morter monocomponent a base de ciment.
<b>Densitat:</b>	2,3 Kg/l de mescla fresca
<b>Granulometria:</b>	0-3 mm
<b>Aigua de pastat</b>	13-15% en pes de morter / 3,9-4,5 l d'aigua per sac de 30 kg. Per a la realització d'aquest treball s'ha utilitzat un 15% d'aigua (13,5 l).
<b>Expansió 24h</b>	3%
<b>Resistència a la compressió (28 dies):</b>	55,6 N/mm <sup>2</sup> .
<b>Resistència a flexotracció</b>	5-8 N/mm <sup>2</sup> .

Taula 1: Característiques del morter SikaGrout 213

## Fitxa tècnica: SikaGrout-213

Construcción	<b>Hoja de Datos de Producto</b>	
	Edición 27/07/2014	
	Identificación n.º 2.5.1	
	Versión n.º 1	
	SikaGrout®-213	
	<b>SikaGrout®-213</b>	
	Mortero monocomponente, fluido de retracción compensada y ligeramente expansivo, a base de cemento	
	<b>Descripción del Producto</b>	SikaGrout®-213 es un mortero monocomponente, a base de cemento, que se suministra listo para su empleo, con la simple adición de agua.
	<b>Usos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Relleno por vertido bajo placas de apoyo y reparto.</li> <li>■ Bancadas de maquinas.</li> <li>■ Apoyos de puentes y grúas.</li> <li>■ Anclajes de elementos metálicos (armaduras, pernos, etc.), postes metálicos y de hormigón, columnas en construcciones prefabricadas, etc.</li> <li>■ Rellenos de grietas y oquedades confinadas en el interior de masas de hormigón.</li> <li>■ No debe emplearse para nivelación de superficies libres y no confinadas.</li> </ul>
	<b>Características/Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fácil mezclado y puesta en obra. Buena fluidez, colocación por vertido.</li> <li>■ Autonivelante.</li> <li>■ Exento de cloruros y de partículas metálicas. Por lo tanto no se oxida en contacto con la humedad sino que al contrario, protege a las partes metálicas contra la corrosión, por su pH básico.</li> <li>■ Ligeramente expansivo.</li> <li>■ Altas resistencias mecánicas, desarrollo rápido de las mismas.</li> <li>■ Excelente adherencia al hormigón, mortero o acero. Proporciona una unión monolítica y resiste bien los golpes y vibraciones.</li> <li>■ Impermeable: resiste el agua y el aceite.</li> <li>■ No es corrosivo ni tóxico.</li> </ul>
<b>Ensayos</b>		
<b>Certificados/Normativa</b>	Producto para anclajes de armaduras de acero según EN 1504-6:2006, con Declaración de Prestaciones 01 02 01 01 001 0 000100 1124., con certificado de producción según el cuerpo notificador nº 0099/CPR/B15/0060, provisto del marcado CE.	
<b>Datos del Producto</b>		
<b>Forma</b>		
<b>Apariencia/Color</b>	Polvo Gris	
<b>Presentación</b>	Sacos de 30 kg	
<b>Almacenamiento</b>		
<b>Condiciones de almacenamiento/Conservación</b>	12 meses, desde su fecha de fabricación, en sus envases de origen bien cerrados y no deteriorados, en lugar seco y fresco. Proteger de las heladas y la acción directa del sol	
<b>Datos Técnicos</b>		
<b>Base química</b>	Mortero monocomponente a base de cemento.	
<b>Densidad</b>	-2,3 kg/l de mezcla fresca.	
		

<b>Granulometría</b>	0-3 mm.					
<b>Espesor de capa</b>	Mín. 10 mm. / Máx. 30 mm.					
<b>Agua de amasado</b>	13-15% en peso de mortero 3,9 - 4,5 l de agua por saco de 30 kg					
<b>Propiedades Físicas/Mecánicas</b>						
<b>Adherencia al acero</b>	Barras Corrugadas: -15 N/mm <sup>2</sup> . Barras Lisas: -4 N/mm <sup>2</sup> .					
<b>Expansión 24 horas</b>	Máximo 3%.					
<b>Resistencia a compresión</b>	- 55-65 N/mm <sup>2</sup> . (EN 196-1)					
	AGUA	COMPRESIÓN: N/mm <sup>2</sup>				
		24h	2 días	3 días	7 días	28 días
	13%	42.6	55.1	57.2	59.2	63.8
	14%	55.1	48.1	50.9	54.2	58.9
	15%	32.9	47.3	49.6	52.6	55.6
<b>Resistencia a flexotracción</b>	- 5- 8 N/mm <sup>2</sup> (EN 196-1)					
<b>Información del Sistema</b>						
<b>Detalles de Aplicación</b>						
<b>Consumos</b>	2,3 kg de mezcla fresca por m <sup>2</sup> y mm de espesor. 2,02 kg de SikaGrout®-213 y 0,28 kg de agua por m <sup>2</sup> y mm de espesor.					
<b>Preparación del soporte</b>	<p>Los soportes deberán estar limpios, sanos, exentos de zonas huecas, grasas, aceites y lechadas superficiales. Los elementos metálicos estarán, además, exentos de óxido. La limpieza del soporte, en caso necesario, se llevará a cabo preferiblemente por procedimientos mecánicos.</p> <p>Los soportes absorbentes se humedecerán previamente hasta la saturación, evitándose el encharcamiento y comenzándose a aplicar el SikaGrout®-213 cuando las superficies adquieran aspecto mate.</p>					
<b>Condiciones de Aplicación/ Limitaciones</b>						
<b>Temperatura del soporte</b>	Mín. + 5°C / Máxima +35°C					
<b>Temperatura de aplicación</b>	Mín. + 5°C / Máxima +35°C					
<b>Método de aplicación</b>	<p>SikaGrout®-213 se coloca por vertido, inmediatamente después de su amasado, para aprovechar al máximo su efecto expansivo.</p> <p>Para los rellenos bajo placas éstas deberán ir provistas de un orificio de entrada del mortero y otro para facilitar la evacuación del aire desplazado. Se debe facilitar el proceso de relleno por agitación mecánica de la mezcla.</p>					
						
	<p>Para el relleno de grandes cavidades o para espesores superiores a 3 cm usar preparado SikaGrout®-213. También se puede confeccionar un micro-hormigón añadiendo 15 kg de árido de 3 a 10 mm por cada saco de SikaGrout®-213.</p>					

Construcción	<b>Instrucciones de Aplicación</b>	
	<b>Mezclado</b>	<p>Se utilizará preferentemente una batidora eléctrica de baja velocidad (máximo 600 r.p.m.). En un recipiente de boca y fondo anchos, verter la cantidad adecuada de agua, añadir de forma gradual el SikaGrout®-213 y batir durante 2 ó 3 minutos hasta conseguir una masa homogénea.</p> <p>La cantidad de agua de amasado puede variar entre el 13% y el 15% en peso del mortero, es decir entre 3,9 y 4,5 litros por cada saco de 30 kg de SikaGrout®-213, y estará determinada por la fluidez y resistencias mecánicas que se necesiten. Generalmente se utiliza un 14% de agua (4,2 litros por saco de 30 kg).</p> <p>Si no se dispone de una batidora mecánica, el amasado se puede hacer a mano. En este caso es necesario ampliar el tiempo de amasado a 5 minutos.</p>
	<b>Vida de la mezcla</b>	<p>Para aprovechar al máximo las propiedades expansivas del SikaGrout®-213 se aconseja su puesta en obra lo más rápido posible. Preferiblemente no superar los 10 minutos desde el mezclado.</p>
	<b>Limpieza de herramientas</b>	<p>Los útiles y herramientas se limpiarán con agua inmediatamente después de su empleo</p>
	<b>Notas de aplicación/ Limitaciones</b>	<p>No está indicado para nivelación de superficies. Por su carácter expansivo, las superficies libres deben ser las mínimas posibles, ya que pueden sufrir abombamientos y fisuraciones.</p> <p>Cuando se utilice para relleno, el tamaño mínimo de la abertura será de 10 mm.</p> <p>Para cualquier aclaración rogamos consulten con nuestro Departamento Técnico.</p>
	<b>Nota</b>	<p>Todos los datos técnicos indicados en estas Hojas de Datos de Producto están basados en ensayos de laboratorio. Las medidas reales de estos datos pueden variar debido a circunstancias más allá de nuestro control.</p>
	<b>Instrucciones de Seguridad e Higiene</b>	<p>Para cualquier información referida a cuestiones de seguridad en el uso, manejo, almacenamiento y eliminación de residuos de productos químicos, los usuarios deben consultar la versión más reciente de la Hoja de Seguridad del producto, que contiene datos físicos, ecológicos, toxicológicos y demás cuestiones relacionadas con la seguridad.</p>
<b>Notas Legales</b>	<p>Esta información y, en particular, las recomendaciones relativas a la aplicación y uso final del producto, están dadas de buena fe, basadas en el conocimiento actual y la experiencia de Sika de los productos cuando son correctamente almacenados, manejados y aplicados, en situaciones normales, dentro de su vida útil, de acuerdo a las recomendaciones de Sika. En la práctica, las posibles diferencias en los materiales, soportes y condiciones reales en el lugar de aplicación son tales, que no se puede deducir de la información del presente documento, ni de cualquier otra recomendación escrita, ni de consejo alguno ofrecido, ninguna garantía en términos de comercialización o idoneidad para propósitos particulares, ni obligación alguna fuera de cualquier relación legal que pudiera existir. El usuario de los productos debe realizar las pruebas para comprobar su idoneidad de acuerdo al uso que se le quiere dar. Sika se reserva el derecho de cambiar las propiedades de sus productos. Los derechos de propiedad de terceras partes deben ser respetados. Todos los pedidos se aceptan de acuerdo a los términos de nuestras vigentes Condiciones Generales de Venta y Suministro. Los usuarios deben de conocer y utilizar la versión última y actualizada de las Hojas de Datos de Productos local, copia de las cuales se mandarán a quien las solicite, o también se puede conseguir en la página «www.sika.es».</p>	

**Masterfiber 400:**

<b>Fibra sintètica:</b>	Estructural per el reforç de formigons de molt alta i ultra alta resistència (VHPC i UHPC).
<b>Material:</b>	Alcohol polivinílic.
<b>Diàmetre i longitud:</b>	Ø= 0,20 mm. Longitud= 18 mm.
<b>Resistència a la tracció:</b>	750 Mpa.
<b>Mòdul d'elasticitat:</b>	7100 Mpa.
<b>Densitat:</b>	1300 Kg/m³.
<b>Dosificació:</b>	15 kg/m³ – 45 kg/³.

Taula 2: Característiques Masterfiber 400.

## Fitxa tècnica: MasterFiber 400



We create chemistry

## MasterFiber 400

**Fibra sintética estructural para el refuerzo de hormigones de muy alta y ultra alta resistencia (VHPC & UHPC).**

### DESCRIPCIÓN

MasterFiber 400 está diseñada para proporcionar un refuerzo estructural en hormigones de muy alta y ultra alta resistencia. La gran fuerza de unión molecular de las fibras de PVA con el hormigón, hace que el MasterFiber 400 sea ideal para el refuerzo o control de fisuración. Estas altas fuerzas de unión eliminan la necesidad de fibras de más longitud, hacienda que la mezcla sea más sencilla con menor impacto en la consistencia por el elevado volumen de fibra de estructural que puede proporcionar un comportamiento dúctil a la estructura.

Esta fibra es adecuada en ambientes alcalinos, donde se requiera de una alta resistencia química, como en ambientes corrosivos o agresivos.

MasterFiber 400 puede ser utilizada en:

- Mobiliario urbano
- Cerramientos y otros elementos delgados
- Tubos
- Centros de transformación
- Tanques sépticos
- Y muchos otros elementos prefabricados...

### DOSIFICACIÓN

La dosificación de la fibra sintética puede variar desde 15 kg hasta más de 45 kg por metro cúbico en función de las características requeridas para el hormigón reforzado con fibras. El uso de MasterFiber 400 en sustitución de la armadura de acero principal debe hacerse tras un estudio del cálculo del proyecto.

Esto provoca una solución libre de óxido, más fina y más ligera que la solución tradicional, es más sencilla para los trabajadores y reduce los costes de mano de obra y de material.



### MÉTODO DE USO

Las fibras deben de añadirse a la amasadora después del agua y los aditivos y mezclar al menos 5 minutos para garantizar una distribución homogénea en el hormigón.

MasterFiber 400 puede ser utilizado en combinación con todos los aditivos de BASF.

### EMBALAJE

Las fibras se presentan en cajas de 15 kg.

### MEDIDAS DE SEGURIDAD

MasterFiber 400 es extremadamente estable sin riesgos para la salud. Sin embargo, en caso de incendio, protegerse del monóxido de carbono, dióxido de carbono y otros gases o humos.

### ALMACENAMIENTO Y VIDA ÚTIL

Este material es muy estable sin riesgos previsibles.

MasterFiber 400  
Página 1 de 3  
Edición: 28/02/2017

**MASTER®**  
**» BUILDERS**  
SOLUTIONS





We create chemistry

## MasterFiber 400

Fibra sintética estructural para el refuerzo de hormigones de muy alta y ultra alta resistencia (VHPC & UHPC).

### MANIPULACIÓN Y TRANSPORTE

Se recomienda la realización de ensayos previos a la utilización del producto. No emplear dosificaciones superiores ni inferiores a las recomendadas sin previa consulta a nuestro Departamento Técnico.

La eliminación del producto y su embalaje es responsabilidad del usuario final y debe llevarse a cabo de acuerdo con la legislación vigente.

### HAY QUE TENER EN CUENTA

- Se recomienda la realización de ensayos previos a la utilización del producto.
- No emplear dosificaciones superiores ni inferiores a las recomendadas sin previa consulta a nuestro Departamento Técnico.

Propiedades	
Material:	Alcohol polivinílico
Diseño:	Monofilamentada
Diametro equivalente:	0.20 mm
Longitud:	18 mm
Resistencia a la tracción:	750 MPa
Alargamiento a la rotura:	6 - 12%
Módulo de elasticidad:	7100 MPa
Esbeltez:	90
Absorción de agua:	Baja
Densidad:	1300 kg/m <sup>3</sup>
Resistencia al Alkali:	Alta

Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico.



MARCA CE DE PRODUCTO BAJO LA DIRECTIVA UE DE PRODUCTOS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA

MasterFiber 400  
 Página 2 de 3  
 Edición: 28/02/2017



### 3.4. Formigonat de la peça:

Es realitza una imprimació de líquid desencofrant prèvia al formigonat de varies capes, per la part interior de tota l'estructura de fusta.

S'anivella tota l'estructura de fusta per a una correcta i equitativa dispersió de la mescla de formigó al sortir de la mescladora i dipositar-se a l'encofrat.

Tal com s'ha esmentat anteriorment, en un primer inici, el sistema es pretenia formigonar amb dues fases: una primera fase d'ompliment formada per les dues bigues en forma de "X" la qual s'hi clavarien un seguit de connectors, i una segona fase d'ompliment del tauló superior que aniria unida a les bigues a través dels connectors esmentats. Finalment es va optar per formigonar tot el conjunt d'una sola pastada essent possible gràcies al mecanitzat de tall digital, que ens permetia realitzar un encofrat complexa d'aquestes característiques.



Imatge 28: Prototip formigonat en estat fresc.

Un aspecte molt important que calia tenir en compte a l'hora de formigonar era des d'on s'abocava el formigó amb fibres. Segons el recorregut que faria el formigó a l'hora d'escampar-se les fibres es distribuïrien d'una manera o una altra al llarg del seu recorregut. És a dir que com més recorregut fes la pasta, més planes, horitzontals i homogènies es distribuïrien aquestes fibres, i com menys recorregut fessin, es distribuïrien més perpendicularment i heterogènies.

Es va decidir tirar-les d'es d'un extrem de la peça i que les fibres llisquessin lentament i es distribuïssin horitzontalment fins a l'altre extrem.

### 3.4.1. Procés de formigonat:

1. Abocament de 6 litres d'aigua a l'interior de la màquina mescladora i posteriorment 30 kg de morter SIKAGROUT 213.
2. Amb diverses dosificacions i combinant-ho, s'ha afegit la resta de morter i aigua fins a abocar els 90 kg de morter i els 15 litres d'aigua totals.
3. Barreja de tota la mescla durant 5 minuts (la freqüència de rotació de les dues aspes mescladores del qual disposa la màquina ha estat de: aspes grans 35 Hz, aspes petites 40,8 Hz).



Imatge 29: Controlador de les aspes grans.



Imatge 30: Controlador de les aspes petites.



Imatge 31: Interior de la mescladora.

4. Abocament d'1 kg de fibres a la mescla, escampant-les lentament i evitant la formació de petits grumolls que sovint es formen entre elles.



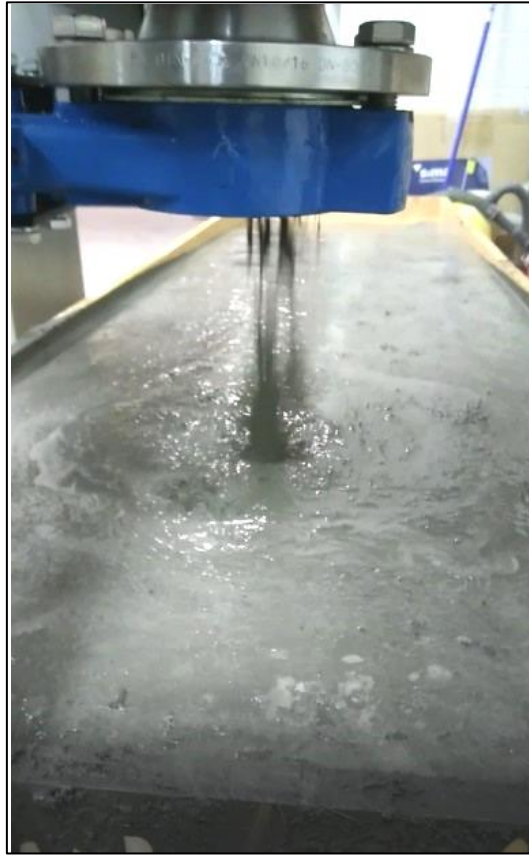
Imatge 32: Abocament de les fibres a l'interior de la mescladora



Imatge 33: Barreja interior mescladora.

5. Barreja de tota la mescla formigó-fibres durant 3 minuts obtenint una massa homogènia.

6. Abocament de la mescla de formigó lentament des d'un extrem de l'estructura de fusta, en direcció a l'altra extrem, per a una millor distribució de les fibres.



Imatge 34: Abocament de la mescla al motlle d'encofrat.

7. Repartiment i anivellació de la massa de formigó al llarg tota la peça homogèniament, i vibració a les potes amb petits cops de martell.

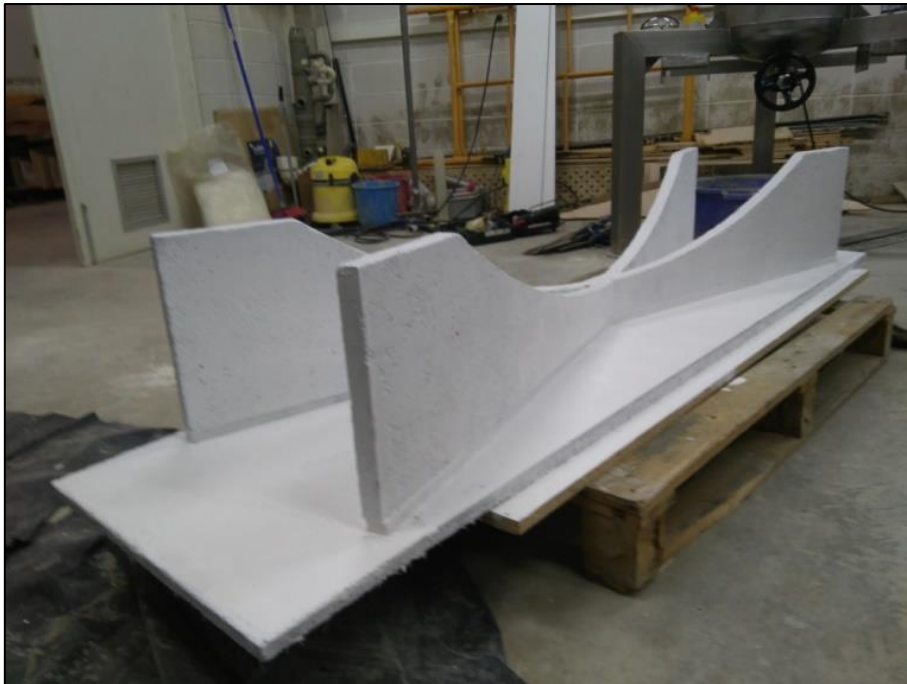


Imatge 35: Prototip amb formigó en estat fresc.

8. Passats 3 dies naturals s'ha desencofrat el conjunt (S'aconsella per a futurs prototips de realitzar el gruix de la part superior de les potes de suport més amples que la part inferior, per poder desencofrar la part inferior del taulell pressionant-lo cap avall).
9. Pintat del prototip de color blanc per poder observar amb més exactitud per on s'esquerdarà en realitzar les proves corresponents. La peça té un color gris molt fosc i seria difícil d'observar amb claredat.



Imatge 36: Prototip pintat de blanc (1).



Imatge 37: Prototip pintat de blanc (2).

### 3.5. Assaig i trencament del prototip:

#### 3.5.1. Preparació de l'assaig:

L'assaig a 4 punts s'ha dut a terme al laboratori de materials de l'Escola Politècnica Superior (EPS) de la Universitat de Girona (UdG).

Previ a tot l'estudi analític s'han preparat tots els suports i elements necessaris per dur-lo a terme degudament.

Com a base de suport de la peça s'han utilitzat 10 blocs de formigó de 50 x 13 cm situats als dos extrems de la peça. Posteriorment s'han col·locat dos recolzaments a la part superior del taulell, un d'articulat i l'altre de simple.



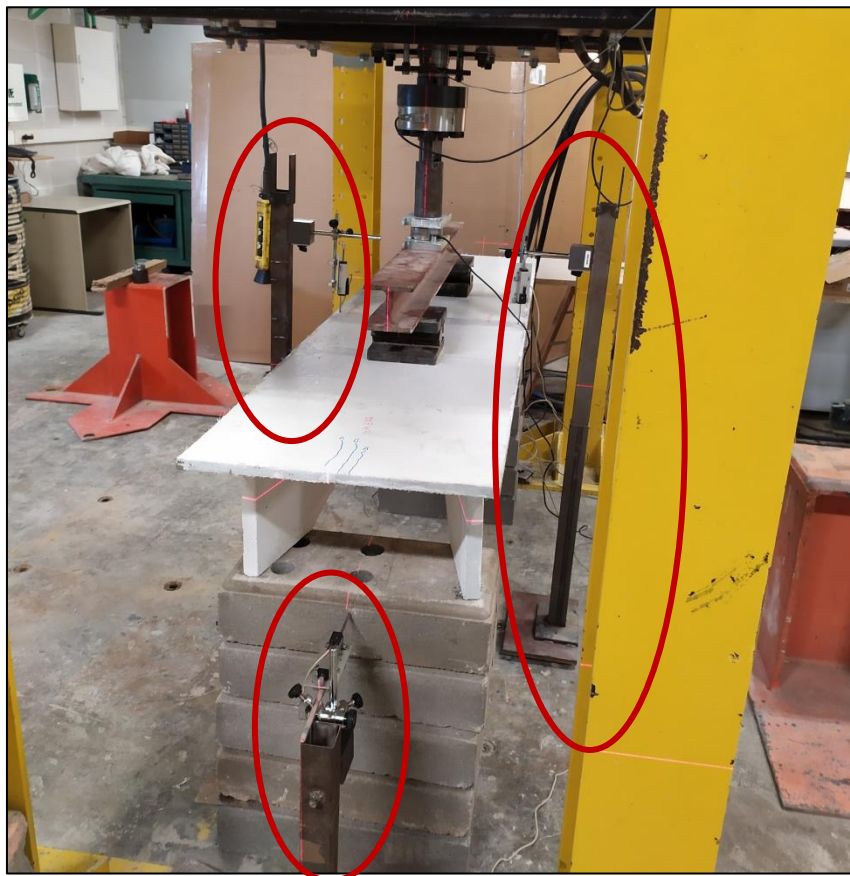
Imatge 38: Prototip amb suports i recolzaments situats.

Al damunt d'aquestes dues articulacions s'hi ha col·locat una biga metàl·lica que serveix per transmetre simultàniament la càrrega de la premsa entre aquestes dues articulacions i la cèl·lula de càrrega de 2,5 tones que serà l'encarregada de mesurar i transmetre les dades.



Imatge 39: Prototip amb biga metàl·lica i cèl·lula de càrrega.

Finalment es posicionen els transductors verticals (senyors) a cada costat del prototip, que serviran per mesurar-ne la fletxa del cantell llarg i el desplaçament horitzontal que es pugui produir.



Imatge 40: Transductors verticals situats.



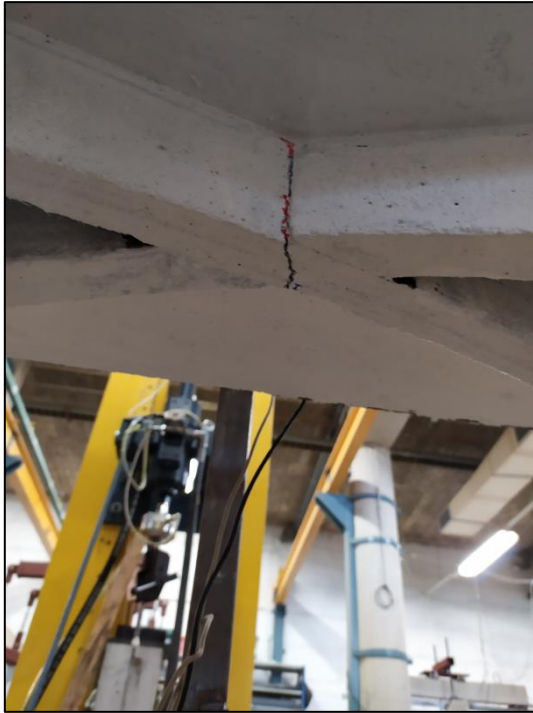
### 3.5.2. Inici de l'assaig:

L'assaig es porta a terme a una velocitat de 0,004 mm/s, amb pauses de 2 minuts per cada 1/2 mm avançat. En aquestes pauses s'han remarcat amb retolador de diferents colors les fissures observades de les diverses pauses realitzades. Posteriorment s'ha continuat amb el mètode esmentat fins a arribar als 2 mm, és a dir 4 pauses.

### 3.5.3. Evolució de les fissures:



Imatge 41: Aparició de la primera fissura.



Imatge 42: Marcatge amb retolador de color vermell.



Imatge 43: Marcatge amb retolador de color blau.



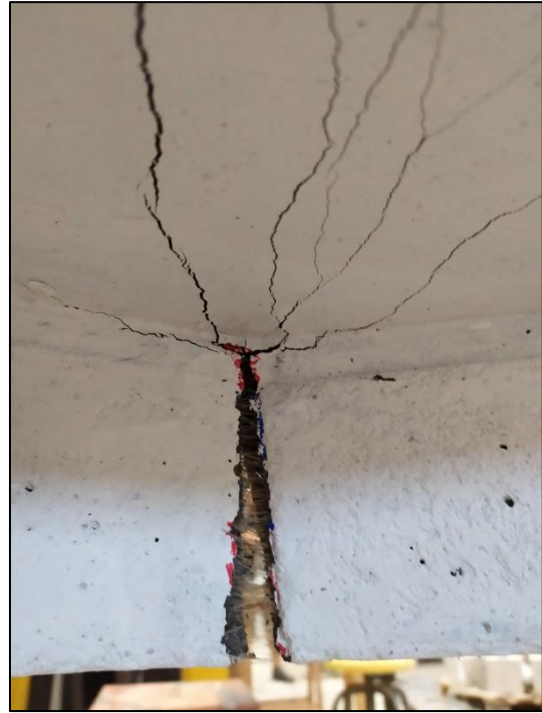
Imatge 44: Aparició de fissures en el taulell superior.



Imatge 45: Aparició fissura horitzontal.



Imatge 46: Disposició de les fibres en horitzontal.



Imatge 47: Trencament d'algunes fibres.



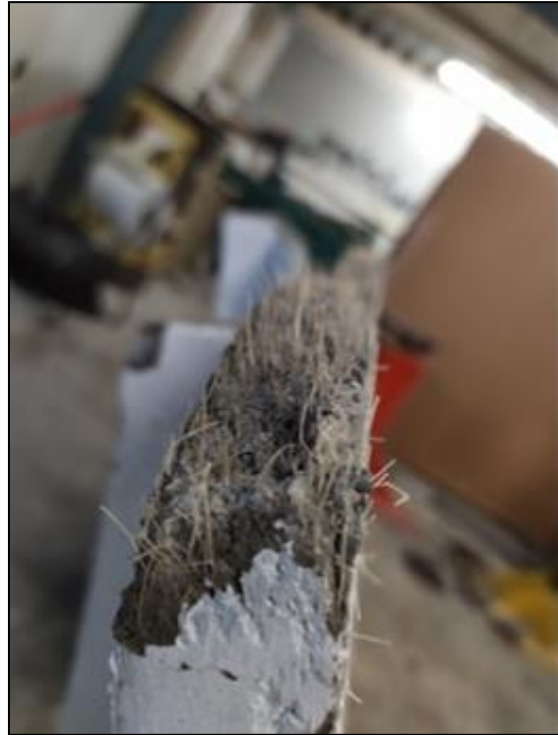
Imatge 48: Estat previ al trencament total.



Imatge 49: Disposició de les fibres (1).



Imatge 50: Part més comprimida del prototip.



Imatge 51: Disposició de les fibres (2).



Imatge 52: Prototip dividit en dos parts pràcticament simètriques.

### 3.5.1. Resum de l'assaig:

Durant l'assaig a 4 punts a flexió s'ha observat quin és el comportament pràctic estructural d'aquest model de biga davant del que podria ser un cas molt proper a la realitat i quines són les parts i zones més febles d'aquest prototip inicial.

Tal com s'ha dit, l'assaig s'ha portat a terme a una velocitat de 0,004 mm/s, amb pauses de 2 minuts per cada 1/2 mm avançat. En aquestes pauses s'han remarcat amb retolador de diferents colors les fissures observades de les diverses pauses realitzades. Posteriorment s'ha continuat amb el mètode esmentat fins a arribar als 2 mm, és a dir 4 pauses. És en aquest punt on la càrrega suportada ha estat de 450 kg. A continuació s'ha seguit augmentant la càrrega sense pauses, fins a produir-se el trencament de la peça amb 550 kg suportats.

La zona més dèbil i propera al trencament s'ha focalitzat principalment a la part central de l'element assajat, tal com estava previst en el model numèric, concretament a la zona inferior on hi ha el nus entre les dues bigues entrecruades. És en aquesta zona doncs on han aparegut les primeres microfissures i que posteriorment han anat augmentant d'amplada i de llargada verticalment fins a arribar a trobar-se amb la base del taulell superior. En aquest punt s'hi han produït un seguit de bifurcacions que a mesura que s'augmentava la càrrega i avançava l'assaig s'allargaven horitzontalment cap al taulell superior fins a predominar i remarcar una única fissura central en el taulell, del qual seria al final, la fissura que partiria i dividiria la peça en dos i marcaria el final de l'assaig.

### 3.5.2. Anàlisi de resultats

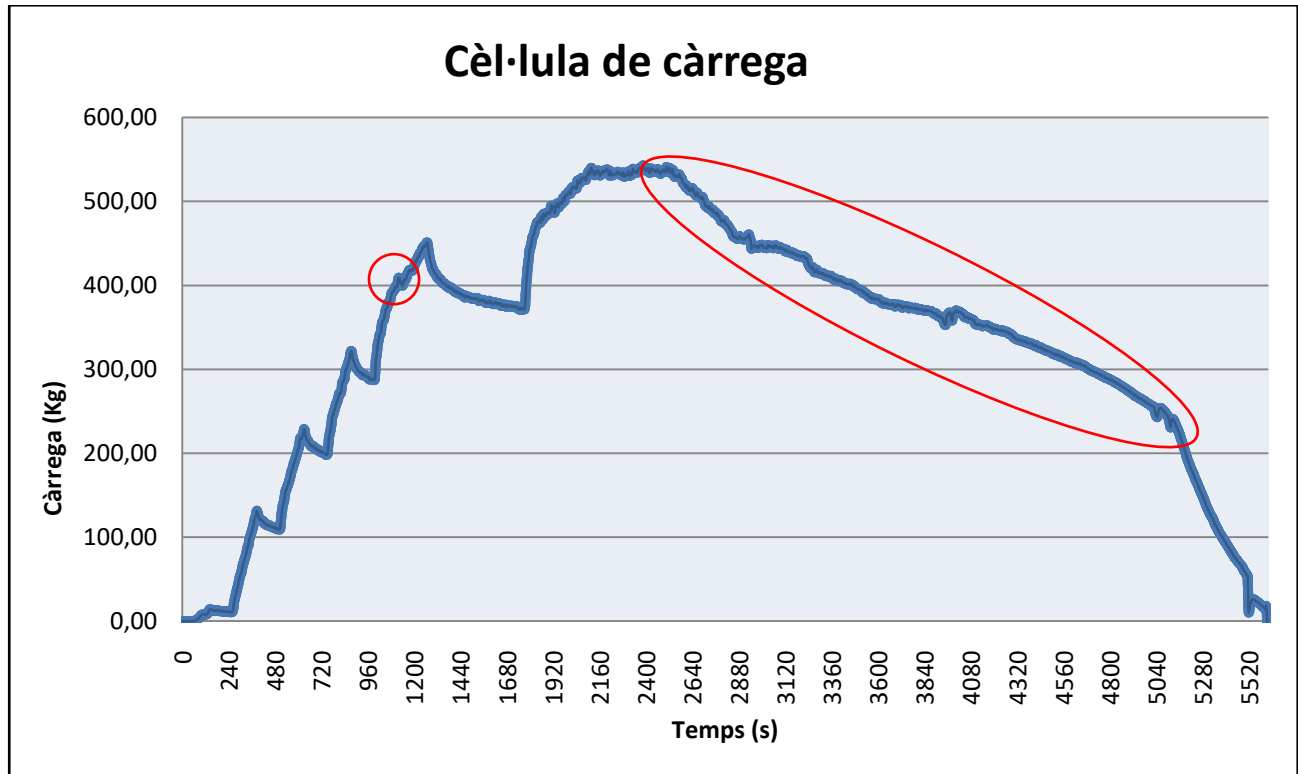
#### 2.5.1.2. Disposició de les fibres:

Observant a simple vista les dues parts seccionades del prototip es pot contemplar que la disposició de les fibres en la part central de la peça ha estat en gran manera al 100% en posició horitzontal. Aquest és un resultat satisfactori, ja que era un objectiu que es pretenia aconseguir abocant la mescla de formigó des d'un extrem de l'encofrat fins a l'altre i amb lentitud, permetent la inclinació i disposició de les fibres en posició horitzontal al llarg del seu recorregut.

#### 2.5.1.3. Assaig a 4 punts:

La gràfica escalonada mostra amb claredat les 4 pauses de 2 minuts realitzades durant l'assaig en qüestió. En aquestes pauses es pot contemplar que la càrrega suportada ha disminuït lleugerament. Aquesta disminució ve provocada pel temps de repòs, que al no continuar aplicant

una càrrega constant al prototip, l'element cedeix lleugerament fins a la propera aplicació de càrrega. És llavors, on finalment arribats els 550 kg suportats, s'arriba a la pèrdua total de resistència de la matriu i la càrrega disminueix lentament fins a arribar a 0, on es produeix el trencament total del prototip.



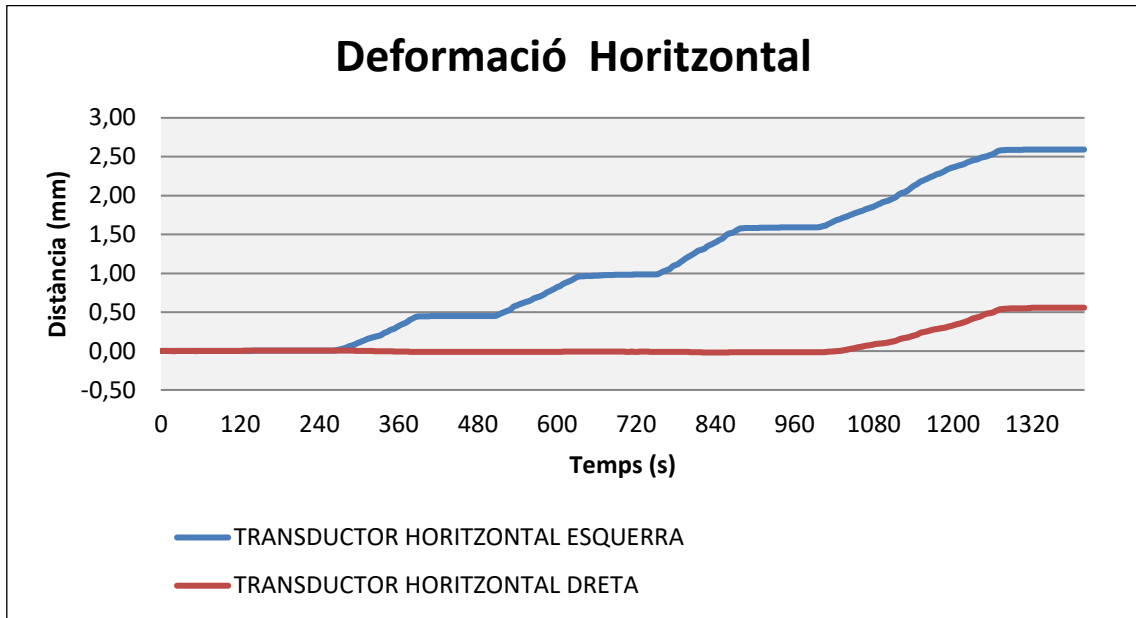
Gràfic 8: Resultats càrrega (Kg) / Temps (s) obtinguts de l'assaig (2).

Cal parar molta atenció en com entren en tensió les fibres un cop es produeix una fissura en la matriu de formigó. Les fibres de la zona afectada comencen a posar-se en funcionament, i entren en tensió, subjectades per el mateix formigó per un extrem de la fibra a l'altra extrem, fent possible l'augment de la càrrega aplicada i evitant que es produeixi el trencament total de la matriu de formigó. Seguidament es pot continuar incrementant la càrrega tal com es pot veure en el *gràfic 9* al cap de 17 minuts d'haver començat l'assaig amb una càrrega suportada de 410 kg.

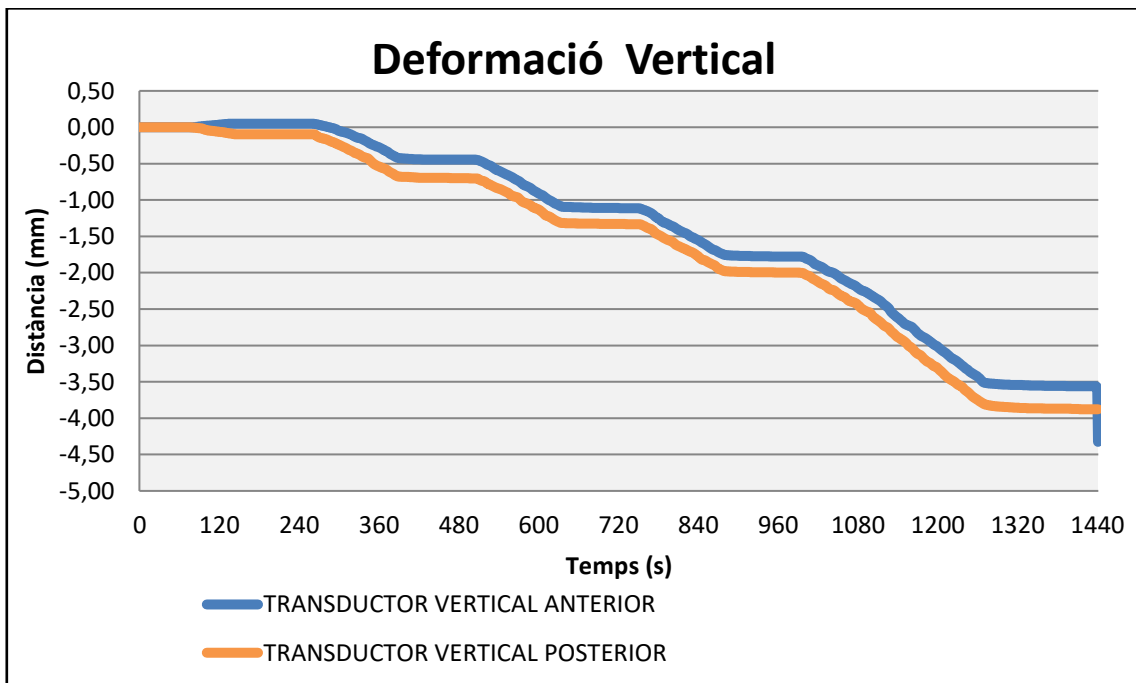
En la fase final en canvi, es produeix el mateix fet però a la inversa. Quan la peça ja no suporta més pes no es trenca de cop, i la càrrega disminueix lentament, pel fet que les fibres que anteriorment havien començat a entrar en funcionament ara es van trencant lentament.

Així doncs, podríem concloure que els resultats obtinguts després de l'assaig són acceptables. Observem que el pes total suportat pel prototip (model experimental) ha estat de 550 kg totals,

enfrent dels 300 kg que hi havia previstos prèviament en el model numèric fet amb el programa informàtic ANSYS. Aquests resultats són molt bons coneixent les característiques geomètriques de la peça, amb uns gruixos molt prims de 3 cm i una llargada del taulell superior de 2 m.



Gràfic 9: Deformació horitzontal produïda al llarg de l'assaig.



Gràfic 10: Deformació vertical produïda al llarg de l'assaig.

Si observem el *gràfic 11* de deformació vertical anterior, i sabent que els transductors verticals encarregats d'enregistrar les dades estaven situats al centre del prototip, podem concloure que s'ha produït una fletxa a la part central de la matriu compresa entre 3,5 i 3,8 mm.

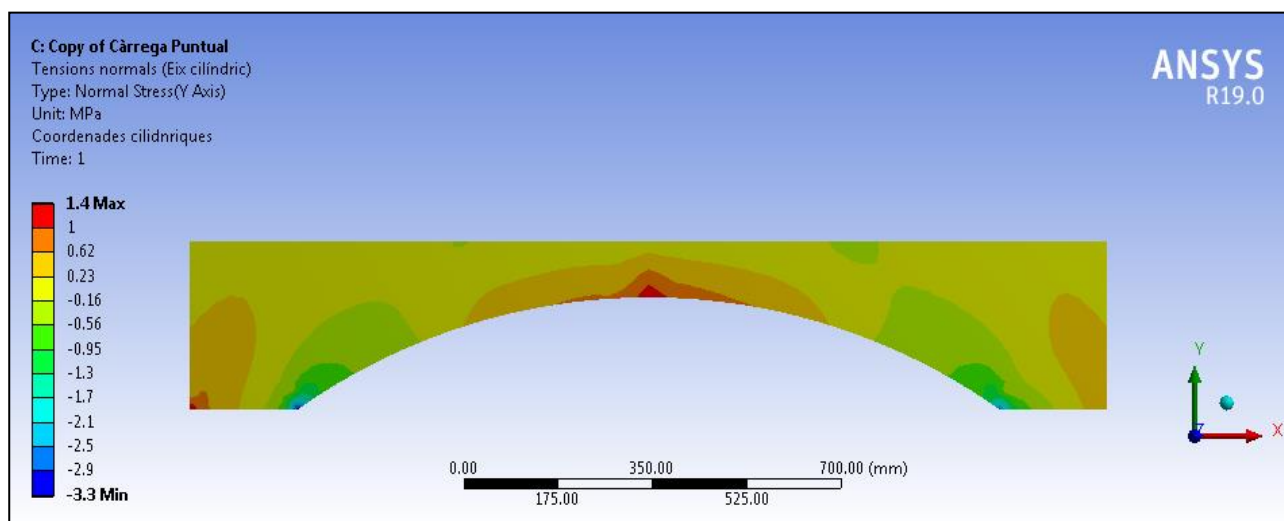
Aquestes deformacions no són del tot coincidents, i s'han produït deformacions lleugerament diferents a cada extrem del taulell tot i ser aparentment simètric a causa de:

- Imperfeccions en la geometria de la peça i la distribució del formigó.
- Naturalesa del propi material i distribució de les fibres.
- Precisió en la col·locació de la peça a assajar centrada a la premsa amb total exactitud.
- Precisió en la col·locació dels transductors encarregats d'enregistrar les dades amb total exactitud.

#### 2.5.1.4. Model numèric ANSYS:

Si observem el model numèric realitzat amb el programa informàtic ANSYS, veurem que els resultats obtinguts es relacionen amb els resultats del model experimental assajat al laboratori.

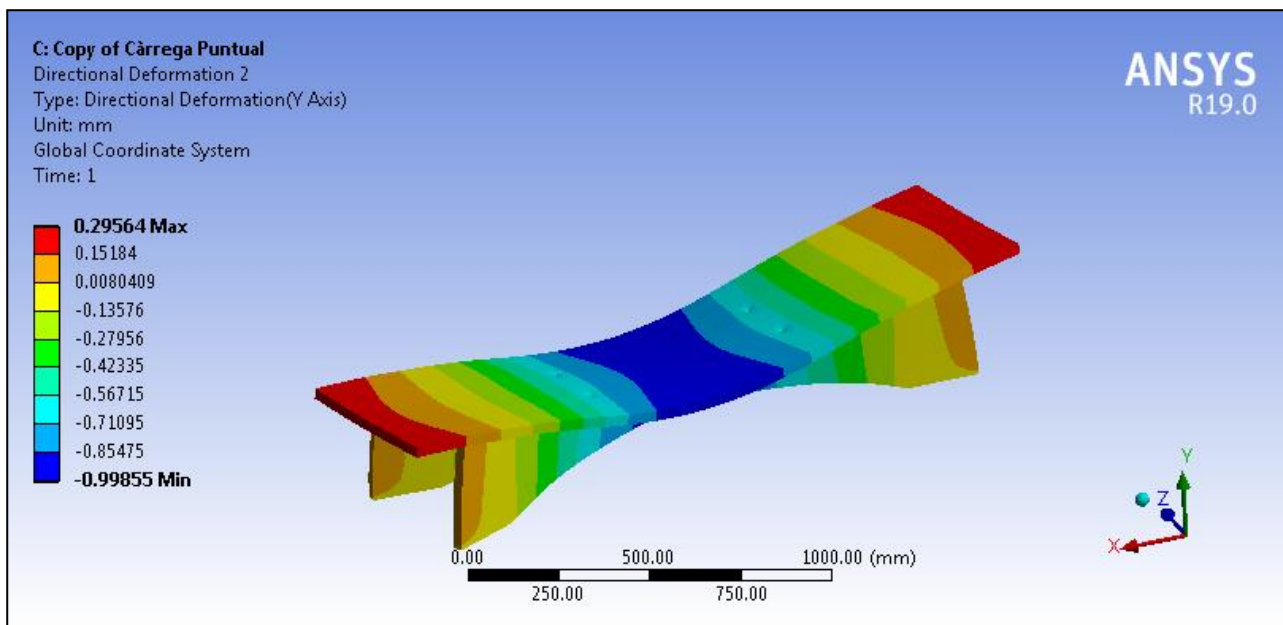
En la *imatge 53* es poden visualitzar les tensions normals assolides. En positiu i de color vermell les traccions, en negatiu i de color blau fosc les compressions. Així doncs, veiem que la part central del prototip, al nucli, és la zona més traccionada coincidint també amb la zona on varen aparèixer les primeres fissures del model experimental, i en la part interna de la base és on hi ha més compressions. En aquesta part central s'han assolit unes tensions màximes de 1,4 MPa, i en la part interna de la base s'han assolit unes tensions mínimes negatives de -3,3 MPa.



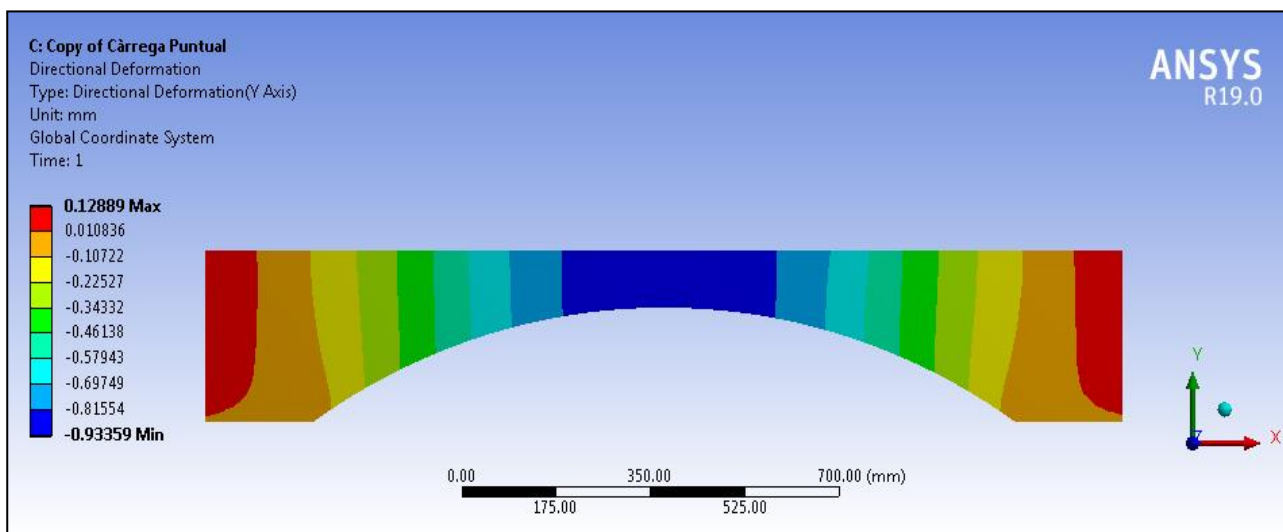
Imatge 53: Tensions assolides del model numèric.













La imatge a continuació en canvi, ens mostra les deformacions en l'eix vertical Y de tota la peça. En aquest apartat veiem que hi ha agut més discrepàncies i variacions en comparació al model experimental fet al laboratori. S'han produït com a conseqüència del que s'explica a continuació, on el model amb ordinador no té en compte les deformacions produïdes com a un sistema lineal.



Imatge 54: Deformacions en l'eix vertical Y del model numèric (3D).

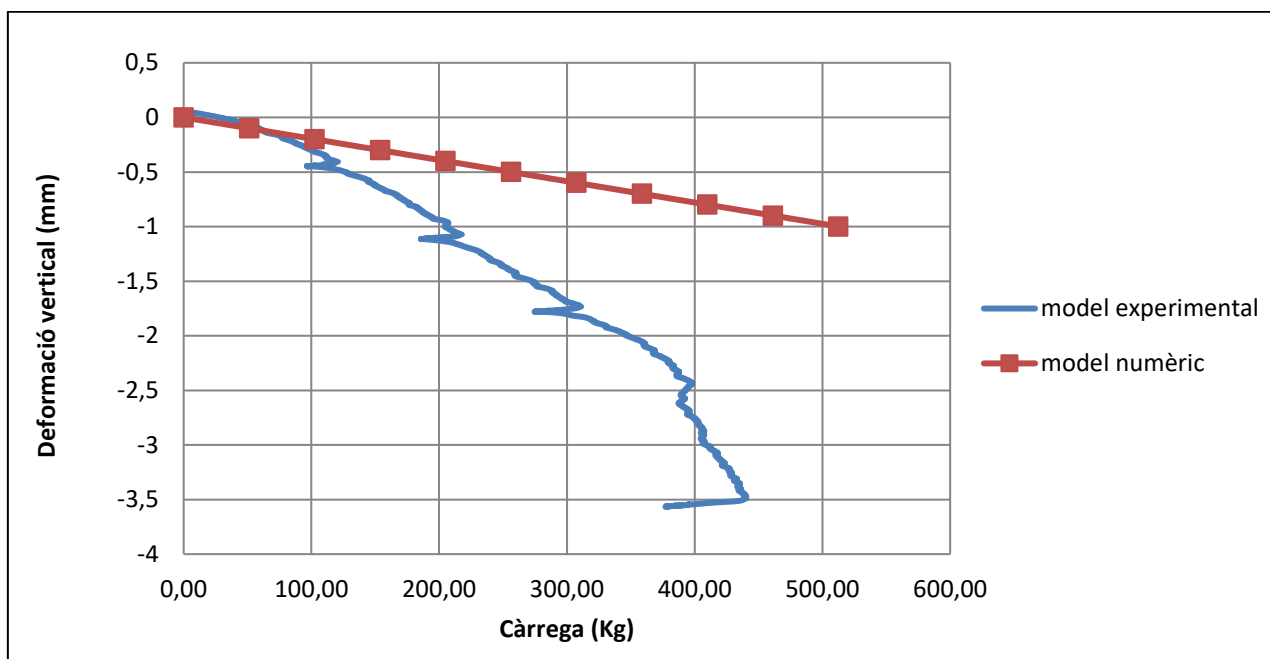


Imatge 55: Deformacions en l'eix vertical Y del model numèric (alçat lateral).

Property	Value	Unit
 Material Field Variables	 Table	
 Density	2300	kg m <sup>-3</sup>
 Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
 Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Mod... 	
Young's Modulus	1500	MPa
Poisson's Ratio	0.18	
Bulk Modulus	7.8125E+08	Pa
Shear Modulus	6.3559E+08	Pa
 Tensile Yield Strength	0	Pa
 Compressive Yield Strength	0	Pa
 Tensile Ultimate Strength	12	MPa
 Compressive Ultimate Strength	80	MPa

Taula 3: Valors utilitzats per generar el model numèric ANSYS.

### 2.5.1.5. Comparatiu model numèric i model experimental



Gràfic 11: Comparació càrrega (Kg) / deformació (mm) del model numèric i l'experimental.

Una vegada realitzat l'assaig corresponent al laboratori, s'ha ajustat el model numèric inicial creat amb ordinador a través del programa ANSYS amb el model experimental real.

El model numèric ha estat modelitzat tenint en compte les deformacions inicials del model experimental. Aquest programa treballa generant un model del prototip lineal, amb un comportament que no té en consideració els desperfectes de la geometria ni les fissures que es produeixen. És per això que s'ha ajustat el mòdul de Young del model numèric utilitzant les primeres dades del model experimental tal com es pot observar a la gràfica, on les primeres dades s'interposen.

En un primer inici, en el model numèric s'hi havia adjudicat per defecte 27.000 MPa que és un valor aproximat del mòdul de Young del formigó convencional. Posteriorment però, després de realitzar l'assaig i tenint en compte l'explicat anteriorment s'ha ajustat a la realitat per poder obtenir unes deformacions inicials semblants al model experimental ajustant-lo a un valor de 1.500 MPa.

## 4. CONCLUSIONS:

L'estudi realitzat amb formigó d'altres prestacions UHPFRC demostra que, tot i ser un material més costós que el formigó convencional, pel que fa al preu del material, els seus avantatges justifiquen l'alt cost inicial. La resistència d'aquest material envers el formigó convencional, la seva gran durabilitat, la innecessarietat d'utilització d'armadures d'acer i les seves característiques post-ruptura el converteixen en un material amb unes excel·lents propietats.

Si comparem els resultats obtinguts del model experimental amb les dades prèvies del model numèric amb ANSYS, veiem que a la realitat s'han produït més deformacions de les esperades però també ha suportat més càrrega. Això pot ser degut a factors geomètrics, ja que en un model analític no hi ha imperfeccions de cap mena i en el model pràctic podia haver-hi petites variacions de gruix imperceptibles a simple vista.

Seria adient realitzar més prototips idèntics per obtenir i comparar els resultats obtinguts amb més exactitud. També seria adient realitzar diversos prototips amb diferents variacions de mescla formigó-fibres, variant el tipus de fibres, la geometria de la peça, etc.

També em pogut observar que l'aportació de fibres en el formigó una vegada s'ha produït la fissuració de la peça, provoquen que aquesta treballi com si es tractés d'una ròtula plàstica.

En quan a l'assaig del prototip experimental, el fet de trencar-se per la part central ens demostra que en un pròxim model de prototip i dirigit a futures investigacions podria millorar-se amb diverses possibles solucions, com per exemple:

- Augmentar en general el gruix del nus central que és la part més afectada, per incrementar la seva capacitat de resistència i suportar més bé els esforços i traccions que s'hi produeixen.
- Arrodonir les arestes d'intersecció entre el taulell superior i les bigues per eliminar els angles rectes i disminuir en gran mesura les tensions generades.
- Dissenyar un prototip semblant amb la forma geomètrica dels extrems de tal manera que es pugui encaixar en les jàsseres o murs, reduint així la tracció generada a la peça.
- La col·locació de petits tirants entre pota i pota de les bigues, unint les bases dels suports evitant així l'obertura de l'arc que formen.
- Col·locar de manera modular el prototip un al costat de l'altre pel cantell curt del taulell, de manera que les potes d'una peça entrin en contacte amb les de l'altra peça, llavors

aquestes treballarien com una falca per contrarestar les forces a tracció i evitar l'obertura de l'arc.

El model experimental i el model numèric han coincidit amb exactitud en la situació de les zones més afectades per la càrrega. Que on hi haurien més traccions seria el nus de la part central (part superior de l'arc) i on hi haurien més compressions serien les parts internes de les bases de les bigues.

El prototip assajat en aquest treball a estat un primer model experimental de dimensions reduïdes, per veure com podria funcionar un element de dimensions superiors. Amb el resultats obtinguts podem concloure que un model de dimensions superiors amb les mateixes característiques, podria ser útil com a element estructural prefabricat, amb la finalitat de ser usat com a biga i base de forjat.

## Índex d'imatges:

Imatge 1: Fibres metàl·liques .....	25
Imatge 2: Fibres de polipropilè (1). / Imatge 3: Fibres de polipropilè (2). .....	27
Imatge 4: Fibres de vidre. ....	28
Imatge 5: Reforç del Pont d'Illzach, França, 2011. / Imatge 6: Pont d'Illzach, França, 2011.....	29
Imatge 7: Passarel·la de Glenmore, Canadà, 2008.....	30
Imatge 8: Coberta de l'estació de Saint Jean, França, 2008 (1). / Imatge 9: Coberta de l'estació de Saint Jean, França, 2008 (2).....	31
Imatge 10: Passarel·la Seon Yu, Corea, Seoul, 2002. ....	31
Imatge 11: Passarel·la de Sakata Mirai, Japó, 2002. ....	32
Imatge 12: Pista d'aterratge aeroport Haneda, Japó, Tokyo, 2007-2010.....	32
Imatge 13: Formes geomètriques generades a partir de cordills i pesos (polígon funicular).....	34
Imatge 14: Predimensionat de la biga. ....	37
Imatge 15: Model numèric realitzat amb el programa ANSYS (deformacions en l'eix Y). ....	38
Imatge 16: Tall mecanitzat de les diverses peces que formen l'encofrat. ....	39
Imatge 17: Encaix cua d'oreneta a la part central.....	39
Imatge 18: Muntatge de l'encofrat (1).....	40
Imatge 19: Muntatge de l'encofrat (2).....	40
Imatge 20: Muntatge de l'encofrat (3).....	41
Imatge 21: Muntatge de l'encofrat (4).....	41
Imatge 22: Muntatge de l'encofrat finalitzat. ....	42
Imatge 23: Morter utilitzat (SikaGrout 213). / Imatge 24: Fibres utilitzades (Masterfiber 400).....	42
Imatge 25: Fibres de polipropilè (Masterfiber 400). / Imatge 26: Aigua, fibres i motlle utilitzats. ....	43
Imatge 27: Mescladora, conjunt de materials utilitzats i motlle d'encofrat.....	43
Imatge 28: Prototip formigonat en estat fresc.....	50
Imatge 29: Controlador de les aspes grans. / Imatge 30: Controlador de les aspes petites.....	51
Imatge 31: Interior de la mescladora. ....	52
Imatge 32: Abocament de les fibres a l'interior de la mescladora. / Imatge 33: Barreja interior mescladora. ....	52
Imatge 34: Abocament de la mescla al motlle d'encofrat.....	53
Imatge 35: Prototip amb formigó en estat fresc.....	53
Imatge 36: Prototip pintat de blanc (1). ....	54
Imatge 37: Prototip pintat de blanc (2). ....	54
Imatge 38: Prototip amb suports i recolzaments situats. ....	55
Imatge 39: Prototip amb biga metàl·lica i cèl·lula de càrrega. ....	56

Imatge 40: Transductors verticals situats. ....	56
Imatge 41: Aparició de la primera fissura. ....	57
Imatge 42: Marcatge amb retolador de color vermell. / Imatge 43: Marcatge amb retolador de color blau. ....	58
Imatge 44: Aparició de fissures en el taulell superior. / Imatge 45: Aparició fissura horitzontal. ....	58
Imatge 46: Disposició de les fibres en horitzontal. / Imatge 47: Trencament d'algunes fibres. ....	59
Imatge 48: Estat previ al trencament total. / Imatge 49: Disposició de les fibres (1). ....	59
Imatge 50: Part més comprimida del prototip. / Imatge 51: Disposició de les fibres (2). ....	60
Imatge 52: Prototip dividit en dos parts pràcticament simètriques. ....	60
Imatge 53: Tensions assolides del model numèric. ....	64
Imatge 54: Deformacions en l'eix vertical Y del model numèric (3D). ....	65
Imatge 55: Deformacions en l'eix vertical Y del model numèric (alçat lateral). ....	65

## Índex de gràfics:

Gràfic 1: Comportament real de la tensió-deformació per compressió de l'UHPFRC. ....	12
Gràfic 2: A l'esquerra Lleis ELS/SLS, a la dreta Lleis ELU/ULS. ....	12
Gràfic 3: Càrrega-desviació d'assaig a flexió. ....	14
Gràfic 4: Diagrama càrrega-obertura de fissura. ....	14
Gràfic 5: Diagrama de càlcul multilíneal tensió-deformació. ....	15
Gràfic 6: Exemple del comportament a tracció d'un UHPFRC. ....	16
Gràfic 7: A l'esquerra Lleis ELS/SLS simplificades, a la dreta Lleis ELU/ULS simplificades. ....	18
Gràfic 8: Resultats càrrega (Kg) / Temps (s) obtinguts de l'assaig (1). <b>Error! Marcador no definit.</b>	
Gràfic 9: Resultats càrrega (Kg) / Temps (s) obtinguts de l'assaig (2). ....	62
Gràfic 10: Deformació horitzontal produïda al llarg de l'assaig. ....	63
Gràfic 11: Deformació vertical produïda al llarg de l'assaig. ....	63
Gràfic 12: Comparació càrrega (Kg) / deformació (mm) del model numèric i l'experimental. ....	67

## Índex de taules:

Taula 1: Característiques del morter SikaGrout 213. ....	44
Taula 2: Característiques Masterfiber 400. ....	47
Taula 3: Valors utilitzats en el model numèric. ....	66

## 5. BIBLIOGRAFIA

AFGC-SETRA., 2013. *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes : Recommendations*. France, 357 p.

Lim, W.Y., & Hong, S.G., 2016. *Shear Tests for Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC) Beams with Shear Reinforcement*, 57 p.

Hervé, S., 2013. *Utilisation du beton fibre à ultra-hautes performances dans le bâtiment*. France, 107 p.

Habel, K., 2004. *Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (uhprfc) and reinforced concrete*. Thèse EPFL n° 3036, Lausanne, Suisse, 195 p.

Graybeal, B., 2013. *Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community*. EUA, 163 p.

Casado, G.A., 2017. *Estudio analítico y experimental de elementos flectados de hormigón de ultra-altas prestaciones armado y pretensado*. Espanya, 92 p.

Torrijos, A.A., 2018. *Análisis experimental del comportamiento de hormigones de ultra-altas prestaciones a temperatura elevada*. Espanya, 82 p.

EHE-08., 2008. *Instrucción de Hormigón Estructural*. Espanya, 702 p.

BASF., 2009. *Hormigón de altas prestaciones*, The Chemical Company. Espanya, 18 p.

Yu, R., Spiesz P. & Brouwers, H., 2015. *Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC) :Towards an efficient utilization of binders and fibres*. *Construction and Building Materials*. Països Baixos, 273-282, 79 p.

Amador, A., *Hormigones Especiales (II): Hormigón Reforzado con Fibras*. [Internet]. Más que ingeniería [consultat el 20 de juny de 2019]. Disponible a: <https://masqueingenieria.com/blog/hormigones-especiales-hormigon-reforzado-con-fibras/>



Frías, M., *Hormigón de altas prestaciones basado en aglomerantes poliméricos*. [Internet]. *Materiales de Construcción*; vol 57, No 286 [consultat el 14 de juliol de 2019]. Disponible a: <https://digital.csic.es/handle/10261/2515>

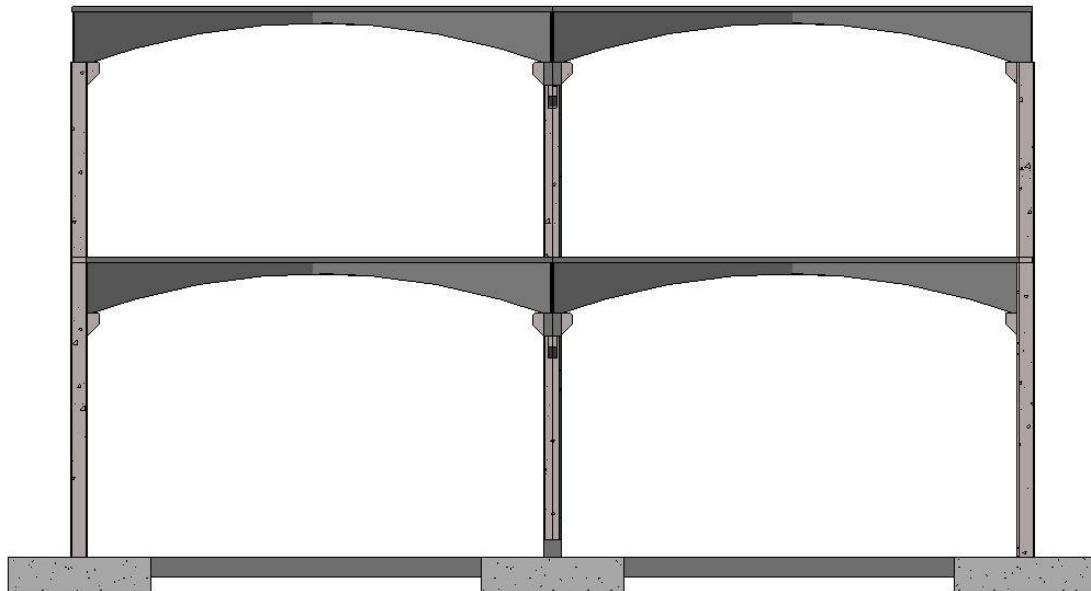
## 6. ANNEX

El prototip realitzat en aquest treball a estat un primer model experimental per veure com podria funcionar un element de dimensions superiors. No ha estat possible la realització d'un model amb mides superiors per els següents motius:

- No disposar d'una mescladora amb la capacitat suficient per subministrar altes quantitats de formigó d'una sola amassada.
- Elevat cost econòmic.
- Dificultats d'encofrar i assajar al laboratori.
- Dificultats en el transport.

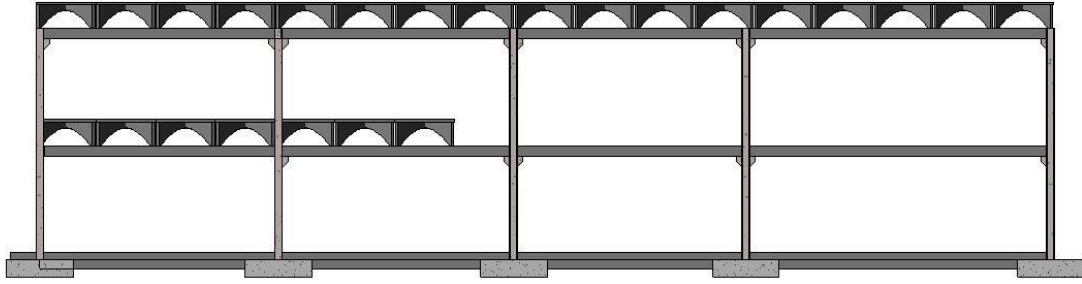
A continuació es mostren un seguit d'imatges d'un prototip de les mateixes característiques però de dimensions superiors, essent així el que es voldria aconseguir realment<sup>5</sup>. L'objectiu en un futur seria utilitzar aquesta peça com a un element estructural prefabricat, amb la funció de biga i forjat al mateix temps, tot ell recolzat per les seves potes o per un encaix a les jàsseres o murs de càrrega.

### 6.1. Exposició del prototip (Revit):

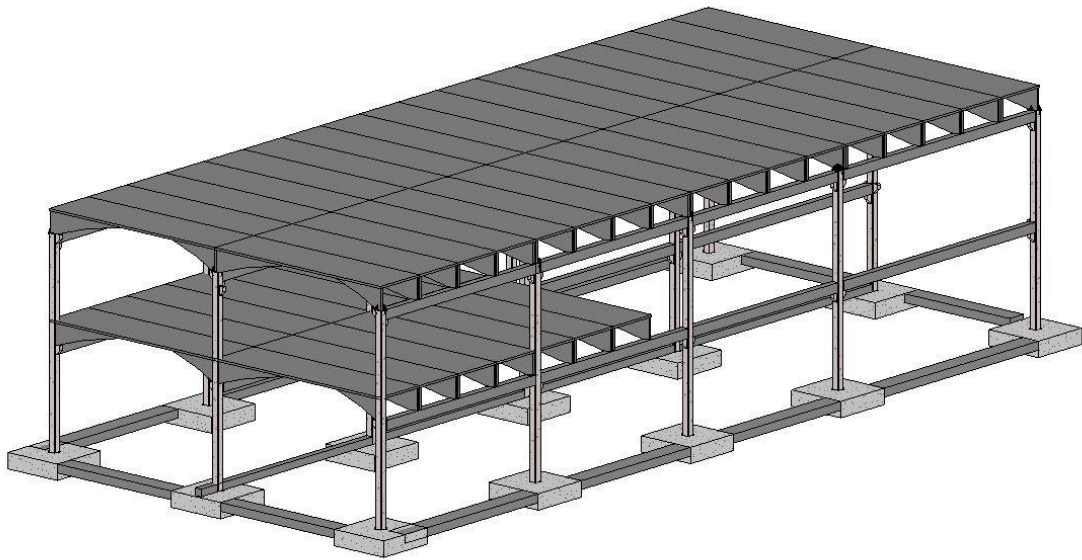


Revit 1: Secció transversal.

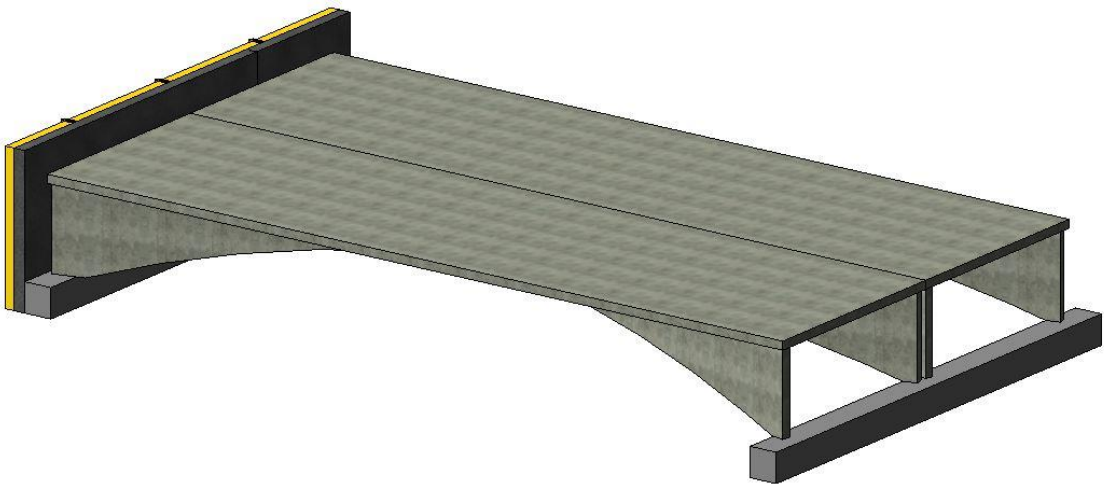
<sup>5</sup> La dimensió estimada seria d'un element prefabricat d'entre 5 i 6 m de llargada.



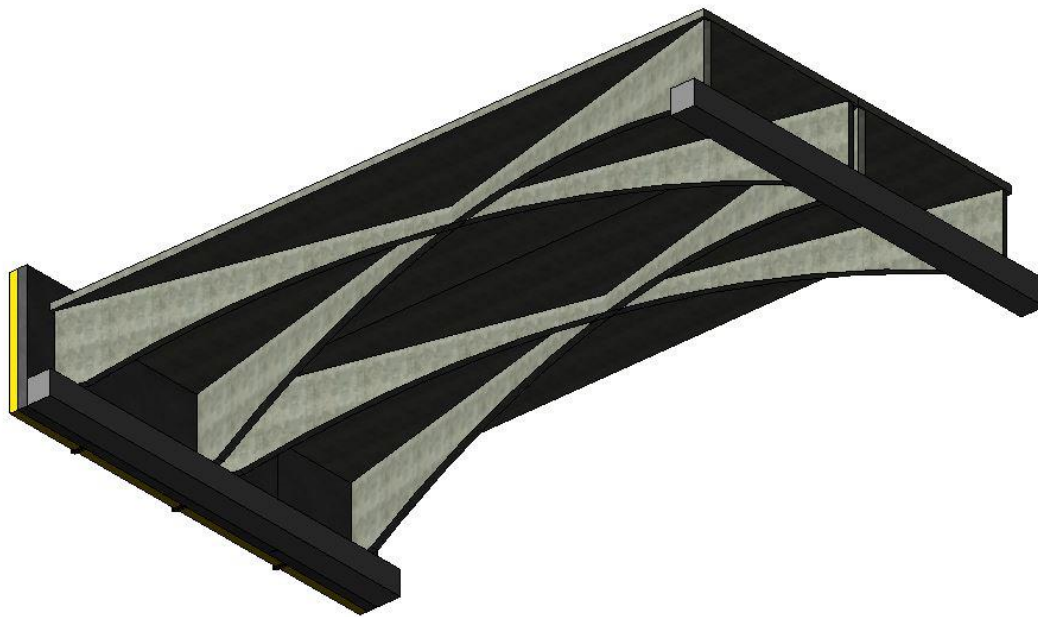
Revit 2: Secció longitudinal.



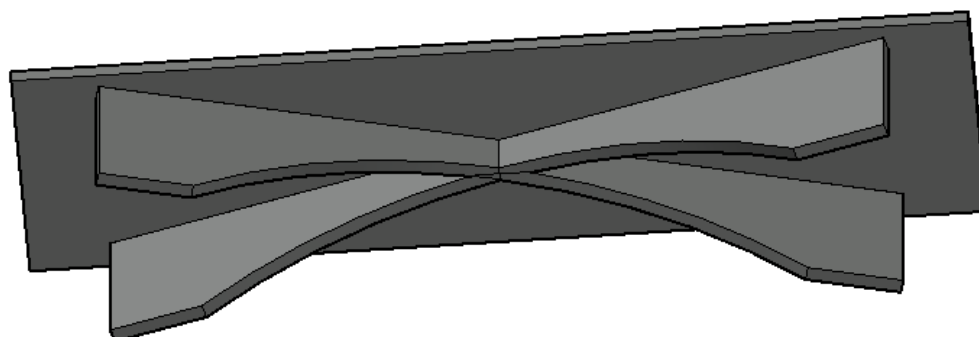
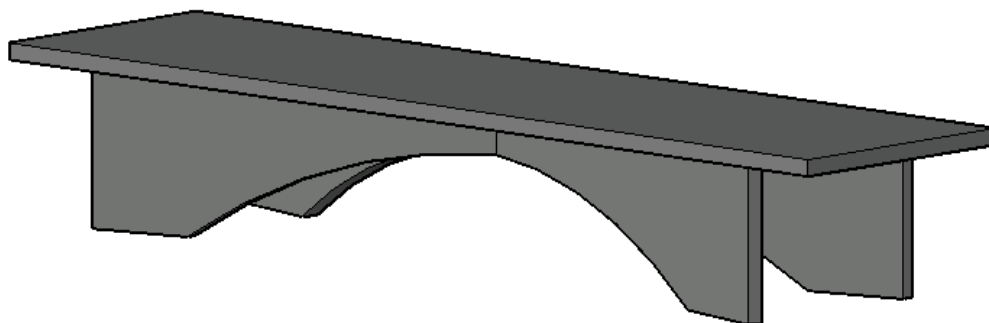
Revit 3: Estructura 3D tipus.



Revit 4: Prototip 3D (vista superior).



Revit 5: Prototip 3D (vista inferior).

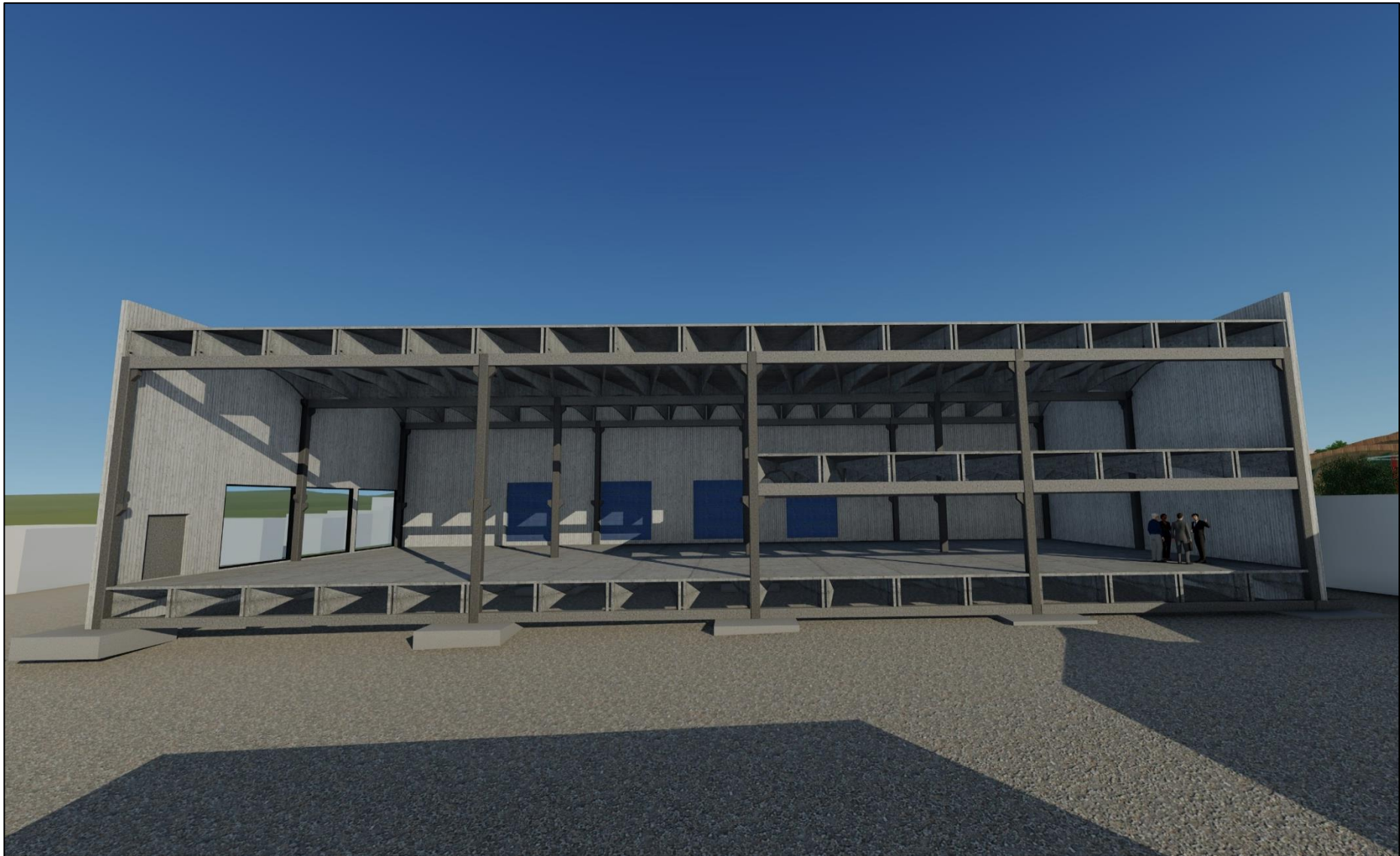


Revit 6: 3D (model simple).

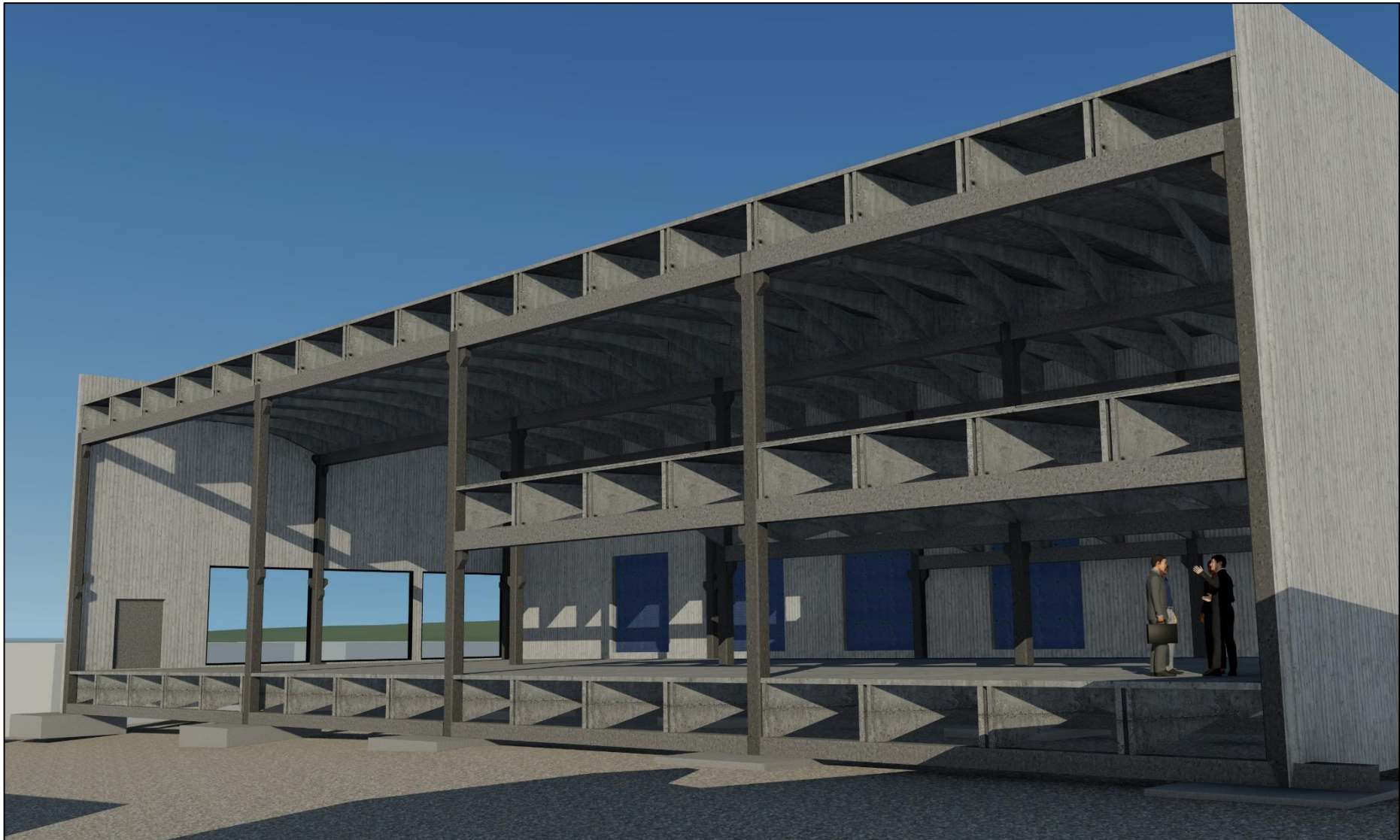
## 6.2. Exposició del prototip (Lumion):



Lumion 1



Lumion 2



Lumion 3



Lumion 4

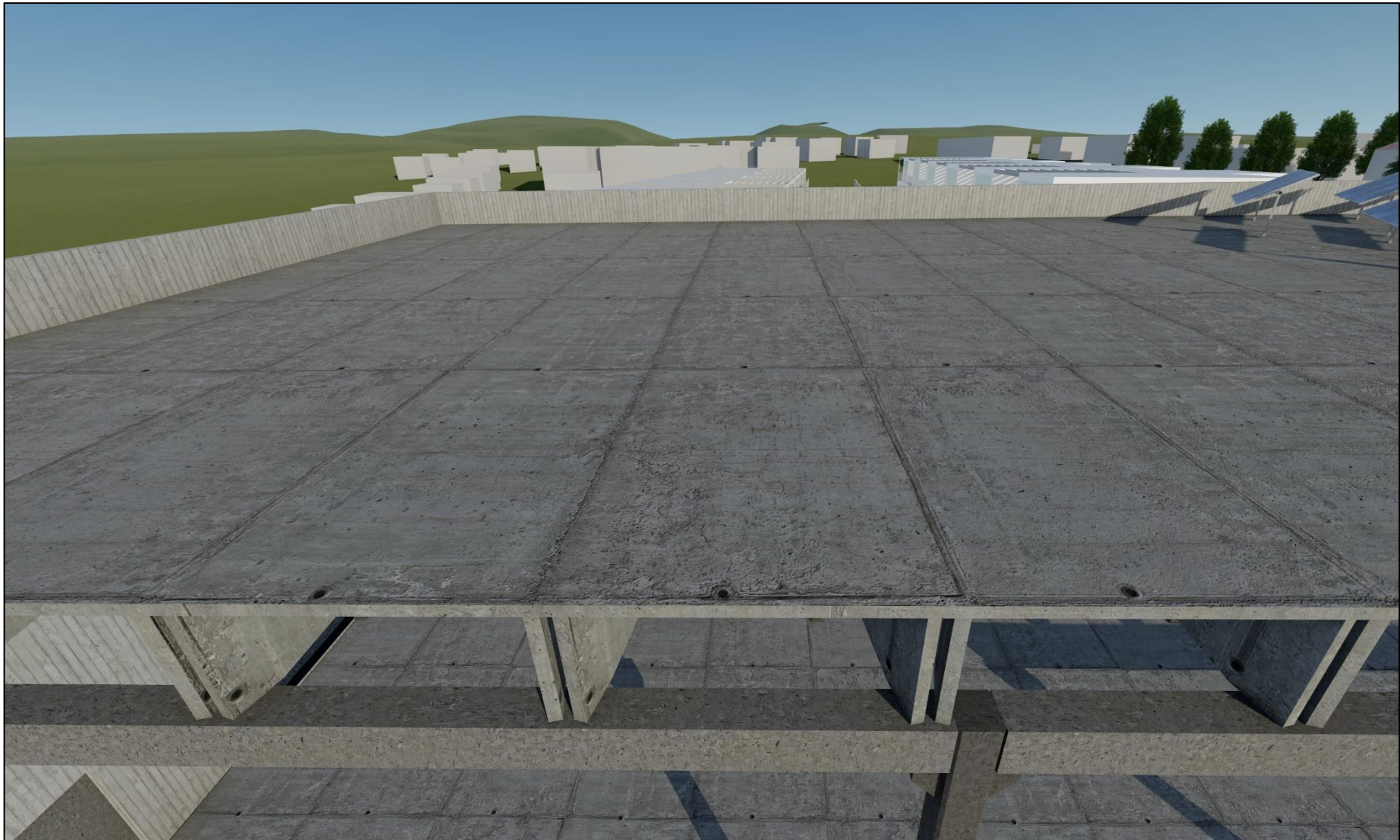




Lumion 5



Lumion 6



Lumion 7



Lumion 8



Lumion 9

