



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## PROJECTE O TESISINA D'ESPECIALITAT

**Títol**

**Determinació analítica de la resistència a tracció de provetes  
de formigó reforçades amb fibres d'acer**

**Autor/a**

**Joan Oriol Torras Balada**

**Tutor/a**

**Clement Molins Borrell**

**Departament**

**Enginyeria de la construcció**

**Intensificació**

**Anàlisi i projecte d'estructures**

**Data**

**Juny 2012**

# RESUM

Títol: Determinació analítica de la resistència a tracció de provetes de formigó reforçades amb fibres d'acer

Autor: Joan Oriol Torras Balada

Tutor: Climent Molins Borrell

El formigó reforçat amb fibres d'acer (FRFA) és un material que té els seus orígens als anys setanta, però no va ser fins als anys noranta que es va plantejar el seu ús com a material estructural. Al tractar-se d'un material relativament modern, en comparació amb d'altres de més a bastament utilitzats, encara no es té un coneixement prou desenvolupat que permeti caracteritzar d'una manera fidel el seu comportament front les diferents sol·licitacions a què es pot veure sotmès en una estructura.

La característica més rellevant que aporta la conjunció formigó-fibres d'acer respecte a una matriu plana de formigó és el comportament que presenta front a esforços de tracció. En concret, els efectes beneficiosos del FRFA es posen de manifest en l'etapa post-fissura. Durant el procés de trencament de l'estructura les fibres existents en la secció fissurada creen un *efecte pont*, entès com la capacitat de mantenir unides temporalment ambdues parts fissurades gràcies a la resistència residual aportada per les fibres. Amb això s'aconsegueix reduir la propagació de les fissures i la seva obertura, fins el moment en què les fibres siguin arrencades completament o es trenquin. És per aquest motiu que bona part de les línies d'investigació actuals es centren en estudiar el comportament a tracció i tractar de reproduir-lo mitjançant expressions matemàtiques.

En aquesta línia el Departament d'Enginyeria de la Construcció de l'Escola de Camins (ETSECCPB) de la UPC ha desenvolupat un mètode que permet caracteritzar analíticament la resposta a tracció de provetes de FRFA. El mètode es basa en la superposició del comportament individual de les fibres existents en la secció de fissura. De l'estudi del comportament de fibres sotmeses a assajos d'arrencament se sap que la resposta de les mateixes depèn directament de la inclinació que presentin respecte l'eix d'aplicació de la càrrega d'arrencament. Per tant, esdevé imprescindible determinar amb suficient exactitud el perfil d'orientació de les fibres que es troben embegudes en les provetes, atès que la resposta a tracció dependrà en bona mesura de la inclinació que presentin les fibres en la secció de fissura.

En aquesta tesina s'analitzen dotze testimonis de FRFA d'alta treballabilitat extrets de provetes en diferents direccions, amb la finalitat d'avaluar la influència de l'orientació preferencial de les fibres en la resposta a tracció. En concret, es caracteritzen les fibres de cada testimoni gràcies a les tomografies (TAC) realitzades sobre els mateixos, i se'n determina el perfil d'orientació experimental així com els coeficients d'orientació relacionats. Seguidament s'analitza si les fibres estan distribuïdes uniformement al llarg dels testimonis, i es compara el perfil d'orientació experimental amb una proposta teòrica, a fi d'avaluar la fiabilitat de la predicció. Finalment s'estudia si la resposta a tracció obtinguda fent ús de les orientacions predites s'ajusta a la resposta a tracció obtinguda amb les orientacions experimentals, alhora que s'analitza si aquesta resposta es veu afectada per l'orientació de les fibres i la direcció d'extracció dels testimonis

# ABSTRACT

Títol: Determinació analítica de la resistència a tracció de provetes de formigó reforçades amb fibres d'acer

Autor: Joan Oriol Torras Balada

Tutor: Climent Molins Borrell

Steel fiber reinforced concrete (SFRC) dates back to seventies, but it was not until the nineties when it began to be considered as a structural material. Being a relatively modern material, compared to other more widely used, its knowledge is still not sufficiently developed in order to allow a faithfully characterization of its behavior when reacting to different forces in certain structures.

The most important feature that provides the combination concrete-steel fibers in relation to a plain concrete is the behavior presented in front of tensile stress. Specifically, the beneficial effects of SFRC are demonstrated in the post-cracking stage. During the cracking process of the structure fibers placed in the cracked section develop a *bridge effect* that keeps together temporarily both sides thanks to residual strength provided by fibers. This effect allows to reduce the propagation of fractures and its crack width, until fibers are completely pulled out or broken. Due to this fact most of current researches are based on the study of tensile behavior and its reproduction through mathematical expressions.

In this way, the Construction Engineering Department in the Civil Engineering School (ETSECCPB) in UPC has developed a method that allows to characterize analytically the tensile response of SFRC specimens. The method is based on the superposition of the individual behavior of fibers placed in the cracked section. From the results of fiber pullout tests we can conclude that its behavior depends directly on fiber inclination towards pullout load axis. Therefore, it becomes essential to determine the exact orientation profile of the embedded fibers, since its tensile response will highly depend on the inclination of the fibers in the cracked section.

This assay analyzes twelve SFRC specimens created with self-compacting concrete from prismatic beam specimens in different directions, with the aim of evaluate the influence of the preferential orientation of fibers in tensile response. Specifically, fibers of each specimen are characterized through tomographies (CT), and both experimental orientation profile and orientation number can be determined. Next, it is necessary to study if fibers are uniformly distributed over the prismatic beams, and then the experimental orientation profile is compared with a theoretical proposal to assess the reliability of prediction. Moreover the assay studies whether the tensile response from using the predicted orientations approaches to the tensile response from the experimental ones. Finally it is analyzed if the tensile response is affected by the orientation of the fibers and the direction of specimens extraction.

# AGRAÏMENTS

Vull aprofitar aquestes línies per donar les gràcies a tota aquella gent que ha contribuït a fer de la meva etapa universitària, d'una manera o d'una altra, una etapa de creixement acadèmic, personal i emocional.

En primer lloc, vull agrair l'amabilitat i predisposició mostrada en tot moment pel meu tutor de tesina, en Climent Molins. T'agraeixo que en cada trobada o reunió m'hagis donat les indicacions i l'empenta adequades que m'han permès continuar perseverant en la tasca dia a dia. Gràcies, Climent.

M'agradaria agrair a tots els amics el fet d'haver pogut compartir tants bons moments plegats, gaudir i aprendre d'ells, i sobretot que m'hagin ajudat a créixer com a persona. Gràcies a tots.

Vull agrair especialment a l'Anna Fernández el seu suport i estima, en tot moment i en qualsevol situació, al llarg de tots aquests anys. Gràcies per estar al meu costat.

Finalment, agrair a la meva família l'inestimable recolzament moral i material que m'han brindat tot aquest llarg període de vida universitària. Arribar fins aquí ha estat, sens dubte, gràcies a vosaltres.

Moltes gràcies a tots.

Uri

1. INTRODUCCIÓ.....	1
1.1 Antecedents .....	1
1.2 Objectius .....	4
2. ESTAT DEL CONEIXEMENT.....	6
2.1 Introducció .....	6
2.2 Formigó reforçat amb fibres d'acer (FRFA).....	7
2.2.1 Formigó autocompactable .....	7
2.2.2 Fibres d'acer .....	9
2.3 Assajos de caracterització del FRFA .....	11
2.3.1 Assaig de flexotracció de càrrega central.....	11
2.3.2 Assaig de doble punxonament.....	12
2.3.3 Assaig de tracció directa.....	12
2.4 Comportament de fibres d'acer aïllades en assaig d'arrencament.....	14
2.4.1 Fibres llises .....	15
2.4.2 Fibres amb l'extrem en forma de ganxo .....	17
2.5 Model teòric de comportament de fibres acabades en ganxo en assaig d'arrencament.....	19
2.6 Model constitutiu per a FRFA.....	21
2.7 Orientació de les fibres .....	23
2.8 Perfil d'orientació de les fibres.....	24
3. OBTENCIÓ DE LES DADES GEOMÈTRIQUES DE LES FIBRES A PARTIR DE LES TOMOGRAFIES. 26	
3.1 Introducció .....	26
3.2 Campanya experimental .....	26
3.2.1 Amassada .....	27
3.2.2 Assajos de caracterització .....	28
3.2.3 Provetes i testimonis.....	29
3.3 Metodologia emprada per a l'obtenció de la posició exacta de les fibres.....	31

3.3.1	Dades de partida .....	31
3.3.2	Tomografia Axial Computeritzada.....	32
3.3.3	Obtenció del model tridimensional.....	33
3.3.4	Posició dels testimonis a l'espai i ordre de tomografiat .....	40
3.4	Dades geomètriques característiques de les fibres a cada testimoni.....	43
4.	ANÀLISI DE LA DISTRIBUCIÓ DE LES FIBRES.....	46
4.1	Introducció .....	46
4.2	Distribució espacial de les fibres per testimonis.....	47
4.2.1	Volums parcials .....	47
4.2.2	Determinació del centre de gravetat .....	49
4.2.3	Anàlisi de la distribució espacial de les fibres per testimonis.....	51
4.3	Distribució espacial de les fibres per provetes.....	55
4.3.1	Volums parcials .....	56
4.3.2	Anàlisi de la distribució espacial de les fibres per provetes.....	57
4.4	Conclusions .....	60
5.	PERFIL D'ORIENTACIÓ DE LES FIBRES .....	61
5.1	Introducció .....	61
5.2	Determinació del perfil d'orientació de les fibres de forma experimental.....	62
5.3	Determinació del perfil d'orientació de les fibres de forma teòrica .....	63
5.4	Comparació dels perfils teòrics i experimentals .....	64
5.5	Uniformitat d'orientació de les fibres .....	67
5.5.1	Proveta F1 .....	68
5.5.2	Proveta F4 .....	71
5.5.3	Proveta F6 .....	74
5.6	Conclusions .....	77
6.	DETERMINACIÓ ANALÍTICA DEL COMPORTAMENT A TRACCIÓ DIRECTA.....	78
6.1	Introducció .....	78

6.2	Contribució de les fibres aïllades a la resistència a tracció .....	79
6.2.1	Nombre de fibres a la secció característica de fissura .....	79
6.2.2	Resposta a assaig d'arrencament de fibres aïllades.....	81
6.3	Contribució de les fibres conjuntes a la resistència a tracció .....	83
6.4	Model de comportament a tracció directa .....	84
6.5	Comparació de les respostes a tracció experimentals i teòriques.....	84
6.6	Anàlisi de les respostes a tracció experimentals.....	91
6.6.1	Proveta F1 .....	92
6.6.2	Proveta F4 .....	92
6.6.3	Proveta F6 .....	93
6.7	Conclusions .....	93
7.	CONCLUSIONS .....	95
7.1	Introducció .....	95
7.2	Conclusions .....	96
7.3	Futures línies de treball.....	98
	ANNEX A. ALGORISME MATLAB.....	99
	ANNEX B. DISTRIBUCIÓ DE LES FIBRES PER TESTIMONIS.....	102
	ANNEX C. PERFIL D'ORIENTACIÓ DE LES FIBRES.....	105
	ANNEX D. CONTRIBUCIÓ DE LES FIBRES A LA RESPOSTA A TRACCIÓ .....	112
D.1	Equacions característiques dels punts clau.....	113
D.2	Nombre de fibres per secció .....	114
	ANNEX E. VISTES DELS TESTIMONIS.....	117
	ANNEX F. TOMOGRAFIES .....	128
	Referències Bibliogràfiques.....	136

# CAPÍTOL 1

## INTRODUCCIÓ

### 1.1 ANTECEDENTS

Des de fa més de cent anys la humanitat ha utilitzat el formigó armat com a principal material de construcció per a un gran nombre divers d'obres d'arquitectura i enginyeria, com per exemple en la construcció d'un pont, d'un edifici, d'una presa o d'una carretera. El formigó és un material compost que s'obté de la mescla d'àrids, ciment i aigua. La principal característica estructural que dota al formigó de la seva versatilitat d'usos és que resisteix molt bé els esforços de compressió, malgrat no ho faci per a altres esforços, com ara la tracció o la flexió. Per tal de solucionar aquests inconvenients, normalment el formigó s'associa amb l'acer (en forma de barres usualment corrugades), el qual treballa molt bé a tracció. Combinant aquests dos materials aconseguim el que s'anomena com a formigó armat, que permet de manera conjunta resistir molt favorablement les diverses sol·licitacions a què es pot veure sotmesa una estructura. Així, l'acer és l'encarregat de resistir la major part dels esforços de tracció i la secció de formigó s'encarrega de resistir les compressions de l'estructura. Alternativament, s'hi poden afegir additius o addicions per tal de modificar-ne alguna propietat en concret.

Recentment, una tècnica que pren cada cop més rellevància és la utilització de fibres embegudes al formigó. Aquestes fibres poden ser de característiques ben diferents, començant pel material constituent (metàl·liques, de fibra de vidre, polimèriques...) i acabant per les seves dimensions (longitud, esveltesa, forma...). L'objectiu principal de la introducció de



fibres en la matriu del compòsit és el de crear una xarxa tridimensional capaç d'absorbir els esforços de tracció que el formigó no pot resistir. Aquestes poden reemplaçar, parcial o totalment, les barres d'acer típiques del formigó armat, permetent una certa llibertat per crear elements de formigó amb formes no convencionals. No obstant, els efectes beneficiosos del formigó reforçat amb fibres d'acer (FRFA, o també SFRC per les seves sigles en anglès) es posen de manifest en l'etapa post-fissura. Durant el procés de trencament les fibres existents en la secció fissurada creen un *efecte pont*, entès com la capacitat de mantenir unides -temporalment- ambdues parts fissurades, gràcies a la resistència residual aportada per les fibres (Cho et al. 2000). D'aquesta manera s'aconsegueix reduir la propagació de fissures i l'obertura de les mateixes abans que les fibres siguin arrancades completament o bé assoleixin la seva tensió límit i es trenquin. La magnitud d'aquests efectes depèn directament de les propietats de les fibres i de la matriu de formigó, així com de les propietats resultants de la matriu del conjunt formigó-fibres.

Per altra banda, una altra innovació recent que desperta molt d'interès en la indústria de la construcció són els anomenats formigons autocompactables (o d'alta treballabilitat). En un principi es van dissenyar per tal de compensar una creixent escassetat de personal especialitzat, però han demostrat ser beneficiosos econòmicament parlant degut a diversos factors. Entre ells destaquen una construcció més ràpida i segura, una reducció notable de la mà d'obra necessària per a la posada en obra i unes seccions de formigó més reduïdes (EFNARC 2002). La característica principal d'aquest tipus de formigó, com ja denota el seu nom, és la capacitat de compactar-se sense la necessitat de vibrat, de manera que es redueixen els nivells de soroll i s'eliminen les vibracions. Totes aquestes característiques s'obtenen gràcies a la incorporació al formigó d'additius superplastificants, relacions baixes d'aigua-aglomerant i un elevat percentatge fins, entre d'altres elements.

Prenent en consideració els aspectes descrits anteriorment, esdevé inevitable la creació del formigó autocompactable reforçat amb fibres d'acer (FACRFA, o també SFRSCC per les seves sigles en anglès), el qual aprofita els avantatges que li pot proporcionar cadascun dels seus elements constituents.

Donat que la indústria demanda i utilitza cada cop més aquest tipus de formigó per a solucions estructurals, cal desenvolupar un coneixement més ampli i tot un seguit de mètodes de caracterització per tal de considerar les prestacions que aporten les fibres a la matriu de formigó. Per tal de caracteritzar-les adequadament, doncs, és necessari reproduir mitjançant diferents tècniques experimentals o mitjançant models numèrics el comportament del conjunt

matriu de formigó-fibres d'acer. Això permet obtenir la resposta del formigó als diferents esforços a què pot veure's sotmès. Els assajos més comuns per als formigons endurits són els de tracció directa, tracció indirecta i flexotracció.

Malgrat tot, la pràctica actual per tal de caracteritzar el FRFA presenta nombrosos desavantatges notables: cal molt treball experimental previ per caracteritzar el comportament post-fissuració; inoperabilitat per optimitzar les característiques de les fibres i la composició del formigó; consum elevat de temps i recursos econòmics, etc.

Donades aquestes restriccions, en Filipe Laranjeira de Oliveira (2010) desenvolupa un mètode per determinar analíticament la resposta a tracció de provetes de FRFA utilitzat amb finalitats estructurals. El mètode es basa en la suma de les contribucions a tracció de cadascuna de les fibres aïllades de la secció de fissura al ser arrencades, en el benentès que el comportament de les mateixes depèn directament de la inclinació que presentin respecte l'eix d'aplicació de la càrrega. Així doncs, aquest mètode parteix de dues dades bàsiques característiques de les provetes: l'orientació de les fibres que té embegudes en el seu interior i el nombre de fibres existents en la secció de fissura.

Un aspecte molt important, i alhora poc estudiat, és aquesta orientació de les fibres dins la matriu de formigó. Intuïtivament es pot concloure que les fibres tindran més efecte sobre la resistència residual i la tenacitat com més perpendicularment disposades estiguin respecte a la secció de fissuració, en tant que l'*efecte pont* que es generarà en la secció serà superior. No obstant, alguns estudis d'arrencament de fibres aïllades (Robins et al. 2002) conclouen que, per a orientacions de 20º respecte la perpendicular al pla de fissuració, s'obtenen resistències pic màximes en el gràfic càrrega d'arrancament-obertura de fissura. Donats aquests resultats és cabdal saber quin és el perfil d'orientació exacte de les fibres embegudes en l'interior de les provetes analitzades, perquè de la seva distribució en depèn directament la resposta a tracció de la proposta analítica.

En el treball de Laranjeira et al. (2011) es desenvolupa una aproximació teòrica a la distribució de les fibres dins la matriu de formigó, partint exclusivament d'un coeficient que caracteritza l'orientació de les mateixes (coeficient d'orientació). Aquesta aproximació s'obté partint de les hipòtesis que la distribució de fibres segueix una funció de probabilitat determinada i calibrant el mètode amb diferents treballs empírics sobre provetes de FRFA.

Estretament relacionat amb l'orientació de les fibres es troba la distribució de les mateixes al llarg de tot el volum analitzat, atès que si una zona concreta de la proveta presenta acumulació

de fibres això es traduirà, de ben segur, en una resistència residual a tracció superior. Per tant, el coneixement de la uniformitat de distribució de les fibres en les provetes esdevé necessari per a relacionar-ne qualsevol resultat de la resposta a tracció.

Prenent aquests motius com a premissa és important, doncs, conèixer amb la màxima exactitud possible quina és la distribució i orientació real de les fibres. Tradicionalment, per a determinar la orientació de fibres en provetes s'han utilitzat tècniques com l'anàlisi d'imatges de seccions tallades, mitjançant el còmput de les fibres de cada secció, o bé a través d'expressions teòriques.

Una manera fiable d'aconseguir-ho és mitjançant les dades provinents del procediment no destructiu conegut com a TAC, el qual permet obtenir a través de tomografies una visió de l'estructura interna de les provetes. A partir dels models en 3-D generats a través de les tomografies és senzill extreure'n la informació geomètrica necessària corresponent.

S'estudiarà al llarg del treball quina és la influència de l'orientació preferencial de les fibres embegudes en uns testimonis en la resposta a tracció, caracteritzada pel model analític de superposició de la contribució de les fibres aïllades. Alhora, s'estudiarà en quina mesura la predicció d'orientació de les fibres que proposen Laranjeira et al. (2011) s'ajusta amb els resultats experimentals.

## 1.2 OBJECTIUS

En la present tesina d'especialitat es pretenen assolir els següents objectius:

- Caracteritzar la posició exacta de les fibres d'acer embegudes en la matriu de formigó autocompactable de 12 testimonis, amb la finalitat d'obtenir-ne el perfil d'orientació real de les mateixes.

En base a les Tomografies Axials Computeritzades (TAC) disponibles de cada testimoni es pretén obtenir les coordenades espacials de les fibres embegudes, de manera local per a cada testimoni, amb l'ajuda d'un programa de càlcul numèric que permeti realitzar un tractament d'imatges adequat. Del coneixement de la posició exacta de les fibres s'obtindrà el perfil d'orientació real i el coeficient d'orientació associat

- Analitzar la distribució espacial de les fibres per a cada testimoni en concret i per a cada proveta de forma general, i estudiar l'orientació preferencial de les fibres al llarg de la proveta.

Del coneixement de la posició exacta de les fibres en els testimonis s'estudiarà la possible acumulació de fibres en alguna zona concreta dels testimonis (i provetes) així com la seva uniformitat de distribució. Així mateix, del perfil d'orientació de les fibres obtingut es pretén estudiar si les provetes presenten una orientació preferencial en algun dels tres eixos de l'espai, amb la finalitat de poder determinar amb posterioritat si aquesta orientació afecta a la resposta a tracció uniaxial.

- Comprovar l'adequació d'un model de predicció de l'orientació de les fibres amb els resultats experimentals obtinguts.

L'aplicació del mètode teòric d'obtenció del perfil d'orientació proposat per Laranjeira et al. (2011) precisa exclusivament del coeficient d'orientació, obtingut de la caracterització de les fibres dels diferents testimonis. De la comparació dels resultats teòrics i experimentals es pretén determinar si aquest model aproxima amb prou significació l'orientació real de les fibres embegudes.

- Obtenir la resposta a tracció uniaxial dels testimonis a través d'un model de predicció analítica.

El model de predicció analítica es basa en la superposició del comportament de les fibres individuals (Laranjeira 2010), i la intenció de la seva aplicació és determinar si l'orientació de les fibres dels diferents testimonis afecta d'una forma decisiva a la resposta a tracció uniaxial.

- Comprovar l'adequació del model del comportament a tracció en base a les dades experimentals i teòriques.

Per comparació de les respostes a tracció obtingudes a través de les dades d'orientació de les fibres experimentals i les obtingudes a través de l'aproximació teòrica es pretén determinar si el model de predicció analítica ofereix una fiabilitat d'aplicació prou elevada.

## CAPÍTOL 2

# ESTAT DEL CONEIXEMENT

### 2.1 INTRODUCCIÓ

En aquest capítol es presenta l'estat actual del coneixement pel que fa als conceptes en què es centra la tesina, de manera que s'estableixin els coneixements necessaris per assolir els objectius plantejats.

Es realitza una descripció dels diferents materials que conformen els testimonis i es fa una breu explicació dels assajos que permeten caracteritzar les característiques mecàniques del FRFA. A continuació, s'explica quin és el comportament i el mecanisme de resposta de fibres aïllades, ja siguin llises o en forma de ganxo i alineades o no respecte l'eix d'aplicació de la càrrega, sotmeses a assaig d'arrencament. Per acabar, es presenta el model de comportament teòric front l'arrencament de fibres amb extrems en forma de ganxo, proposat per Laranjeira et al. (2010, 40: 1471-1487), seguit d'un model de predicció analítica que descriu la resposta a tracció d'una proveta de formigó autocompactable per superposició del comportament de les fibres individuals (Laranjeira 2010).

## 2.2 FORMIGÓ REFORÇAT AMB FIBRES D'ACER (FRFA)

El Formigó Reforçat amb Fibres d'Acer (FRFA) és un material compost format a l'afegir a la matriu de formigó fibres metàl·liques com si d'àrids es tractessin. La característica més rellevant d'aquest material és la capacitat que té de resistir esforços de tracció un cop la proveta ja ha trencat. Aquesta resistència residual s'obté gràcies a la resistència mecànica que ofereixen les fibres existents a la secció fissurada, les quals mantenen unides les dues cares de la fissura a l'estructura. Aquest efecte es coneix com a *efecte pont*, el qual cus les fissures un cop s'obren i impedeix (si més no, dificulta) la seva propagació, evitant que el material acabi trencant. Aquesta resistència es manté fins el punt on totes les fibres de la secció fissurada són arrancades. Per tant, cal tenir molt en compte diverses variables per tal que la capacitat resistent sigui l'adequada. Així, aquesta capacitat està influenciada per la dosificació de fibres en el formigó, la distribució i orientació que les fibres prenguin dins de la proveta, el tipus de formigó utilitzat, el tipus i les característiques de les fibres considerades, etc. A més, alguns estudis (Zerbino et al. 2012) han demostrat que existeix una forta relació entre el nombre de fibres en les superfícies de fissura i els paràmetres post-fissura obtinguts mitjançant assajos de tracció uniaxial.

D'aquesta forma, per tal d'obtenir un material amb les propietats desitjades caldria aconseguir una distribució més o menys uniforme (homogènia i isotropa) de les fibres. No obstant, aquesta homogeneïtat i isotropia no es pot garantir de forma usual degut a la influència sobre la distribució de les fibres que introdueixen els quatre processos següents: barreja de les fibres amb el formigó, mètode d'abocat del FRFA al motlle, efectes dinàmics (vibracions externes i flux del material) i geometria del motlle (Laranjeira 2010; Kang et al. 2011; Zerbino et al. 2012) Alhora, la inclusió de fibres dins de la matriu de formigó dificulta la treballabilitat de la mescla, de manera que s'ha de vigilar la quantitat de fibres que s'hi introdueixen.

Una manera de solucionar bona part dels problemes enunciats anteriorment és mitjançant l'ús d'un tipus especial de formigó, el formigó autocompactable (FAC).

### 2.2.1 Formigó autocompactable

Al Japó, durant nombrosos anys a partir de 1983, el problema de la durabilitat del formigó en estructures va esdevenir un tòpic de molt interès. Per obtenir un formigó que duri al llarg dels anys, cal que treballadors qualificats i amb experiència el compactin suficientment. Degut a

una gradual reducció d'aquest tipus d'operaris en la indústria de la construcció nipona, les obres veien reduïda severament la seva qualitat. Per tal de solucionar aquesta situació es va inventar l'anomenat formigó autocompactable (o d'alta treballabilitat). Mitjançant el seu ús el formigó es podia compactar en qualsevol cantonada de l'obra simplement per l'efecte del seu propi pes i sense necessitat de cap tipus de vibració externa.

El primer prototip de formigó autocompactable va ser completat l'any 1998 utilitzant materials que ja existien en aquell moment en el mercat. El prototip va tenir bons resultats pel que fa a la retracció per assecat i per enduriment, la calor d'hidratació, la densitat un cop endurida la pasta i altres propietats (Okamura i Ouchi 1998).

El mètode per obtenir el formigó autocompactable implica no només aconseguir una pasta de morter altament deformable (Figura 2.1), sinó també capacitat de pas (Figura 2.2) i resistència a la segregació dels àrids més grossos respecte la pasta de morter quan el formigó flueix a través dels encofrats.



**Figura 2.1 - Assaig de flux d'assentament amb con d'Abrams per a formigó autocompactable (Rhein Chemotechnik)**



**Figura 2.2 - Assaig de capacitat de pas, conegut com anell J, per a formigó autocompactable (Cement Admixtures Association)**

Cal utilitzar, doncs, les següents restriccions per tal d'obtenir un formigó capaç d'autocompactar-se:

- Limitar el contingut d'àrids grossos, perquè són els que més fricció tenen a l'hora de deformar-se el formigó i per tant els que més limiten el flux.
- Utilitzar additius superplastificants, perquè permeten obtenir una pasta altament viscosa i faciliten el flux de la mescla.
- Utilitzar una relació aigua-aglomerant baixa

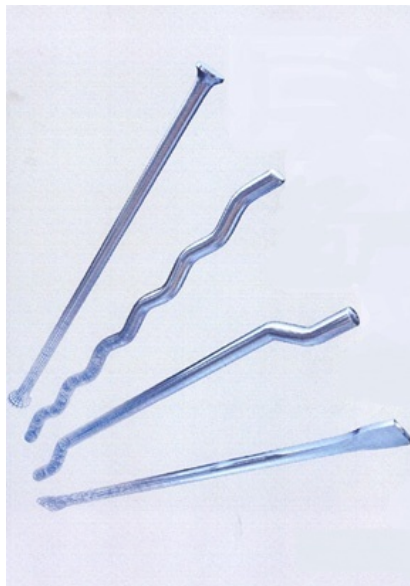
En resum, l'ús de formigó autocompactable facilita l'abocat del mateix, permet l'estalvi dels processos de vibrat i compactació i augmenta el rendiment i la seguretat en l'obra.

### **2.2.2 Fibres d'acer**

Les fibres embegudes dins la matriu de formigó són les encarregades de resistir els esforços de tracció a què es veuen sotmeses les provetes. El comportament del formigó reforçat amb fibres depèn notablement de la tipologia de fibra utilitzada, així com de les seves característiques mecàniques i geomètriques.



Avui en dia existeix una gran varietat comercial de fibres diferents. Si ens fixem en el tipus de material que les formen trobem fibres metàl·liques, polimèriques, de fibra de vidre i naturals. Pel que fa a les fibres metàl·liques, aquestes es poden obtenir mitjançant diferents processos, com serien les fibres metàl·liques rascades en calent, tallades en làmines i conformades en fred. Les obtingudes seguint aquest darrer procés es poden classificar alhora segons la geometria que presentin. Es poden diferenciar segons la seva longitud, el diàmetre o la forma que adopten. Existeixen des de microfibras fins a fibres de 60 mm de longitud i fibres amb diàmetres de 0,12 mm fins a 1,20 mm. Pel que fa a la forma geomètrica aquestes poden ser vàries (Figura 2.3): llises (*straight*), ondulades (*crimped*), amb extrems en forma de ganxo (*hooked end*), amb extrems plans (*flat end*), amb extrems en forma de cons (*cone end*) o amb geometries poligonals. Pel que fa a la qualitat de l'acer que forma les fibres, trobem un elevat interval de valors. Podem trobar des d'acers amb baix contingut de carboni amb límit elàstic de 1200 MPa fins a acers amb alt contingut en carboni amb límit elàstic de 2100 MPa.



**Figura 2.3 - Diferents geometries de fibres d'acer: cone end, crimped, hooked end i flat end, en sentit descendent (Bekaert)**

Les fibres no llises són les que aporten una major resistència donat que la seva particular geometria obliga a una deformació mecànica de la mateixa abans de ser arrencada de la matriu de formigó.

De la unió d'aquests dos materials (FAC i fibres d'acer) neix inevitablement el formigó autocompactable reforçat amb fibres d'acer, de manera que s'aconsegueixen conjuntament els avantatges d'ambdós materials constituents, tot i que impliqui la introducció d'algun inconvenient.

### 2.3 ASSAJOS DE CARACTERITZACIÓ DEL FRFA

Com ja s'ha comentat anteriorment, una de les característiques dels formigons reforçats amb fibres que els fa tan atractius és la capacitat de resistir traccions residuals, un cop l'estructura ja ha fissurat. Per tant, és important saber quina és la resposta de l'estructura quan es veu sotmesa a tracció. Amb aquest motiu, s'han desenvolupat experiments destructius capaços d'avaluar el comportament a tracció de provetes de FRFA. Existeixen assajos de tracció directa i indirecta.

Pel que fa als assajos de tracció indirecta, en destaquen dues tipologies diferents: els de flexotracció i els de punxonament. Cal comentar que els assajos indirectes són més senzills de realitzar que els directes, malgrat siguin poc operatius degut a la gran mida de les provetes.

#### 2.3.1 Assaig de flexotracció de càrrega central

L'assaig de **flexotracció de càrrega central** (RILEM 2002) parteix d'una proveta prismàtica entallada per una cara en la seva secció central. La proveta es recolza en dos suports situats un a cada extrem i se li aplica una càrrega central, a la cara oposada a l'entalla (Figura 2.4). Donada la seva disposició i geometria la proveta es veu sotmesa a un esforç de flexotracció i se la força a trencar per la secció central. La lectura i control de l'assaig es realitza gràcies a uns transductors. L'assaig permet obtenir el comportament a tracció mitjançant la relació entre la càrrega aplicada i la deflexió de la proveta (o de l'obertura de la fissura a l'entalla, *CMOD*).

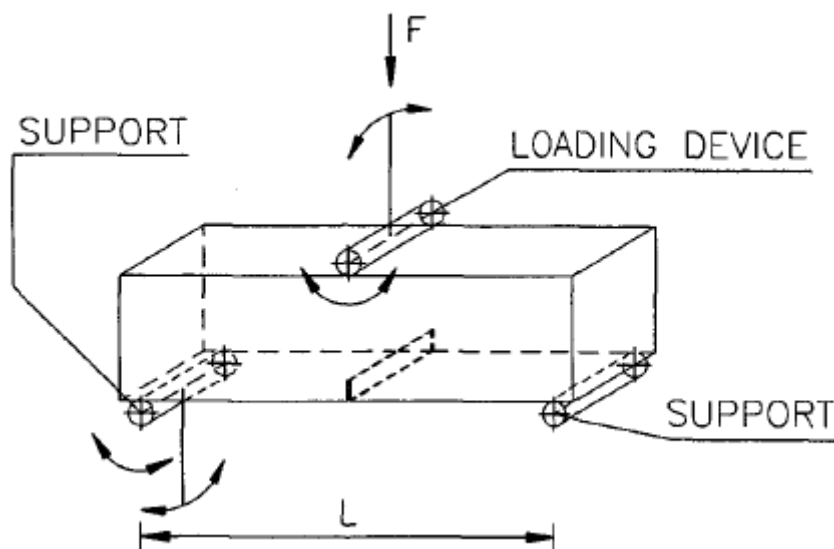
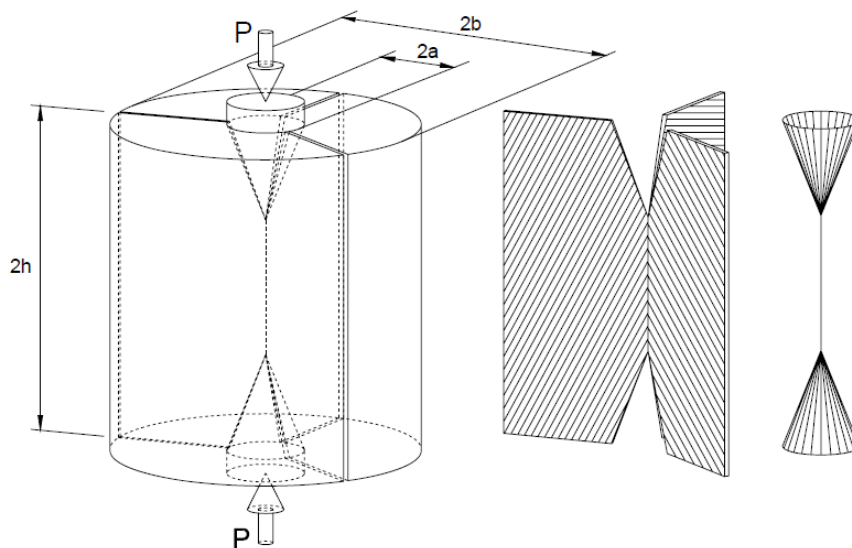


Figura 2.4 - Esquema de l'assaig de flexotracció de càrrega central (RILEM 2002)

### 2.3.2 Assaig de doble punxonament

L'assaig de doble punxonament, conegut com a assaig **Barcelona** (AENOR 2010), es realitza en provetes cilíndriques, de relació altura-diàmetre aproximadament igual a la unitat (usualment amb diàmetres de valor 150 mm), col·locades sobre plats cilíndrics de càrrega. Uns pistons exerceixen una pressió sobre les bases de la proveta, de manera que aquesta es veu forçada a trencar diametralment degut a la formació de dos cons que penetren en ella (Figura 2.5). La deformació circumferencial, corresponent a la suma de fissures radials que s'hi produeixen, es mesura gràcies a una cadena extensiomètrica, de manera que es pot determinar la resposta de la proveta a tracció segons una relació càrrega aplicada - deformació circumferencial. Aquesta configuració d'assaig permet enregistrar el comportament de la proveta després de la seva fissuració.



**Figura 2.5 - Esquema de la proveta d'assaig i de les superfícies de trencament en l'assaig Barcelona (Molins, Aguado i Guàrdia 2008)**

### 2.3.3 Assaig de tracció directa

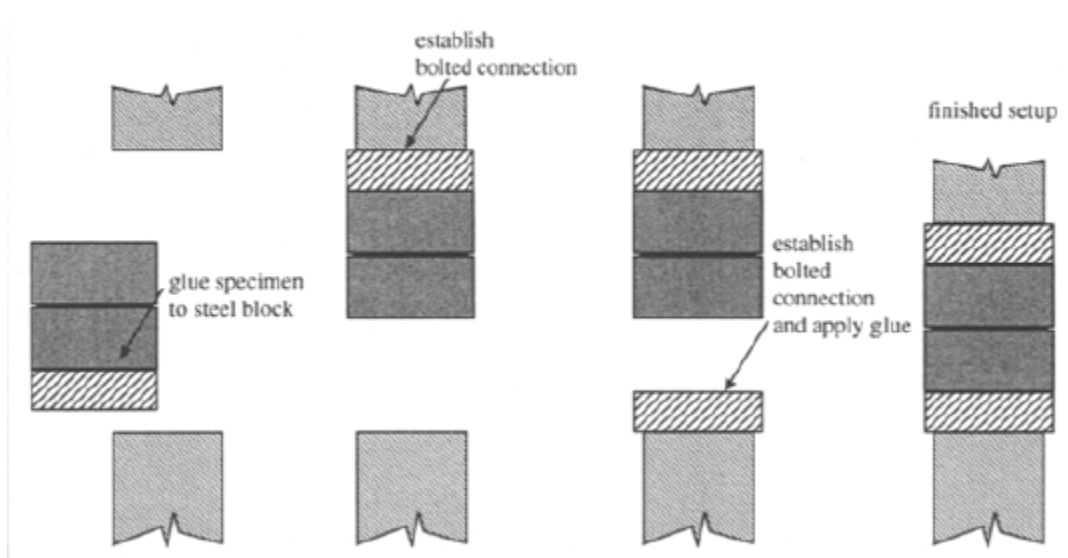
Els assajos de tracció directa són els que millor mesuren la resistència a tracció del FRFA. L'assaig més usualment realitzat és el de **tracció uniaxial** (RILEM 2001). Encara que l'estat tensional dins les provetes sigui biaxial o triaxial, s'assumeix que la corba tensió-deformació es pot determinar mitjançant aquest assaig de tracció directa uniaxial (Wang et al. 1990). Aquest experiment mesura directament la relació entre la tracció i l'obertura de fissura, però

comporta una dificultat inherent que s'ha de tenir molt present: l'execució. Així, degut a la naturalesa fràgil del formigó sotmès a tracció, els resultats experimentals obtinguts són altament dependents de les condicions en què es realitzin els assajos (Gopalaratnam i Shah 1987).

Aquest assaig segueix les recomanacions proposades per la *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages* (RILEM 2001). L'assaig es realitza sobre provetes cilíndriques formigonades in situ o bé extrems d'alguna estructura existent. Les provetes hauran de ser prèviament entallades diametralment, amb la intenció que aquesta secció entallada sigui el punt més dèbil i per on es forci el trencament de les provetes.

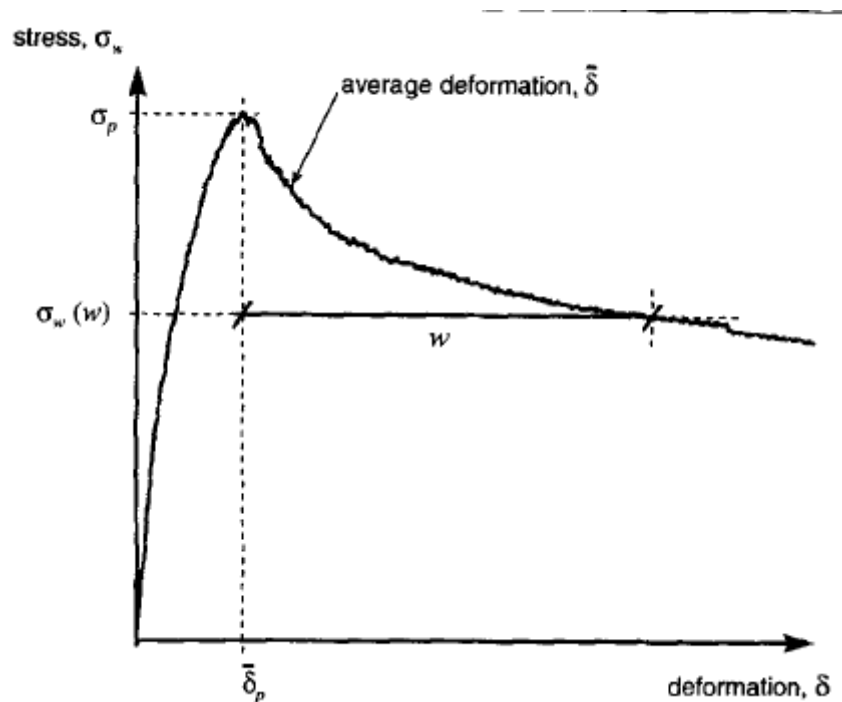
Per assegurar un assaig de tracció directa uniaxial estable, l'equipament necessari per a dur a terme l'assaig ha d'acomplir els següents requisits (RILEM 2001; Wang et al. 1990): (1) la màquina d'assaig, les mordasses i les unions entre ells han de ser suficientment rígids com per no introduir càrregues inestables un cop s'ha assolit la càrrega pic; (2) les provetes han d'estar perfectament col·locades, atès que qualsevol desalineació inicial introduirà un estat tensional no desitjat a la proveta; i (3) l'equipament d'assaig ha de tenir una elevada rigidesa rotacional, per tal de no introduir flexions a la proveta i aconseguir un estat tensional uniforme.

Prenent com a referència l'esmentat anteriorment el procés de preparació de l'assaig s'ha de realitzar amb molta cura. A la Figura 2.6 es poden veure els passos a seguir per col·locar correctament una proveta a la màquina d'assaig.



**Figura 2.6 - Esquema del procediment a seguir per col·locar les provetes a la màquina d'assaig (RILEM 2001)**

Els resultats típics obtinguts mitjançant l'assaig sobre provetes de formigó reforçades amb fibres d'acer presenten una gràfica tensió-deformació de l'estil com la que es mostra a la Figura 2.7.



**Figura 2.7 - Exemple de resposta a tracció de l'assaig de tracció uniaxial (RILEM 2001)**

S'observa que la resposta del FRFA és elàstica fins a assolir aproximadament el 80% de la resistència a tracció de la matriu de formigó (Gopalaratnam i Shah 1987). A partir d'aquest punt es produeixen deformacions no lineals fins més enllà d'assolir la resistència pic. Aquestes deformacions es corresponen amb la deformació mecànica dels ganxos de les fibres. Finalment la resistència residual es desenvolupa segons la contribució global que tenen les fibres individuals, en funció de la distribució d'aquestes a l'interior de la proveta, la seva resistència i característiques geomètriques. (Laranjeira 2010)

#### **2.4 COMPORTAMENT DE FIBRES D'ACER AÏLLADES EN ASSAIG D'ARRENCAMENT**

Per tal de caracteritzar el comportament a tracció directa d'una proveta de FRFA, on interactuen nombroses fibres d'acer alhora, cal entendre prèviament quin és el comportament d'una fibra aïllada quan aquesta és arrancada de la matriu de formigó on es troba embeguda. Donat que en la realitat les fibres no es troben completament alineades amb l'esforç de tracció a què estan sotmeses, és interessant saber quina és la influència que té aquesta inclinació pel

que fa a l'*efecte pont*. El comportament de les fibres d'acer sotmeses a assajos d'arrencament està força estudiat i descrit per diferents autors (Cunha et al. 2010; Blázquez 2009; Fantilli et al. 2008). Ha quedat demostrat, a més, que la superposició de les contribucions individuals de les fibres d'acer existents a una secció fissurada permet reproduir el comportament observat en els assajos de tracció directa uniaxial (Laranjeira 2010). Per aquest motiu, per tal de comprendre correctament el comportament a tracció directa de les provetes de FRFA és important explicar detalladament quin és el comportament de les fibres aïllades sotmeses a assajos d'arrencament

En els apartats que venen a continuació s'explicarà quina és la interacció entre les fibres i la matriu de formigó durant els assajos d'arrencament, segons es tracti de fibres llises o amb extrems en forma de ganxo i estiguin alineades o inclinades amb la càrrega d'arrencament.

#### **2.4.1 Fibres llises**

##### **2.4.1.1 Alineades amb la càrrega d'arrencament**

El comportament observat en assajos d'arrencament de fibres llises quan aquestes estan alineades amb la càrrega d'arrencament presenta un diagrama càrrega-desplaçament que usualment comença amb una primera branca lineal, iniciant en el punt (0,0) de la gràfica, corresponent a una situació on la fibra i la matriu de formigó estan fortament cohesionades i treballen conjuntament. El paràmetre principal que marca la fi d'aquesta etapa és la qualitat de la zona de transició de la interfase entre la fibra d'acer i la matriu de formigó (Cunha et al. 2010). És important, doncs, l'estudi específic d'aquesta interfase perquè les propietats de la matriu en depenen estretament. Per tant, les primeres fissures apareixen inevitablement en aquella zona sotmesa a un major esforç, de manera que la interfase fibra-matriu comença a fallar. Aquest procés de pèrdua d'adherència pot portar a dues situacions ben diferenciades: un mecanisme progressiu i estable o un de catastròfic. En el primer d'ells la corba que segueix la branca lineal és una corba còncaua no lineal que decreix, essent el caràcter no lineal degut a efectes d'abradió que tenen lloc a la interfase entre la fibra i el formigó un cop superat el pic de càrrega. Pel segon cas el diagrama segueix sent lineal fins a la càrrega pic seguit d'un decreixement bruscat fins a assolir la càrrega residual, on finalment es produeix la sortida de la fibra de la matriu.

Per tant, la contribució de les fibres llises en assajos d'arrencament passa per un coneixement acurat de les característiques de la interfase fibra-formigó.

#### **2.4.1.2 Inclínades respecte l'eix d'aplicació de la càrrega d'arrencament**

La principal diferència entre les fibres inclinades respecte les alineades rau en el doblegat de les fibres durant l'arrencament i en l'efecte les forces de desviació que es produeixen en l'angle que forma la fibra a la sortida de dins el formigó, generant l'*spalling*.

Quan una fissura es troba amb una fibra inclinada, aquesta primera acostuma a canviar la direcció de propagació i discórrer paral·lela a la fibra, donat que la zona d'interfase és la més dèbil de la matriu. Això provoca un estat tensional asimètric que implica un decreixement de la càrrega d'inici de la pèrdua d'adherència amb l'increment de l'angle d'inclinació (Cunha et al. 2010).

Un cop es comença a perdre l'adherència entre la fibra i la matriu de formigó l'obertura de la fissura comença a créixer. Per tal de garantir una compatibilitat geomètrica de tots els elements, la fibra tendeix a reorientar-se adequadament, reduint l'angle d'inclinació respecte un eix perpendicular al pla de fissura. Les sol·licitacions a les que es veu sotmesa la fibra inclinada passen a incloure un estat de tallant i flexió. Alhora que aquest procés de doblegat es produeix, la pressió induïda sobre la matriu de formigó que envolta la fibra provoca una fallada local de la matriu, a ambdós costats, quan se supera un valor crític. Això genera una pèrdua de peces petites de matriu en forma de tascó, formant aproximadament 90° respecte la fibra embeguda (Cailleux et al. 2005), la qual provoca unes pèrdues de càrrega sobtades en la corba càrrega-desplaçament (Cunha et al. 2010). Aquesta pèrdua de material és conegut amb l'esmentat efecte *spalling*. El volum de l'exfoliació de la matriu depèn de la càrrega a la qual està sotmesa la fibra, la forma i orientació de la mateixa i la resistència a tracció i mida màxima dels àrids de la matriu de formigó. Després de cada exfoliació de la matriu es crea una cunya més estable, essent la longitud de fibra embeguda romanent la que resta per a ser arrencada. A partir del punt en què ja no es perd material, degut a que no es supera el valor crític de pressió sobre la matriu, la resistència romanent, deguda a l'important increment de la fricció entre fibra i matriu que es produeix gràcies a la força de desviació, es manté constant, de manera semblant a com ho feien les fibres alineades, però en un valor superior degut a que aquestes forces de desviació n'incrementen el fregament.

D'aquesta manera es pot concloure que els assajos d'arrencament sobre fibres llises venen governats per dos mecanismes diferents (Robins et al. 2002): adherència - evidenciada com a la tensió tangencial existent a la interfase fibra-matriu de formigó - i fricció - evidenciada com a la tensió tangencial que permet el lliscament relatiu de la fibra al llarg de la interfase un cop s'ha perdut l'adherència. Atès que el fregament és superior en les fibres no alineades gràcies a les forces de desviació, aquestes resisteixen més.

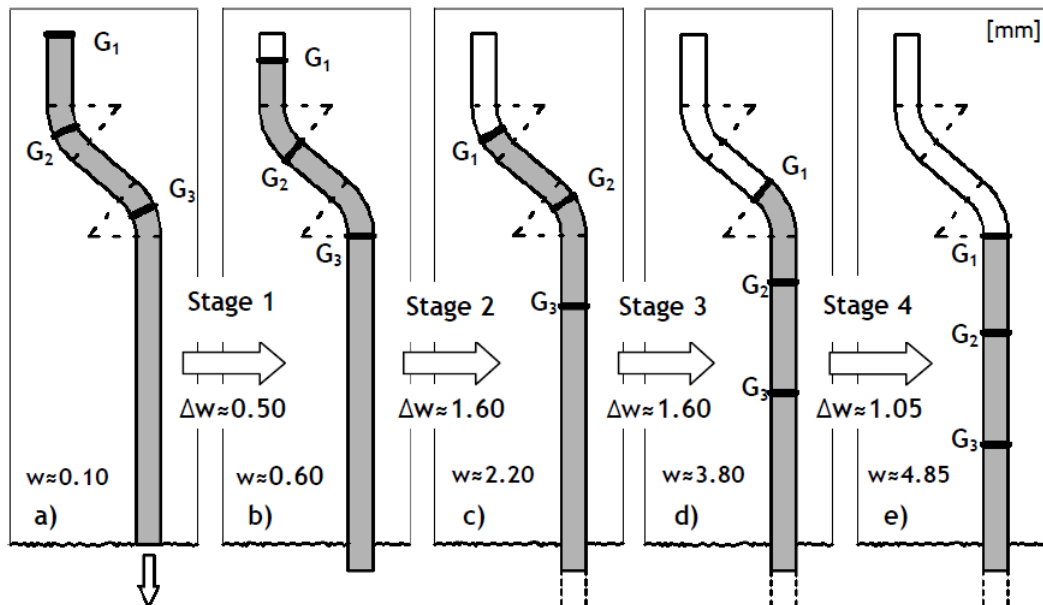
#### 2.4.2 Fibres amb l'extrem en forma de ganxo

El comportament a arrencament de les fibres conformades en fred que tenen els extrems en forma de ganxo és força semblant al descrit per a les fibres llises, amb la diferència que inclouen un tercer mecanisme: l'ancoratge mecànic del ganxo. L'existència d'aquest ancoratge implica que les fibres hagin de patir deformacions plàstiques per a ser arrancades, cosa que es tradueix en augments de la càrrega necessària per a l'arrencament de les mateixes. Aquest augment de càrrega provoca, alhora, que el volum de la falca exfoliada de la matriu augmenti sensiblement.

Diferents estudis experimentals (Pompo et al. 1996) suggereixen que la contribució del ganxo es pot caracteritzar mitjançant quatre regions diferents, cadascuna d'elles amb un comportament mecànic concret: (1) resposta elàstica de les fibres en la matriu de formigó seguida per una pèrdua d'adherència, de manera anàloga a com succeïa en fibres llises; (2) activació de la fibra i estirament del ganxo; (3) lliscament sota fricció de la fibra per la matriu de formigó, un cop la fibra ha patit la deformació necessària per a circular lliurement; i (4) extracció completa de la fibra de la matriu, la qual comporta un descens de càrrega amb l'obertura de fissura causat per la pèrdua de contacte entre ambdós elements. Les regions (1), (3) i (4) són compartides pel comportament a arrencament de les fibres llises, mentre que la regió (2) s'explica a continuació.

Aquesta segona regió comprèn quatre etapes diferenciades. A la següent figura es poden veure aquestes etapes per a fibres alineades amb la càrrega d'arrencament, així com l'ample de fissura ( $w$ ) i els increments dels amplex de fissura entre etapes ( $\Delta w$ ), considerant la geometria del ganxo descrita per Van Gysel (2000).





**Figura 2.8 - Etapes de deformació del ganxo i obertura de fissura associada (Laranjeira et al. 2010, 40: 1471-1487)**

Al principi del procés (Figura 2.8a) d'arrencament la fibra tot just ha perdut l'adherència amb la matriu i la geometria del ganxo es manté fixa per moments. A partir d'aquest moment les seccions corbades (punt G<sub>2</sub> i G<sub>3</sub> a la Figura 2.8a) es veuen sotmeses a deformacions plàstiques, de manera que la càrrega d'arrencament augmenta substancialment fins assolir un màxim, corresponent al punt on G<sub>2</sub> i G<sub>3</sub> entren en un segment recte del conducte de lliscament dins la matriu (Figura 2.8b). A continuació la càrrega d'arrencament disminueix donat que els punts G<sub>2</sub> i G<sub>3</sub> ja no estan sotmesos a deformació plàstica. No obstant, quan el punt G<sub>2</sub> assoleix la posició originària del punt G<sub>3</sub> (Figura 2.8c) aquest primer es veu sotmès de nou a una deformació plàstica perquè se l'obliga a doblegar-se cap al costat contrari al de la seva forma original. Durant la tercera etapa es produeix un lleuger decreixement de la càrrega d'arrencament degut a l'entrada del punt G<sub>2</sub> a l'últim tram recte del conducte de lliscament. A partir d'aquest moment la càrrega d'arrencament queda governada per la fricció que els punts G<sub>1</sub> i G<sub>3</sub> exerceixen sobre les parets del conducte. Quan el punt G<sub>1</sub> assoleix el segon segment corbat (Figura 2.8d) la fricció augmenta. L'última etapa culmina quan el punt G<sub>1</sub> arriba al darrer tram recte (Figura 2.8e), mantenint fins a l'extracció completa de la fibra una resistència residual degut a la geometria deformada de la pròpia fibra (Laranjeira et al. 2010, 40: 1471-1487).

#### 2.4.2.1 Alineades amb la càrrega d'arrencament

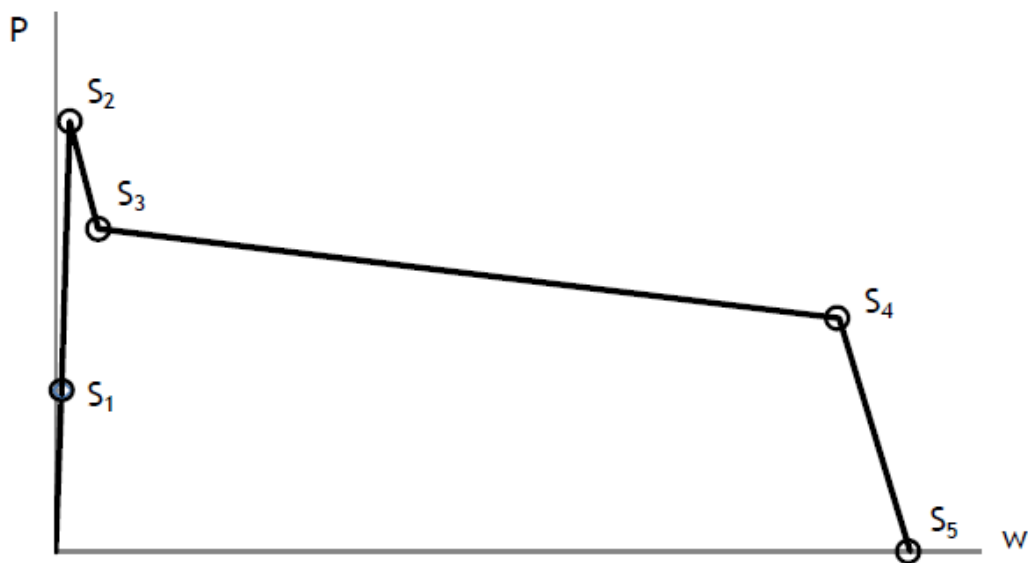
Les diferents propietats dels materials condueixen a determinar la contribució del mecanisme d'ancoratge mecànic en la resistència a l'arrencament de les fibres. S'ha observat experimentalment que com més gran sigui el diàmetre de la fibra major serà l'energia necessària per a doblegar-la; com més elevada sigui la resistència característica de la matriu on la fibra es troba embeguda major serà la càrrega pic en el gràfic càrrega-desplaçament; i com més elevat sigui el límit elàstic major haurà de ser l'energia necessària per deformar el ganxo (Van Gysel 2000). S'ha d'assolir un compromís entre la composició de la matriu de formigó i el límit elàstic de l'acer per tal d'aconseguir una resposta òptima front a l'arrencament de la fibra, evitant en tot moment una ruptura fràgil.

#### **2.4.2.2 Inclínades respecte l'eix d'aplicació de la càrrega d'arrencament**

L'augment de càrrega degut a les deformacions plàstiques del ganxo provoca que el volum de la cunya exfoliada de la matriu augmenti sensiblement respecte al cas de les fibres sense ganxo. Alguns estudis realitzats sobre fibres inclinades aïllades conclouen que l'angle d'inclinació que maximitza la càrrega pic es troba en l'interval  $10^\circ - 30^\circ$ . No obstant, s'ha determinat (Robins et al. 2002; Cunha et al. 2010) que quan augmenta l'angle d'inclinació la càrrega en què la fibra trenca disminueix, de manera que s'observen més trencaments de fibres per a inclinacions elevades. Així mateix, com més inclinada estigui una fibra major serà l'obertura de la fissura en el moment que s'assoleixi la càrrega pic.

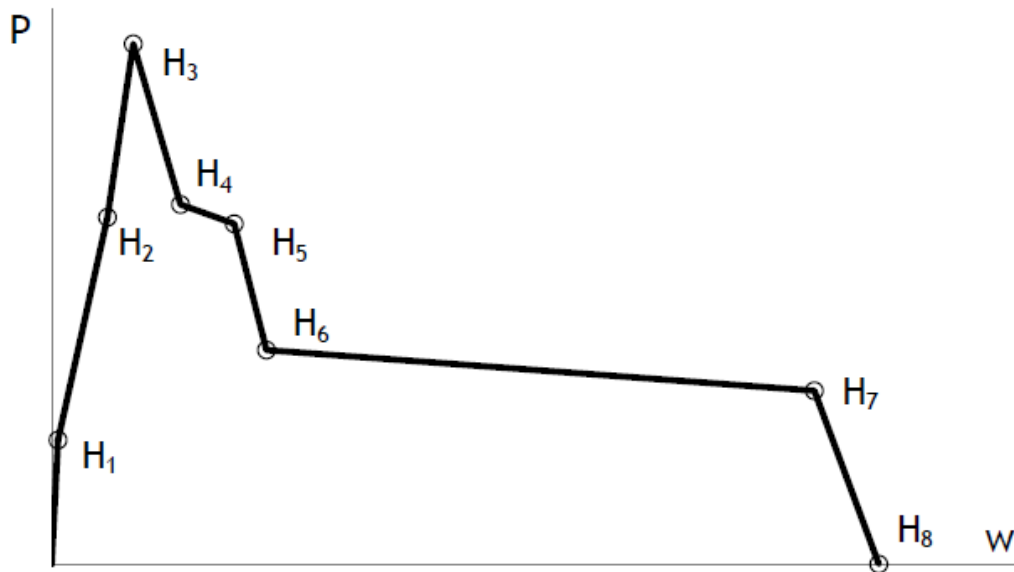
### **2.5 MODEL TEÒRIC DE COMPORTAMENT DE FIBRES ACABADES EN GANXO EN ASSAIG D'ARRENCAMENT**

Els models d'arrencament de fibres d'acer aïllades inclinades descrits anteriorment (segons si es tracta de fibres llises o amb els extrems en forma de ganxo) es poden esquematitzar en gràfiques caracteritzades per diferents punts clau. Aquests punts controlen la forma de la gràfica i venen definits segons el fenomen físic al qual fan referència. Aquests punts s'han extret de dades experimentals provinents de múltiples assajos d'arrencament de fibres. Per al cas de fibres llises tenim fins a 5 punts (codificats amb la lletra de S de *Straight*;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  i  $S_5$ ) i per a fibres amb extrems en forma de ganxo fins a 8 punts (codificats amb la lletra de H de *Hooked*;  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ ,  $H_4$ ,  $H_5$ ,  $H_6$ ,  $H_7$  i  $H_8$ ). A la gràfica següent es poden observar els diferents punts considerats per al cas de les fibres llises.



**Figura 2.9 - Diagrama esquemàtic del model d'arrencament per a fibres inclinades llises (Laranjeira et al. 2010, 43: 875-895)**

Pel que fa a les fibres llises, el punt  $S_1$  marca el moment en què comença la pèrdua d'adherència entre la matriu i la fibra d'acer; el punt  $S_2$  es correspon amb el moment en què la càrrega d'arrencament és màxima, degut a què les parts que han perdut l'adherència comencen a doblegar-se i alinear-se amb la càrrega aplicada, el que provoca una exfoliació progressiva de la matriu; el punt  $S_3$  indica l'inici de l'etapa de fricció, un cop l'extrem de la fibra ha perdut definitivament l'adherència; el punt  $S_4$  marca el començament d'una etapa pre-extracció de la fibra, que es dona quan la fibra embeguda romanent assoleix una longitud crítica; i el punt  $S_5$  es correspon amb l'extracció completa de la fibra. Cadascun d'aquests punts està associat a una càrrega d'arrencament i a un ample de fissura determinat, en funció de nombrosos paràmetres (longitud embeguda, angle d'inclinació...) i interaccions mecàniques. Així doncs, a partir dels anteriors processos es poden determinar expressions matemàtiques que caracteritzin tant la càrrega d'arrencament com l'obertura de fissura (Laranjeira et al. 2010, 43: 875-895).



**Figura 2.10 - Diagrama esquemàtic del model d'arrençament per a fibres inclinades amb els extrems en forma de ganxo (Laranjeira et al. 2010, 40: 1471-1487)**

En les fibres amb l'extrem en forma de ganxo, el punt  $H_1$  correspon a l'activació del ganxo, un cop s'inicia la pèrdua d'adherència entre la fibra i la matriu i la geometria del ganxo es manté intacta (Figura 2.8a); el punt  $H_2$  indica el moment en què comença a doblegar-se la fibra i per tant a haver-hi exfoliació de la matriu de formigó, quedant la fibra ancorada per l'efecte del ganxo; el punt  $H_3$  marca el moment en què la contribució del ganxo és màxima (Figura 2.8b) i on acaba el procés d'exfoliació de la matriu, entenent que a partir d'aquest punt es produeix només un mecanisme de fricció; el punt  $H_4$  indica el moment en què les seccions corbades del ganxo es veuen sotmeses a una deformació oposada a la seva originària (Figura 2.8c) i a l'inici de l'etapa de fricció, sense cap procés d'exfoliació de la matriu; el punt  $H_5$  marca el moment en què es produeix el descens de càrrega degut al complet allisat del ganxo; el punt  $H_6$  es correspon amb l'inici del mecanisme resistent residual governat per la fricció (Figura 2.8e); el punt  $H_7$  marca el començament d'una etapa pre-extracció de la fibra, que es dona quan la fibra embeguda romanent assoleix una longitud crítica; i el punt  $H_8$  es correspon amb l'extracció completa de la fibra.

## 2.6 MODEL CONSTITUTIU PER A FRFA

L'inconvenient de caracteritzar el comportament a tracció d'una estructura mitjançant la realització de nombrosos assajos de tracció uniaxial sobre provetes constituïdes pel mateix material, rau en el fet que cal destruir cada vegada les provetes amb "exactament" les

mateixes característiques que tindrà el formigó que finalment es faci servir. És per aquest motiu que esdevé interessant desenvolupar un model constitutiu que permeti explicar el comportament a tracció del FRFA, sense la necessitat d'analitzar multitud de provetes cada vegada. En aquest context, en Laranjeira (2010) ha desenvolupat un mètode capaç de predir la resposta post-fissuració del FRFA. De forma resumida, la seva proposta permet obtenir la relació tracció-obertura de fissura del FRFA,  $\sigma_{FRFA}(w)$ , com a suma de la contribució a la tracció del formigó per si sol,  $\sigma_{formigó}(w)$ , i la contribució a la tracció de les fibres d'acer,  $\sigma_{fibres}(w)$ .

Pel que fa a la contribució del formigó aquesta ve determinada segons la següent equació (Gopalaratnam i Shah 1987):

$$\sigma_{formigó}(w) = f_{ctm} \times e^{-kw}$$

essent  $k$  una constant de valor  $39,8 \text{ mm}^{-1}$  i

$$f_{ctm} = \begin{cases} 0,3 \times f_{ck}^{\frac{2}{3}} & \text{si } 12 \leq f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 2,12 \times \ln\left(1 + \frac{f_{ck} + 8}{10}\right) & \text{si } 12 \leq f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \end{cases}$$

Per la seva banda, la relació  $\sigma_{fibres}(w)$ , corresponent a la globalitat de les fibres d'acer, s'obté considerant la contribució individual de cadascuna de les fibres que conformen la proveta. En aquest punt es fa evident la necessitat de determinar la inclinació que tenen les fibres en la secció de fissura, doncs cada inclinació té una resposta pròpia front a arrencament. Laranjeira et al. (2011) desenvolupen un procediment per predir el perfil d'orientació de les fibres d'un testimoni, partint exclusivament del coeficient d'orientació, un coeficient que indica una mitjana dels cosinus directors de totes les fibres embegudes respecte l'eix longitudinal. Per la seva part, aquest coeficient l'aproxima tenint en compte les quatre etapes principals de fabricació de les provetes: barrejat de les fibres amb la pasta, abocat del formigó, efectes dinàmics derivats del complet ompliment del motlle i la forma de l'encofrat. Es classifiquen, doncs, les fibres de la proveta segons la seva orientació, categoritzant-les en sis categories diferents. Aquestes categories venen caracteritzades pels angles indicadors de classe, definits per uns intervals d'angles d'inclinació ( $\Delta\theta$ ) de  $15^\circ$ :  $7,5^\circ$  a l'interval  $[0^\circ, 15^\circ]$ ;  $22,5^\circ$  a l'interval  $[15^\circ, 30^\circ]$ ;  $37,5^\circ$  a l'interval  $[30^\circ, 45^\circ]$ ;  $52,5^\circ$  a l'interval  $[45^\circ, 60^\circ]$ ;  $67,5^\circ$  a l'interval  $[60^\circ, 75^\circ]$ ; i  $82,5^\circ$  a l'interval  $[75^\circ, 90^\circ]$ . Tenint en compte la càrrega d'arrencament corresponent a cadascuna de les categories,  $P_{\theta_i}$ , i el nombre de fibres de la secció de fissura en la direcció considerada,  $N_{\theta_i}$ , s'obté fàcilment la relació  $\sigma_{fibres}(w)$ .

$$\sigma_{\text{fibres}}(w) = \frac{\sum(P_{\theta_i} \times N_{\theta_i})}{A_{\text{sec}}}$$

Essent  $A_{\text{sec}}$  l'àrea d'una secció transversal de la proveta de FRFA.

De les anteriors equacions es pot concloure que el comportament a tracció és altament sensible a la distribució i orientació de les fibres en l'estructura analitzada, així com del nombre de fibres existents en la secció característica de fissuració. Aquests motius refermen un dels objectius principals d'aquesta tesina, avaluar la influència de l'orientació preferencial de les fibres en la resposta a tracció.

## 2.7. ORIENTACIÓ DE LES FIBRES

En l'apartat anterior ja es fa referència a la importància de conèixer l'orientació de les fibres en la secció de fissura per determinar quina és la contribució de cadascuna d'elles a la resposta a tracció de la proveta. En la literatura existeixen nombrosos treballs i articles que estudien, determinen i prediuen, d'una manera o d'una altra i amb més o menys precisió, l'orientació de les fibres, caracteritzada pel coeficient d'orientació ( $\eta \in [0,1]$ ). Hi ha diferents tècniques i procediments per caracteritzar aquest coeficient, i la seva classificació és clara: destructius i no destructius. La mesura d'aquests procediments es pot realitzar directa o indirectament.

Un exemple de mètode destructiu i mesura indirecta seria el còmput manual de fibres de la secció fissurada de la proveta, a la qual s'hi accedeix un cop s'ha realitzat l'assaig corresponent. Aquest mètode relaciona el nombre de fibres de la secció amb l'orientació mitjana de les fibres, obtinguda mitjançant expressions teòriques.

Mesures directes de l'orientació de les fibres es poden obtenir mitjançant l'anàlisi d'imatges o a través de la tècnica TAC. El coeficient d'orientació de les fibres, corresponent a l'eix perpendicular a la imatge, es pot determinar mitjançant la següent expressió, essent  $N_f$  el nombre de fibres observat a la imatge i on l'angle  $\varphi$  indica la inclinació de la fibra a través de la relació entre el diàmetre de la fibra i l'eix major de l'el·lipse que defineix el tall de la fibra a la imatge.

$$\eta_{\varphi} = \frac{1}{N_f} \cdot \sum_1^{N_f} \cos \varphi = \frac{1}{N_f} \cdot \sum_1^{N_f} \cos \frac{\phi_f}{L_f}$$

Les limitacions d'aquests mètodes rauen en la mida de les provetes i en el temps que s'ha d'emprar per determinar les orientacions, de manera que usualment es restringeix aquest tipus d'anàlisi per a casos d'investigació en laboratori.

S'han proposat altres procediments per a grans elements, com ho podrien ser les bigues d'una estructura, que es basen en la resistència elèctrica i les propietats magnètiques de les fibres embegudes. Aquests mètodes permeten una simple i econòmica mesura de les orientacions, amb l'avantatge que eviten les incerteses que usualment existeixen entre elements petits i grans. No obstant, aquests mètodes fins a dia d'avui han estat poc estudiats.

Recentment s'ha desenvolupat un mètode que permet obtenir el coeficient d'orientació partint de les característiques dels encofrats i el mètode d'abocat del formigó (Laranjeira 2010). En concret, avalua l'impacte que tenen en l'orientació de les fibres quatre fases diferents: (1) mescla de les fibres en el formigó, (2) mètode d'abocat del formigó a l'encofrat, (3) efectes dinàmics durant el formigonat (flux del formigó i vibració en la compactació) i (4) geometria de l'encofrat. Cal, però, un més ampli estudi per tal de donar robustesa al procediment, atesa la dificultat de predicció de l'orientació de les fibres per a diferents situacions concretes.

## 2.8 PERFIL D'ORIENTACIÓ DE LES FIBRES

Per tal de determinar el perfil d'orientació de les fibres, recentment s'ha determinat un mètode estadístic que permet aproximar-lo de manera ràpida i senzilla.

En concret, Laranjeira et al. (2011) buscaven dos objectius principals: identificar de forma genèrica la naturalesa estadística de l'orientació de les fibres dins d'una proveta de formigó i desenvolupar un procediment que fos capaç de predir la distribució dels angles d'orientació de les fibres partint única i exclusivament del coeficient d'orientació de l'eix longitudinal de la proveta ( $\eta_\theta$ ). Basant-se en varis treballs experimentals i estudiant diferents distribucions usualment utilitzades per la caracterització de nombroses propietats del formigó, van assolir les següents conclusions:

1. La utilització d'una distribució de tipus *Gaussiana* (també coneguda com a distribució Normal) ajusta molt millor el perfil d'angles d'orientació de les fibres,  $\theta$ , que una distribució de tipus *Gumbel* (estadística de valors extrems).

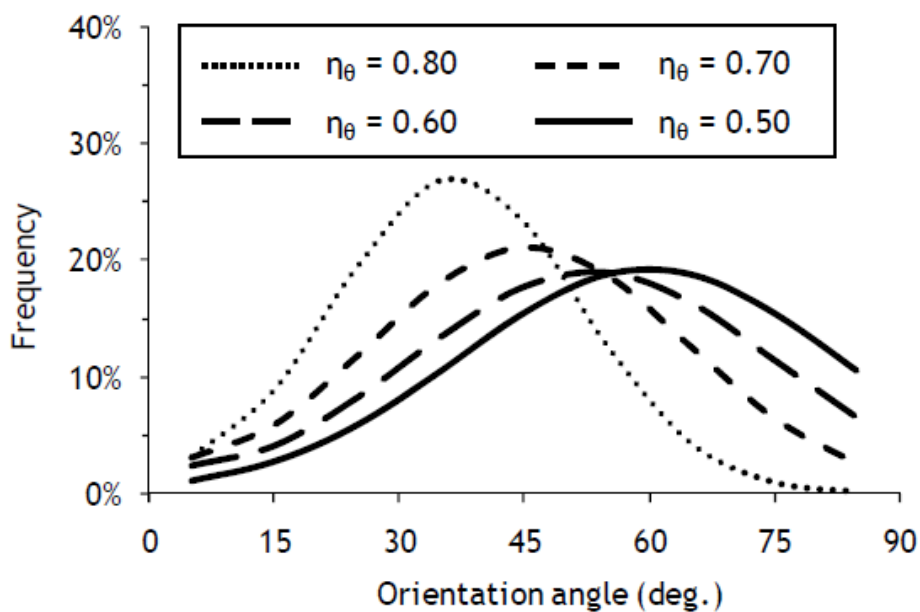
2. Es pot considerar com a bona aproximació de l'angle d'orientació mitjà,  $\theta_m$ , l'obtinguda mitjançant la següent expressió (Grünewald 2004; Schönlin 1988):

$$\theta_m = \arccos(\eta_\theta) \times \frac{180}{\pi}$$

3. La dispersió dels angles d'orientació,  $\sigma(\theta)$ , es pot definir mitjançant l'expressió següent:

$$\sigma(\theta) = 90 \times \eta_\theta \times (1 - \eta_\theta)$$

Tenint en compte aquestes 3 directrius es pot obtenir de forma senzilla, mitjançant un simple full de càlcul, el perfil d'orientació teòric per a qualsevol coeficient d'orientació (Figura 2.11).



**Figura 2.11 - Perfil d'orientació predit per diferents coeficients d'orientació (Laranjeira et al. 2011)**

Per a cada perfil, el valor de màxima probabilitat coincideix amb l'angle corresponent a l'angle d'orientació mitjà,  $\theta_m$ .



## CAPÍTOL 3

# OBTENCIÓ DE LES DADES GEOMÈTRIQUES DE LES FIBRES A PARTIR DE LES TOMOGRAFIES

### 3.1 INTRODUCCIÓ

En aquest apartat es descriu la campanya experimental duta a terme per tal d'obtenir les provetes de les quals s'extrauran els 12 testimonis que seran analitzats en aquest treball. Posteriorment, s'explicarà el procediment que s'ha seguit per tal d'obtenir la posició i orientació de les fibres en 3D, s'indicaran les principals característiques de cada testimoni pel que fa la disposició de les fibres i se'n resumiran els trets més representatius.

### 3.2 CAMPANYA EXPERIMENTAL

L'estudi de la posició de les fibres parteix d'unes provetes de formigó d'alta treballabilitat reforçat amb fibres d'acer de 60 mm de longitud i 0,71 mm de diàmetre, amb una dosificació de fibres de 20 kg/m<sup>3</sup>. Aquestes provetes van ser realitzades per *Jaume Guàrdia Tomàs i Climent Molins (2008)*. En aquest treball es realitza una campanya experimental molt àmplia per tal de testejar l'assaig Barcelona, prenent diferents dosificacions de formigó autocompactable (un de resistència normal i un altre d'alta resistència) així com quatre

quanties diferents de fibres d'acer (0, 20, 40 i 60 kg/m<sup>3</sup>). Per a cadascuna de les amassades es van realitzar certs assajos en fresc i un cop endurida la pasta, amb l'objectiu de determinar les característiques mecàniques del formigó. Els assajos en fresc es van fer per controlar el formigó d'alta treballabilitat i per veure com afectava la incorporació de fibres al comportament fluid del formigó. Per la seva banda, els assajos un cop endurida la pasta es van realitzar per tal d'obtenir la compressió, el mòdul elàstic i la resistència a tracció característics de cada amassada.

### 3.2.1 Amassada

En la present tesina es prendran com a referència les dades de l'amassada A20, corresponents a un formigó d'alta treballabilitat de resistència normal (A) i amb una dosificació de fibres de 20 kg/m<sup>3</sup> (20). A les següents taules es resumeixen els principals valors considerats en la dosificació de l'amassada (Taula 3.1) així com les característiques bàsiques de les fibres (Taula 3.2) i els resultats obtinguts dels respectius assajos realitzats (Taula 3.3 i Taula 3.4).

**Taula 3.1 - Dosificació de l'amassada A20**

DOSIFICACIÓ	MATERIALS	A20 (kg/m <sup>3</sup> )
CIMENT	<i>Uniland CEM I 52,5</i>	334,00
FILLER	Calcari	100,00
MICROSÍLICE	-	-
AIGUA	Xarxa Barcelona	177,00
GRAVA 12/20	Calcari	308,11
GRAVETA 5/12	Calcari	449,52
ARENA 0/5	Calcari	338,56
ARENA 0/2	Calcari	602,63
ADDITIU	Superplastificant <i>Sika Viscocrete 5920</i>	6,3534
FIBRES	<i>Dramix RC 80/60 BP</i>	20,00
PES TOTAL	-	2336,173

Taula 3.2 - Característiques de les fibres utilitzades

CONCEPTE	VALOR
TIPOLOGIA	<i>Dramix RC 80/60 BP</i>
LONGITUD (L)	60 mm
DIÀMETRE ( $\varnothing$ )	0,71 mm
ESVELTESA (L/ $\varnothing$ )	85
EXTREMS CONFORMATS	<i>Hooked end</i>
RESISTÈNCIA A TRACCIÓ	2300 N/mm <sup>3</sup>

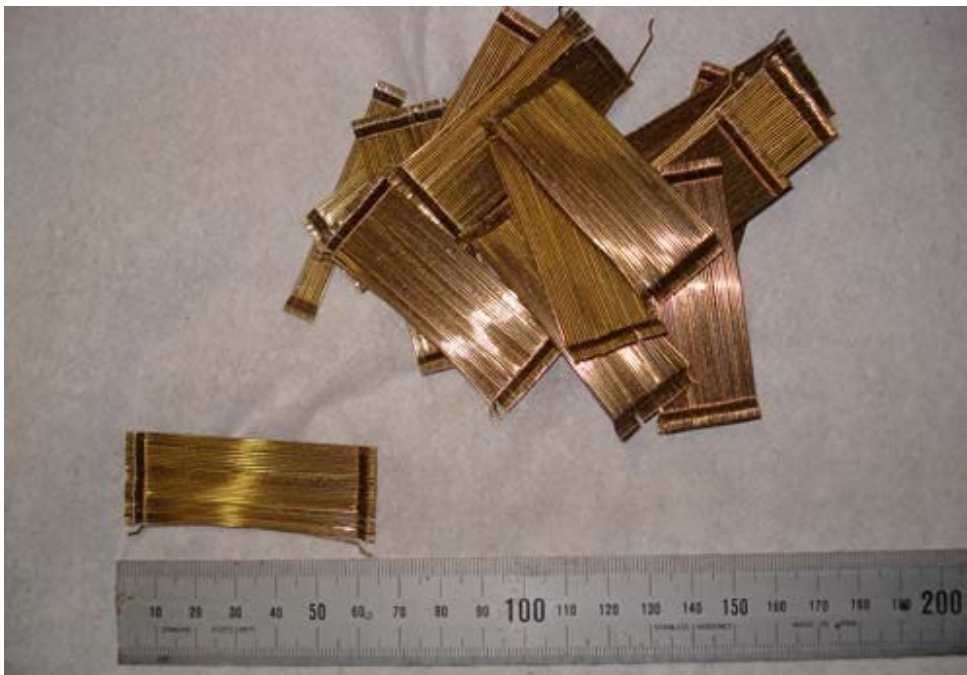


Figura 3.1 - Fibres Bekaert Dramix RC 80/60 BP (Bekaert)

### 3.2.2 Assajos de caracterització

Per a caracteritzar el formigó en fresc es van realitzar els assajos d'extensió de flux, d'anell japonès i una prova reològica amb viscosímetre, mentre que pel formigó endurit es va determinar la resistència a compressió, el mòdul elàstic i la resistència a tracció. Tant l'assaig del mòdul de deformació com l'assaig de compressió es van realitzar sobre provetes cilíndriques de 150 mm de diàmetre i 300 mm d'altura. La resistència a tracció es va determinar mitjançant l'assaig Barcelona sobre provetes cilíndriques de 150 mm de diàmetre i 150 mm d'altura.

Taula 3.3 - Resultats dels assajos en fresc

ASSAIG	PARÀMETRE	VALOR
EXTENSIÓ DE FLUX	$D_f$ (mm)	745
	$T_{50}$ (s)	1,9
ANEL·L J	D (mm)	-
	H (mm)	-
BML-VISCOMETER	$\tau_0$ (Pa)	7
	$\mu$ (Pa·s)	42,2

Taula 3.4 - Propietats mecàniques obtingudes pels assajos en el formigó endurit

PROPIETAT MECÀNICA		VALOR (N/mm <sup>2</sup> )	COEFICIENT DE VARIACIÓ
RESISTÈNCIA A COMPRESSIÓ	$f_{cm,7}$	31,44	11,85 %
	$f_{cm,28}$	46,47	5,35 %
RESISTÈNCIA A TRACCIÓ	$f_{ctm,28}$	3,99	3,82 %
MÒDUL DE DEFORMACIÓ	$E_{c,28}$	35.800	2,39 %

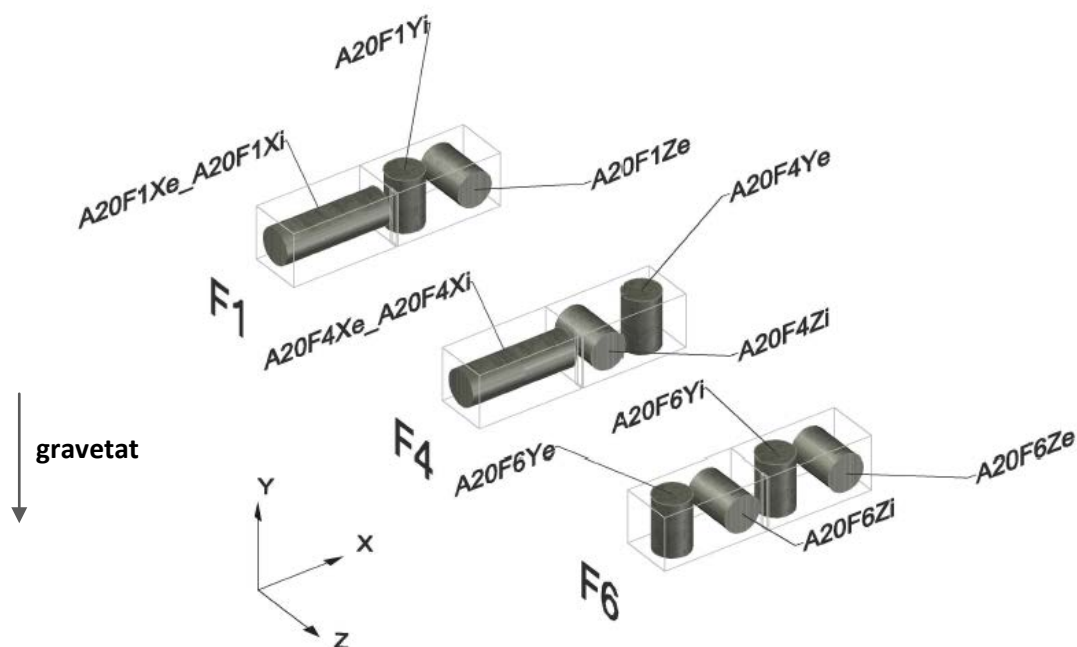
### 3.2.3 Provetes i testimonis

Per a extreure els testimonis que posteriorment haurien de ser tomografiats, es van crear fins a 6 provetes prismàtiques (anomenades F1, F2, F3, F4, F5 i F6) amb l'amassada esmentada anteriorment. Aquestes provetes tenien unes dimensions de 600x150x150 mm i es van aprofitar per a realitzar un assaig de flexotracció de tres punts, seguint la normativa UNE-EN-14651 (2005). Aquest assaig parteix de provetes prismàtiques amb entalla central, de manera que es garanteix el trencament de la proveta a través de l'entalla, en ser aquesta la secció més dèbil i on presumiblement s'assoliran majors tensions. D'aquesta manera l'assaig acostuma a partir en dues parts iguals les provetes assajades. Malgrat tot no sempre les dues parts són exactes, degut a que no es té la certesa que la proveta trenqui per la secció central seguint una trajectòria de fissura perpendicular a l'eix longitudinal de la proveta. És en cadascuna d'aquestes parts d'on s'extreuen els 12 testimonis necessaris per a caracteritzar la posició de les fibres dins la proveta. Els testimonis utilitzats en la present tesina només provenen de les provetes denominades F1, F4 i F6, d'entre les 6 provetes disponibles. La nomenclatura utilitzada per classificar els testimonis segueix un esquema com el següent:

#### **A20 - proveta - direcció d'extracció - posició del testimoni**

Els valors que adopten són  $F1$ ,  $F4$  o  $F6$  per a la *proveta*;  $X$ ,  $Y$  o  $Z$  per a la *direcció d'extracció*; i  $e$  o  $i$  per a la *posició del testimoni*, segons es tracti d'un testimoni extret de la part interior o exterior de la proveta, respectivament.

Així, els testimonis extrets van ser perforats en les tres direccions de l'espai ( $X$ ,  $Y$  i  $Z$ ), per tal de poder extreure conclusions respecte la influència de la resistència a tracció segons la preferència de les orientacions de les fibres. Els testimonis cilíndrics extrets en direcció  $X$  tenen unes dimensions de 100 mm de diàmetre i uns 300 mm de longitud, mentre que els testimonis extrets tan en direcció  $Y$  com en  $Z$  tenen unes dimensions de 100 mm de diàmetre i uns 150 mm de longitud. Les extraccions realitzades segons la direcció i segons la proveta es poden visualitzar a la Figura 3.2. La direcció de la gravetat també hi està indicada.



**Figura 3.2 - Esquema de la localització dels testimonis extrets de les diferents provetes**

No obstant, com que aquests testimonis haurien de ser utilitzats posteriorment per a un assaig tipus Barcelona i aquest precisa de provetes cilíndriques amb una relació diàmetre-alçada aproximadament de valor 1, es van retallar 25 mm a banda i banda dels testimonis extrets en direcció  $Y$  i en  $Z$  per tal d'obtenir uns testimonis d'alçada 100 mm. Aquests testimonis de diàmetre 100 mm i mateixa longitud van ser convenientment tomografiats, amb una equidistància entre tomografies d'1 mm. Pel que fa als testimonis extrets en direcció  $X$ , tot i que també haurien de ser objecte d'assaig en un futur proper, es van tomografiar els 300 mm al complet.

### 3.3 METODOLOGIA EMPRADA PER A L'OBTENCIÓ DE LA POSICIÓ EXACTA DE LES FIBRES

#### 3.3.1 Dades de partida

Les dades de partida per tal de caracteritzar la posició i orientació de les fibres dins de cada testimoni són al voltant d'unes 100 tomografies per cada testimoni extret en direcció Y o Z, i al voltant d'unes 300 per als testimonis extrets en direcció X. A la taula següent s'indiquen les tomografies realitzades per a cadascun dels testimonis.

**Taula 3.5 - Codificació dels testimonis i nombre de tomografies realitzades per a cadascun**

TESTIMONI	Nº TOMOGRAFIES
<b>A20F1Xe-A20F1Xi</b>	300
<b>A20F1Yi</b>	103
<b>A20F1Ze</b>	98
<b>A20F4Xe-A20F4Xi</b>	269
<b>A20F4Ye</b>	99
<b>A20F4Zi</b>	101
<b>A20F6Ye</b>	98
<b>A20F6Yi</b>	103
<b>A29F6Ze</b>	100
<b>A20F6Zi</b>	104

Es pot observar que al testimoni A20F4Xe-A20F4Xi el nombre de tomografies disponibles és tan sols de 269, quan realment n'hi hauria d'haver un nombre més proper a 300. Sense saber-ne els motius exactes, es pot interpretar que el testimoni que es va extreure de la proveta F4 no tenia les dimensions corresponents degut a que durant l'assaig de flexotracció la fissura de la proveta, o bé no es va produir en el punt central (coincidint amb la secció de l'entalla), o bé la fissura va començar a l'entalla però la direcció que va prendre no va ser perpendicular a l'eix longitudinal de la proveta, sinó que es va inclinar. D'expenses d'aquests motius la "meitat" de la qual es va extreure el testimoni A20F4Xe-A20F4Xi tindria una longitud inferior a 300 mm, mentre que l'altra "meitat", de la qual es van extreure els testimonis A20F4Ye i A20F4Zi, tindria una longitud superior a 300 mm.

Cal comentar que, malgrat que per facilitar el procediment d'extracció es van tomografiar els aproximadament 300 mm complets, aquests dos testimonis extrets en direcció X es dividiran

transversalment en dos cadascun, com es pot deduir de la seva nomenclatura, de manera que els testimonis resultants vindran definits per la meitat de les tomografies. Així, del testimoni llarg A20F1Xe-A20F1Xi s'obtidran els testimonis A20F1Xe i A20F1Xi, caracteritzats cadascun per 150 tomografies, i del testimoni A20F4Xe-A20F4Xi s'obtidran els testimonis A20F4Xe i A20F4Xi, caracteritzats en aquest cas per 135 tomografies cadascun.

### 3.3.2 Tomografia Axial Computeritzada

La Tomografia Axial Computeritzada (del grec *tomos*, que significa tall, i *graphis*, que significa representació gràfica; usualment coneguda com a TAC) consisteix en una tècnica de d'assaig no destructiva (normalment anomenada NDT, del seu acrònim en anglès) que permet conèixer la composició interna d'un determinat cos material.

Inicialment, la tècnica de TAC va ser desenvolupada com una eina al servei de la medicina, ja que permet usos molt diversos. Les imatges obtingudes per la TAC són exactes, no invasives i no provoquen dolor. Un avantatge important és la seva capacitat d'obtenir alhora imatges d'ossos, teixits tous i vasos sanguinis. La utilització d'aquesta tècnica permet diagnosticar ràpida i fiablement, per part d'un especialista, nombrosos problemes clínics que de forma natural precisarien d'intervencions invasives del pacient. No obstant, aquesta tècnica presenta un petit risc de desenvolupar càncer com a conseqüència de l'excessiva exposició als rajos X, però el benefici obtingut per un diagnòstic precís és àmpliament superior al risc assumit.

Pel que fa a l'ús industrial de la TAC, aquest es centra en l'anàlisi de porositat d'objectes, generació d'arxius CAD per enginyeria inversa i l'assemblatge i anàlisi visual de components. Per al nostre cas, ens interessa el fet que es tracta d'una tècnica no destructiva que permet la visualització en 3 dimensions de l'estructura interna dels objectes escanejats.

El cos és analitzat mesurant les seves diverses radiografies des de diferents angles. En efecte, es genera tota una sèrie de radiografies en 2 dimensions de l'objecte mentre aquest rota al voltant d'un eix central. Cadascuna de les radiografies descriu, per a un angle considerat, l'absorció per part de la placa radiogràfica del feix de rajos X que emet el tub de rajos X (Krause et al. 2010). Així, per cada pla que s'analitza s'obtenen multitud d'imatges, que mitjançant un ordinador permeten obtenir una imatge final que representa un tall de l'objecte, com si d'una llesca es tractés. Si es repeteix aquest procés al llarg de l'eix del cos (en el nostre cas l'eix central dels cilindres que formen els testimonis) s'obtenen multitud de talls que en conjunt conformen l'objecte sencer.

En la TAC, com en qualsevol tècnica basada en escàners, es repeteixen una sèrie d'etapes per tal d'obtenir la representació final:

- Sistema de generació de dades

Es precisa d'un generador d'energia d'alt voltatge per obtenir l'energia necessària, així com un tub de rajos X per produir la radiació precisada. L'aparell generador d'energia emet un feix molt fi de rajos X que incideix sobre l'objecte que s'estudia, però només una part de la radiació emesa travessa el cos. La radiació no absorbida per l'objecte, en forma d'espectre, es recollida pels detectors. Aquesta energia és anomenada "radiació atenuada".

-Sistema d'adquisició de dades

Es reben les senyals que envien els detectors i es converteix en format digital, enviant novament les dades a un ordinador. Aquest procés es repeteix en un nombre elevat de direccions separades un determinat angle, per a cada pla d'anàlisi.

- Sistema de processament de dades, reconstrucció de la imatge i visualització

A partir de les dades corresponents a tots els plans de l'objecte, i en totes les direccions considerades, es pot reconstruir la informació a través d'algoritmes matemàtics computats per un ordinador. S'aconsegueix un *output* en forma d'imatges representades en escala de grisos clarament interpretables.

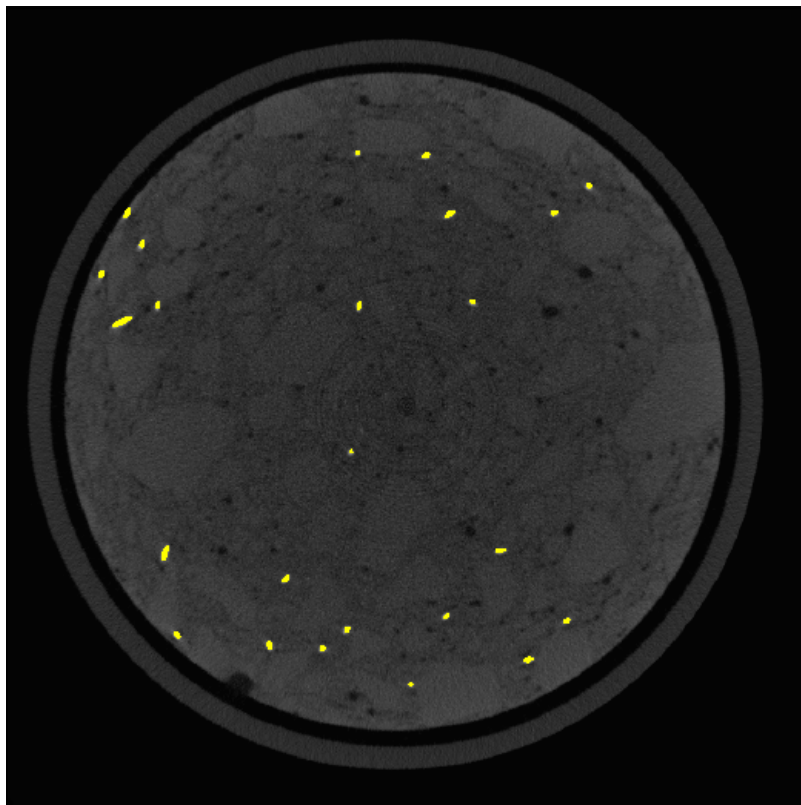
### 3.3.3 Obtenció del model tridimensional

Partint d'aquestes tomografies, en format de mapa de bits (extensió *.bmp*), l'objectiu principal consisteix en aconseguir un model en 3D de tots els testimonis escanejats, per superposició de les diferents imatges obtingudes. La intenció és, per a cada testimoni, identificar les fibres que s'hi troben embegudes i determinar-ne la posició exacta a l'espai. Un cop determinada la situació de cada fibra es pot obtenir la informació que es precisi de cadascuna d'elles sense cap dificultat. Dades com el nombre de fibres total, nombre de fibres completes, nombre de fibres amb pèrdua de l'extrem conformat, orientació de cada fibra, angle mitjà d'orientació, coeficient d'orientació ( $\eta_\theta$ ) o dispersió de les orientacions, entre d'altres, seran necessàries per a la caracterització de cada testimoni. Amb aquestes dades es podrà concloure amb un perfil d'orientació de les fibres per a cada testimoni.



El tractament de dades que precisa l'obtenció d'aquesta informació es realitza mitjançant dos programaris informàtics: el llenguatge de programació MATLAB, creat per la companyia *The MathWorks*, i l'AutoCAD, creat per la companyia *Autodesk*.

Pel que fa al tractament de dades mitjançant MATLAB, aquest s'ha centrat única i exclusivament en el processat de les imatges. S'ha implementat un algorisme de manera que, partint d'un seguit d'imatges (les tomografies corresponents a cada testimoni), s'obté un arxiu en un format compatible per l'AutoCAD (extensió *.dxf*) que conté un nombre determinat de punts que indiquen la posició exacta dels talls de les fibres d'acer a cadascuna de les tomografies. És a dir, per a cada tomografia el MATAB identifica els talls de les fibres d'acer i detecta els píxels que n'abasten. Una vegada identificats els píxels, només cal saber la posició que ocupen aquests a l'espai (això és, en les tres dimensions, dins dels testimonis) i exportar-ho en un format que sigui capaç de llegir-ho l'AutoCAD (veure Figura 3.3). D'aquesta manera, com que s'associa cada tomografia a una cota diferent del testimoni, es té una representació tridimensional de la posició que ocupen les fibres a cada tomografia.



**Figura 3.3 - Tomografia corresponent al testimoni A20F6Ze, on es poden veure els píxels detectats pel MATLAB i dibuixats com a punts a l'AUTOCAD, en color groc.**

Per a cadascun dels testimonis, l'operativa seguida per l'algorisme consisteix en tres passos:

### 1. Lectura de les imatges corresponents a la totalitat del testimoni.

El MATLAB és capaç de llegir les imatges en forma de matriu, associant cada component de la mateixa amb un píxel de la imatge. Quan es tracta d'imatges en color el MATLAB interpreta cada imatge com una matriu multidimensional (*array* en anglès), de dimensions  $M \times N \times 3$ . Cadascuna d'aquestes 3 capes defineix el valor dels components RGB (*Red* -vermell-, *Green* -verd, *Blue* -blau-) de cadascun dels  $M \times N$  píxels de la imatge. D'aquesta manera, el color de cada píxel queda determinat per la combinació d'intensitats de vermell, verd i blau emmagatzemats en la capa corresponent en la posició de cada píxel. No obstant, quan la imatge està representada per una escala de grisos, com és el nostre cas, el valor dels 3 components que defineixen el color és constant, raó per la qual el MATLAB utilitza en aquests casos simplement una matriu  $M \times N$  per representar la imatge. Així doncs, el MATLAB emmagatzema una matriu  $1024 \times 1024$  per a cada tomografia disponible a cadascun dels testimonis.

### 2. Identificació de les fibres d'acer a les tomografies

Les tomografies realitzades representen l'estructura interior dels testimonis. Per tant, és possible detectar la diversitat de materials que componen el sòlid gràcies a la propietat dels materials d'absorbir en major o menor quantitat la radiació emesa sobre ells. Això es tradueix, com ja s'ha comentat anteriorment, en una representació de les tomografies en escala de grisos, on les zones més fosques són els materials que menys radiació absorbeixen. Particularment, els porus d'aire existents en una proveta de formigó no absorbeixen radiació, i per tant presenten valors nuls en l'escala de grisos, el que es correspon amb el color negre a la imatge. Conèixer prèviament el valor en escala de grisos d'un determinat material és una dada imprescindible per poder-lo identificar posteriorment a les tomografies. A la Taula 3.6 s'identifica cada material amb un interval de valors que adopten en l'escala de grisos (Molins, Martínez i Arnáiz 2008), el que facilitarà la separació de cada material de la resta.

**Taula 3.6 - Interval de valors a l'escala de grisos per als diferents materials existents als testimonis de FRFA analitzats (Molins, Martínez i Arnáiz 2008)**

MATERIAL	INTERVAL DE VALORS A L'ESCALA DE GRISOS
ACER DE FIBRES	145 - 146
ÀRIDS	55 - 70
AIRE	0
MORTER	40 - 50
SOFRE DE RECAPÇAMENT	160

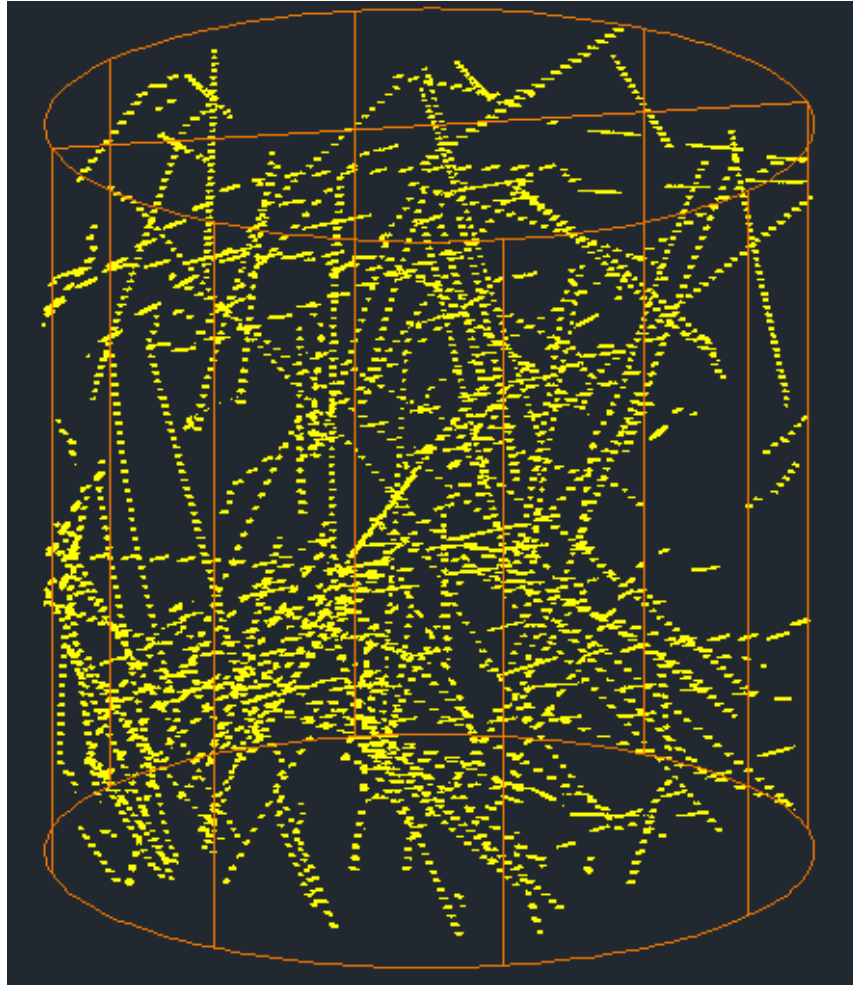
Com es pot comprovar, un dels inconvenients del mètode per a molts materials utilitzats en enginyeria és que presenten uns intervals de valors molt propers entre ells, de manera que es fa difícil distingir fins a quin punt es correspon amb un material o un altre. Afortunadament, l'acer de les fibres té valors molt diferent dels demés materials, el que permet distingir-lo amb certa facilitat dels materials petris.

Així doncs, l'algorisme implementat en MATLAB busca aquells píxels que es troben dins l'interval de valors corresponent a l'acer de les fibres i en guarda en una altra matriu les coordenades de cada píxel.

### **3. Representació dels píxels a l'AutoCAD**

Un cop determinades les coordenades ( $X$  i  $Y$ ) dels píxels que es corresponen amb els talls de les fibres d'acer de les diferents tomografies, només cal exportar aquests punts en un arxiu en format d'AutoCAD (Figura 3.4). La component  $Z$  dels punts queda determinada segons la tomografia que s'estigui considerant. És a dir, com que les tomografies són arxius numerats seguint un ordre determinat d'escaneig (per exemple, des de l'1 fins al 103 per al testimoni A20F1Yi), s'associa cada nombre de la numeració com a mil·límetres de cota, amb el benentès que totes les tomografies estan equiespaiades 1 mm, una rere l'altra, segons la seva ordenació. Aprofitant la mateixa numeració es graven les dades de cadascuna de les tomografies, amb la seva cota associada, en una capa diferent a l'AutoCAD, de manera que faciliti el tractament de dades posterior. Això implica, seguint amb l'exemple, que el testimoni A20F1Yi, al qual li corresponen 103 tomografies, té una longitud total segons l'escaneig de 103 mm i alhora 103 capes diferents.

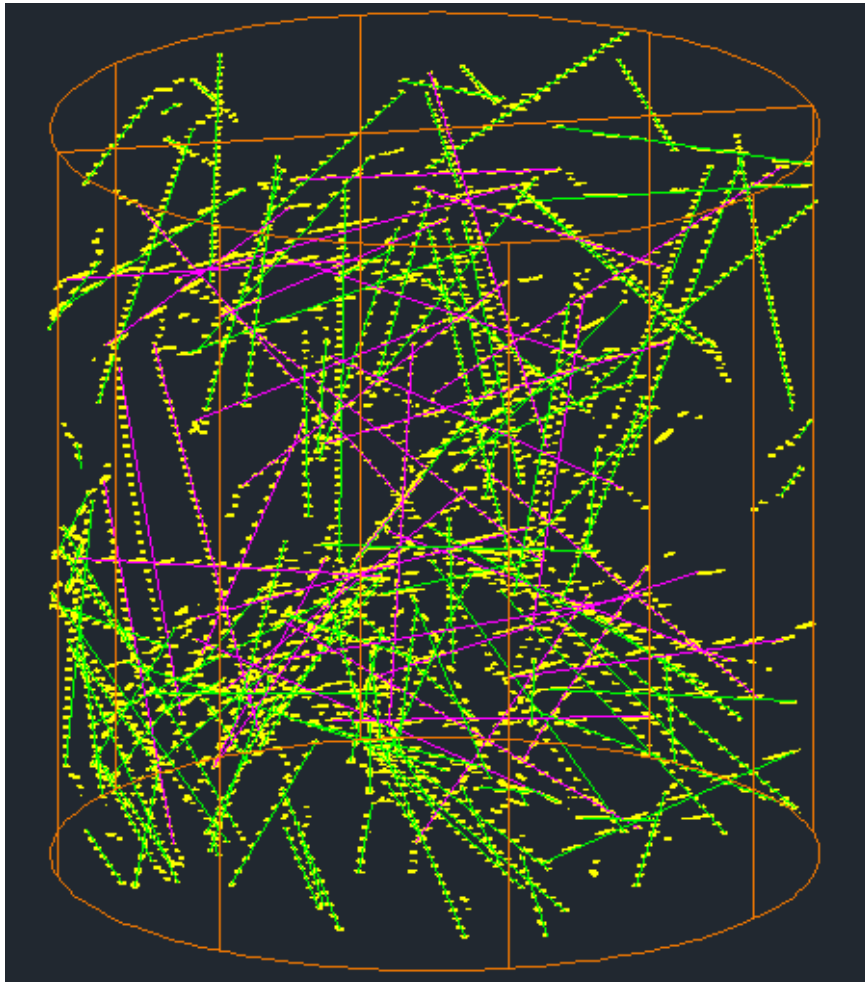
A partir d'aquest punt, el processat de les dades per tal de determinar la posició exacta de les diferents fibres passa a realitzar-se exclusivament amb el programari AutoCAD de forma manual (Figura 3.5).



**Figura 3.4 - Vista dels outputs del MATLAB en l'AutoCAD, per al testimoni A20F6Ze**

És evident que es podria implementar un altre algorisme que treballés millor i permetés, partint dels píxels identificats anteriorment, obtenir la distribució de fibres real de tot el testimoni. Intuïtivament es pot pensar que qualsevol tall d'una fibra queda representat en una tomografia com una el·lipse, on l'eix menor coincideix amb el diàmetre efectiu de la fibra. Analitzant la longitud del semieix major en el tall de la fibra es pot determinar quina és l'orientació de la mateixa respecte l'eix central del testimoni, doncs l'equiespaiat entre tomografies és fix i conegut. Així, qualsevol fibra que estigui col·locada de forma completament perpendicular a la tomografia apareixerà com un cercle perfecte, mentre que qualsevol fibra col·locada paral·lela a la tomografia es mostrarà com una el·lipse molt allargada. No obstant, tot i que l'algorisme pogués detectar l'orientació de totes les fibres en una tomografia determinada, per determinar si es tracta de la part inicial, final o intermèdia d'una fibra hauria de processar la informació d'una tomografia amb la informació obtinguda en la següent, de manera que el càlcul esdevindria molt costós en termes de temps. Alhora, implementar l'algorisme adequat tenint convenientment en compte tots els casos particulars i

aconseguint una representació real de l'interior del testimoni, hauria de ser força complex. Alguns treballs (Krause et al. 2010; Kang et al. 2011; Barnett et al. 2010; Tan et al. 2006) inclouen aquesta reflexió, i tracten de resoldre-ho de maneres diverses. És per tots aquests motius que s'ha optat per treballar "manualment" amb l'AutoCAD, tot i saber que la feina a realitzar sigui pesada i repetitiva.

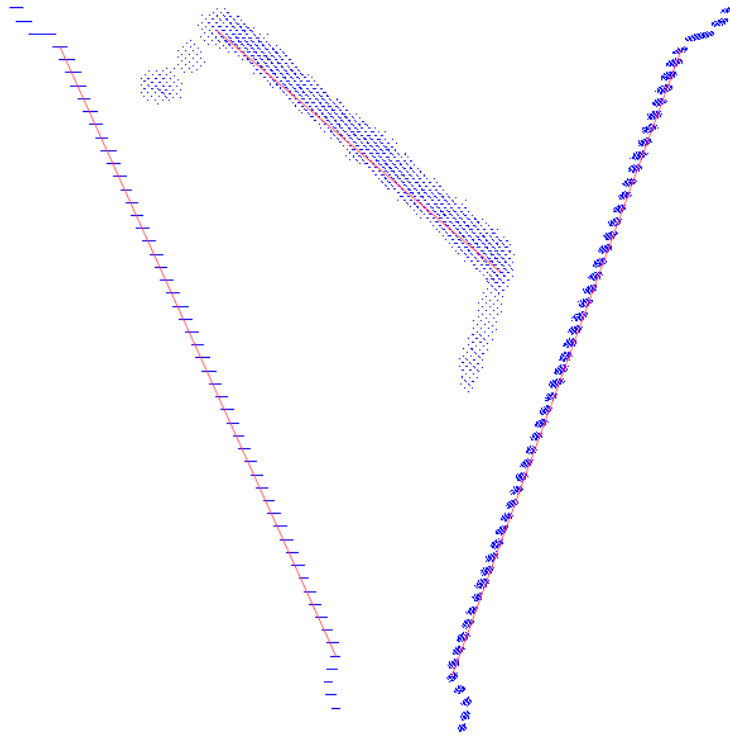


**Figura 3.5 - Vista de les fibres embegudes en el testimoni A20F6Ze. En color magenta, les fibres completes, i en color verd les incompletes**

L'algorisme implementat es pot consultar a l'Annex A d'aquesta present tesina.

Pel que fa al processament de dades mitjançant l'AutoCAD, com ja s'ha comentat anteriorment, aquest es centra en l'obtenció de la representació de les fibres a l'interior de cada testimoni, partint dels outputs del MATLAB. Com que es té una visualització en 3 dimensions dels punts que conformen els talls de les fibres, és relativament senzill identificar-les dins de cada testimoni. Es representa cada fibra mitjançant una línia a l'AutoCAD, creada prenent com a extrems de la mateixa els punts que es considera límits de la fibra. Les línies

que representen les fibres no inclouen el ganxo, de manera que quan es detecta la presència del mateix es finalitza la línia abans d'assolir-lo (Figura 3.6). Aquest procediment permet determinar de manera més precisa quina és la direcció que té la fibra, donat que detectar on comença i on acaba exactament el ganxo es fa força difícil per la geometria que presenta, i incloure'l en la línia introduiria sens dubte una variació de la inclinació real.

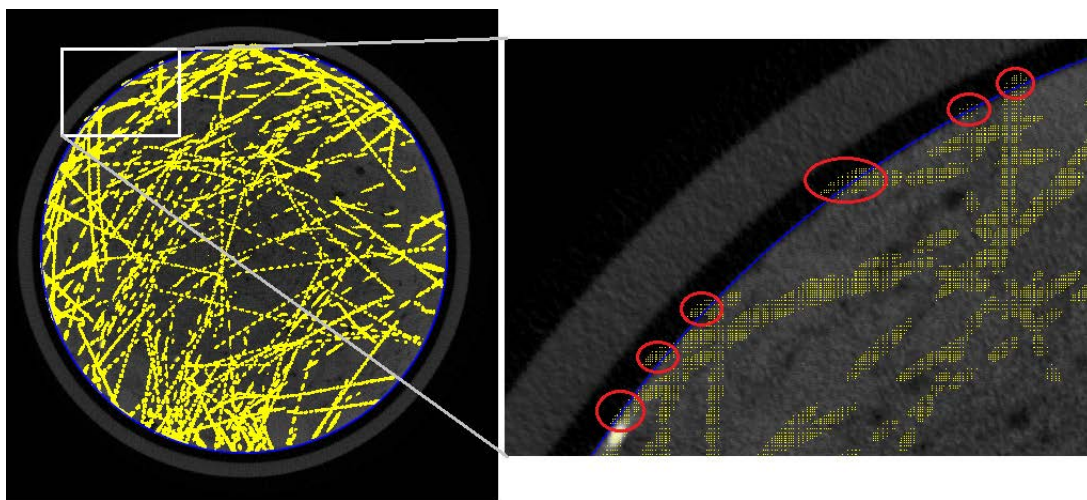


**Figura 3.6 - Diferents perspectives de la línia (en vermell) que caracteritzen una mateixa fibra (en blau) en l'AutoCAD**

Es classifiquen les fibres segons siguin completes (és a dir, que tinguin ambdós extrems en forma de ganxo embeguts dins la matriu de formigó) o bé incompletes, sense l'extrem conformat (és a dir, que només tinguin un dels dos ganxos o no en tinguin cap). Un cop es tenen localitzades la totalitat de les fibres, completes i incompletes, se'n determinen les coordenades dels seus punts extrems mitjançant una rutina d'AutoCAD (escrit en AutoLISP, extensió *.fas*) (Construcgeek).

Cal comentar, però, que en vista dels outputs que genera el MATLAB un cop carregats al programa de disseny es constata que, vistos els testimonis en planta (Figura 3.7), no es poden agrupar totes les fibres en un mateix cercle de diàmetre 100 mm. Això indica, doncs, que o bé els testimonis tomografiats no tenien una geometria perfecta, entenent com a tal que el tall realitzat per extreure els cilindres de les provetes es va realitzar amb nombroses irregularitats;

o bé que les tomografies no van realitzar-se completament centrades respecte l'eix de generació del testimoni. Si suposem que la sonda d'extracció rotativa va ser utilitzada apropiadament tal i com marca la Norma UNE 83505 (AENOR 2004), mantenint-se fix tant l'aparell com el testimoni a l'hora de realitzar les extraccions, i que el diàmetre de perforació es va mantenir constant durant tot el procés, atribuïm aquestes irregularitats dels outputs a la presa de les tomografies. Aquest fet provoca que tant la orientació com la distribució i posició de les fibres determinades amb aquestes dades no siguin exactament les reals dins dels testimonis. No obstant, com que la magnitud d'aquesta manca de centralitat de les tomografies és molt petita, de l'ordre d'1 o 2 mm, es considera que els errors que hi introdueixen són més aviat menyspreables.

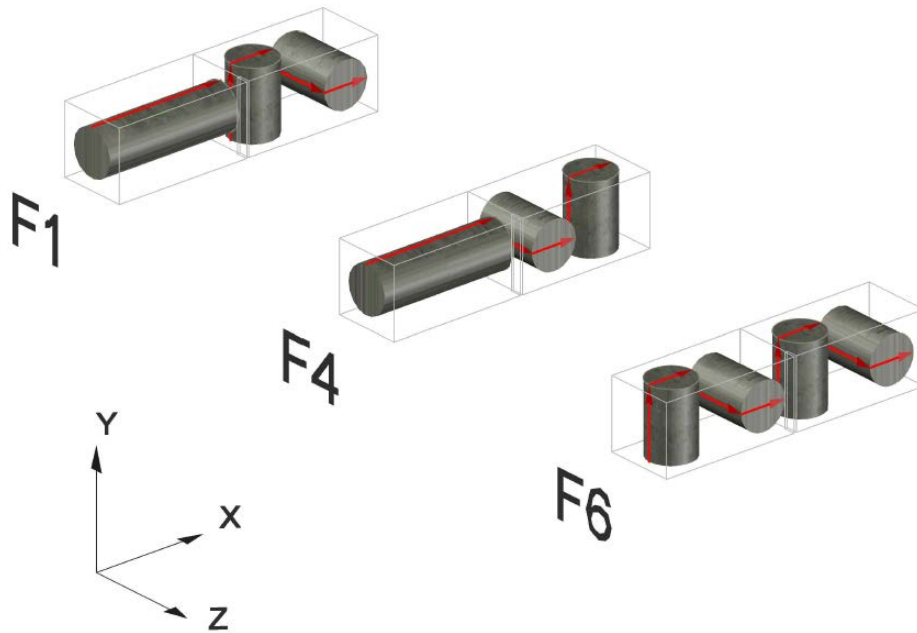


**Figura 3.7 - Vista en planta de la proveta A20F6Ze (esquerra). En l'ampliació (dreta) es comprova que alguns píxels queden fora del cercle**

### 3.3.4 Posició dels testimonis a l'espai i ordre de tomografiat

Arribats a aquest punt cal fer referència al problema de la posició dels testimonis a l'espai i de l'ordre de les tomografies respecte els diferents testimonis, perquè del correcte posicionament dels mateixos en depèn bona part de la descripció de la uniformitat i els coeficients d'orientació. La problemàtica sorgeix del fet que tant les provetes com les tomografies es van realitzar fa un grapat d'anys, i la informació que defineix en quina posició exacta es van tomografiar els testimonis s'ha perdut. Si bé se suposa que tots els testimonis es van escanejar seguint un mateix patró, seguint l'esquema d'extracció de la Figura 3.8, es desconeix quin és aquest. Així doncs, ha sigut necessari realitzar algunes hipòtesis per tal d'encaixar i determinar les posicions exactes dels testimonis dins de les corresponents provetes.

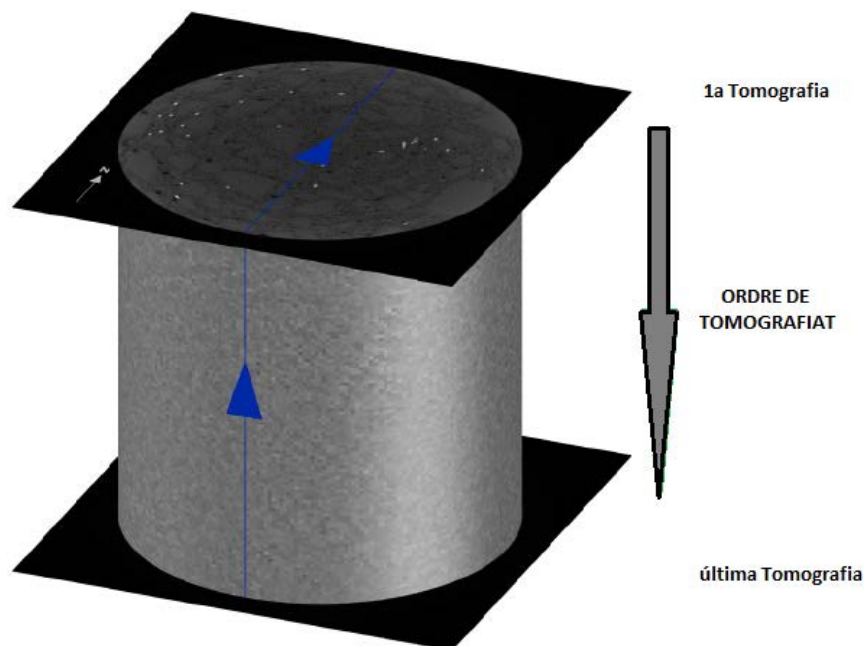




**Figura 3.8 - Esquema d'extracció dels testimonis i eixos de les provetes**

La hipòtesi de posicionament i tomografiat finalment adoptat considera que els testimonis es van col·locar amb la fletxa longitudinal senyalant cap amunt, mentre que la fletxa de la base es trobava col·locada senyalant el "nord" de les tomografies (entès aquest "nord" com la part superior de la tomografia a l'obrir l'arxiu). Així mateix, s'assumeix que les tomografies es van prendre en direcció oposada a la fletxa longitudinal, és a dir, de dalt a baix del testimoni.

Per aclarir els conceptes explicats s'adjunta a la Figura 3.9 un esquema representatiu.

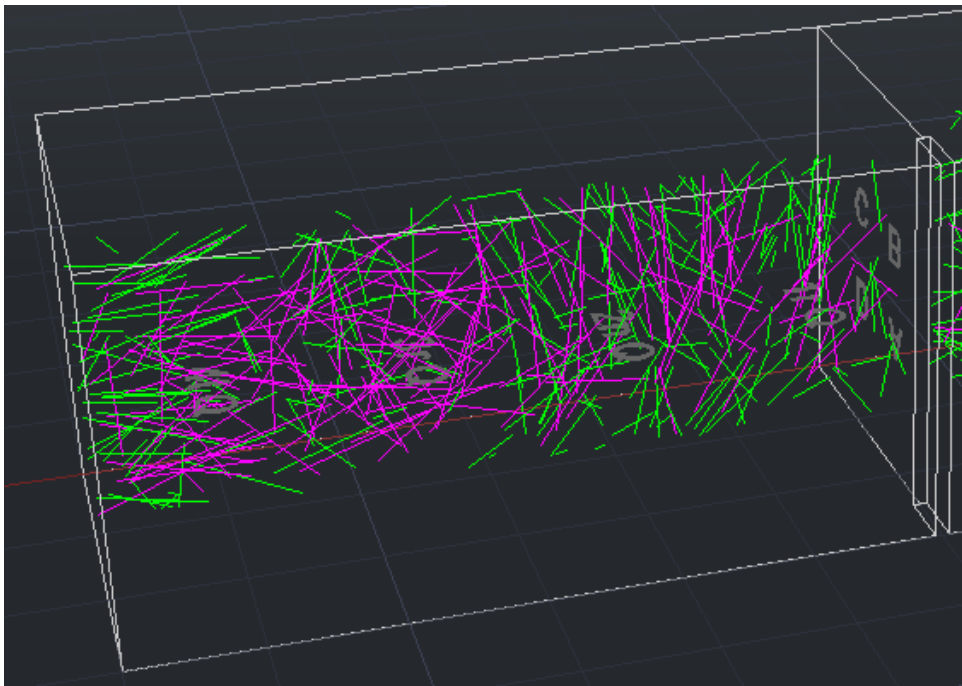


**Figura 3.9 - Esquema del posicionament i ordre de tomografiat**



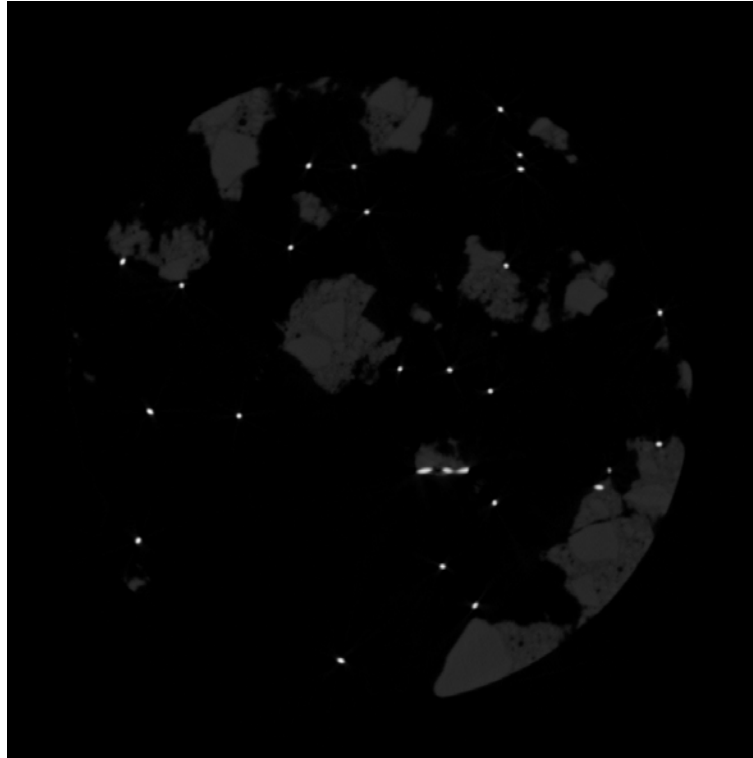
Malgrat tot, aquesta darrera assumptió no es compleix per a totes les provetes. Això es pot detectar un cop es col·loquen les fibres dels testimonis en la seva posició a la proveta. Per a les provetes F4 i F6, la distribució de les mateixes sembla correcta i adequada, mentre que no és així per a la proveta F1.

A la següent figura es pot veure com, si es segueix la hipòtesi de la resta de provetes, existeix una acumulació de fibres a la part exterior del testimoni A20F1Xe-A20F1Xi, corresponent al costat de la paret del motlle de la proveta, que fa sospitar d'una mala col·locació del testimoni. Alhora, a la part interior del testimoni, corresponent al centre de la proveta es detecten poques fibres i força inclinades perpendicularment a l'eix longitudinal de la proveta, cosa que fa pensar que aquest costat es podria tractar realment del costat corresponent a una de les parets del motlle.



**Figura 3.10 - Vista de la distribució de fibres del testimoni A20F1Xe-A20F1Xi dins la proveta**

A més, l'estil de tomografia corresponent a la part exterior del testimoni de la Figura 3.10 és el que es pot observar a la Figura 3.11. En ella es veuen talls de fibres (en blanc) que no es troben embegudes a la matriu de formigó, de manera que la interpretació més plausible és que es tractin de les fibres soltes després del trencament de la proveta, i que per tant els extrems interior i exterior estarien canviats.



**Figura 3.11 - Tomografia de la part inferior del testimoni A20F1Xe-A20F1Xi**

Per tant, prenent en consideració els anteriors motius, s'assumeix que per a tots els testimonis de la proveta F1 l'ordre de tomografiat és l'invers, és a dir, de baix a dalt dels testimonis.

#### **3.4 DADES GEOMÈTRIQUES CARACTERÍSTIQUES DE LES FIBRES A CADA TESTIMONI**

Un cop es té la localització exacta de cadascuna de les fibres dins de cada testimoni es poden extreure nombroses dades d'interès: (a) el nombre total de fibres embegudes dins el testimoni, (b) el nombre de fibres completes, (c) el coeficient d'orientació, (d) la quantia de fibres, (e) la distribució de fibres dins el testimoni i (f) l'orientació de les fibres, entre d'altres. Pel tractament de les dades s'ha utilitzat un simple full de càlcul. A continuació es resumeixen els trets més característics dels testimonis.

Taula 3.7 - Característiques principals dels testimonis

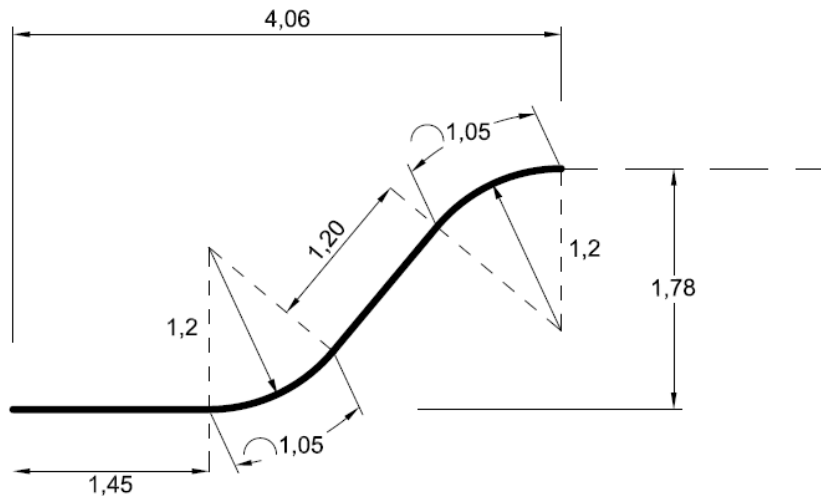
Testimoni	A20F1Xe	A20F1Xi	A20F1Yi	A20F1Ze	A20F4Xe	A20F4Xi	A20F4Ye	A20F4Zi	A20F6Ye	A20F6Yi	A20F6Ze	A20F6Zi
<b>Direcció d'extracció</b>	X	X	Y	Z	X	X	Y	Z	Y	Y	Z	Z
<b>Nº de fibres total</b>	171	180	142	118	72	151	93	113	141	175	157	179
<b>Densitat (fibres/cm<sup>3</sup>)</b>	0,15	0,15	0,18	0,15	0,07	0,14	0,12	0,14	0,19	0,22	0,20	0,22
<b>Nº de fibres completes</b>	51	86	42	35	25	41	29	31	38	67	37	42
<b>Nº de fibres incompletes</b>	120	94	100	83	47	110	64	82	103	108	120	137
<b>% de fibres completes</b>	29,8	47,8	29,6	29,7	34,7	27,2	31,2	27,4	27,0	38,3	23,6	23,5
<b>Longitud mitjana de fibres completes (mm)</b>	51,2	51,9	51,8	51,1	51,5	52,3	51,8	51,2	50,8	51,2	51,1	52,0
<b>Longitud mitjana de fibres incompletes (mm)</b>	28,6	29,5	28,8	29,9	31,5	26,6	27,3	24,4	27,9	28,5	26,9	26,5
<b>Coefficient d'orientació (<math>\eta_\theta</math>)</b>	0,42	0,60	0,36	0,55	0,56	0,76	0,65	0,31	0,62	0,30	0,49	0,59

S'observa que en mitjana la proveta F6 té una densitat superior de fibres per cm<sup>3</sup> de formigó, seguida de la proveta F1 i la proveta F4, respectivament. A més, s'observa que els testimonis extrets de les parts interiors tenen densitats superiors als extrets de les parts externes, de forma relativa segons provetes.

La mitjana del percentatge de fibres completes respecte la totalitat de fibres es troba en un 31%. S'observen valors relativament elevats per als testimonis A20F1Xi (47,8%), A20F4Xe (34,7%) i A20F6Yi (38,3%). Els testimonis extrets en direcció Z de la proveta F6 tenen un percentatge mitjà molt baix (al voltant de 23,5%).

Pel que fa a les longituds mitjanes de les fibres completes s'observa que aquestes tenen un valor molt proper en tots els testimonis, trobant-se aquest al voltant de 51,5 mm. Aquest valor és completament acceptable, atès que cada ganxo té una longitud aproximada de 4 mm (Figura 3.12) i la fibra total uns 60 mm. Per tant, la determinació de fibres mitjançant el CAD s'ha realitzat correctament.

Els coeficients d'orientació de la Taula 3.7 fan referència exclusivament als obtinguts per l'eix longitudinal de cada testimoni.



**Figura 3.12 - Geometria del ganxo, en mm (Van Gysel 2000)**

## CAPÍTOL 4

# ANÀLISI DE LA DISTRIBUCIÓ DE LES FIBRES

### 4.1 INTRODUCCIÓ

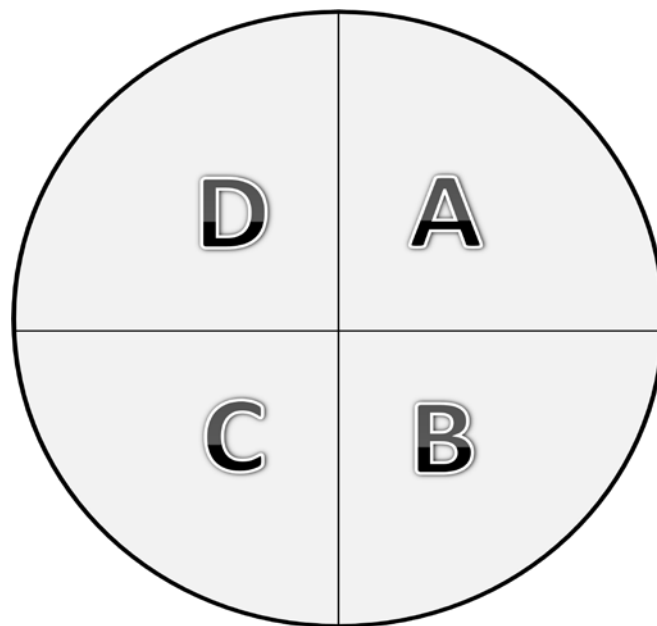
Els valors geomètrics de les fibres obtinguts en el capítol anterior permeten estudiar diferents característiques dels testimonis de forma global, com poden ser la orientació preferencial de les fibres o la seva uniformitat, segons s'agrupin les dades per provetes (F1, F2, F3), per direcció d'extracció (X, Y, Z) o bé per posició a la proveta (e, i). No obstant, abans d'abordar aquests anàlisis és important realitzar una caracterització de la distribució espacial de les fibres dins de cada proveta, amb la finalitat d'advertir una possible acumulació de fibres en alguna zona concreta dels testimonis.

Així doncs, en aquest capítol s'analitza de forma estadística la distribució espacial de les fibres tant dins de cada testimoni per separat com en cada proveta en conjunt.

## 4.2 DISTRIBUCIÓ ESPACIAL DE LES FIBRES PER TESTIMONIS

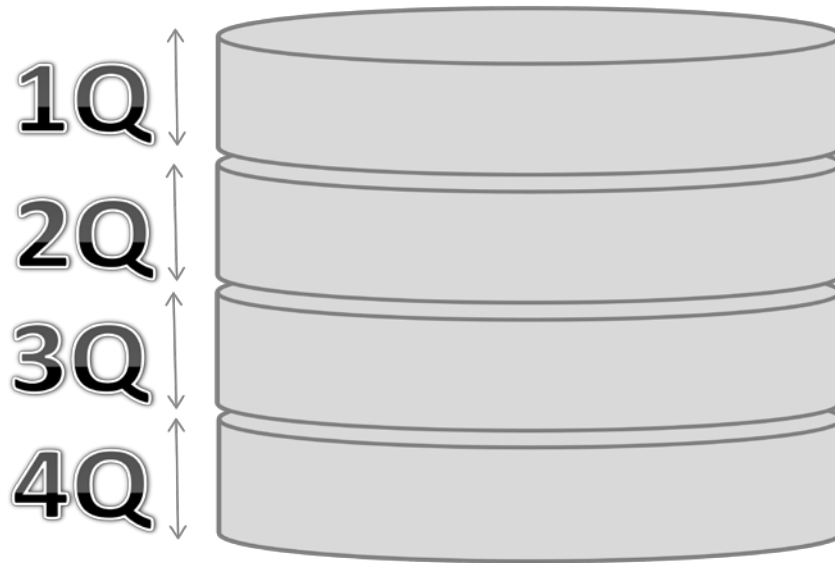
### 4.2.1 Volums parcials

Per a tots els testimonis s'estudiarà si aquests presenten uniformitat en la localització de les fibres. Mitjançant una anàlisi de la distribució del centre de gravetat de les fibres embegudes dins els testimonis, per volums parcials, es podrà determinar si presenten acumulació de fibres en alguna part concreta del testimoni. Els volums parcials considerats classifiquen les fibres en parts diferents del testimoni i permeten determinar la uniformitat de distribució de les fibres. Aquesta uniformitat s'avalua comparant el percentatge de fibres existents en cada volum parcial respecte al total de fibres amb un llinard d'uniformitat ( $\mu$ ) que depèn de la forma que adopti el volum. Les formes són de tres tipologies diferents, segons la Figura 4.1, la Figura 4.2 i la Figura 4.3.



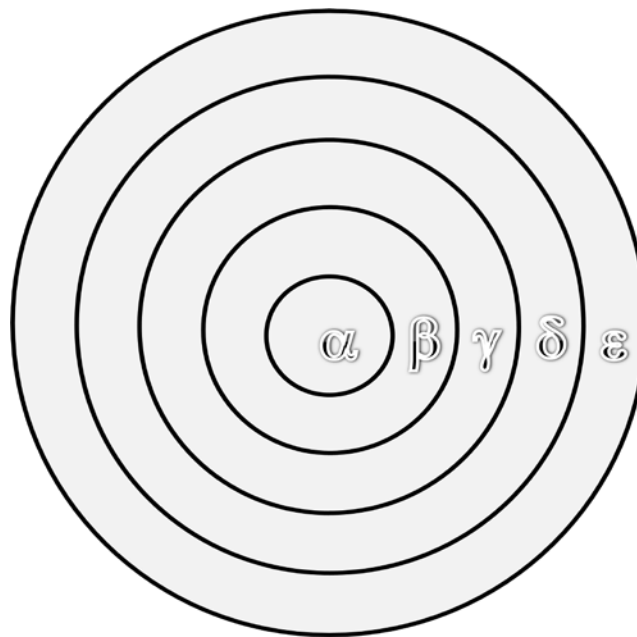
**Figura 4.1 - Volums parcials segons els quatre quadrants de la base del testimoni (A, B, C i D)**

S'estableix un llinard d'uniformitat del 25% per a cada quadrant, doncs cada quadrant equival a una quarta part del volum total.



**Figura 4.2 - Volums parcials segons quatre quartils de l'altura del testimoni (1r Q., 2n Q., 3r Q. i 4t Q.)**

S'estableix, de nou, un llinard d'uniformitat del 25% per a cada quartil, atès que cada quartil equival a una quarta part del volum total.



**Figura 4.3 - Volums parcials segons cinc anells, en funció del radi de la base del testimoni ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  i  $\epsilon$ )**

Per a aquesta tipologia s'estableixen uns llinars d'uniformitat amb els valors de la Taula 4.1, establerts segons el seu volum relatiu.

Taula 4.1 - L·lindars d'uniformitat considerats per als diferents anells

$\mu_{\alpha}$	4%
$\mu_{\beta}$	12%
$\mu_{\gamma}$	20%
$\mu_{\delta}$	28%
$\mu_{\epsilon}$	36%

#### 4.2.2 Determinació del centre de gravetat

Pel que fa al centre de gravetat de les fibres cal comentar que s'ha estudiat la determinació d'aquest mitjançant dos procediments diferents:

- El primer de tots, trivial i directe, fa referència a aquell centre de gravetat obtingut simplement considerant el punt mig de totes les fibres identificades al CAD, independentment de si es tracta de fibres completes o incompletes. Amb aquest mètode es classifiquen, doncs, tants centres de gravetat com fibres tingui el testimoni. No obstant, aquest mètode introdueix un problema important a l'hora de determinar el percentatge de fibres en certs volums parcials.

En concret, el percentatge de fibres que es detecten a l'anell  $\epsilon$  és notablement superior al seu l·lindar en la majoria dels testimonis. Això és així perquè s'ha de tenir present que totes aquelles fibres incompletes de reduïda longitud, les quals es troben situades majoritàriament al marge de les provetes, tindran inevitablement el centre de gravetat situat en aquest anell. Si les provetes tinguessin un radi superior i es consideressin una quantitat superior d'anells, sempre amb el mateix increment de radi, aquests centres de gravetat de ben segur que no es localitzarien tots a l'anell  $\epsilon$ . Per tant, tenint present l'esmentat efecte (l'anomenarem *efecte marge*), el criteri per definir la uniformitat segons anells haurà de ser més flexible que en els altres casos.

Aquest efecte, de retruc, afecta al nombre de fibres existents en els volums parcials en forma de quadrants i de quartils, malgrat l'efecte no sigui tan destacable perquè el còmput es fa en forma de sector angular i de cilindre, respectivament, de manera que els percentatges de fibres es mantenen molt propers.

- El segon procediment corregeix l'*efecte marge* esmentat. Aquest mètode prescindeix de totes aquelles fibres que tinguin una longitud inferior a la meitat de la mitjana del testimoni



corresponent. Així, s'evita situar els centres de gravetat reals de les fibres en uns volums parcials que no els correspongui. Per tant, aquest mètode utilitza un nombre inferior al total de fibres embegudes dins el testimoni per caracteritzar-ne la seva distribució real.

Es pot assimilar aquest procediment com si es tingués la informació de totes les fibres disponibles en les provetes i s'utilitzés únicament la informació corresponent a uns volums de control, corresponents als testimonis analitzats en la present tesina.

S'assumeix que aquest mètode descriu de forma més versemblant la distribució de les fibres al llarg del testimoni i permet determinar amb millor exactitud la uniformitat de la distribució de les mateixes. Per tant, serà el mètode que s'utilitzarà per caracteritzar la situació de les fibres per als diferents testimonis.

A la Taula 4.2 es pot veure el nombre de fibres resultant de l'aplicació d'aquest procediment i una comparació amb el nombre de fibres totals embegudes al testimoni.

**Taula 4.2 - Nombre de fibres utilitzades en la distribució i relació amb la totalitat de cada testimoni**

<b>Testimoni</b>	<b>Nº de fibres embegudes total</b>	<b>Nº de fibres utilitzades en la distribució</b>	<b>% de fibres utilitzades respecte el total</b>
<b>A20F1Xe</b>	171	123	71,9%
<b>A20F1Xi</b>	180	149	82,8%
<b>A20F1Yi</b>	142	96	67,6%
<b>A20F1Ze</b>	118	89	75,4%
<b>A20F4Xe</b>	72	57	79,2%
<b>A20F4Xi</b>	151	97	64,2%
<b>A20F4Ye</b>	93	63	67,7%
<b>A20F4Zi</b>	113	65	57,5%
<b>A20F6Ye</b>	141	101	71,6%
<b>A20F6Yi</b>	175	129	73,7%
<b>A20F6Ze</b>	157	98	62,4%
<b>A20F6Zi</b>	179	111	62,0%

Les fibres utilitzades per fer l'anàlisi de la distribució de les mateixes representen al voltant d'un 70% del nombre total de fibres embegudes dins els testimonis. S'observa que els valors són molt propers entre ells per a testimonis extrets en la mateixa direcció de la proveta F6, com és el cas dels testimonis A20F6Ye i A20F6Yi (71,6% i 73,7%, respectivament) i dels

testimonis A20F6Ze i A20F6Zi (62,4% i 62,0%, respectivament), malgrat el nombre de fibres variï sensiblement d'uns als altres.

#### **4.2.3 Anàlisi de la distribució espacial de les fibres per testimonis**

A continuació es presenten els valors més destacables de la distribució de les fibres per a cada testimoni (Taula 4.3), representat pel percentatge de fibres de cada volum parcial respecte al total de cada testimoni. Els valors destacats en negreta fan referència a una situació en què es superin els extrems dels intervals considerats com a acceptables. Aquests intervals es fixen segons un criteri subjectiu, assumint uns valors tals com [20% - 25%] per al cas d'anàlisi per quadrants i per quartils, i [3% - 5%], [10% - 14%], [16% - 24%], [22% - 34%] i [28% - 44%] per a l'anàlisi mitjançant els anells  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  i  $\epsilon$ , respectivament.

A l'Annex B es poden trobar les dades completes utilitzades per a l'anàlisi.

Taula 4.3 - Distribució de fibres en els testimonis

		Proveta											
		F1				F4				F6			
Volum parcial	Llindar d'uniformitat	A20F1Xe	A20F1Xi	A20F1Yi	A20F1Ze	A20F4Xe	A20F4Xi	A20F4Ye	A20F4Zi	A20F6Ye	A20F6Yi	A20F6Ze	A20F6Zi
<b>Regió A</b>	25%	25,2%	24,8%	25,0%	<b>19,1%</b>	<b>35,1%</b>	21,6%	<b>38,1%</b>	<b>6,2%</b>	29,7%	26,4%	23,5%	26,1%
<b>Regió B</b>	25%	27,6%	28,2%	28,1%	21,3%	<b>15,8%</b>	25,8%	<b>17,5%</b>	29,2%	<b>10,9%</b>	23,3%	<b>19,4%</b>	20,7%
<b>Regió C</b>	25%	24,4%	25,5%	20,8%	<b>41,6%</b>	21,1%	23,7%	25,4%	<b>30,8%</b>	24,8%	24,8%	23,5%	<b>18,0%</b>
<b>Regió D</b>	25%	22,8%	21,5%	26,0%	<b>18,0%</b>	28,1%	28,9%	<b>19,0%</b>	<b>33,8%</b>	<b>34,7%</b>	25,6%	<b>33,7%</b>	<b>35,1%</b>
<b>1r Q</b>	25%	25,2%	<b>30,2%</b>	25,0%	24,7%	<b>36,8%</b>	<b>33,0%</b>	<b>31,7%</b>	<b>18,5%</b>	<b>17,8%</b>	24,0%	23,5%	<b>31,5%</b>
<b>2n Q</b>	25%	24,4%	22,1%	27,1%	29,2%	22,8%	27,8%	27,0%	<b>33,8%</b>	<b>36,6%</b>	<b>36,4%</b>	21,4%	28,8%
<b>3r Q</b>	25%	28,5%	27,5%	<b>33,3%</b>	20,2%	29,8%	<b>19,6%</b>	27,0%	21,5%	<b>17,8%</b>	22,5%	28,6%	22,5%
<b>4t Q</b>	25%	22,0%	20,1%	<b>14,6%</b>	25,8%	<b>10,5%</b>	<b>19,6%</b>	<b>14,3%</b>	26,2%	<b>27,7%</b>	<b>17,1%</b>	26,5%	<b>17,1%</b>
<b>Anell <math>\alpha</math></b>	4%	<b>2,4%</b>	<b>5,4%</b>	<b>8,3%</b>	4,5%	<b>7,0%</b>	3,1%	<b>1,6%</b>	<b>7,7%</b>	5,0%	4,7%	<b>5,1%</b>	3,6%
<b>Anell <math>\beta</math></b>	12%	10,6%	<b>15,4%</b>	11,5%	14,6%	10,5%	11,3%	11,1%	<b>16,9%</b>	<b>5,0%</b>	<b>15,5%</b>	11,2%	<b>9,9%</b>
<b>Anell <math>\gamma</math></b>	20%	<b>26,8%</b>	<b>25,5%</b>	<b>26,0%</b>	23,6%	22,8%	19,6%	<b>12,7%</b>	18,5%	21,8%	<b>27,9%</b>	21,4%	<b>28,8%</b>
<b>Anell <math>\delta</math></b>	28%	32,5%	25,5%	<b>40,6%</b>	22,5%	31,6%	<b>38,1%</b>	<b>38,1%</b>	<b>38,5%</b>	<b>36,6%</b>	<b>34,9%</b>	<b>38,8%</b>	<b>40,5%</b>
<b>Anell <math>\epsilon</math></b>	36%	<b>27,6%</b>	28,2%	<b>13,5%</b>	34,8%	28,1%	<b>27,8%</b>	36,5%	<b>18,5%</b>	31,7%	<b>17,1%</b>	<b>23,5%</b>	<b>17,1%</b>

#### 4.2.3.1 Proveta F1

El testimoni **A20F1Xe** presenta valors que s'ajusten als diferents intervals dels volums parcials, amb l'excepció dels anells  $\alpha$  (2,4%),  $\gamma$  (26,8%) i  $\varepsilon$  (27,6%) que tenen uns valors que sobrepassen els intervals, però sense arribar a ser-ne un motiu destacable de falta d'uniformitat. Per tant, es pot concloure que les fibres embegudes al testimoni A20F1Xe es troben distribuïdes uniforme i homogèniament.

Per la seva part, els valors del testimoni **A20F1Xi** també s'ajusten als intervals dels volums parcials, malgrat obtingui un ajustat 30,2% de fibres en el 1r quartil. En l'anàlisi per anells també s'observa que alguns valors sobrepassen els intervals, però de nou sense destacar en excés, de manera que es pot considerar que les fibres es troben distribuïdes uniformement.

El testimoni **A20F1Yi** presenta uniformitat en l'anàlisi segons quadrants, però no així pel que fa als altres anàlisi. Concretament, el 4t quartil (14,6%) presenta un valor inusualment baix, mentre que el 3r quartil (33,3%) en presenta un de moderadament elevat. Alhora, l'anàlisi per anells mostra que no es manté la uniformitat pel que fa a aquest tipus de distribució, doncs excepte a l'anell  $\beta$  obté valors que superen els límits dels intervals. En destaquen un valor molt reduït de fibres a l'anell  $\varepsilon$  (13,5%) i un de molt elevat per a l'anell central (8,3%, més del doble del valor llindar).

Contràriament, el testimoni **A20F1Ze** presenta uniformitat en els volums parcials dels anàlisi per anells i per quartils, malgrat no sigui així per a l'estudi segons quadrants. En concret, presenta una acumulació notable de fibres en la regió C (41,6%), mentre que en les regions A (19,1%) i D (18,0%) el nombre de fibres és més reduït de l'esperat, però sense suposar una exageració al tenir uns valors propers als extrems dels intervals. Podem concloure que en termes generals la distribució de fibres en aquest testimoni és uniforme, tot i que un dels quadrants acumuli bona part de les fibres.

#### 4.2.3.2 Proveta F4

El testimoni **A20F4Xe** presenta uniformitat en l'anàlisi per anells (el 7% de l'anell  $\alpha$  és poc significatiu), no així per als altres dos casos. Acumula fins a un 36,8% de fibres al 1r quartil, mentre que el 4t només té un 10,5% de les fibres. Pel que fa a l'anàlisi per quadrants obté un

valor notablement elevat per a la regió A (35,1%) i alhora un de sensiblement reduït per a la regió B (15,8%). Aquest testimoni presenta, doncs, una clara falta d'uniformitat, en el benentès que el percentatge de fibres decreix notablement amb els quartils i que aquestes tendeixen tant a acumular-se en el quadrant A com a no fer-ho en el B

El testimoni **A20F4Xi** presenta uniformitat pel que fa a l'anàlisi per quadrants, però no així per als altres dos casos. S'observa una acumulació de fibres en el 1r quartil alhora que decreix el nombre de fibres amb els quartils. Els valors dels volums parcials en forma d'anell no s'ajusten als intervals en els anells  $\delta$  (38,1%) i  $\epsilon$  (27,8%), però no els sobrepassen de manera destacable. Es considera que aquest testimoni tampoc presenta uniformitat de distribució de les fibres.

Per la seva part, el testimoni **A20F4Ye** presenta una acumulació notable en la regió A (38,1%), mentre que a les regions B (17,5%) i D (19%) s'observa un valor més reduït del que tocaria però poc destacable. Pel que fa a l'anàlisi per quartils presenta una distribució força semblant a l'anterior testimoni, essent els quartils 1r (31,7%) i 4t (14,3%) els que tenen un percentatge que denota manca d'uniformitat. El darrer anàlisi mostra que no existeix uniformitat per anells, doncs fins a tres anells diferents presenten valors fora dels intervals. Amb tot, es conclou que el testimoni no té una distribució homogènia de les fibres.

Al testimoni **A20F4Zi** no s'hi observa uniformitat en cap dels anàlisis. La regió A (6,2%) presenta un valor excessivament reduït, mentre que les regions C (30,8%) i D (33,8%) excedeixen els intervals. El 1r (18,5%) i el 2n quartil (33,8%) superen els intervals per defecte i per excés, respectivament, mentre que en l'anàlisi per anells només s'accepta el valor de l'anell  $\gamma$  (18,5%).

L'estudi de la distribució de fibres al llarg de la proveta F4 en genèric mostra certa coherència, atès que per exemple els elevats valors de fibres del 1r quartil del testimoni A20F4Xi i de les regions B i C del testimoni A20F4Zi es donen perquè estan situats a una zona molt propera. Altres exemples serien l'elevat valor del 1r quartil del testimoni A20F4Ye comparat amb el valor de la regió D del testimoni A20F4Zi, i el reduït valor del 4t quartil del testimoni A20F4Ye comparat amb el baixíssim valor de la regió A del testimoni A20F4Zi.

#### 4.2.3.3 Proveta F6

El testimoni **A20F6Ye**, en vista dels valors de la Taula 4.3, presenta manca clara d'uniformitat. La regió B (10,9%) presenta un valor excessivament reduït de fibres, mentre que la regió D

(34,7%) en presenta un de massa elevat. Cap dels valors obtinguts en l'anàlisi dels quartils es troba dins l'interval exigít.

El testimoni **A20F6Yi**, no obstant, presenta una bona distribució de fibres pel que fa a l'anàlisi segons quadrants, mentre que per al quartil 2n (36,4%) obté un valor molt elevat i per al 4t quartil (17,1%) un valor sensiblement reduít. A l'anàlisi per anells només és acceptable el valor de l'anell  $\alpha$  (4,7%), de manera que es pot concloure que no té una homogeneïtat de fibres en tot el volum del testimoni.

Per la seva banda, el testimoni **A20F6Ze** presenta uniformitat en l'anàlisi per quartils, no així per al cas dels quadrants. En efecte, la regió B (19,4%) té un valor lleugerament inferior al mínim de l'interval mentre que la regió D (33,7%) obté un valor sensiblement elevat. L'anàlisi segons anells tampoc denota una bona distribució, atès que només dos d'ells es troben dins els intervals corresponents. No obstant, com que els valors que no compleixen les restriccions són molt propers als extrems dels intervals, es considera que el testimoni presenta una certa uniformitat de distribució de les fibres.

Finalment, el testimoni **A20F6Zi** té dues regions fora de l'interval d'acceptació, amb valors notablement separats dels extrems del mateix (regió C, 18%, i regió D, 35,1%). L'anàlisi per quartils no millora la uniformitat del testimoni, atès que el 1r quartil (31,5%) obté un valor superior a l'esperat i el 4t quartil (17,1%) n'obté un de sensiblement inferior. L'anàlisi per anells acaba de confirmar aquesta falta d'uniformitat, doncs els valors que obté són molt dispers i allunyats dels respectius intervals.

L'estudi de la proveta F6 d'una forma general permet afirmar que la distribució de fibres dins seu no és homogènia ni uniforme. No obstant, la localització i acumulació de les fibres concorda amb l'esperat. Un exemple seria l'elevat percentatge de fibres de la regió D del testimoni A20F6Zi respecte l'elevat percentatge del 2n quartil del testimoni A20F6Yi.

### 4.3 DISTRIBUCIÓ ESPACIAL DE LES FIBRES PER PROVETES

Si l'estudi d'uniformitat es realitza de forma general per cadascuna de les provetes es poden treure conclusions globals de la localització de les fibres. Aquest estudi parteix de la totalitat de les fibres embegudes als testimonis, tinguin o no el centre de gravetat dins del mateix.

### 4.3.1 Volums parcials

Es divideix la proveta en 4 parts longitudinals iguals (Figura 4.4), considerant-se cadascuna de les dues parts extremes com l'exterior de la proveta i les dues altres parts l'interior. Amb aquesta divisió s'intenta determinar si existeix menys densitat de fibres a les parts exteriors de les provetes, atès que són els punts més allunyats a l'hora de formigonar i on menys fibres arriben. El llinard d'uniformitat serà és el 25%.

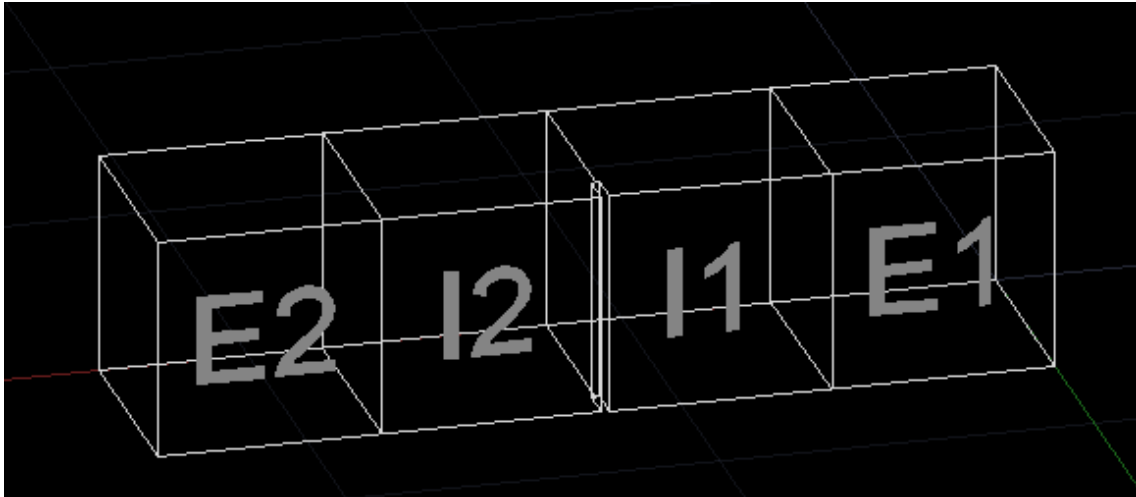


Figura 4.4 - Parts exteriors i interiors d'una proveta

A més, es consideren també la meitat superior i la inferior (Figura 4.5), per determinar si durant el formigonat s'acumulen fibres en una part o l'altra. El llinard d'uniformitat és el 50%.

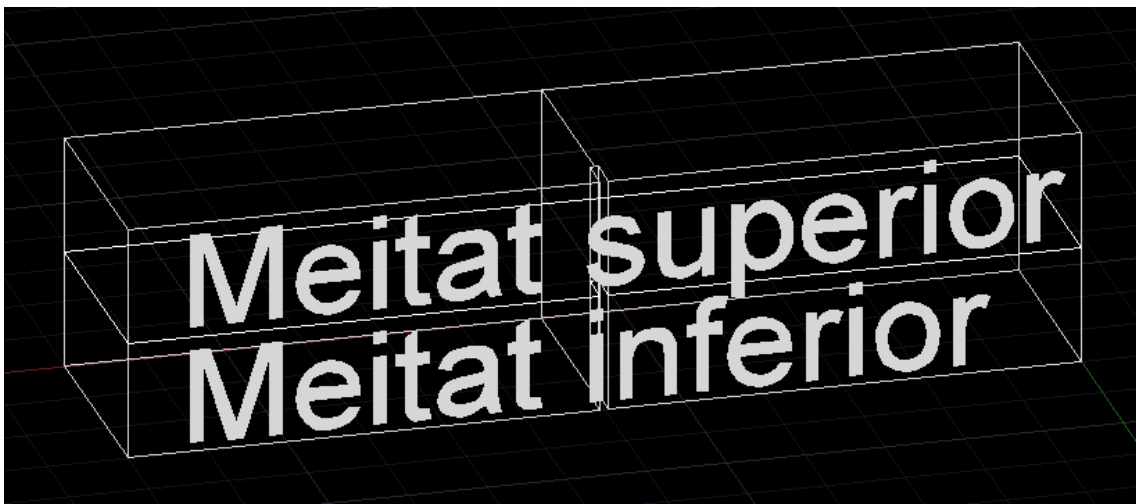


Figura 4.5 - Meitats superior i inferior d'una proveta

### 4.3.2 Anàlisi de la distribució espacial de les fibres per provetes

A la Taula 4.4 es mostren els resultats obtinguts per als diferents volums parcials. El nombre de fibres de cada volum parcial en cadascuna de les provetes s'obté tenint en compte el nombre de fibres reals existents en cada part en relació al volum del testimoni en el qual estan embegudes

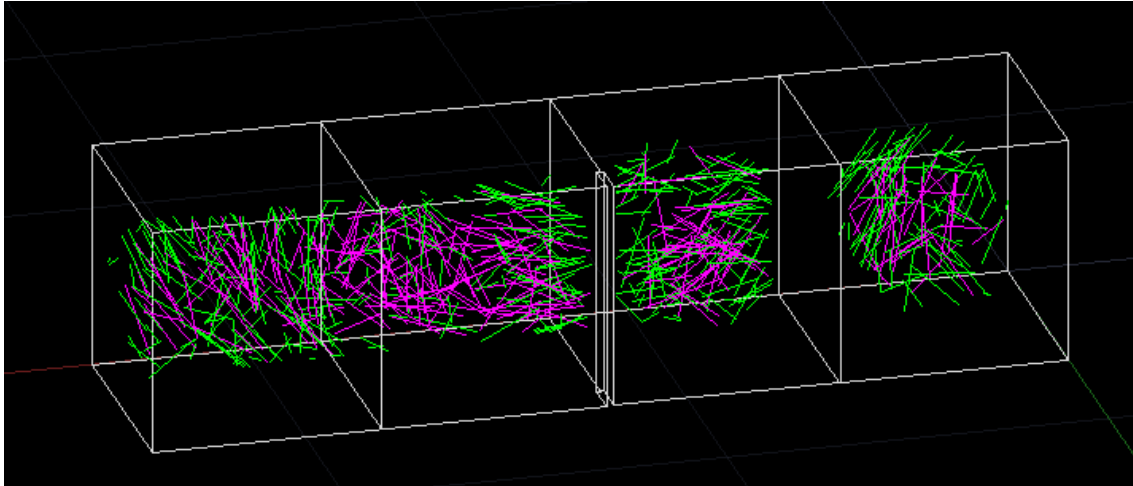
Taula 4.4 - Nombre de fibres per a cada part en què es divideixen les provetes

Volum parcial	F1		F4		F6	
	Nº fibres	% respecte el total de la proveta	Nº fibres	% respecte el total de la proveta	Nº fibres	% respecte el total de la proveta
<b>E1</b>	122,00	24,5%	95,00	25,3%	159,00	24,5%
<b>I1</b>	139,00	28,0%	113,00	30,1%	172,00	26,5%
<b>I2</b>	121,00	24,3%	113,00	30,1%	174,00	26,8%
<b>E2</b>	115,00	23,1%	54,00	14,4%	145,00	22,3%
<b>Meitat superior</b>	321,00	52,5%	212,00	49,4%	369,00	56,6%
<b>Meitat inferior</b>	290,00	47,5%	217,00	50,6%	283,00	43,4%

Pel que fa a la **provetta F1** en general (Figura 4.6), la quantitat de fibres en els dos extrems es troba per sota el 25%, però obté valors que no denoten falta d'uniformitat. En concret, el nombre de fibres per a l'extrem E1, corresponents al testimoni A20F1Ze, és del 24,5% (Taula 4.4) del total de fibres de la proveta. Per a l'extrem E2, corresponent al testimoni A20F1Xe, el percentatge es redueix lleugerament fins al 23,1%. Les parts interiors, caracteritzades pels testimonis A20F1Xi i A20F1Yi, concentren el 52,3%, valor que no es considera significatiu d'un major nombre de fibres en aquestes parts respecte les parts exteriors.

La meitat superior i la inferior presenten valors molt propers, i no fan pensar en una acumulació preferent de fibres en cap de les dues parts.

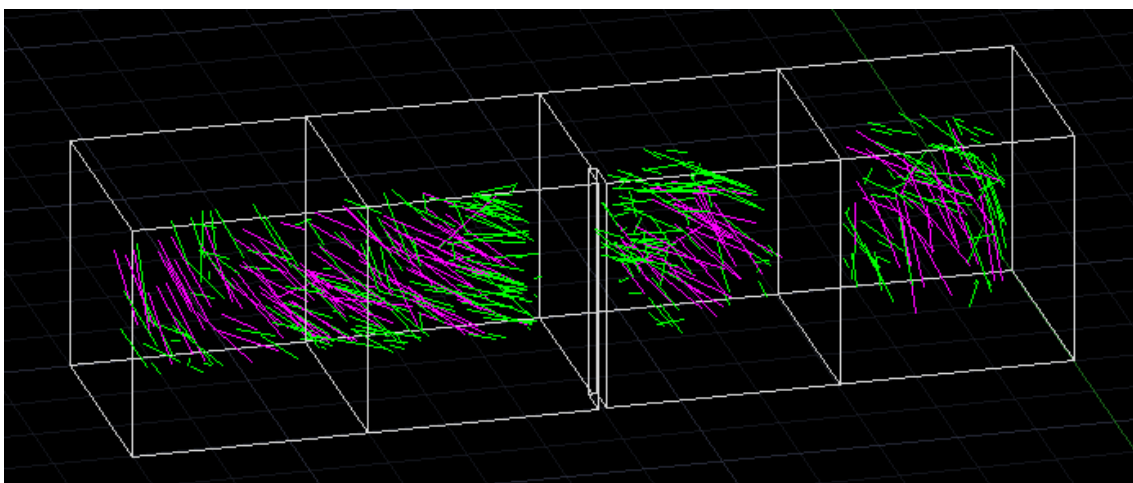




**Figura 4.6 - Vista de les fibres embegudes en els testimonis de la proveta F1**

L'estudi de la distribució de fibres al llarg de la **proveta F4** (Figura 4.7) mostra com en les parts interiors s'acumulen un nombre de fibres notablement superior que en les parts exteriors, caracteritzades pel testimoni A20F4Ye (E1) i pel testimoni A20F4Xe (E2). En concret, el percentatge de fibres respecte el total de la proveta és del 60,3% (Taula 4.4) per a les parts interiors i del 39,7% per a les parts exteriors, corresponents en aquest cas al testimoni A20F4Zi (I1) i al testimoni A20F4Xi (I2). En aquest cas sí que es confirma una falta d'uniformitat en la distribució de fibres al llarg de la proveta, segurament degut a una mala barreja de la pasta o al formigonat.

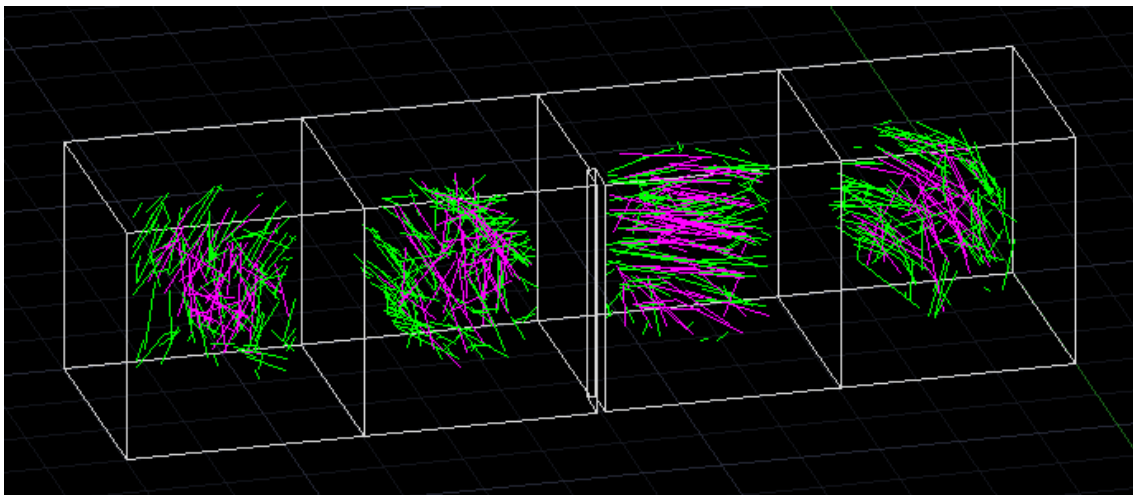
Pel que fa a la distribució segons les meitats superior i inferior, s'observa una completa uniformitat de les fibres.



**Figura 4.7 - Vista de les fibres embegudes en els testimonis de la proveta F4**

Per la seva part, la distribució de fibres a la **proveta F6** (Figura 4.8) mostra que les parts exteriors, caracteritzades pels testimonis A20F6Ye (E2) i A20F6Ze (E1), acumulen un 46,8% de les fibres totals, valor superior al 53,2% de les parts interiors. No obstant, la diferència entre ells és poca i els valors són poc significatius, de manera que es conclou que no existeix una acumulació excessiva de fibres en cap part de la proveta, però sí una molt lleu tendència a fer-ho a la part interior, caracteritzada pels testimonis A20F6Yi (I1) i A20F6Zi (I2).

La distribució segons meitats mostra que en la part superior de la proveta s'acumulen més fibres (56,6%) que no pas en la part inferior (43,4%). Tot i que la lògica faci pensar que la gravetat tendirà a situar les fibres a la part inferior de la proveta, els efectes de flux a què es veu sotmès el formigó durant el formigonat, el qual es troba molt fluïdificat per a permetre una bona treballabilitat i evitar la compactació, poden provocar que el formigó circuli per la part inferior i desplaci lleugerament les fibres cap amunt. Aquesta seria una explicació prou raonable del fet que la densitat de fibres a la meitat superior sigui més elevada que en la meitat inferior.



**Figura 4.8 - Vista de les fibres embegudes en els testimonis de la proveta F6**

#### 4.4 CONCLUSIONS

De l'anàlisi a nivell de proveta dels resultats de les tres provetes estudiades, i amb la deguda prevenció a l'hora de generalitzar a partir del resultat de tan sols tres mostres, és possible afirmar que:

- La meitat central de les provetes sempre té embegudes un nombre de fibres superior a les existents en les parts exteriors. Això es compleix en les tres provetes, essent el valor per a la proveta F1 del 52,3%, del 60,3% per a la proveta F4 i del 53,2% per a la proveta F6. Només en una de les sis parts extremes de totes tres provetes (part E1 de la proveta F4) el nombre de fibres és superior al llinard d'uniformitat, assolint un 25,3%. La mitjana de les fibres que es troben a les parts interior és del 55,3%
- Existeix una certa uniformitat de distribució de les fibres pel que fa a la seva localització a la meitat superior i a la inferior. Tot i això, en les tres provetes estudiades es troba una mica més de fibra en la meitat superior que, en cap cas, sembla tenir una importància rellevant. El valor mitjà de la part superior seria del 52,8%, respecte a un 47,2% de la part inferior.

D'aquests resultats es desprèn que en aquestes provetes de formigó autocompactable no hi ha cap tendència d'acumulació de fibres a la part inferior de l'encofrat, malgrat la seva major densitat de fibres. A més, s'observa una lleugera tendència a l'acumulació de fibres en la part central de la proveta, zona on es realitza l'assaig de flexotracció. Aquest fet pot conduir a una petita sobreestimació de la resposta resistent de les provetes quan se les sotmet a l'assaig de flexotracció.

## CAPÍTOL 5

# PERFIL D'ORIENTACIÓ DE LES FIBRES

### 5.1 INTRODUCCIÓ

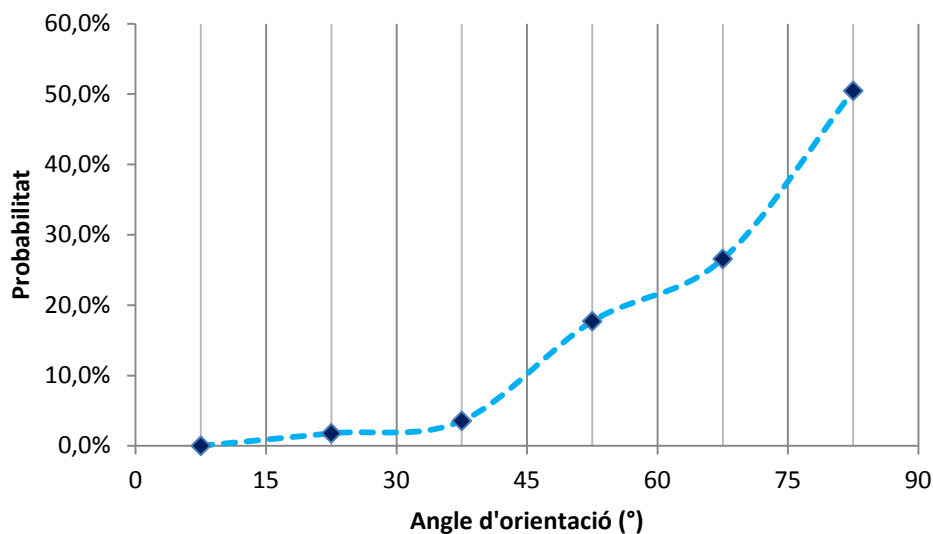
Com ja s'ha introduït en l'estat del coneixement, per a poder determinar correctament la resposta del formigó amb fibres una vegada el formigó fissura cal també conèixer amb exactitud el perfil d'orientació de les fibres dins de cada testimoni. Amb aquesta informació serà possible determinar quina serà la contribució de les fibres a la resposta a tracció dels testimonis, segons la inclinació de les mateixes, tal i com es desenvoluparà al Capítol 6.

En aquest capítol es presenten els perfils d'orientació obtinguts tant de forma experimental -prenent les inclinacions reals determinades en base a l'anàlisi de les tomografies- com de forma teòrica -mitjançant el procediment proposat per Laranjeira et al. (2011), que només precisa del coeficient d'orientació. Un cop obtinguts els dos perfils d'orientació es realitza una comparació entre ells, per tal de comprovar fins a quin punt el procediment teòric ajusta els perfils reals determinats experimentalment. Finalment, s'estudia la uniformitat i preferència d'orientació de les fibres en els tres eixos de l'espai per a cada proveta, amb la intenció de poder relacionar aquesta informació amb la resposta a tracció obtinguda en el Capítol 6

## 5.2 DETERMINACIÓ DEL PERFIL D'ORIENTACIÓ DE LES FIBRES DE FORMA EXPERIMENTAL

Amb les dades geomètriques obtingudes al Capítol 3, es pot determinar de forma ràpida i senzilla la distribució de les fibres segons la seva orientació respecte l'eix longitudinal de cada testimoni, representat en cada cas per la seva funció de densitat de probabilitat de l'angle d'inclinació. És intuïtiu pensar que la forma que adopti aquesta funció de densitat depèn en gran mesura del valor del coeficient d'orientació que tingui el testimoni en l'eix corresponent, atès que aquest coeficient es pot considerar com un promig de l'angle que formen les fibres respecte l'eix considerat.

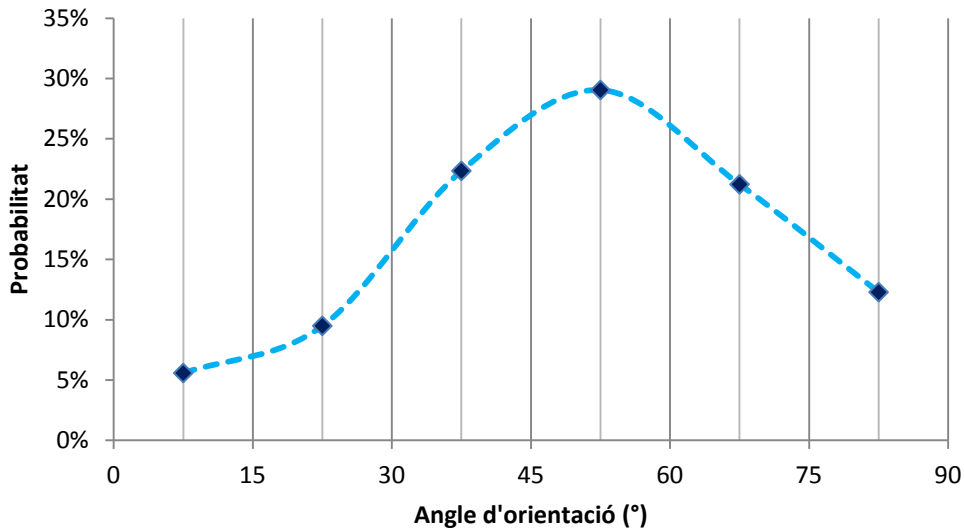
Així, un testimoni que tingui un coeficient d'orientació baix implica que una bona part de les fibres embegudes dins seu s'orienten perpendicularment a l'eix longitudinal, de manera que tindrà una probabilitat baixa d'albergar fibres orientades paral·lelament a aquest eix. A la Figura 5.1 es representa una funció de densitat de probabilitat per a un coeficient d'orientació de valor  $\eta_0=0,31$ , prenent intervals d'angle de  $\Delta\theta=15^\circ$  i prenent com a marques d'abscisses els centres de classe.



**Figura 5.1 - Funció de densitat de probabilitat per al testimoni A20F4Zi ( $\eta_0=0,31$ )**

S'observa que vora un 50% de les fibres totals es troben a l'interval  $[75^\circ, 90^\circ]$ , i vora un altre 30% de les fibres es troba entre els angles  $[60^\circ, 75^\circ]$ . Per tant, en vista de la forma que pren queda palès que bona part de les fibres estan col·locades més aviat de forma perpendicular a l'eix longitudinal

Per contra, per a testimonis amb un coeficient d'orientació alt, un considerable nombre de fibres estaran orientades de forma paral·lela a l'eix longitudinal. La probabilitat d'obtenir fibres perpendiculars a l'eix serà, doncs, notablement baixa. A la Figura 5.2 es representa una funció de densitat de probabilitat per a un coeficient d'orientació de valor  $\eta_\theta=0,59$ .



**Figura 5.2 - Funció de densitat de probabilitat per al testimoni A20F6Zi ( $\eta_\theta=0,59$ )**

Com que el valor del coeficient d'orientació de la figura anterior no és extremadament elevat, sinó que es pot considerar com a valor intermedi, el gruix dels angles que formen les fibres es centra en els intervals  $[30^\circ,45^\circ]$ ,  $[45^\circ,60^\circ]$  i  $[60^\circ,75^\circ]$ . El percentatge màxim es troba situat a l'interval  $[45^\circ,60^\circ]$  i els mínims es troben a les cues de la funció de densitat.

### 5.3 DETERMINACIÓ DEL PERFIL D'ORIENTACIÓ DE LES FIBRES DE FORMA TEÒRICA

Per tal de calcular teòricament el perfil d'orientació es fa ús del procediment proposat per Laranjeira et al. (2011), el qual ha estat explicat al capítol estat del coneixement. Partint únicament del coeficient d'orientació de l'eix longitudinal de la proveta aquest mètode aproxima la freqüència d'orientació de les fibres per a uns angles determinats. Els resultats obtinguts per aquest mètode són els que es poden observar en la Figura 5.3, per als coeficients d'orientació indicats:

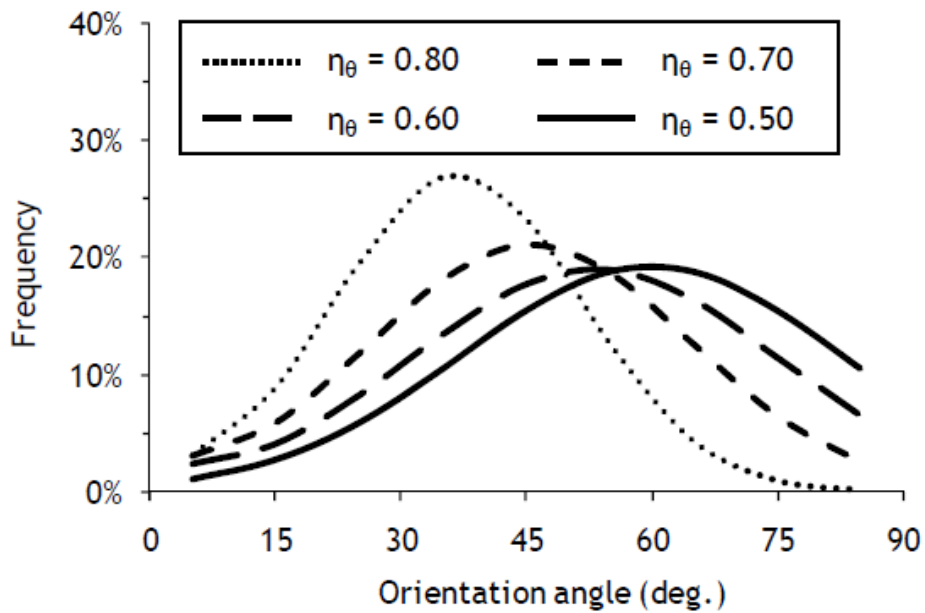


Figura 5.3 - Perfil d'orientació predit per diferents coeficients d'orientació (Laranjeira et al. 2011)

#### 5.4 COMPARACIÓ DELS PERFILS TEÒRICS I EXPERIMENTALS

Per tal de determinar si el mètode teòric s'ajusta de forma fidel al perfil d'orientació experimental (real) cal fixar-se en la diferència de freqüència existent entre un mètode i l'altre. A la Figura 5.4 es pot veure un exemple de la comparació entre els dos perfils per al testimoni A20F1Ze.

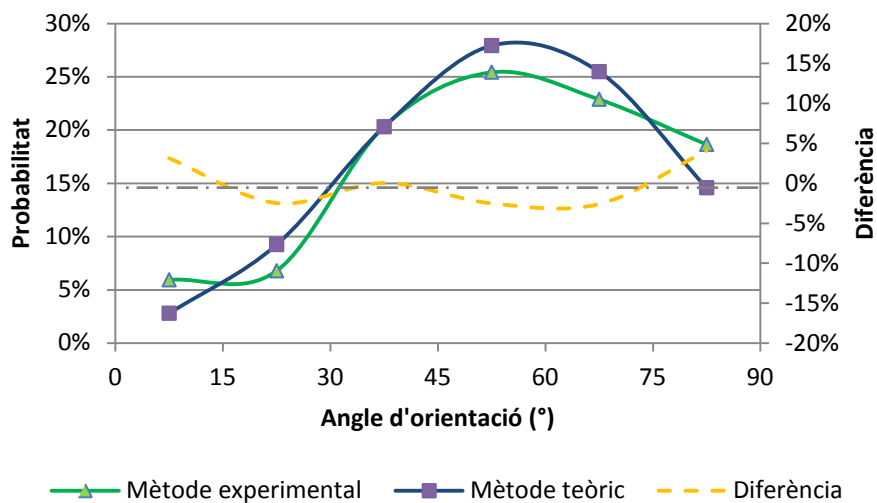


Figura 5.4 - Perfils d'orientació experimental, teòric i la seva diferència, per al testimoni A20F1Ze ( $\eta_\theta=0,55$ )

A l'Annex C s'adjunten les gràfiques corresponents a tots els testimonis.

Per a una comparació correcta aquesta diferència es mostra com a mitjana dels valors absoluts per a cada angle d'inclinació. Si no s'utilitza el valor absolut els percentatges positius compensen els negatius, de manera que s'obté un valor promig que no permet identificar les diferències reals. A la Taula 5.1 es poden veure els valors de la mitjana de les diferències per a cada testimoni, així com el valor màxim que s'assoleix.

**Taula 5.1 - Màxims i mitjanes de la diferència dels perfils d'orientació entre els dos mètodes**

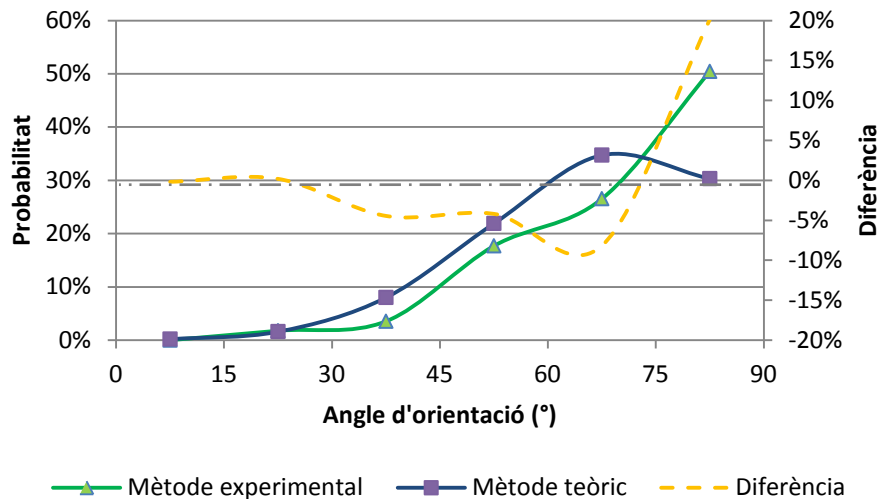
Testimoni	$\eta_0$	Màxim	Mitjana
A20F1Xe	0,42	9,87%	3,44%
A20F1Xi	0,60	13,47%	9,49%
A20F1Yi	0,36	15,25%	4,72%
A20F1Ze	0,55	4,07%	2,47%
A20F4Xe	0,56	3,85%	2,38%
A20F4Xi	0,76	13,06%	5,65%
A20F4Ye	0,65	9,59%	5,15%
A20F4Zi	0,31	20,12%	6,23%
A20F6Ye	0,62	5,75%	3,60%
A20F6Yi	0,30	13,44%	4,90%
A20F6Ze	0,49	5,51%	2,71%
A20F6Zi	0,59	2,32%	1,05%

Dels valors de la taula anterior es desprèn que els valors predits pel procediment teòric s'ajusten notablement bé a la realitat, doncs la diferència mitjana no supera per a la majoria dels testimonis el 6,5% (amb l'excepció del testimoni A20F1Xi, que té una mitjana del 9,49%). Aquest valor es considera poc significatiu tenint en compte que s'està fent una predicció d'una propietat geomètrica de forma general, per a una proveta que pot veure's influenciada per nombrosos efectes, com poden ser-ho el flux de la massa de formigó durant el formigonat o la modificació de l'orientació de les fibres per culpa dels marges de l'encofrat.

No obstant, s'observa que existeix una relació entre els coeficients d'orientació i la diferència màxima, que es compleix en la majoria dels testimonis: per valors extrems dels coeficients d'orientació el valor màxim de diferència entre els mètodes és major que per a coeficients d'orientació intermedis.



Així, per als testimonis amb un coeficient d'orientació notablement baix (per sota de 0,40), com ho són els testimonis A20F1Yi, A20F4Zi i A20F6Yi, amb valors de 0,35, 0,31 i 0,30 respectivament, la diferència màxima no baixa en cap cas del 13%. En concret, obtenen el 15,25%, 20,12% i 13,44% de diferència, respectivament, valors notablement elevats. Cal comentar que per aquestes tres testimonis els valors màxims s'obtenen per al darrer angle d'inclinació considerat com a marca de classe, 82,5°, com evidencia la Figura 5.5, perquè se'n detecten més fibres amb aquesta inclinació a la realitat que no pas de forma teòrica.



**Figura 5.5 - Perfils d'orientació experimental, teòric i la seva diferència, per al testimoni A20F4Zi ( $\eta_\theta=0,31$ )**

Per al testimoni amb major coeficient d'orientació, l'A20F4Xi ( $\eta_\theta=0,76$ ), aquest màxim se situa en un 13,06%. Per als testimonis A20F1Xi i A20F4Ye, amb un coeficient d'orientació superior o igual a 0,60, les diferències màximes són també elevades, situant-se en un 13,47% i un 9,59%, respectivament. Per la seva part, el testimoni A20F6Ye, amb un coeficient d'orientació de valor 0,62, es desmarca d'aquesta tendència, doncs la diferència màxima només assoleix un 5,75%.

Per a la resta de testimonis, amb coeficients d'orientació situats entre 0,40 i 0,60, la diferència màxima no arriba a assolir mai el 10%, quedant-se al voltant d'un 5% de forma general.

Si s'estudia la diferència per provetes, s'observa que en les provetes F1 i F4 les diferències màxima i mitjana majors s'obtenen per a testimonis extrems de les parts interiors. Això es relaciona amb el fet que en són els testimonis que tenen uns coeficients d'orientació més extrems. En la proveta F6 no és compleix aquest fet, perquè el testimoni A20F6Zi és el que menor diferència absoluta té.

En vista d'aquests resultats es pot concloure que els valors predits s'ajusten prou bé amb la realitat i que les màximes diferències s'obtenen per coeficients d'orientació de valors extrems (inferiors a 0,40 i superiors a 0,60). Caldrà veure si aquestes diferències, però, tenen un efecte considerable en la resposta a tracció

### 5.5 UNIFORMITAT D'ORIENTACIÓ DE LES FIBRES

Per a estudiar la uniformitat d'orientació de cada testimoni es parteix dels coeficients d'orientació obtinguts en les tres direccions d'extracció ( $\eta_{\theta x}$ ,  $\eta_{\theta y}$  i  $\eta_{\theta z}$ ) així com de les gràfiques corresponents a les probabilitats acumulades segons els cosinus directors dels tres eixos de l'espai de les provetes (Figura 5.6).

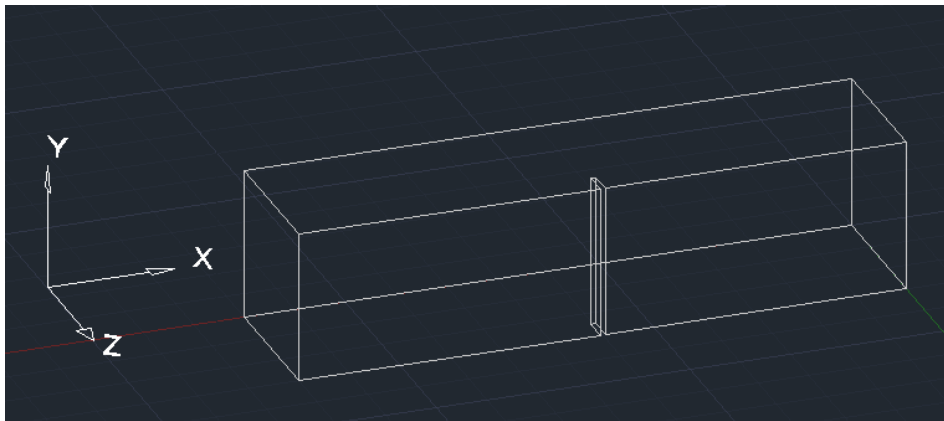


Figura 5.6 - Eixos de les provetes

Aquest tipus de gràfica permet determinar amb relativa facilitat si hi ha alguna orientació preferencial de les fibres. Analitzem la uniformitat dels testimonis classificant-los per provetes, per tal d'identificar relacions entre els diferents eixos.

5.5.1 Proveta F1

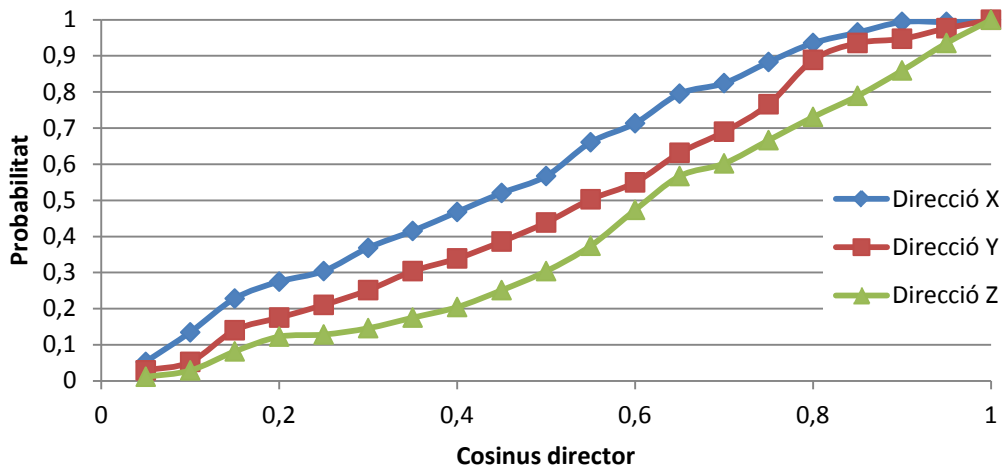


Figura 5.7 - Distribució de probabilitat acumulada dels cosinus directors del testimoni A20F1Xe

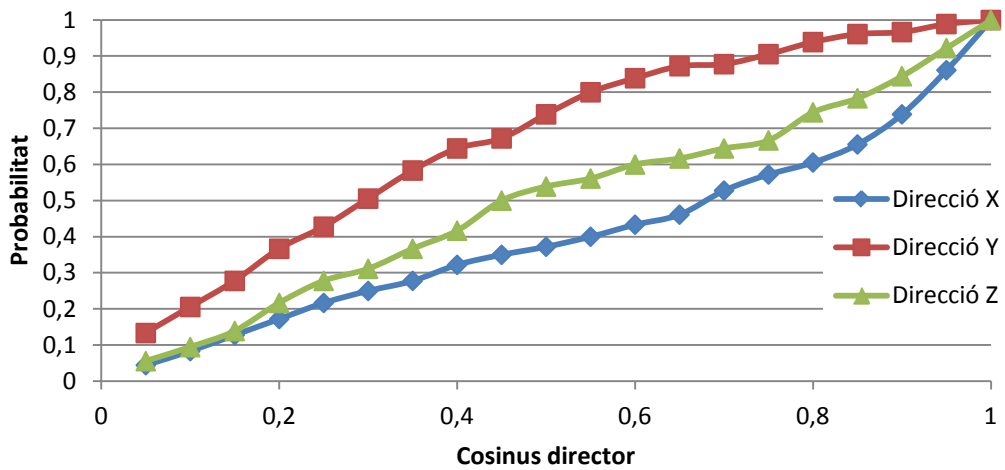


Figura 5.8 - Distribució de probabilitat acumulada dels cosinus directors del testimoni A20F1Xi

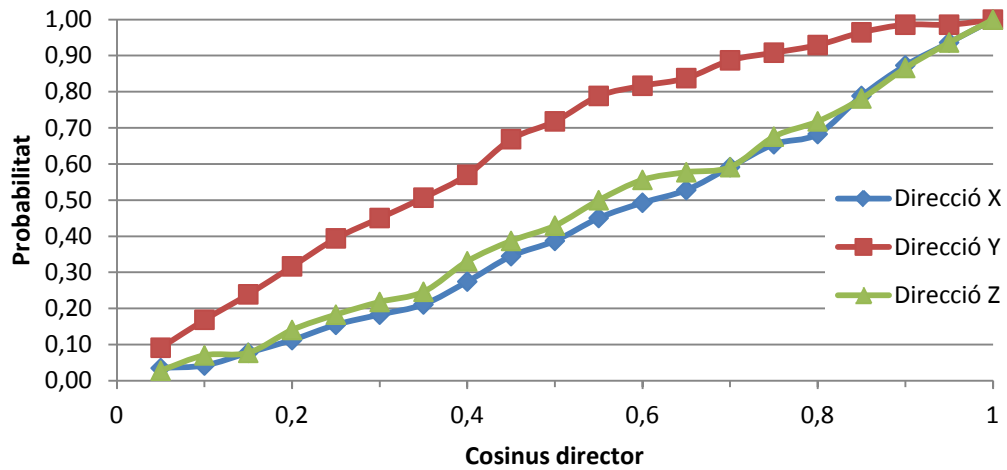


Figura 5.9 - Distribució de probabilitat acumulada dels cosinus directors del testimoni A20F1Yi

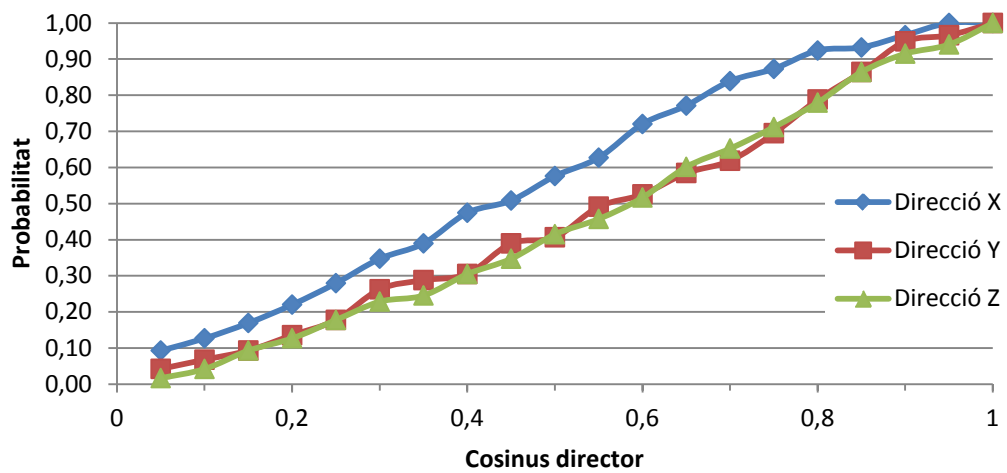


Figura 5.10 - Distribució de probabilitat acumulada dels cosinus directors del testimoni A20F1Ze

En aquesta proveta s'observa que al testimoni A20F1Xe (Figura 5.7) les fibres no tendeixen a orientar-se en cap direcció preferencial, tot i que la direcció Y i la direcció Z predominin sensiblement sobre la direcció longitudinal ( $\eta_{\theta Y}=0,51$  i  $\eta_{\theta Z}=0,60$  respecte  $\eta_{\theta X}=0,42$ , segons la Taula 5.2). El testimoni A20F1Xi mostra una lleugera tendència de les fibres a orientar-se en direcció X ( $\eta_{\theta X}=0,60$ ), i alhora s'observa una manca de fibres orientades en direcció Y ( $\eta_{\theta Y}=0,34$ ), doncs només un 20% de les fibres tenen un cosinus director de valor superior a 0,55. Per la seva banda, el testimoni A20F1Yi (Figura 5.9) mostra una distribució dels cosinus directors gairebé uniforme en les direccions X i Z, mentre que només un 20 % de les fibres tenen un cosinus director superior a 0,55 en la direcció Y, cosa que indica que poques fibres es troben orientades de forma paral·lela al mateix eix. Un coeficient d'orientació baix, amb un valor de  $\eta_{\theta Y}=0,36$  (Taula 5.2), corrobora la poca orientació de fibres respecte aquest eix. Pel

que fa al testimoni A20F1Ze (Figura 5.10), aquest mostra una distribució dels cosinus directores sensiblement uniforme en les direccions Y i Z, alhora que el valor del cosinus en direcció X supera el 0,65 per al 20% de les fibres. De nou, els coeficients d'orientació (Taula 5.2) corroboren aquesta uniformitat en Y i Z ( $\eta_{\theta Y}=0,54$  i  $\eta_{\theta Z}=0,55$ ) i la manca d'orientació en X ( $\eta_{\theta X}=0,43$ ). Aquesta relativament baixa orientació de les fibres en direcció X per als testimonis exteriors pot ser deguda a l'efecte que fa la paret del motlle sobre les fibres durant el formigonat, atès que el formigonat es realitza des del centre del motlle i quan la pasta arriba als extrems del mateix aquesta impacta amb la paret i modifica l'orientació de les fibres.

**Taula 5.2 - Coeficient d'orientació de les diferents direccions dels testimonis de la proveta F1**

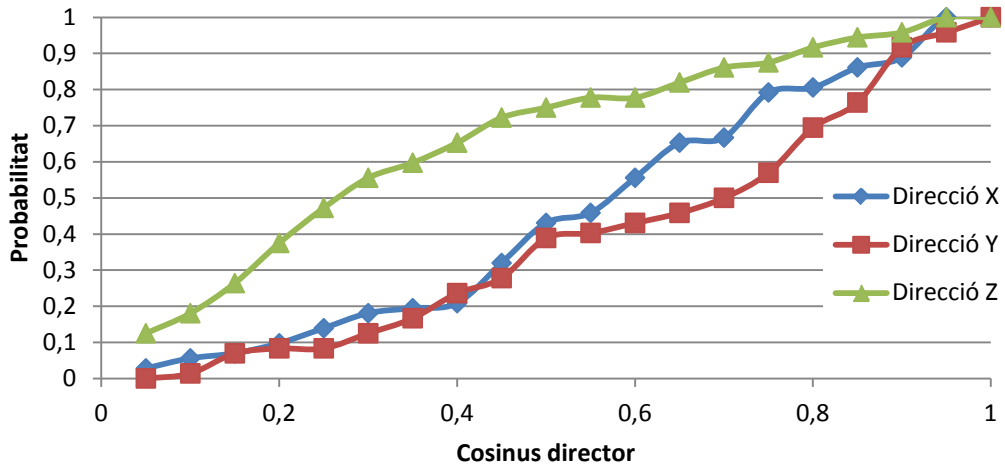
Testimoni	$\eta_{\theta X}$	$\eta_{\theta Y}$	$\eta_{\theta Z}$
<b>A20F1Xe</b>	0,42	0,51	0,60
<b>A20F1Xi</b>	0,60	0,34	0,51
<b>A20F1Yi</b>	0,58	0,36	0,56
<b>A20F1Ze</b>	0,43	0,54	0,55
<b>Mitjana proveta</b>	0,51	0,44	0,56
<b>Coefficient de variació proveta</b>	16,42%	20,51%	5,90%
<b>Mitjana testimonis interiors</b>	0,59	0,35	0,53
<b>C.V. testimonis interiors</b>	1,54%	3,33%	4,58%
<b>Mitjana testimonis exteriors</b>	0,43	0,53	0,58
<b>C.V. testimonis exterior</b>	1,65%	2,80%	4,27%

A la proveta F1 en general s'observa que en direcció Z existeix una alta uniformitat de distribució de les orientacions de les fibres, evidenciat per uns coeficients d'orientació molt propers i un baix coeficient de variació (5,90% a la proveta en general, 4,58% per als testimonis interiors i 4,27% per als testimonis exteriors). En les direccions X i Y els coeficients de variació per a la proveta en general són notablement més elevats (16,42% i 20,51%, respectivament), malgrat que els testimonis interiors i els exteriors, de forma separada, tinguin coeficients d'orientació mitjans i coeficients de variació molt baixos (1,54% i 1,65%, respectivament). Aquests fets impliquen, doncs, que les direccions X i Y tenen una elevada uniformitat entre testimonis interiors i exteriors, però no així de forma general.

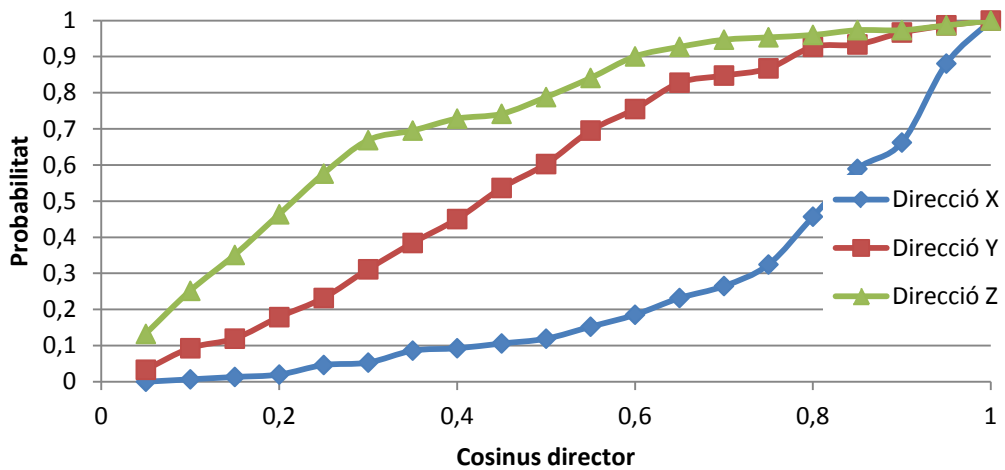
Es pot concloure, doncs, que les fibres de la proveta F1 de forma general no presenten cap orientació preferencial i que els cosinus directores estan uniformement distribuïts en direcció Z.

A més, els testimonis interiors entre si i els exteriors entre si mostren orientacions gairebé iguals, amb elevada uniformitat en totes les direccions.

**5.5.2 Proveta F4**



**Figura 5.11 - Distribució de probabilitat acumulada dels cosinus directors del testimoni A20F4Xe**



**Figura 5.12 - Distribució de probabilitat acumulada dels cosinus directors del testimoni A20F4Xi**

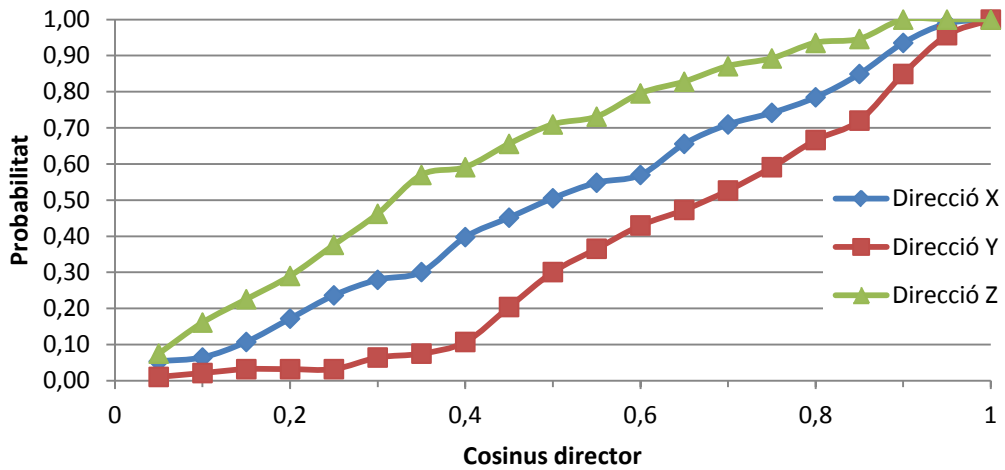


Figura 5.13 - Distribució de probabilitat acumulada dels cosinus directors del testimoni A20F4Ye

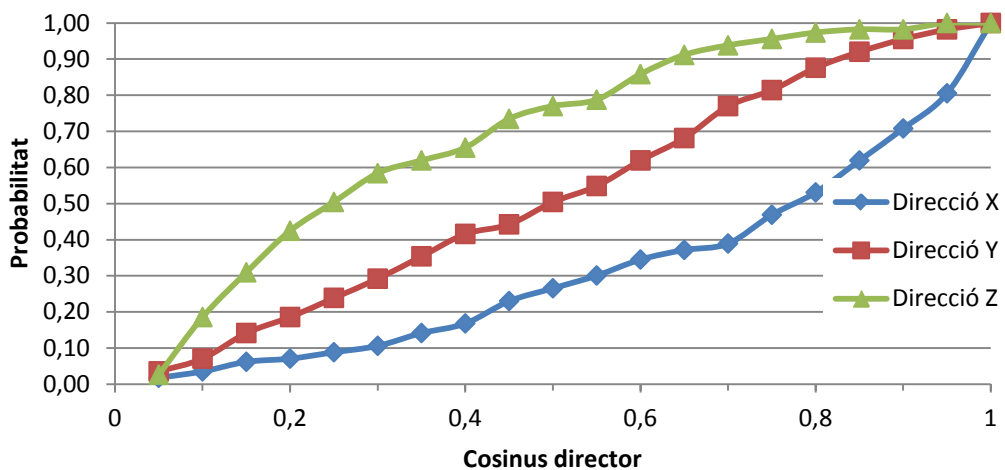


Figura 5.14 - Distribució de probabilitat acumulada dels cosinus directors del testimoni A20F4Zi

S'observa en els testimonis A20F4Xi (Figura 5.12) i A20F4Zi (Figura 5.14) que gairebé el 50% de les fibres presenten un cosinus director superior a 0,8 amb la direcció X (evidenciat per un alt coeficient d'orientació  $\eta_{\theta X}$ , de valor 0,76 i 0,69, respectivament, segons la Taula 5.3). S'observa, a més, que en aquests dos testimonis només un 10% de les fibres presenten un valor de cosinus director superior a 0,65 en la direcció Z, el que indica que les fibres es troben molt poc orientades cap a aquest eix ( $\eta_{\theta Z}=0,28$  i  $\eta_{\theta Z}=0,31$ , respectivament). En aquests dos testimonis la distribució del cosinus director en direcció Y és bastant uniforme, cosa que concorda amb el valor dels coeficients d'orientació ( $\eta_{\theta Y}=0,44$  i  $\eta_{\theta Y}=0,48$ , respectivament). Contràriament, per als testimonis A20F4Xe (Figura 5.11) i A20F4Ye (Figura 5.13) la distribució del cosinus director més uniforme és en direcció X ( $\eta_{\theta X}=0,56$  i  $\eta_{\theta X}=0,51$  respectivament), mentre que l'orientació preferencial de les fibres és en direcció Y ( $\eta_{\theta Y}=0,62$  i  $\eta_{\theta Y}=0,65$ ). Per aquests testimonis

s'observa, a més, que un 50% de les fibres presenten un cosinus director inferior a 0,3 en direcció Z, cosa que indica perpendicularitat de les fibres respecte aquest eix ( $\eta_{\theta z}=0,34$  i  $\eta_{\theta z}=0,36$ ). Els valors reduïts de l'orientació en X respecte els altres dos testimonis sembla ser degut a l'efecte de les parets de l'encofrat, que obliguen a les fibres a modificar la seva orientació, al tractar-se d'uns testimonis extrems de l'extrem de la proveta

**Taula 5.3 - Coeficient d'orientació de les diferents direccions dels testimonis de la proveta F4**

Testimoni	$\eta_{\theta x}$	$\eta_{\theta y}$	$\eta_{\theta z}$
<b>A20F4Xe</b>	0,56	0,62	0,34
<b>A20F4Xi</b>	0,76	0,44	0,28
<b>A20F4Ye</b>	0,51	0,65	0,36
<b>A20F4Zi</b>	0,69	0,48	0,31
<b>Mitjana proveta</b>	0,63	0,55	0,32
<b>Coefficient de variació proveta</b>	16,20%	16,43%	9,71%
<b>Mitjana testimonis interiors</b>	0,73	0,46	0,30
<b>C.V. testimonis interiors</b>	4,87%	5,23%	5,45%
<b>Mitjana testimonis exteriors</b>	0,53	0,63	0,35
<b>C.V. testimonis exterior</b>	4,75%	2,51%	3,24%

De forma global, les fibres de la proveta F4 tenen una tendència clara a orientar-se preferentment en direcció longitudinal X, amb un coeficient d'orientació mitjà notablement elevat en aquesta direcció ( $\eta_{\theta x}=0,63$ ). També s'observa una lleu tendència de les fibres a orientar-se en direcció Y (mitjana del coeficient d'orientació de valor  $\eta_{\theta y}=0,55$ ) i a més es detecten poques fibres orientades segon la direcció Z ( $\eta_{\theta z}=0,32$ ). Els testimonis extrems de la part interior de la proveta, A20F4Xi i A20F4Zi, els quals evidentment es troben col·locats de forma contigua, tenen una elevada uniformitat d'orientació, atès que els coeficients d'orientació de cada direcció són pràcticament iguals entre si i els coeficients de variació són baixos (4,87%, 5,23% i 5,45% per a les direccions X, Y i Z, respectivament). Passa el mateix per als testimonis extrems de les parts exteriors, doncs els coeficients d'orientació són també molt semblants entre si per direccions i els coeficients de variació són encara més baixos (4,75%, 2,51% i 3,24% per a les direccions X, Y i Z, respectivament). La diferència dels valors entre els testimonis interiors i exteriors redueix la uniformitat d'orientació global de la proveta, però aquesta uniformitat global es pot considerar significativa en vista dels coeficients de variació. No obstant, la direcció Z és, de nou, la direcció més uniforme al llarg de tota la proveta.



5.5.3 Proveta F6

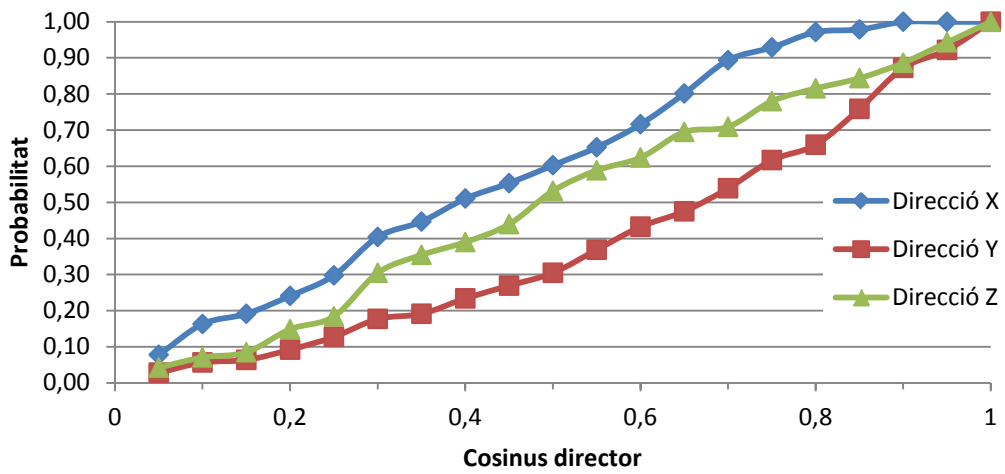


Figura 5.15 - Distribució de probabilitat acumulada dels cosinus directors del testimoni A20F6Ye

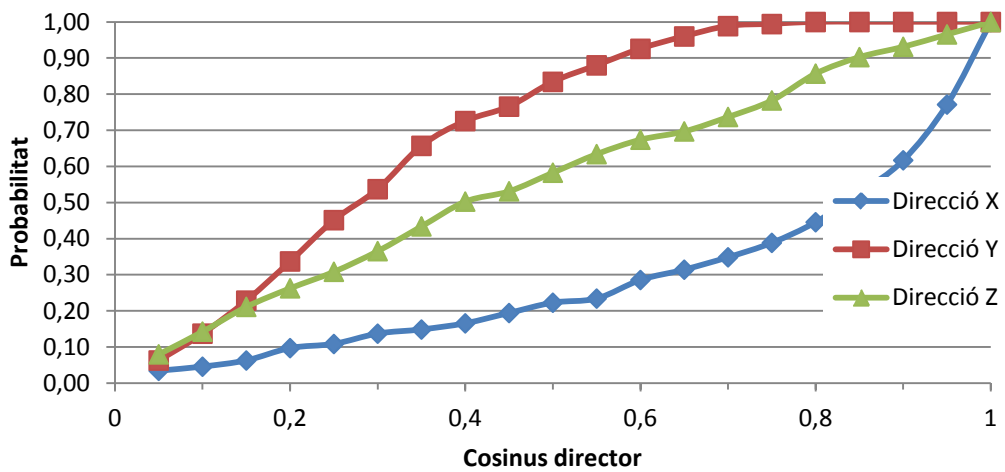


Figura 5.16 - Distribució de probabilitat acumulada dels cosinus directors del testimoni A20F6Yi

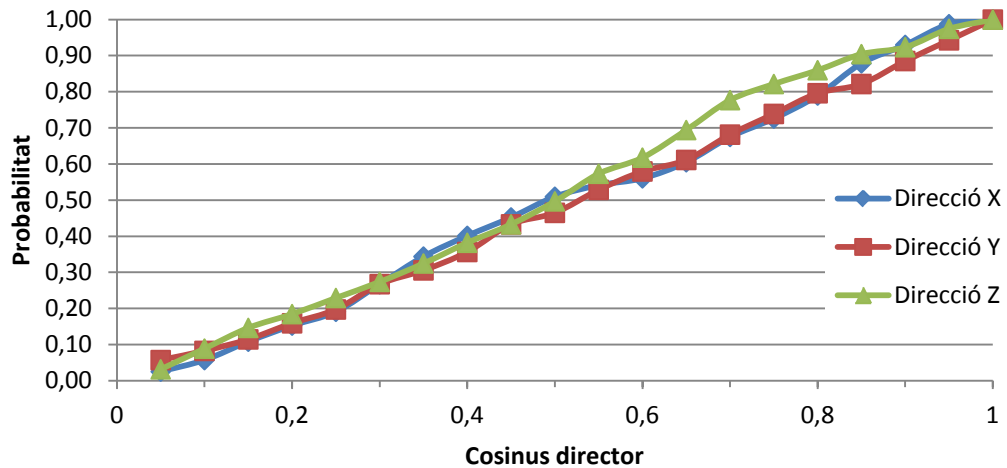


Figura 5.17 - Distribució de probabilitat acumulada dels cosinus directors del testimoni A20F6Ze

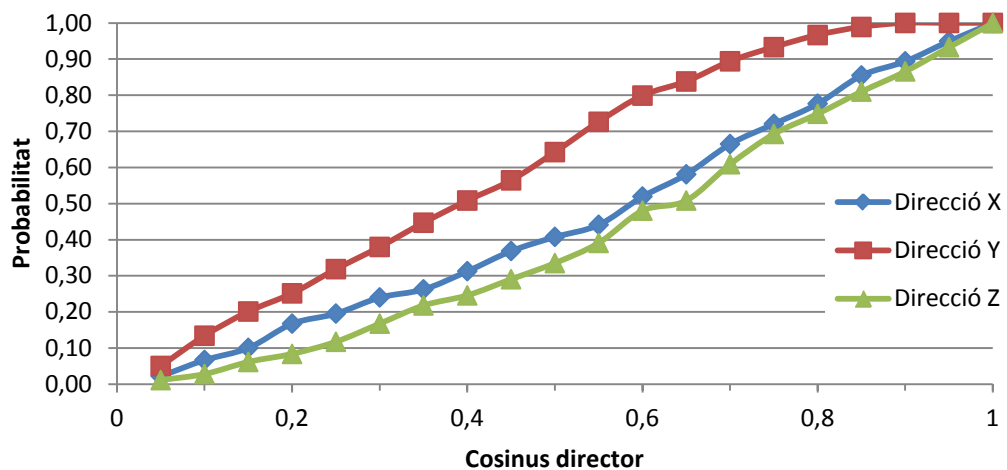


Figura 5.18 - Distribució de probabilitat acumulada dels cosinus directors del testimoni A20F6Zi

En el testimoni A20F6Ye (Figura 5.15) tan sols un 10% de les fibres presenta un cosinus director de valor superior a 0,7 en direcció X (evidenciat per un reduït coeficient d'orientació,  $\eta_{\theta X}=0,40$ , Taula 5.4), alhora que mostra preferència d'orientació en direcció Y, atès que un 50% de les fibres presenten un cosinus director de valor superior a 0,7 i el coeficient d'orientació és relativament elevat ( $\eta_{\theta Y}=0,60$ , Taula 5.4). Pel que fa al testimoni A20F6Yi (Figura 5.16) s'observa una clara i forta tendència de les fibres a orientar-se en direcció X, doncs un 50% de les fibres presenten un cosinus director superior a 0,85 en aquesta direcció i el coeficient d'orientació és notablement elevat ( $\eta_{\theta X}=0,72$ ). En el mateix testimoni es pot veure que només un 10% de les fibres té un cosinus director superior a 0,55 en direcció Y, el que indica que les fibres estan col·locades molt perpendicularment a l'eix esmentat ( $\eta_{\theta Y}=0,30$ ). Per la seva banda, el testimoni A20F6Ze (Figura 5.17) no presenta cap preferència d'orientació, estant les fibres

orientades uniformement en totes les direccions (coeficients d'orientació propers entre si i amb valors al voltant de 0,50). Per últim, el testimoni A20F6Zi (Figura 5.18) presenta una distribució sensiblement uniforme dels cosinus directors en les direccions X i Z ( $\eta_{\theta x}=0,55$  i  $\eta_{\theta z}=0,59$ ), alhora que només un 10% de les fibres es troben orientades amb un cosinus director superior a 0,7 en direcció Y, el que implica que estan col·locades de forma més aviat perpendicular a aquest eix (evidenciat pel valor reduït del coeficient d'orientació,  $\eta_{\theta y}=0,39$ ).

**Taula 5.4 - Coeficient d'orientació de les diferents direccions dels testimonis de la proveta F6**

<b>Testimoni</b>	<b><math>\eta_{\theta x}</math></b>	<b><math>\eta_{\theta y}</math></b>	<b><math>\eta_{\theta z}</math></b>
<b>A20F6Ye</b>	0,40	0,62	0,50
<b>A20F6Yi</b>	0,72	0,30	0,44
<b>A20F6Ze</b>	0,52	0,52	0,49
<b>A20F6Zi</b>	0,55	0,39	0,59
<b>Mitjana proveta</b>	0,55	0,46	0,51
<b>Coeficient de variació proveta</b>	20,61%	26,36%	10,81%
<b>Mitjana testimonis interiors</b>	0,63	0,35	0,52
<b>C.V. testimonis interiors</b>	13,50%	13,70%	14,50%
<b>Mitjana testimonis exteriors</b>	0,46	0,57	0,50
<b>C.V. testimonis exterior</b>	12,13%	8,04%	1,65%

Pel que fa als coeficients de variació dels testimonis interiors i exteriors s'observa que presenten valors relativament elevats en totes les direccions, amb l'excepció de la direcció Z per als testimonis exteriors, on el valor és de tan sols l'1,65%.

Es pot concloure, doncs, que aquesta proveta no presenta preferència de distribució dels cosinus directors de les fibres en cap dels eixos, de forma general, però sí que s'observa una certa uniformitat en la direcció Z per a tots quatre testimonis. En relació amb això, el coeficient de variació dels coeficients d'orientació en direcció Z és notablement més reduït que el corresponent a les altres direccions, on aquests valors són relativament més elevats, cosa que denota falta d'uniformitat en la orientació de les fibres.

## 5.6 CONCLUSIONS

En vista de l'anàlisi anterior es pot concloure que les provetes no presenten de forma general preferència d'orientació en cap de les direccions de l'espai, cosa que s'associa al fet d'haver utilitzat un formigó autocompactable: en els casos en què la compactació s'ha de fer manualment, l'excés de vibració condueix a una preferent orientació de les fibres (Gettu et al. 2005). Malgrat tot, la proveta F4 mostra una tendència clara d'orientació de les fibres en direcció X, possiblement degut a la influència del flux del formigó durant el seu abocat.

S'observa, també, que l'eix Z de cada proveta presenta força uniformitat de distribució, donat que els coeficients de variació dels coeficients d'orientació en aquesta direcció són els més baixos.

Per a les provetes F1 i F4, els coeficients d'orientació dels testimonis interiors entre si acostumen a tenir uns valors molt propers, cosa que denota una elevada uniformitat d'orientació de les fibres en les parts interiors. Alhora, això també passa per a les parts exteriors, on els coeficients d'orientació de les provetes entre sí són molt semblants. Aquest fet remarca una certa simetria del comportament del formigó durant el formigonat, doncs aquest va ser abocat des de la part interior dels encofrats. Malgrat tot, en la proveta F6 s'observen més diferències en aquest aspecte, doncs els coeficients d'orientació són més dispars entre si.

Així mateix, s'observa que, si comparem de forma relativa per a cada proveta les direccions dels testimonis que han estat extrets de l'exterior amb els testimonis interiors, els primers són els que presenten un coeficient d'orientació en direcció X menor i major en direcció Y. Per a les provetes F4 i F6, a més, d'entre els coeficients d'orientació corresponents a les tres direccions de l'espai de cada testimoni exterior s'observa que el major d'ells és el que fa referència a la direcció Y. A la proveta F1 no és així perquè la direcció Z té uns coeficients d'orientació més elevats de forma general. Tot això sembla confirmar que les parets de l'encofrat influeixen directament en la orientació de les fibres, atès que l'extrem del motlle obliga a girar les fibres orientades longitudinalment cap a la direcció Y, degut de ben segur al reflux que es produeix durant el formigonat.

S'observa també que en la majoria dels testimonis interiors dels tres coeficients d'orientació disponibles el major sempre es correspon amb la direcció X, amb l'excepció del testimoni A20F6Zi on el coeficient d'orientació major és en direcció Z ( $\eta_{\theta Z}=0,59$ ), tot i que molt proper al valor en direcció X ( $\eta_{\theta X}=0,55$ ).

## CAPÍTOL 6

# DETERMINACIÓ ANALÍTICA DEL COMPORTAMENT A TRACCIÓ DIRECTA

### 6.1 INTRODUCCIÓ

Una vegada ja es tenen convenientment caracteritzats tots els testimonis es pot procedir a determinar analíticament la resistència a tracció directa. El procediment seguit no es val, doncs, de resultats experimentals obtinguts de la realització d'assajos sobre els mateixos testimonis, sinó que la resistència s'obté aplicant el model de predicció analítica per superposició del comportament de les fibres individuals establert per Laranjeira (2010). Al Capítol 2 de la present tesina es fa un breu resum de la metodologia seguida per tal d'obtenir les equacions necessàries que caracteritzen el comportament a tracció de provetes de FRFA.

En aquest capítol, doncs, es calcula la resposta a tracció dels diferents testimonis utilitzant els perfils d'orientació obtinguts anteriorment, i alhora fent ús de la contribució del conjunt de fibres disponibles a la secció característica de fissura. Malgrat no totes les fibres embegudes dins els testimonis siguin completes, i per tant no es preveu que totes elles desenvolupin la totalitat de la seva capacitat resistent que els proporciona els dos ganxos, es considera que les fibres corresponents a la secció característica de fissura sí que contribueixen de forma completa a la resposta a tracció. El capítol conté també una comparació dels resultats obtinguts mitjançant els perfils d'orientació teòrics i experimentals, per determinar si la proposta de Laranjeira (2010) s'ajusta en prou mesura a la realitat.

## 6.2 CONTRIBUCIÓ DE LES FIBRES AÏLLADES A LA RESISTÈNCIA A TRACCIÓ

Per tal de determinar la contribució de les fibres, segons l'interval al qual pertanyin en funció del seu angle d'inclinació, a la resposta *càrrega - ample de fissura* total, cal saber dos paràmetres fonamentals: el nombre de fibres per secció que es troben inclinades segons l'interval considerat ( $N_{\theta_i}$ ) i la respectiva resposta sota assaig d'arrencament d'una fibra aïllada ( $P_{\theta_i}(w)$ ).

Cal comentar que, a diferència del que passava amb la distribució de l'orientació de les fibres a l'espai, en l'anàlisi de la resistència a tracció no cal saber la posició exacta dels testimonis. Això és així perquè les dades que es precisen per a determinar la resposta a tracció es corresponen amb els eixos longitudinals dels testimonis. En aquesta situació, tant el coeficient d'orientació de l'eix longitudinal com el nombre de fibres de la secció característica en cada testimoni resta invariant es facin les hipòtesis que es facin. Per tant, prescindint de si les hipòtesis de posició i tomografiat realitzades en aquell apartat són correctes o no, es pot estudiar la contribució de les fibres amb la certesa que els valors obtinguts seran correctes.

A més, es considera que totes les fibres de la secció característica de fissura desenvolupen de forma completa la seva capacitat resistent, malgrat es pugui entendre que algunes fibres de la secció siguin incompletes. Aquesta hipòtesi va en consonància amb el fet d'haver obtingut el valor dels coeficients d'orientació utilitzant la totalitat de les fibres, donat que dona una millor aproximació del perfil d'orientació real al llarg dels testimonis.

### 6.2.1 Nombre de fibres a la secció característica de fissura

Per obtenir el valor de  $N_{\theta_i}$  es precisa de la distribució d'orientació de les fibres ( $P(\theta_i)$ ), cosa que ja s'ha determinat al Capítol 5, i del nombre de fibres ( $N_f$ ) existents en una secció de fissura característica, la qual assumim que coincideix amb una secció transversal del testimoni. El nombre de fibres en una secció transversal d'un testimoni es pot aproximar mitjançant la fórmula proposada per Dupont i Vandewalle (2005).

$$N_f = \frac{A_{sec}}{A_f} \times V_f \times \eta_{\theta}$$

essent  $A_{sec}$  l'àrea corresponent a un tall transversal d'un testimoni de FRFA,  $A_f$  l'àrea d'un tall transversal d'una fibra i  $V_f$  el volum de fibres

No obstant, com que es tenen els valors exactes del nombre de fibres en cada secció per a cada testimoni, s'ha considerat oportú realitzar un recompte manual per a un nombre reduït de testimonis diferents (un de cada proveta), de manera que es pugui determinar la conveniència d'aplicar o no l'anterior fórmula. Així doncs, s'ha comptat per a cada testimoni considerat el nombre de fibres de cada secció, tomografia a tomografia. Per comprovar si realment la fórmula és aplicable o no, amb aquests recomptes s'han calculat dues mitjanes: una amb la totalitat de fibres per secció del testimoni sencer i una altra corresponent únicament a les 20 tomografies centrals. S'entén que la secció de fissura característica es troba situada a la zona central del testimoni, doncs és on es localitza l'entalla. Assumim, doncs, que en una regió de 10 mm per sobre i 10 mm per sota l'entalla és on es podria situar aquesta fissura. Si els valors de les mitjanes són propers als obtinguts per la fórmula aproximada, s'utilitzarà aquesta darrera per al càlcul de fibres en la secció fissurada per a la resta de testimonis. A la Taula 6.1 es poden observar els valors obtinguts per als tres testimonis analitzats.

**Taula 6.1 - Valors del nombre de fibres de la secció de fissura**

Testimoni	Valor aproximat	Mitjana testimoni complet	Diferència respecte el valor aproximat	Mitjana secció central	Diferència respecte el valor aproximat
<b>A20F1Ze</b>	30	32	6,67 %	38	26,67 %
<b>A20F4Ye</b>	35	27	-22,86 %	30	-14,29 %
<b>A20F6Yi</b>	15	24	60,00 %	30	100,00 %

De la taula anterior es desprèn que els valors reals, tant per al cas del testimoni complet com per al cas de la secció central, difereixen notablement del valor aproximat. Malgrat aquesta diferència en valor absolut no sigui molt elevada, sí que ho és de forma relativa. A més, els valors que més s'allunyen, de forma general, es corresponen amb els obtinguts amb la mitjana de la secció central, essent en algun cas el doble del predit. Per tant, el nombre de fibres en la secció de fissura no es calcularà mitjançant la fórmula aproximada. Donat que el valor obtingut a la secció central difereix tant del valor aproximat per la fórmula, que no obstant ha estat calibrada per nombrosos estudis independents (Dupont i Vandewalle 2005; Krenchel 1975), s'estima adient utilitzar els valors de la mitjana del recompte manual per al testimoni complet, doncs proporciona uns valors reals més propers als obtinguts per l'aproximació de la fórmula. A la taula següent es presenten els valors obtinguts per a tots els testimonis.

Taula 6.2 - Valors de la mitjana de fibres per secció per a cada testimoni

Testimoni	Mitjana del testimoni complet
A20F1Xe	19
A20F1Xi	36
A20F1Yi	22
A20F1Ze	32
A20F4Xe	15
A20F4Xi	35
A20F4Ye	27
A20F4Zi	14
A20F6Ye	36
A20F6Yi	24
A20F6Ze	29
A20f6Zi	42

Un cop es té determinat el nombre de fibres de la secció de fissura només cal aplicar la distribució d'orientació de les fibres per tal d'obtenir el nombre de fibres existents en cada interval d'angle considerat (es poden trobar els valors corresponents a cada testimoni a l'Annex D). Els valors de la Taula 6.2 s'aplicaran tant pel perfil experimental com pel perfil teòric.

### 6.2.2 Resposta a assaig d'arrencament de fibres aïllades

L'altre paràmetre important per determinar la contribució de les fibres de la secció fissurada és el seu comportament front arrencament de forma aïllada, segons la inclinació que tinguin. Tal i com s'enuncia al Capítol 2 existeixen unes equacions que modelitzen els punts clau de la gràfica d'assaig d'arrencament de fibres (Figura 6.1).



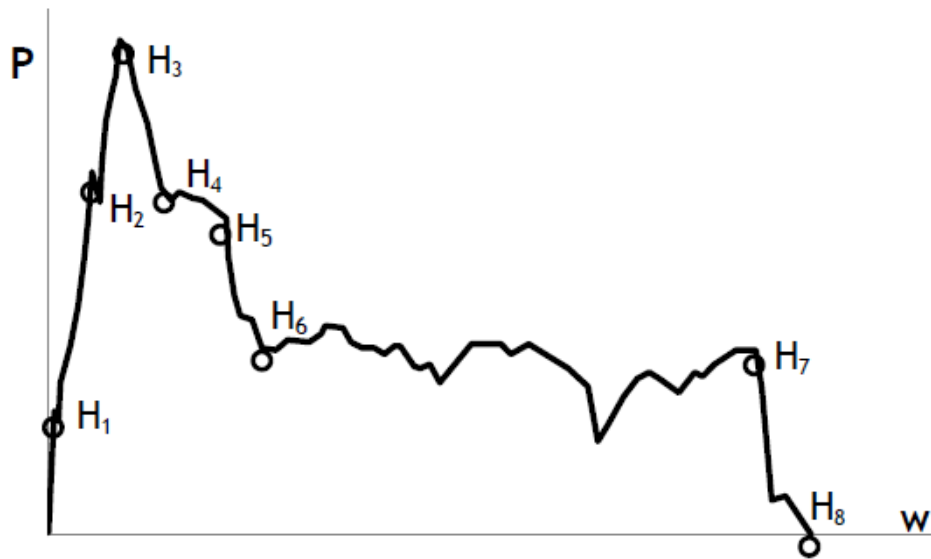


Figura 6.1 - Identificació dels punts clau sobre una resposta experimental d'arrencament de fibres (Laranjeira et al. 2010, 40: 1471-1487)

A la Figura 6.2 es pot veure una gràfica que mostra la relació càrrega d'arrencament - obertura de fissura, segons la marca central de l'interval de l'angle d'inclinació de les fibres considerat. Els valors han estat obtinguts de l'aplicació de les expressions per als diferents punts clau.

A l'Annex D es mostra un resum de les diferents expressions que caracteritzen aquest model d'arrencament, en funció de l'angle  $\theta$  considerat i d'altres paràmetres. Cal comentar que els valors corresponents als assajos d'arrencament de fibres alineades amb la càrrega, necessaris per a determinar la resposta per a fibres inclinades, van ser extrets de Blázquez (2009)

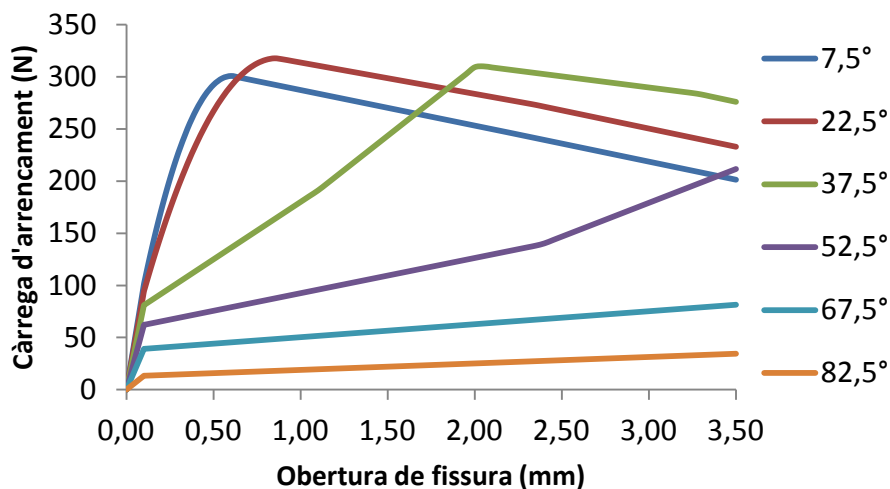


Figura 6.2 - Relació càrrega d'arrencament - obertura de fissura segons la inclinació considerada

Queda palès que els angles d'inclinació més paral·lels a la direcció d'arrencament assoleixen càrregues superiors (7,5°, 22,5° i 37,5°), essent el valor 22,5° el que n'assoleix la màxima, corroborant així els resultats obtinguts per Robins et al. (2002). Aquelles fibres que es troben molt inclinades respecte la direcció d'arrencament oposaran menys resistència, com es desprèn de la gràfica corresponent als angles 67,5° i 82,5°.

### 6.3 CONTRIBUTIÓ DE LES FIBRES CONJUNTES A LA RESISTÈNCIA A TRACCIÓ

Per tal de determinar la contribució conjunta de les fibres només cal realitzar, per a cada angle d'inclinació considerat, el producte del nombre de fibres per la càrrega d'arrencament corresponent. D'aquesta manera, s'obtenen unes gràfiques de càrrega d'arrencament - obertura de fissura ponderades segons el nombre de fibres en cada inclinació. Un exemple del que s'obté és el que mostra la figura següent, valent-se de les dades de la Taula 6.3, les quals es corresponen amb els valors de la distribució de fibres experimentals obtinguts.

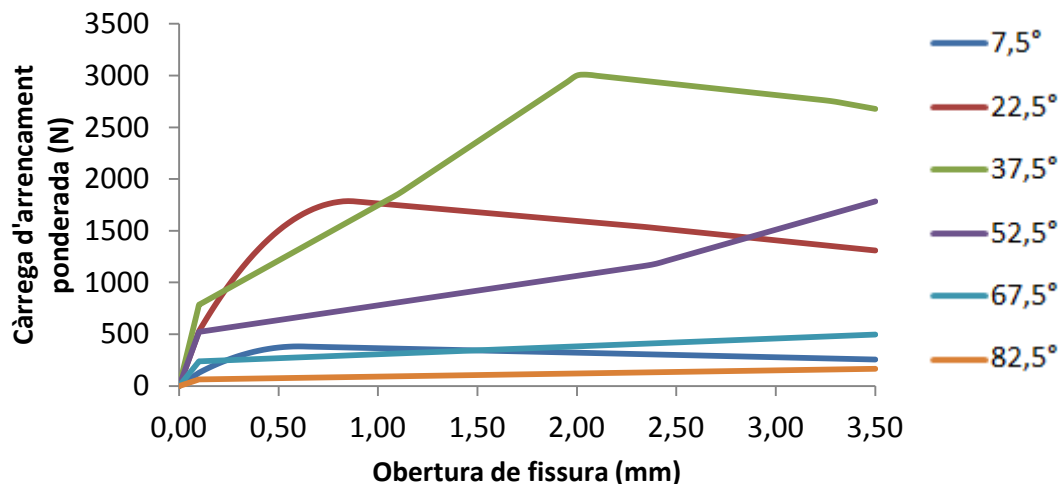


Figura 6.3 - Relació càrrega d'arrencament - obertura de fissura ponderada segons el nombre de fibres i en funció de la seva inclinació, per al testimoni A20F6Ye

Taula 6.3 - Distribució de fibres en funció de l'angle d'inclinació a la secció de fissuració, per al testimoni A20F6Ye

$\theta_i$	7,5°	22,5°	37,5°	52,5°	67,5°	82,5°
$N_f$	36					
$P(\theta_i)$	3,5%	15,6%	27,0%	23,4%	17,0%	13,5%
$N_{\theta_i}$	1,28	5,62	9,70	8,43	6,13	4,85

Realitzem aquest procediment per a tots els testimonis, utilitzant tant les dades de distribució de fibres experimentals (obtingudes al Capítol 3) com les dades provinents de les prediccions de Laranjeira et al. (2011), determinades al Capítol 5. Els valors corresponents als diferents testimonis per a  $N_{\theta_i}$  es troben a l'Annex D.

#### 6.4 MODEL DE COMPORTAMENT A TRACCIÓ DIRECTA

Per obtenir la resposta analítica a tracció directa de cada testimoni només resta aplicar les equacions del model constitutiu plantejades al Capítol 2, on s'incorpora a la contribució de les fibres d'acer la resistència del formigó segons les seves característiques mecàniques. Aquesta darrera contribució és fixa per a tots els testimonis, doncs tots ells comparteixen la mateixa dosificació de formigó.

A la Figura 6.4 es mostra un exemple gràfic del comportament a tracció d'un testimoni, prenent les dades reals extretes de l'anàlisi de les tomografies.

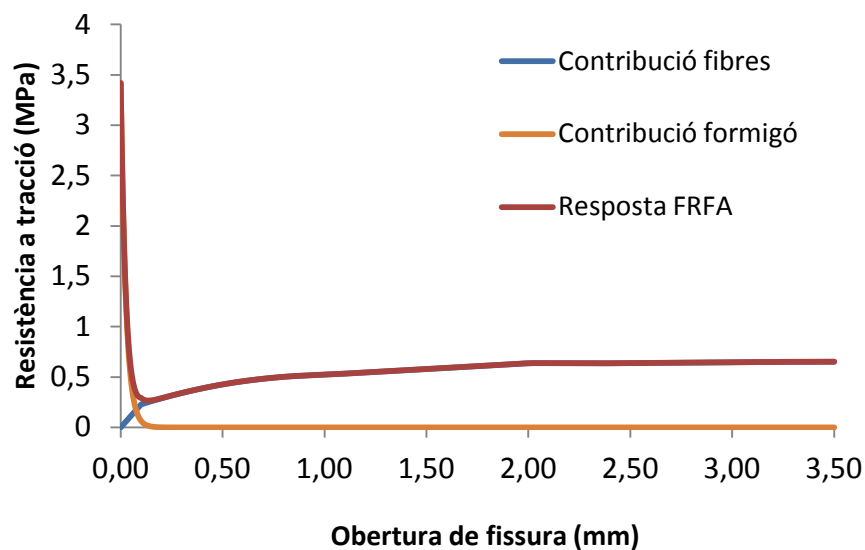


Figura 6.4 - Resposta a tracció del testimoni A20F4Ye

#### 6.5 COMPARACIÓ DE LES RESPOSTES A TRACCIÓ EXPERIMENTALS I TEÒRIQUES

Un cop es té el comportament de tots els testimonis es pot realitzar una comparació entre les diferents respostes, de manera que es pot determinar si el model analític proposat per Laranjeira (2010) s'ajusta a la realitat dels testimonis.

A continuació es mostra la resposta global dels testimonis de FRFA sotmesos a tracció directa utilitzant per a cada testimoni el mètode teòric i l'experimental. A les gràfiques s'hi inclou també la diferència entre ambdós mètodes, en forma de percentatge, donat que les dues metodologies donen valors molt propers i sovint es fa difícil percebre'n la diferència en valors absoluts.

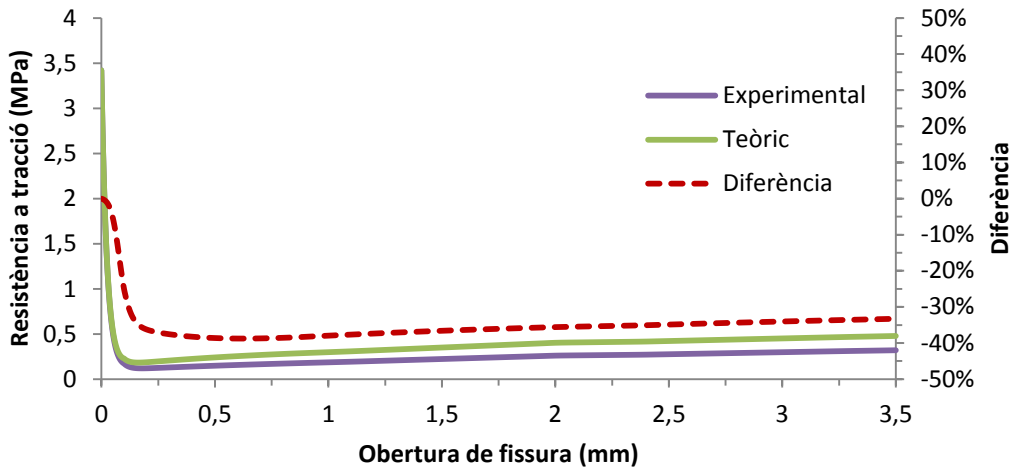


Figura 6.5 - Resposta a tracció experimental i teòrica del testimoni A20F1Xe

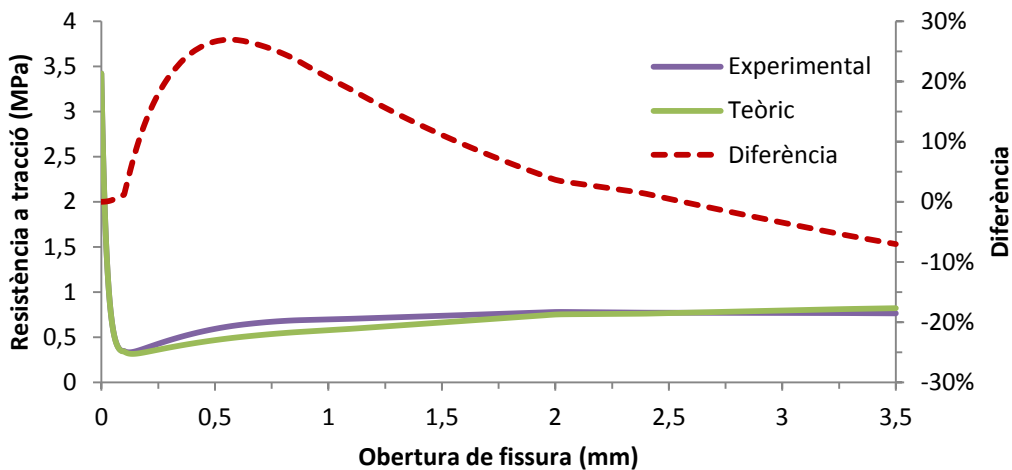


Figura 6.6 - Resposta a tracció experimental i teòrica del testimoni A20F1Xi

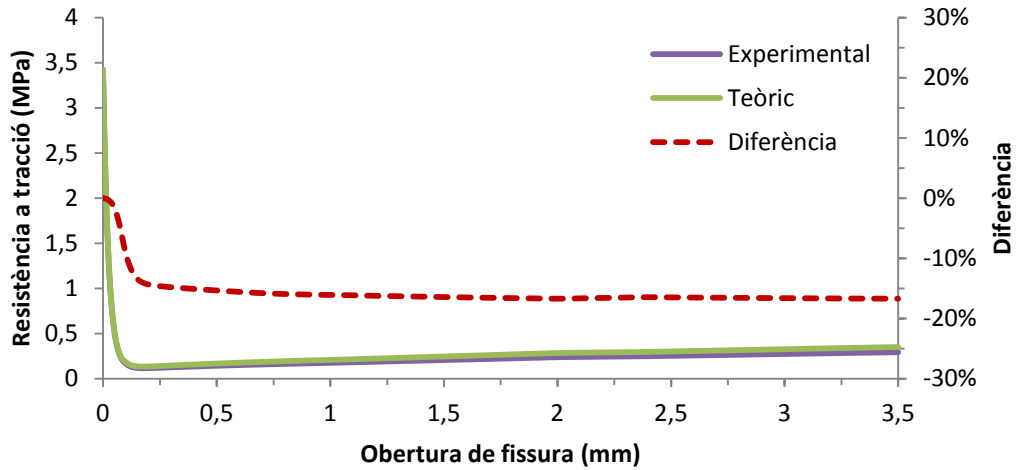


Figura 6.7 - Resposta a tracció experimental i teòrica del testimoni A20F1Yi

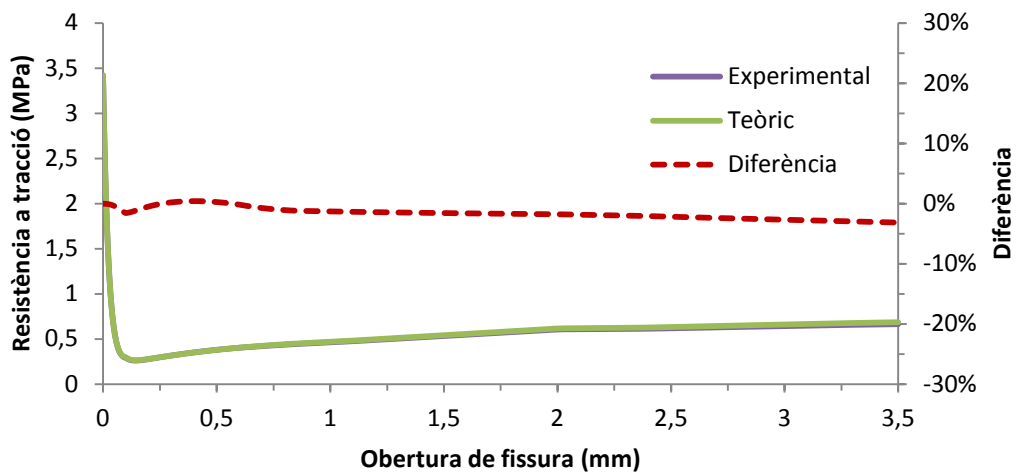


Figura 6.8 - Resposta a tracció experimental i teòrica del testimoni A20F1Ze

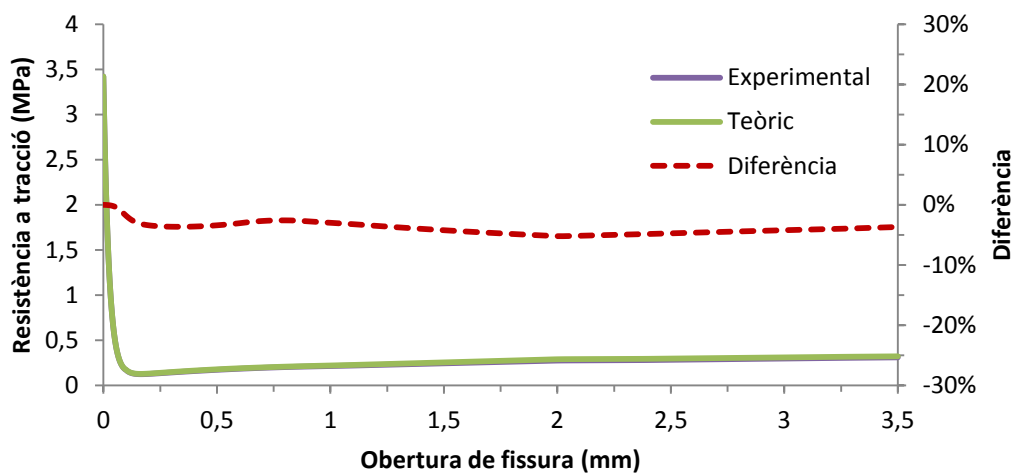


Figura 6.9 - Resposta a tracció experimental i teòrica del testimoni A20F4Xe

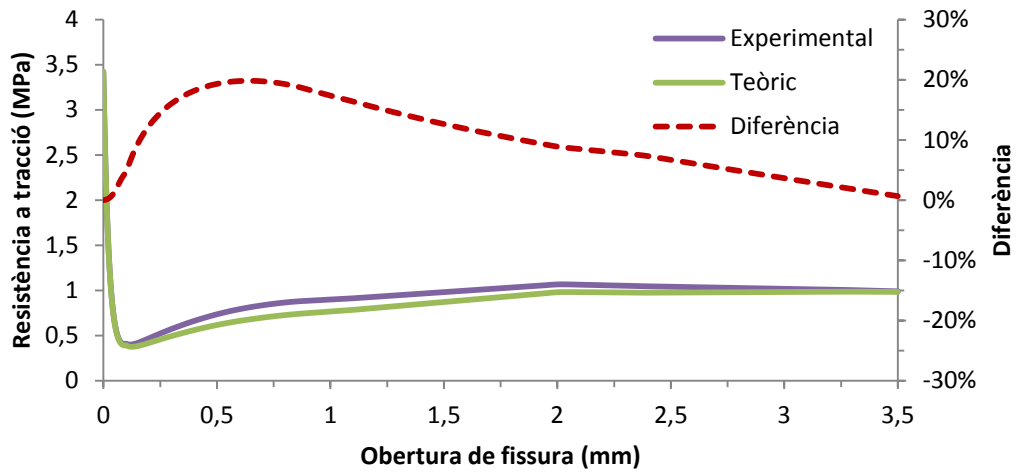


Figura 6.10 - Resposta a tracció experimental i teòrica del testimoni A20F4Xi

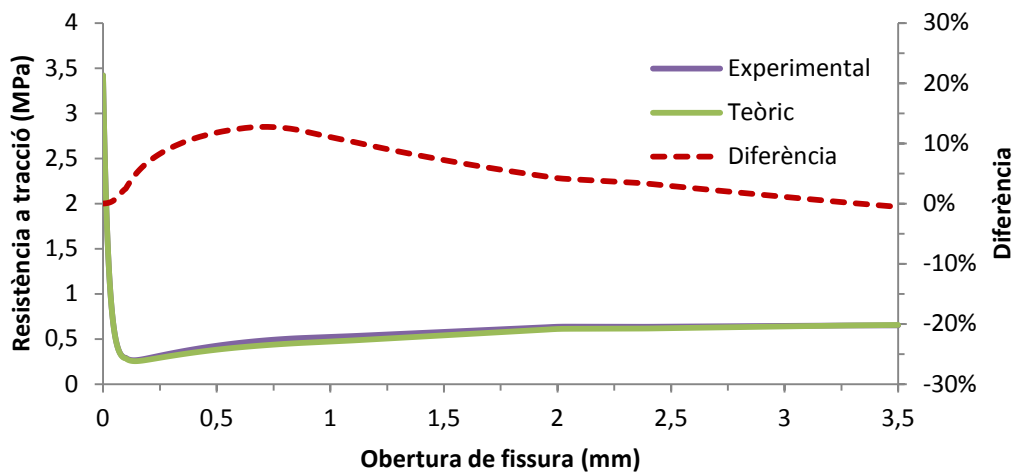


Figura 6.11 - Resposta a tracció experimental i teòrica del testimoni A20F4Ye

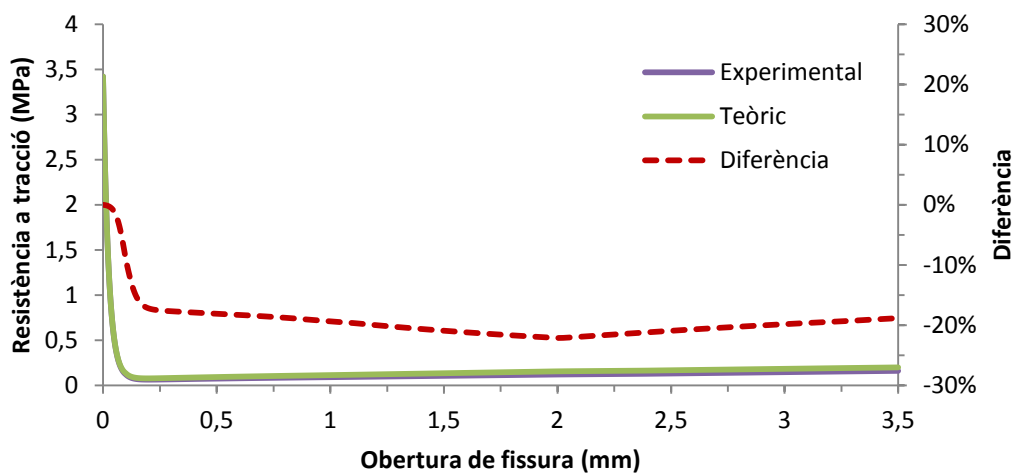


Figura 6.12 - Resposta a tracció experimental i teòrica del testimoni A20F4Zi

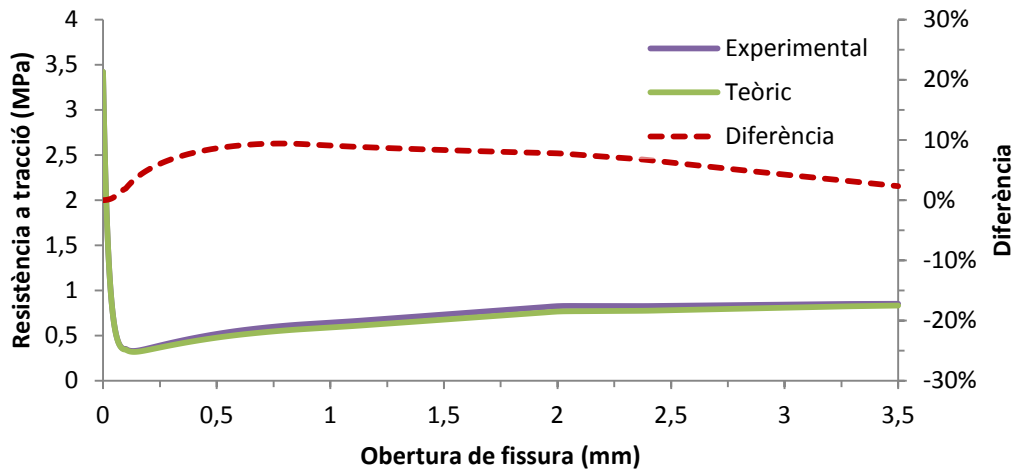


Figura 6.13 - Resposta a tracció experimental i teòrica del testimoni A20F6Ye

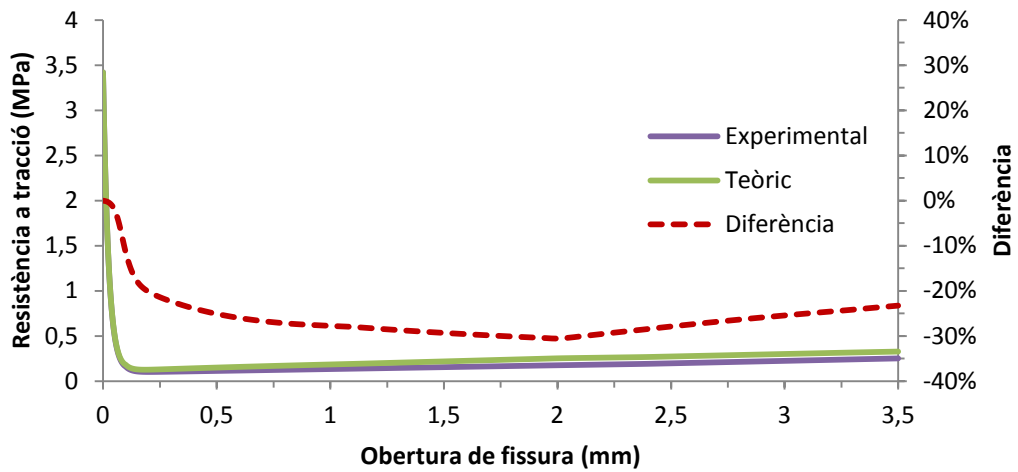


Figura 6.14 - Resposta a tracció experimental i teòrica del testimoni A20F6Yi

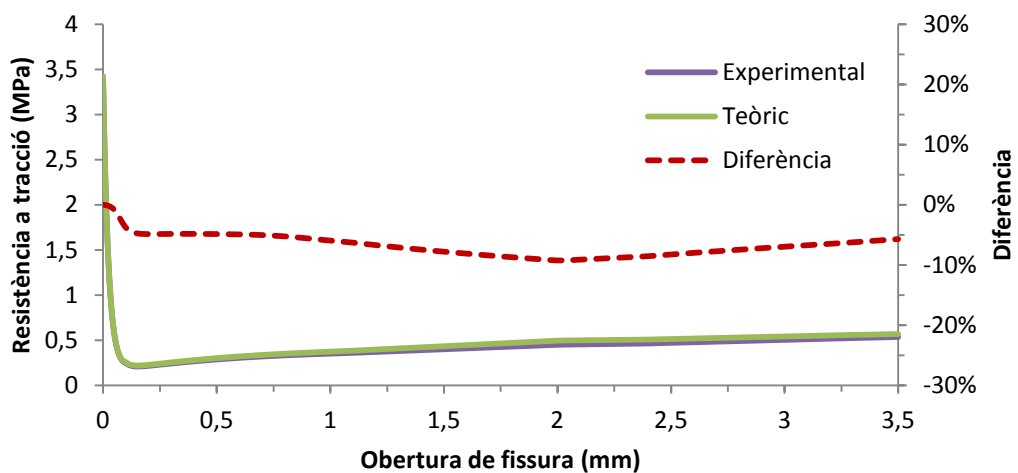
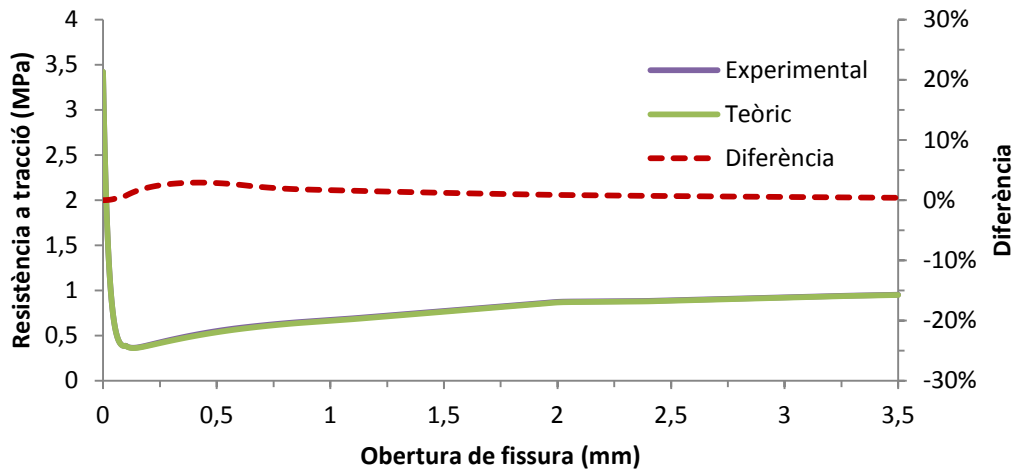


Figura 6.15 - Resposta a tracció experimental i teòrica del testimoni A20F6Ze



**Figura 6.16 - Resposta a tracció experimental i teòrica del testimoni A20F6Zi**

A les gràfiques anteriors es pot observar que la diferència màxima entre els dos mètodes no excedeix en la majoria dels casos el 31%, i a més aquesta sempre es produeix en moments puntuals i sense mantenir-se el percentatge màxim de forma permanent. Aquests valors es consideren poc destacables per a assajos a tracció directa i d'altres assajos mecànics, atesa la heterogeneïtat del material que conforma les provetes i la dificultat de reproduir amb exactitud el resultat d'un experiment. A més, s'ha de tenir present que en cada formigonat s'introdueixen diferents factors que modifiquen sensiblement les propietats tant geomètriques com mecàniques de les provetes, pel que es considera que l'aproximació és bona.

De forma general la diferència s'estabilitza en valors situats a l'interval  $[0\%, \pm 20\%]$ , com passa en els testimonis A20F1Yi, A20F1Ze, A20F4Xe, A20F4Zi, A20F6Ye, A20F6Ze i A20F6Zi. Per la seva banda, en els testimonis A20F1Xi, A20F4Xi i A20F4Ye la diferència assoleix un màxim al voltant dels 0,5 mm d'obertura de fissura, i aleshores disminueix progressivament amb l'augment de l'obertura, fins a assolir un valor força reduït per a obertures de 3,5 mm. És curiós observar com en aquests tres testimonis la diferència adopti una forma molt semblant entre si, malgrat els valors de la resistència i els coeficients d'orientació siguin notablement diferents. Pel que fa als testimonis A20F1Xe i A20F6Yi, aquests són els que presenten una diferència més clara al llarg de tota la gràfica, mantenint-se aquesta al voltant d'un 30%-38% i d'un 20%-25%, respectivament.

De forma anàloga a com s'ha fet en el capítol corresponent al perfil d'orientació de les fibres, a continuació es presenta una taula que mostra els valors màxims i mitjans de la diferència entre el procediment experimental i el teòric, presos en valor absolut per evitar la compensació dels valors positius amb els negatius.



Taula 6.4 - Màxims i mitjanes de la diferència de la resposta a tracció entre els dos mètodes

Testimoni	$\eta_0$	Màxim	Mitjana
A20F1Xe	0,42	12,98%	8,78%
A20F1Xi	0,60	26,92%	10,15%
A20F1Yi	0,36	16,73%	15,70%
A20F1Ze	0,55	3,15%	1,67%
A20F4Xe	0,56	5,20	3,88%
A20F4Xi	0,76	19,84%	10,18%
A20F4Ye	0,65	12,74%	5,66%
A20F4Zi	0,31	22,15%	19,27%
A20F6Ye	0,62	9,39%	6,59%
A20F6Yi	0,30	30,57%	26,00%
A20F6Ze	0,49	9,26%	6,74%
A20F6Zi	0,59	2,89%	1,19%

S'observa com, paral·lelament a l'anàlisi del perfil d'orientació, els testimonis que tenen un coeficient d'orientació extrem presenten uns valors màxims més elevats. Si ens fixem en aquells testimonis amb coeficients d'orientació més baixos (A20F1Yi, A20F4Zi i A20F6Yi) veiem que la diferència màxima és molt elevada, assolint fins a un 30,57% per al testimoni A20F6Yi. Aquests valors, a més, van acompanyats de diferències mitjanes molt elevades, de fins al 26% de mitjana per al testimoni A20F6Yi, cosa que no passava per a les orientacions. Per la seva banda, en els testimonis amb coeficients d'orientació més elevats (A20F1Xi, A20F4Xi, A20F4Ye i A20F6Ye) s'observa com les diferències màximes augmenten, però les mitjanes es mantenen sensiblement baixes i molt properes a les obtingudes per als perfils d'orientació. En el testimoni A20F4Xi inclús la mitjana es veu reduïda gairebé a la meitat. Tots els demés testimonis (A20F1Xe, A20F1Ze, A20F4Xe, A20F6Ze i A20F6Zi) obtenen majoritàriament valors màxims i mitjans lleugerament superiors als obtinguts en el cas de les orientacions, sense arribar en cap cas a superar un 9% de diferència mitjana.

En vista de les gràfiques anteriors i els valors de la Taula 6.4 **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.** es pot considerar que l'aproximació teòrica proposada per Laranjeira (2010) s'ajusta en bona mesura als resultats obtinguts mitjançant els valors experimentals per a coeficients d'orientació superiors a 0,40, utilitzant el mètode de superposició del comportament de fibres individuals. No obstant, per a coeficients d'orientació baixos (inferiors a 0,40) la fiabilitat de la predicció es redueix perquè els valors teòrics s'ajusten menys a la

realitat, de manera que fora bo millorar la proposta de predicció de la distribució d'orientacions per a aquests valors del coeficient d'orientació. S'entén que com més perpendiculars es trobin les fibres respecte l'eix d'aplicació de la càrrega més crítica esdevindrà la situació, i per tant són uns casos límits on esdevé molt important de conèixer el comportament exacte.

## 6.6 ANÀLISI DE LES RESPOSTES A TRACCIÓ EXPERIMENTALS

Per tal d'analitzar si existeix algun tipus d'influència de l'orientació preferencial de les fibres en la resposta a tracció dels testimonis, es presenta a continuació una taula que inclou els valors mitjans de la resistència residual per a cadascun d'ells (Taula 6.5), prenent el perfil d'orientació de les fibres real. Aquesta resistència mitjana s'obté utilitzant els valors de resistència a tracció obtinguts a partir d'aquell moment on deixa de treballar el formigó i comencen a treballar exclusivament les fibres en conjunt, és a dir, aquell punt de la gràfica on la resistència assoleix un mínim, per passar després a créixer lleugerament.

Taula 6.5 - Resistència residual mitjana de cada testimoni, en MPa

Testimoni	Direcció	Mitjana del recompte de fibres per secció	$\eta_0$	Resistència residual mitjana (MPa)
A20F1Xe	X	19	0,42	0,202
A20F1Xi	X	36	0,60	0,612
A20F1Yi	Y	22	0,36	0,195
A20F1Ze	Z	32	0,55	0,467
A20F4Xe	X	15	0,56	0,212
A20F4Xi	X	35	0,76	0,800
A20F4Ye	Y	27	0,65	0,488
A20F4Zi	Z	14	0,31	0,105
A20F6Ye	Y	36	0,62	0,617
A20F6Yi	Y	24	0,30	0,158
A20F6Ze	Z	29	0,49	0,361
A20F6Zi	Z	42	0,59	0,664

### 6.6.1 Provena F1

Dels valors de la taula anterior es desprèn que el testimoni que presenta una resistència residual a tracció superior és l'extret en direcció X de la part interior de la proveta (0,612 MPa), i el que n'ofereix una menor resistència és l'extret en direcció Y, també de la part interior de la proveta (0,195 MPa). Aquests testimonis es corresponen amb els que tenen el coeficient d'orientació major i menor respectivament.

No obstant, el testimoni A20F1Xe, amb un coeficient d'orientació proper al del testimoni A20F1Yi ( $\eta_{\theta}=0,42$  per  $\eta_{\theta}=0,36$ , respectivament), també té una resistència residual mitjana força baixa (0,202 MPa), que només supera la del testimoni A20F1Yi en 0,007 MPa. Aquesta petita diferència és deguda, malgrat el coeficient d'orientació, al fet que el testimoni A20F1Yi té un nombre superior de fibres, les quals incrementen la contribució a la resistència. Cal recordar que aquest testimoni presenta una baixa orientació de les fibres en direcció X degut a l'efecte de la paret de l'encofrat sobre les fibres durant el formigonat.

El testimoni A20F1Ze obté una resistència relativament elevada (0,467 MPa), en relació amb la uniformitat que presenta al llarg de la proveta.

### 6.6.2 Provena F4

En aquesta proveta s'observa de nou que el testimoni que presenta una resistència mitjana major és l'extret en direcció X de la part interior, assolint un valor mitjà de 0,800 MPa. Alhora, l'altre testimoni interior (A20F4Zi) és el que té una resistència menor, uns 0,105 MPa. Aquests valors de resistència es corresponen, respectivament, amb els coeficients d'orientació major i menor.

El testimoni A20F4Xe, per la seva part, presenta un valor baix de resistència (0,212 MPa) producte del poc nombre de fibres existent en la secció de fissura del testimoni, malgrat tenir un coeficient d'orientació de valor mitjà (0,56).

Finalment, el testimoni A20F4Ye obté una resistència sensiblement elevada (0,488), derivat del fet de tenir un coeficient d'orientació elevat acompanyat per un nombre de fibres moderat.

### 6.6.3 Provena F6

Els valors de la Taula 6.5 referent a aquesta prova no deixen un clar valor de resistència residual en cap dels eixos, doncs tant els valors dels testimonis que caracteritzen l'eix Y (A20F6Ye i A20F6Yi) com els dels que ho fan per a l'eix Z (A20F6Ze i A20F6Zi) són molt dispars entre si. Aquestes diferències es deuen, sens dubte, al fet de tractar-se de testimonis extrets de parts internes i externes alternativament.

En concret, s'observa per al testimoni A20F6Ye una resistència residual mitjana de 0,617 MPa, mentre que per al testimoni A20F6Yi la resistència es redueix fins a 0,158 MPa. No obstant, aquests resultats estan en consonància amb la distribució dels cosinus directors dels respectius testimonis. No es pot fer una justificació acurada de l'existència d'aquesta diferència tan elevada per a testimonis extrets en la mateixa direcció de la mateixa prova, però es pot entendre que és perquè es troben en zones diferents de la prova (exterior i interior, respectivament), relativament allunyades entre si i perquè l'anàlisi de distribució de fibres a l'espai per aquests dos testimonis conclou que no existeix uniformitat de localització en tot el volum, més aviat el contrari. A més, el coeficient d'orientació i el nombre de fibres per secció del testimoni A20F6Ye són notablement superiors als del testimoni A20F6Yi.

Per als testimonis A20F6Ze i A20F6Zi la diferència no és tan gran però sí que és clara. La resistència residual del segon d'aquests dos testimonis gairebé duplica la del primer. A l'estudi de distribució de probabilitats dels cosinus directors no s'observa tanta diferència en la uniformitat de distribució per a l'eix Z, de manera que l'explicació més plausible és que el testimoni A20F6Zi té un nombre de fibres més elevat en la secció de fissura que el testimoni A20F6Ze (en concret, de 42 i 29, respectivament).

## 6.7 CONCLUSIONS

Els valors de la resistència mitjana a tracció que presenten els testimonis mostren una coherència clara tant amb l'orientació com amb el nombre de fibres de la secció fissurada.

De l'anàlisi de l'orientació de les fibres es desprèn, de forma general, que els testimonis interiors tendien a tenir coeficients d'orientació superiors en direcció X que no pas en les altres

direccions, coherent amb la direcció del flux del formigó durant el formigonat. Per contra, els testimonis exteriors presentaven coeficients d'orientació en direcció X força més reduïts, essent el que assolía valors majors de forma més usual la direcció Y (provetes F4 i F6), tot i que en alguns casos el major es trobés en direcció Z (provetes F1). Aquest darrer fet s'associa al reflux produït durant el formigonat a l'assolir les parets extremes de l'encofrat.

D'una forma paral·lela, s'observa com els testimonis interiors extrets en direcció X presenten resistències notablement elevades (amb un promig de 0,706 MPa) i força baixes en direcció Y (mitjana de 0,176 MPa), cosa que és coherent amb l'efecte del flux del formigó. Els testimonis interiors que caracteritzen la direcció Z obtenen valors de resistència molt dispars entre si, producte de la diferència absoluta de fibres existents en la secció de fissura entre els dos testimonis i als coeficients d'orientació. Per la seva part, els testimonis exteriors en direcció X mostren resistències força baixes (mitjana de 0,207 MPa), mentre que en direcció Y i Z la resistència és força major (promitjos de 0,553 MPa i 0,414 MPa, respectivament), mostrant l'efecte del reflux del formigó quan impacta amb les parets de l'encofrat.

## CAPÍTOL 7

# CONCLUSIONS

### 7.1 INTRODUCCIÓ

En aquesta tesina s'ha caracteritzat la posició exacta i el coeficient d'orientació de les fibres amb extrems en forma de ganxo embegudes dins de 12 testimonis diferents, provinents de la seva extracció, en les tres direccions de l'espai, de tres provetes de formigó autocompactable reforçat amb fibres d'acer. S'ha estudiat la distribució espacial de les fibres en el conjunt de les provetes, per tal de determinar si existeix uniformitat de distribució. A més, s'ha obtingut el perfil d'orientació de les fibres de cada testimoni de dues maneres diferents, partint de les dades experimentals i fent ús de la predicció de Laranjeira et al. (2011), i se n'han comparat els resultats. Finalment s'ha obtingut la resposta a tracció de cada testimoni, mitjançant el model de predicció analítica per superposició del comportament de les fibres individuals proposat també per Laranjeira (2010), i s'ha realitzat una comparació dels resultats segons s'utilitzin les dades experimentals o teòriques del perfil d'orientació.

A continuació es presenten, doncs, les conclusions a les que s'ha arribat després de tot l'anàlisi realitzat.

## 7.2 CONCLUSIONS

(a) Les tomografies són una potent eina per visualitzar i quantificar l'estructura interna d'un testimoni de FRFA. A més, representa una tècnica d'assaig no destructiva que permet obtenir resultats fora de l'abast d'altres mètodes d'avui dia.

Partint de les tomografies i mitjançant un *software* de processament d'imatges es pot crear una representació en 3-D que permet localitzar de forma manual a l'espai cadascuna de les fibres que els testimonis tenen embegudes. En base a aquesta representació es pot extreure informació geomètrica que caracteritzi els testimonis, com ho seria la longitud de les fibres, el coeficient d'orientació o el perfil d'orientació. Cal remarcar que aquesta informació és exacta i precisa per a cadascun dels testimonis, doncs no es recorre en cap moment a aproximacions teòriques.

(b) En totes les provetes analitzades s'observa una lleugera tendència a l'acumulació de fibres a la part interior de les mateixes, amb una mitjana del conjunt de les provetes del 55,3%. Això pot induir a una lleu sobreestimació de la resposta resistent dels assajos de flexotracció.

(c) La distribució de les fibres dins les provetes és força homogènia pel que fa a la divisió de les mateixes en dues meitats, superior i inferior. Concretament, la mitjana de fibres en la meitat superior és del 52,8% per un 47,2% de la meitat inferior per al conjunt de les provetes.

Malgrat la lògica faci pensar que la gravetat tendirà a situar les fibres majoritàriament a la part inferior del motlle, les dades experimentals no ho corroboren. Una explicació raonable pot ser que el formigó autocompactable, al ser tan fluid per tal de permetre una bona treballabilitat i adaptabilitat als encofrats, genera un flux durant el formigonat que provoca un lleuger desplaçament de les fibres cap amunt.

(d) El perfil d'orientació de les fibres teòric proposat per Laranjeira et al. (2011) s'ajusta notablement bé al perfil real. No obstant, per a coeficients d'orientació de valors extrems (inferiors a 0,40 i superiors a 0,60) s'assoleixen diferències màximes entre els mètodes experimentals i teòrics sensiblement superiors a la mitjana (de fins al 20,12% respecte una mitjana del 9,69%).

(e) El conjunt de provetes no presenta de forma general una preferència d'orientació determinada, cosa que s'associa al fet de tractar-se d'un formigó autocompactable i no

precisar de vibració externa. Malgrat tot, es detecta una preferència d'orientació clara en direcció  $X$  per a la proveta F4, provocada segurament pel flux longitudinal que es genera durant el formigonat.

Alhora, s'observa que la direcció  $Z$  en cada proveta presenta uniformitat de distribució dels cosinus directors de les fibres, tot i que els coeficients d'orientació mitjans corresponents a aquesta direcció siguin força diferents proveta a proveta.

- (f) S'observa que de forma general els testimonis interiors tenen un coeficient d'orientació major per a la direcció  $X$  que en les altres direccions, cosa que és coherent amb la direcció del flux del formigó. Per als testimonis exteriors els coeficients d'orientació en direcció  $X$  acostumen a ser més baixos que les direccions  $Y$  i  $Z$ , fet que es relaciona amb el reflux del formigó a l'impactar amb la paret extrema de l'encofrat durant l'abocat.
- (g) La resposta a tracció uniaxial dels testimonis, calculada mitjançant la superposició del comportament de les fibres individuals, mostra que la resistència residual mitjana és molt sensible al nombre de fibres de la secció característica de fissura i al perfil d'orientació de les mateixes. Com major sigui el coeficient d'orientació i el nombre de fibres, major serà la resistència residual mitjana.
- (h) La resposta a tracció obtinguda mitjançant l'aproximació teòrica del perfil d'orientació proposada per Laranjeira (2010) s'ajusta en bona mesura als resultats obtinguts mitjançant el perfil d'orientació experimental, per a coeficients d'orientació superiors a 0,40. No obstant, per a coeficients d'orientació baixos (inferiors a 0,40) les diferències entre els resultats esperats i els reals obté valors màxims molt elevats, fins a sobrepassar en algun cas el 30%, i van acompanyades de diferències mitjanes elevades. En aquests casos, doncs, la fiabilitat de la predicció es redueix, de manera que caldria millorar la proposta de predicció, entenent que com més perpendiculars es trobin les fibres respecte l'eix d'aplicació de la càrrega més crítica esdevindrà la situació, i per tant són uns casos límits on esdevé molt important de conèixer el comportament exacte.
- (i) De forma coherent amb les orientacions de les fibres dels testimonis, s'observa com els testimonis interiors extrets en direcció  $X$  presenten resistències residuals mitjanes notablement més elevades que en les altres direccions. Els testimonis exteriors, per la



seva banda, assoleixen resistències residuals mitjanes més baixes en direcció  $X$  que en les direccions  $Y$  i  $Z$ . Aquests fets corroboren la importància de la orientació de les fibres en la resposta a tracció i com varia aquesta segons es tracti d'un testimoni extret de l'interior o de l'exterior de les provetes.

En aquesta tesina es mostra que poden existir diferències notables en la resistència a tracció residual dels testimonis en funció de la zona i la direcció en la qual han estat extrets. Es pot afirmar que la orientació de les fibres es veu afectada pel flux del formigó i els efectes que produeixen les parets de l'encofrat, cosa que hauria de ser considerat en el disseny estructural i a l'hora de modelitzar el comportament del FRFA.

### 7.3 FUTURES LÍNIES DE TREBALL

Tenint en compte que la Tomografia Axial Computeritzada permet obtenir dades geomètriques exactes de les fibres embegudes en les provetes analitzades de forma no destructiva, es considera que és una bona tècnica per obtenir el perfil d'orientació de les fibres. No obstant, el procés manual d'identificació de les fibres és molt costós en quant a temps, de manera que una línia a seguir seria l'automatització del procediment, i més tenint present que la dosificació de fibres pot ser molt superior als  $20 \text{ kg/m}^3$  emprats en aquest estudi. D'aquesta forma, l'obtenció de les dades i la representació en 3-D esdevindria simplement una feina de càlcul numèric que qualsevol ordinador podria realitzar.

En vista que la predicció de la resposta a tracció de Laranjeira (2010) perd fiabilitat per a coeficients d'orientació extrems, caldria millorar-ne la proposta. No obstant, la fiabilitat s'ha determinat utilitzant un nombre relativament petit de testimonis, de manera que seria necessari l'estudi de més provetes per tal de corroborar els resultats obtinguts en el present estudi.

Els resultats a tracció obtinguts mitjançant el model de superposició del comportament de les fibres individuals són en bona part teòrics, doncs el model és una predicció estadística. Per tant, seria interessant poder assajar a tracció directa els testimonis en el laboratori amb la finalitat de poder comparar els dos resultats obtinguts.

Alhora, sabent que la resistència a tracció és major com més elevat és el coeficient d'orientació, fóra interessant poder desenvolupar un procediment que aconseguixi imposar a les fibres una orientació preferencial en aquella direcció on es produeixin les majors tensions.

## ANNEX A

# ALGORISME MATLAB

En aquest annex es presenta l'algorisme programat en MATLAB per a l'obtenció dels punts corresponents als talls de les fibres en cadascuna de les tomografies de tots els testimonis. L'algorisme és vàlid per a qualsevol nombre de tomografies. L'*script* utilitzat per exportar els punts al CAD va ser escrit per *Grzegorz Kwiatek* i es troba disponible a la pàgina web [http://www.seismologia-gornicza.pl/?page\\_id=172](http://www.seismologia-gornicza.pl/?page_id=172)

```

clear all;
clc;

disp('Lectura imatges')

% El programa llegeix les imatges en format .bmp que es troben a la carpeta
% de treball i emmagatzema la seva informació en matrius anomenades TAC
% (informació de cada píxel)

imatges = dir('*.bmp');
num_imatges = numel(imatges);
TAC = cell(1, num_imatges);
for k = 1:num_imatges;
    TAC{k} = imread(imatges(k).name);
    TAC{k} = rot90(TAC{k},3);
% Gir de la matriu de 270° perquè a l'insertar les imatges al CAD quadri tot
% sense haver de fer cap rotació auxiliar.
end

% Es crea una matriu auxiliar A, per a cada matriu TAC, de la mateixa
% dimensió que la matriu TAC i que conté únicament els elements de TAC que
% tenen valors superiors a 120 i inferiors a 255 (interval que corresponen al
% valor de les fibres d'acer)

num_A = length(TAC{1});
A = cell(1, num_imatges);
for k = 1:num_imatges;
    A{k} = zeros(num_A,num_A);
end
for k = 1:num_imatges;
    for i = 1:num_A;
        for j = 1:num_A;
            if TAC{k}(i,j) > 120;
                if TAC{k}(i,j) < 255;
                    A{k}(i,j) = TAC{k}(i,j);
                end
            end
        end
    end
end
end

% Guardem les coordenades de cada píxel corresponent a fibres d'acer
disp('Guarda coordenades')

g = 0;
l = 0;
for k = 1:num_imatges;
    for i = 1:num_A;
        for j = 1:num_A;
            if A{k}(i,j) > 0;
                m{k}(g+1) = i/num_A;
                n{k}(l+1) = j/num_A;
                g = g+1;
                l = l+1;
            end
        end
    end
end
g = 0;
l = 0;
end

% Exportem tots els punts obtinguts anteriorment i els grafiquem en el CAD
% ordenats per capes segons l'ordre de les imatges

disp('CAD')

```

```
FID = dxf_open('MATLAB_a20f1ze.dxf');  
k = 1;  
while k <= num_imatges;  
    FID = dxf_set(FID, 'Color', [1 1 0], 'Layer', k);  
    dxf_point(FID, m{k}, n{k}, (k)*ones(size(A{k})));  
    k = k+1;  
end  
dxf_close(FID);
```

Un exemple del què s'obté es pot veure a la Figura A.1

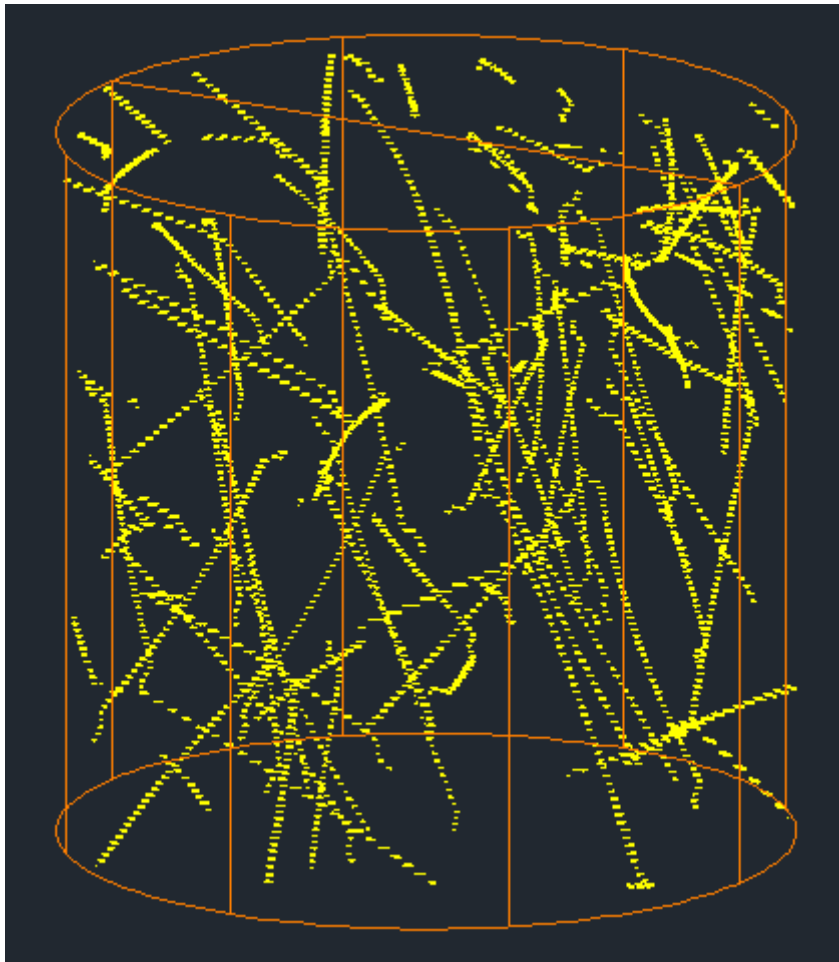


Figura A.1 - Output del MATLAB vist a l'AutoCAD per al testimoni A20F4Ye

## ANNEX B

# DISTRIBUCIÓ DE LES FIBRES PER TESTIMONIS

En aquest annex es presenten les dades utilitzades per a realitzar l'anàlisi de distribució de fibres de tots els testimonis.

Volum parcial	A20F1Xe		A20F1Xi		A20F1Yi		A20F1Ze		A20F4Xe		A20F4Xi	
	Nº de fibres	% de fibres respecte el total	Nº de fibres	% de fibres respecte el total	Nº de fibres	% de fibres respecte el total	Nº de fibres	% de fibres respecte el total	Nº de fibres	% de fibres respecte el total	Nº de fibres	% de fibres respecte el total
<b>Regió A</b>	31	25,20%	37	24,83%	24	25,00%	17	19,10%	20	35,09%	21	21,65%
<b>Regió B</b>	34	27,64%	42	28,19%	27	28,13%	19	21,35%	9	15,79%	25	25,77%
<b>Regió C</b>	30	24,39%	38	25,50%	20	20,83%	37	41,57%	12	21,05%	23	23,71%
<b>Regió D</b>	28	22,76%	32	21,48%	25	26,04%	16	17,98%	16	28,07%	28	28,87%
<b>1r Q</b>	31	25,20%	45	30,20%	24	25,00%	22	24,72%	21	36,84%	32	32,99%
<b>2n Q</b>	30	24,39%	33	22,15%	26	27,08%	26	29,21%	13	22,81%	27	27,84%
<b>3r Q</b>	35	28,46%	41	27,52%	32	33,33%	18	20,22%	17	29,82%	19	19,59%
<b>4t Q</b>	27	21,95%	30	20,13%	14	14,58%	23	25,84%	6	10,53%	19	19,59%
<b>Anell <math>\alpha</math></b>	3	2,44%	8	5,37%	8	8,33%	4	4,49%	4	7,02%	3	3,09%
<b>Anell <math>\beta</math></b>	13	10,57%	23	15,44%	11	11,46%	13	14,61%	6	10,53%	11	11,34%
<b>Anell <math>\gamma</math></b>	33	26,83%	38	25,50%	25	26,04%	21	23,60%	13	22,81%	19	19,59%
<b>Anell <math>\delta</math></b>	40	32,52%	38	25,50%	39	40,63%	20	22,47%	18	31,58%	37	38,14%
<b>Anell <math>\epsilon</math></b>	34	27,64%	42	28,19%	13	13,54%	31	34,83%	16	28,07%	27	27,84%

Volum parcial	A20F4Ye		A20F4Zi		A20F6Ye		A20F6Yi		A20F6Ze		A20F6Zi	
	Nº de fibres	% de fibres respecte el total	Nº de fibres	% de fibres respecte el total	Nº de fibres	% de fibres respecte el total	Nº de fibres	% de fibres respecte el total	Nº de fibres	% de fibres respecte el total	Nº de fibres	% de fibres respecte el total
<b>Regió A</b>	24	38,10%	4	6,15%	30	29,70%	34	26,36%	23	23,47%	29	26,13%
<b>Regió B</b>	11	17,46%	19	29,23%	11	10,89%	30	23,26%	19	19,39%	23	20,72%
<b>Regió C</b>	16	25,40%	20	30,77%	25	24,75%	32	24,81%	23	23,47%	20	18,02%
<b>Regió D</b>	12	19,05%	22	33,85%	35	34,65%	33	25,58%	33	33,67%	39	35,14%
<b>1r Q</b>	20	31,75%	12	18,46%	18	17,82%	31	24,03%	23	23,47%	35	31,53%
<b>2n Q</b>	17	26,98%	22	33,85%	37	36,63%	47	36,43%	21	21,43%	32	28,83%
<b>3r Q</b>	17	26,98%	14	21,54%	18	17,82%	29	22,48%	28	28,57%	25	22,52%
<b>4t Q</b>	9	14,29%	17	26,15%	28	27,72%	22	17,05%	26	26,53%	19	17,12%
<b>Anell <math>\alpha</math></b>	1	1,59%	5	7,69%	5	4,95%	6	4,65%	5	5,10%	4	3,60%
<b>Anell <math>\beta</math></b>	7	11,11%	11	16,92%	5	4,95%	20	15,50%	11	11,22%	11	9,91%
<b>Anell <math>\gamma</math></b>	8	12,70%	12	18,46%	22	21,78%	36	27,91%	21	21,43%	32	28,83%
<b>Anell <math>\delta</math></b>	24	38,10%	25	38,46%	37	36,63%	45	34,88%	38	38,78%	45	40,54%
<b>Anell <math>\epsilon</math></b>	23	36,51%	12	18,46%	32	31,68%	22	17,05%	23	23,47%	19	17,12%

## ANNEX C

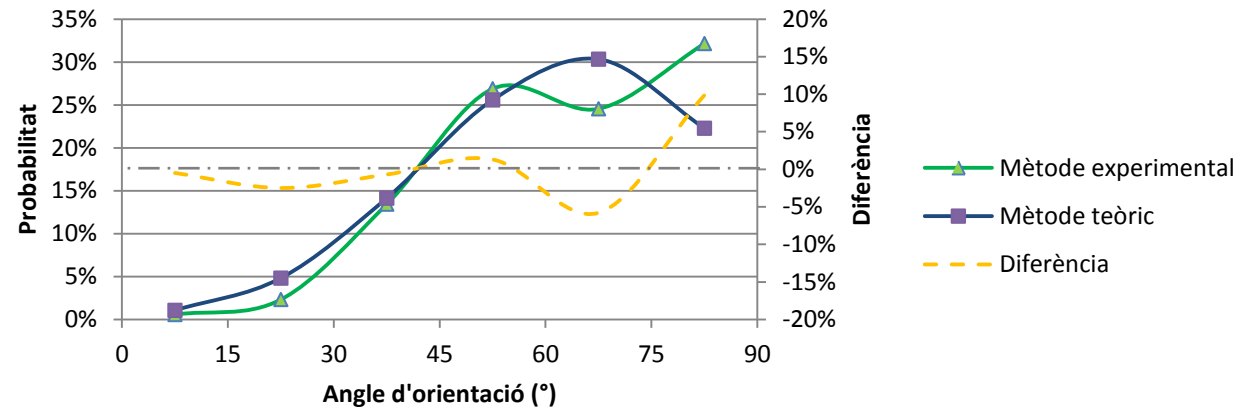
# PERFIL D'ORIENTACIÓ DE LES FIBRES

En aquest annex es presenten les dades utilitzades per a realitzar l'anàlisi dels perfils d'orientació de les fibres de tots els testimonis i les diferents gràfiques associades amb els perfils experimentals, els teòrics i la seva diferència.



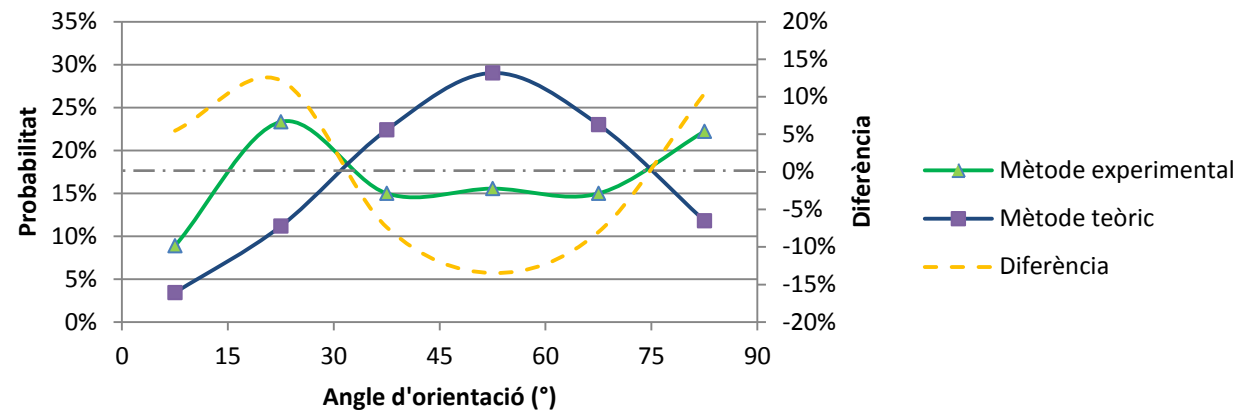
## Testimoni A20F1Xe

Experimental		Teòric	
$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )	$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )
7,5°	0,58%	7,5°	1,07%
22,5°	2,34%	22,5°	4,83%
37,5°	13,45%	37,5°	14,14%
52,5°	26,90%	52,5°	25,60%
67,5°	24,56%	67,5°	30,34%
82,5°	32,16%	82,5°	22,29%



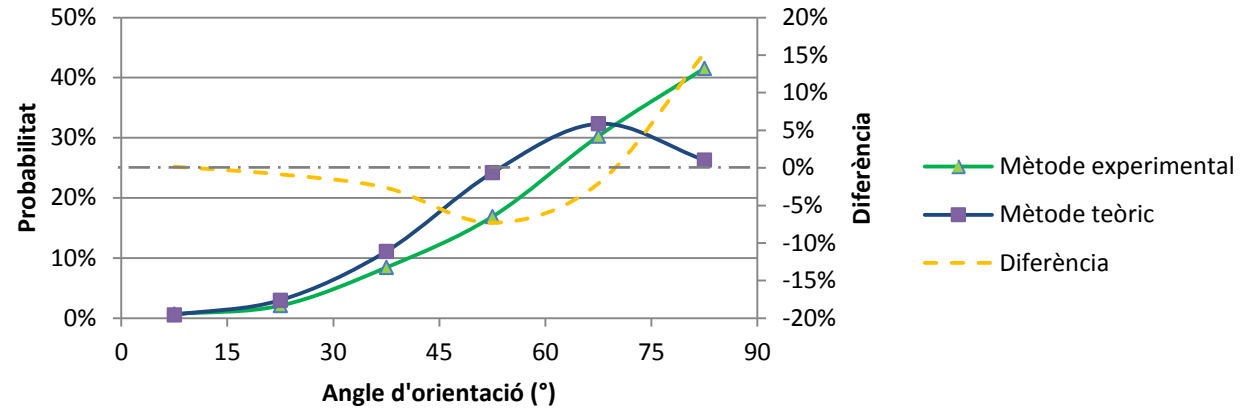
## Testimoni A20F1Xe

Experimental		Teòric	
$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )	$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )
7,5°	8,89%	7,5°	3,43%
22,5°	23,33%	22,5°	11,18%
37,5°	15,00%	37,5°	22,40%
52,5°	15,56%	52,5°	29,03%
67,5°	15,00%	67,5°	23,00%
82,5°	22,22%	82,5°	11,80%



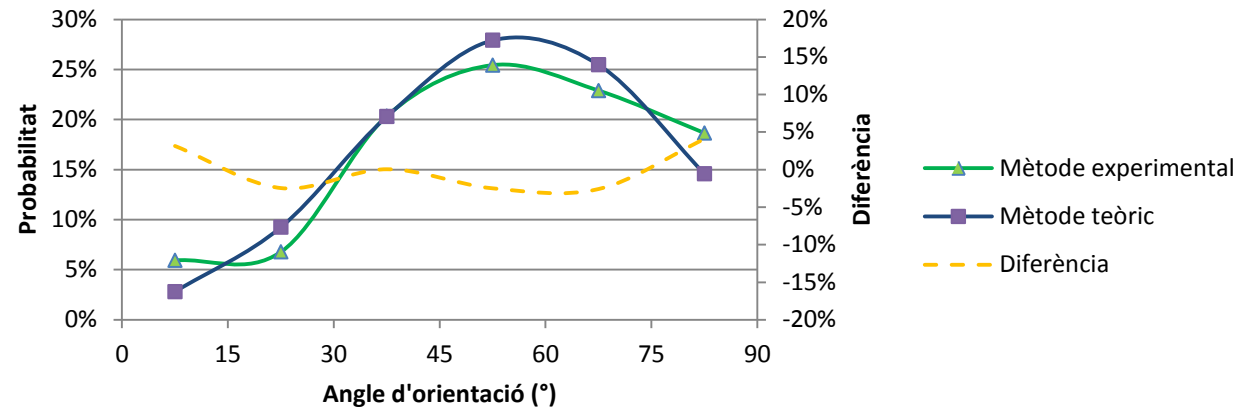
## Testimoni A20F1Yi

Experimental		Teòric	
$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )	$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )
7,5°	0,70%	7,5°	0,55%
22,5°	2,11%	22,5°	2,98%
37,5°	8,45%	37,5°	11,11%
52,5°	16,90%	52,5°	24,21%
67,5°	30,28%	67,5°	32,35%
82,5°	41,55%	82,5°	26,30%



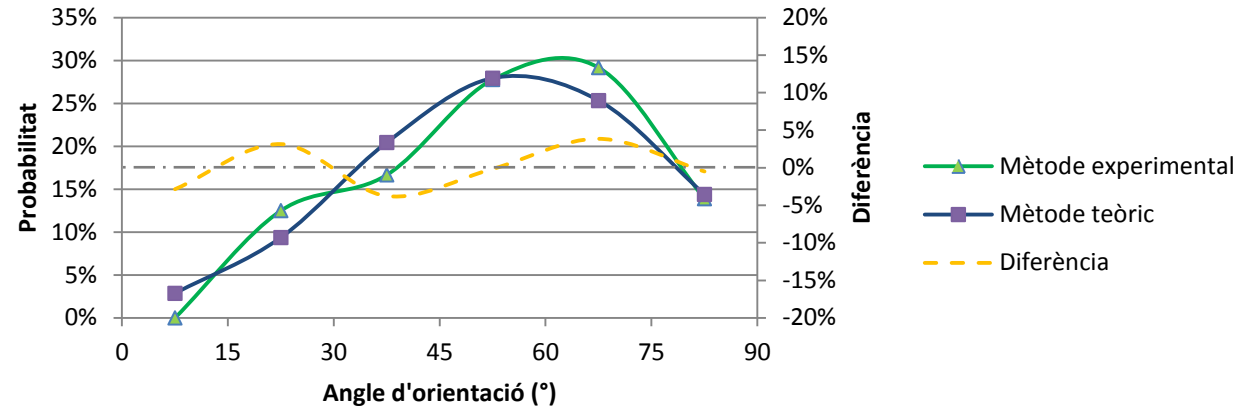
## Testimoni A20F1Ze

Experimental		Teòric	
$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )	$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )
7,5°	5,93%	7,5°	2,80%
22,5°	6,78%	22,5°	9,24%
37,5°	20,34%	37,5°	20,30%
52,5°	25,42%	52,5°	27,92%
67,5°	22,88%	67,5°	25,47%
82,5°	18,64%	82,5°	14,58%



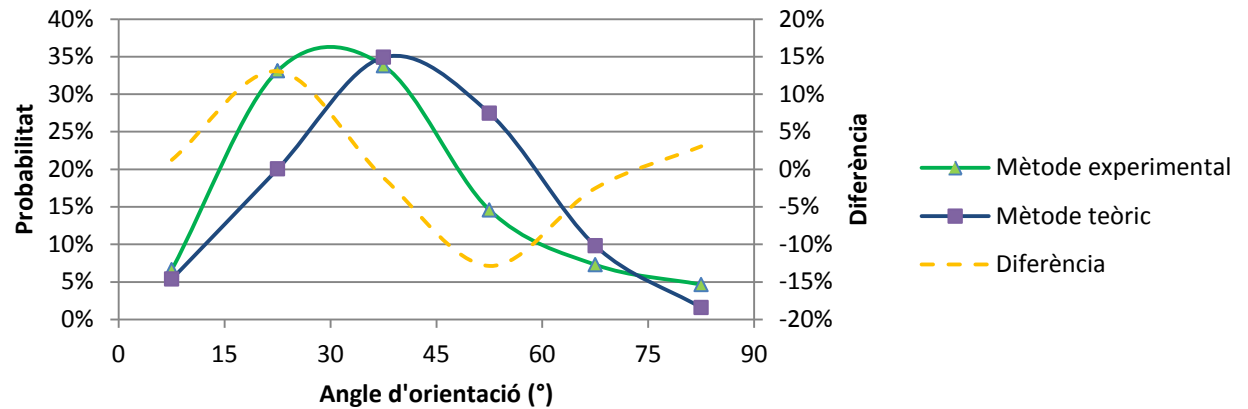
## Testimoni A20F4Xe

Experimental		Teòric	
$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )	$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )
7,5°	0,00%	7,5°	2,86%
22,5°	12,50%	22,5°	9,36%
37,5°	16,67%	37,5°	20,43%
52,5°	27,78%	52,5°	27,93%
67,5°	29,17%	67,5°	25,32%
82,5°	13,89%	82,5°	14,39%



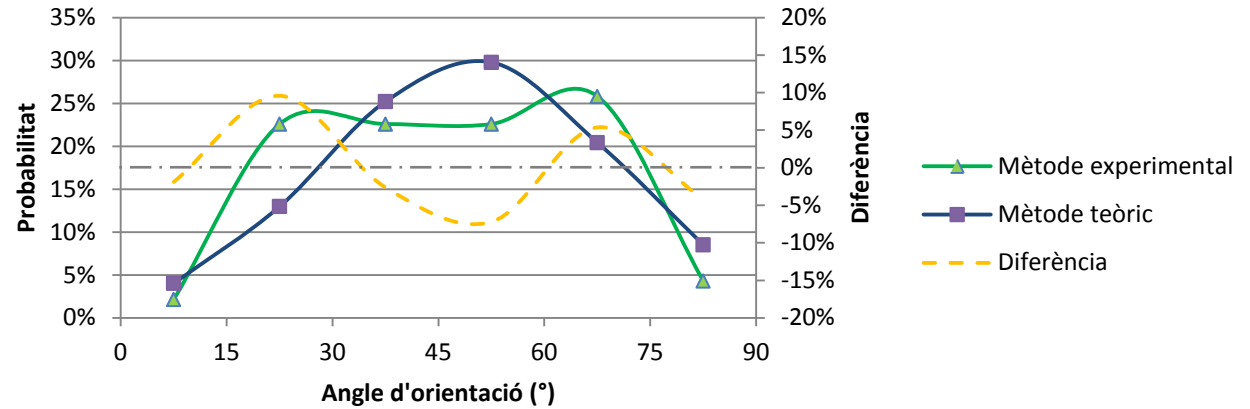
## Testimoni A20F4Xi

Experimental		Teòric	
$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )	$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )
7,5°	6,62%	7,5°	5,38%
22,5°	33,11%	22,5°	20,05%
37,5°	33,77%	37,5°	34,92%
52,5°	14,57%	52,5°	27,46%
67,5°	7,28%	67,5°	9,81%
82,5°	4,64%	82,5°	1,58%



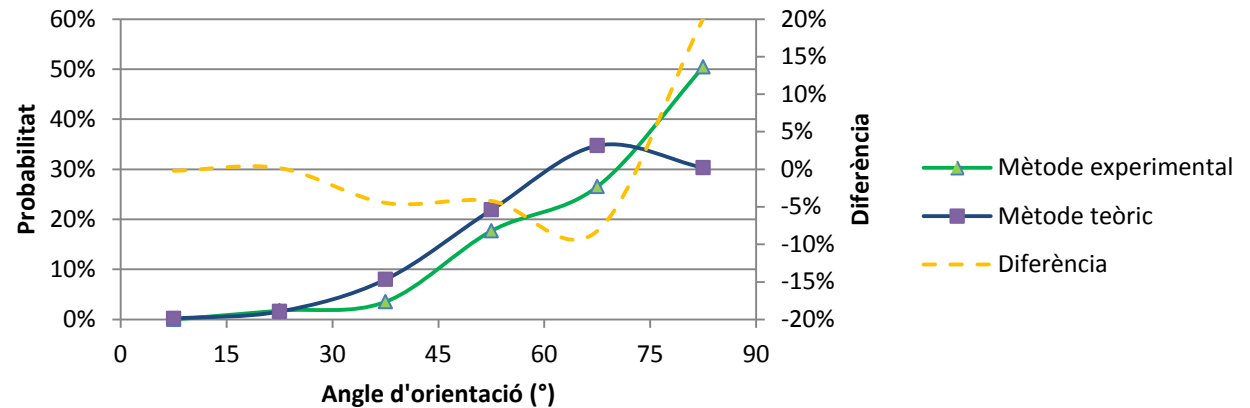
## Testimoni A20F4Ye

Experimental		Teòric	
$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )	$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )
7,5°	2,15%	7,5°	4,04%
22,5°	22,58%	22,5°	12,99%
37,5°	22,58%	37,5°	25,21%
52,5°	22,58%	52,5°	29,78%
67,5°	25,81%	67,5°	20,43%
82,5°	4,30%	82,5°	8,52%



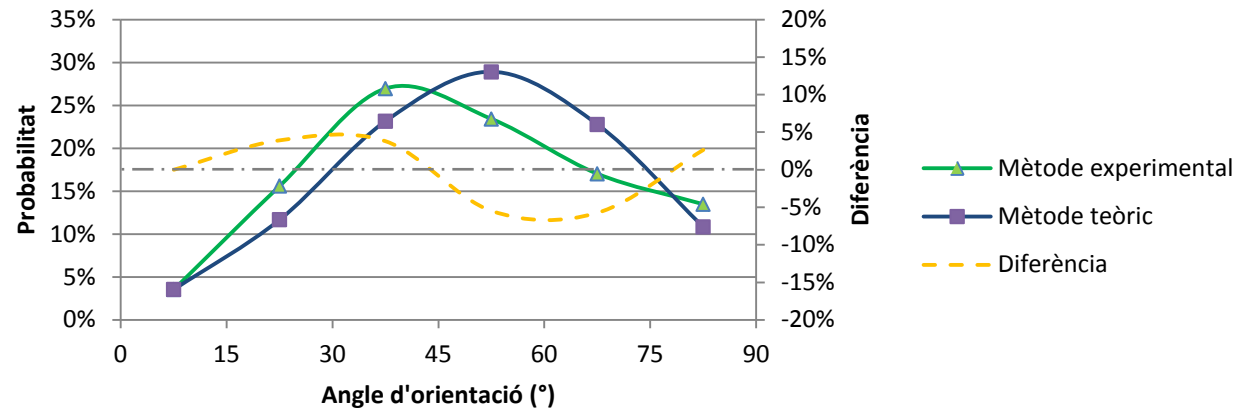
## Testimoni A20F4Zi

Experimental		Teòric	
$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )	$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )
7,5°	0,00%	7,5°	0,20%
22,5°	1,77%	22,5°	1,60%
37,5°	3,54%	37,5°	8,01%
52,5°	17,70%	52,5°	21,91%
67,5°	26,55%	67,5°	34,74%
82,5°	50,44%	82,5°	30,32%



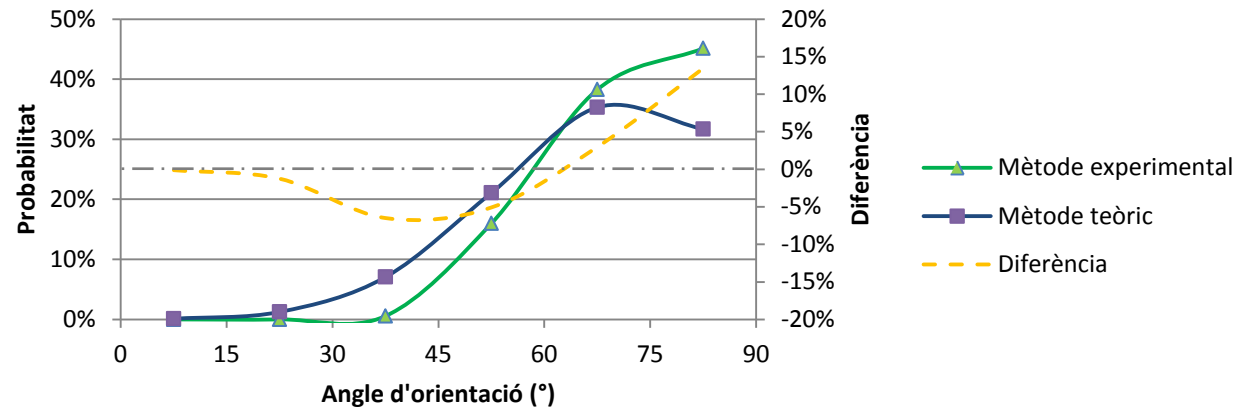
## Testimoni A20F6Ye

Experimental		Teòric	
$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )	$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )
7,5°	3,55%	7,5°	3,55%
22,5°	15,60%	22,5°	11,68%
37,5°	26,95%	37,5°	23,15%
52,5°	23,40%	52,5°	28,90%
67,5°	17,02%	67,5°	22,77%
82,5°	13,48%	82,5°	10,84%



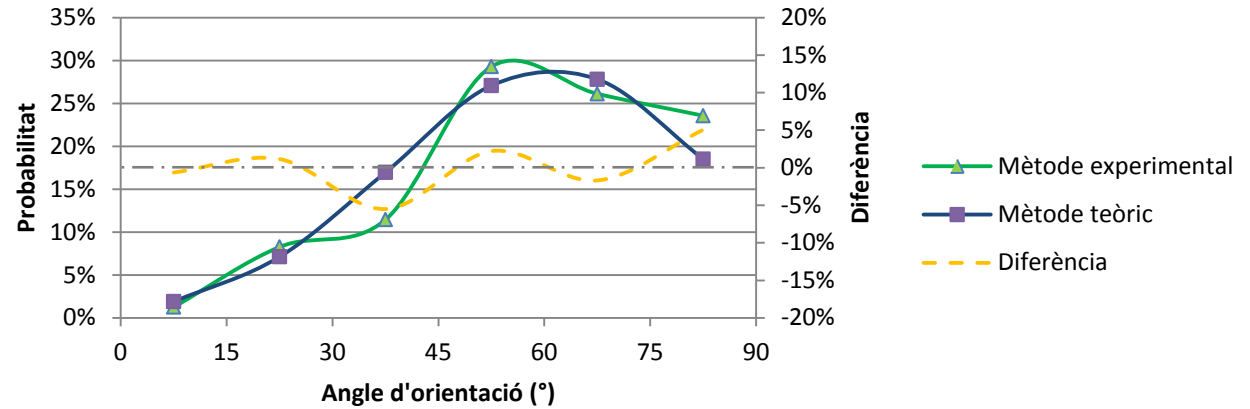
## Testimoni A20F6Yi

Experimental		Teòric	
$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )	$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )
7,5°	0,00%	7,5°	0,13%
22,5°	0,00%	22,5°	1,27%
37,5°	0,57%	37,5°	7,08%
52,5°	16,00%	52,5°	21,09%
67,5°	38,29%	67,5°	35,32%
82,5°	45,14%	82,5°	31,70%



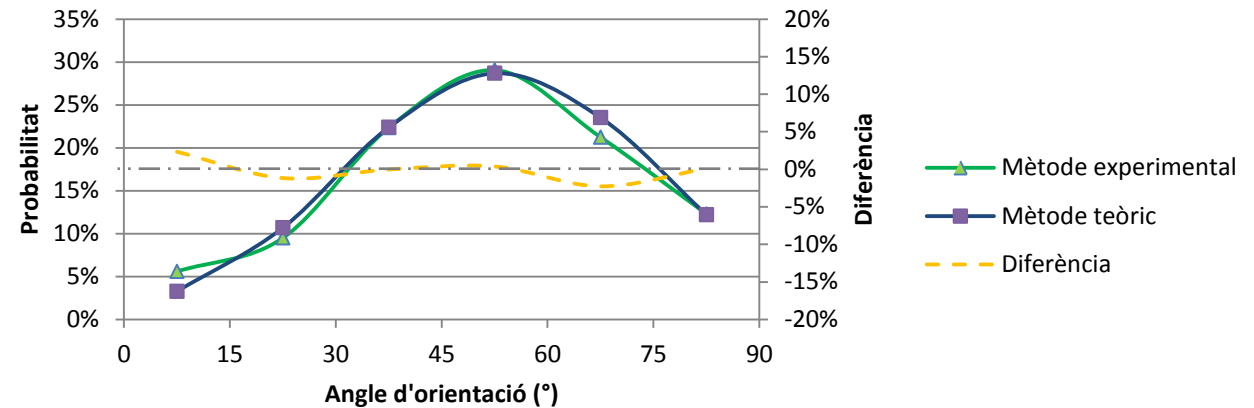
## Testimoni A20F6Ze

Experimental		Teòric	
$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )	$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )
7,5°	1,27%	7,5°	1,91%
22,5°	8,28%	22,5°	7,14%
37,5°	11,46%	37,5°	16,97%
52,5°	29,30%	52,5°	27,08%
67,5°	26,11%	67,5°	27,81%
82,5°	23,57%	82,5°	18,51%



## Testimoni A20F6Zi

Experimental		Teòric	
$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )	$\theta_{ia}$	P( $\theta$ )
7,5°	5,59%	7,5°	3,27%
22,5°	9,50%	22,5°	10,68%
37,5°	22,35%	37,5°	22,39%
52,5°	29,05%	52,5°	28,69%
67,5°	21,23%	67,5°	23,52%
82,5°	12,29%	82,5°	12,20%



## ANNEX D

# CONTRIBUCIÓ DE LES FIBRES A LA RESPOSTA A TRACCIÓ

En aquest annex es presenten les dades característiques de la contribució de les fibres en els diferents testimonis. Es mostren les equacions que permeten obtenir les càrregues i els desplaçaments als diferents punts clau del model d'arrencament de les fibres segons l'angle d'inclinació, i a continuació es presenten el nombre de fibres per secció que es troben inclinades segons l'angle considerat ( $N_{\theta_i}$ ).

### D.1 EQUACIONS CARACTERÍSTIQUES DELS PUNTS CLAU

D'acord amb la Figura D.1, a la Taula D.1 poden veure les equacions que permeten obtenir els punts característics dels models d'arrencament per a les fibres alineades i inclinades, respectivament.

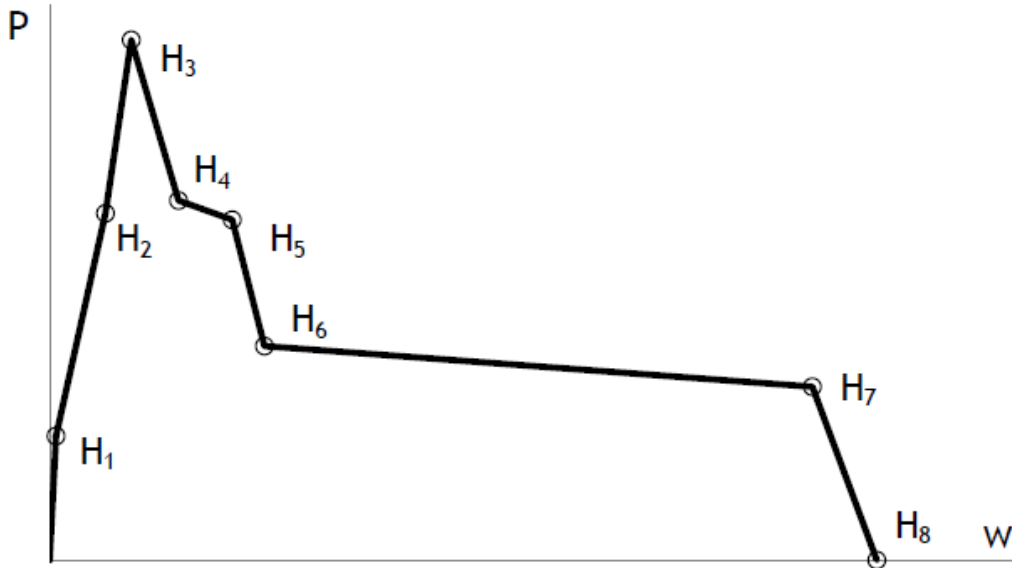


Figura D.1 - Diagrama esquemàtic del model d'arrencament per a fibres inclinades amb els extrems en forma de ganxo (Laranjeira et al. 2010, 40: 1471-1487)

Taula D.1 - Expressions matemàtiques que caracteritzen els punts clau del model d'arrencament de fibres amb extrems en forma de ganxo inclinades (Laranjeira et al. 2010, 40: 1471-1487)

Punt	Expressió matemàtica
H <sub>1</sub>	$P_{H1} = P_{S01} \cos \theta$ $w_{H1} = w_{S01}$
H <sub>2</sub>	$P_{H2} = \left( P_{S01} L_{\text{eff}(H2)} + \Delta P_{H01} \frac{L_e - 6L_{SP1}}{L_e} \right) \cos \theta + \mu D_{F1}$ $w_{H2} = w_{H1} + \Delta w_{H01} \cos \theta \frac{L_e - 6L_{SP1}}{L_e} + \Delta w_{SP1}$
H <sub>3</sub>	$P_{H3} = (P_{S01} L_{\text{eff}(H3)} + \Delta P_{H01}) \cos \theta + \mu D_{F2}$ $w_{H3} = w_{H1} + \Delta w_{H01} \cos \theta + \Delta w_{SP1} + \Delta w_{SP2}$
H <sub>4</sub>	$P_{H4} = \left( P_{S01} L_{\text{eff}(H4)} + \sum_{i=1}^2 \Delta P_{H0i} \right) \cos \theta + \mu D_{F2}$ $w_{H4} = w_{H3} + \Delta w_{H02} \cos \theta$



$$P_{H5} = \left( P_{S01} L_{\text{eff}(H5)} + \sum_{i=1}^3 \Delta P_{H0i} \right) \cos \theta + \mu D_{F2}$$

$$w_{H5} = w_{H4} + \Delta w_{H03} \cos \theta$$

$$P_{H6} = \left( P_{S02} L_{\text{eff}(H6)} + \sum_{i=1}^4 \Delta P_{H0i} \right) \cos \theta + \mu D_{F2}$$

$$w_{H6} = w_{H5} + \Delta w_{H04} \cos \theta$$

$$P_{H7} = \left( \sum_{i=1}^4 \Delta P_{H0i} \right) \cos \theta + \mu D_{F2}$$

$$w_{H7} = L_e - (L_{SP1} + L_{SP2} + L_{H,\text{crit}})$$

$$P_{H8} = 0$$

$$w_{H7} = L_e - (L_{SP1} + L_{SP2})$$

Els valors corresponents als assajos d'arrencament de fibres alineades amb la càrrega (subíndex 0), necessaris per a determinar la resposta per a fibres inclinades, van ser extrets de Blázquez (2009)

L'obtenció de les diferents expressions es troba àmpliament justificada a Laranjeira et al (2010, 40: 1471-1487), alhora que es poden trobar els valors emprats per als diferents coeficients.

## D.2 NOMBRE DE FIBRES PER SECCIÓ

A continuació es mostren el nombre de fibres considerades en la secció de fissura característica de cada testimoni segons l'angle d'inclinació ( $N_{\theta i}$ ), necessàries per aplicar el model analític de resistència a tracció, tant per als perfils d'orientació experimental (Taula D.2) com pels perfils d'orientació teòric (Taula D.3).

**Taula D.2 - Nombre de fibres en la secció de fissura orientades segons l'angle  $\theta_i$  per als perfils d'orientació experimentals**

	$\theta_i$	7,5°	22,5°	37,5°	52,5°	67,5°	82,5°
	$N_f$	19					
<b>A20F1Xe</b>	$P(\theta_i)$	0,6%	2,3%	13,5%	26,9%	24,6%	32,2%
	$N_{\theta_i}$	0,11	0,44	2,56	5,11	4,67	6,11
	$N_f$	36					
<b>A20F1Xi</b>	$P(\theta_i)$	8,9%	23,3%	15,0%	15,6%	15,0%	22,2%
	$N_{\theta_i}$	3,20	8,40	5,40	5,60	5,40	8,00
	$N_f$	22					
<b>A20F1Yi</b>	$P(\theta_i)$	0,7%	2,1%	8,5%	16,9%	30,3%	41,5%
	$N_{\theta_i}$	0,15	0,46	1,86	3,72	6,66	9,14
	$N_f$	32					
<b>A20F1Ze</b>	$P(\theta_i)$	5,9%	6,8%	20,3%	25,4%	22,9%	18,6%
	$N_{\theta_i}$	1,90	2,17	6,51	8,14	7,32	5,97
	$N_f$	15					
<b>A20F4Xe</b>	$P(\theta_i)$	0,0%	12,5%	16,7%	27,8%	29,2%	13,9%
	$N_{\theta_i}$	0,00	1,88	2,50	4,17	4,38	2,08
	$N_f$	35					
<b>A20F4Xi</b>	$P(\theta_i)$	6,6%	33,1%	33,8%	14,6%	7,3%	4,6%
	$N_{\theta_i}$	2,32	11,59	11,82	5,10	2,55	1,62
	$N_f$	27					
<b>A20F4Ye</b>	$P(\theta_i)$	2,2%	22,6%	22,6%	22,6%	25,8%	4,3%
	$N_{\theta_i}$	0,58	6,10	6,10	6,10	6,97	1,16
	$N_f$	14					
<b>A20F4Zi</b>	$P(\theta_i)$	0,0%	1,8%	3,5%	17,7%	26,5%	50,4%
	$N_{\theta_i}$	0,00	0,25	0,50	2,48	3,72	7,06
	$N_f$	36					
<b>A20F6Ye</b>	$P(\theta_i)$	3,5%	15,6%	27,0%	23,4%	17,0%	13,5%
	$N_{\theta_i}$	1,28	5,62	9,70	8,43	6,13	4,85
	$N_f$	24					
<b>A20F6Yi</b>	$P(\theta_i)$	0,0%	0,0%	0,6%	16,0%	38,3%	45,1%
	$N_{\theta_i}$	0,00	0,00	0,14	3,84	9,19	10,83
	$N_f$	29					
<b>A20F6Ze</b>	$P(\theta_i)$	1,3%	8,3%	11,5%	29,3%	26,1%	23,6%
	$N_{\theta_i}$	0,37	2,40	3,32	8,50	7,57	6,83
	$N_f$	42					
<b>A20F6Zi</b>	$P(\theta_i)$	5,6%	9,5%	22,3%	29,1%	21,2%	12,3%
	$N_{\theta_i}$	2,35	3,99	9,39	12,20	8,92	5,16

**Taula D.3 - Nombre de fibres en la secció de fissura orientades segons l'angle  $\theta_i$  per als perfils d'orientació teòrics**

	$\theta_i$	7,5°	22,5°	37,5°	52,5°	67,5°	82,5°
	$N_f$	19					
<b>A20F1Xe</b>	$P(\theta_i)$	1,1%	4,8%	14,1%	25,6%	30,3%	22,3%
	$N_{\theta_i}$	0,20	0,92	2,69	4,86	5,77	4,24
	$N_f$	36					
<b>A20F1Xi</b>	$P(\theta_i)$	3,4%	11,2%	22,4%	29,0%	23,0%	11,8%
	$N_{\theta_i}$	1,23	4,03	8,06	10,45	8,28	4,25
	$N_f$	22					
<b>A20F1Yi</b>	$P(\theta_i)$	0,6%	3,0%	11,1%	24,2%	32,4%	26,3%
	$N_{\theta_i}$	0,12	0,66	2,44	5,33	7,12	5,79
	$N_f$	32					
<b>A20F1Ze</b>	$P(\theta_i)$	2,8%	9,2%	20,3%	27,9%	25,5%	14,6%
	$N_{\theta_i}$	0,89	2,96	6,50	8,93	8,15	4,66
	$N_f$	15					
<b>A20F4Xe</b>	$P(\theta_i)$	2,9%	9,4%	20,4%	27,9%	25,3%	14,4%
	$N_{\theta_i}$	0,43	1,40	3,07	4,19	3,80	2,16
	$N_f$	35					
<b>A20F4Xi</b>	$P(\theta_i)$	5,4%	20,1%	34,9%	27,5%	9,8%	1,6%
	$N_{\theta_i}$	1,88	7,02	12,22	9,61	3,43	0,55
	$N_f$	27					
<b>A20F4Ye</b>	$P(\theta_i)$	4,0%	13,0%	25,2%	29,8%	20,4%	8,5%
	$N_{\theta_i}$	1,09	3,51	6,81	8,04	5,52	2,30
	$N_f$	14					
<b>A20F4Zi</b>	$P(\theta_i)$	0,2%	1,6%	8,0%	21,9%	34,7%	30,3%
	$N_{\theta_i}$	0,03	0,22	1,12	3,07	4,86	4,24
	$N_f$	36					
<b>A20F6Ye</b>	$P(\theta_i)$	3,5%	11,7%	23,2%	28,9%	22,8%	10,8%
	$N_{\theta_i}$	1,28	4,21	8,33	10,40	8,20	3,90
	$N_f$	24					
<b>A20F6Yi</b>	$P(\theta_i)$	0,1%	1,3%	7,1%	21,1%	35,3%	31,7%
	$N_{\theta_i}$	0,03	0,30	1,70	5,06	8,48	7,61
	$N_f$	29					
<b>A20F6Ze</b>	$P(\theta_i)$	1,9%	7,1%	17,0%	27,1%	27,8%	18,5%
	$N_{\theta_i}$	0,55	2,07	4,92	7,85	8,07	5,37
	$N_f$	42					
<b>A20F6Zi</b>	$P(\theta_i)$	3,3%	10,7%	22,4%	28,7%	23,5%	12,2%
	$N_{\theta_i}$	1,37	4,49	9,40	12,05	9,88	5,12

## ANNEX E

## VISTES DELS TESTIMONIS

En aquest annex s'adjunten 3 vistes de cada testimoni, on es poden divisar les fibres completes embegudes (en magenta) i les incompletes (en verd). Els eixos que s'indiquen són els corresponents als eixos locals del CAD. A la taula següent es mostra la correspondència entre els eixos del CAD de cada testimoni i els tres eixos de l'espai de les provetes.

Taula E.1 - Correspondència d'eixos entre els utilitzats en el CAD i els de les provetes

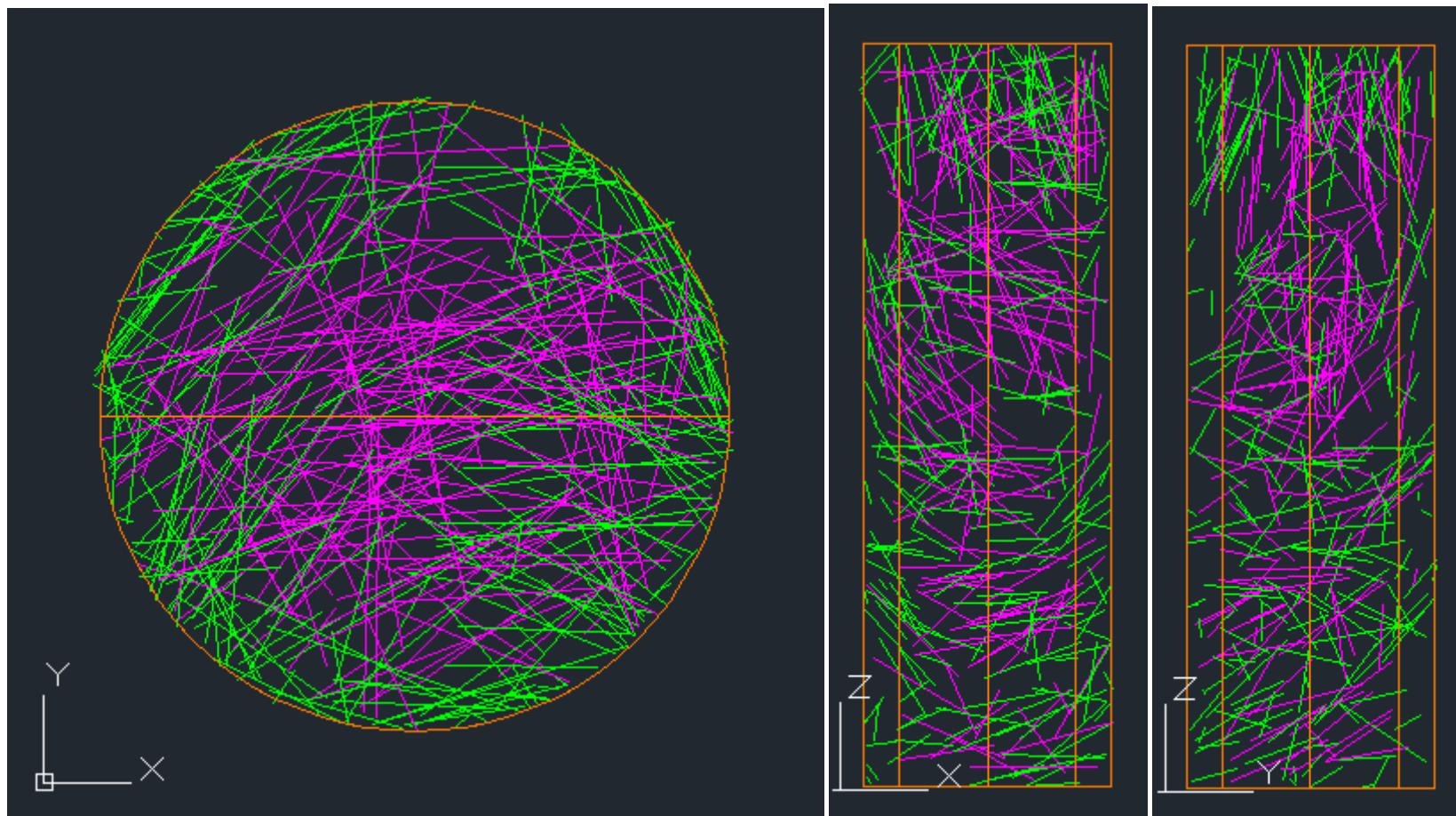
Proveta	F1				F4				F6			
Testimoni	A20F1Xe	A20F1Xi	A20F1Yi	A20F1Ze	A20F4Xe	A20F4Xi	A20F4Ye	A20F4Zi	A20F6Ye	A20F6Yi	A20F6Ze	A20F6Zi
Eix CAD	Z Y X	Z Y X	Y Z X	Y X Z	Z Y X	Z Y X	Y Z X	Y X Z	Y Z X	Y Z X	Y X Z	Y X Z
Eix proveta	X Y Z	X Y Z	X Y Z	X Y Z	X Y Z	X Y Z	X Y Z	X Y Z	X Y Z	X Y Z	X Y Z	X Y Z

## Testimoni A20F1Xe-A20F1Xi

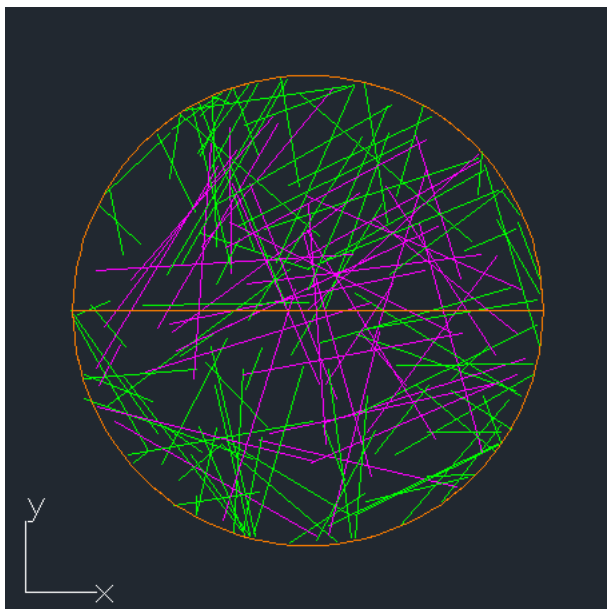
Planta X-Y

Alçat X-Z

Alçat Y-Z

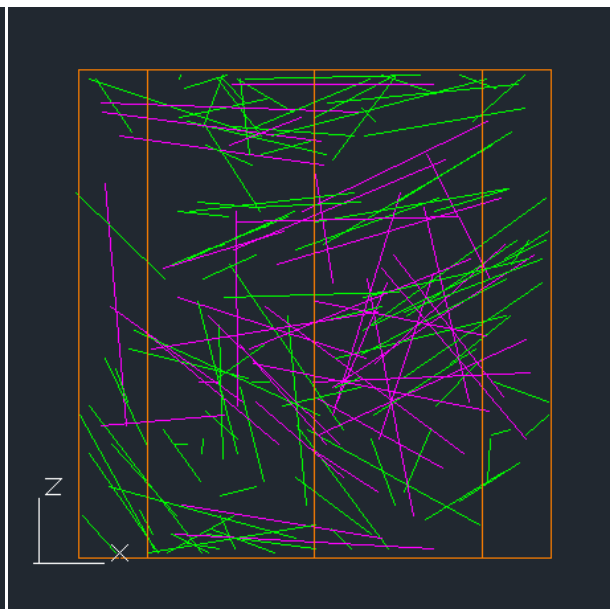


Planta X-Y

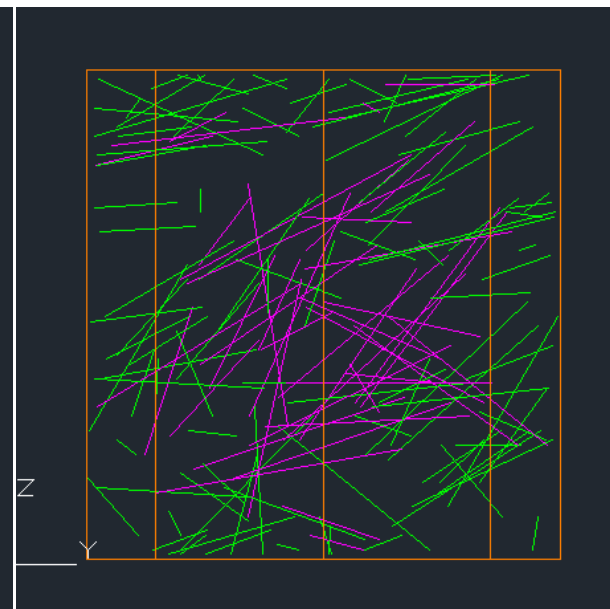


Testimoni A20F1Yi

Alçat X-Z

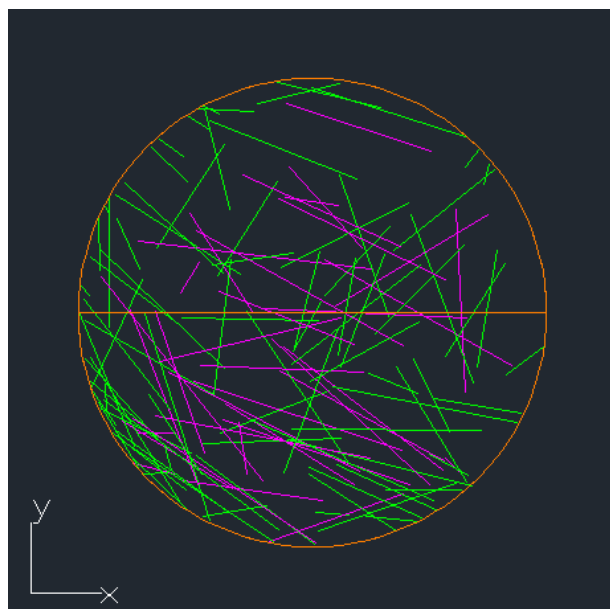


Alçat Y-Z

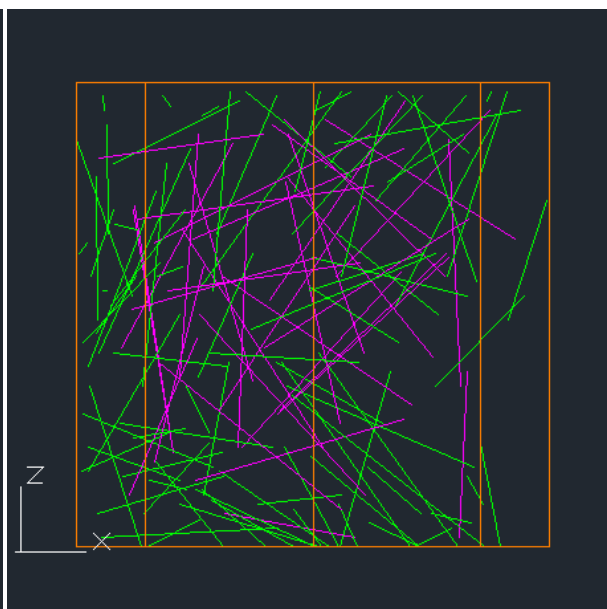


## Testimoni A20F1Ze

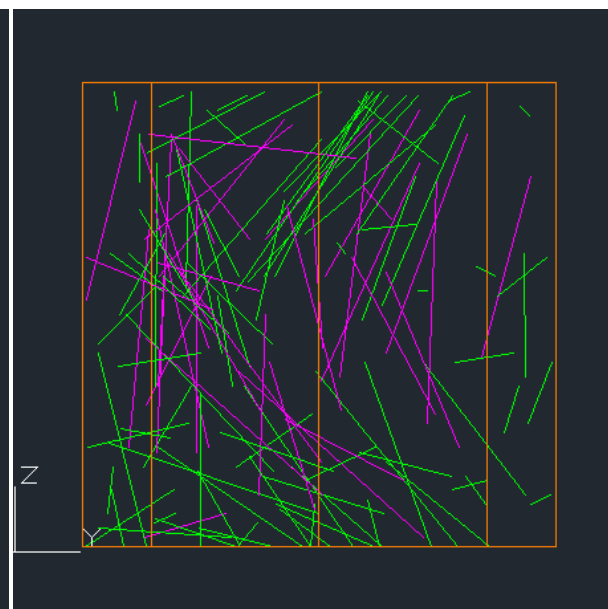
Planta X-Y



Alçat X-Z



Alçat Y-Z

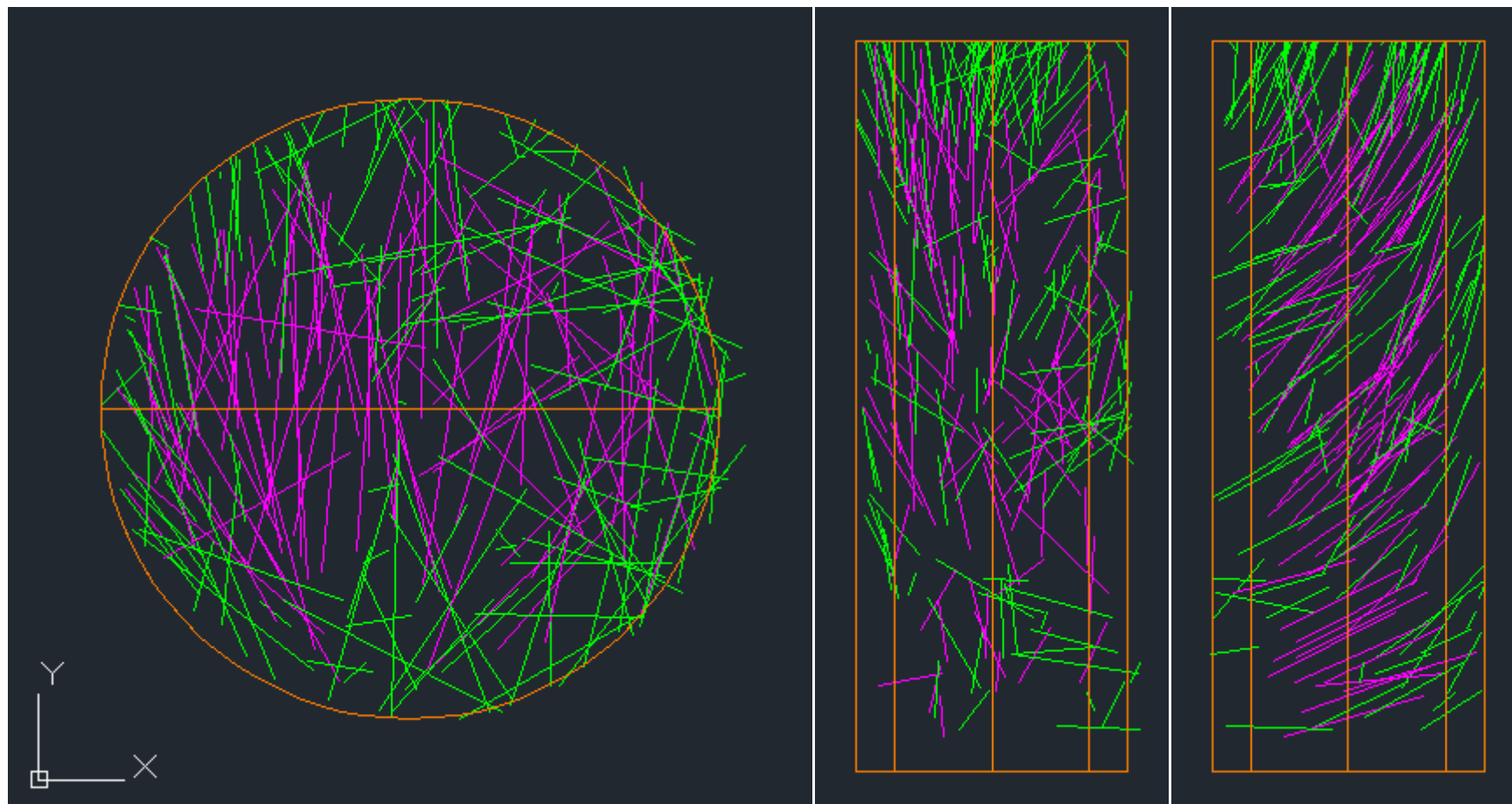


## Testimoni A20F4Xe-A20F4Xi

Planta X-Y

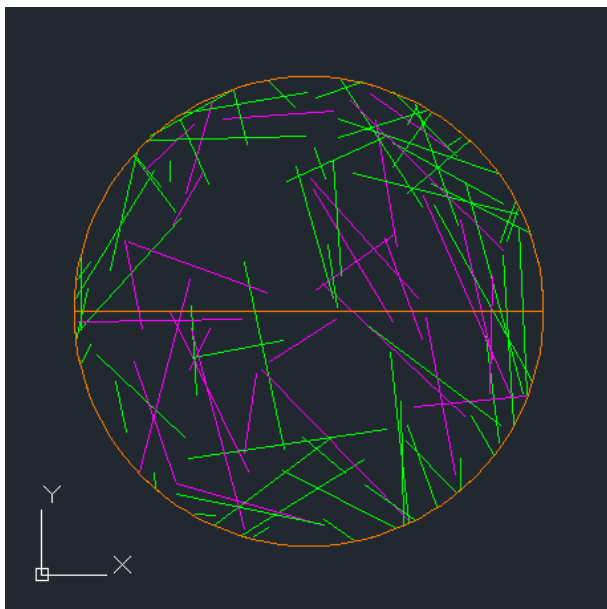
Alçat X-Z

Alçat Y-Z



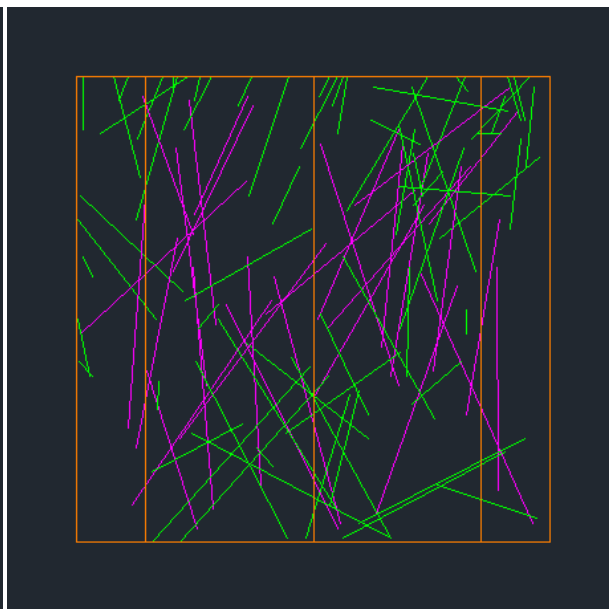


Planta X-Y

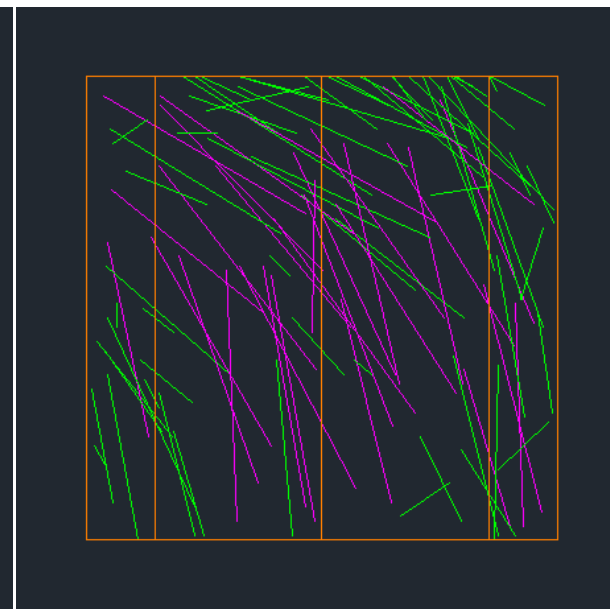


Testimoni A20F4Ye

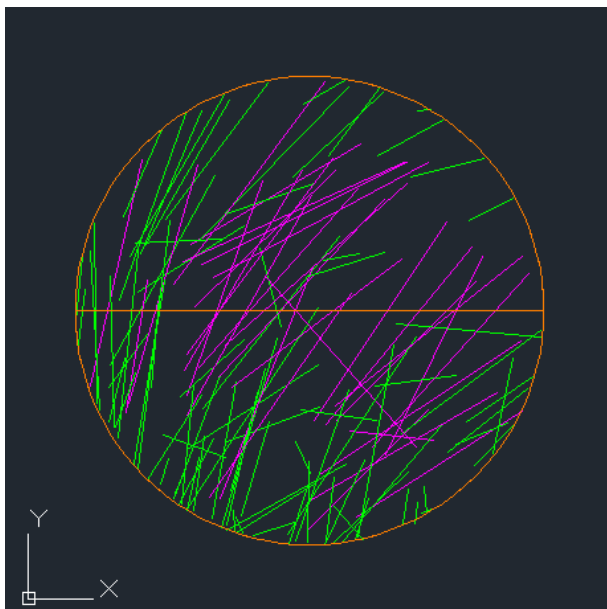
Alçat X-Z



Alçat Y-Z

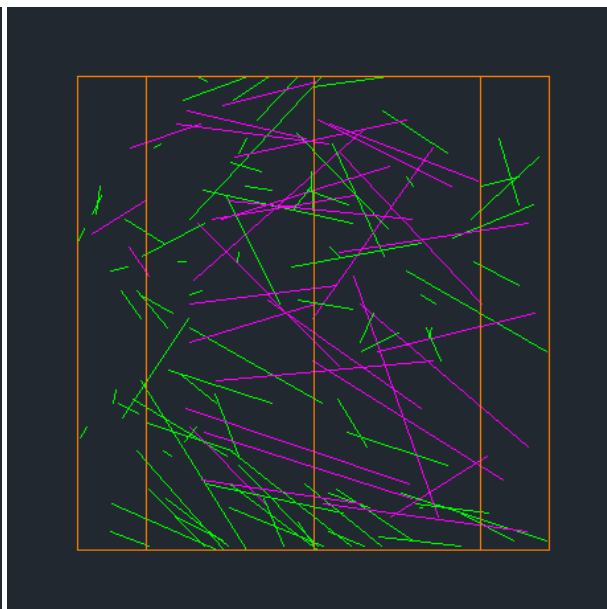


Planta X-Y

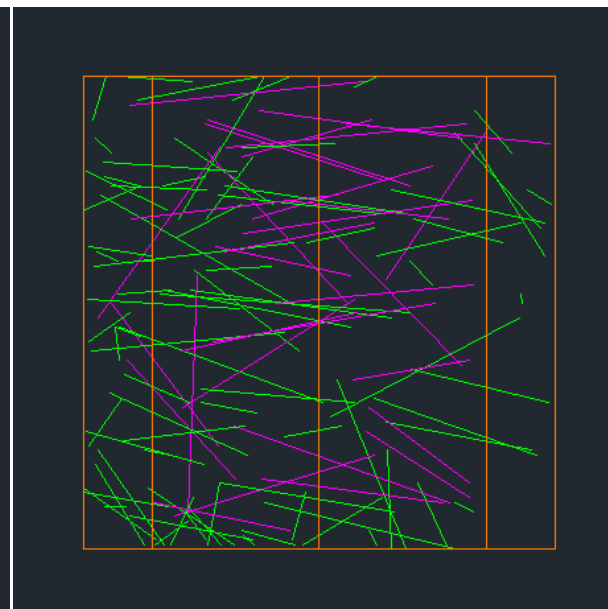


Testimoni A20F4Zi

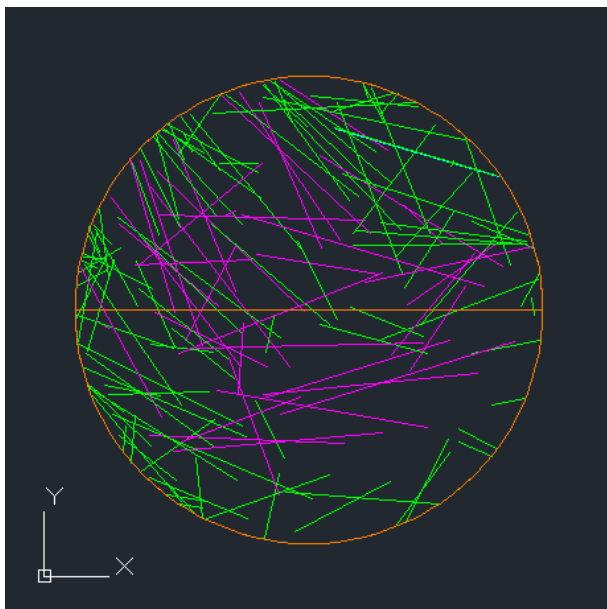
Alçat X-Z



Alçat Y-Z

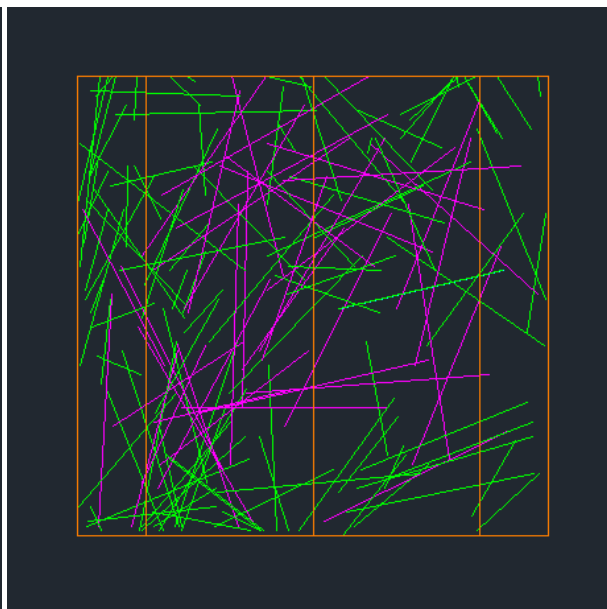


Planta X-Y

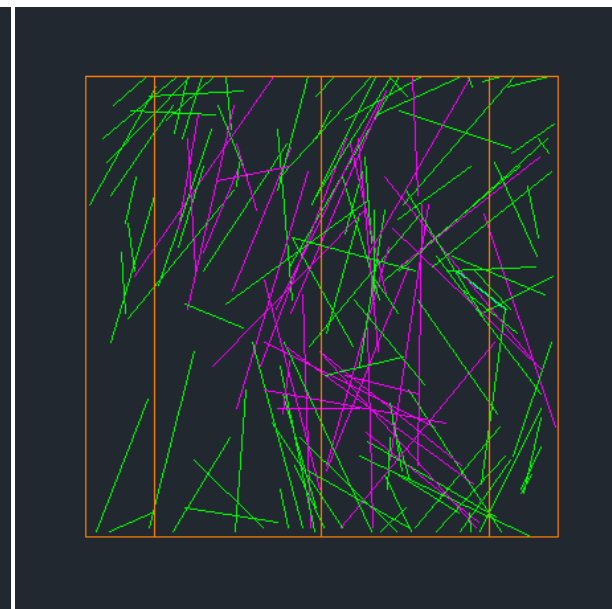


Testimoni A20F6Ye

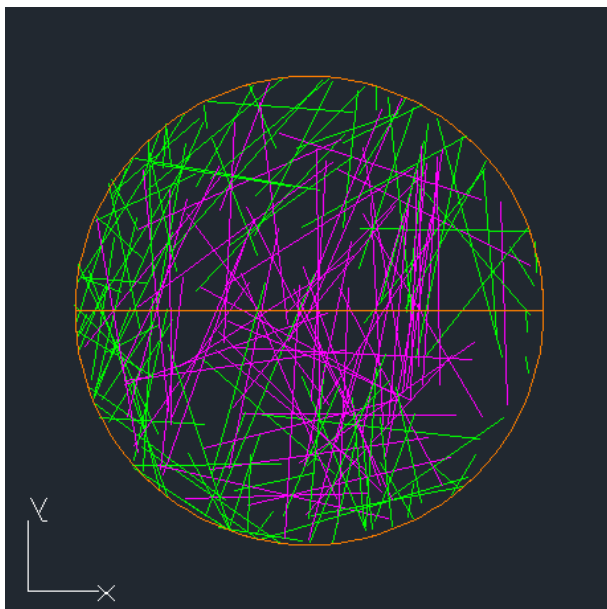
Alçat X-Z



Alçat Y-Z

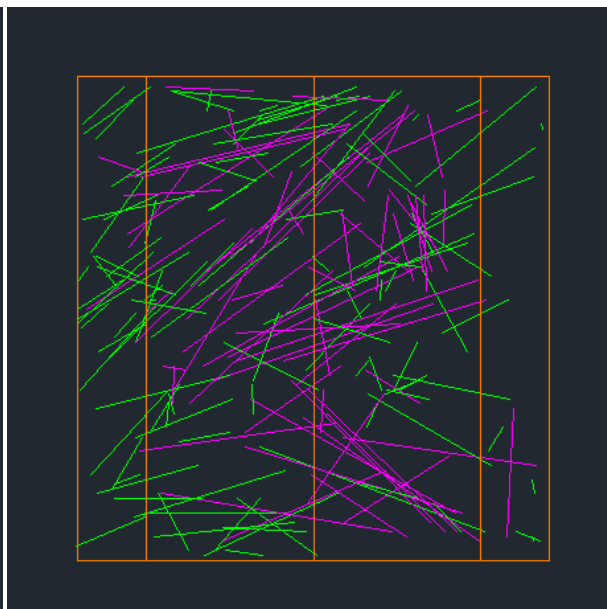


Planta X-Y

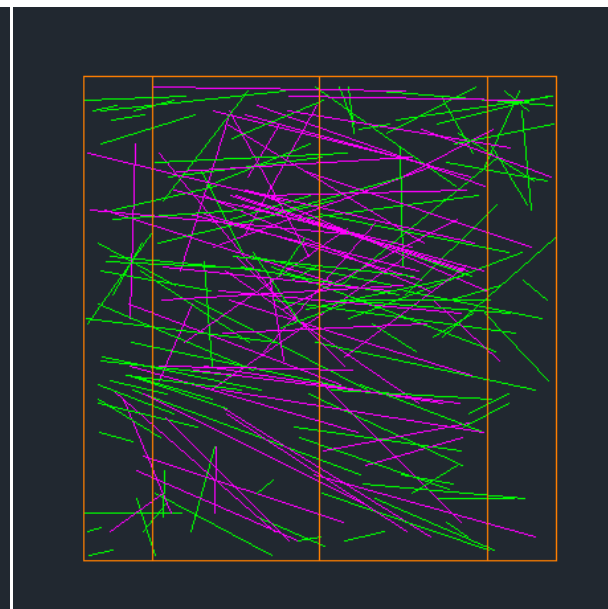


Testimoni A20F6Yi

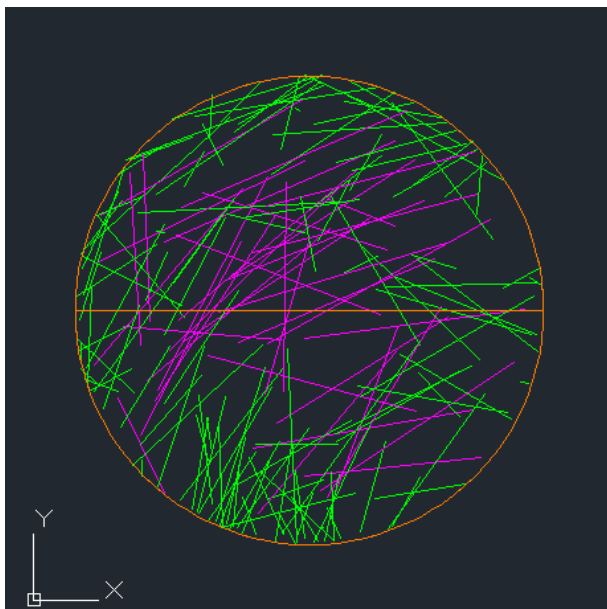
Alçat X-Z



Alçat Y-Z

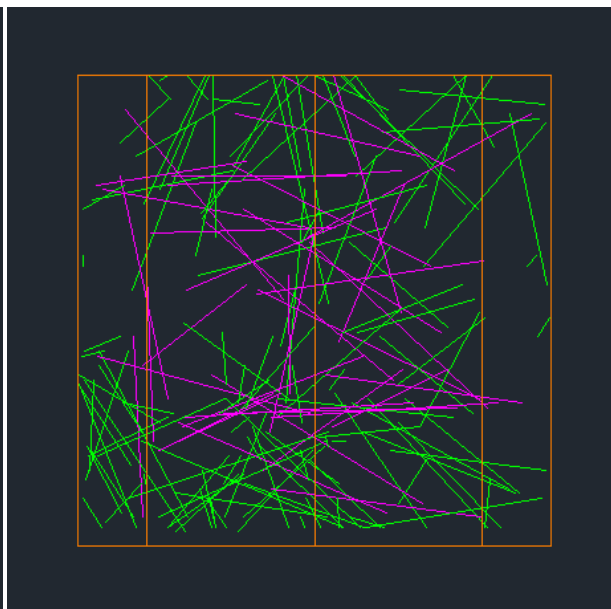


Planta X-Y

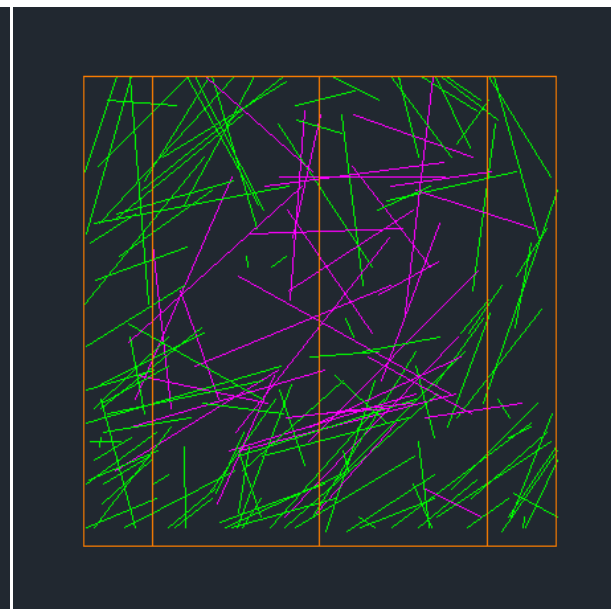


Testimoni A20F6Ze

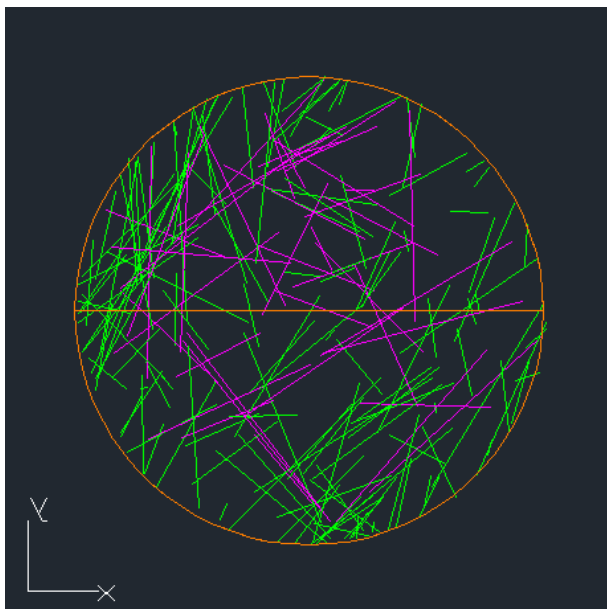
Alçat X-Z



Alçat Y-Z

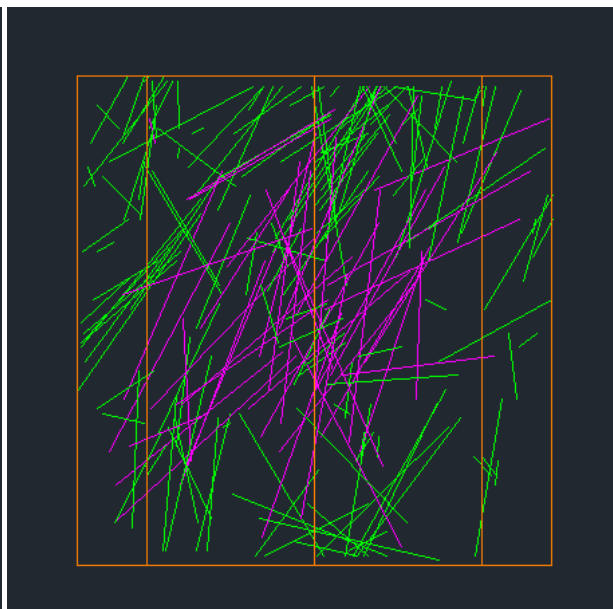


Planta X-Y

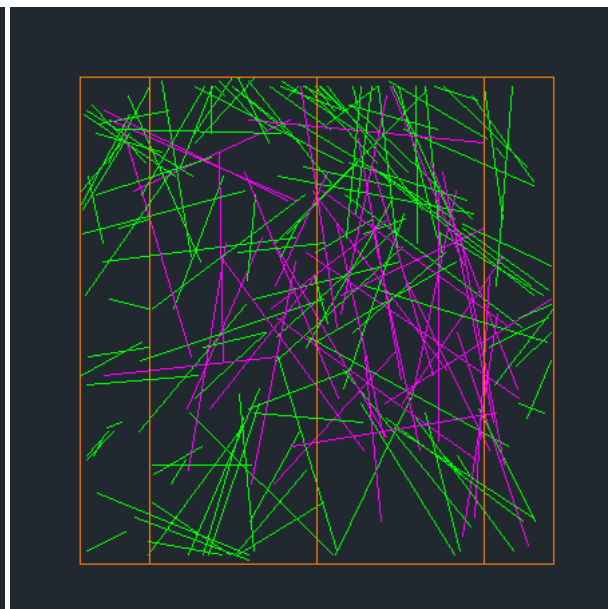


Testimoni A20F6Zi

Alçat X-Z



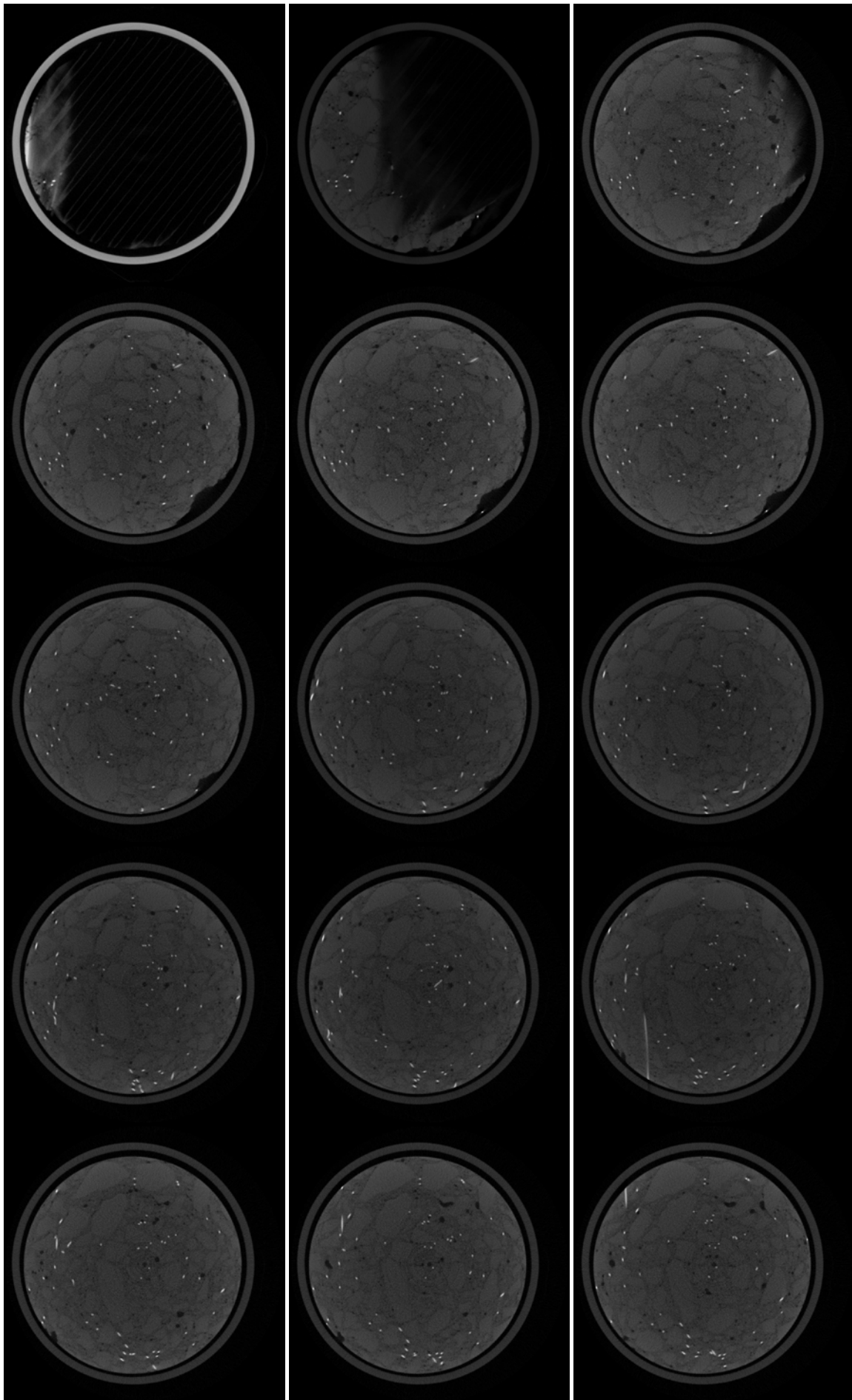
Alçat Y-Z



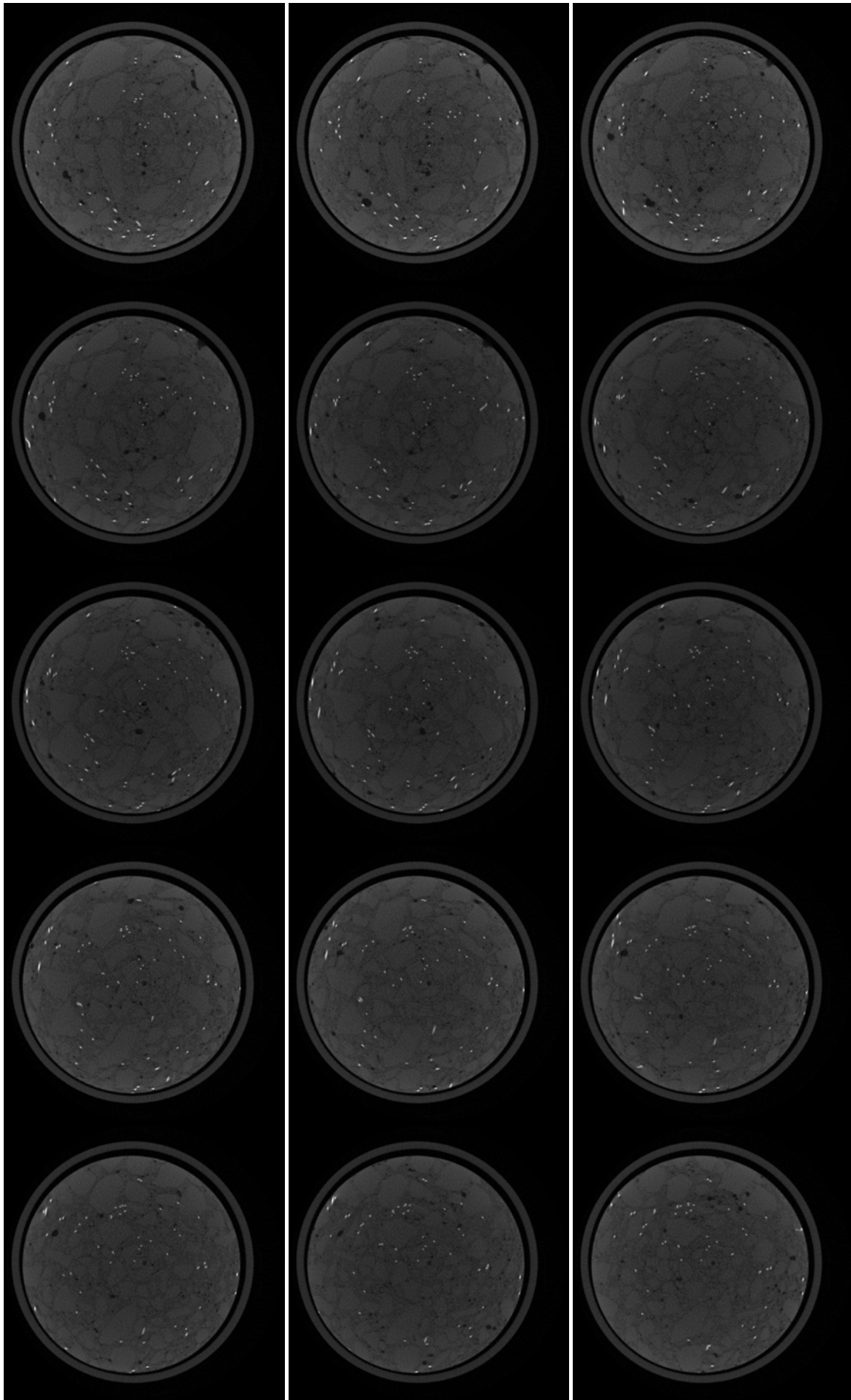
## ANNEX F

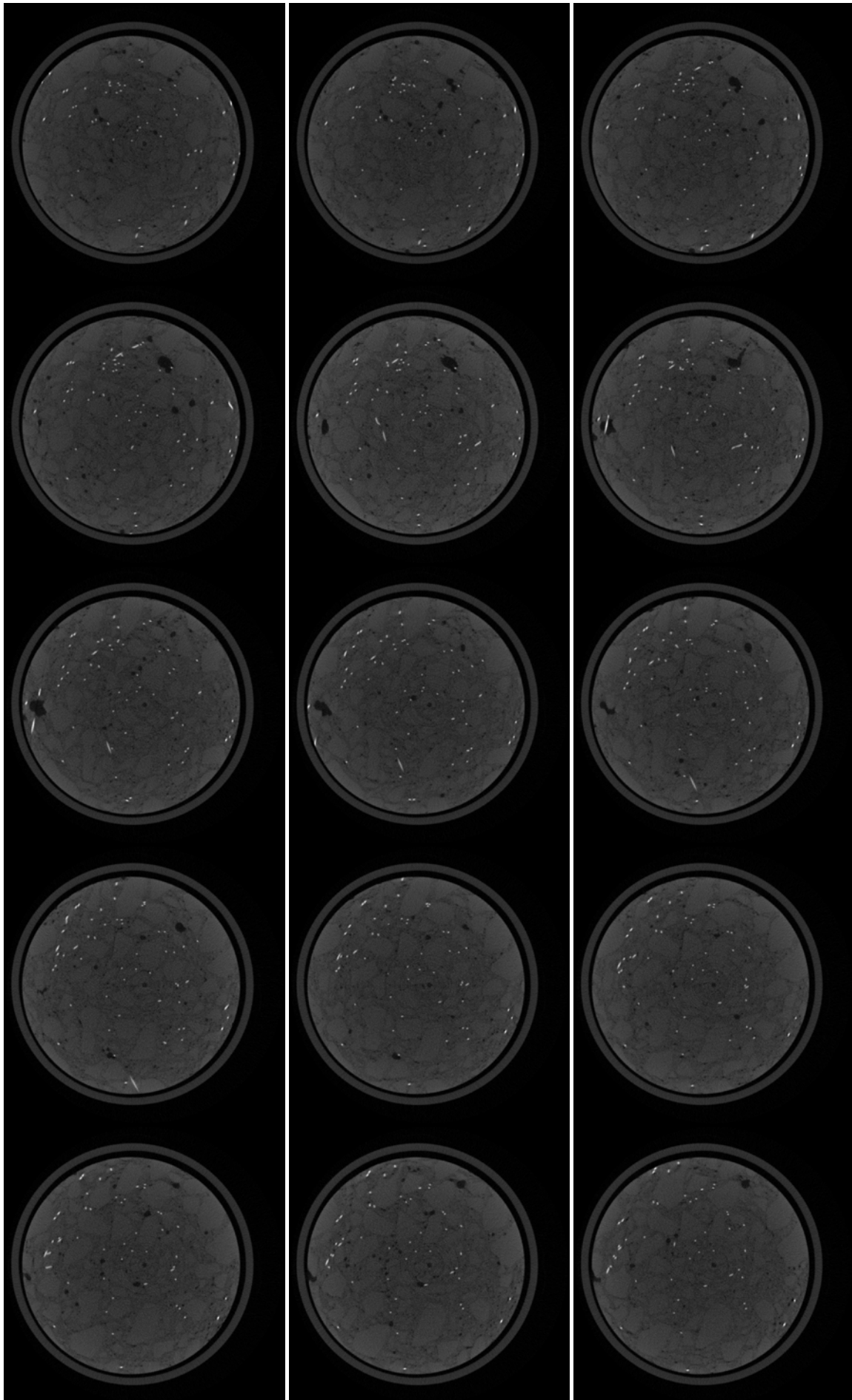
# TOMOGRAFIES

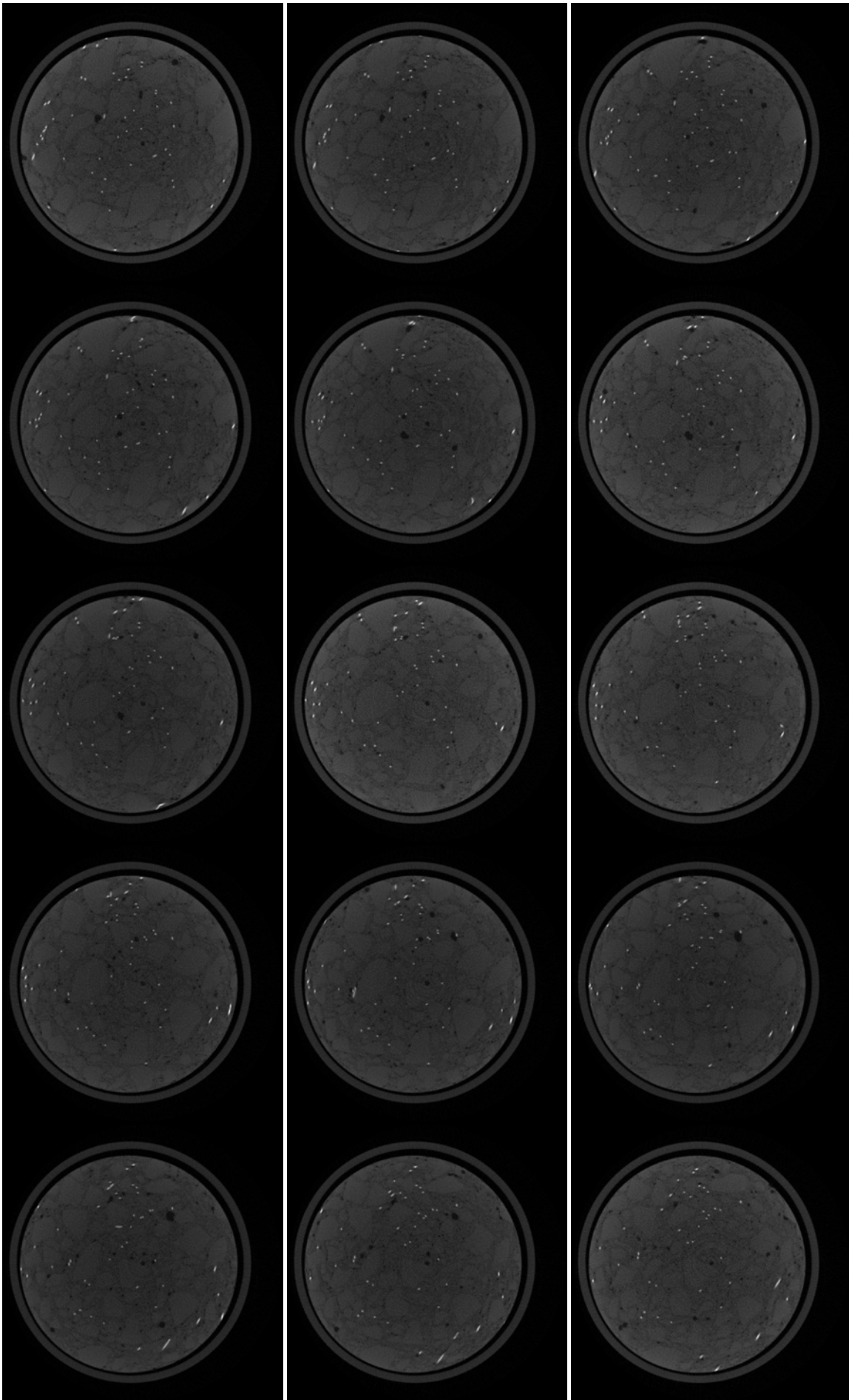
En aquest annex es presenta un exemple de la sèrie de tomografies que conformen un dels testimonis i que han permès obtenir les característiques geomètriques de les fibres embegudes. En concret, es correspon amb el testimoni A20F6Zi, el qual està caracteritzat per 104 tomografies. L'ordre de les tomografies és d'esquerra a dreta i de dalt a baix.

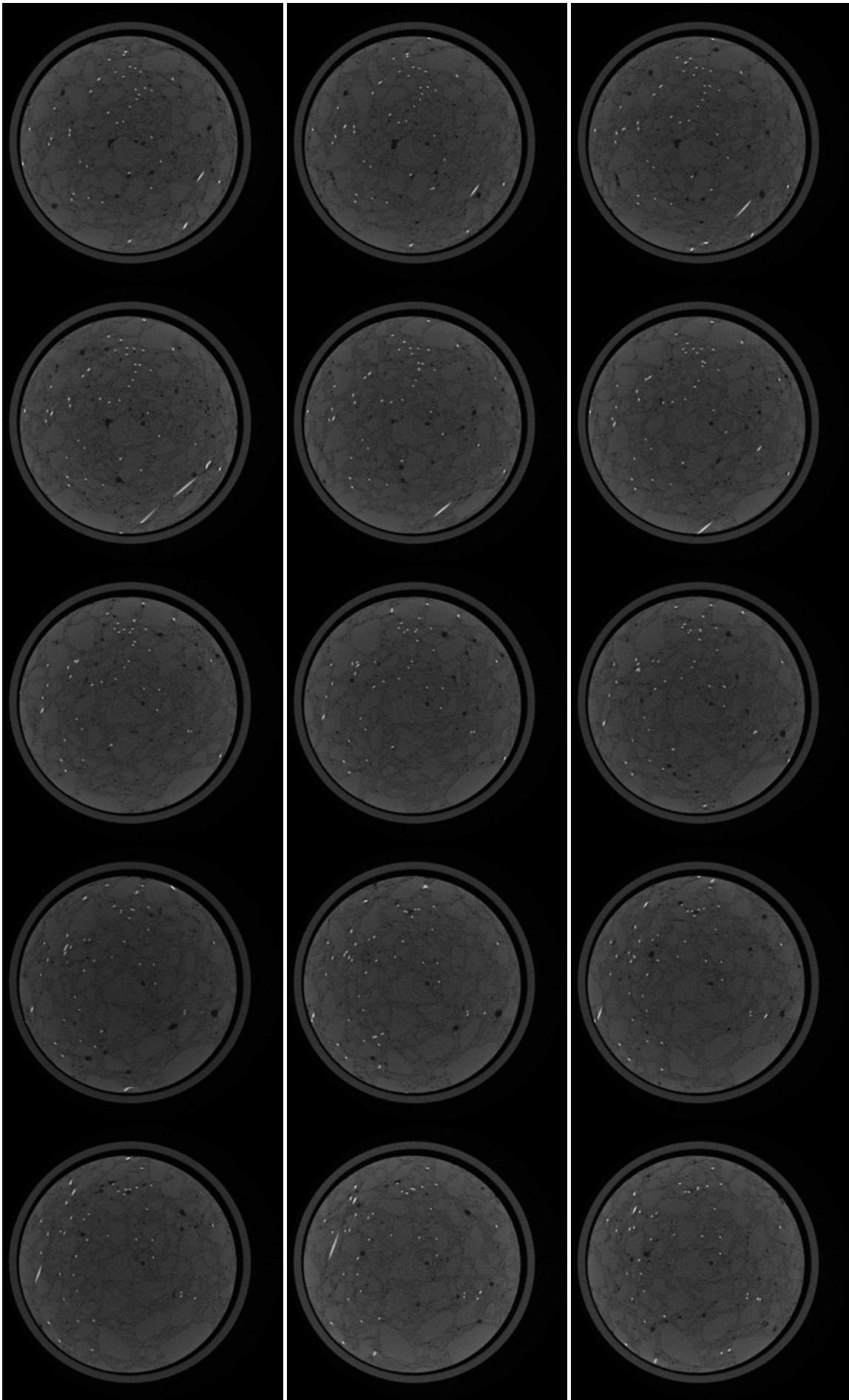


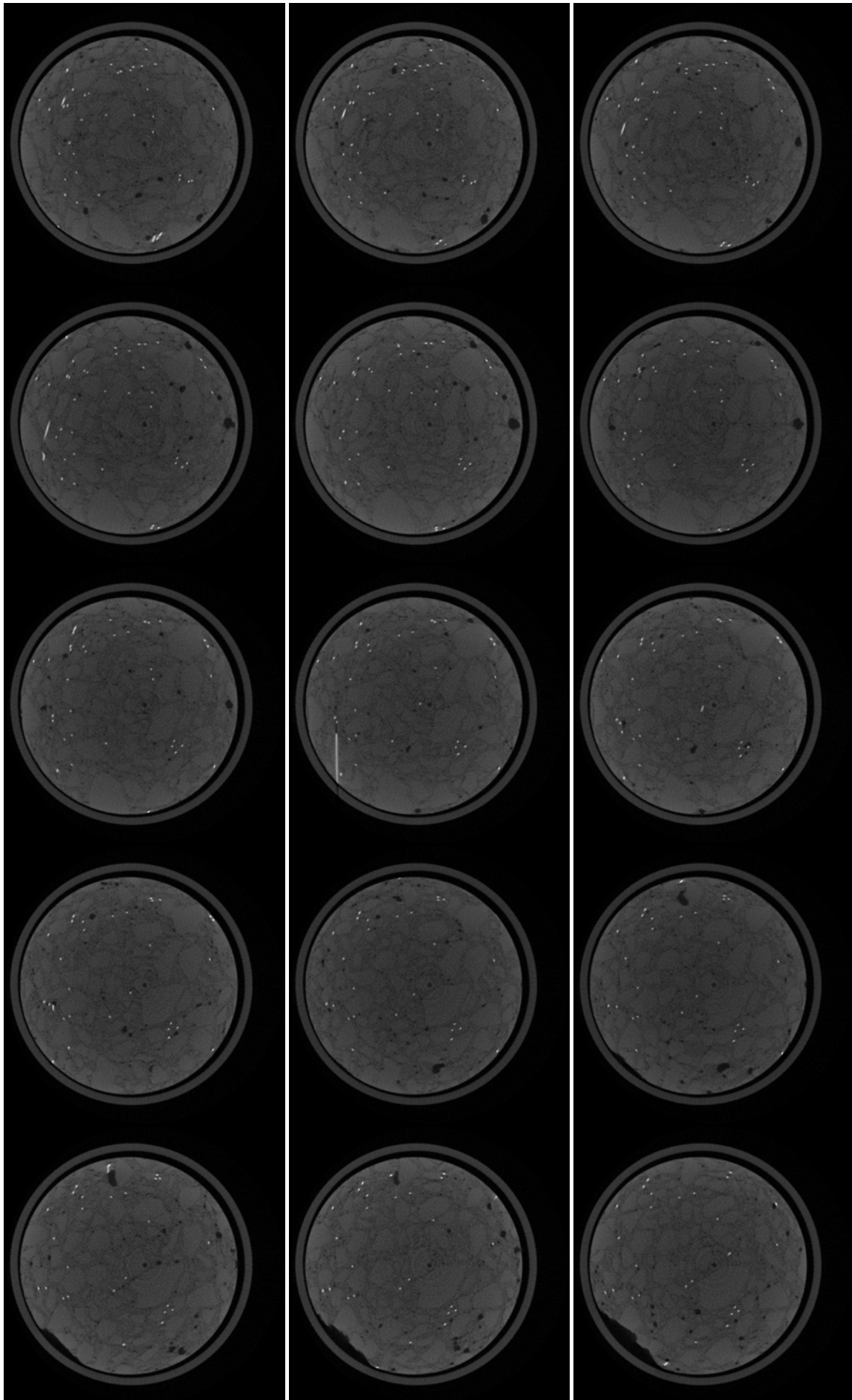




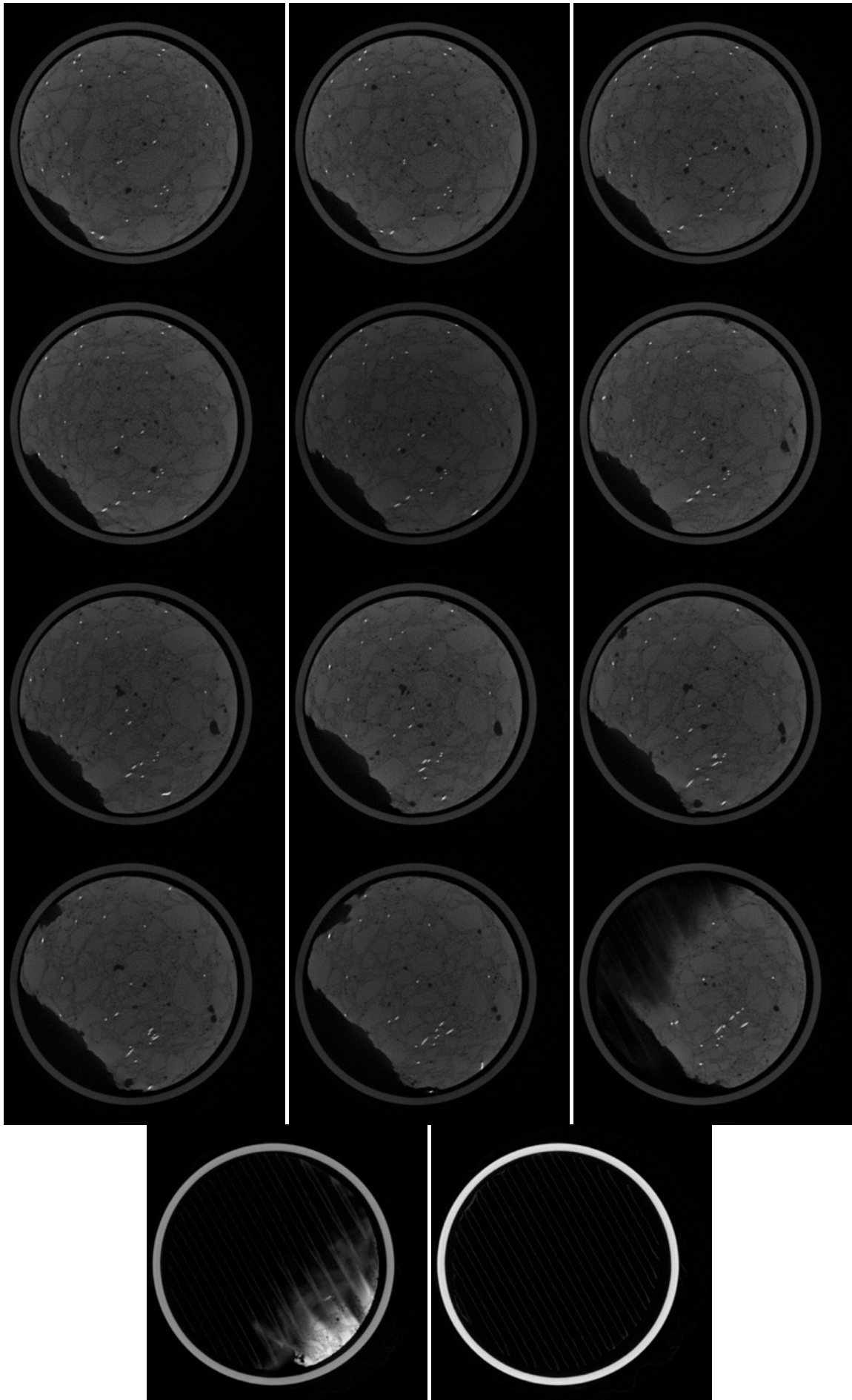












## REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

AENOR. *Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona*. UNE 83515. 2010.

AENOR. *Extracción y conservación de probetas testigo*. UNE 83505. 2004.

Barnett, S.; Lataste, J-F; Parry, T.; Millard, S.; Soutsos, M. Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength. *Materials and Structures*, 2010, vol. 43, p. 1009-1023.

Bekaert. Bekart Products and Applications: Concrete reinforcement. Disponible a: <http://www.bekaert.com/en/Product%20Catalog/Products/D/Dramix%20steel%20fibres%20for%20concrete%20reinforcement.aspx>

Blázquez, X. Caracterització experimental de l'arrencament de fibres d'acer en provetes de formigó. Tesina d'especialitat, ETSECCPB, UPC, 2009.

Cailleux, E.; Cutard, T.; Bernhart, G. Pullout of steel fibres from a refractory castable: experiment and modeling. *Mechanics of Materials*, vol. 37, p. 427-445.

Cement Admixtures Association. Cement Admixtures Association: Admixtures Types. Disponible a: <http://www.admixtures.org.uk/types.asp>

CEN. *Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality, residual)*. EN 14651. 2005.

Cho, B-S; Back, S-Y; Park H-J. Tensile properties of fiber reinforced concrete. *KCI Concrete Journal*, 2000, vol. 12, núm. 2, p. 85-93.

Construcgeek. Construcgeek: Rutina que exporta puntos de coordenadas de líneas a un archivo CSV. Disponible a: <http://www.construcgeek.com/recursos/rutina-que-exporta-puntos-de-coordenadas-lineas-un-archivo-csv>

Cunha, V.; Barros, J.; Sena-Cruz J.M. Pullout behavior of steel fibers in self-compacting concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 22, núm. 1, 2010, p. 1-9.

Dupont, D.; Vandewalle, L. Distribution of steel fibres in rectangular sections. *Cement & Concrete Composites*, 2005, vol. 27, p. 391-398.

EFNARC. *Especificaciones y directrices para el Hormigón autocompactable - HAC*, 2002.

Fantilli, A.; Mihashi, H.; Vallini, P. Effect of bond-slip on the crack bridging capacity of steel fibers in cement-based composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 20, núm. 9, 2008, p. 588-598.

Gettu, R.; Gardner, D.; Saldívar, H.; Barragán, B. Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens. *Materials and Structures*, 2005, vol. 38, p. 31-37.

Gopalaratnam, V.; Shah, S. Tensile failure of steel fiber-reinforced mortar. *Journal of Engineering Mechanics*, 1987, vol. 113, núm. 5, p. 635-652.

Grünewald, S. Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete. Tesi doctoral, Delft University of Technology, 2004.

Guàrdia, J.; Molins, C. Caracterització del comportament a tracció de formigó d'alta treballabilitat reforçat amb fibres d'acer mitjançant l'assaig Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya, 2008.

Kang, S.; Lee, B.; Kim, J-K; Kim, Y. The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 2011, vol. 25, p. 2450-2457.

Krause, M.; Hausherr, J.M.; Burgeth, B.; Herrmann, C.; Krenkel, W. Determination of the fibre orientation in composites using the structure tensor and local X-ray transform. *Journal of Materials Science*, 2010, vol. 45, p. 888-896.

Krenchel, H. Fibre spacing and specific fibre surface. A: Neville, A. *Fibre reinforced cement and concrete*. UK: The Construction Press, 1975, p. 69-79.

Laranjeira, F. Design-oriented constitutive model for steel fiber reinforced concrete. Tesi doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.

Laranjeira, F.; Aguado, A.; Molins, C. Predicting the pullout response of inclined hooked steel fibers. *Materials and Structures*, 2010, vol. 40, p. 1471-1487.

Laranjeira, F.; Aguado, A.; Molins, C. Predicting the pullout response of inclined straight steel fibers. *Materials and Structures*, 2010, vol. 43, p. 875-895.



Laranjeira, F.; Grünewald, S.; Walraven, J.; Blom, C.; Molins, C.; Aguado, A. Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete. *Materials and Structures*, 2011, vol. 44, p. 1093-1111.

Molins, C.; Aguado, A.; Guàrdia, J. Control de la resistencia a fisuración y tracción residual de HRFA mediante el ensayo Barcelona. *ACHE*, 2008, p. 215-216.

Molins, C.; Martínez, J.; Arnáiz, N. Distribución de fibras de acero en probetas prismáticas de hormigón. *ACHE*. 2008.

Okamura, H.; Ouchi, M. Self-compacting high performance concrete. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1998, vol. 1(4), p. 378-383.

Pompo, A.; Stupak, PR; Nicolais, L.; Marchese, B. Analysis of steel fibre pull-out from a cement matrix using video photography. *Cement & Concrete Composites*, vol. 18, p. 3-8.

Rhein Chemotechnik. Rhein Chemotechnik products: Concrete Superplasticizers. Disponible a: <http://www.rhein-chemotechnik.com/en/products/concrete-admixtures/for-concrete-precast-industry/concrete-superplasticizers.html>

RILEM. RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Bending test. *Materials and Structures*, 2002, vol. 35, p. 579-582.

RILEM. RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Uni-axial tension test for steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, 2001, vol. 34, p. 3-6.

Robins, P.; Austin, S.; Jones, P. Pull-out behaviour of hooked steel fibres. *Materials and Structures*, 2002, vol. 35, p. 434-442.

Schönlín, K. Determination of the orientation, the content and the distribution of the fibres in fibre reinforced concrete. *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 6, p. 168-171.

Tan, J.; Elliott, J.; Clyne, T. Analysis of tomography images of bonded fibre networks to measure distributions of fibre segment length and fibre orientation. *Advanced Engineering Materials*, 2006, vol. 8, núm 6, p. 495-500.

Van Gysel, A. Studie van het uittrekgedrag van staalvezels ingebed in een cementgebonden matrix met toepassing op staalvezelbeton onderworpen aan buiging. Tesi doctoral, Gent University, 2000.

Wang, Y.; Li, V.; Backer, S. Experimental determination of tensile behavior of fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 1990, vol. 87, núm. 5, p. 461-468.

Zerbino, R.; Tobes, J.M.; Bossio, M.E.; Giaccio, G. On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites*, 2012, vol. 34, p.191-200.