

CAPÍTOL 5

CONCLUSIONS I LÍNIES FUTURES D'INVESTIGACIÓ

5.1. INTRODUCCIÓ

En aquest capítol s'exposen les conclusions que es deriven dels diferents treballs realitzats durant la realització d'aquesta tesina. Aquestes conclusions es presenten en forma de conclusions generals i de conclusions específiques.

Les condicions generals responen al compliment dels objectius principals que han guiat el desenvolupament d'aquest estudi. Aquests s'han dirigit, en primer lloc, a estudiar la conveniència d'incorporar fibres sintètiques d'alt mòdul elàstic al formigó projectat per via humida per augmentar-ne la seva ductilitat. En segon lloc, en realitzar una comparació relativa del comportament del formigó projectat reforçat amb fibres sintètiques i el formigó projectat amb fibres metàl·liques en termes de tenacitat. En tercer lloc, en estudiar la idoneïtat dels assaigs de biga i placa per caracteritzar el formigó projectat reforçat amb fibres, i per últim, en analitzar i comparar els dos tipus d'assaigs de placa que s'han dut a terme en aquesta tesina.

Les conclusions específiques són conseqüència dels resultats concrets obtinguts en els diferents estudis que s'han realitzat. Aquestes conclusions són de caràcter particular i han de contemplar-se en el marc dels formigons utilitzats en aquest treball, pel què la seva extrapolació a d'altres formigons ha de ser contrastada en aquests.

Finalment, es presenten una sèrie de línies futures d'investigació que han sorgit en el transcurs d'aquest estudi, de manera que es segueixi profunditzant en el coneixement d'aquest material.

5.2. CONCLUSIONS GENERALS

La realització d'aquesta tesina m'ha servit per arribar a una sèrie de conclusions tècniques que es presenten a continuació:

1. La incorporació de fibres sintètiques d'alt mòdul elàstic en el formigó projectat pel procés per via humida, en dosificacions de $4,5 \text{ kg/m}^3$, incrementa substancialment la capacitat d'absorció d'energia després de produir-se la primera fissura (tenacitat).
2. La incorporació de fibres sintètiques d'alt mòdul elàstic confereix al formigó projectat una capacitat superior de suportar càrrega a grans deformacions, mentre que les fibres metàl·liques presenten una capacitat de suportar càrrega a petites deformacions sensiblement superior.
3. Els assaigs de placa són més adequats per caracteritzar, en termes de tenacitat, al formigó projectat reforçat amb fibres. Els assaigs de biga són poc recomanables, d'una banda perquè són poc representatius del comportament bidimensional del formigó projectat, i de l'altre per la gran dispersió que mostren els resultats obtinguts en l'anàlisi.
4. L'assaig de placa Australian Round Determinate Plate Test es presenta com l'assaig més adequat per a la realització del control de qualitat en obres on el formigó projectat reforçat amb fibres és un element important. Tanmateix, l'assaig EFNARC Plate Bending Test mostra, d'una manera més real, el comportament del formigó projectat gràcies al caràcter hiperestàtic d'aquest, pel què el fa més adequat en campanyes experimentals amb l'objectiu d'avaluar l'efecte de la incorporació de fibres al formigó projectat. D'altra banda, aquest assaig és molt més susceptible a les variacions d'espessor de la placa que no pas el RDP Test.

5.3. CONCLUSIONS ESPECÍFIQUES

5.3.1. Relatives al disseny de la mescla i al procés de projecció.

La metodologia de dosificació aplicada per determinar les proporcions de la mescla, proposada per Rodríguez (1997) té com a objectiu final uns valors de resistència a compressió (30 MPa), densitat ($2,3 \text{ kg/dm}^3$) i porositat determinats (10%). Aquest valors, en general, s'han assolit i superat.

La necessitat de grans volums de formigó per a la projecció dels plafons va obligar a la fabricació del formigó en planta, amb la consegüent manca de control sobre la fabricació d'aquest i sobretot, sobre la quantitat d'aigua afegida a la mescla. Això va implicar que la fluïdesa fos superior a la esperada, a causa de la possible presència d'una major quantitat d'aigua de la que es va obtenir a la dosificació teòrica. Aquest fet va suposar que els plafons es projectessin en posició horitzontal, i no pas en posició inclinada com es va preveure a la planificació de la campanya experimental.

Les conseqüències d'aquest canvi en el procés de projecció no són clares: l'elevada fluïdesa va provocar que el formigó no tingués el grau de compactació que seria esperable en aplicacions reals en obra, i que a l'hora de realitzar la projecció dels plafons, el formigó fluís. Aquest fenomen, tot i no desitjable, ens va ajudar en la preparació superficial dels plafons, aspecte fonamental en els assaigs de placa.

Un altre aspecte àmpliament tractat a la literatura consultada, així com en diferents normatives, és la influència de l'experiència de l'operador que realitza la projecció en la qualitat del producte final. Gràcies a la col·locació dels plafons en posició horitzontal, aquesta variable ja no intervenia en l'anàlisi dels resultats.

5.3.2. Relatives a la caracterització del formigó projectat.

La resistència a compressió mitja que la metodologia tenia com a objectiu era de 30 MPa a 28 dies. Els tres tipus de formigó fabricats han mostrat resistències superiors, compresos entre els 33 MPa en el formigó de control, 34 MPa del FPFS i 36 MPa del FPFM. L'explicació per a aquests valors la podem trobar en el percentatge de microsilíce introduït en substitució de ciment a la dosificació de la mescla. Aquesta variable no es té en compte en la metodologia de dosificació, però molts autors en recomanen el seu ús per millorar-ne la compacitat i densitat.

Els resultats de compressió simple mostren un efecte poc significatiu de la incorporació de fibres sintètiques d'alt mòdul elàstic en el formigó projectat per via humida, amb petits augments del 2-3% respecte el formigó de control. Aquest augment és superior en el formigó projectat amb fibres metàl·liques, obtenint-se millores avaluades entre un 7 i un 11% respecte el formigó de control.

Els resultats de la determinació del mòdul d'elasticitat tampoc mostren una influència significativa de l'addició de fibres, tant sintètiques com metàl·liques, en el formigó projectat per via humida. A falta de dades a més llarg plaç, les petites variacions dels resultats obtinguts a 120 dies ens indiquen que a l'edat de 28 dies ja es podria avaluar el mòdul d'elasticitat del material de manera quasi definitiva.

L'estudi de l'estimació del mòdul elàstic a partir de la resistència mitja a compressió simple segons la formulació proposada a la "Instrucción de Hormigón Estructural", mostra que les fórmules són aplicables al formigó projectat, tot i que caldria establir fórmules especials per aquest material.

Els valors obtinguts de porositat (13%), paràmetre fonamental tant en la resistència a compressió com en la determinació del mòdul d'elasticitat, són lleugerament superiors als esperats segons la metodologia de dosificació utilitzada (10%). Aquest increment de la porositat és perfectament justificable per la incorporació de fibres en la mostra, i es troba per sota del 17% que es marca com a límit en la literatura consultada. Això ens permet assegurar la bona qualitat del formigó projectat utilitzat en la campanya experimental.

Els resultats sobre densitat presenten valors lleugerament inferiors als esperats segons la metodologia de dosificació ($2,3 \text{ kg/dm}^3$), amb valors de $2,18 \text{ kg/dm}^3$. Aquests resultats poden explicar-se per la introducció d'aire associat a la incorporació de fibres.

5.3.3. Relatives a l'estudi de la retracció per assecat.

L'estudi de la retracció per assecat del formigó projectat reforçat amb fibres es va realitzar sobre elements tipus provetes, tot i que alguns autors com Lascorz, Agulló i Garcia (2002), en recomanen l'estudi d'aquesta propietat directament sobre placa, a causa de la major simplicitat i menor dispersió dels resultats obtinguts.

Els valors de retracció per assecat en un formigó projectat són de l'ordre del doble als obtinguts en el formigó convencional, per una mateixa resistència característica de disseny. Aquest fenomen ve determinat per la major quantitat de ciment (25 – 35 % superior) i de fons, requisits indispensables per assegurar un bon transport del material a través de la mànega. Això provoca una major demanda d'aigua afavorint un assecat més ràpid, donant lloc a problemes associats a l'aparició de fissures en superfície.

L'addició de fibres sintètiques d'alt mòdul elàstic en el formigó projectat per via humida no presenta reduccions significatives de la retracció per assecat. Aquest valor, proper al 4% respecte el formigó de control (sense fibres), representa un valor poc important si es compara amb el 20% de reducció de retracció per assecat que van presentar les provetes de formigó projectat reforçat amb fibres metàl·liques respecte el formigó de control. Tanmateix, aquests resultats concorden amb els obtinguts en els assaigs de placa, on es pot observar que les fibres metàl·liques mostren un millor comportament a petites deformacions.

5.3.4. Relatives a la realització dels assaigs de placa.

- **Assaig EFNARC Plate Bending Test.**

Una de les variacions que es va decidir dur a terme respecte les especificacions de l'assaig va ser la orientació de la placa. L'EFNARC indica que la càrrega s'ha d'aplicar sobre la cara regular, i que per tant la cara irregular (cara vista en una projecció real) és la que s'ha de recolzar sobre el bastidor. La base teòrica de l'assaig ho requereix perquè aquesta és la posició en la que treballaria el formigó projectat en una aplicació real.

D'altra banda és indispensable per la bona realització de l'assaig que la placa estigui simplement recolzada en tot el seu perímetre, aspecte molt difícil d'aconseguir sense una preparació prèvia de la placa. A la literatura consultada es recomana col·locar una capa de morter de gruix variable en tot el perímetre en contacte amb el bastidor per aconseguir aquesta regularitat en el recolzament. Aquesta solució, que implica un gran esforç i temps, no va resultar ser adequada, doncs després de realitzar la preparació amb morter, el recolzament seguia sent completament irregular. Per tant, es va optar per girar la placa i col·locar la cara en contacte amb el motlle a la part inferior, juntament amb

unes làmines de tefló en tot el perímetre per acabar d'eliminar l'efecte de les petites irregularitats que hi poguessin existir.

Aquesta solució, tot i que discutible, va resultar efectiva, i l'anàlisi comparatiu dels dos tipus de placa no es veia afectat perquè totes les plaques es van assajar seguint el mateix procediment.

Un altre dels aspectes que es va intentar estudiar era el moviment que patia la placa durant l'assaig, així com l'efecte de la col·locació del tefló en el valor de la fletxa del punt central. Per fer-ho, es van col·locar 4 lvdts a la cara superior, però els resultats obtinguts no permeten enunciar cap conclusió sobre aquest tema, a causa de la difícil interpretació d'aquests.

- **Assaig Australian Round Determinate Plate Test.**

L'assaig Australian Round Determinate Plate Test presenta un desavantatge clar respecte l'anterior. Existeix la possibilitat de la placa no trenqui en tres parts, i per tant que l'assaig quedi invalidat. Aquesta problemàtica es veu compensada per la major simplicitat de l'assaig, tant pel que fa a manipulació de les plaques com a la interpretació dels resultats obtinguts.

El seu caràcter isostàtic el fa menys dependent de la homogeneïtat de la placa en quan al seu espessor, i en facilita molt més la col·locació i assaig, doncs no és necessària cap preparació superficial de la placa.

5.4. LÍNIES FUTURES D' INVESTIGACIÓ.

La tecnologia del formigó projectat, basada fonamentalment en l'experiència pràctica del dia a dia a l'obra, presenta grans possibilitats d'investigació. Si ens centrem en l'àmbit en el que s'ha realitzat aquesta tesina, la investigació sobre l'efecte de la incorporació de fibres sintètiques d'alt mòdul elàstic en el formigó projectat per via humida, les futures línies d'investigació són nombroses.

Per continuar estudiant en termes de capacitat d'absorbir energia després de produïda la primera fissura (tenacitat), s'ha d'estudiar l'efecte de la incorporació de fibres sintètiques en el formigó projectat per via humida amb diferents dosificacions, amb l'objectiu d'establir una dosificació equivalent entre les fibres sintètiques i les fibres metàl·liques. D'aquesta manera podrien realitzar-se comparacions entre el comportament dels dos tipus de fibres en termes de tenacitat en valors absoluts, podent-se establir límits d'ús en termes de rendibilitat econòmiques, o establir rangs de dosificacions de fibres sintètiques per cada una de les determinades aplicacions.

Complementàriament a les dades d'energia absorbida seria interessant dur a terme un control de fissuració de les plaques assajades, per tal de poder establir una seqüència real del procés de fissuració, així com una mesura de l'obertura de cada una de les fissures al mateix temps que es controla la fletxa del punt central. D'aquesta manera, es podria analitzar amb més fiabilitat el comportament bidimensional del formigó projectat.

Pel què fa a la dosificació, seria molt interessant realitzar noves campanyes experimentals amb una dosificació de la mescla que permetés dur a terme la projecció sobre plafons col·locats verticalment, doncs la representativitat del producte final obtingut seria superior.

Una de les propietats fonamentals del formigó projectat amb fibres és el rebot d'aquestes. Es recomana el desenvolupament de nous estudis específics sobre aquesta propietat amb diferents dosificacions de la mescla, així com varies dosificacions de fibres. La justificació d'aquests estudis és clarament econòmica, doncs les fibres són el component més car de la mescla.

Seria també interessant realitzar una nova campanya experimental per tal de continuar estudiant l'efecte de la incorporació de les noves fibres sintètiques en termes de retracció per assecat, usant en aquest cas plafons de formigó projectat en lloc de provetes cilíndriques per a la seva mesura.

Es recomana continuar l'estudi de la influència de la incorporació de les fibres sintètiques en aspectes com la porositat, a causa de la importància que aquest paràmetre té en la resistència a compressió i en la determinació del mòdul d'elasticitat del material.

Per últim, es recomana el desenvolupament de nous estudis sobre l'efecte de la incorporació de les noves fibres sintètiques d'alt mòdul elàstic en el formigó projectat per via humida davant de d'accions dinàmiques o d'impacte, tot comparant el comportament amb el conferit per l'addició de fibres metàl·liques.