

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Títol:** Estudi comparatiu dels models de predicció d'obertura de fissura en estructures de formigó armat amb materials compostos (FRP)

**Document:** Memòria i annexos

**Alumne:** Roger Fluvià Ayats

**Tutor:** Cristina Barris Peña

**Departament:** Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

**Àrea:** Mecànica de Medis Continus i Teoria de les Estructures

**Convocatòria (mes/any):** Febrer 2018

## ÍNDEX

1	INTRODUCCIÓ .....	1
1.1	Antecedents .....	1
1.2	Objecte.....	2
1.3	Abast.....	2
2	ESTAT DE L'ART .....	4
2.1	Estructura de formigó.....	4
2.2	Materials compostos de matriu polimèrica (FRP) .....	5
2.3	Estructures de formigó armat amb FRP.....	7
2.4	Fissuració en elements de formigó armats amb FRP .....	8
2.5	Normatives.....	12
2.5.1	ACI 440.1R-06 .....	13
2.5.2	ISIS Canada .....	15
2.5.3	Eurocodi 2.....	17
2.6	Comparació dels models de càlcul de l'obertura de fissura .....	22
2.6.1	Comparació entre els models de càlcul d'amplada de fissura de l'ACI 440 i l'ISIS .....	23
2.6.2	Comparació entre els models de càlcul d'amplada de fissura dels EC2.....	23
3	PLANTEJAMENT DE L'ESTUDI.....	27
3.1	Metodologia emprada .....	27
3.2	Procediment de càlcul .....	28
3.3	Paràmetres.....	30
4	ANÀLISI DE RESULTATS.....	32
4.1	Anàlisi de la influència de diferents paràmetres sobre $k_b$ segons la normativa ACI 440.....	32
4.1.1	$k_b - \emptyset$ .....	32
4.1.2	$k_b - \text{acabat superficial}$ .....	41
4.1.3	$k_b - n \cdot \rho$ .....	42
4.1.4	$k_b - d/h$ .....	43
4.2	Anàlisi de la influència de diferents paràmetres sobre $k_b$ segons la normativa ISIS .....	44
4.2.1	$k_b - \emptyset$ .....	44
4.2.2	$k_b - \text{acabat superficial}$ .....	52
4.2.3	$k_b - n \cdot \rho$ .....	52
4.2.4	$k_b - d/h$ .....	54

4.3	Anàlisi de la variància del factor acabat superficial.....	54
4.3.1	Descomposició de la Suma de Quadrats. Test F .....	55
4.3.2	Taula resum de l'ANOVA .....	59
4.3.3	Anàlisi de resultats de la variància del factor acabat superficial per les normatives ACI 440 i ISIS 60 .....	
4.4	Anàlisi comparatiu dels resultats teòrics i experimentals d'amplada de fissura .....	63
4.4.1	Amplada de fissura a la fibra més traccionada de la secció .....	63
4.4.2	Amplada de fissura a l'alçada del reforç .....	67
5	RESUM DEL PRESSUPOST .....	72
6	CONCLUSIONS.....	73
7	RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	75
8	BIBLIOGRAFIA.....	76
	ANNEX A. COEFICIENT D'ADHERÈNCIA EN FUNCIÓ DE DIFERENTS PARÀMETRES .....	79
A.1.	Normativa ACI 440 .....	79
A.1.1.	Coeficient d'adherència en funció de $n \cdot p$ .....	79
A.1.2.	Coeficient d'adherència en funció de $d/h$ .....	82
A.2.	Normativa ISIS Canada .....	85
A.2.1.	Coeficient d'adherència en funció de $n \cdot p$ .....	85
A.2.2.	Coeficient d'adherència en funció de $d/h$ .....	88
	ANNEX B. RESULTATS TEÒRICS OBTINGUTS PER A DE CADASCUNA DE LES NORMATIVES SOBRE ELS VALORS EXPERIMENTALS .....	92
B.1.	Resultats obtinguts per a les normatives ACI 440 i ISIS Canada .....	92
B.1.1.	Gràfics obtinguts per l'article Pecce <i>et al.</i> 2000.....	92
B.1.2.	Gràfics obtinguts per l'article Thériault & Benmokrane 2000 .....	93
B.1.3.	Gràfics obtinguts per l'article Lee <i>et al.</i> 2010 .....	97
B.1.4.	Gràfics obtinguts per l'article Kassem <i>et al.</i> 2011.....	99
B.1.5.	Gràfics obtinguts per l'article Barris <i>et al.</i> 2013.....	104
B.1.6.	Gràfics obtinguts per l'article Noël & Soudki 2014 .....	108
B.1.7.	Gràfics obtinguts per l'article Mias <i>et al.</i> 2015 .....	110
B.1.8.	Gràfics obtinguts per l'article Adam <i>et al.</i> 2015 .....	113
B.1.9.	Gràfics obtinguts per l'article El-Nemr <i>et al.</i> 2016.....	116
B.1.10.	Gràfics obtinguts per l'article Barris <i>et al.</i> 2017.....	122
B.2.	Resultats obtinguts per a les normatives EC2-92 i EC2-04.....	127
B.2.1.	Gràfics obtinguts per l'article Pecce <i>et al.</i> 2000.....	127
B.2.2.	Gràfics obtinguts per l'article Thériault & Benmokrane 2000 .....	128

B.2.3. Gràfics obtinguts per l'article Lee <i>et al.</i> 2010 .....	132
B.2.4. Gràfics obtinguts per l'article Kassem <i>et al.</i> 2011.....	133
B.2.5. Gràfics obtinguts per l'article Barris <i>et al.</i> 2013.....	138
B.2.6. Gràfics obtinguts per l'article Noël & Soudki 2014 .....	143
B.2.7. Gràfics obtinguts per l'article Mias <i>et al.</i> 2015 .....	145
B.2.8. Gràfics obtinguts per l'article Adam <i>et al.</i> 2015 .....	148
B.2.9. Gràfics obtinguts per l'article El-Nemr <i>et al.</i> 2016.....	151
B.2.10. Gràfics obtinguts per l'article Barris <i>et al.</i> 2017.....	156
ANNEX C. PRESSUPOST .....	161

## 1 INTRODUCCIÓ

### 1.1 Antecedents

El formigó és el material de construcció resultant de la mescla de ciment amb grava (àrids gruixuts), sorra (àrids fins), aigua i altres additius. En l'àmbit de la construcció el formigó s'arma amb barres d'acer al seu interior. Això és perquè el formigó en sí mateix té molt bona resistència a compressió, però molt mala resistència a tracció i a flexió (la resistència a tracció és aproximadament 10 vegades més petita que a compressió). Les barres d'acer són les encarregades d'aguantar els esforços de tracció i compressió.

El manteniment i reparació d'estructures de formigó armat a causa del seu deteriorament sovint ocasiona problemes de servei i importants costos els quals cal tenir en compte. Això és especialment accentuat quan les estructures estan sotmeses a ambients agressius, com els marins o amb alta humitat, en els quals les barres d'acer emprades com a reforç es veuen afectades per la corrosió. Per aquest motiu, en els darrers temps s'està implementant l'ús de barres de material compost de matriu polimèrica (en anglès, *fibre reinforced polymer*, FRP) com a reforç estructural. Aquestes armadures presenten com a principal atractiu que no pateixen el fenomen de corrosió. Per contra, els FRP habitualment tenen un mòdul d'elasticitat inferior al de l'acer, provocant deformacions en l'estructura superiors a les que s'obtindrien si aquesta estigués armada amb acer convencional.

Per garantir la seguretat, en el moment de dissenyar una estructura cal tenir en compte els estats límits (EL). Existeixen dos tipus d'EL: els estats límits últims (ELU), que són aquells que si es superen l'estructura pot patir un col·lapse estructural, i els estats límits de servei (ELS). Els ELS no posen en perill l'estabilitat de l'estructura, però en cas de superar-se, poden resultar danyats elements estructurals secundaris o poden crear inseguretat als usuaris de l'estructura. Els ELS fan referència a les tensions en els materials, les fletxes i a la fissuració.

En el cas concret d'estructures armades amb FRP, els ELS solen governar el seu disseny estructural, degut principalment al baix mòdul d'elasticitat d'aquests materials, però també a les diferents condicions d'acabat de l'armadura.

El fenomen de la fissuració és pràcticament impossible d'evitar, ja sigui per factors exteriors com per esforços interns. Tot i tractar-se d'un procediment gairebé inevitable, els criteris de comprovació de la fissura són bastant estrictes per raons de seguretat.

En aquest estudi es pretén fer un estudi comparatiu de diferents models de predicció d'obertura de fissures en estructures de formigó armat amb materials compòsits o FRP ("Fibre Reinforced Polymer").

## **1.2 Objecte**

La finalitat d'aquest treball és analitzar i comparar els models de predicció de l'obertura de fissura en servei d'estructures de formigó armat. S'estudiarà la idoneïtat de les formulacions de diferents codis i es farà un estudi paramètric per veure la influència de diferents paràmetres sobre l'obertura de fissura a partir del coeficient d'adherència.

A partir de la generació d'una base de dades realitzada a partir de la recerca de dades en articles, on es recullen obertures de fissura experimentals per a diferents estats de càrrega i per a diferents bigues, així com altres paràmetres de cada una d'elles, es procedirà a l'estudi de la secció d'una biga a flexió pura.

El treball es desenvolupa fent un estudi comparatiu de la normativa americana ACI 440.1R-06, la normativa canadense ISIS Canada, dedicades al càlcul de formigó armat amb FRP, i les dues últimes versions de la normativa europea Eurocodi 2, per a estructures de formigó armat amb acer, amb resultats experimentals d'estructures de formigó armat amb FRP.

## **1.3 Abast**

El projecte consta d'un estudi comparatiu dels models de predicció d'obertura de fissura mencionats anteriorment. El desglossament del treball és de la següent manera:

En primer lloc, es realitza una breu introducció a la descripció de la fissuració, explicant les característiques principals de les estructures de formigó, la formació de fissures, les principals causes que provoquen la fissuració, els diferents tipus de fissures que existeixen i les conseqüències principals que comporta la formació d'una fissura en el formigó armat. A més, es centra en l'anàlisi

en el mètode de càlcul d'obertura de fissura, aprofundint en el mètode teòric emprat per a cada normativa.

A continuació, s'explica el procediment de l'estudi, descrivint les condicions escollides, juntament amb la metodologia de càlcul i els paràmetres establerts.

El següent apartat recull l'anàlisi de resultats. Inicialment, es realitza l'anàlisi de l'estudi paramètric per a les normatives ACI 440.1R-06 i ISIS Canada. El que es pretén és determinar quin acabat superficial de les armadures és millor. A més, es busquen tendències per determinar quin paràmetre és més influent sobre el coeficient d'adherència ( $k_b$ ) i, per tant, sobre l'obertura de fissura. A continuació, mitjançant el mètode estadístic ANOVA s'analitza la variància del factor acabat superficial, és a dir, es determina si hi ha diferències significatives entre les mitjanes dels coeficients d'adherència de cada tipus de d'acabat. Finalment, s'analitza l'adequació dels resultats teòrics d'amplada de fissura obtinguts per a cadascuna de les normatives en vers els valors experimentals. Els resultats són representats per mitjà de gràfiques, diagrames i taules, i són analitzats i discutits.

Finalment, es descriuen les conclusions generals del treball.

## 2 ESTAT DE L'ART

### 2.1 Estructura de formigó

El formigó estructural, degut a les seves excel·lents propietats mecàniques, de durabilitat i econòmiques, és el material més emprat en les construccions d'edificació i enginyeria civil.

Tot i que resisteix tensions i esforços de compressió apreciables, el principal inconvenient del formigó és la seva baixa resistència a esforços de tracció. És per aquest motiu que se li introdueixen barres longitudinals al seu interior, les quals s'anomenen armadures i són les que resisteixen els esforços de tracció que apareixen en l'estructura, mentre que el formigó, per altra banda, resisteix els esforços a compressió. Aquestes barres es dimensionen d'acord amb la magnitud de l'esforç axial i els moments flectors i conformen el que és l'armadura principal, mentre que l'esforç tallant i el moment torsor són suportats pels estreps o cercols. La Figura 1 mostra l'esquema d'una biga de formigó armat on es diferencien clarament l'armadura i els estreps.

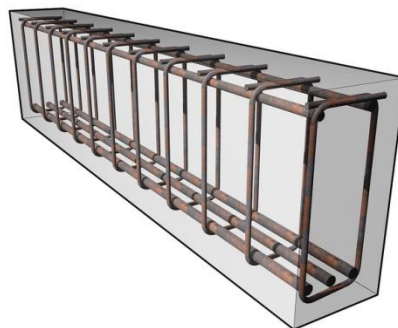


Figura 1. Esquema d'una biga de formigó armat amb l'armadura principal i els estreps

El manteniment i reparació d'estructures de formigó armat a causa del seu deteriorament ocasiona problemes de servei i importants costos als quals cal dedicar especial atenció. Aquesta situació es produeix principalment en estructures sotmeses a ambients agressius, com els marins o amb alta humitat, en els quals les barres d'acer emprades com a reforç estructural es veuen afectades per la corrosió. La problemàtica creada per aquests tipus de patologies ha provocat l'adopció d'especificacions més estrictes en els codis de disseny per tal de millorar la durabilitat de les estructures de formigó.



L'ús de materials compostos de matriu polimèrica (des d'ara FRP, Fibre Reinforced Polymer) apareix com una solució efectiva als problemes de corrosió que poden presentar les estructures de formigó armades amb acer, així com altres problemàtiques que poden sorgir com a conseqüència de l'acció de camps electromagnètics. (Torres & Barris 2010).

## **2.2 Materials compostos de matriu polimèrica (FRP)**

Els FRP són materials compostos de fibres sintètiques o orgàniques d'elevada resistència en una matriu polimèrica. Les fibres són els constituents que aporten la rigidesa i capacitat resistent i acostumen a ser elements llargs i continus que ocupen entre el 20 i el 75% del volum del compost. Les seves propietats depenen del material utilitzat, i són molt superiors a les de les resines. La matriu del compost està formada generalment per resines que tenen com a principal funció la de transmetre els esforços entre fibres, mantenir-les en la seva orientació i donar protecció al conjunt. Les resines més utilitzades són les epoxis, per les seves propietats adherents i la seva resistència a la corrosió, però també s'empren resines de polièster o vinilèster i en alguns casos termoplàstiques.

Aquests materials són anisotròpics, és a dir, les seves propietats són diferents depenent de la seva direcció, al contrari de l'acer, que és isotròpic (les seves propietats són uniformes en totes les direccions, independentment de la càrrega aplicada).

Generalment, els FRP es classifiquen en quatre grans grups segons el material de la fibra: de fibra de vidre (Glass-FRP, GFRP), de fibra de carboni (Carbon-FRP, CFRP), de fibra d'aramida (Aramid-FRP, AFRP) i de fibra de basalt (Basalt-FRP, BFRP). El primer grup (GFRP) presenta una bona relació entre les propietats mecàniques i el preu, malgrat que necessita protecció per a medis alcalins. Els CFRP són els materials amb prestacions més elevades dels presentats, i també els més cars, mentre que els AFRP es troben en una situació intermèdia pel que fa a les seves prestacions.

En general, les barres de FRP presenten com a característiques mecàniques un mòdul elàstic baix en relació amb l'acer i una resistència a tracció elevada, tal com es mostra a la taula 1.

Característiques	GFRP	CFRP	AFRP	Acer
Densitat (kg/m <sup>3</sup> )	1.25÷2.10	1.50÷1.60	1.25÷1.40	7.90
Coef. dilatació long. ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) $\alpha_L$	6÷10	-9÷0	-6÷-2	11.7
Coef. dilatació transv. ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) $\alpha_T$	21÷23	74÷104	60÷80	11.7
Límit elàstic (MPa)	-	-	-	400÷500
Resistència a tracció (MPa)	480÷1600	600÷3690	1720÷2540	550
Modul elàstic (GPa)	35÷60	120÷580	41÷125	200
Allargament límit elàstic (%)	-	-	-	0.2÷0.25
Allargament en ruptura (%)	1.2÷3.1	0.5÷1.7	1.9÷4.4	15÷20

Taula 1. Comparació de les característiques mecàniques dels FRP i de l'acer. (Torres & Barris 2010)

Aquestes particularitats afavoreixen que les estructures de formigó armades amb barres de FRP tinguin deformacions i obertures de fissura més elevades que les armades amb acer. Per aquest motiu en aquestes estructures adquireix major importància l'estudi del comportament en servei. D'altra banda, cal destacar que els FRP presenten un comportament tensió – deformació lineal fins a ruptura, el límit elàstic coincideix amb la resistència última, i no hi ha un comportament dúctil del reforç, tal com succeeix amb acer. Per tant, els FRP no es deformen plàsticament i l'acer a uns 500 GPa deixa de deformar-se elàsticament i comença a deformar-se plàsticament fins a arribar a la ruptura. En la Figura 2 es pot veure una comparativa entre el ventall de mòduls elàstics que poden prendre les barres d'FRP en funció del tipus de fibra en comparació amb l'acer (en anglès *steel*).

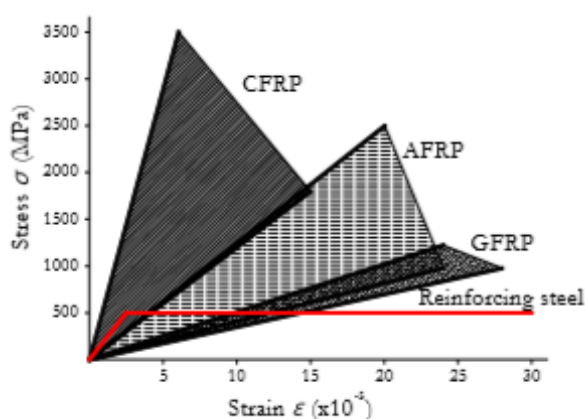


Figura 2. Diagrama esforç-deformació pels diferents tipus de barres d'FRP i per a l'acer. (Barris 2011)

Els FRP tenen altres peculiaritats que cal tenir en compte a l'hora d'usar-los en estructures de formigó, com el fenomen de ruptura per tensions mantingudes (*creep rupture*), pel qual una barra de FRP sotmesa a un esforç constant inferior a la seva resistència nominal de tracció amb càrrega

instantània pot fallar de manera fràgil al cap d'un cert temps. Això obliga a limitar les tensions ocasionades per la fracció de càrregues permanents. (Torres & Barris 2010)

### 2.3 Estructures de formigó armat amb FRP

La capacitat de flexió de qualsevol biga de formigó armat es pot definir com la capacitat màxima d'absorció d'una càrrega externa que té la biga. Quan s'assoleix la capacitat de flexió de la biga, en almenys una secció de la biga, un o ambdós dels seus materials (formigó i FRP) han assolit la seva tensió o deformació màxima. Per avaluar la capacitat de flexió d'una biga, cal fer algunes hipòtesis (Barris 2011):

- Les seccions planes es mantenen planes si estan sotmeses de flexió.
- La relació tensió-deformació de l'armadura és coneguda.
- La relació tensió-deformació del formigó és coneguda.
- La resistència a tracció del formigó és negligible.

En el cas concret d'estructures armades amb FRP, els ELS solen governar el seu disseny estructural, degut principalment al baix mòdul d'elasticitat d'aquests materials, però també a les diferents condicions d'acabat de l'armadura. En aquest cas, els materials (formigó i FRP) es troben en el seu rang elàstic. Per tant, assumint les hipòtesis anteriorment citades, els diagrames de deformació i tensió a nivell seccional són els que es defineixen a la Figura 3. Com es pot observar, en la secció fissurada, es considera que el formigó a tracció no contribueix a la capacitat resistent de la mateixa.

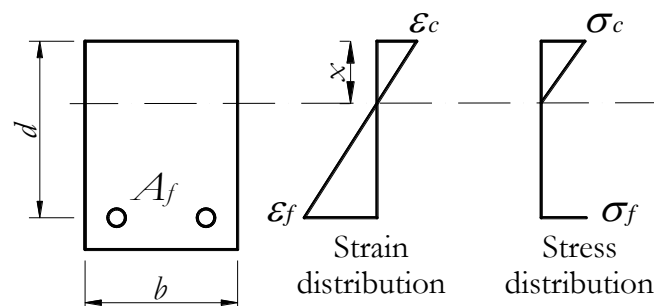


Figura 3. Diagrames de deformació i tensió de la secció d'una biga. (Barris 2011)

Per al càlcul de la capacitat última de la secció (ELU), considerant una fallada per flexió, cal tenir en compte la relació constitutiva tensió-deformació del formigó fins a ruptura, de manera que l'anàlisi es realitza aplicant l'equilibri de forces i moments en la secció de la Figura 4. Existeixen diferents

normatives que permeten assimilar la distribució parabòlica del formigó a un bloc rectangular equivalent, tal i com es mostra a la figura.

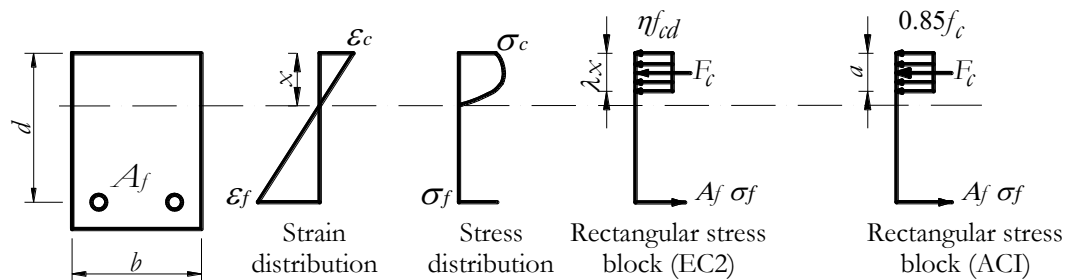


Figura 4. Diagrames de deformació i tensió de la secció d'una biga. (Barris 2011)

## 2.4 Fissuració en elements de formigó armats amb FRP

L'aparició de fissures en les estructures de formigó armat és un fenomen inherent al material del qual estan fetes.

La utilització d'armadures, ja siguin d'acer o de FRP, requereix que el formigó que les envolta pugui arribar a deformacions importants superiors a les compatibles amb la seva capacitat de resistència a la tracció. Superada aquesta capacitat el formigó es trenca i apareixen esquerdes, és a dir, es produeix la fissuració. Per tant, la capacitat màxima de deformació de les armadures ha de ser superior a la del formigó a tracció.

Tot i que la fissuració és inevitable, per tractar aquesta problemàtica, es tendeix a limitar l'obertura de la fissura per sota d'uns valors que no comportin un risc a l'estructura.

Les principals causes per les quals apareixen les fissures són: (Rodríguez 1984)

- Les degudes a l'actuació de les càrregues externes, les quals produeixen fissures perpendiculars a l'armadura de les bigues (direcció principal 1), si aquestes treballen a tracció o flexió. A més, si també hi ha tallants o torsos les fissures seran inclinades.
- Les degudes a les deformacions de l'estructura, les quals són parcialment impedides per la seva constitució interna o per les condicions de recolzament. Aquest tipus de fissures doncs, poden sorgir degut a la retracció i fluència del formigó, a les variacions de temperatura o als assentaments de l'estructura.

- Les degudes a l'assentament del formigó fresc dins dels encofrats, que és parcialment impedit per les armadures.
- Finalment, les degudes a un conjunt de fenòmens com la corrosió de les armadures, l'acció de les gelades, atacs químics del formigó, etc. No obstant això, com ja s'ha esmentat anteriorment, en aquest estudi les armadures de les bigues estudiades són de materials compostos (FRP), per la qual cosa alguns d'aquests fenòmens com la corrosió només són una causa de corrosió quan les armadures són d'acer.

A continuació hi ha una classificació dels diferents tipus de fissures:

#### *Fissures primàries*

Són les fissures laterals que s'originen primer a la superfície del formigó. La seva inclinació és sempre molt propera a 90°. A la superfície de les armadures les amplades de fissura de les fissures primàries és menor que a la superfície del formigó.

#### *Fissures secundàries*

Quan els esforços augmenten, les noves fissures laterals que apareixen tot seguit són les anomenades fissures secundàries. La formació d'aquest tipus de fissura està considerablement influïda per la deformació superficial de les armadures.

La inclinació d'aquestes fissures sol ser d'uns 60° a prop de la superfície de l'armadura, mentre que a prop de la superfície del formigó és d'uns 90°.

La posició en la que es formen les fissures secundàries no estan definida. En general, les fissures secundàries es formen relativament a prop de les fissures primàries en comptes de a la tercera part entre dues fissures primàries adjacents.

Les fissures secundàries es solen veure on la separació entre les fissures primàries és propera a la separació màxima entre fissures, i rarament on els espais són propers al espai entre fissures mínim.

#### *Fissures internes*

Són les fissures que són imperceptibles a la superfície del formigó. En el formigó del voltant de les barres, poc després de la formació de les fissures primàries es formen unes petites fissures internes les quals no apareixen a la superfície del formigó. La formació de fissures internes prové considerablement de la deformació de la superfície de les barres.

Aquestes fissures tenen una gran influència en l'adherència entre les barres i el formigó. Aquesta pèrdua d'adherència apareix primer a la superfície de la barra adjacent a la fissura primària.

Un cop formades aquestes fissures el formigó del voltant de les armadures té l'aparença d'una pinta, tal i com es pot veure a la Figura 5. Les dents d'aquesta "pinta" (fissures internes) es deformen en la direcció de la fissura primària més propera per les forces de compressió transmeses des dels terminals de la barra quan l'esforç de tracció aplicat en ella augmenta. La seva inclinació, més o menys, sol ser d'uns  $60^\circ$  respecte l'eix de la barra.

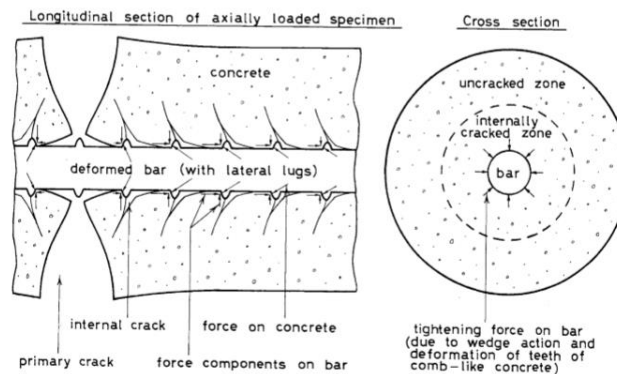


Figura 5. Deformació del formigó al voltant de l'armadura després de la formació de les fissures internes. (Goto 1971)

#### *Fissures longitudinals*

Són les fissures que s'originen en direcció de l'eix de l'armadura. Hi ha casos en els que quan els esforços de les barres són bastant alts, el formigó adjacent a les fissures primàries existents també es fissura en la direcció de l'eix de les barres. Aquestes fissures són les anomenades fissures longitudinals i es poden considerar com un segon tipus de fissures secundàries.

La formació de fissures longitudinals sol ser més probable quan la separació entre les fissures primàries és propera a la màxima.

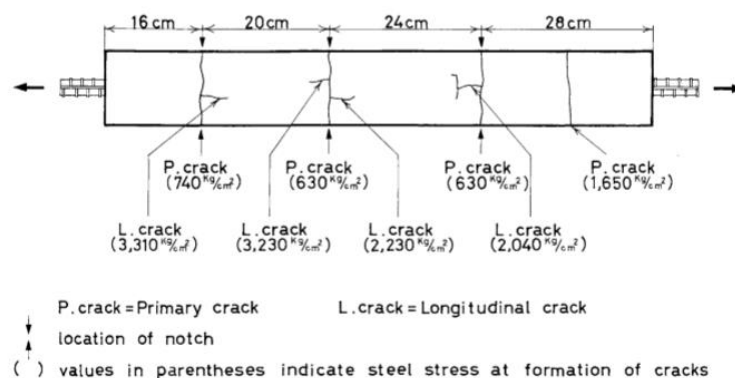


Figura 6. Esbós d'un cas simple d'una biga armada sotmesa a tracció on es poden veure fissures primàries i longitudinals. (Goto 1971)

Fonamentalment, les fissures també es poden classificar en dos grans grups segons el seu origen.

El primer grup el formen les fissures d'origen tensional, denominades fissures estructurals. Aquestes es deuen a les tensions a tracció que superen la resistència del formigó, produïdes pels esforços derivats de l'aplicació de les accions exteriors o de deformacions. Els orígens d'aquest fenomen poden ser diversos:

1. Un primer origen, és la fissura deguda a l'allargament de l'armadura. És típica en els casos de peces a tracció o a flexió simple o composta. Es tracta d'un fenomen produït per l'impossibilitat que té el formigó per a seguir les deformacions de les armadures, fent que tot esforç de tracció sigui exercit per l'armadura.
2. Un segon és la fissura deguda a les tensions de tracció en el formigó. Un cas típic podria ser el de les fissures inclinades de l'esforç tallant.
3. Un tercer és la fissura deguda a una compressió excessiva del formigó.

El segon gran grup el constitueixen les fissures produïdes tant abans com després del enduriment del formigó, denominades fissures no estructurals. Aquestes sempre són generades per causes intrínseques, és a dir, degut als comportaments dels elements que formen l'estructura. La formació de fissures no estructurals està lligada a l'evolució i característiques de la resistència i la deformabilitat del formigó a tracció. Les causes principals de l'aparició d'aquest tipus de fissures són:

- En el transcurs del primer dia de vida de l'estructura, causada per l'assentament plàstic del formigó i la retracció plàstica del mateix.
- En l'estat de formigó ja endurit, com són la contracció tèrmica inicial, la retracció hidràulica i la fissuració en mapa.

El control de les fissures no estructurals es pot evitar definint adequadament la dosificació, la fabricació, la posada en obra i el curat del formigó, mentre que el control de les fissures estructurals es pot dur a terme amb el correcte disseny de l'estructura. Les normatives internacionals estableixen diversos mètodes de control de l'obertura de fissura: tant poden ser de forma directa com indirecta, fixant uns valors màxims que no han de ser superats.

Aquests límits varien en funció de la classe d'exposició a la que es troba sotmesa l'estructura, tenint en compte el possible risc de corrosió de les armadures.

El procés de fissuració d'un element de formigó armat s'inicia quan en una secció determinada, la fibra més traccionada de formigó arriba a la seva resistència a tracció. En aquest instant es genera la primera fissura (càrrega de fissuració,  $P_{cr}$ ). Fins a aquest moment, la rigidesa de la secció és la corresponent al moment d'inèrcia brut (o no fissurat, estat I en la Figura 7). A partir de la càrrega de fissuració, la corba càrrega- amplada de fissura pateix una transició entre l'estat no fissurat (I) i l'estat totalment fissurat (II). Aquesta transició és deguda a la contribució del formigó traccionat entre dues fissures adjacents i durant la mateixa, apareixen noves fissures. A partir d'una càrrega més elevada, el nombre de fissures no augmenta. Quan s'arriba a aquest estadi, es considera que la fissuració està estabilitzada, i les fissures existents únicament creixen en amplada i alçada fins que s'arriba al límit de l'ELS (càrrega de servei,  $P_s$ ).

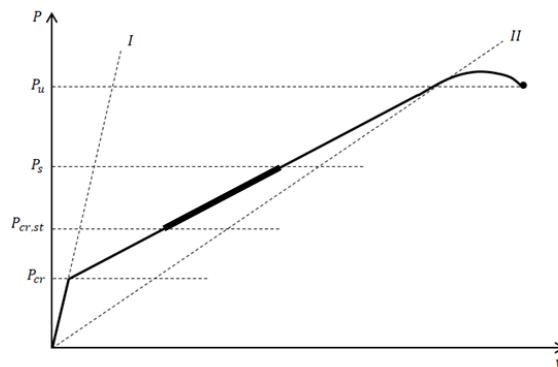


Figura 7. Relació càrrega-amplada de fissura amb tots els diferents estats de càrrega.

L'estudi d'aquest treball es centra en la fissuració deguda a la resposta estructural, i específicament enfront a esforços de flexió pura. La determinació de l'amplada previsible de fissures en una estructura és un problema complex i de naturalesa aleatòria, de manera que el resultat dels càlculs és un valor merament orientatiu.

## 2.5 Normatives

A continuació s'exposen les normatives utilitzades en aquest estudi en relació al càlcul de l'obertura de fissura provocada per la resposta estructural. En el cas de l'Eurocodi 2, s'ha estimat oportú l'anàlisi de la formulació de la versió actual (2004) i d'una versió anterior a l'actual (1992), per tal de poder analitzar les diferències i similituds entre les dues versions.



En els següents subapartats s'expliquen les diferents normatives utilitzades i el mètode empíric pel càlcul de l'obertura de la fissura.

### 2.5.1 ACI 440.1R-06

La normativa americana ACI 440.1R-06 ("Guia pel disseny i construcció de formigó estructural armat amb barres de FRP") per tal de calcular teòricament l'amplada de fissura màxima a la fibra més traccionada provocada per la resposta estructural.

Com el seu títol indica, aquesta normativa proporciona recomanacions pel disseny i construcció de les estructures de formigó armades amb FRP. El document només es dirigeix a estructures de formigó armat amb FRP que no estigui pretensat (la normativa referent a estructures de formigó pretensat amb armadures de FRP es proporciona en l'ACI 440.4R). La base d'aquesta normativa és el coneixement obtingut d'arreu del món de la recerca experimental, de la recerca del treball analític i de les aplicacions de camp de les armadures de FRP.

Les recomanacions de disseny estan basades en el coneixement actual i es destinen a complementar els codis i les directrius de les estructures de formigó armat convencionals (amb acer) ja existents, i per proporcionar als enginyers assistència pel que fa a les especificacions, disseny i construcció de les estructures de formigó armades amb FRP.

S'ha utilitzat la normativa del 2006 que és la anterior a la més recent perquè la fórmula pel càlcul de l'obertura de fissura màxima proporciona directament l'obertura de fissura, mentre que amb la normativa del 2015 la formulació no proporciona l'obertura de fissura de forma directa, sinó que és per calcular la separació màxima entre les armadures.

L'ACI 440.1R-06 estableix el càlcul de l'amplada de fissura probable màxima per a estructures de formigó armades amb FRP d'acord amb la següent expressió:

$$w = 2 \cdot \frac{f_f}{E_f} \cdot \beta \cdot k_b \cdot \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

essent:

$w$ : Amplada de fissura màxima, mm.

$f_f$ : Tensió de l'armadura, MPa.

$E_f$ : Mòdul de Young o mòdul elàstic de l'armadura, MPa.

$$\varepsilon_f = \frac{f_f}{E_f} \quad (\text{Eq. 2})$$

$\beta$ : Ràtio de la distància entre la línia neutra i la cara on hi ha la tensió i de la distància entre la línia neutra i el centre de gravetat de la barra o armadura, adimensional.

$$\beta = \frac{h - x}{d - x} \quad (\text{Eq. 3})$$

$k_b$ : Coeficient d'adherència ("bond coefficient"), el qual expressa el grau d'adherència entre l'armadura de FRP i el formigó que l'envolta, adimensional.

$d_c$ : Espessor o gruix del recobriment mecànic. És la distància de la superfície del formigó on hi ha la tensió (superfície de baix) al centre de gravetat de la barra més propera de l'armadura, mm.

$s$ : Separació entre les barres o armadures, mm.

Per realitzar el càlcul teòric de l'amplada de fissura màxima amb aquesta norma, s'han trobat tots els paràmetres de l'equació menys la deformació de l'armadura,  $\varepsilon_f$  (mm). Per tal de calcular aquest paràmetre, s'han hagut de calcular prèviament els següents paràmetres:

$$x = d \cdot n \cdot \rho \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2}{n \cdot \rho}} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

essent:

$x$ : Distància de la cara superior de la biga a la línia neutra (LN), mm.

$d$ : Cantell útil. Distància de la cara superior de la biga al CdG de l'armadura, mm.

$$n = \frac{E_f}{E_c} \quad (\text{Eq. 5})$$

$E_c$ : Mòdul elàstic del formigó, MPa.

$\rho$ : Quantia geomètrica del FRP, adimensional.

$$\rho = \frac{A_f}{b \cdot d} \quad (\text{Eq. 6})$$

$A_f$ : Àrea total de l'armadura, mm<sup>2</sup>.

$b$ : Amplada de la secció de la biga, mm.

$$I_{cr} = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x^3 + A_f \cdot n \cdot (d - x)^2 \quad (\text{Eq. 7})$$

essent:

$I_{cr}$ : Moment d'inèrcia de la secció fissurada, mm<sup>4</sup>.

$$C = \frac{M}{E_c \cdot I_{cr}} \quad (\text{Eq. 8})$$

essent:

$C$ : Curvatura, mm<sup>-1</sup>.

$M$ : Moment flector màxim de la biga, MPa.

I finalment, es calcula la deformació de l'armadura i s'introdueix a l'Eq. 1, obtenint així l'amplada de fissura màxima.

$$\varepsilon_f = C \cdot (d - x) \quad (\text{Eq. 9})$$

### 2.5.2 ISIS Canada

La normativa ISIS Canadà ("Intelligent Sensing for Innovate Structures") és un membre de la NCE ("Networks of Centres of Excellence"), administrat i finançat per la NSERC ("Natural Sciences and Engineering Research Council"), la CIHR ("Canadian Institutes of Health Research") i la SSHRC ("Social Sciences and Humanities Research Council"), en col·laboració amb "Industry Canada".

La versió original d'aquest document es va fer 2001. No obstant, la versió 2 implementada el 2007, és la última actualització d'aquesta normativa i la que s'utilitza en aquest estudi. Aquesta versió tracta de capturar l'estat de l'art i l'estat de la pràctica per tal de proporcionar una guia actualitzada pels enginyers i dissenyadors que busquen utilitzar armadures de FRP. Tot i que la coherència amb els

codis existents ha estat i és una consideració important, la versió pot diferir dels documents de codi en determinades clàusules on investigacions i estudis recents indiquen que hi ha millors criteris o equacions.

L'objectiu d'aquesta norma és proporcionar als calculistes i enginyers directrius i equacions que es puguin utilitzar pel disseny d'estructures de formigó armat amb FRP. No forma part d'un codi nacional o internacional, sinó que es basa principalment en resultats experimentals de recerca duts a terme en laboratoris i institucions canadencs i internacionals, i es verifica a través de projectes de demostració de camp sobre estructures funcionals.

A més, pretén ser coherent amb CSA S806 (2002) o CSA S6 (2006), per a aplicacions de construcció i ponts, respectivament. No obstant això, la guia pot diferir d'aquests dos documents on els resultats de més recerques suggereixen un enfocament alternatiu.

L'ISIS Canadà estableix el càlcul de l'amplada de fissura probable màxima per a estructures de formigó armades amb FRP d'acord amb la següent expressió:

$$w = 2 \cdot k_b \cdot \frac{f_f}{E_f} \cdot \beta \cdot \sqrt[3]{d_c + A} \quad (\text{Eq. 10})$$

essent:

$w$ : Amplada de fissura màxima, mm.

$k_b$ : Coeficient d'adherència ("bond coefficient"), el qual expressa el grau d'adherència entre l'armadura de FRP i el formigó que l'envolta, adimensional.

$f_f$ : Tensió de l'armadura, MPa.

$E_f$ : Mòdul de Young o mòdul elàstic de l'armadura, MPa.

$\beta$ : Ràtio de la distància entre la línia neutra i la cara on hi ha la tensió i de la distància entre la línia neutra i el CdG de la barra o armadura, adimensional. Es calcula a partir de l'Eq. 3.

$d_c$ : Espessor o gruix del recobriment mecànic. És la distància de la superfície del formigó on hi ha la tensió (superfície de baix) al CdG de la barra més propera de l'armadura, mm.

$A$ : Àrea de tensió efectiva del formigó que envolta l'armadura i que té el mateix centroid (centre de gravetat) que aquesta, dividit pel nombre de barres de l'armadura, mm<sup>2</sup>.

Com en el cas de la normativa ACI 440, per realitzar el càlcul teòric de l'amplada de fissura màxima amb aquesta norma, s'han trobat tots els paràmetres de l'equació menys la deformació de l'armadura,  $\varepsilon_f$ . Per tal de calcular aquest paràmetre, s'ha seguit exactament el mateix procediment.

Primerament, s'ha calculat la  $x$  mitjançant l'Eq. 4. Tot seguit s'ha calculat  $I_{cr}$  a partir de l'Eq. 7 i  $C$  a partir de l'Eq. 8. I finalment, s'ha calculat  $\varepsilon_f$  amb l'Eq. 9.

### 2.5.3 Eurocodi 2

L'"Eurocodi2: Projecte d'estructures de formigó", és un conjunt de normes europees, que pertany als Eurocodis, que especifiquen les normes tècniques per al disseny de formigó, estructures de formigó armat i formigó pretensat, amb la filosofia de disseny d'estat límit. La norma més recent és l'Eurocodi2 de l'any 2004 (EC2-04), però en aquest estudi també s'analitza l'Eurocodi2 de l'any 1992 (EC2-92).

#### 2.5.3.1 Eurocodi 2 del 1992 (EC2-92)

L'Eurocodi 2 proposa limitar l'obertura de fissura màxima o característica d'acord amb la següent expressió:

$$w_k \leq w_{lim} \quad (\text{Eq. 11})$$

essent:

$w_k$ : Obertura característica de fissura, mm.

$w_{lim}$ : Obertura de fissura màxima (mm) segons la classe d'exposició de l'estructura (veure Taula 2)

Exposure class	Design crack width, $w_k$ , under the frequent load combination (mm)	
	Post-tensioned	Pre-tensioned
1	0.2	0.2
2	0.2	(
3	(   <u>decompression</u>	(   <u>decompression</u>
4	( or (coating of the tendons (and $w_k =   0.2  $	(
NOTE for definition of decomposition, see (7) above.		

Taula 2. Valors recomanats d'amplada de fissura (en mm) extreta de (Eurocodi 2, 1992)

L'obertura característica de fissura es calcula a partir de la següent expressió:

$$w_k = \beta \cdot s_{rm} \cdot \varepsilon_{fm} \quad (\text{Eq. 12})$$

essent:

$\beta$ : Coeficient de correcció que relaciona l'obertura mitjana de fissura amb el valor característic i val 1,3 per fissuració produïda solament per accions indirectes i 1,7 per la resta de casos.

En aquest estudi però, s'ha calculat l'amplada mitjana de fissura i, per tant,  $\beta$  s'ha adoptat igual a 1.

$s_{rm}$ : Separació mitjana entre fissures (mm) que resulta de l'expressió:

$$s_{rm} = 50 + 0.25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\emptyset}{\rho_r} \quad (\text{Eq. 13})$$

$\varepsilon_{fm}$ : Allargament mitjà de les armadures, tenint en conta la col·laboració del formigó entre fissures.

$$\varepsilon_{fm} = \frac{\sigma_f}{E_f} \cdot \left( 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left( \frac{\sigma_{fr}}{\sigma_f} \right)^2 \right) \quad (\text{Eq. 14})$$

$k_1$ : Coeficient que considera les propietats d'adherència de les barres de l'armadura, sent 0,8 en el cas de barres corrugades i de 1,6 per el de barres llises.

$k_2$ : Coeficient que té en compte la forma de distribució de deformacions, sent de 0,5 per flexió, i de 1,0 per tracció pura.

$\emptyset$ : Diàmetre de la barra (mm). Quan l'armadura està formada per un grup de barres de diferents diàmetres es calcula el diàmetre equivalent,  $\emptyset_{eq}$ . Per una secció amb  $n_1$  barres de diàmetre  $\emptyset_1$  i  $n_2$  barres de diàmetre  $\emptyset_2$ , s'utilitzaria la següent expressió:

$$\emptyset_{eq} = \frac{n_1 \emptyset_1^2 + n_2 \emptyset_2^2}{n_1 \emptyset_1 + n_2 \emptyset_2} \quad (\text{Eq. 15})$$

$\rho_r$ : Quantia geomètrica efectiva de l'armadura, adimensional. ( $\rho_r = \rho_{eff}$ )

$$\rho_{eff} = \frac{A_f}{A_{c,eff}} \quad (\text{Eq. 16})$$

$A_{c,eff}$ : Àrea eficaç ( $\text{mm}^2$ ) del formigó de la zona de recobriment (veure Figura 7), d'altura  $h_{eff} = 2,5 \cdot (h - d)$ .

$A_f$ : Secció total de les armadures situades en l'àrea eficaç del formigó,  $A_{c,eff}$ . ( $\text{mm}^2$ )

$\sigma_f$ : Tensió de servei de l'armadura passiva en la hipòtesis de secció fissurada, MPa.

$\sigma_{fr}$ : Tensió de l'armadura en la secció fissurada en l'instant en que es fissura el formigó, MPa.

$E_f$ : Mòdul d'elasticitat del FRP, MPa.

$\beta_1$ : Coeficient que considera la propietat d'adherència de les barres, sent de 1,0 en el cas de barres corrugades i de 0,5 en el cas de barres llises.

$\beta_2$ : Coeficient que té en compte el període de la càrrega, sent de 1,0 per a càrregues de curta durada, i de 0,5 per a càrregues de llarga durada.

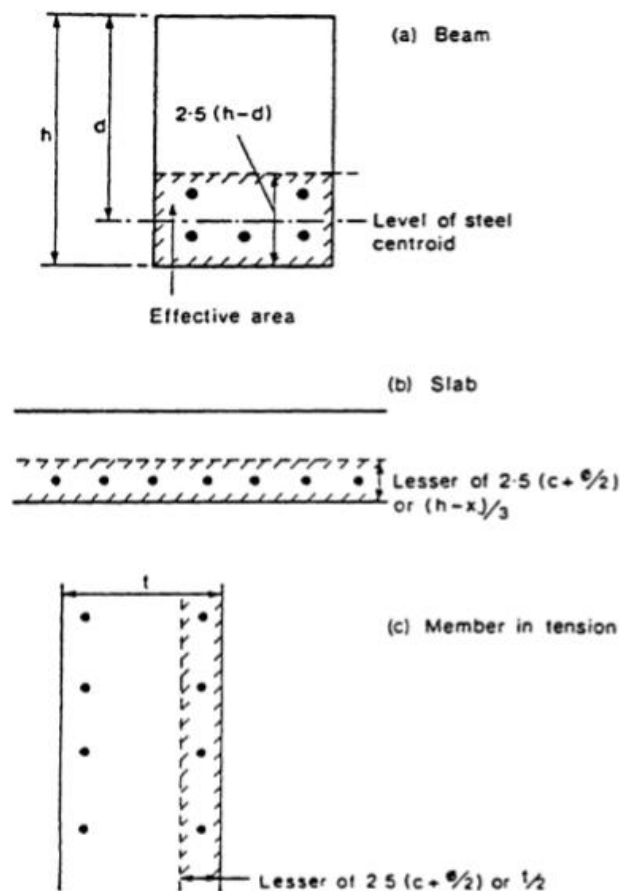


Figura 7. Àrea eficaç del formigó a tracció dels diferents casos més típics extreta de (Eurocodi 2, 1992)

### 2.5.3.2 Eurocodi 2 del 2004 (EC2-04)

L'Eurocodi 2 proposa limitar l'obertura de fissura màxima o característica d'acord amb la següent expressió:

$$w_k \leq w_{lim} \quad (\text{Eq. 17})$$

essent:

$w_k$ : Obertura característica de fissura, mm.

$w_{lim}$ : Obertura de fissura màxima (mm) segons la classe d'exposició de l'estructura (veure Taula 3)

Exposure Class	Reinforced members and prestressed members with unbonded tendons	Prestressed members with bonded tendons
	Quasi-permanent load combination	Frequent load combination
X0, XC1	0,4 <sup>1</sup>	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 <sup>2</sup>
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Decompression
<b>Note 1:</b> For X0, XC1 exposure classes, crack width has no influence on durability and this limit is set to guarantee acceptable appearance. In the absence of appearance conditions this limit may be relaxed.		
<b>Note 2:</b> For these exposure classes, in addition, decompression should be checked under the quasi-permanent combination of loads.		

Taula 3. Valors recomanats d'amplada de fissura (en mm) extreta de (Eurocodi 2, 2004)

Alternativament, l'Eurocodi 2 (2004) proposa unes taules simplificades per comprovar si la quantia d'armadura és suficient per evitar el càlcul de la fissuració.

L'obertura característica de fissura es calcula a partir de la següent expressió:

$$w_k = s_{r,max} \cdot \varepsilon_m = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm}) \quad (\text{Eq. 18})$$

essent  $s_{r,max}$  la separació màxima entre fissures (mm), que resulta de l'expressió:

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\sigma}{\rho_{p,eff}} \quad (\text{Eq. 19})$$



$\varepsilon_m$ : Allargament mitjà de les armadures (mm), tenint en conta la col·laboració del formigó entre fissures:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_f - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_f} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (\text{Eq. 20})$$

$c$ : Recobriment de l'armadura, mm.

$k_1$ : Coeficient que considera les propietats d'adherència de les barres de l'armadura, sent 0,8 en el cas de barres corrugades i de 1,6 per el de barres llises.

$k_2$ : Coeficient que té en compte la forma de distribució de deformacions, sent de 0,5 per flexió, i de 1,0 per tracció pura.

$k_3, k_4$ : Coeficients el valor del qual ve recomanats en l'Annex Nacional de cada país. Els valors recomanats són 3,4 i 0,425, respectivament.

$k_t$ : Factor que depèn de la duració de la càrrega, sent de 0,6 per càrregues instantània o de curta durada, i de 0,4 per càrregues permanents, de llarga durada o repetides

$\emptyset$ : Diàmetre de la barra (mm). Quan l'armadura està formada per un grup de barres de diferents diàmetres es calcula el diàmetre equivalent,  $\emptyset_{eq}$ . El diàmetre equivalent es calcula segons l'Eq. 15.

$\rho_{p,eff}$ : Quantia geomètrica efectiva de l'armadura, adimensional. ( $\rho_{p,eff} = \rho_{eff}$ )

La quantia geomètrica es calcula segons l'Eq. 16.

$A_{c,eff}$ : Àrea eficaç del formigó (mm<sup>2</sup>) a tracció que envolta l'armadura, d'altura  $h_{c,eff}$ , on  $h_{c,eff}$  és el valor menor entre  $2,5 \cdot (h-d)$ ,  $(h-x)/3$  o  $h/2$  (veure Figura 8).

$A_f$ : Secció total de les armadures situades en l'àrea eficaç del formigó (mm<sup>2</sup>),  $A_{c,eff}$ .

$\sigma_f$ : Tensió de servei de l'armadura passiva en la hipòtesis de secció fissurada, MPa.

$E_f$ : Mòdul d'elasticitat del FRP, MPa.

$\alpha_e$ : Relació modular (adimensional):

$$\alpha_e = \frac{E_f}{E_c} \quad (\text{Eq. 21})$$

$f_{ct,eff}$ : És el valor mitjà de la resistència eficaç a tracció del formigó en el moment en que s'espera que les fissures comencin a produir-se, MPa.

$$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 0.30 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (\text{Eq. 22})$$

$f_{ck}$ : Resistència característica del formigó, MPa.

Cal assenyalar que l'Eq. 19 ja inclou un coeficient de correcció per obtenir directament la separació màxima (o característica) de fissures. Aquest coeficient és 1,7.

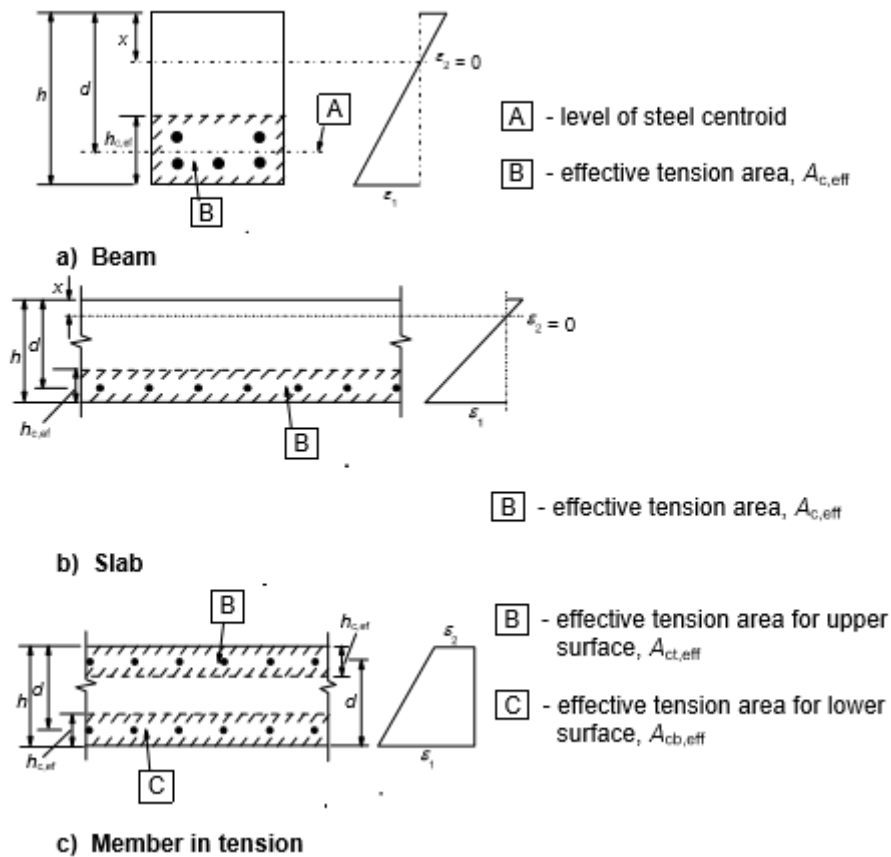


Figura 8. Àrea eficaç del formigó a tracció dels diferents casos més típics extreta de (Eurocodi 2, 2004)

## 2.6 Comparació dels models de càlcul de l'obertura de fissura

La predicció de l'amplada prevista de fissura és un problema molt complex i de naturalesa aleatòria, que ve influenciat per molts factors. Per aquesta causa, el càlcul de l'amplada de fissura és complicat de precisar.

En aquest apartat es pretén comparar les diferents normatives per veure'n les similituds i les diferències entre elles. Per tal de fer aquesta comparació, primerament es comparen les formulacions de les normatives ACI 440 i ISIS, les quals donen un valor teòric de l'amplada de fissura i estan en funció del coeficient d'adherència ( $k_b$ ).

La segona comparació a realitzar és entre les dues versions de l'Eurocodi 2. A diferència de les dues normatives anteriors, els paràmetres utilitzats per predir l'obertura característica de fissura de l'EC2-92 i de l'EC2-04 són la deformació mitjana del FRP i la separació entre fissures. No obstant, ambdues normes també contenen un paràmetre ( $k_1$ ) implícit dins la separació entre fissures que considera les propietats d'adherència de les barres de l'armadura.

A continuació, tal i com s'ha explicat anteriorment, es comparen dos a dos les normatives.

#### **2.6.1 Comparació entre els models de càlcul d'amplada de fissura de l'ACI 440 i l'ISIS**

En aquest estudi, s'ha considerat molt important determinar bé si l'amplada de fissura és la màxima o la mitjana i si es troba en el reforç o a la cara de baix de la biga. Tan la norma ACI 440 com l'ISIS estableixen el càlcul de l'amplada de fissura probable màxima per a estructures de formigó armades amb FRP i situada a la part de baix de la biga.

A part d'això, es diferencien en que la formulació de l'ACI 440 porta un factor multiplicador de 2 i l'ISIS de 2,2. L'última diferència està en l'últim bloc de la fórmula, el qual per la normativa ACI 440 és

$$\sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2}, \text{ mentre que per la normativa ISIS és } \sqrt[3]{d_c + A}.$$

#### **2.6.2 Comparació entre els models de càlcul d'amplada de fissura dels EC2**

Tan l'EC2-92 com l'EC2-04 pretenen establir el càlcul d'amplada de fissura situada a l'alçada del reforç.

Assumint una relació d'1,7 entre l'amplada característica i mitjana, es pot deduir una expressió (veure taula 4) per a la separació mitjana entre fissures segons la formulació de l'Eurocodi 2 (2004).

### 2.6.2.1 Comparació entre els models de càlcul de la separació entre fissures

La separació entre fissures és la distància entre dues fissures, és a dir, les dues zones on la deformació per tracció del formigó aconsegueix la seva capacitat de resistència a tracció del formigó.

La distància entre fissures (part no fissurada) permet que una part de la força sigui aguantada pel formigó, i no necessita ser suportada per l'FRP. Aquest pas d'esforç es transmet per l'adherència. Aquest fenomen de la contribució del formigó entre fissures és conegut en anglès com a *tension-stiffening*.

La separació entre fissures és proporcional al diàmetre i inversament proporcional a la quantia eficaç. Aquest paràmetre és menor o major segons la quantia d'armadura, la relació entre mòduls d'elasticitat i el tipus d'adherència de la barra (si és corrugada o llisa) a partir del coeficient d'adherència introduït en les fórmules de les dues normatives.

A part d'aquest coeficient, les dues normatives també són directament proporcionals a una altre coeficient ( $k_2$ ) que té en compte la forma de distribució de deformacions (a tracció o a flexió pura).

A la taula 4 mostrada a continuació es poden observar l'expressió utilitzada per cada normativa pel càlcul de la separació entre fissures, tenint en compte si es tracta de separació màxima o mitjana.

Normativa	Formulació
EC2-92 mean	$s_{rm} = 50 + 0.25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\phi}{\rho_r}$
EC2-04 mean	$s_{r,mean} = 2 \cdot c + 0,25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\phi}{\rho_{p,eff}}$
EC2-04 max	$s_{r,max} = 3,4 \cdot c + 0,425 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\phi}{\rho_{p,eff}}$

Taula 4. Comparació entre les formulacions de la separació entre fissures de les dues normatives

Amb l'EC2-04, la normativa proporciona la  $s_{r,max}$  perquè la fórmula ja inclou un coeficient de correcció que és de 1,7. Per tal de fer-ne la comparació amb l'EC2-92, es converteix la separació màxima a mitjana dividint  $s_{r,max}$  per aquest coeficient de correcció de 1,7.

### 2.6.2.2 Comparació entre els models de càlcul de la deformació mitjana del FRP

La deformació no és més que la diferència mitjana de la deformació entre l'FRP i el formigó abans de fissurar. Així doncs, l'expressió emprada per cada normativa és la següent:

Normativa	Formulació
<b>EC2-92</b>	$\varepsilon_m = \frac{\sigma_f}{E_f} \cdot \left( 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left( \frac{\sigma_{fr}}{\sigma_f} \right)^2 \right)$
<b>EC2-04</b>	$\varepsilon_m = \frac{\sigma_f - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_f} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_f}{E_f}$

Taula 5. Comparació entre les formulacions de la deformació mitjana del FRP de les dues normatives

Es pot observar que aquestes expressions depenen bàsicament de la diferència de la deformació (o tensió) de l'acer ( $\varepsilon_{fm}$ ) i un efecte de rigidesa, que fa disminuir la deformació/tensió.

Tal i com es considera en l'estimació de la separació mitjana entre fissures (el paràmetre  $\phi/\rho_{eff}$ ), el formigó que envolta les armadures absorbeix part de les tensions a tracció entre fissures produint un efecte de rigidesa de la peça.

### 2.6.2.3 Comparació d'altres paràmetres dels models de càlcul d'amplada de fissura

La quantia eficaç ( $\rho_{eff}$ ) és un paràmetre necessari tan pel càlcul de la separació entre fissures (paràmetre  $\phi/\rho_{eff}$ ) com per la deformació mitjana de l'acer (en el cas de l'EC2-04), i per tant, per predir l'obertura de la fissura.

La quantia eficaç (veure Eq. 16) és igual a la relació entre l'àrea de l'armadura ( $A_f$ ) i l'àrea eficaç del formigó ( $A_{c,eff}$ ).

L'àrea eficaç del formigó és un paràmetre que sorgeix de l'assaig a tracció. L'àrea representa la zona de l'entorn a la barra que és traccionada per efectes de l'adherència amb l'armadura. En el cas que la secció es trobi sotmesa a esforços de flexió, la secció eficaç és menor que l'àrea total del formigó degut a que el voltant de la fissura es produeix la tracció de la barra sobre el formigó de forma local

formant una zona pertorbada en la que es poden produir tensions superiors a la tensió de fissuració, sense que es vegi involucrada tota la secció del formigó.

A partir de diversos estudis analítics es va descobrir que la forma de l'àrea efectiva havia de ser oval o el·lipsoïdal, per tal d'encaixar millor amb els resultats. Finalment, per raons de simplificat, l'àrea es va considera de forma rectangular com demostren les definicions de les diverses normatives.

Les normes estudiades utilitzen el següent mètode pel càlcul de la secció:

$$A_{c,eff} = b \cdot h_{eff} \quad (\text{Eq. 23})$$

Les equacions emprades per estimar l'alçada eficaç ( $h_{eff}$ ) per les diverses normatives són:

Normativa	Formulació
EC2-92	$h_{eff} = 2,5 \cdot (h - d)$
EC2-04	$h_{eff} = \min \left( 2,5 \cdot (h - d) ; \frac{h - x}{3} ; \frac{h}{2} \right)$

Taula 6. Comparació entre les formulacions de l'alçada eficaç de les dues normatives

Les formulacions descrites per les dues normatives estan en funció de la línia neutra. La línia neutra, a part de ser requerida pel càlcul de l'alçada eficaç, com es pot observar en la Taula 6, també és un paràmetre necessari pel càlcul de l'amplada de fissura.

Per una secció rectangular, els valors dels paràmetres que defineixen el comportament seccional són la profunditat relativa de la fibra neutra (distància de la cara superior de la biga a la línia neutra (Eq. 4), i el moment d'inèrcia de la secció fissurada (Eq. 7).

### 3 PLANTEJAMENT DE L'ESTUDI

#### 3.1 Metodologia emprada

Aquest estudi es centra en l'estudi de la predicció d'obertura de fissura de bigues de formigó armades amb FRP sotmeses a flexió pura.

S'ha generat una base de dades de resultats experimentals a partir de la bibliografia publicada fins al moment, per tal d'obtenir el màxim de valors experimentals d'obertura de fissura, per a diferents tipus de biga i de reforç d'FRP. Al llarg de l'estudi s'han analitzat un nombre total de 106 espècimens, dels que s'han descartat 12 degut a manca d'informació en la publicació. Per a cada espècimen, s'han detectat les propietats geomètriques de l'element i les propietats mecàniques dels materials, per tal de poder predir teòricament l'obertura de fissura a diferents nivells de càrrega.

Un cop entrades a la base de dades totes les dades de totes les bigues, s'ha procedit a realitzar-ne el càlcul teòric d'amplada de fissura màxima segons les normatives ACI 440 i ISIS, explicades en el capítol anterior. Els resultats teòrics d'amplada de fissura s'han representat gràficament en funció del moment flector aplicat a la secció d'estudi, per tal de fer la comparació amb les corbes dels valors experimentals.

L'amplada de fissura s'ha estudiat i comparat per a una franja de càrregues compreses entre la fissuració estabilitzada i la càrrega màxima de servei. En aquest estudi, s'ha considerat que la càrrega de fissuració estabilitzada és 1,5 vegades la càrrega de fissuració i que la càrrega de servei és de 3 a 4,5 vegades la càrrega de fissuració estabilitzada o un 35-45% de la càrrega última ( $P_u$ ). Per aquest rang, s'ha ajustat un coeficient d'adherència ( $k_b$ ). Aquest càlcul s'ha realitzat per mínims quadrats (mètode explicat al final d'aquest apartat). Addicionalment, també s'ha calculat l'amplada de fissura teòrica màxima amb la normativa EC2-04 i s'ha representat, per a cada biga.

Cal tenir en compte, però, que ACI 440 i ISIS proporcionen un valor teòric per a l'amplada de fissura a la part més traccionada de la secció (fibra inferior de la secció), mentre que la normativa Eurocodi 2 (2004) prediu l'amplada de fissura a l'alçada del reforç.

D'altra banda, pels articles que proporcionen valors experimentals d'amplada de fissura mitjana, se n'han introduït també les dades a la base de dades, i s'ha calculat l'amplada de fissura mitjana

teòrica segons els dos Eurocodi 2 per a cada biga, per tal de comparar els resultats teòrics amb els valors experimentals. En aquest cas, s'han considerat les amplades de fissura a l'alçada del reforç.

Per a cada biga, un cop representats gràficament els valors d'amplada de fissura teòrics de cada normativa amb els experimentals, tenint en compte si es tracta de valors màxims o mitjans i si es considera l'amplada de fissura a baix de la biga o a l'alçada del reforç, se n'han analitzat els resultats i se n'han extret conclusions.

Un cop analitzats tots els espècimens, els resultats s'han classificat segons els paràmetres amb més influència en l'amplada de fissura (l'acabat superficial, el paràmetre  $n \cdot \rho$ , la relació  $d/h$ , i el diàmetre del reforç  $\phi$ ), i se n'ha buscat tendències del coeficient d'adherència ( $k_b$ ) ajustat en cada cas, per tal de detectar si existeix alguna tendència en l'ajust del coeficient d'adherència ( $k_b$ ) relacionada amb aquests paràmetres.

Finalment, utilitzant el mètode estadístic ANOVA s'ha analitzat la variància del factor acabat superficial, és a dir, s'ha comprovat si hi ha diferències significatives entre les mitjanes dels coeficients d'adherència de cada tipus d'acabat superficial.

### 3.2 Procediment de càlcul

El coeficient  $k_b$  s'ha ajustat per mínims quadrats partint de l'expressió de l'amplada de fissura (Eq. 1), de la que es pot deduir un valor residual ( $Res_i$ ) igual a la diferència entre el valor experimental i el valor teòric:

$$Res_i = w_{i,exp} - \left[ 2 \cdot \frac{f_{fi}}{E_{fi}} \cdot \beta_i \cdot \sqrt{d_{ci}^2 + \left(\frac{s_i}{2}\right)^2} \cdot k_b \right]$$

↑ Valor residual
 ↑  $w_i$ 
↑  $A_i$

essent  $f_{fi}$ ,  $E_{fi}$ ,  $\beta_i$ ,  $d_{ci}$  i  $s_i$  dades o càlculs ja fets per a cada estat de càrrega o moment. D'aquesta manera, es pot simplificar el valor de  $Res_i$  a:

$$Res_i = w_{i,exp} - A_i \cdot k_b \quad (\text{Eq. 24})$$



Per tal de trobar el valor residual mínim, es treballarà amb el sumatori de valors residuals per una fissura en particular, al llarg de la càrrega en la que es pretén fer l'ajust:

$$\sum Res_i = \sum (w_{i,exp} - A_i \cdot k_b) \quad (\text{Eq. 25})$$

On:

$$A_{i,ACI} = 2 \cdot \frac{f_{fi}}{E_{fi}} \cdot \beta_i \cdot \sqrt{d_{ci}^2 + \left(\frac{s_i}{2}\right)^2} \quad (\text{Eq. 26})$$

$$A_{i,ISIS} = 2.2 \cdot \frac{f_{fi}}{E_{fi}} \cdot \beta_i \cdot \sqrt[3]{d_{ci} + A^2} \quad (\text{Eq. 27})$$

A continuació es busca quin és el valor de  $k_b$  que fa que  $Res_i$  sigui mínim (indicant que la diferència entre el valor teòric i experimental sigui la menor possible). Per minimitzar l'equació es deriva respecte el coeficient d'adherència i s'igual a zero. Finalment, s'aïlla el paràmetre que interessa ajustar ( $k_b$ ).

$$\frac{d}{dk_b} \left( \sum Res_i \right)^2 = 0 = \frac{d}{dk_b} \left( \sum (w_i - A_i \cdot k_b)^2 \right) =$$

$$= \frac{d}{dk_b} \left( \sum (w_i^2 - 2 \cdot k_b \cdot w_i \cdot A_i + k_b^2 \cdot A_i^2) \right) =$$

$$= 0 - 2 \cdot \sum w_i \cdot A_i + 2 \cdot k_b \cdot \sum A_i^2$$



$$k_b = \frac{\sum w_i \cdot A_i}{\sum A_i^2}$$

Cal remarcar que la única diferència entre l'ajust de  $k_b$  per mínims quadrats del coeficient d'adherència entre les normatives ACI 440.1R-06 i ISIS Canada és el valor de "A", tal i com s'indica a les equacions 26 i 27.

### 3.3 Paràmetres

Els paràmetres principals d'aquest estudi són aquells que afecten a la transmissió de l'esforç de l'armadura al formigó: el tipus d'acabat superficial de l'armadura, el paràmetre  $n \cdot \rho$ , on  $n$  pren valors entre 0,9 i 4,3 i  $\rho$  pren valors entre 0,26 i 3,06%,  $d/h$  i el diàmetre de l'armadura.

Totes les seccions estudiades són de tipus rectangular, amb una amplada ( $b$ ) i una alçada ( $h$ ) variables entre 120 i 1000 mm per a l'amplada i 120 a 400 mm per a l'alçada. La llargada de la biga ( $L$ ) també és diferent per a cada biga i no és rellevant, ja que només és d'interès la distància que està situada la càrrega des del recolzament, per les bigues dels articles que ens proporcionen la força, i no el moment, en funció de l'amplada de fissura, ja que amb aquesta distància es pot calcular el moment flector màxim.

Les diferents bigues es consideren de formigó armat, compostes per un formigó amb un mòdul elàstic ( $E_c$ ) diferent per a cada una (entre 25 i 45 GPa) i l'armadura de barres de FRP. Les barres poden ser de GFRP (*Glass fiber-reinforced polymer* o fibres de vidre), de CFRP (*Carbon fiber-reinforced polymer* o fibres de carboni) o de AFRP (*Aramid fiber-reinforced polymer* o fibres d'aramida), i cada una té un mòdul elàstic diferent (generalment entre 30 i 70 GPa per a les barres de GFRP, entre 135 i 145 GPa per a les de CFRP i entre 45 i 125 GPa per a les barres de AFRP) i, com ja s'ha dit en l'apartat anterior, s'han classificat segons l'acabat superficial.

En principi, només es pretenia diferenciar tres tipus d'acabats (acabat amb corruga o *ribbed*, acabat amb sorreta o *sand-coated* i acabat amb una fibra longitudinal helicoidal o *wrapped*, veure Figura 9), però s'ha donat el cas que l'armadura d'algunes bigues té un altre tipus d'acabat, per la qual cosa també s'ha classificat l'acabat superficial en dos tipus més (acabat llis o *smooth* i acabat amb corruga 2 o *ribbed 2*, veure Figura 10). El *ribbed 2* presenta un procés de fabricació diferent al *ribbed*, ja que per fer la corruga no s'ha mecanitzat la barra ja existent, sinó que se li ha afegit una capa de material per sobre amb la forma de la corruga.



Figura 9. Tipus d'acabats superficials: (a) *ribbed*; (b) *sand-coated*; (c) *wrapped* (ACI 440.1R-06)

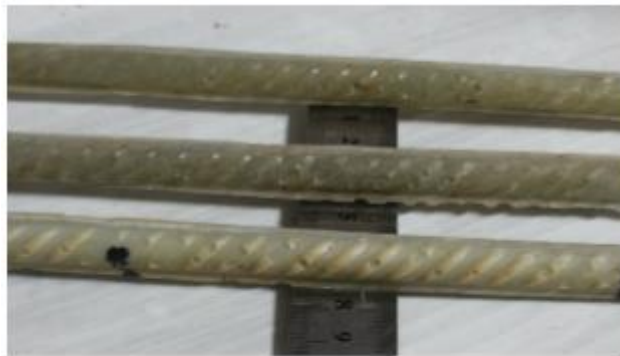


Figura 10. Acabat superficial del tipus *ribbed* 2 (Adam *et al.* 2015)

El diàmetre de les armadures ( $\varnothing$ ) varia entre 5 i 25 mm, tot i que la majoria estan compresos entre 10 i 20 mm. Per altra banda, hi ha diferents configuracions pel que fa al nombre de barres de les armadures, les quals són: 2, 3, 4, 6, 7 o 12 barres (configuracions de 7 i 12 barres poc usuals).

El recobriment geomètric de l'armadura també és un paràmetre a estudiar, ja que conjuntament amb l'alçada de la secció determinen l'alçada efectiva. El recobriment geomètric és la distància de la cara de tensions (la de baix de la biga) a la superfície de la barra més propera de l'armadura. Els diferents recobriments geomètrics de les diferents bigues varien de 20 a 55 mm.

Com ja s'ha mencionat anteriorment, en cada model de càlcul d'amplada de fissura utilitzat s'ha tingut en compte si es tracta d'amplada de fissura màxima o mitjana. Depenent de la normativa emprada, també s'ha considerat l'obertura de fissura a la superfície de baix de biga o a l'alçada del reforç. Per aproximar el valor de l'amplada de fissura a l'alçada del reforç a l'amplada de fissura a baix de la biga es multiplica pel paràmetre  $\beta$  (Eq. 3). Per fer la conversió contrària es divideix l'amplada de fissura per  $\beta$ . La predicció de resultats s'ha considerat en la fase de fissuració estabilitzada (veure apartat 2.4).

## 4 ANÀLISI DE RESULTATS

La finalitat d'aquest treball és analitzar la fissuració en servei en una biga de formigó armat sotmesa a flexió pura mitjançant l'estudi paramètric.

Concretament, s'analitza la influència dels paràmetres  $n \cdot \rho$ ,  $d/h$ , tipus d'acabat superficial i  $\emptyset$  sobre el coeficient d'adherència ( $k_b$ ), per les normatives ACI 440 i ISIS. Primerament, s'analitza la influència d'aquests paràmetres sobre  $k_b$  solament per la normativa ACI 440, llavors per la normativa ISIS i finalment es comparen els resultats d'ambdues normatives. A més, com ja s'ha explicat anteriorment, també s'analitza la variància del factor acabat superficial mitjançant el mètode estadístic ANOVA, per tal de determinar si hi ha diferències significatives entre les mitjanes dels coeficients d'adherència de cada tipus de d'acabat.

Finalment, la última anàlisi de resultats consisteix en estudiar l'adequació dels resultats teòrics d'amplada de fissura obtinguts segons cadascuna de les normatives sobre els resultats experimentals. Aquesta anàlisi es fa utilitzant totes les normatives (ACI 440, ISIS, EC2-92 i EC2-04).

### 4.1 Anàlisi de la influència de diferents paràmetres sobre $k_b$ segons la normativa ACI 440

Primerament, s'ha analitzat la tendència que segueix el coeficient d'adherència en funció dels diferents paràmetres, sense classificar el tipus d'acabat superficial en cap cas i, llavors, classificant segons el tipus d'acabat superficial i el fabricant.

Com es pot veure a les equacions 1 i 10 interessa que el coeficient  $k_b$  sigui el més petit possible, ja que l'amplada de fissura és proporcional a aquest coeficient i, per tant, si disminueix  $k_b$  també ho fa  $w$ .

#### 4.1.1 $k_b - \emptyset$

Primerament, es representa gràficament el coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues i analitzar si hi ha una tendència del coeficient d'adherència per aquest paràmetre. Com es pot observar a la Figura 11, el núvol de punts del coeficient d'adherència no segueix una tendència clara en funció del diàmetre. A més, la dispersió és bastant elevada. Per tant, a priori no es poden treure conclusions sobre la influència del diàmetre sobre el coeficient d'adherència.

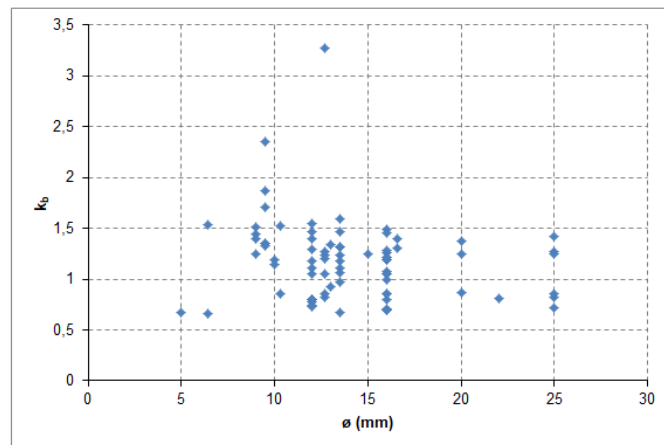


Figura 11. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues

Com que la distribució de  $k_b - \varnothing$  per a totes les bigues no segueix una tendència clara, a continuació s'estudia l'efecte del tipus d'acabat superficial de l'armadura per aquesta distribució. L'acabat superficial es classifica segons l'indicat a l'apartat 3.3.

#### 4.1.1.1 $k_b - \varnothing$ pel tipus d'acabat superficial *ribbed*

Primerament, s'ha representat gràficament  $k_b - \varnothing$  per a cada fabricant de l'acabat superficial *ribbed*. Els diferents fabricants són *Shoeck*, *Marshall* i *deformed*, tot i que aquest últim no és un fabricant en si, sinó un tipus de *ribbed*, ja que a l'article d'on s'han extret les dades experimentals de les bigues amb aquestes armadures no s'hi especifica el fabricant.

A continuació es mostren les Figures 12, 13 i 14, les quals hi ha representat  $k_b - \varnothing$  pels diferents fabricants de l'acabat superficial *ribbed*.

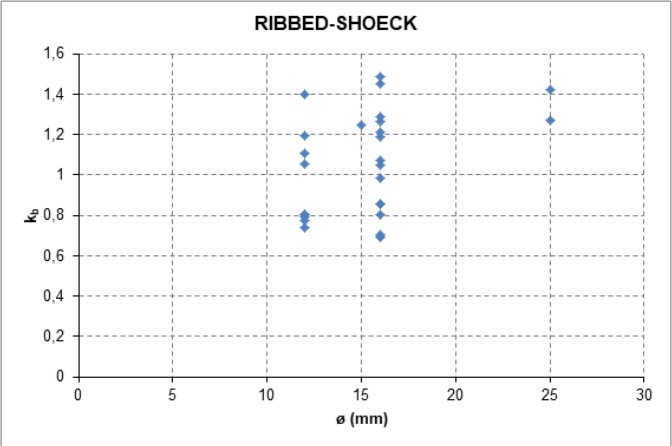


Figura 12. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a les bigues amb acabat superficial  
*ribbed – Shoeck*

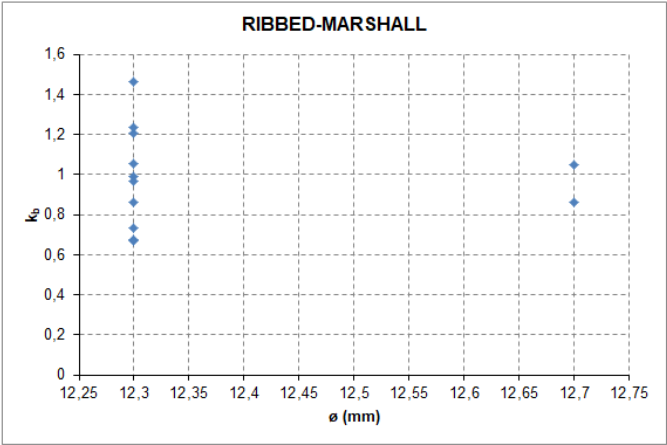


Figura 13. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a les bigues amb acabat superficial  
*ribbed – Marshall*

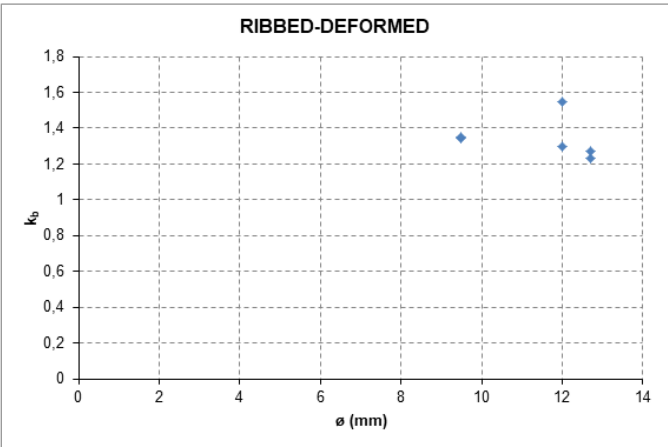


Figura 14. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a les bigues amb acabat superficial  
*ribbed – deformed*

Com es pot observar, classificant per acabats i fabricant la dispersió disminueix bastant. Per determinar si el diàmetre de l'armadura influeix en el coeficient d'adherència, es calcula per a cada diàmetre i cada fabricant del tipus d'acabat *ribbed* el coeficient d'adherència mitjà i el seu interval de tolerància o coeficient de variació (en anglès *coefficient of variance, CoV*). El *CoV* es calcula de la següent manera:

$$CoV = \frac{\sigma}{\bar{\mu}} \quad (\text{Eq. 28})$$

essent  $\sigma$  la desviació estàndard del coeficient d'adherència respecte cada diàmetre i tipus d'acabat superficial i  $\bar{\mu}$  la mitjana del coeficient d'adherència de cada diàmetre i tipus d'acabat.

A continuació es mostra una taula per a cada fabricant on hi ha per a cada diàmetre el coeficient d'adherència mitjà, el seu *CoV* i la desviació estàndard.

$\phi$ (mm)	12	15	16	25	Tots els $\phi$
<b><math>k_b</math> mitjà</b>	0,95	1,24	1,05	1,35	1,06
<b>Desv. Estand.</b>	0,225	0	0,271	0,106	0,257
<b>CoV</b>	0,238	0	0,257	0,079	0,242

Taula 7. Coeficient d'adherència mitjà amb el seu *CoV* per a cada diàmetre de les bigues amb acabat superficial *ribbed* – *Shoeck*

$\phi$ (mm)	12	Tots els $\phi$
<b><math>k_b</math> mitjà</b>	0,98	0,98
<b>Desv. Estand.</b>	0,241	0,241
<b>CoV</b>	0,246	0,246

Taula 8. Coeficient d'adherència mitjà amb el seu *CoV* per a cada diàmetre de les bigues amb acabat superficial *ribbed* – *Marshall*

$\phi$ (mm)	9,5	12	12,7	Tots els $\phi$
<b><math>k_b</math> mitjà</b>	1,35	1,42	1,25	1,34
<b>Desv. Estand.</b>	0,004	0,176	0,029	0,110
<b>CoV</b>	0,003	0,124	0,023	0,082

Taula 9. Coeficient d'adherència mitjà amb el seu *CoV* per a cada diàmetre de les bigues amb acabat superficial *ribbed* – *deformed*

Com es pot observar, no existeix una tendència clara creixent o decreixent del coeficient d'adherència en funció del diàmetre del reforç. Cal destacar que en el cas dels FRP, el mòdul d'elasticitat de la barra és depenent del diàmetre d'aquesta (Barris *et al.* 2013), podent emascarar el possible efecte del diàmetre en el coeficient d'adherència. Per altra banda, és possible establir una comparació entre els diferents fabricants de *ribbed* per al diàmetre de 12 mm. Si es compara el coeficient d'adherència pel diàmetre de 12 mm entre els tres fabricants s'observa que entre els fabricants *ribbed – Shoeck* i *ribbed – Marshall* el coeficient  $k_b$  és bastant igual sent de  $0.95 \pm 0.238$  i  $0.98 \pm 0.246$ , respectivament. Per tant, no se'n poden treure conclusions perquè no hi ha cap diferència significativa. No obstant, el coeficient d'adherència del *ribbed – deformed* ( $k_b = 1.34 \pm 0.082$ ) és molt major. Així doncs, fins aquí es pot concloure que el pitjor acabat superficial és el del fabricant *ribbed – deformed*.

Com que els altres diàmetres dels que es disposen de cada fabricant de l'acabat *ribbed* no coincideixen entre ells, per tal de treure'n conclusions finals s'ha calculat el coeficient d'adherència mitjà amb el seu CoV per a totes les bigues (tots els diàmetres) de cada fabricant. Els coeficients d'adherència mitjans globals (considerant tots els diàmetres de cada fabricant) es mostren a les taules 7, 8 i 9.

Segons aquests resultats, el millor coeficient d'adherència (el més petit) per l'acabat superficial *ribbed* i classificant-lo per fabricants és amb les armadures de *ribbed - Marshall*, seguit de les *ribbed - Shoeck* i el pitjor amb les *ribbed - deformed*.

$$k_{b,Marshall} < k_{b,Shoeck} < k_{b,deformed}$$

A continuació, es mostra la Figura 15 en la que hi ha representat gràficament el coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues i diferenciant-les per fabricants:



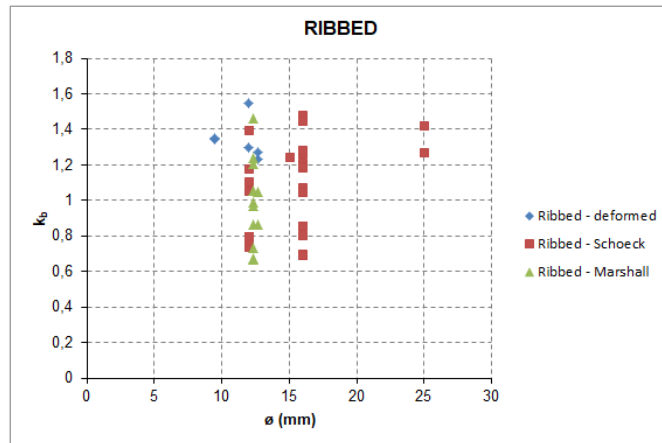


Figura 15. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues de l'acabat superficial *ribbed* diferenciant-les per fabricants

#### 4.1.1.2 $k_b - \phi$ pel tipus d'acabat superficial *wrapped*

Per l'acabat superficial *wrapped* hi ha dos fabricants: *wrapped\_1* i *wrapped Aslan*. En aquest cas *wrapped\_1* tampoc és un fabricant i aquest subgènere de l'acabat superficial *wrapped* se l'ha anomenat així per diferenciar-lo de l'altre fabricant, ja que a l'article d'on s'han tret les dades d'aquestes bigues no s'especifica el fabricant de l'acabat superficial.

S'ha seguit el mateix procediment que pel *ribbed*. A continuació es mostren les Figures 16 i 17, a les quals hi ha representat  $k_b - \phi$  pels diferents fabricants de l'acabat superficial *wrapped*.

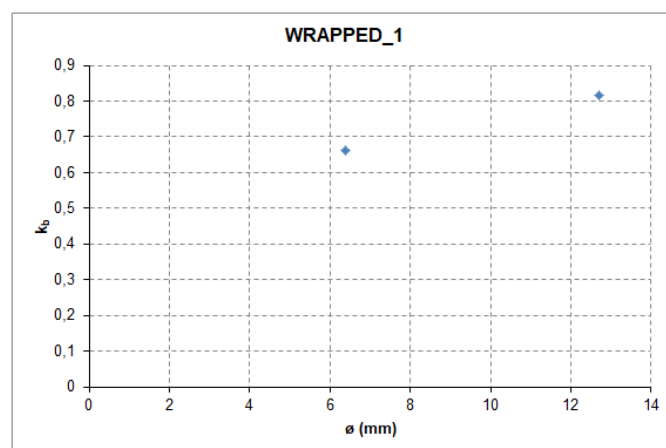


Figura 16. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a les bigues amb acabat superficial *wrapped\_1*

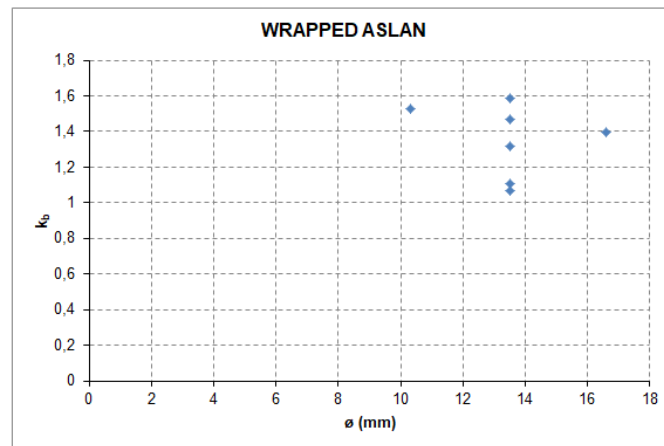


Figura 17. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a les bigues amb acabat superficial *wrapped Aslan*

A continuació es mostren les taules 10 i 11 on hi ha, per a cada diàmetre, el coeficient d'adherència mitjà, el seu CoV i la desviació estàndard.

ø (mm)	6,4	12,7	Tots els ø
k <sub>b</sub> mitjà	0,66	0,82	0,74
Desv. Estand.	0	0	0,110
CoV	0	0	0,149

Taula 10. Coeficient d'adherència mitjà amb el seu CoV per a cada diàmetre de les bigues amb acabat superficial *wrapped\_1*

ø (mm)	10,3	13,5	16,6	Tots els ø
k <sub>b</sub> mitjà	1,53	1,31	1,39	1,35
Desv. Estand.	0	0,225	0	0,202
CoV	0	0,172	0	0,149

Taula 11. Coeficient d'adherència mitjà amb el seu CoV per a cada diàmetre de les bigues amb acabat superficial *wrapped Aslan*

Igual que en el subapartat anterior, no s'aconsegueix establir una relació clara entre el diàmetre i el coeficient d'adherència. Addicionalment, en aquest cas, com que no es disposa de diàmetres iguals pels dos fabricants s'ha calculat directament el coeficient d'adherència mitjà global per a cada un. El millor fabricant pel *wrapped* és el *wrapped\_1* perquè té el coeficient d'adherència mitjà global més petit ( $k_b = 0.74 \pm 0.149$ ), mentre que el *wrapped Aslan* té un coeficient d'adherència mitjà global més gran ( $k_b = 1.35 \pm 0.149$ ).

$$k_{b,Wrapped\_1} < k_{b,Aslan}$$

A continuació, es mostra la Figura 18 on hi ha representat gràficament el coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues i diferenciant-les per fabricants:

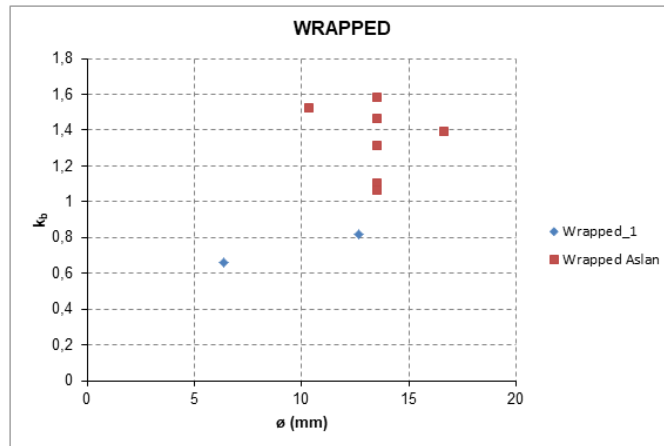


Figura 18. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues de l'acabat superficial *wrapped* diferenciant-les per fabricants

#### 4.1.1.3 $k_b - \varnothing$ pel tipus d'acabat superficial *sand-coated*

En aquest cas no hi ha classificació per fabricants. Per determinar si el diàmetre de l'armadura influeix en el coeficient d'adherència, es calcula per a totes les bigues (tots els diàmetres) del tipus d'acabat *sand-coated* el coeficient d'adherència mitjà global i el seu interval de tolerància (CoV).

A continuació es mostra la Figura 19, a la qual hi ha representat  $k_b - \varnothing$  per a tots els diàmetres de l'acabat superficial *sand-coated*.

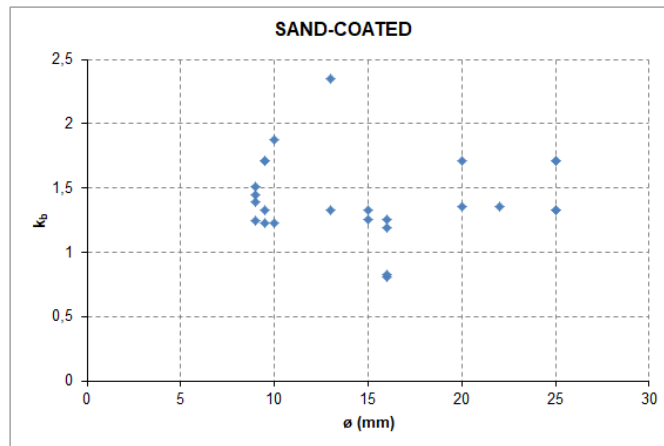


Figura 19. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues de l'acabat superficial *sand-coated*

El coeficient d'adherència mitjà global per a les bigues amb acabat superficial *sand-coated* és de  $1.27 \pm 0.287$ , i, igual que en els dos casos anteriors, es fa difícil establir una relació entre el coeficient d'adherència i el diàmetre del reforç.

#### 4.1.1.4 $k_b - \varnothing$ pel tipus d'acabat superficial *smooth*

Pel tipus d'acabat superficial *smooth* tampoc hi ha classificació per fabricants. La base de dades només conté dues bigues amb aquest tipus d'acabat superficial, una d'elles amb un coeficient d'adherència molt gran de 3.28 (dada atípica). Per tant, en aquest cas no s'ha calculat el coeficient d'adherència mitjà global amb el seu CoV. Per aquest tipus d'acabat superficial  $k_b = 1,54$ .

A continuació es mostra la Figura 20, a la qual hi ha representat  $k_b - \varnothing$  pels dos únics diàmetres de l'acabat superficial *smooth*.

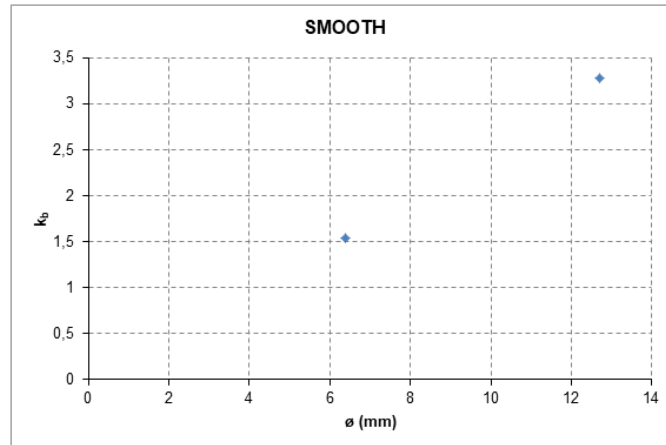


Figura 20. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues de l'acabat superficial *smooth*

#### 4.1.2 $k_b$ – acabat superficial

En aquest apartat es pretén analitzar quin dels 4 tipus d'acabat superficial és el millor, és a dir, quin és el que genera amplades de fissura més petites. Per tal de realitzar aquesta comparació es calculen els coeficients d'adherència mitjans amb els seus CoV per a cada tipus d'acabat superficial i sense tenir en compte els fabricants per a cada un d'ells. A continuació es mostren els coeficients d'adherència mitjans globals amb els seus CoV:

$$k_{b,Ribbed} = 1.07 \pm 0.245$$

$$k_{b,Wrapped} = 1.22 \pm 0.266$$

$$k_{b,Sand-coated} = 1.27 \pm 0.287$$

$$k_{b,Smooth} = 2.41 \pm 0.511$$

Per tant, els coeficients d'adherència mitjans globals en funció del diàmetre es relacionen entre ells de la següent manera:

$$k_{b,Ribbed} < k_{b,Wrapped} < k_{b,Sand-coated} < k_{b,Smooth}$$

El tipus d'acabat *ribbed* és el que té un millor coeficient d'adherència, seguit del *wrapped* i del *sand-coated*. L'acabat superficial que té el pitjor coeficient d'adherència és l'*smooth*. Aquesta conclusió és l'esperada, ja que l'acabat *ribbed* és el que permet una millor transferència d'esforços tallants entre la barra i el formigó del voltant. (Baena *et al.* 2009).

#### 4.1.3 $k_b - n \cdot \rho$

Primerament, es representa gràficament el coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  per a totes les bigues i s'analitza si hi ha una tendència del coeficient d'adherència per aquest paràmetre. La Figura 21 representa la relació entre el coeficient d'adherència i  $n \cdot \rho$ . Aparentment, la dispersió es bastant elevada, i a priori no es poden treure conclusions sobre la influència de  $n \cdot \rho$  sobre el coeficient d'adherència.

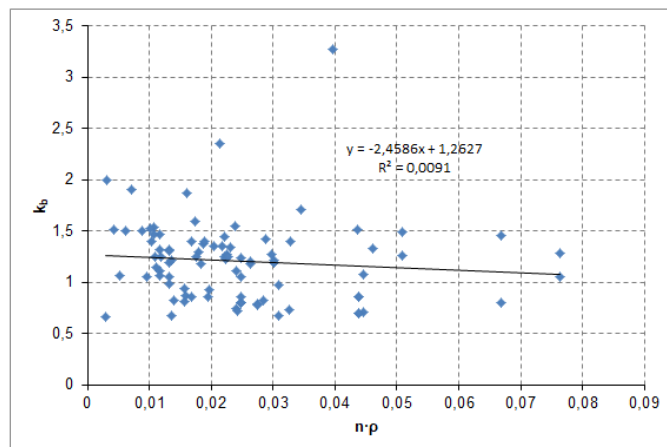


Figura 21. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  per a totes les bigues

A la Figura 21, el núvol de punts obtingut s'ha ajustat una tendència lineal, obtenint un coeficient de correlació  $R^2$  molt baix. La  $R^2$  representa la bondat d'ajust de la recta de regressió lineal (mesura la proporció de la variació de  $k_b$  explicada per la seva relació en  $n \cdot \rho$ , en aquest cas) i pren valors entre 0 i 1. Quan més proper a 1, més perfecte és la correlació, és a dir, la recta de regressió estarà més ben ajustada al núvol de punts. Com es pot observar, si s'agafen els valors de totes les bigues (tots els acabats superficials inclosos),  $R^2$  pren un valor de 0.005, el qual és molt petit i significa que no hi ha una correlació significativa per afirmar la dependència. Així doncs, es pot afirmar que hi ha molta dispersió.

Per tal de reduir la dispersió, s'analitza com varia el coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  classificant les diferents bigues segons el tipus d'acabat superficial de l'armadura. En aquest cas no es pot deduir la influència de  $n \cdot \rho$  sobre el coeficient d'adherència perquè les dispersions del coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  no segueixen una tendència clara ni constant existint una dispersió de valors d'aquest paràmetre molt important entre totes les bigues amb un mateix tipus d'acabat superficial. Per tant, no es pot determinar la influència de  $n \cdot \rho$  sobre  $k_b$ . Les representacions gràfiques de les tendències del coeficient d'adherència per aquest paràmetre i per a cada acabat superficial es troben a l'Annex A.1.1.

#### 4.1.4 $k_b - d/h$

Pel paràmetre  $d/h$  primerament també es representa gràficament el coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a totes les bigues i s'analitza si hi ha una tendència del coeficient d'adherència per aquest paràmetre. La Figura 22 representa la relació entre el coeficient d'adherència i  $d/h$ . A simple vista la dispersió es bastant elevada, i a priori no es poden treure conclusions sobre la influència de  $d/h$  sobre el coeficient d'adherència.

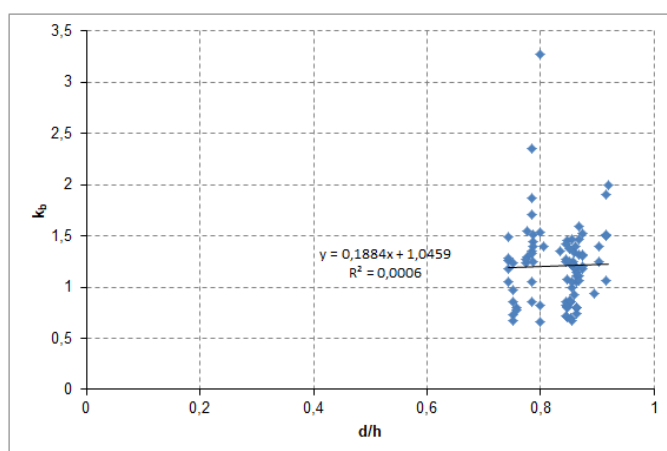


Figura 22. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a totes les bigues

Analitzant com varia el coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  classificant les diferents bigues segons el tipus d'acabat superficial de l'armadura, s'observa que la dispersió baixa, però que tampoc se'n poden treure conclusions perquè les dispersions de punts no segueixen tendències clares.

Les representacions gràfiques de les tendències del coeficient d'adherència per aquest paràmetre i per a cada acabat superficial es troben a l'Annex A.1.2.

#### 4.2 Anàlisi de la influència de diferents paràmetres sobre $k_b$ segons la normativa ISIS

Com en la norma ACI 440, primer s'ha analitzat la tendència que segueix el coeficient d'adherència en funció dels diferents paràmetres, sense classificar el tipus d'acabat superficial en cap cas i, llavors, classificant segons el tipus d'acabat superficial i el fabricant.

##### 4.2.1 $k_b - \varnothing$

Primerament, es representa gràficament el coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues i analitzar si hi ha una tendència del coeficient d'adherència per aquest paràmetre. Com es pot observar a la Figura 23, el núvol de punts del coeficient d'adherència no segueix una tendència clara en funció del diàmetre. A més, la dispersió es bastant elevada. Per tant, a priori no es poden treure conclusions sobre la influència del diàmetre sobre el coeficient d'adherència.

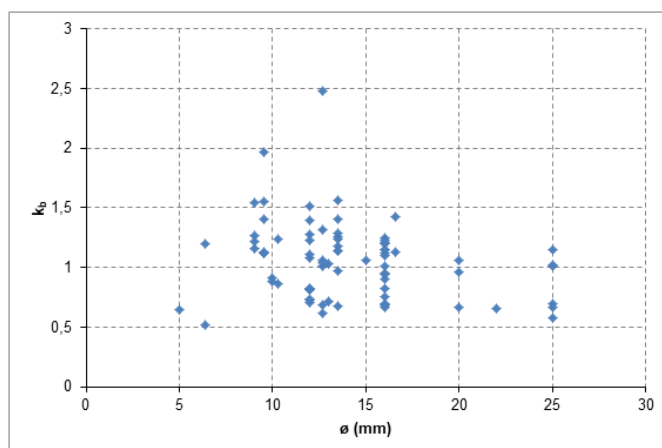


Figura 23. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues

Com que la distribució de  $k_b - \varnothing$  per a totes les bigues no segueix una tendència clara, a continuació s'estudia l'efecte del tipus d'acabat superficial de l'armadura per aquesta distribució.

##### 4.2.1.1 $k_b - \varnothing$ pel tipus d'acabat superficial *ribbed*

Tal i com s'ha fet per la norma ACI 440, primerament s'ha representat gràficament  $k_b - \varnothing$  per a cada fabricant de l'acabat superficial *ribbed*. Els diferents fabricants són *Shoeck*, *Marshall* i *deformed*.

A continuació es mostren les Figures 24, 25 i 26, les quals hi ha representat  $k_b - \varnothing$  pels diferents fabricants de l'acabat superficial *ribbed*.



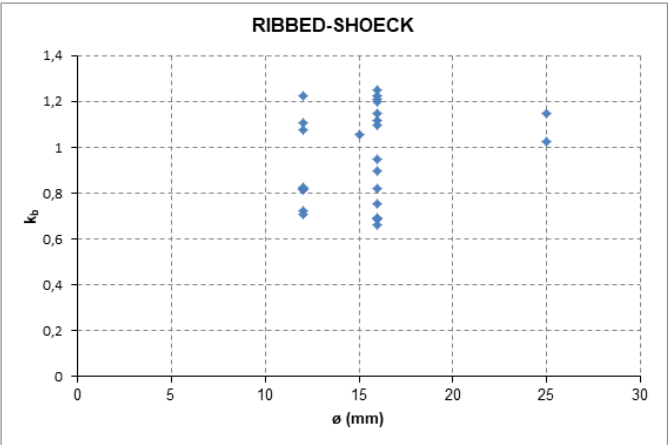


Figura 24. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a les bigues amb acabat superficial  
*ribbed – Shoeck*

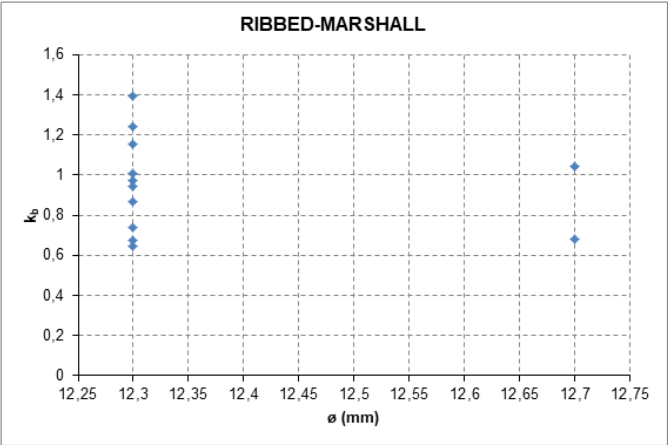


Figura 25. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a les bigues amb acabat superficial  
*ribbed – Marshall*

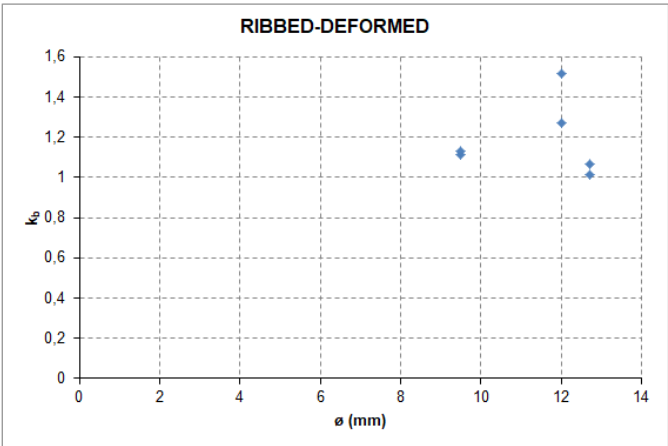


Figura 26. Coeficient del coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a les bigues amb acabat  
superficial *ribbed – deformed*

Amb la normativa ISIS, com es pot observar classificant per acabats i fabricant la dispersió també disminueix bastant. Per determinar si el diàmetre de l'armadura influeix en el coeficient d'adherència, es calcula per a cada diàmetre i cada fabricant del tipus d'acabat *ribbed* el coeficient d'adherència mitjà i el seu CoV (Eq. 28), tal i com s'ha fet amb la norma ACI 440.

A continuació es mostra una taula per a cada fabricant on hi ha per a cada diàmetre el coeficient d'adherència mitjà, el seu CoV i la desviació estàndard.

$\phi$ (mm)	12	15	16	25	Tots els $\phi$
<b><math>k_b</math> mitjà</b>	0,89	1,06	0,96	1,09	0,95
<b>Desv. Estand.</b>	0,176	0	0,228	0,085	0,201
<b>CoV</b>	0,197	0	0,238	0,079	0,212

Taula 12. Coeficient d'adherència mitjà amb el seu CoV per a cada diàmetre de les bigues amb acabat superficial *ribbed* – *Shoeck*

$\phi$ (mm)	12	Tots els $\phi$
<b><math>k_b</math> mitjà</b>	0,95	0,95
<b>Desv. Estand.</b>	0,240	0,240
<b>CoV</b>	0,253	0,253

Taula 13. Coeficient d'adherència mitjà amb el seu CoV per a cada diàmetre de les bigues amb acabat superficial *ribbed* – *Marshall*

$\phi$ (mm)	9,5	12	12,7	Tots els $\phi$
<b><math>k_b</math> mitjà</b>	1,12	1,39	1,04	1,19
<b>Desv. Estand.</b>	0,012	0,172	0,038	0,184
<b>CoV</b>	0,011	0,124	0,036	0,155

Taula 14. Coeficient d'adherència mitjà amb el seu CoV per a cada diàmetre de les bigues amb acabat superficial *ribbed* – *deformed*

Com es pot observar, amb aquest norma tampoc existeix una tendència clara creixent o decreixent del coeficient d'adherència en funció del diàmetre del reforç. No obstant, és possible establir una comparació entre els diferents fabricants de *ribbed* per al diàmetre de 12 mm. En aquest cas, si es compara el coeficient d'adherència pel diàmetre de 12 mm entre els tres fabricants ja se'n poden

treure unes primeres conclusions. Els coeficients d'adherència de cada fabricant pel diàmetre de 12 mm són  $k_{b,Shoeck} = 0,89 \pm 0,197$ ,  $k_{b,Marshall} = 0,95 \pm 0,253$  i  $k_{b,deformed} = 1,39 \pm 0,124$ . Per tant, pel diàmetre de 12 mm es pot concloure que el millor acabat superficial és el *ribbed – Shoeck*, seguit del *ribbed – Marshall* i el pitjor el *ribbed – deformed*, ja que, com ja s'ha explicat anteriorment, com més petit sigui el coeficient d'adherència, menor serà l'amplada de fissura i, per tant, millor acabat superficial.

Com que els altres diàmetres dels que es disposen de cada fabricant de l'acabat *ribbed* no coincideixen entre ells, per tal de treure'n conclusions finals i validar la conclusió anterior s'ha calculat el coeficient d'adherència mitjà amb el seu CoV per a totes les bigues (tots els diàmetres) de cada fabricant. Els coeficients d'adherència globals (considerant tots els diàmetres de cada fabricant) es mostren a les taules 12, 13 i 14.

A partir d'aquests resultats, no s'observen diferències significatives entre els coeficients d'adherència mitjans globals dels fabricants *ribbed – Shoeck* i *ribbed – Marshall*. Per tant, no es pot validar la conclusió treta a partir del diàmetre de 12 mm. No obstant, el *ribbed – deformed* continua sent el que té un coeficient d'adherència més dolent (més alt).

Per tant, la conclusió final és que el millor coeficient d'adherència en funció del diàmetre de l'armadura per l'acabat superficial *ribbed* i classificant-lo per fabricants és o el *ribbed – Shoeck* o el *ribbed – Marshall* (sent més probable que sigui millor el *ribbed – Shoeck* per la comparació dels coeficients d'adherència pel diàmetre de 12 mm) i el pitjor coeficient d'adherència és segur el del *ribbed – deformed*.

$$k_{b,Shoeck} \sim k_{b,Marshall} < k_{b,deformed}$$

A continuació, es mostra la Figura 27 en la que hi ha representat gràficament el coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues i diferenciant-les per fabricants:

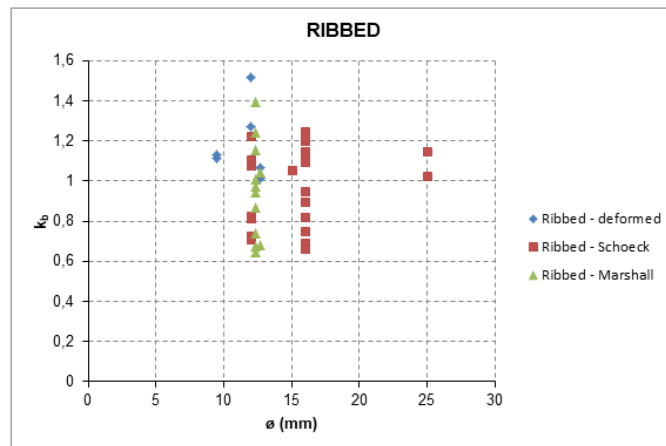


Figura 27. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues de l'acabat superficial *ribbed* diferenciant-les per fabricants

#### 4.2.1.2 $k_b - \phi$ pel tipus d'acabat superficial *wrapped*

Com en el cas de la norma ACI 440, per l'acabat superficial *wrapped* hi ha dos fabricants: *wrapped\_1* i *wrapped Aslan*.

A continuació es mostren les Figures 28 i 29, a les quals hi ha representat  $k_b - \phi$  pels diferents fabricants de l'acabat superficial *wrapped*.

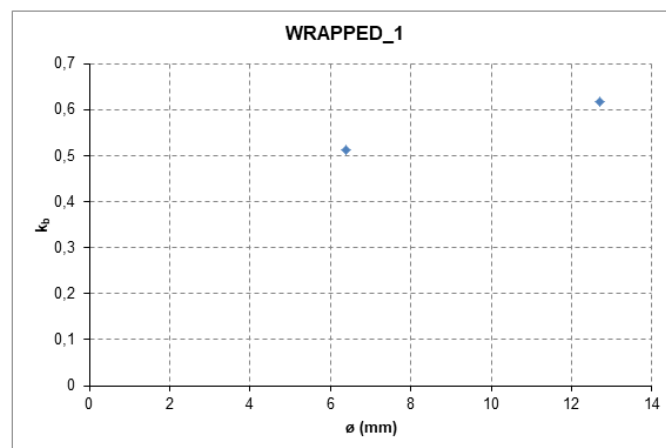


Figura 28. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a les bigues amb acabat superficial *wrapped\_1*

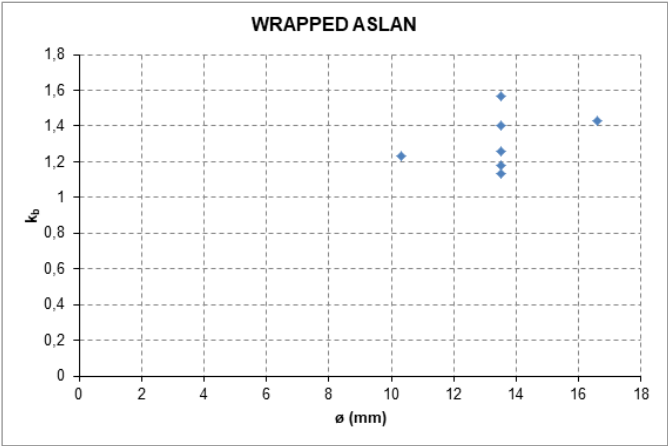


Figura 29. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a les bigues amb acabat superficial  
*wrapped Aslan*

A continuació es mostra una taula per a cada fabricant on hi ha per a cada diàmetre el coeficient d'adherència mitjà, el seu *CoV* i la desviació estàndard.

ø (mm)	6,4	12,7	Tots els ø
k <sub>b</sub> mitjà	0,51	0,62	0,57
Desv. Estand.	0	0	0,074
CoV	0	0	0,130

Taula 15. Coeficient d'adherència mitjà amb el seu *CoV* per a cada diàmetre de les bigues amb acabat  
superficial *wrapped\_1*

ø (mm)	10,3	13,5	16,6	Tots els ø
k <sub>b</sub> mitjà	1,23	1,31	1,43	1,31
Desv. Estand.	0	0,175	0	0,154
CoV	0	0,134	0	0,117

Taula 16. Coeficient d'adherència mitjà amb el seu *CoV* per a cada diàmetre de les bigues amb acabat  
superficial *wrapped Aslan*

En aquest cas, com que no es disposa de diàmetres iguals pels dos fabricants s'ha calculat directament el coeficient d'adherència mitjà global per a cada un. El millor fabricant pel *wrapped* és el *wrapped\_1* perquè té el coeficient d'adherència mitjà global més petit ( $k_b = 0.57 \pm 0.130$ ), mentre que el *wrapped Aslan* té un coeficient d'adherència mitjà global més gran ( $k_b = 1.31 \pm 0.117$ ).

$$k_{b,Wrapped\_1} < k_{b,Aslan}$$

A continuació, es mostra la Figura 30 on hi ha representat gràficament el coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues i diferenciant-les per fabricants:

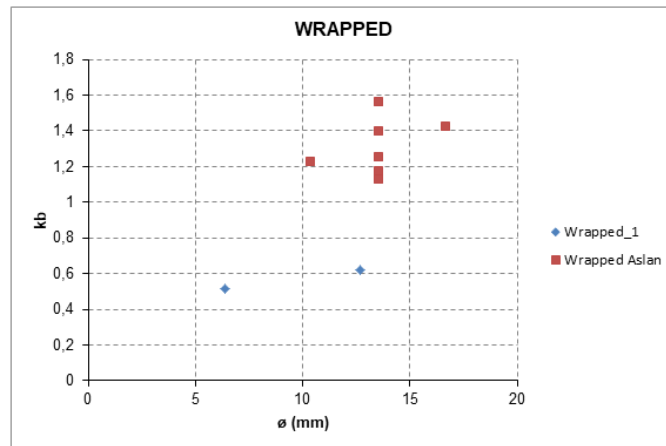


Figura 30. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues de l'acabat superficial *wrapped* diferenciant-les per fabricants

#### 4.2.1.3 $k_b - \phi$ pel tipus d'acabat superficial *sand-coated*

En aquest cas no hi ha classificació per fabricants. Per determinar si el diàmetre de l'armadura influeix en el coeficient d'adherència, es calcula per a totes les bigues (tots els diàmetres) del tipus d'acabat *sand-coated* el coeficient d'adherència mitjà global i el seu interval de tolerància (CoV).

A continuació es mostra la Figura 31, a la qual hi ha representat  $k_b - \phi$  per a tots els diàmetres de l'acabat superficial *sand-coated*.

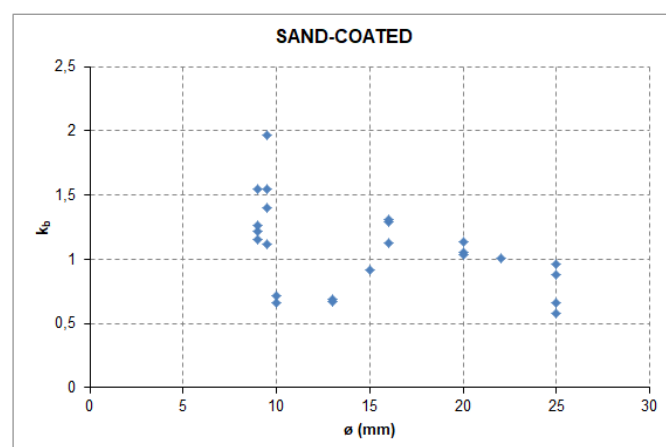


Figura 31. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues de l'acabat superficial *sand-coated*

El coeficient d'adherència mitjà global per a les bigues amb acabat superficial *sand-coated* és de  $1.08 \pm 0.314$ .

A més, en aquest cas s'observa una clara tendència dels valors del coeficient d'adherència en funció del diàmetre. Quan augmenta el diàmetre, el coeficient d'adherència disminueix, és a dir, quan més gran és el diàmetre de les barres de l'armadura hi ha millor adherència i, per tant, es redueix l'amplada de fissura.

#### 4.2.1.4 $k_b - \phi$ pel tipus d'acabat superficial *smooth*

Pel tipus d'acabat superficial *smooth* tampoc hi ha classificació per fabricants. La base de dades només conté dues bigues amb aquest tipus d'acabat superficial, una d'elles amb un coeficient d'adherència molt gran de 2,48 (dada atípica). Per tant, en aquest cas no s'ha calculat el coeficient d'adherència mitjà global amb el seu CoV. Per aquest tipus d'acabat superficial  $k_b = 1,19$ .

A continuació es mostra la Figura 32, a la qual hi ha representat  $k_b - \phi$  per a tots els diàmetres de l'acabat superficial *smooth*.

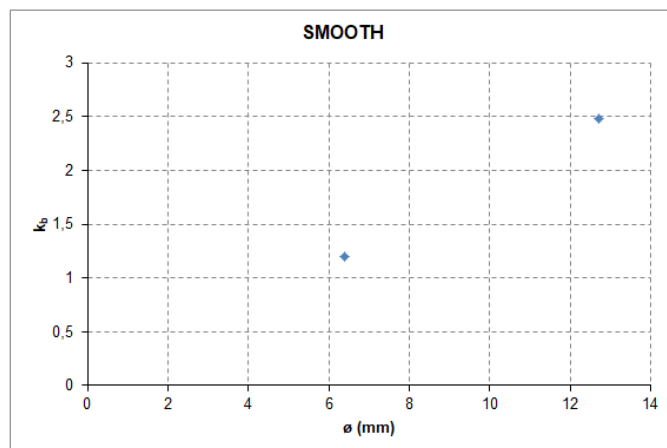


Figura 32. Coeficient d'adherència en funció del diàmetre per a totes les bigues de l'acabat superficial *smooth*

#### 4.2.2 $k_b$ – acabat superficial

En aquest apartat es pretén analitzar quin dels 4 tipus d'acabat superficial és el millor, és a dir, quin és el que genera amplades de fissura més petites. Per tal de realitzar aquesta comparació es calculen els coeficients d'adherència mitjans amb els seus CoV per a cada tipus d'acabat superficial i sense tenir en compte els fabricants per a cada un d'ells. A continuació es mostren els coeficients d'adherència mitjans globals amb els seus CoV:

$$k_{b,Ribbed} = 0.98 \pm 0.225$$

$$k_{b,Wrapped} = 1.15 \pm 0.311$$

$$k_{b,Sand-coated} = 1.08 \pm 0.314$$

$$k_{b,Smooth} = 1.83 \pm 0.494$$

Per tant, els coeficients d'adherència mitjans globals en funció del diàmetre es relacionen entre ells de la següent manera:

$$k_{b,Ribbed} < k_{b,Sand-coated} < k_{b,Wrapped} < k_{b,Smooth}$$

El tipus d'acabat *ribbed* és el que té un millor coeficient d'adherència i l'acabat *smooth* el pitjor. No obstant, amb la norma ISIS, les armadures amb acabat superficial *sand-coated* tenen més bon coeficient d'adherència que les *wrapped* (al contrari que amb la norma ACI 440). Com en el cas de la normativa ACI 440, l'acabat *ribbed* és el que té més bona adherència, ja que aquest acabat permet una millor transferència d'esforços tallants entre la barra i el formigó del voltant. (Baena *et al.* 2009).

#### 4.2.3 $k_b - n \cdot p$

Com amb la normativa ACI 440, primerament es representa gràficament el coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot p$  per a totes les bigues i s'analitza si hi ha una tendència del coeficient d'adherència per aquest paràmetre. La Figura 33 representa la relació entre el coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot p$ . Aparentment, la dispersió es bastant elevada, i a priori no es poden treure conclusions sobre la influència de  $n \cdot p$  sobre el coeficient d'adherència.



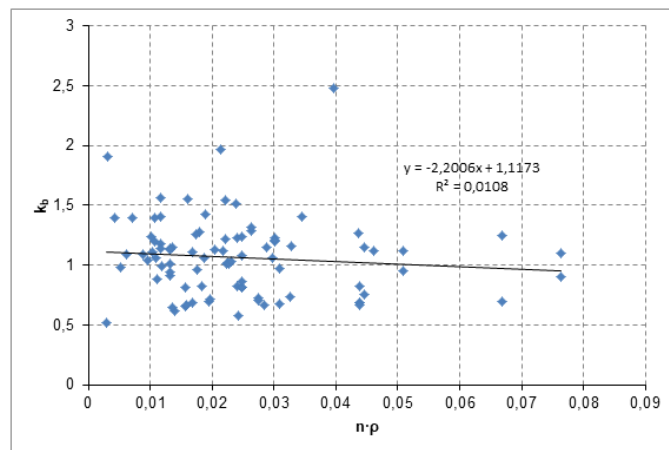


Figura 33. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  per a totes les bigues

Com es pot observar a la Figura 33 el coeficient d'adherència segueix una tendència lineal amb una  $R^2$  molt baixa. Si s'agafen els valors de totes les bigues (tots els acabats superficials inclosos),  $R^2$  pren un valor de 0.0108, el qual és molt petit i significa que no hi ha una correlació significativa per afirmar la dependència. Així doncs, es pot afirmar que hi ha molta dispersió.

Per tal de reduir la dispersió, s'analitza com varia el coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  classificant les diferents bigues segons el tipus d'acabat superficial de l'armadura. Con per la normativa ACI 440, en aquest cas no es pot deduir la influència de  $n \cdot \rho$  sobre el coeficient d'adherència perquè les dispersions del coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  no segueixen una tendència clara ni constant existint una dispersió de valors d'aquest paràmetre molt important entre totes les bigues amb un mateix tipus d'acabat superficial. Per tant, no es pot determinar la influència de  $n \cdot \rho$  sobre  $k_b$ . Les representacions gràfiques de les tendències del coeficient d'adherència per aquest paràmetre i per a cada acabat superficial es troben a l'Annex A.1.1.

Així doncs, per veure la influència de  $n \cdot \rho$  sobre el coeficient d'adherència el que es fa és utilitzar línies de tendència per a cada tipus d'acabat superficial (per tal de reduir la variabilitat). Utilitzant línies de tendència no se n'ha pogut treure conclusions en cap cas, ja que per a cada tipus d'acabat superficial, les dispersions del coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  no segueixen una tendència clara ni constant. Per tant, no es pot determinar la influència de  $n \cdot \rho$  sobre  $k_b$ . Les representacions gràfiques de les tendències del coeficient d'adherència per aquest paràmetre i per a cada acabat superficial es troben a l'Annex A.2.1.

#### 4.2.4 $k_b - d/h$

Pel paràmetre  $d/h$  primerament també es representa gràficament el coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a totes les bigues i s'analitza si hi ha una tendència del coeficient d'adherència per aquest paràmetre. La Figura 34 representa la relació entre el coeficient d'adherència i  $d/h$ . A simple vista la dispersió es bastant elevada, i a priori no es poden treure conclusions sobre la influència de  $d/h$  sobre el coeficient d'adherència.

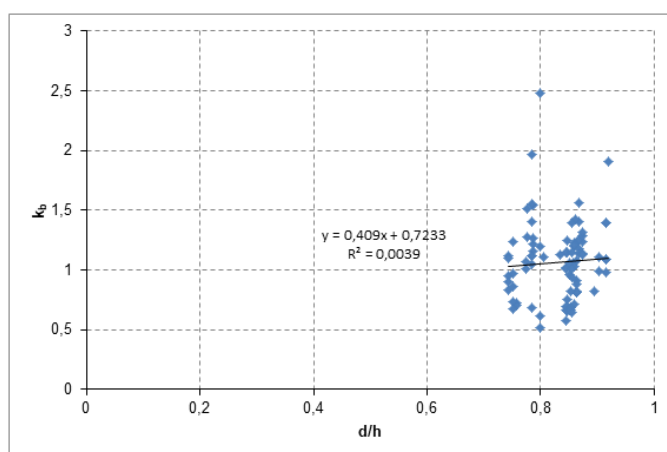


Figura 34. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a totes les bigues

Analitzant com varia el coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  classificant les diferents bigues segons el tipus d'acabat superficial de l'armadura, s'observa que la dispersió baixa, però que tampoc se'n poden treure conclusions perquè les dispersions de punts no segueixen tendències clares.

Les representacions gràfiques de les tendències del coeficient d'adherència per aquest paràmetre i per a cada acabat superficial es troben a l'Annex A.2.2.

#### 4.3 Anàlisi de la variància del factor acabat superficial

A les anàlisis de resultats 4.1.2 i 4.2.2, s'analitza la influència de l'acabat superficial sobre  $k_b$  per a les normatives ACI 440 i ISIS, respectivament. En ambdues normatives s'ha pogut concloure que l'acabat superficial amb millor adherència (el que té la mitjana del coeficient  $k_b$  més petita) és el *ribbed* i l'adherència més baixa s'obté amb l'acabat superficial *smooth* (el que té la mitjana del coeficient  $k_b$  més gran). No obstant, pels altres dos acabats superficials, en el cas de l'ACI 440 és millor el *wrapped* i en el cas de l'ISIS és millor el *sand - coated*. Així doncs, per tal de validar aquestes conclusions

interessa determinar si hi ha diferències significatives entre les mitjanes dels coeficients d'adherència de cada un d'aquests acabats superficials.

Mitjançant el mètode estadístic ANOVA s'ha analitzat la variància del factor acabat superficial, és a dir, s'ha comprovat si hi ha diferències significatives entre les mitjanes dels coeficients d'adherència ( $k_b$ ) de cada tipus d'acabat superficial (*ribbed*, *wrapped* i *sand-coated*). Per fer aquest estudi estadístic, no s'ha tingut en compte l'acabat superficial *smooth*, ja que no és significatiu sobre tot el conjunt de dades perquè només es disposen de dues bigues amb aquest tipus d'acabat superficial.

S'ha utilitzat aquest mètode perquè, en general, la pràctica de realitzar els resultats d'aquest tipus d'experiments comparant dos a dos (mitjançant les tècniques estadístiques de comparació de dues poblacions) totes les parelles possibles de tractaments o grups no és recomanable, ja que és molt laboriós i incrementa la probabilitat de cometre un error de primera espècie.

En aquest estudi, el mètode estadístic ANOVA consisteix en estudiar l'efecte d'un únic factor (acabat superficial de les armadures) amb tres variants o variables explicatives (els tres tipus d'acabat superficial) sobre la mitjana de la variable resposta (coeficient d'adherència que ha de ser el menor possible).

Així doncs, l'objectiu principal del mètode és aprendre a calcular la taula de l'ANOVA i treure conclusions sobre la variabilitat o no sobre la variable resposta dels factors involucrats, en aquest cas sobre només un d'ells. Un cop calculada la taula de l'anàlisi de la variància i si l'ANOVA resulta significatiu, amb aquest mètode es pot comparar les mitjanes de diferents poblacions.

En els següents subapartats hi ha desenvolupat i analitzats els resultats del mètode.

#### **4.3.1 Descomposició de la Suma de Quadrats. Test F**

##### **4.3.1.1 Descomposició de la variabilitat total**

Primerament, tal i com es mostra a la Figura 35, es vol arribar a fer la descomposició de la variabilitat total de les dades en la suma de dues altres variabilitats.

Variabilitat total en les dades	=	Variabilitat deguda a la diferència entre els tractaments o grups (efecte del factor acabat superficial)	+	Variabilitat residual (diferència dins de cada tractament)
---------------------------------------	---	--	---	--

Figura 35. Descomposició de la variabilitat total de les dades

El problema queda de la següent manera:

- Factors: acabat superficial de les armadures (només un)
- Variables explicatives: acabats superficials *ribbed*, *wrapped* i *sand-coated*.
- Variable resposta: coeficient d'adherència ( $k_b$ ).
- Objectiu: Existeixen diferències significatives entre els coeficients d'adherència mitjans ( $\overline{k_b}$ ) en les armadures dels tres tipus d'acabat superficial?

Es planteja el test d'hipòtesi nul·la ( $H_0$ ) d'igualtat de les tres mitjanes del coeficient d'adherència ( $k_b$ ) en front a la hipòtesi alternativa ( $H_1$ ) d'existència de desigualtat de les mitjanes en almenys en dues d'elles. A continuació hi ha representades les dues hipòtesis:

$$H_0: m_1 = m_2 = m_3$$

$$H_1: \exists i, j; i \neq j / m_1 \neq m_2$$

Un cop plantejades les dues hipòtesis, s'obtenen les mitjanes de cada un dels tractaments (tipus d'acabats superficials) i la mitjana de totes les dades.

I a continuació, es descomposa la variabilitat total en les dades en una variabilitat deguda als tractaments més una variabilitat residual (veure Figura 36). Per fer-ho, es calculen la suma de quadrats corresponents.

Així doncs, per veure si les variàncies són iguals o diferents utilitzem la Suma de Quadrats (SQ). La Figura 36 mostra un esquema de les diferents sumes de quadrats que s'utilitzen.

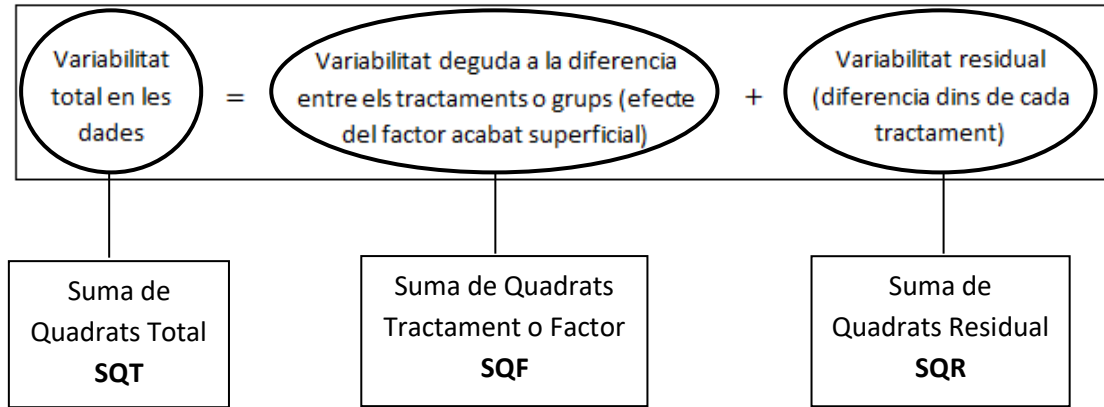


Figura 36. Descomposició de la variabilitat total de les dades mitjançant la suma de quadrats

- Suma de Quadrats Total (SQT):

És la suma dels quadrats de les desviacions de cada dada respecte a la mitjana general.

$$SQT = \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{Eq. 29})$$

- Suma de Quadrats Tractament o Factor (SQF):

És la suma dels quadrats de les desviacions de la mitjana de cada acabat superficial respecte a la mitjana general.

$$SQF = \sum n_i \cdot (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \quad (\text{Eq. 30})$$

- Suma de Quadrats Residual (SQR):

És la suma dels quadrats de les desviacions de cada dada respecte a la mitjana del seu tractament.

$$SQR = \sum_{ribbed} (x_i - \bar{x}_1)^2 + \sum_{wrapped} (x_i - \bar{x}_2)^2 + \sum_{s-c} (x_i - \bar{x}_3)^2 \quad (\text{Eq. 31})$$

Essent el subíndex 1 per l'acabat superficial *ribbed*, el subíndex 2 pel *wrapped* i el subíndex 3 pel *sand-coated*.

#### 4.3.1.2 Significació d'un efecte

La comparació de la SQ associada a cada efecte amb la SQR permet estudiar si l'efecte és o no significatiu.

Per a realitzar aquesta operació, cada suma de quadrats es divideix pels seus graus de llibertat (g.l.), obtenint així uns estadístics anomenats quadrats mitjans (QM):

$$QM = \frac{SQ}{g.l.} \quad (\text{Eq. 32})$$

- El  $QM_{\text{Total}}$  és la variància de les dades observades.
- El  $QM_{\text{Residual}}$  és una estimació de la  $\sigma^2$  (variància) de les poblacions mostrades (assumint la mateixa  $\sigma^2$  per a totes les poblacions).
- El QM associat a cada efecte:
  - Si l'efecte no existeix en la població el QM és una altre estimació de la  $\sigma^2$  independent de la del  $QM_{\text{Residual}}$ .
  - Si existeix un efecte real poblacional, llavors tendeix a ser major que  $\sigma^2$ .

Els graus de llibertat es determinen de la següent manera:

- SQT -> (nº de dades - 1) g.l.
- SQF -> (nº de tractaments - 1) g.l.
- SQR -> (g.l.<sub>SQT</sub> - g.l.<sub>SQF</sub>) g.l.

#### 4.3.1.3 Test F

Es denomina f-ratio o f calculada al quocient:

$$\frac{QM_{\text{Factor}}}{QM_{\text{Residual}}}$$

Es poden donar dos casos:

- 1) Si no existeix un efecte real del factor a nivell poblacional: el  $QM_{factor}$  serà molt igual al  $CM_{Residual}$  ( $CM_{factor} = CM_{Residual}$ )

$$F - ratio = \frac{QM_{Factor}}{QM_{Residual}} \approx F_{glF, glR} \quad (\text{Eq. 33})$$

El f-ratio serà molt semblant a 1 amb una distribució F de Fisher amb els corresponents graus de llibertat.

Per tant, s'accepta la hipòtesi nul·la ( $H_0$ ) que les mitjanes poblacionals són iguals i es pot afirmar que no hi ha diferències significatives entre els coeficients d'adherència dels diferents acabats superficials.

- 2) Si existeix un efecte real del factor a nivell poblacional: el  $QM_{factor} \gg QM_{Residual}$

El f-ratio serà massa gran per ser una F de Fisher amb els graus de llibertat corresponents.

Per tant, es rebutja la hipòtesis nul·la ( $H_0$ ) i es pot concloure que si que hi ha diferències significatives entre els diferents acabats superficials, respecte al valor mitjà del coeficient d'adherència de les barres.

#### 4.3.2 Taula resum de l'ANOVA

Origen de variació	Suma de Quadrats	g.l.	Quadrat mitjà	F-ratio
<b>Tractaments</b>	SQF	k-1	QMF	F
<b>Residual</b>	SQR	N-k	QMR	-
<b>Total</b>	SQT	N-1	-	-

Taula 17. Taula resum de l'ANOVA

essent:

- k: nombre de tractaments (grups)  
n: nombre de mostres en cada tractament  
N: nombre total de mostres

### 4.3.3 Anàlisi de resultats de la variància del factor acabat superficial per les normatives ACI 440 i ISIS

Un cop fet tot el procediment per a realitzar el mètode, s'ha obtingut la taula de l'ANOVA per a les normatives ACI 440 i ISIS i se n'han analitzat els resultats. En els següents apartats es mostren les taules de l'ANOVA i el seu anàlisi per a les dues normatives.

#### 4.3.3.1 Anàlisi de la variància del factor acabat superficial per la normativa ACI 440

La taula de l'ANOVA per la norma ACI 440 és la següent:

Origen de variació	Suma de Quadrats	g.l.	Quadrat mitjà	F-ratio
<b>Tractaments</b>	0,821	2	0,411	4,722
<b>Residual</b>	6,955	80	0,087	-
<b>Total</b>	7,776	82	-	-

Taula 18. Taula ANOVA per la normativa ACI 440

- Risc de 1<sup>a</sup> espècie:  $\alpha = 0,05$
- Es busca a la taula:  $F_{2,80}(5\%) = 3,123 < 4,722$

Per tant, si es busca a la taula de la F de Fisher (veure Figura 37) el valor corresponent a 2,80 amb un error de 1<sup>a</sup> espècie del 5%, s'obté un valor de 3,123 fent una interpolació lineal entre 60 i 120. Com que el f-ratio és major que el valor trobat a la taula es rebutja la hipòtesis nul·la ( $H_0$ ). Així doncs, a partir d'aquest mètode es pot concloure que per a la normativa ACI 440 hi ha diferències significatives entre les mitjanes del coeficient d'adherència dels tres tipus d'acabat superficial, o en almenys entre dues d'elles.



#### 4.3.3.2 Anàlisi de la variància del factor acabat superficial per la normativa ISIS

La taula de l'ANOVA per la norma ISIS és la següent:

Origen de variació	Suma de Quadrats	g.l.	Quadrat mitjà	F-ratio
Tractaments	0,432	2	0,216	2,950
Residual	5,851	80	0,073	-
Total	6,283	82	-	-

Taula 19. Taula ANOVA per la normativa ISIS

- Risc de 1<sup>a</sup> espècie:  $\alpha = 0,05$
- Es busca a la taula:  $F_{2,80}(5\%) = 3,123 > 2,950$

Per tant, si es busca a la taula de la F de Fisher (veure Figura 37) el valor corresponent a 2,80 amb un error de 1<sup>a</sup> espècie del 5%, s'obté un valor de 3,123 fent una interpolació lineal entre 60 i 120. Com que el f-ratio és menor que el valor trobat a la taula s'accepta la hipòtesis nul·la ( $H_0$ ). Així doncs, a partir d'aquest mètode es pot concloure que per a la normativa ISIS no hi ha diferències significatives entre les mitjanes del coeficients d'adherència dels tres tipus d'acabat superficial.

A continuació es mostra la Figura 37 on hi ha la taula de la F de Fisher amb un error de 1<sup>a</sup> espècie del 5%.

Funció de distribució **F de FISHER**. Valors de  $F_{0,05}$



		Graus de llibertat del numerador $\nu_1$																			0		F				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$							
Graus de llibertat del denominador $\nu_2$	1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	45.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3							
	2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50							
	3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	894	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53							
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63							
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36							
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67							
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23							
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93							
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71							
	10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54							
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40							
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30							
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21							
	14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13							
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07							
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.51	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01							
	17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96							
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92							
	19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88							
	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84							
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81								
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78								
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76								
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73								
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71								
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69								
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67								
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65								
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64								
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62								
40	4.06	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51								
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39								
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25								
$\infty$	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00								

NOTA:  $F_{0,05,\nu_1,\nu_2} = 1/F_{0,05,\nu_2,\nu_1}$

Figura 37. Funció de distribució F de Fisher amb un error de 1<sup>a</sup> espècie del 5% (apunts d'Estadística,  
Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials)

#### 4.4 Anàlisi comparatiu dels resultats teòrics i experimentals d'amplada de fissura

En aquest apartat es pretén comparar els valors experimentals d'amplada de fissura per a cada estat de càrrega amb els teòrics obtinguts per a cadascuna de les normatives utilitzades.

Com ja s'ha comentat anteriorment, segons la normativa es treballa amb obertures de fissura màximes o mitjanes i a la part de baix de la biga o a l'alçada del reforç. A la taula 20 hi ha representats tots els casos possibles.

Normativa	w (mm)	Situació fissura
ACI 440	Màxima	Baix
ISIS	Màxima	Baix
EC2-92	Mitjana	Alçada reforç
EC2-04 max	Màxima	Alçada reforç
EC2-04 mean	Mitjana	Alçada reforç

Taula 20. Possibles casos d'obertura i situació de fissura segons la normativa

Per tal d'analitzar l'adequació dels resultats teòrics obtinguts sobre els valors experimentals s'ha representat per a cada biga un gràfic Moment (kN·m) – Amplada de fissura (mm) o Càrrega (kN) – Amplada de fissura (mm). S'ha separat l'anàlisi segons la situació de la fissura (a baix de la biga o a l'alçada del reforç) i segons si es tracta d'amplada de fissura màxima i amplada mitjana.

##### 4.4.1 Amplada de fissura a la fibra més traccionada de la secció

En aquest apartat s'analitzen els resultats obtinguts per les normatives ACI 440 i ISIS, ja que són les dues normatives que treballen amb amplades de fissura a la part de baix de la biga.

Com ja s'ha comentat en apartats anteriors, la base de dades conté 94 bigues sense comptar les que s'han descartat per diferents motius (geomètrics, falta de dades a l'article que la proporciona...). Per tant, un cop entrada tota la formulació per a cada normativa s'ha pogut analitzar l'adequació dels resultats teòrics d'amplada de fissura màxima obtinguts sobre els valors experimentals per a totes 94 bigues, la qual cosa representa una quantitat bastant elevada de resultats i de gràfiques. En aquest

apartat es comenten els resultats de les bigues més significatius per tal de simplificar-ne l'anàlisi i l'extracció de conclusions. Tots els resultats es troben a l'Annex B.1.

Per aquest estudi, s'han utilitzat els coeficients d'adherència ajustats a l'apartat 3.2. Cal remarcar que per a cada biga les corbes M-w per a les normatives ACI 440 i ISIS són exactament les mateixes perquè els coeficients d'adherència de les dues normatives s'han ajustat per mínims quadrats exactament igual. No obstant, per a cada biga els coeficients d'adherència d'ambdues normatives no tenen perquè ser iguals.

Alguns articles proporcionen els valors experimentals d'obertura de fissura a l'alçada del reforç. Per tal de fer les representacions de les corbes experimentals a la part de baix de la biga per a poder-les comparar amb les normatives, s'ha suposat que la fissura s'obre linealment seguint un factor de proporció  $\beta$ . Aquest factor és el paràmetre de l'equació de cada normativa que pertany a l'Eq. 3. Així doncs, per passar l'amplada de fissura experimental a l'alçada del reforç a la part de baix de la biga es multiplica per aquesta per  $\beta$ .

En aquest apartat, cada gràfic conté les següents corbes:

- Exp baix: Corba P- $w_{exp}$  o M- $w_{exp}$  a la part de baix de la biga (valors experimentals d'obertura de fissura màxima).
- ACI, ISIS: Corba P- $w_{teo}$  o M- $w_{exp}$  segons les normes ACI i ISIS (valors teòrics d'obertura de fissura màxima).

Cal tenir en conta que els subíndexs *exp* signifiquen experimental i els subíndexs *teo* signifiquen teòric. P significa càrrega i M significa moment.

Les Figures 38, 39 i 40 mostren una representació gràfica P-w o M-w amb les corbes experimentals i teòriques. En totes aquestes figures l'adaptació dels resultats d'obertura de fissura teòrics sobre els experimentals és molt bona. S'observa que en tots els casos les corbes teòriques de les normatives ACI 440 i ISIS s'ajusten molt bé als resultats experimentals en el tram corresponent a la fase de fissuració estabilitzada, tot i que també s'adapten bastant bé fora d'aquesta fase (veure Figures 38 i 40). Això ja era d'esperar perquè s'ha ajustat el coeficient d'adherència per mínims quadrats a partir dels valors experimentals.

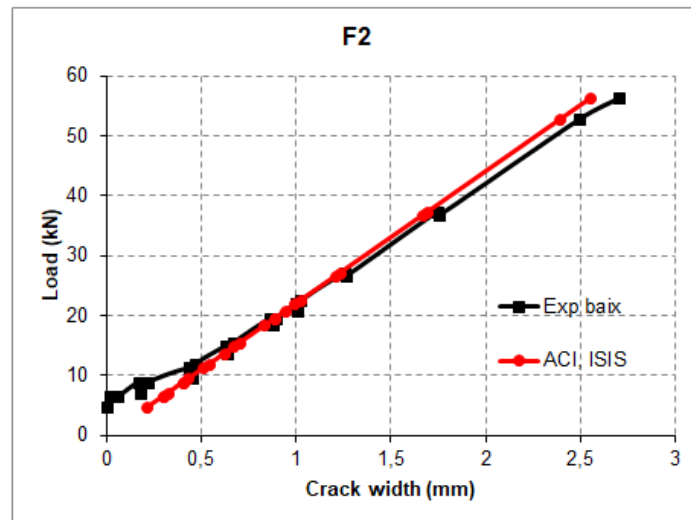


Figura 38. Amplada de fissura màxima de la biga F2 (Pecce *et al.* 2000)

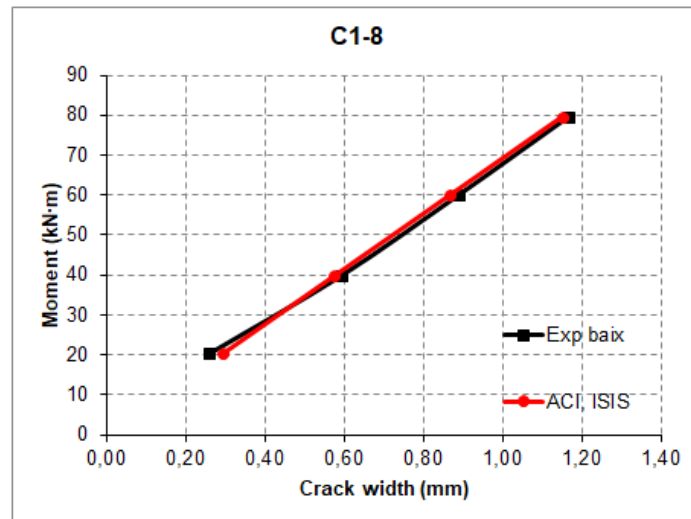


Figura 39. Amplada de fissura màxima de la biga C1-8 (Kassem *et al.* 2011)

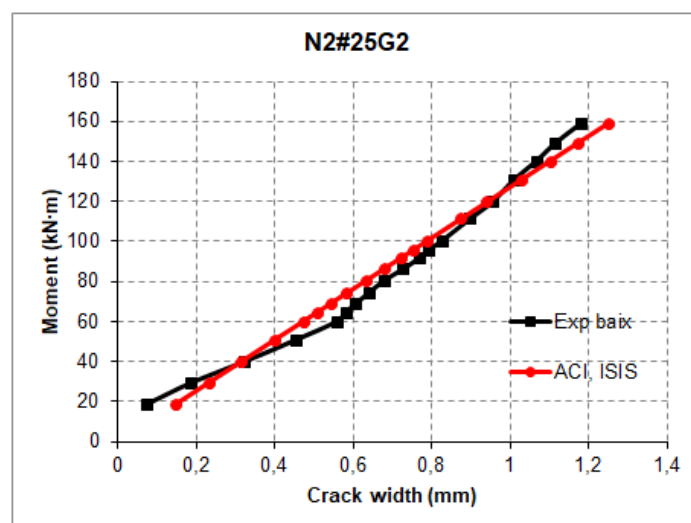


Figura 40. Amplada de fissura màxima de la biga N2#25G2 (El-Nemr *et al.* 2016)

D'altra banda, les Figures 41 i 42 mostren una representació gràfica P-w o M-w amb les corbes experimentals i teòriques en que l'adaptació dels resultats d'obertura de fissura teòrics sobre els experimentals només s'ajusta bé en el primer tram, és a dir, a la fase de fissuració estabilitzada, que és on s'ha fet l'ajust per mínims quadrats. Això pot ser degut a que, malgrat estar en la fase de fissuració estabilitzada, poden haver aparegut fissures secundàries o fissures adjacents que ja existien, les quals poden haver fet que les màximes deixin de créixer en la mateix proporció. Tot i això, la majoria de bigues s'adapten bastant bé a fora la fase de fissuració estabilitzada.

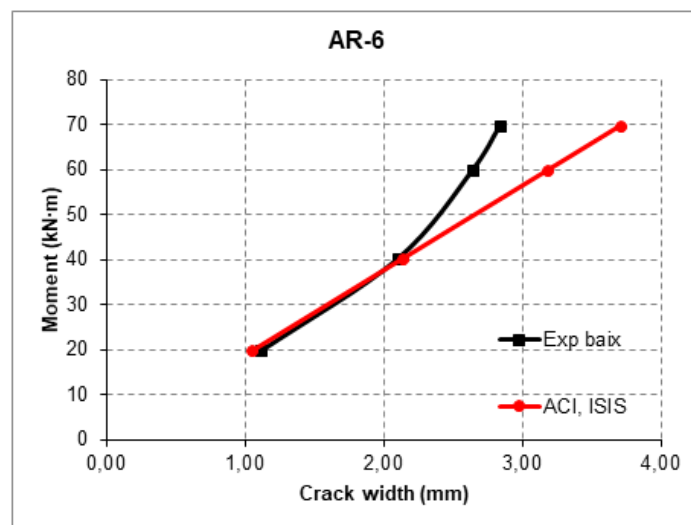


Figura 41. Amplada de fissura màxima de la biga AR-6 (Kassem *et al.* 2011)

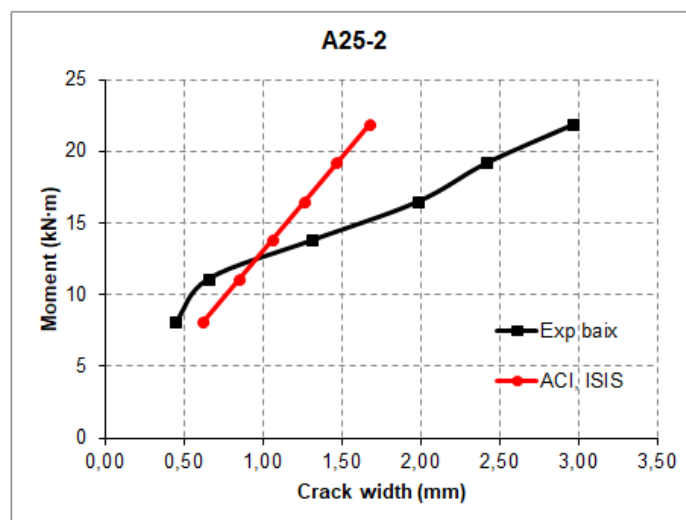


Figura 42. Amplada de fissura màxima de la biga A25-2 (Adam *et al.* 2015)

#### 4.4.2 Amplada de fissura a l'alçada del reforç

En aquesta anàlisi de resultats, només s'analitza l'adequació dels resultats teòrics d'amplada de fissura sobre els valors experimentals amb les normatives EC2-92 i EC2-04 perquè són les úniques que treballen amb amplades de fissura a l'alçada del reforç. Per aquest estudi, s'han requerit els valors experimentals mitjans, i només tres de tots els articles amb què s'ha fet el treball disposen d'aquest resultat. És per això que el nombre de bigues per fer aquest anàlisi és menor que en l'apartat anterior. En aquest cas es disposa de 32 bigues i també es comentaran els resultats agafant algunes de les bigues que siguin més significatives per simplificar-ne l'anàlisi i l'extracció de conclusions. No obstant, també s'ha analitzat l'EC2-04 per amplades de fissura màxima amb els valors experimentals d'obertura de fissura màxima a l'alçada del reforç.

Com s'explica a l'apartat 2.6.2.1 (normativa EC2-04), l'EC2-04 treballa amb valors de separació màxima entre fissures. Per tal de poder comparar els resultats de l'EC2-04 amb els valors experimentals d'obertura de fissura mitjans, s'ha suposat un valor mitjà de separació entre fissures. La conversió de la separació entre fissures màxima a mitjana i, per tant, d'obertura de fissura màxima a mitjana, s'ha fet dividint la separació màxima entre fissures per un factor de correcció de 1,7.

En aquest no s'han ajustat els coeficients d'adherència de les dues normatives per mínims quadrats a partir de les dades experimentals, degut a que aquestes normatives assumeixen el coeficient d'adherència en la formulació de la separació entre fissures, i els articles analitzats no disposaven d'aquesta informació. Així doncs, a continuació s'analitzen diversos casos on l'adaptació de la corba teòrica de la normatives EC2-02 i EC2-04 sobre l'experimental és més bona o més dolenta.

En aquest apartat, la notació dels diferents gràfics és la següent:

- Exp reforç mean: Corba  $P-w_{exp}$  o  $M-w_{exp}$  a l'alçada del reforç (valors experimentals d'obertura de fissura mitjana).
- Exp reforç max: Corba  $P-w_{exp}$  o  $M-w_{exp}$  a l'alçada del reforç (valors experimentals d'obertura de fissura màxima). Per les bigues que no es disposa de valors experimentals d'obertura de fissura mitjans, aquesta corba se l'anomena "Exp reforç".
- EC2-92: Corba  $P-w_{exp}$  o  $M-w_{teo}$  segons la normativa EC2-92 (valors teòrics)
- EC2-04 mean: Corba  $P-w_{exp}$  o  $M-w_{teo}$  segons la normativa EC2-04 (valors teòrics d'obertura de fissura mitjana).

- EC2-04 max: Corba  $P-w_{exp}$  o  $M-w_{teo}$  segons la normativa EC2-04 (valors teòrics d'obertura de fissura màxima). Per les bigues que no es disposa de valors experimentals d'obertura de fissura mitjans, aquesta corba se l'anomena "EC2-04".

Com en la llegenda dels gràfics de l'apartat anterior, els subíndexs *exp* signifiquen experimental i els subíndexs *teo* signifiquen teòric. P significa càrrega i M significa moment.

Les figures 43 i 44 mostren una representació gràfica P-w o M-w amb les corbes experimentals i teòriques. En totes aquestes figures l'adaptació dels resultats d'obertura de fissura teòrics sobre els experimentals és molt bona, per la qual cosa es pot concloure que per aquestes bigues les normatives EC2-92 i EC2-04 s'adeqüen molt bé a les dades experimentals.

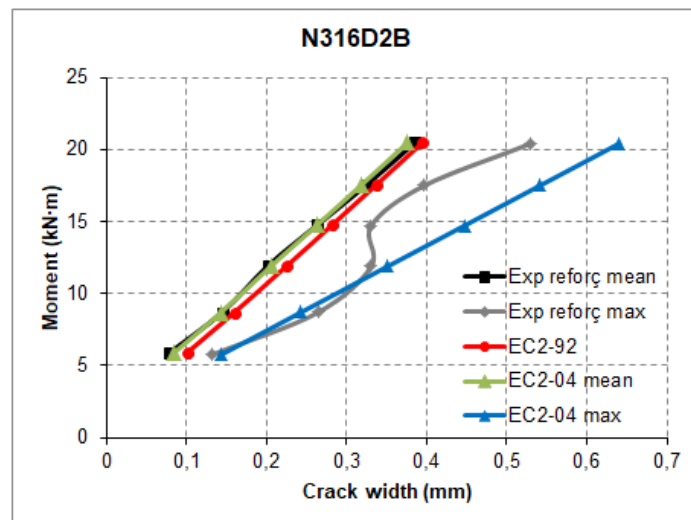


Figura 43. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N316D2B (Barris *et al.* 2013)

Com es pot veure a la Figura 43, les corbes teòriques d'obertura de fissura mitjanes de les dues versions de l'Eurocodi 2, s'ajusten molt bé a la corba experimental d'obertura de fissura mitjana a l'alçada del reforç. No obstant, la corba teòrica d'obertura de fissura màxima de l'EC2-04 s'ajusta molt bé al primer tram de la corba experimental d'obertura de fissura màxima a l'alçada del reforç, però en el segon tram la corba teòrica pren valors més grans d'obertura de fissura que l'experimental.



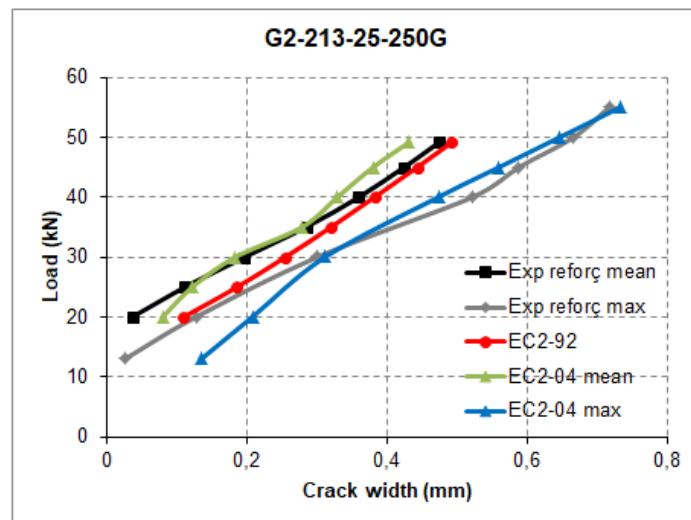


Figura 44. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G2-213-25-250G (Barris *et al.* 2017)

Com es pot veure a la Figura 44, les corbes teòriques d'obertura de fissura mitjanes de les dues versions de l'Eurocodi 2, també s'ajusten bastant bé a la corba experimental d'obertura de fissura mitjana a l'alçada del reforç, tot i que les de la Figura 43 s'hi ajusten una mica millor. Pel que fa a la corba teòrica d'obertura de fissura màxima de l'EC2-04, en aquest cas s'ajusta molt bé a tota la corba experimental d'obertura de fissura màxima a l'alçada del reforç.

D'altra banda, les Figures 45 i 46 mostren una representació gràfica P-w o M-w on es pot veure els casos més desfavorables pel que fa a l'adaptació dels resultats d'obertura de fissura teòrics sobre els experimental, és a dir, per aquestes bigues les normatives EC2-92 i EC2-04 no s'adeqüen bé a les dades experimentals.

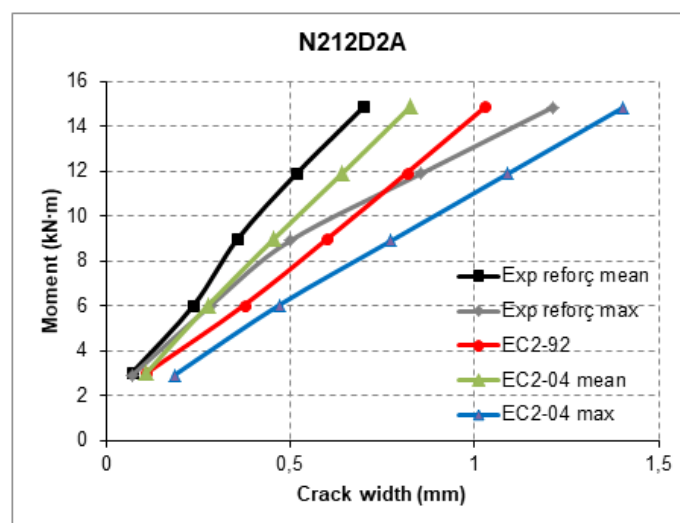


Figura 45. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N212D2A (Barris *et al.* 2013)

Com es pot veure a la Figura 45, totes les corbes teòriques de les dues versions de l'Eurocodi 2 (tan si es tracta de valors mitjans com màxim) donen valors d'amplada fissura majors que els experimentals. Així doncs, per aquesta biga la normativa no reflecteix bé el que passa realment. No obstant, com que l'amplada de fissura teòrica és més gran que l'experimental, no cal alarmar-se perquè interessa que l'amplada de fissura sigui la menor possible i, per tant, les normatives estan proporcionant valors més grans que els que hi ha hagut realment.

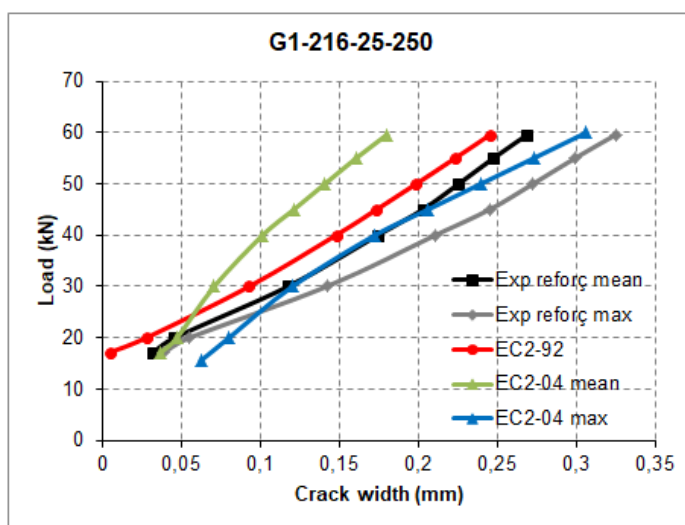


Figura 46. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G1-216-25-250 (Barris *et al.* 2017)

A la Figura 46, totes les corbes teòriques de les dues versions de l'Eurocodi 2 (tan si es tracta de valors mitjans com màxim) donen valors d'amplada fissura més petits que els experimentals. Així doncs, per aquesta biga la normativa tampoc reflecteix bé el que passa realment, tot i que és el cas contrari que en la biga anterior. En aquest cas, com que l'amplada de fissura teòrica és menor que l'experimental, significa que l'amplada de fissura que realment s'ha format és més gran que la prevista per la norma i, per tant, és dolent perquè l'estructura es fissurarà més de l'esperat.

En general, les corbes teòriques per la normativa EC2-04 s'adapten més bé a les corbes experimentals que per l'EC2-92.

Finalment, tal i com es pot veure a la taula 4 de l'apartat 2.6.2.1, l'expressió de la separació mitjana entre fissures per la norma EC2-04 és exactament igual que la de l'EC2-92 menys en el primer factor. Per l'EC2-92, per tal que el primer terme de la separació mitjana sigui de 50, el recobriment (*cover*, *c*) ha de ser igual a 25. Així doncs, mentre que per a la normativa EC2-04 per diferents recobriments, la

corba teòrica s'adequa bastant bé sobre l'experimental, per la normativa EC2-92 s'ajusta molt millor si el recobriment és de 25 mm. Per tant, quan més difereix el valor del recobriment de 25 mm, l'adequació de la corba teòrica sobre l'experimental és més dolenta.

## **5 RESUM DEL PRESSUPOST**

El preu total de la recopilació de la bibliografia, l'elaboració de la base de dades, la redacció del treball i l'anàlisi de resultats puja (a falta de costos indirectes i IVA) la quantitat de DOTZE MIL VINT EUROS (12.020 €).

## 6 CONCLUSIONS

Partint de la base dels resultats obtinguts de l'estudi comparatiu dels models de predicció d'obertura de fissura en elements de formigó armat amb FRP, es determinen les següents conclusions:

A l'hora de fer l'estudi paramètric de la influència de diferents paràmetres sobre el coeficient d'adherència per les normatives ACI 440 i ISIS, no s'ha pogut determinar la influència ni del diàmetre, ni de  $n \cdot \rho$ , ni de  $d/h$  sobre  $k_b$  per cap de les dues normatives, ja que els gràfics de  $k_b$  en funció d'aquests paràmetres mostren una important dispersió i no se n'ha trobat cap tendència clara. Per tal de disminuir la dispersió en aquest gràfics, s'han buscat tendències classificant les bigues segons l'acabat superficial de les armadures, però tampoc se'n ha pogut treure cap conclusió clara perquè en aquest cas tampoc segueixen una tendència clara i la dispersió continua essent important. Aquesta dispersió, present en tot el treball, s'atribueix principalment a dos factors. Per una banda, existeix una gran variabilitat associada a la fissuració d'estructures de formigó armat. És per això que en models com el present en l'Eurocodi 2, l'amplada de fissura màxima o mitjana s'assumeix que és 1.7 vegades l'amplada mitjana. Per altra banda, la mesura de l'amplada de fissura presenta problemes durant els assaigs experimentals. Per prendre aquesta mesura, és habitual l'ús d'elements òptics de relativa poca precisió, on la subjectivitat de l'usuari resulta molt rellevant en el valor final de la lectura.

Malgrat aquesta dispersió, s'ha pogut determinar quin tipus d'acabat superficial és el que té millor adherència per a les dues normatives. En aquest cas, enlloc de buscar tendències, s'ha calculat el coeficient d'adherència mitjà i el seu coeficient de variància ( $CoV$ ) per a cada acabat superficial. Per la normativa ACI 440 s'ha arribat a la conclusió que l'acabat superficial que presenta millor adherència és l'acabat superficial amb corruga (en anglès *ribbed*), seguit amb el que té la fibra longitudinal helicoïdal (en anglès *wrapped*), de l'acabat amb sorreta (en anglès *sand-coated*) i el pitjor l'acabat superficial és el llis (en anglès *smooth*). Per la normativa ISIS, l'acabat superficial amb millor adherència també és el *ribbed* i el pitjor l'*smooth*. Tot i això, per aquesta norma l'acabat superficial *sand-coated* ha donat millors resultats pel que fa a l'adherència que el *wrapped*. Així doncs, en general els resultats han estat els esperats, ja que l'acabat *ribbed* és el que permet una millor transferència d'esforços tallants entre la barra i el formigó del voltant i l'acabat *smooth*, el qual és llis, és el que ha de tenir menys adherència per la seva geometria superficial.

Per tal de validar la conclusió anterior extreta de l'anàlisi paramètric per a cada normativa, interessa determinar si hi ha diferències significatives entre les mitjanes dels coeficients d'adherència de cada un d'aquests acabats superficials. Així doncs, mitjançant el mètode estadístic ANOVA s'ha analitzat la variància del factor acabat superficial, és a dir, s'ha comprovat si hi ha diferències significatives entre les mitjanes dels coeficients d'adherència ( $k_b$ ) de cada tipus d'acabat superficial (*ribbed*, *wrapped* i *sand-coated*). Per fer aquest estudi estadístic, no s'ha tingut en compte l'acabat superficial *smooth*, ja que no és significatiu sobre tot el conjunt de dades. Després de realitzar aquest estudi, per la normativa ACI 440 s'ha trobat que hi ha diferències significatives entre les mitjanes del coeficient d'adherència dels tres tipus d'acabat superficial, o en almenys entre dues d'elles, i per la normativa ISIS s'ha trobat que no hi ha diferències significatives entre les mitjanes dels coeficients d'adherència dels tres tipus d'acabat superficial. Per tant, la conclusió de l'anàlisi paramètric de l'acabat superficial per la norma ACI 440 segons aquest mètode es pot acceptar i per la normativa ISIS no.

Pel que fa a l'anàlisi comparatiu dels resultats teòrics i experimentals d'amplada de fissura, per les normatives ACI 440 i ISIS s'ha pogut concloure que els valors teòrics d'amplada de fissura d'ambdues normatives s'adeqüen molt bé sobre els valors experimentals, sobretot al tram de la corba P-w o M-w corresponent a la fase de fissuració estabilitzada. Això és perquè s'ha ajustat el coeficient d'adherència de cada biga per mínims quadrats a la fase de fissuració estabilitzada. D'altra banda, per les normatives EC2-92 i EC2-04 no s'ha pogut ajustar el coeficient d'adherència, degut a que la influència de l'adherència es troba en un paràmetre, la separació entre fissures, que no es troba habitualment publicat en els resultats experimentals. Per aquestes dues normatives, mentre que els resultats teòrics d'amplada de fissura per l'EC2-04 s'ajusten bastant bé sobre els valors experimentals (tan si es tracta d'amplada de fissura màxima com mitjana), per l'EC2-92 s'ha pogut demostrar que els resultats teòrics s'ajusten molt millor sobre els experimentals per les bigues que tenen un recobriment de 25 mm. Quan més difereix el valor del recobriment de 25 mm, els valors teòrics s'adeqüen més malament sobre els experimentals. No obstant, aquesta diferència no s'ha pogut atribuir a un factor en concret, ja que no s'ha pogut estudiar per separat la separació i l'amplada de fissura.

## **7 RELACIÓ DE DOCUMENTS**

MEMÒRIA

ANNEX A. COEFICIENT D'ADHERÈNCIA EN FUNCIO DE DIFERENTS PARÀMETRES

ANNEX B. RESULTATS TEÒRICS OBTINGUTS PER A DE CADASCUNA DE LES NORMATIVES SOBRE ELS  
VALORS EXPERIMENTALS

ANNEX C. PRESSUPOST

## 8 BIBLIOGRAFIA

ACI Committee 440. (2006) "ACI 440.1R-06. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars." *American Concrete Institute (ACI)*, Farmington Hills, Mich, USA, 45 pp.

Adam M. A., Said M., Mahmoud A. A., Shanour A. S. (2015) "Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars" *Construction and Building Materials*, 84, 354-366.

Alkhrdaji T., Ombres L., Nanni A. (2000) "Flexural Behavior and Design of One-Way Concrete Slabs Reinforced with Deformed GFRP Bars," *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, 217-224.

Baena M., Torres L., Turon A., Barris C. (2009) "Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test" *Composites: Part B*, 40, 784-797.

Barris C. (2011) "Serviceability behaviour of fibre reinforced polymer reinforced concrete beams" *Universitat de Girona*.

Barris C., Torres L., Comas J., Miàs C. (2013) "Cracking and deflections in GFRP RC beams: An experimental study" *Composites: Part B*, 55, 580-590.

Barris C., Torres L., Miàs C., Llorens M. (2017) "Experimental study on crack width and crack spacing for Glass-FRP reinforced concrete beams" *Engineering Structures*, 131, 231-242.

CEN. (1992) "Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1:1992)." *Comité Européen De Normalisation*, Brussels, 195 pp.

CEN. (2004) "Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1:2004)." *Comité Européen De Normalisation*, Brussels, 225 pp.

El-Nemr A., Ahmed E. A., Barris C., Benmokrane B. (2016) "Bond-dependent coefficient of glass- and carbon-FRP bars in normal- and high-strength concretes" *Construction and Building Materials*, 113, 77-89.



Frosch R. J. (1999) "Another Look at Cracking and Crack Control in Reinforced Concrete" *ACI Structural Journal*, V. 96, No. 3, 437-442.

Goto Y. (1971) "Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars" *ACI Journal*, No. 68, 244-251.

ISIS Canada (2007) "Reinforcing concrete structures with fibre reinforced polymers – Design manual No. 3." *ISIS Canada Corporation*. University of Manitoba, Manitoba, Canada , 151 pp.

Kassem C., Farghaly A. S., Benmokrane B. (2011) "Evaluation of Flexural Behavior and Serviceability Performance of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars" *Journal of Composites for Construction*, 15, 682-695.

Lee W. K., Jansen D. C., Berlin K. B., Cohen I. E. (2010) "Flexural Cracks in Fiber-Reinforced Concrete Beams with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars" *ACI Structural Journal*, V. 107, No. 3.

Matthys S., Taerwe L. (2000) "Concrete slabs reinforced with FRP grids. I: one-way bending" *Journal of Composites for Construction*, V. 4, No. 3, 145-153.

Miàs C., Torres L., Guadagnini M., Turon A. (2015) "Short and long-term cracking behaviour of GFRP reinforced concrete beams" *Composites Part B*, 77, 223-231.

Noël M., Soudki K. (2014) "Estimation of the crack width and deformation of FRP-reinforced concrete flexural members with and without transverse shear reinforcement" *Engineering Structures*, 59, 393-398.

Pecce M., Manfredi G., Cosenza E. (2000) "Experimental response and code models of GFRP RC beams in bending" *Journal of Composites for Construction*, V. 4, No. 4, 182-190.

Rodríguez J., Andrade C. (1984) "Análisis de las condiciones de fisuración en las estructuras de hormigón armado y su relación con la probabilidad de corrosión de las armaduras" *Informes de la Construcción*, V. 36, No. 366.

Thériault M., Benmokrane B. (2000) "Effects of FRP reinforcement ratio and concrete strength on flexural behavior of concrete beams" *Journal of Composites for Construction*, V. 2, No. 1, 7-16.

Torres L., Barris C. (2010) "L'ús de materials compostos en estructures de formigó" *Nivell: revista del Centre d'Estudis de la Construcció i Anàlisi de Materials*, 11, 21-25.

Toutanji H., Deng Y. (2003) "Deflection and crack-width prediction of concrete beams reinforced with glass FRP rods" *Construction and Building Materials*, 17, 69-74.7

Toutanji H. A., Saafi M. (2000) "Flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars" *ACI Structural Journal*, V. 97, No. 5, 712-719.

## ANNEX A. COEFICIENT D'ADHERÈNCIA EN FUNCIÓ DE DIFERENTS PARÀMETRES

En aquest annex es representen les dispersions de punts del coeficient d'adherència en funció dels paràmetres  $n \cdot \rho$  i  $d/h$ , on es poden veure les tendències del coeficient d'adherència per aquests paràmetres i per a cada tipus d'acabat superficial.

### A.1. Normativa ACI 440

#### A.1.1. Coeficient d'adherència en funció de $n \cdot \rho$

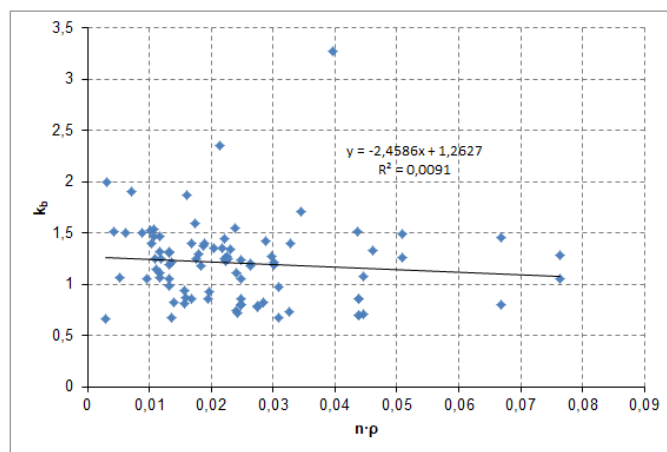


Figura 47. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  per a totes les bigues

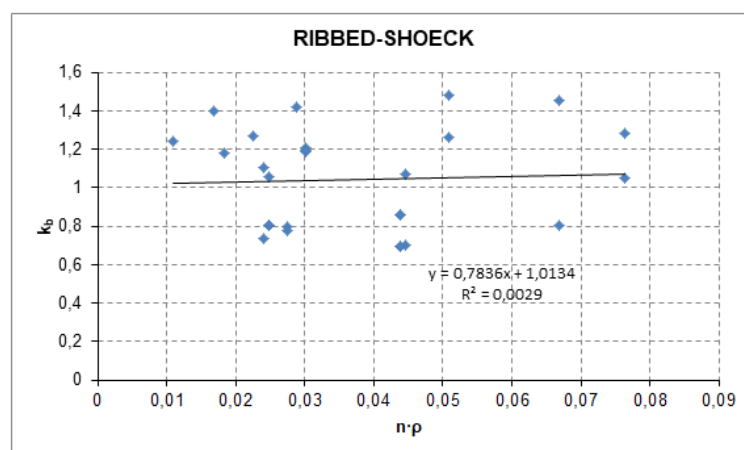


Figura 48. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed* – *Shoeck*

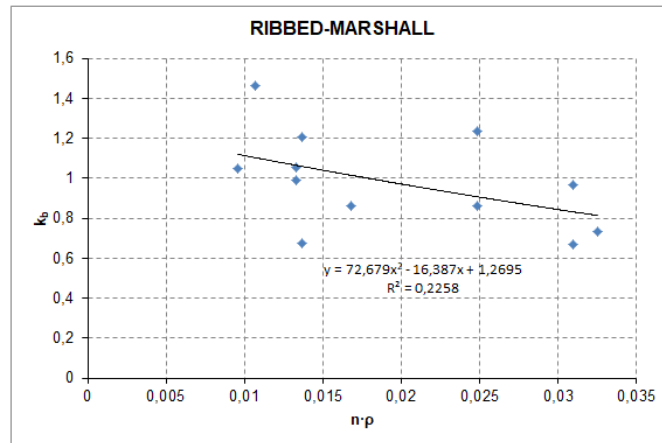


Figura 49. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot p$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed* – *Marshall*

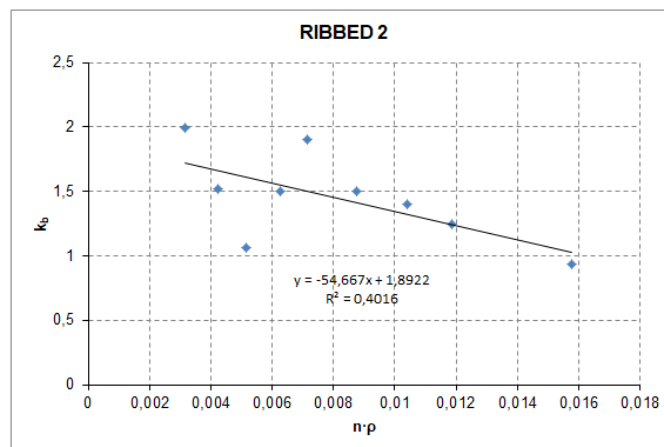


Figura 50. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot p$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed 2*

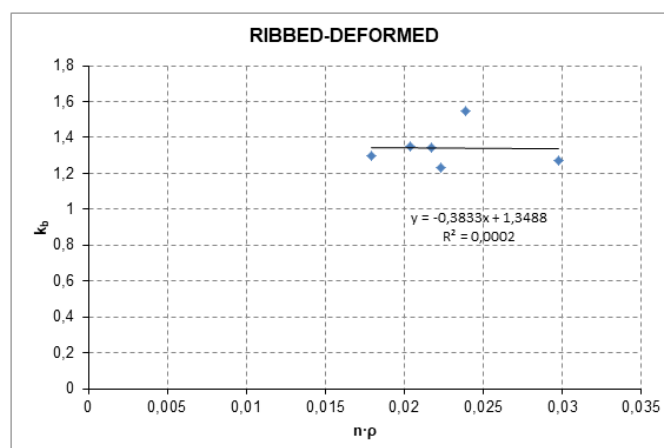


Figura 51. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot p$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed* – *deformed*

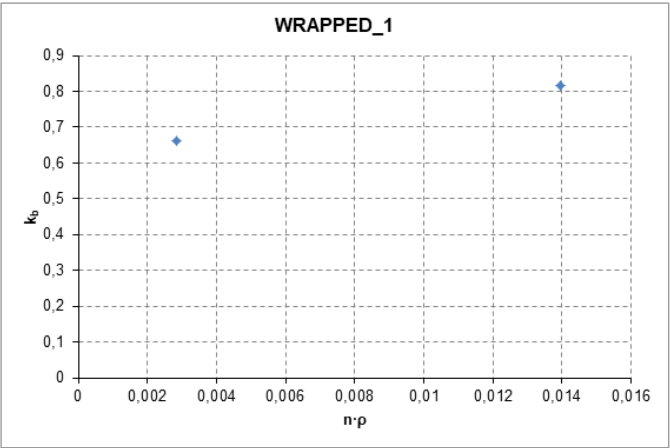


Figura 52. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot p$  per a les bigues amb acabat superficial *wrapped\_1*

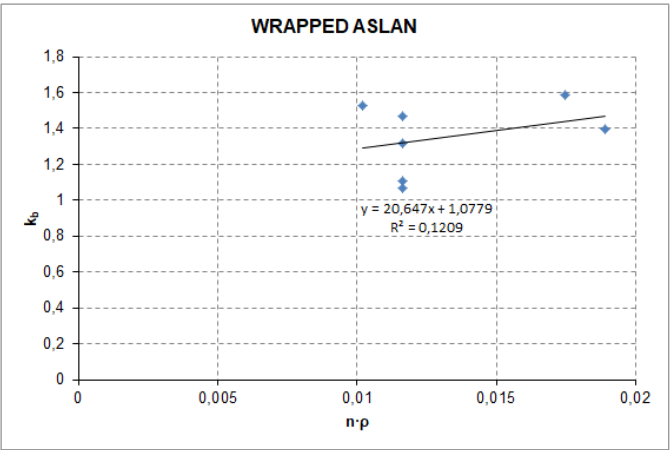


Figura 53. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot p$  per a les bigues amb acabat superficial *wrapped Aslan*

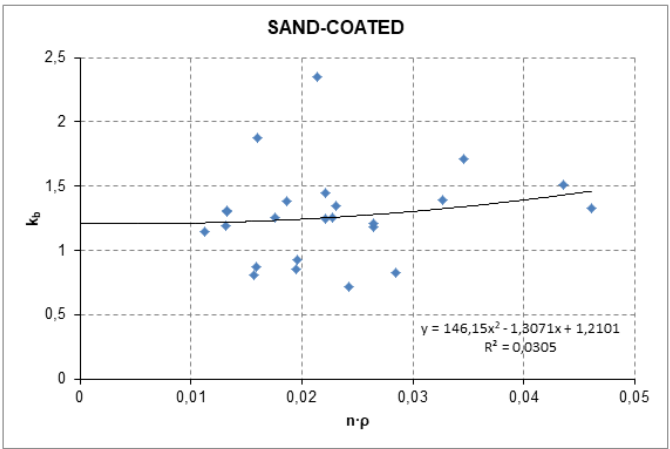


Figura 54. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot p$  per a les bigues amb acabat superficial *sand-coated*

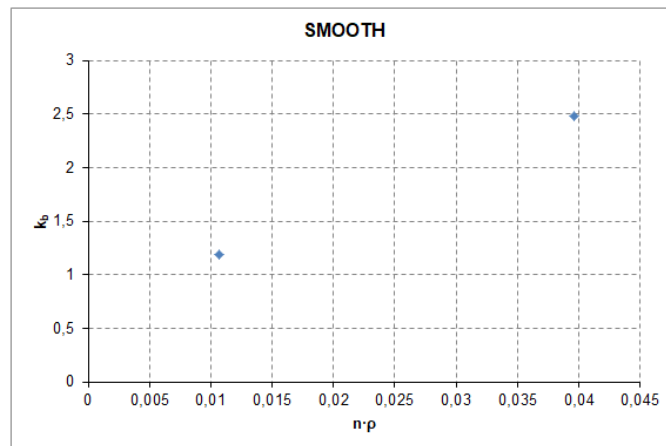


Figura 55. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  per a les bigues amb acabat superficial *smooth*

#### A.1.2. Coeficient d'adherència en funció de $d/h$

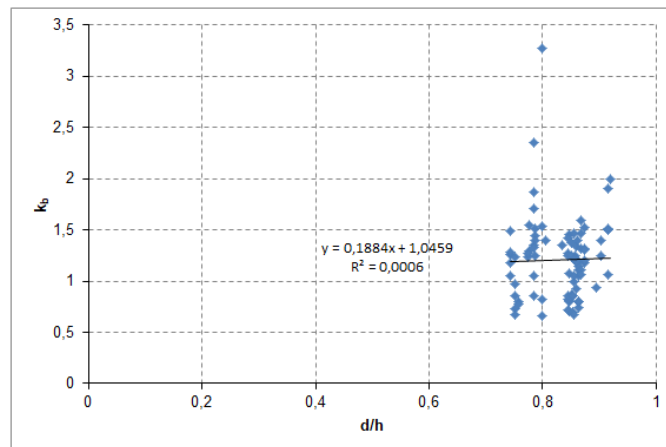


Figura 56. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a totes les bigues

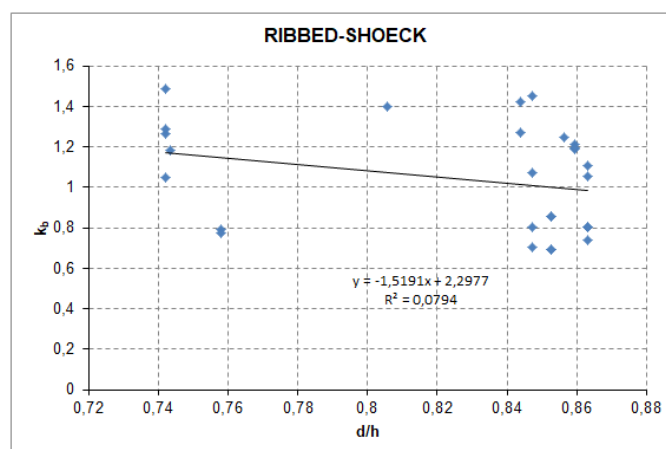


Figura 57. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed – Shoeck*

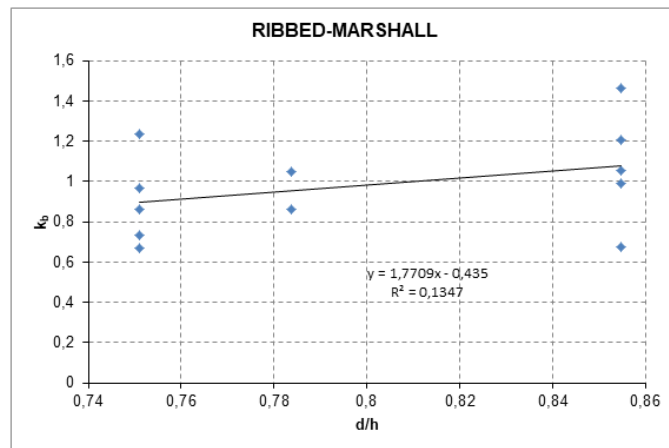


Figura 58. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed* – *Marshall*

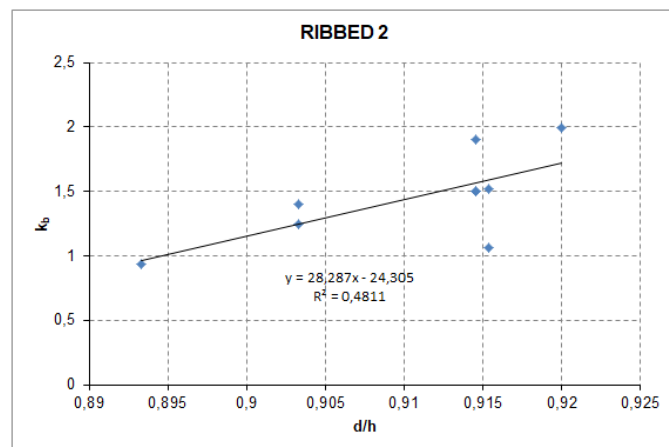


Figura 59. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed 2*

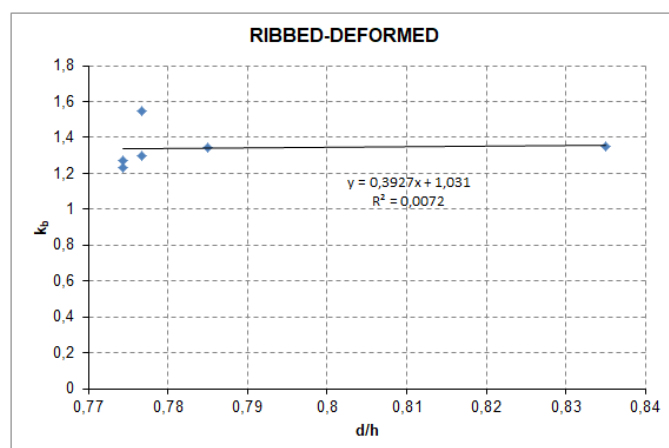


Figura 60. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed* – *deformed*

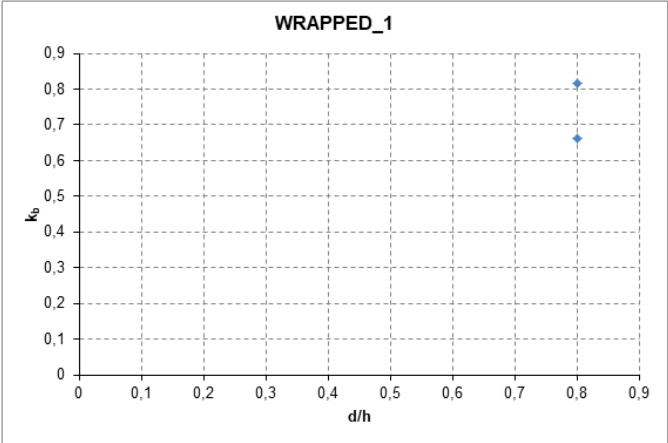


Figura 61. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial  
*wrapped\_1*

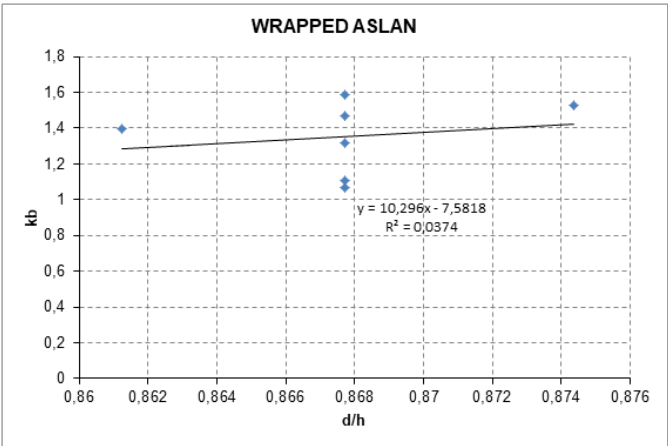


Figura 62. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial *wrapped*  
*Aslan*

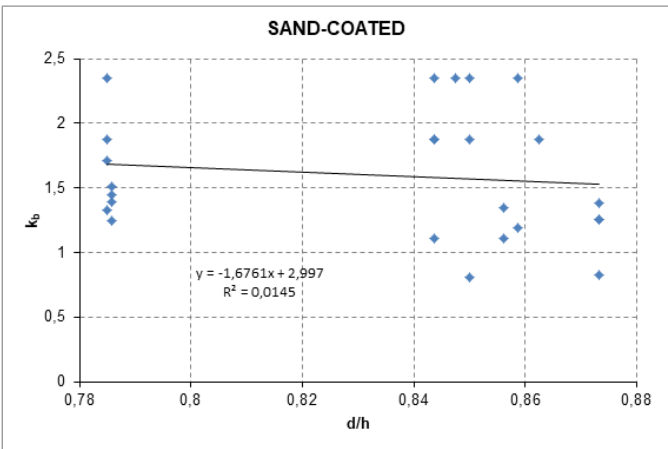


Figura 63. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial *sand* –  
*coated*



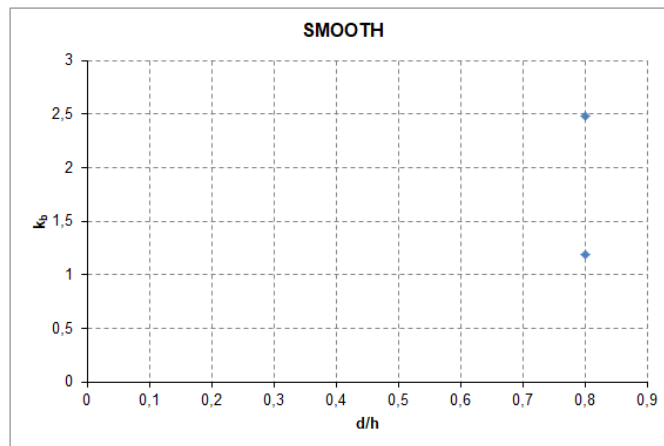


Figura 64. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial *smooth*

## A.2. Normativa ISIS Canada

### A.2.1. Coeficient d'adherència en funció de $n \cdot \rho$

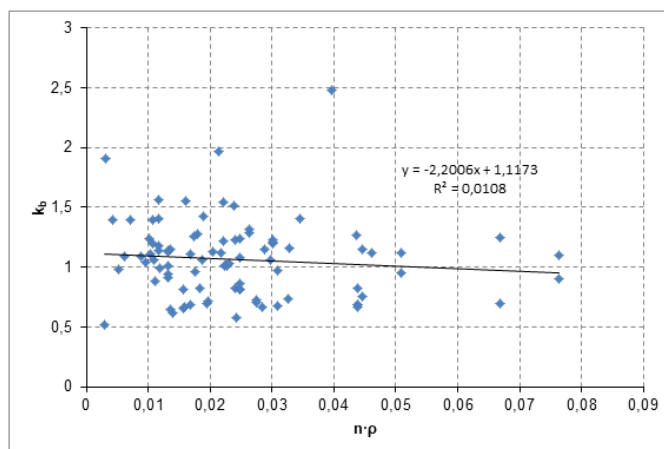


Figura 65. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  per a totes les bigues

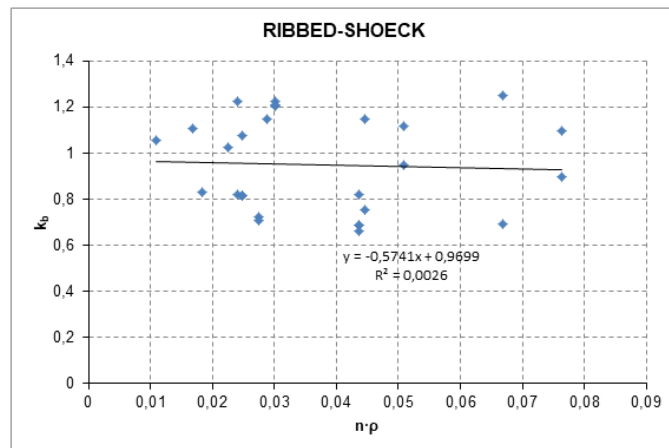


Figura 66. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot p$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed* – *Shoeck*

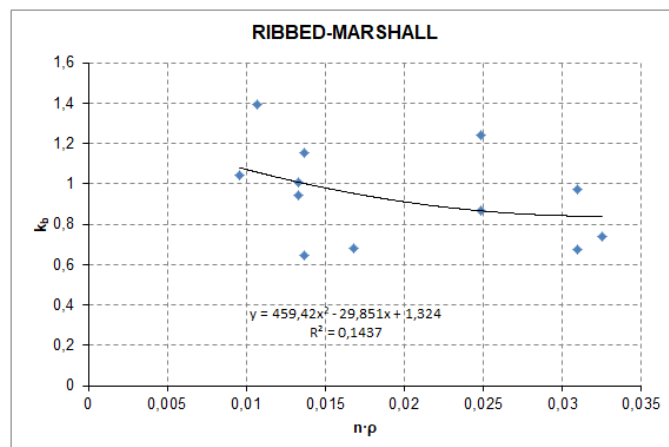


Figura 67. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot p$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed* – *Marshall*

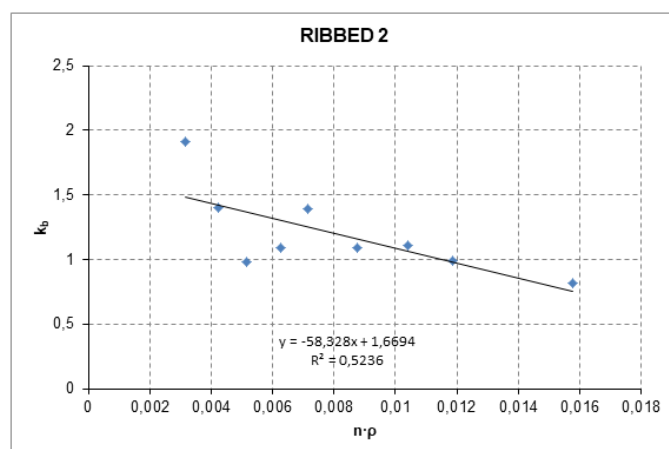


Figura 68. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot p$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed 2*

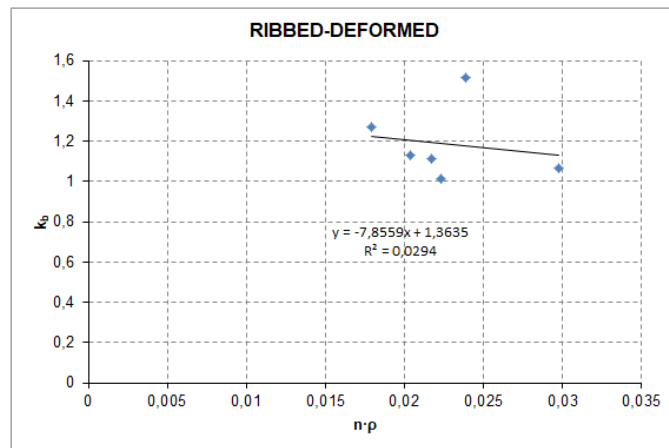


Figura 69. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed – deformed*

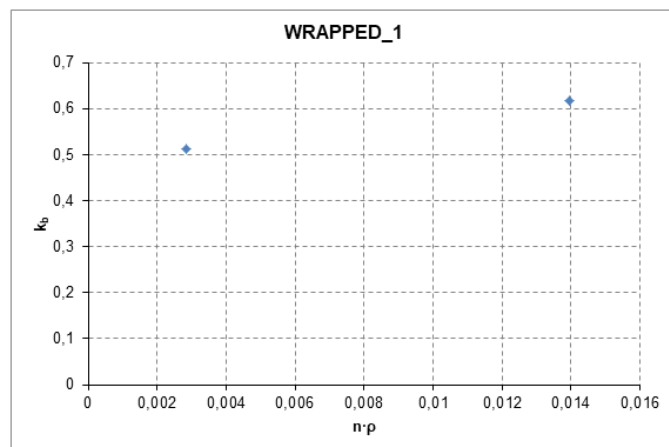


Figura 70. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  per a les bigues amb acabat superficial *wrapped\_1*

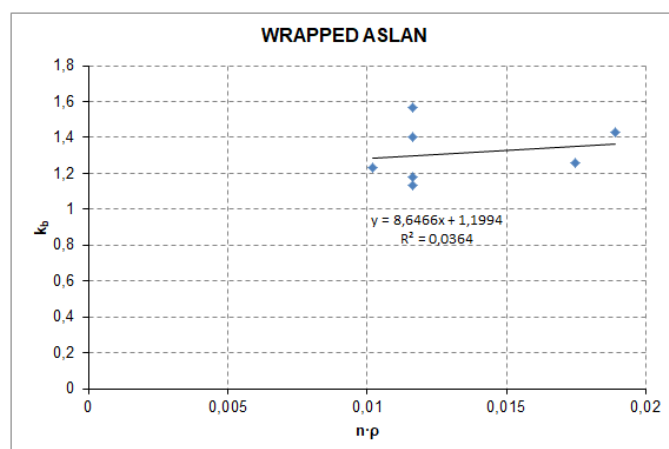


Figura 71. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  per a les bigues amb acabat superficial *wrapped Aslan*

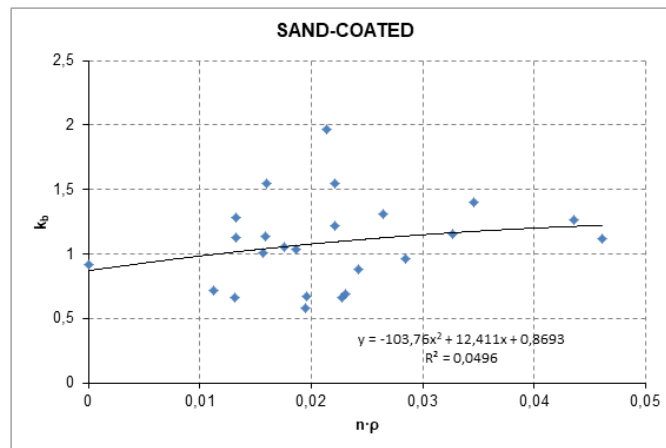


Figura 72. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  per a les bigues amb acabat superficial *sand – coated*

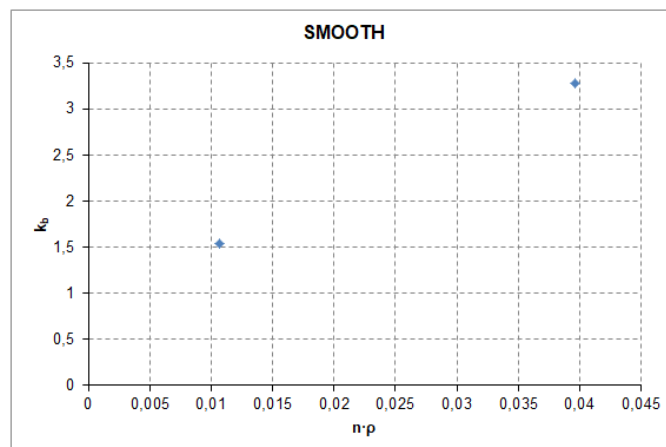


Figura 73. Coeficient d'adherència en funció de  $n \cdot \rho$  per a les bigues amb acabat superficial *smooth*

#### A.2.2. Coeficient d'adherència en funció de $d/h$

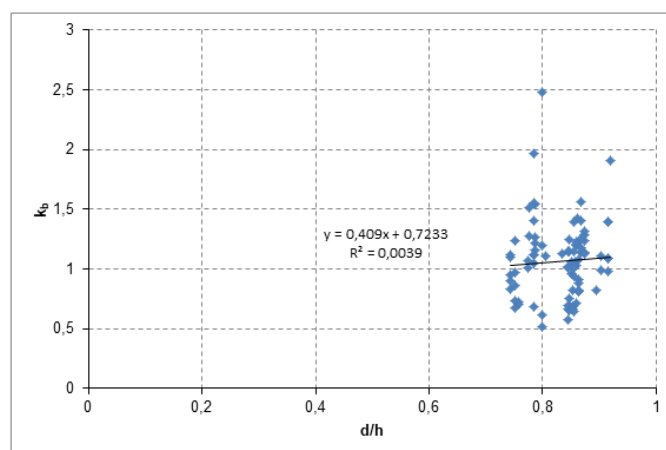


Figura 74. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a totes les bigues

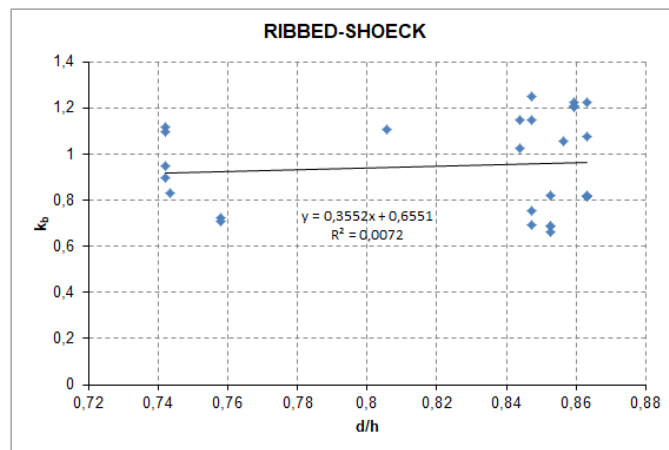


Figura 75. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed* – *Shoeck*

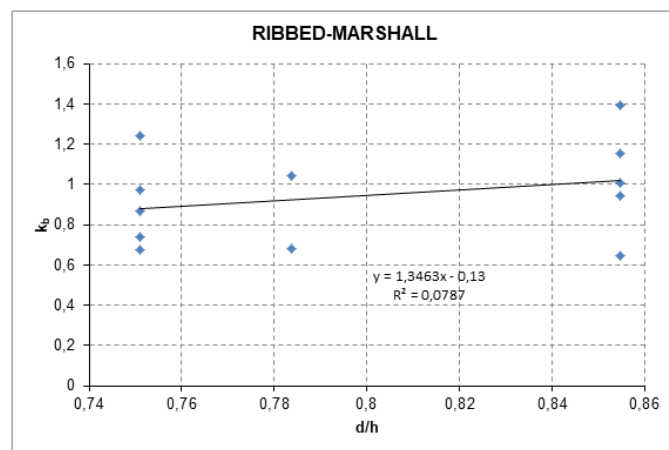


Figura 76. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed* – *Marshall*

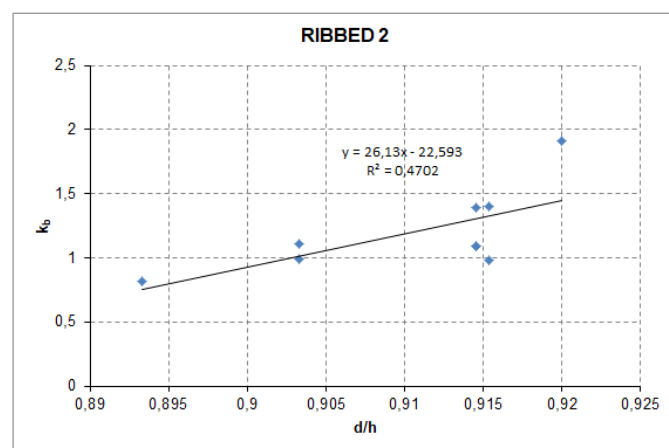


Figura 77. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed 2*

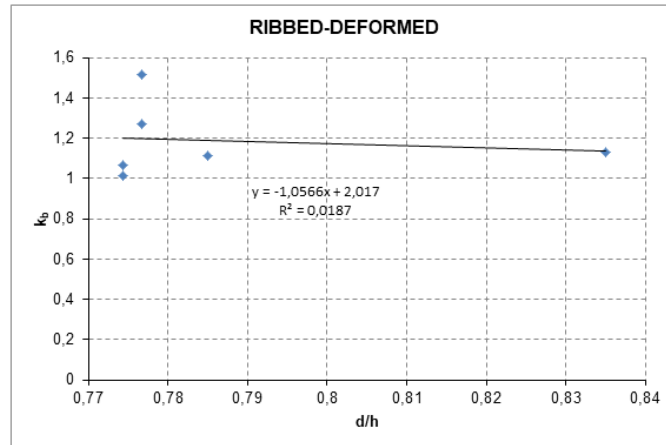


Figura 78. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial *ribbed – deformed*

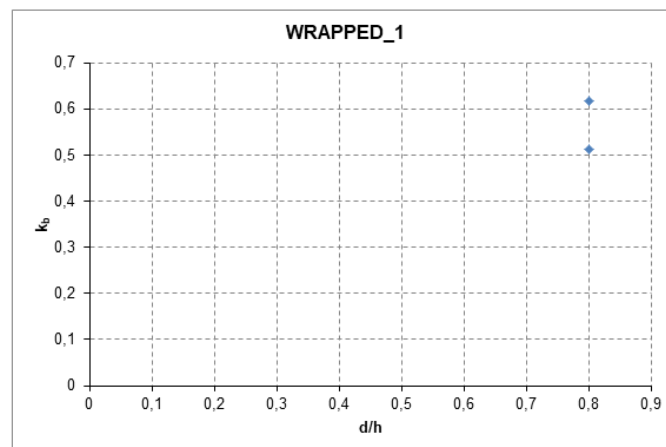


Figura 79. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial *wrapped\_1*

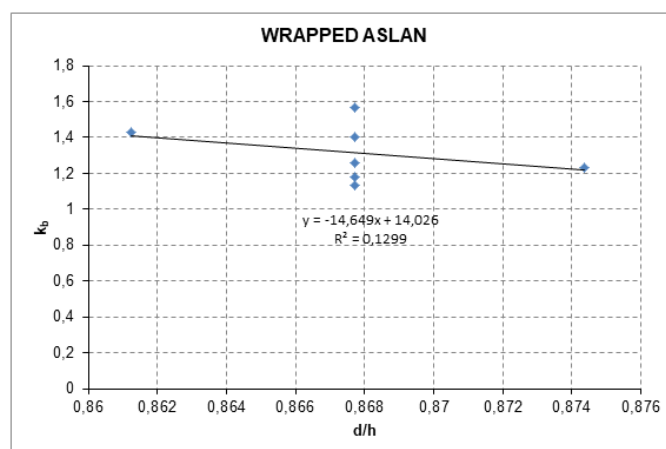


Figura 80. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial *wrapped Aslan*

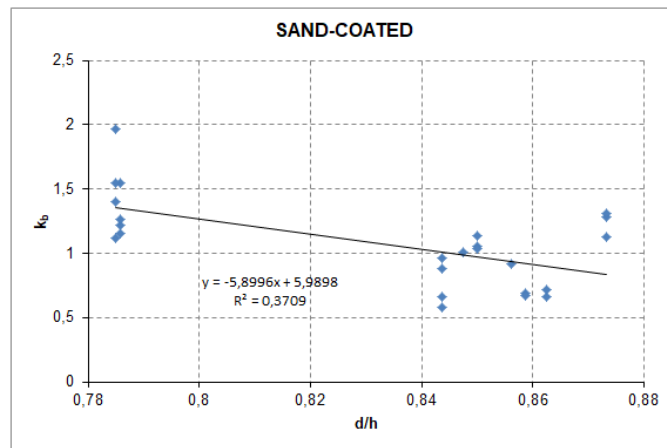


Figura 81. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial *sand – coated*

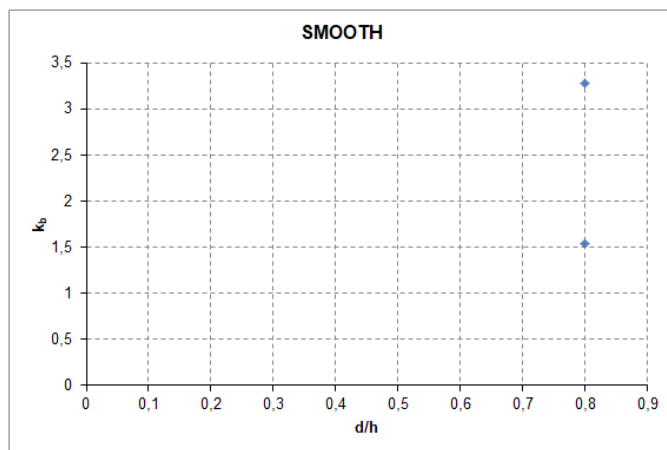


Figura 82. Coeficient d'adherència en funció de  $d/h$  per a les bigues amb acabat superficial *smooth*

## ANNEX B. RESULTATS TEÒRICS OBTINGUTS PER A DE CADASCUNA DE LES NORMATIVES SOBRE ELS VALORS EXPERIMENTALS

En aquest annex es representen tots els gràfics d'adequació dels resultats teòrics obtinguts per a cadascuna de les normatives sobre els valors experimentals corresponents a l'apartat 4.4 de la memòria del projecte. S'ha tingut en conta en tot moment si la situació de la fissura és a la cara de baix de la biga o a l'alçada del reforç i si es tracta d'amplada de fissura màxima o mitjana.

### B.1. Resultats obtinguts per a les normatives ACI 440 i ISIS Canada

En aquest apartat es representen tots els gràfics de resultats per les normatives ACI 440 i ISIS, les quals proporcionen amplada de fissura màxima situada a la cara de baix de la biga.

#### B.1.1. Gràfics obtinguts per l'article Pecce *et al.* 2000

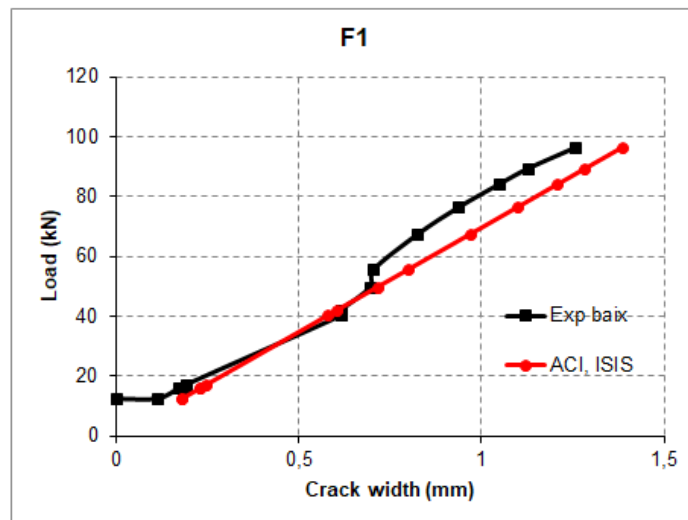


Figura 83. Amplada de fissura màxima de la biga F1 (Pecce *et al.* 2000)



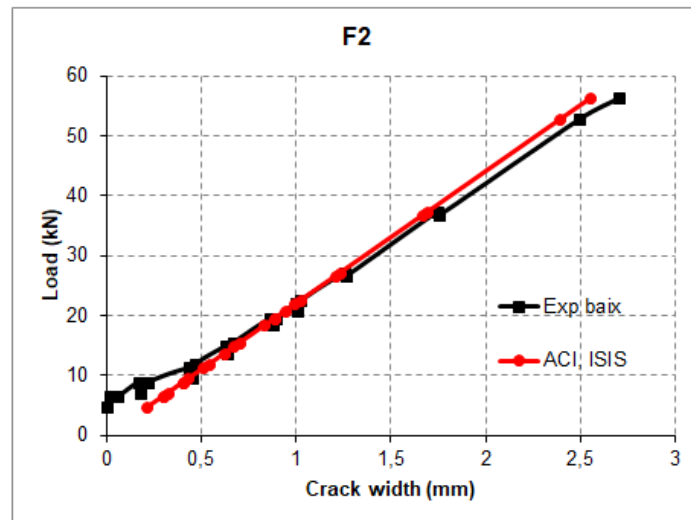


Figura 84. Amplada de fissura màxima de la biga F2 (Pecce *et al.* 2000)

#### B.1.2. Gràfics obtinguts per l'article Thériault & Benmokrane 2000

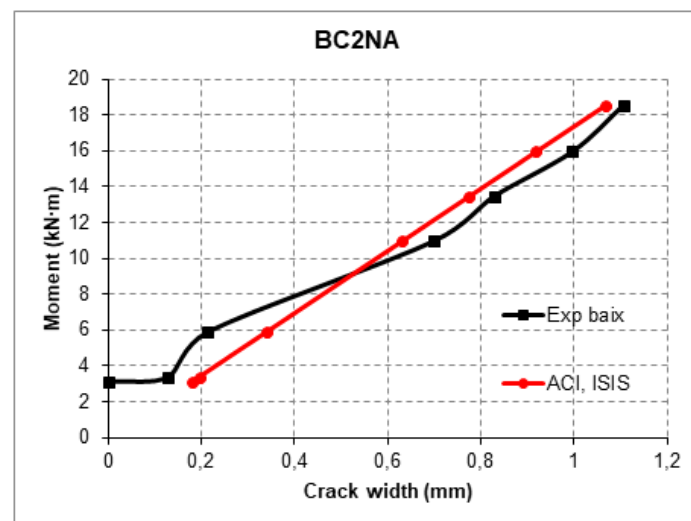


Figura 85. Amplada de fissura màxima de la biga BC2NA (Thériault & Benmokrane 2000)

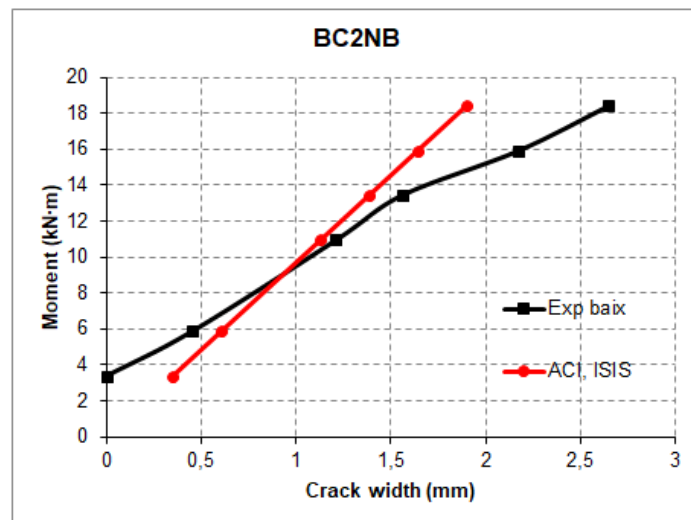


Figura 86. Amplada de fissura màxima de la biga BC2NB (Thériault & Benmokrane 2000)

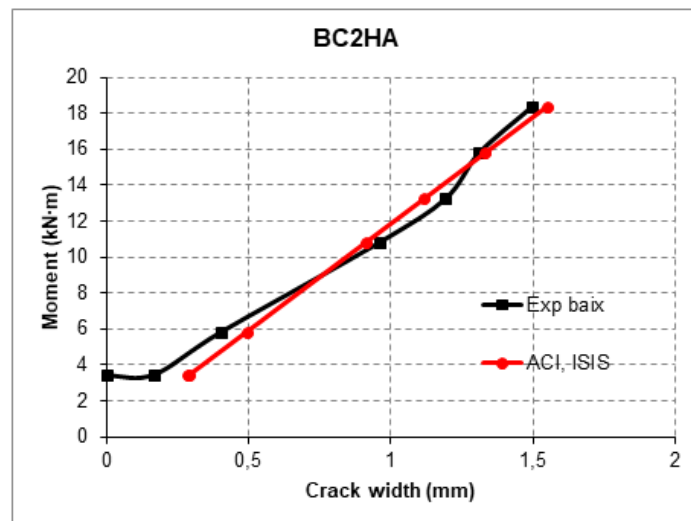


Figura 87. Amplada de fissura màxima de la biga BC2HA (Thériault & Benmokrane 2000)

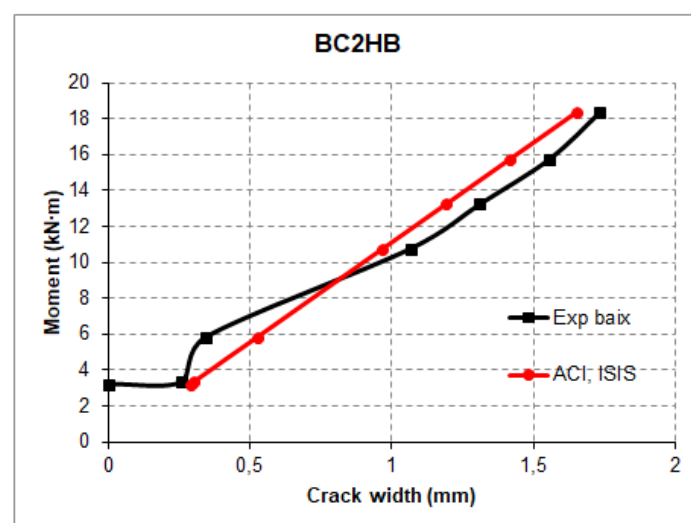


Figura 88. Amplada de fissura màxima de la biga BC2HB (Thériault & Benmokrane 2000)

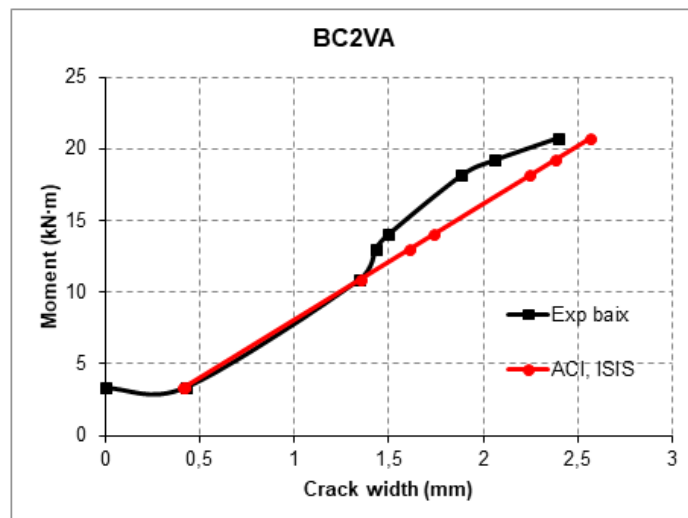


Figura 89. Amplada de fissura màxima de la biga BC2VA (Thériault & Benmokrane 2000)

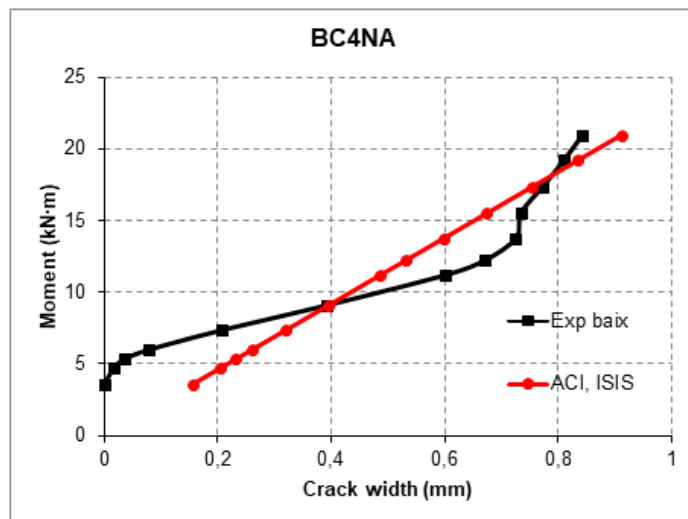


Figura 90. Amplada de fissura màxima de la biga BC4NA (Thériault & Benmokrane 2000)

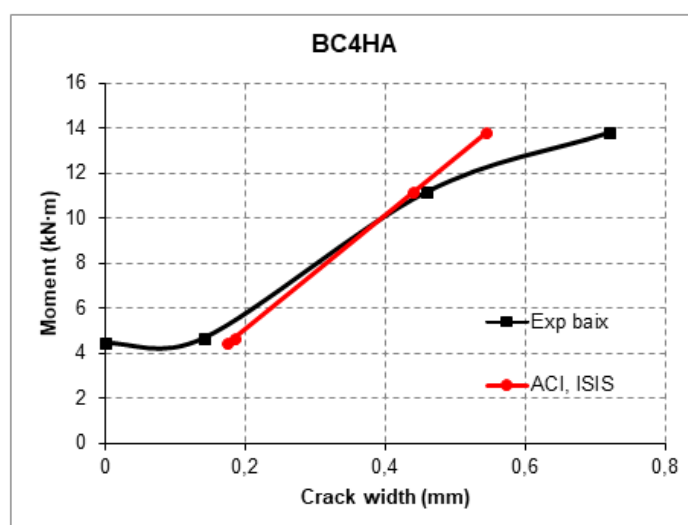


Figura 91. Amplada de fissura màxima de la biga BC4HA (Thériault & Benmokrane 2000)

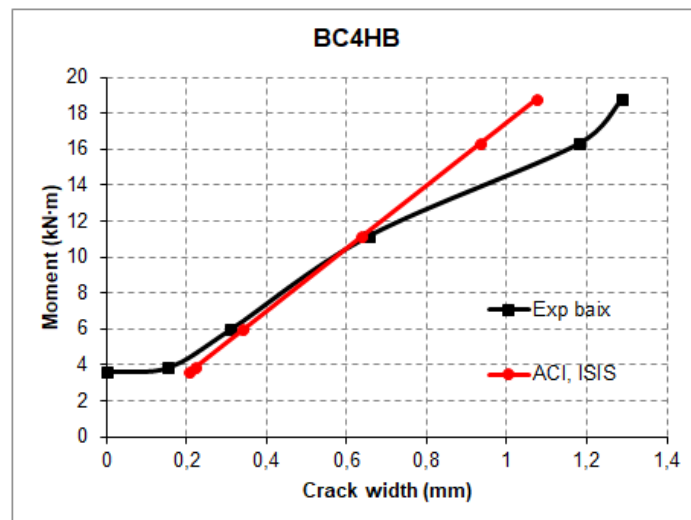


Figura 92. Amplada de fissura màxima de la biga BC4HB (Thériault & Benmokrane 2000)

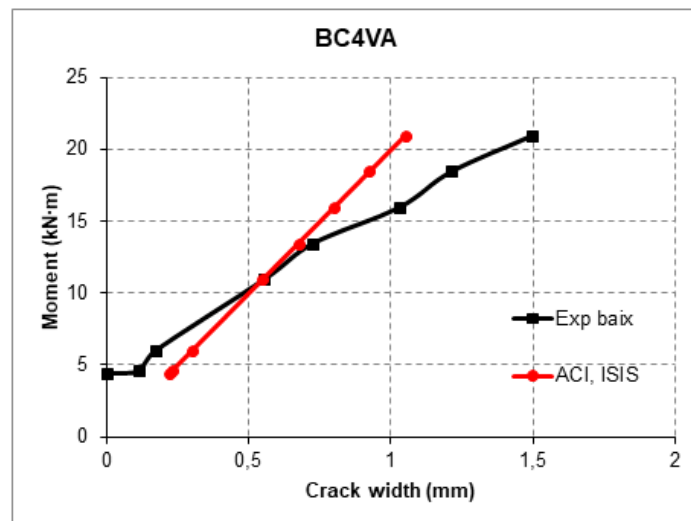


Figura 93. Amplada de fissura màxima de la biga BC4VA (Thériault & Benmokrane 2000)

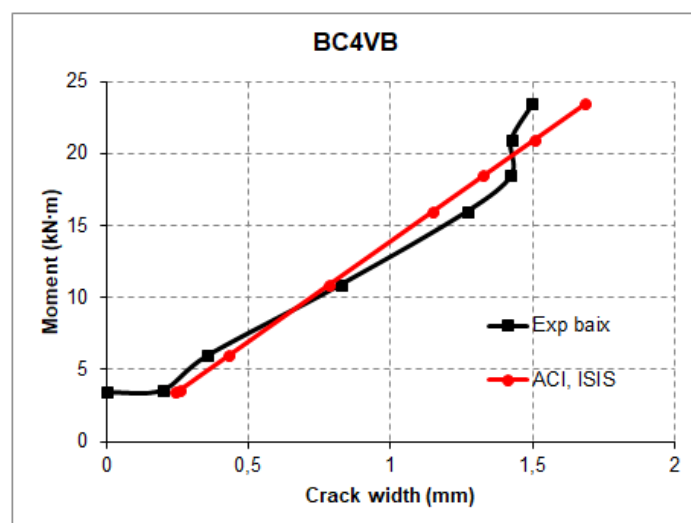


Figura 94. Amplada de fissura màxima de la biga BC4VB (Thériault & Benmokrane 2000)

**B.1.3. Gràfics obtinguts per l'article Lee *et al.* 2010**

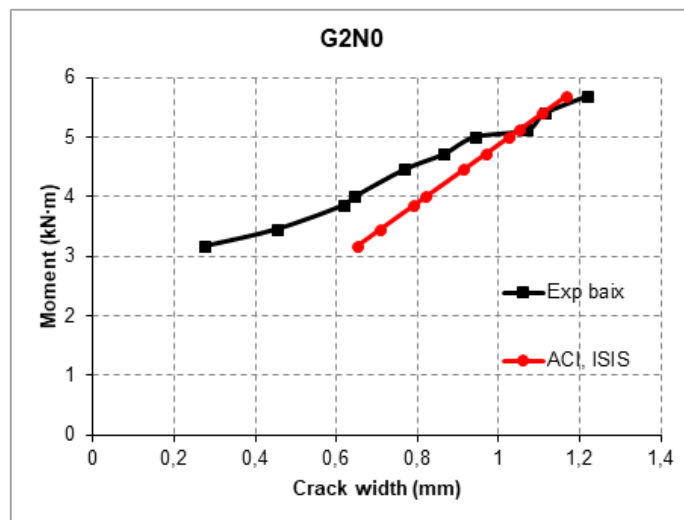


Figura 95. Amplada de fissura màxima de la biga G2N0 (Lee *et al.* 2010)

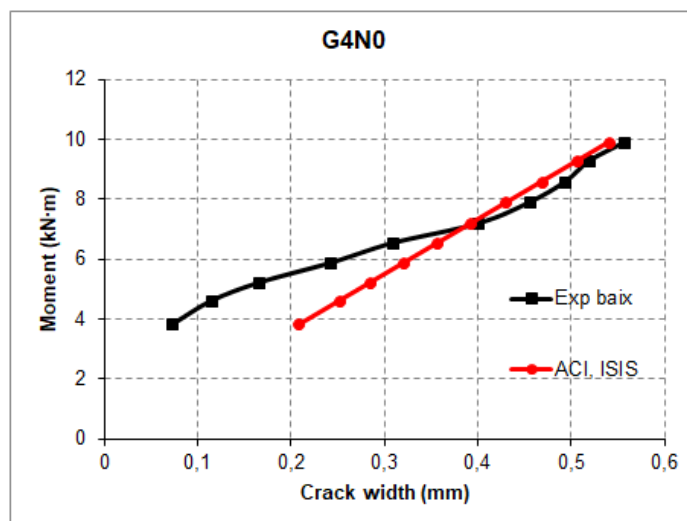


Figura 96. Amplada de fissura màxima de la biga G4N0 (Lee *et al.* 2010)

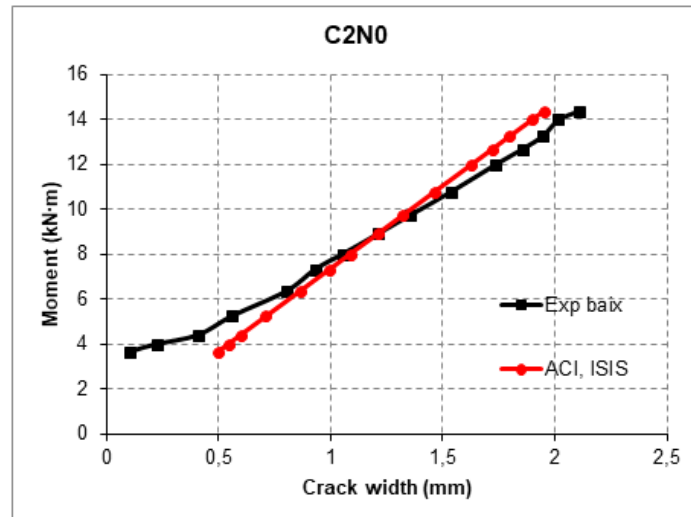


Figura 97. Amplada de fissura màxima de la biga C2N0 (Lee *et al.* 2010)

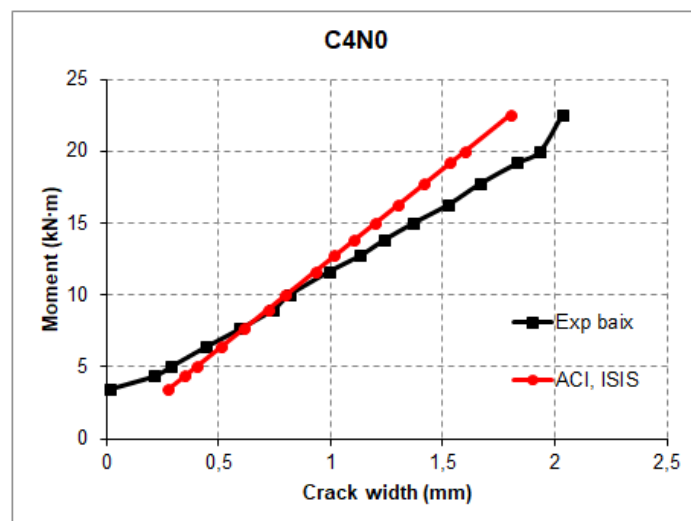


Figura 98. Amplada de fissura màxima de la biga C4N0 (Lee *et al.* 2010)

**B.1.4. Gràfics obtinguts per l'article Kassem *et al.* 2011**

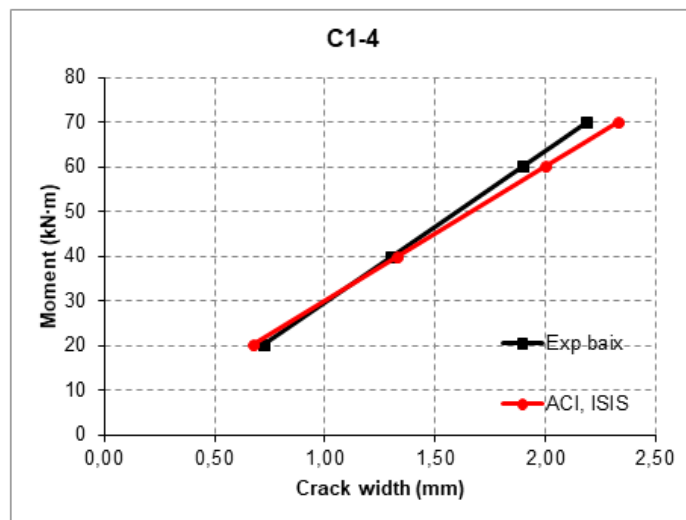


Figura 99. Amplada de fissura màxima de la biga C1-4 (Kassem *et al.* 2011)

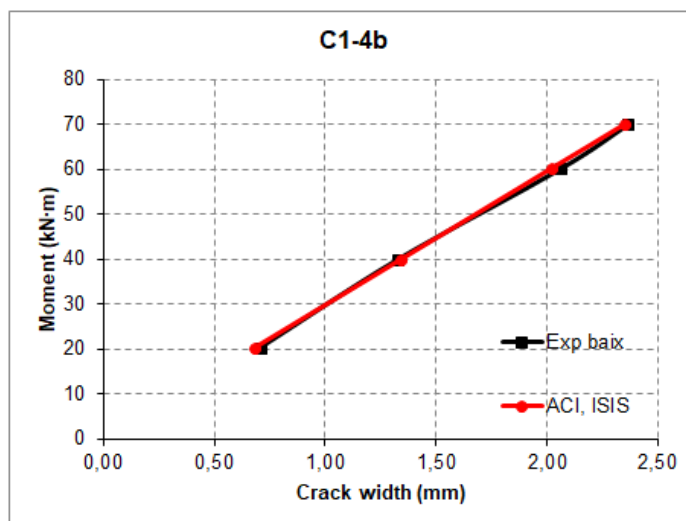


Figura 100. Amplada de fissura màxima de la biga C1-4b (Kassem *et al.* 2011)

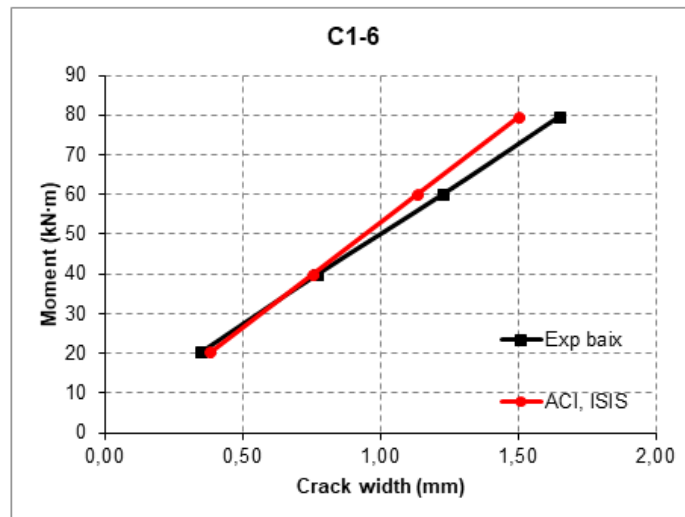


Figura 101. Amplada de fissura màxima de la biga C1-6 (Kassem *et al.* 2011)

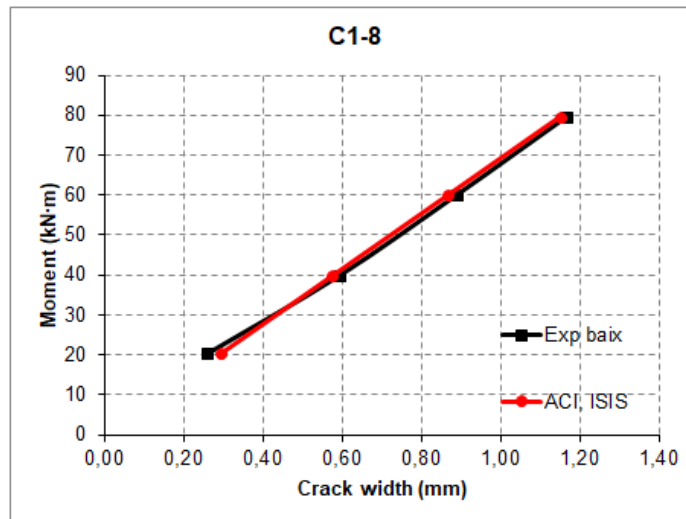


Figura 102. Amplada de fissura màxima de la biga C1-8 (Kassem *et al.* 2011)

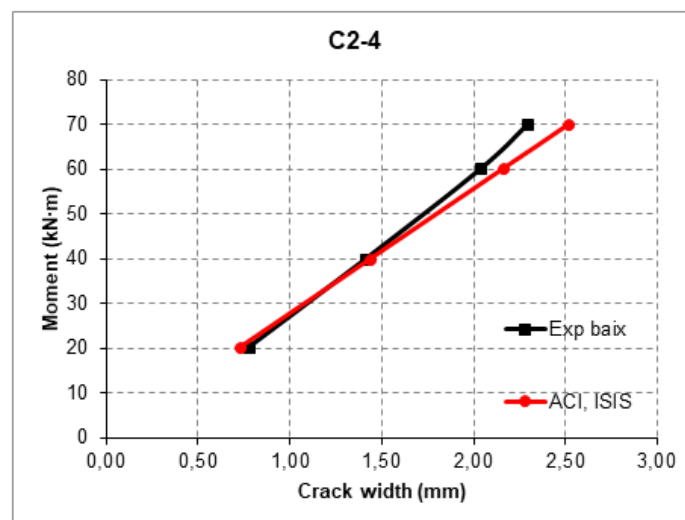


Figura 103. Amplada de fissura màxima de la biga C2-4 (Kassem *et al.* 2011)



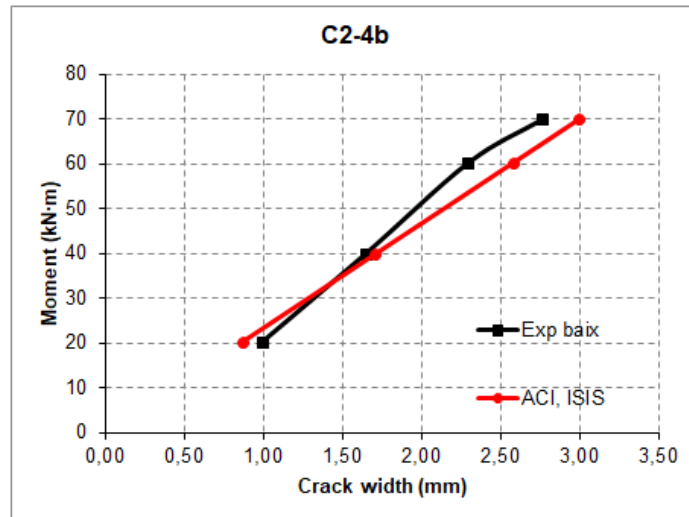


Figura 104. Amplada de fissura màxima de la biga C2-4b (Kassem *et al.* 2011)

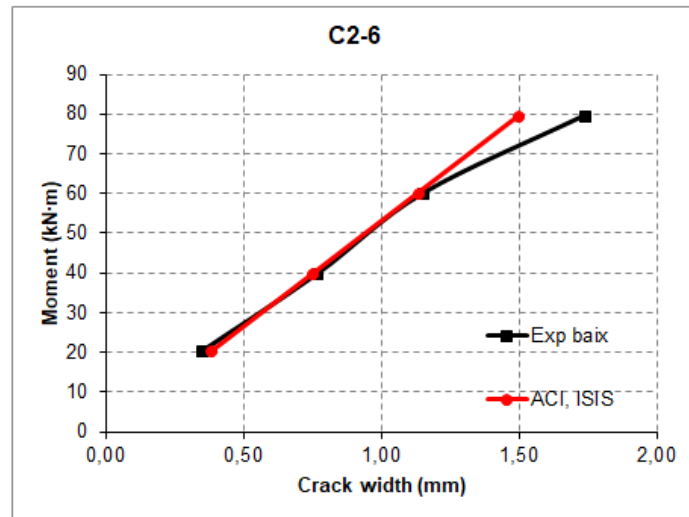


Figura 105. Amplada de fissura màxima de la biga C2-6 (Kassem *et al.* 2011)

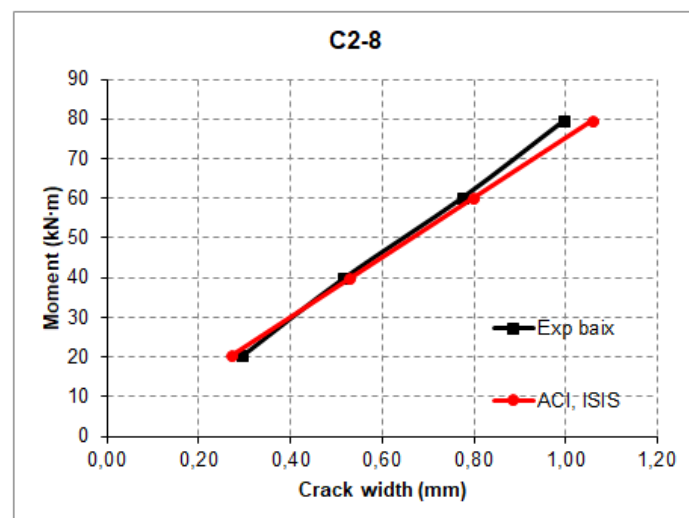


Figura 106. Amplada de fissura màxima de la biga C2-8 (Kassem *et al.* 2011)

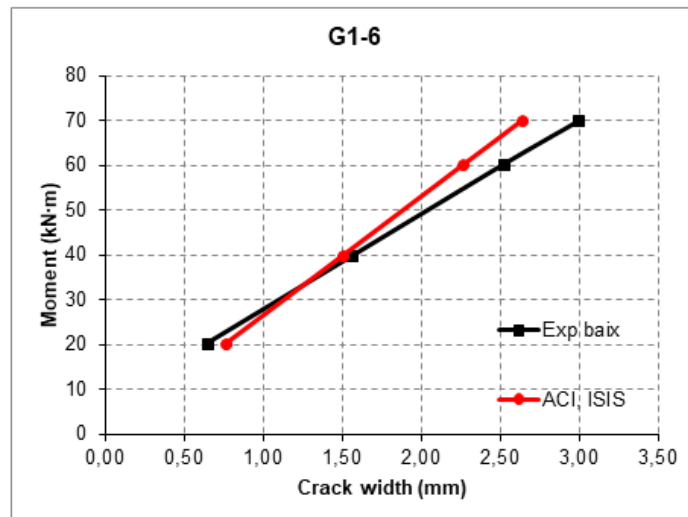


Figura 107. Amplada de fissura màxima de la biga G1-6 (Kassem *et al.* 2011)

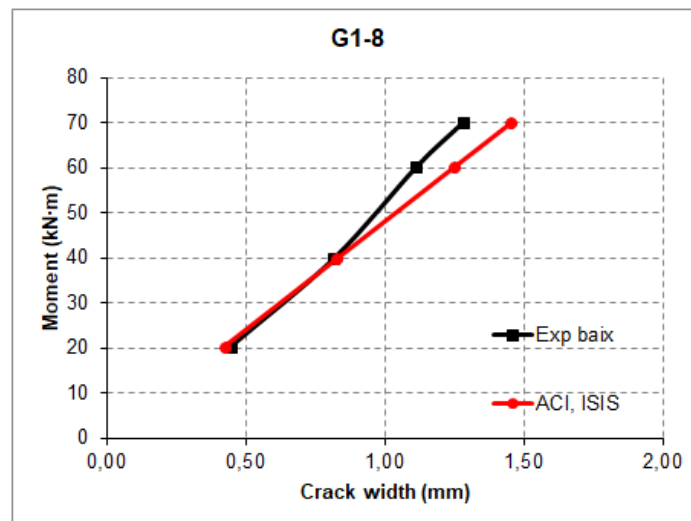


Figura 108. Amplada de fissura màxima de la biga G1-8 (Kassem *et al.* 2011)

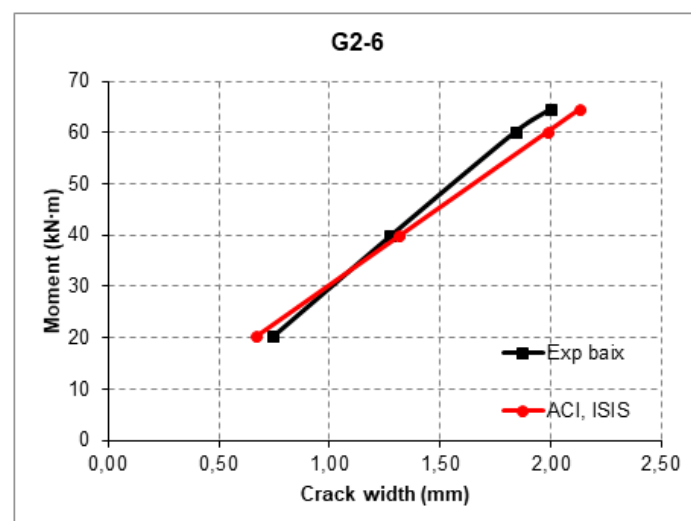


Figura 109. Amplada de fissura màxima de la biga G2-6 (Kassem *et al.* 2011)

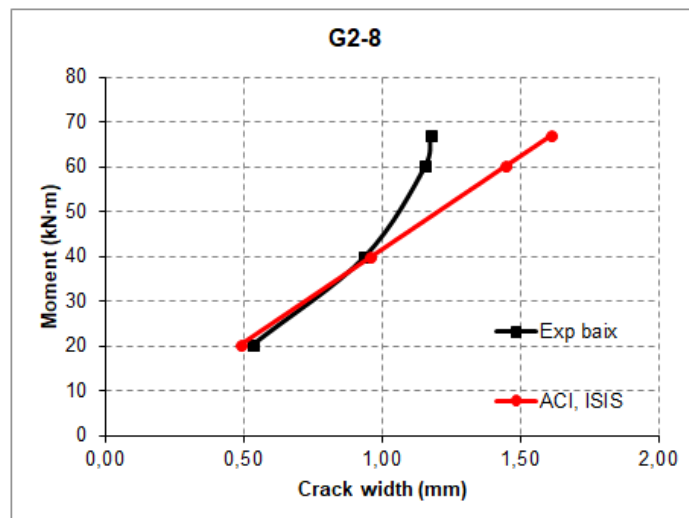


Figura 110. Amplada de fissura màxima de la biga G2-8 (Kassem *et al.* 2011)

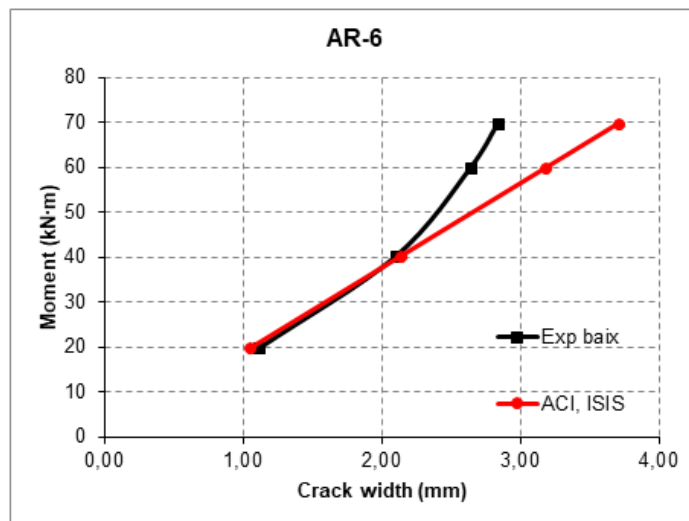


Figura 111. Amplada de fissura màxima de la biga AR-6 (Kassem *et al.* 2011)

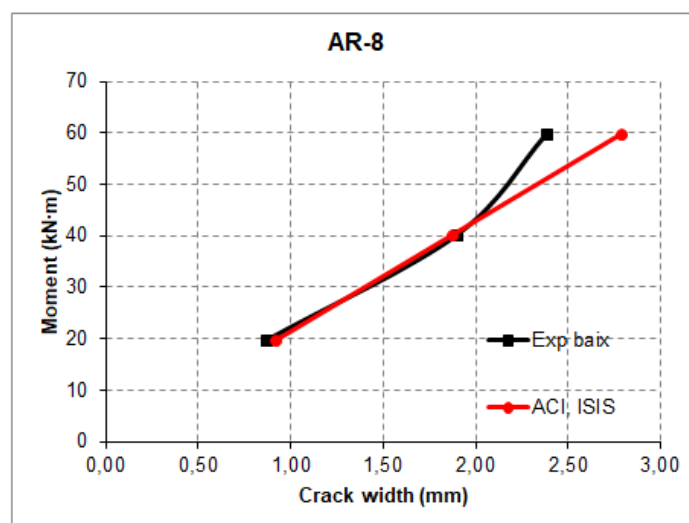


Figura 112. Amplada de fissura màxima de la biga AR-8 (Kassem *et al.* 2011)

**B.1.5. Gràfics obtinguts per l'article Barris *et al.* 2013**

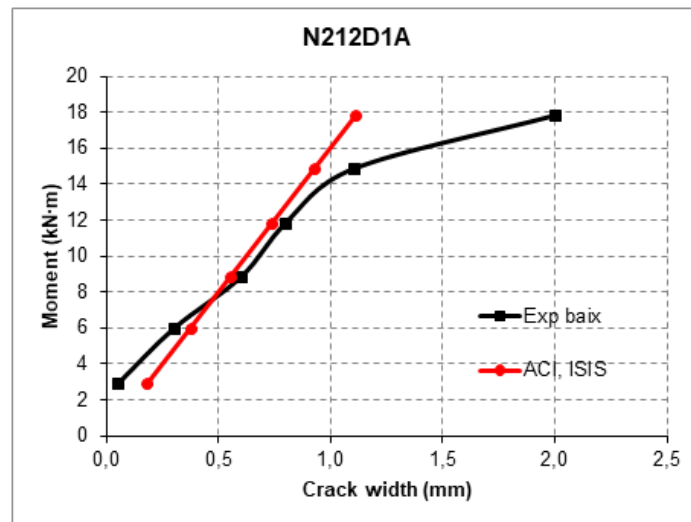


Figura 113. Amplada de fissura màxima de la biga N212D1A (Barris *et al.* 2013)

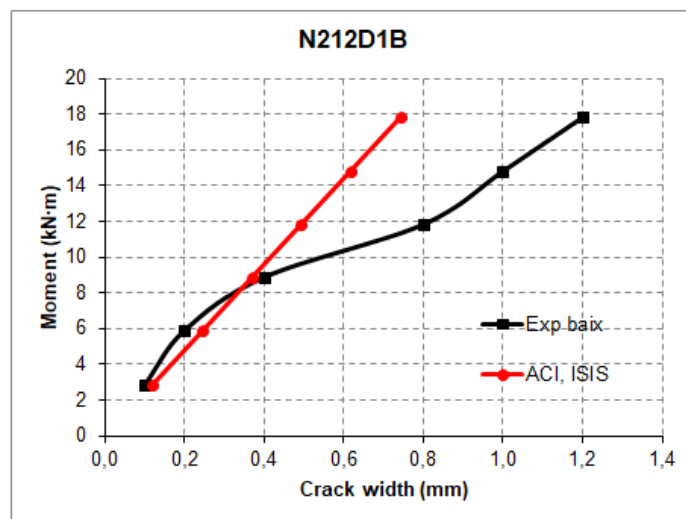


Figura 114. Amplada de fissura màxima de la biga N212D1B (Barris *et al.* 2013)

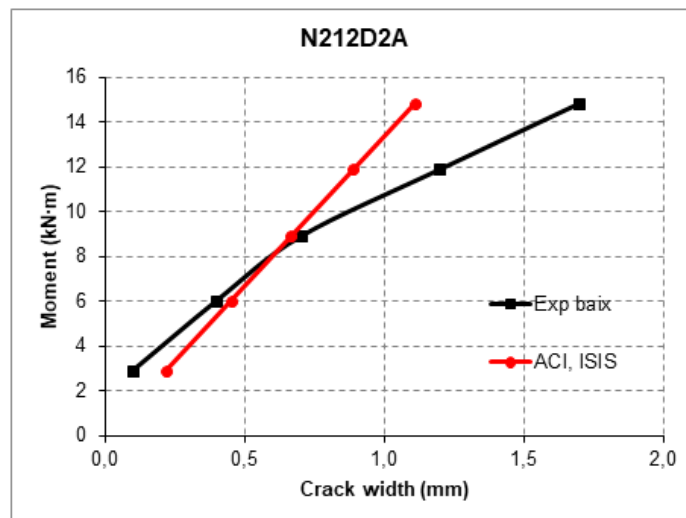


Figura 115. Amplada de fissura màxima de la biga N212D2A (Barris *et al.* 2013)

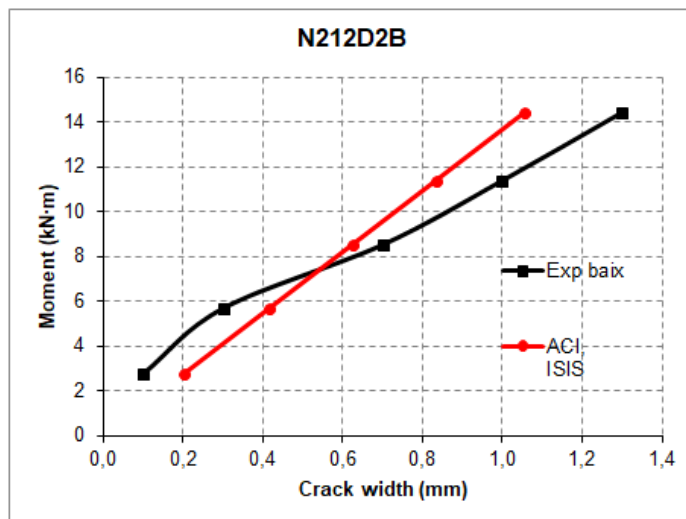


Figura 116. Amplada de fissura màxima de la biga N212D2B (Barris *et al.* 2013)

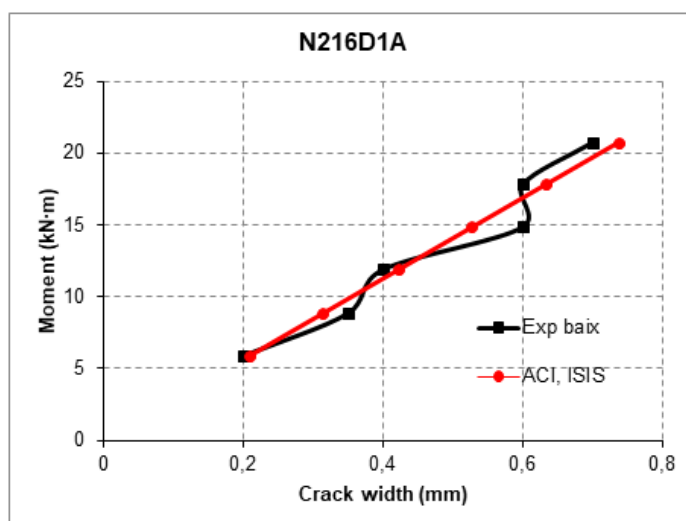


Figura 117. Amplada de fissura màxima de la biga N216D1A (Barris *et al.* 2013)

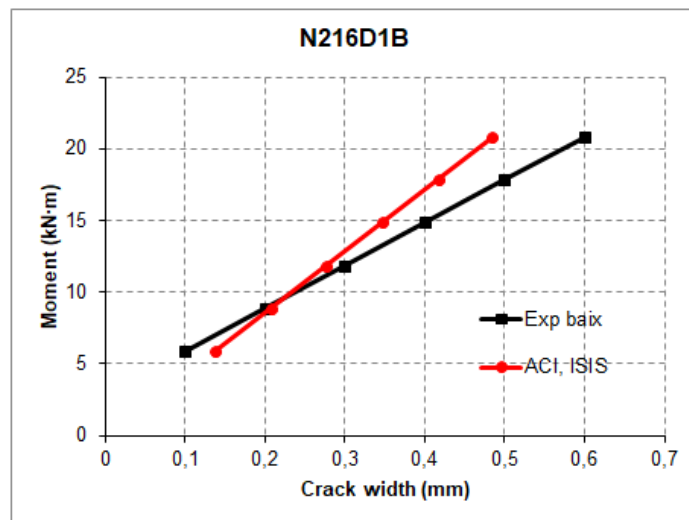


Figura 118. Amplada de fissura màxima de la biga N216D1B (Barris *et al.* 2013)

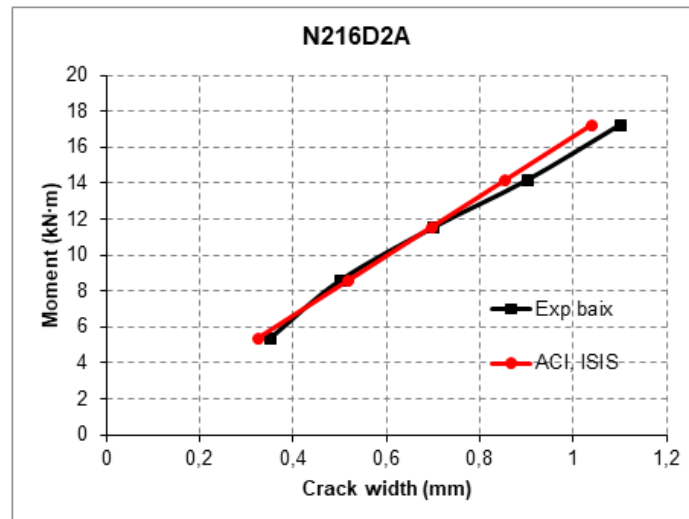


Figura 119. Amplada de fissura màxima de la biga N216D2A (Barris *et al.* 2013)

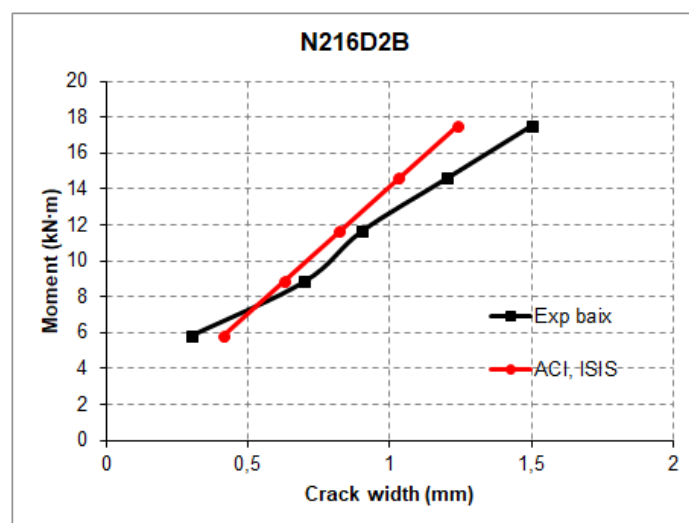


Figura 120. Amplada de fissura màxima de la biga N216D2B (Barris *et al.* 2013)

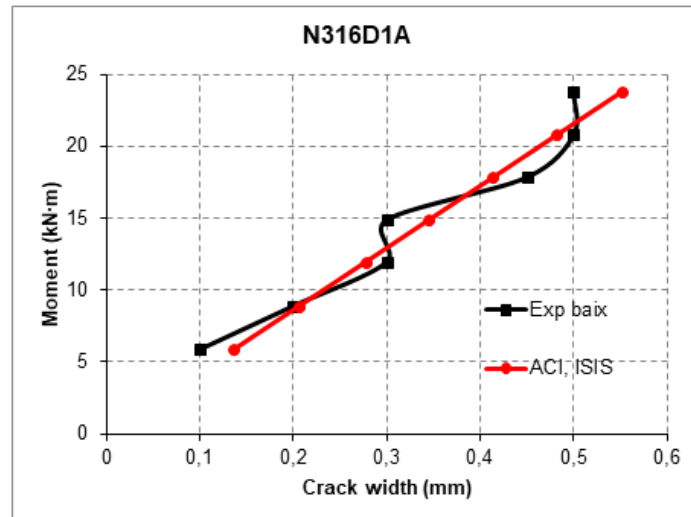


Figura 121. Amplada de fissura màxima de la biga N316D1A (Barris *et al.* 2013)

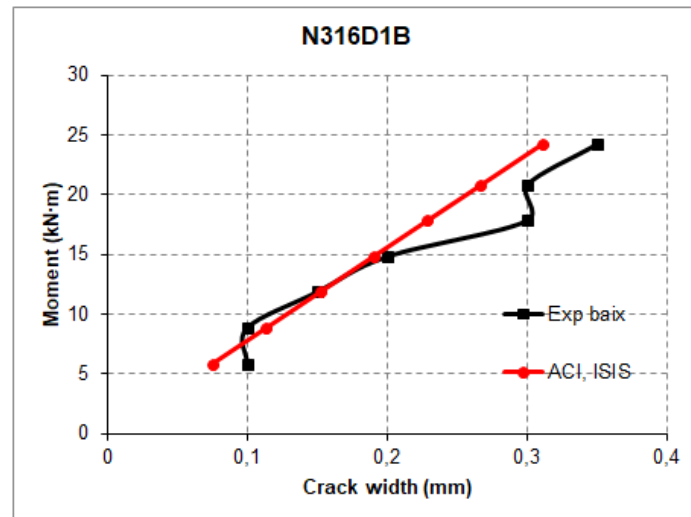


Figura 122. Amplada de fissura màxima de la biga N316D1B (Barris *et al.* 2013)

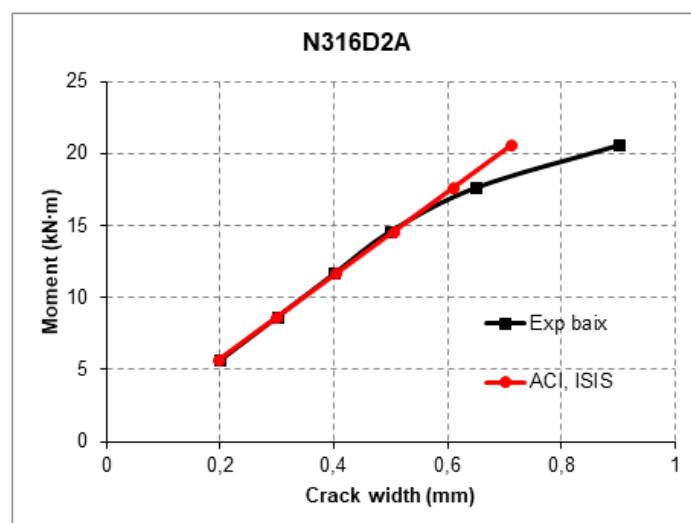


Figura 123. Amplada de fissura màxima de la biga N316D2A (Barris *et al.* 2013)

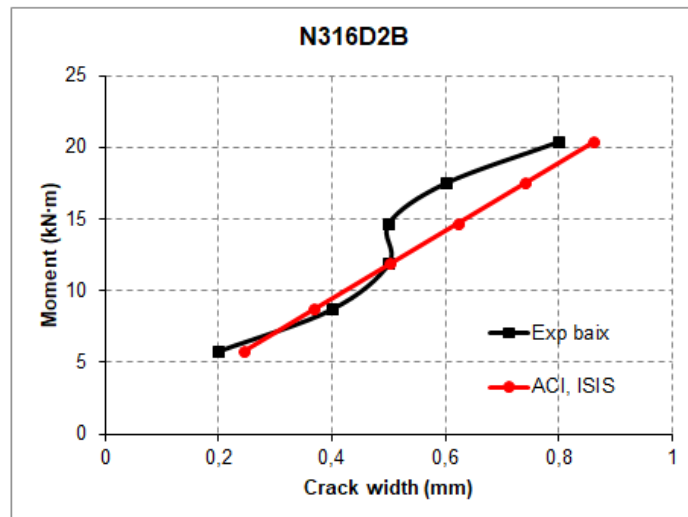


Figura 124. Amplada de fissura màxima de la biga N316D2B (Barris *et al.* 2013)

#### B.1.6. Gràfics obtinguts per l'article Noël & Soudki 2014

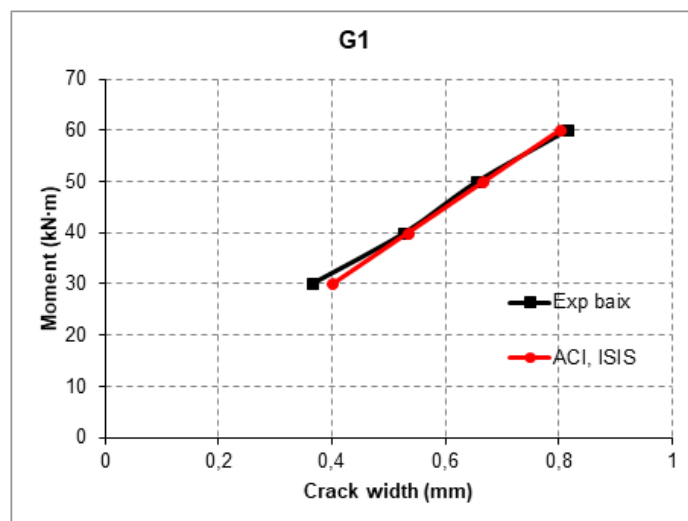


Figura 125. Amplada de fissura màxima de la biga G1 (Noël & Soudki 2014)



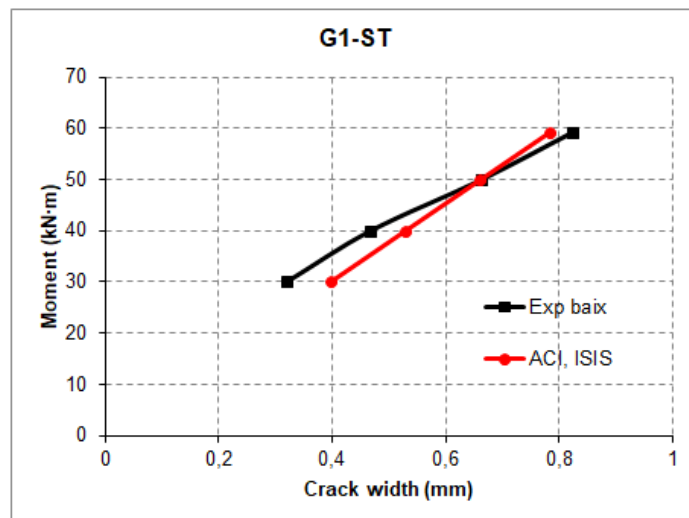


Figura 126. Amplada de fissura màxima de la biga G1-ST (Noël & Soudki 2014)

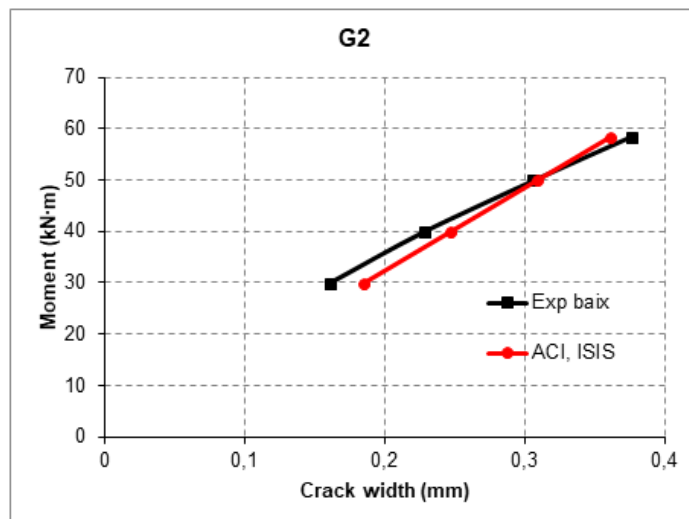


Figura 127. Amplada de fissura màxima de la biga G2 (Noël & Soudki 2014)

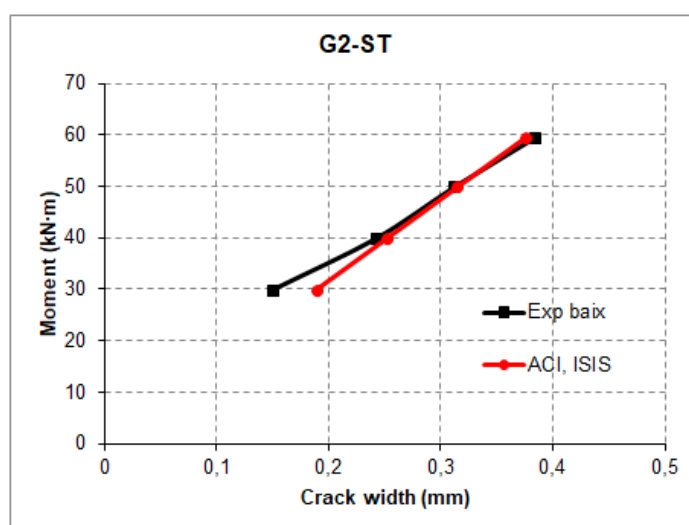


Figura 128. Amplada de fissura màxima de la biga G2-ST (Noël & Soudki 2014)

**B.1.7. Gràfics obtinguts per l'article Mias *et al.* 2015**

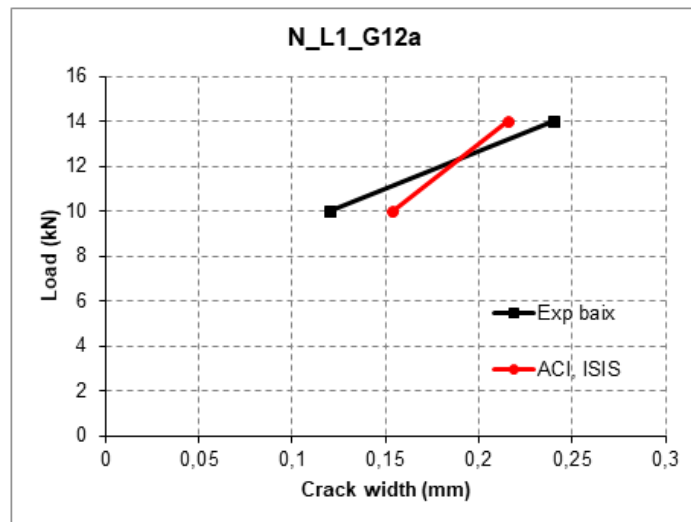


Figura 129. Amplada de fissura màxima de la biga N\_L1\_G12a (Mias *et al.* 2015)

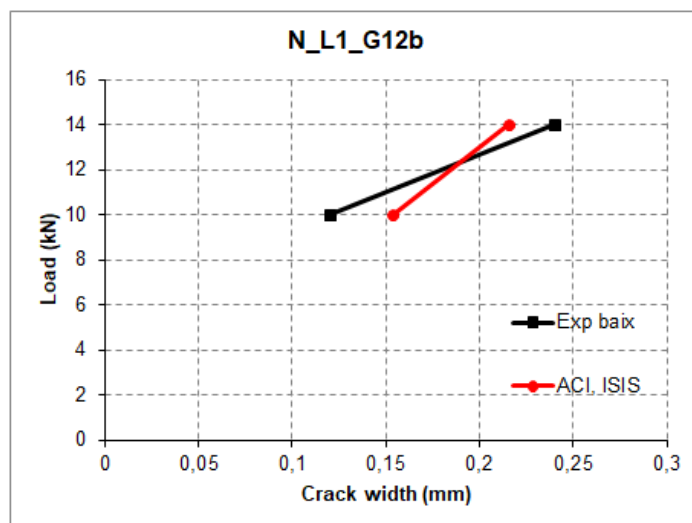


Figura 130. Amplada de fissura màxima de la biga N\_L1\_G12b (Mias *et al.* 2015)

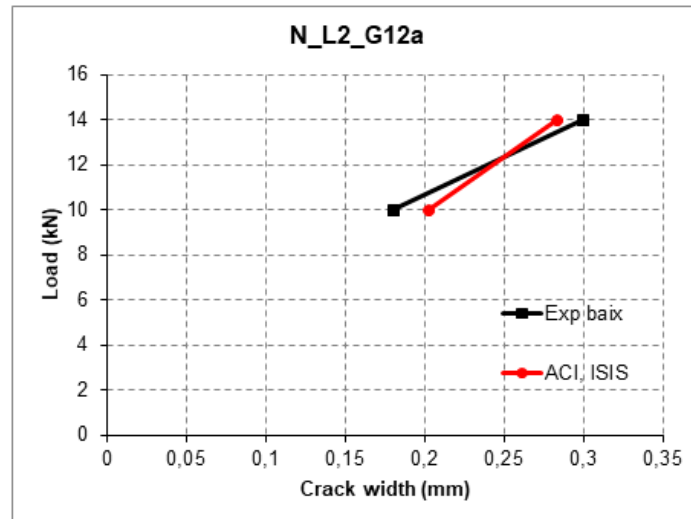


Figura 131. Amplada de fissura màxima de la biga N\_L2\_G12a (Mias *et al.* 2015)

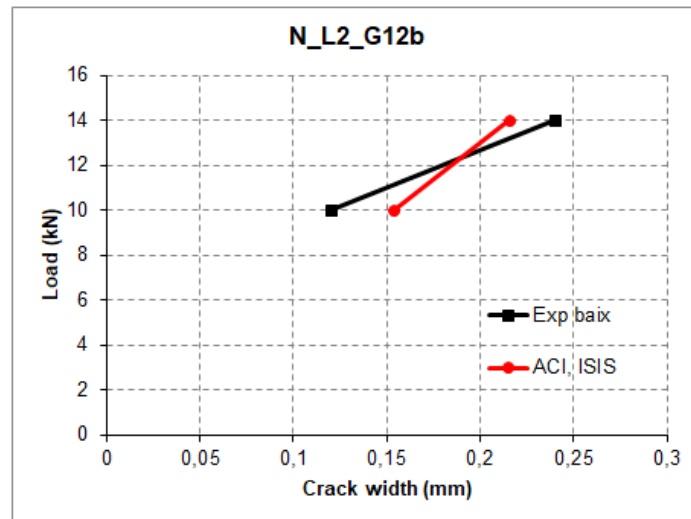


Figura 132. Amplada de fissura màxima de la biga N\_L2\_G12b (Mias *et al.* 2015)

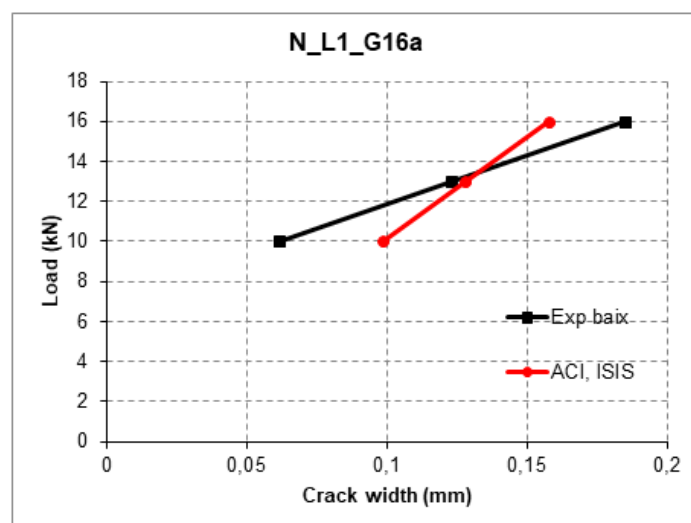


Figura 133. Amplada de fissura màxima de la biga N\_L1\_G16a (Mias *et al.* 2015)

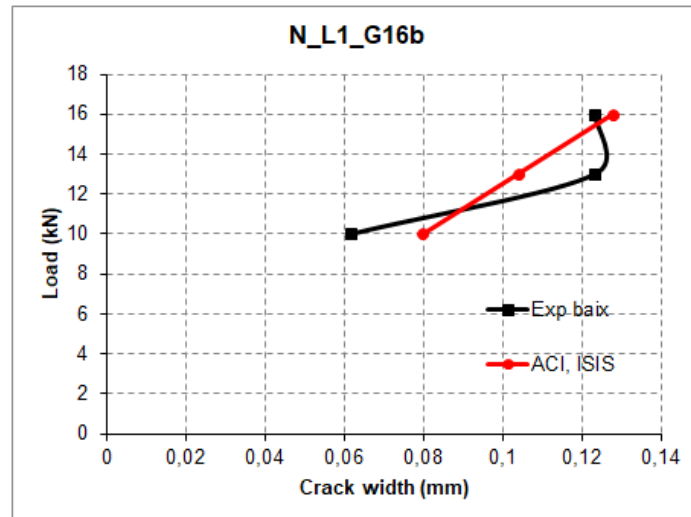


Figura 134. Amplada de fissura màxima de la biga N\_L1\_G16b (Mias *et al.* 2015)

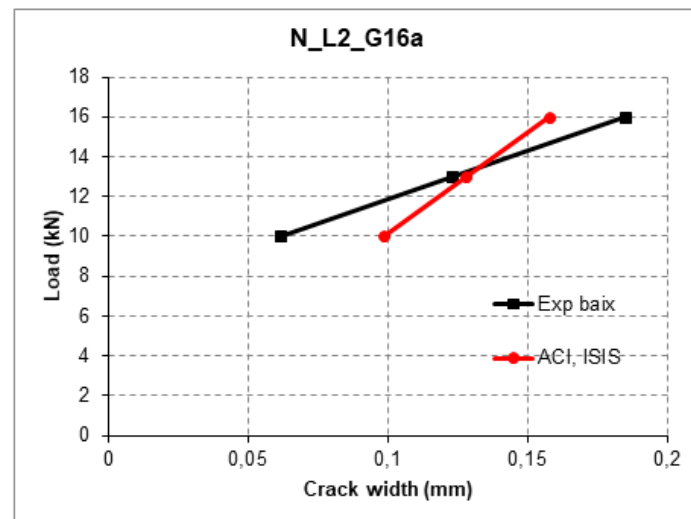


Figura 135. Amplada de fissura màxima de la biga N\_L2\_G16a (Mias *et al.* 2015)

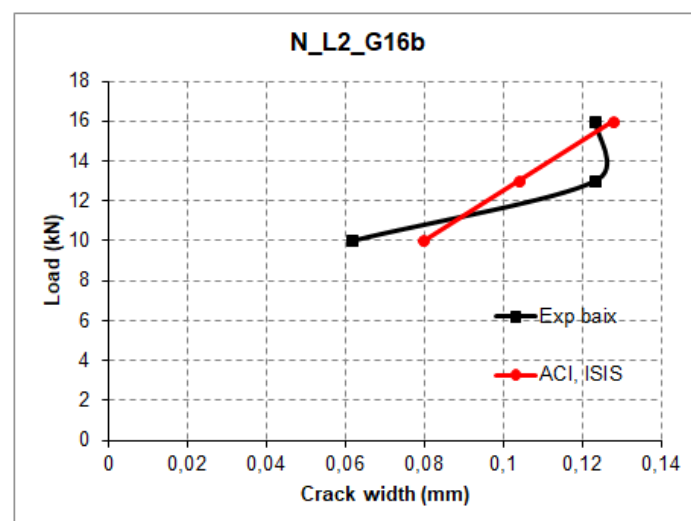


Figura 136. Amplada de fissura màxima de la biga N\_L2\_G16b (Mias *et al.* 2015)

**B.1.8. Gràfics obtinguts per l'article Adam *et al.* 2015**

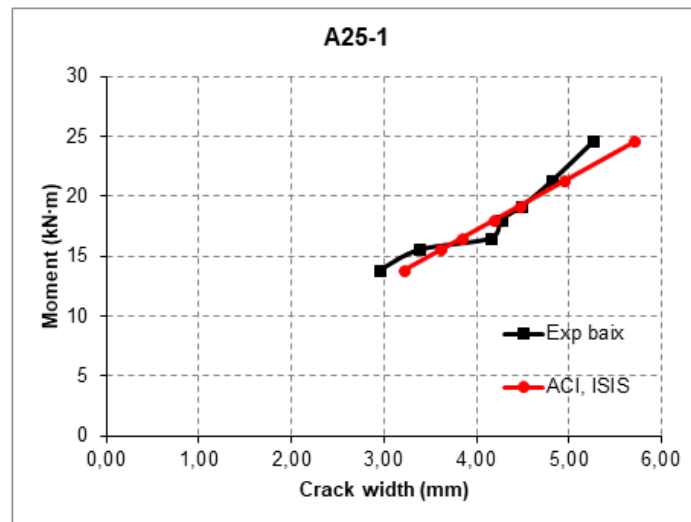


Figura 137. Amplada de fissura màxima de la biga A25-1 (Adam *et al.* 2015)

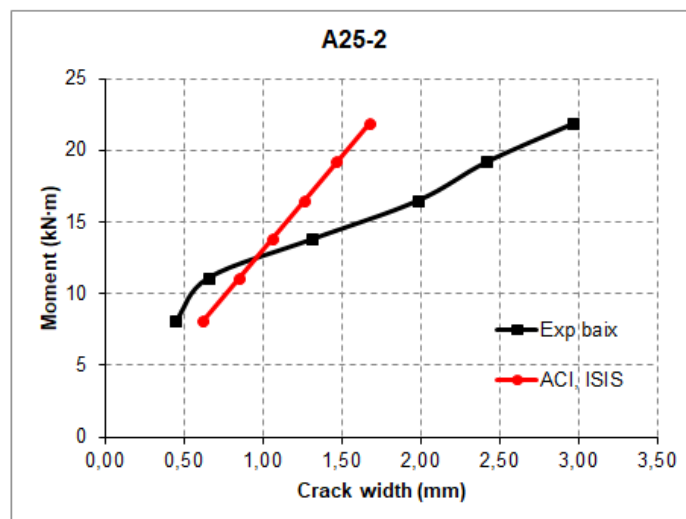


Figura 138. Amplada de fissura màxima de la biga A25-2 (Adam *et al.* 2015)

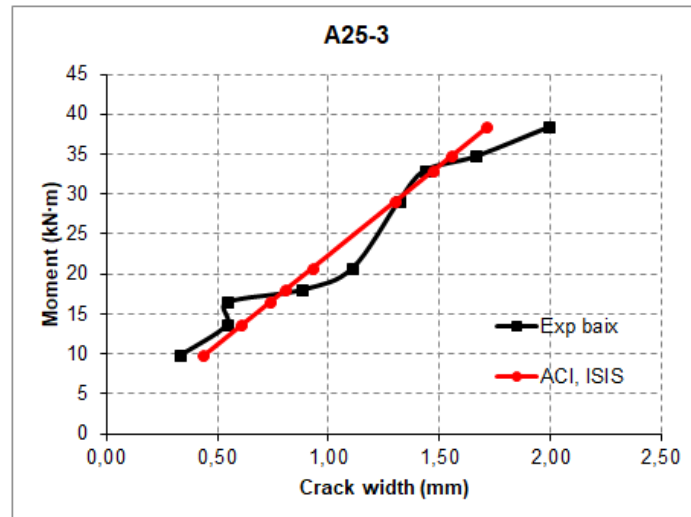


Figura 139. Amplada de fissura màxima de la biga A25-3 (Adam *et al.* 2015)

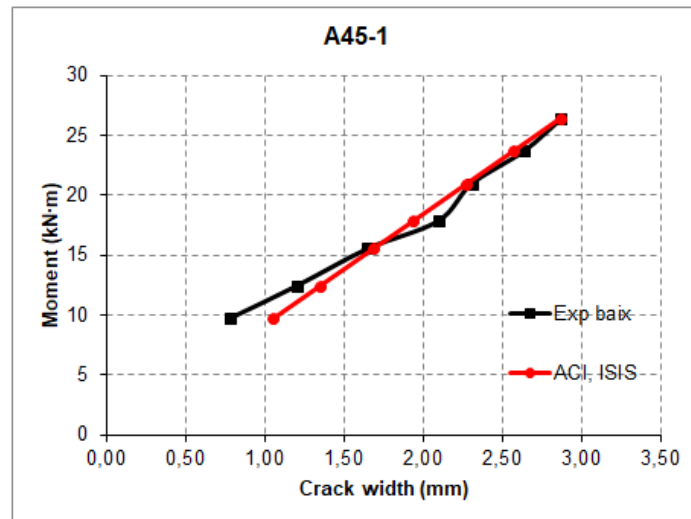


Figura 140. Amplada de fissura màxima de la biga A45-1 (Adam *et al.* 2015)

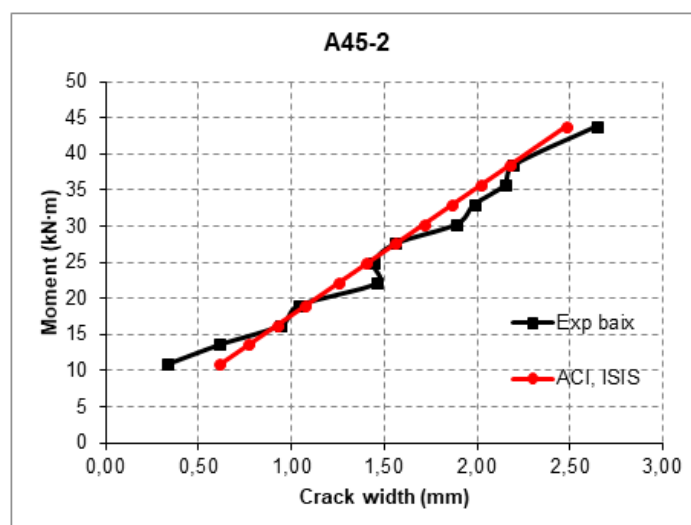


Figura 141. Amplada de fissura màxima de la biga A45-2 (Adam *et al.* 2015)

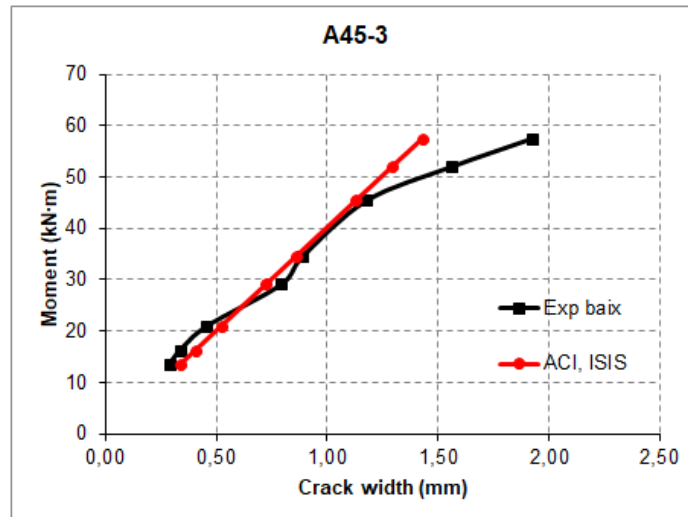


Figura 142. Amplada de fissura màxima de la biga A45-3 (Adam *et al.* 2015)

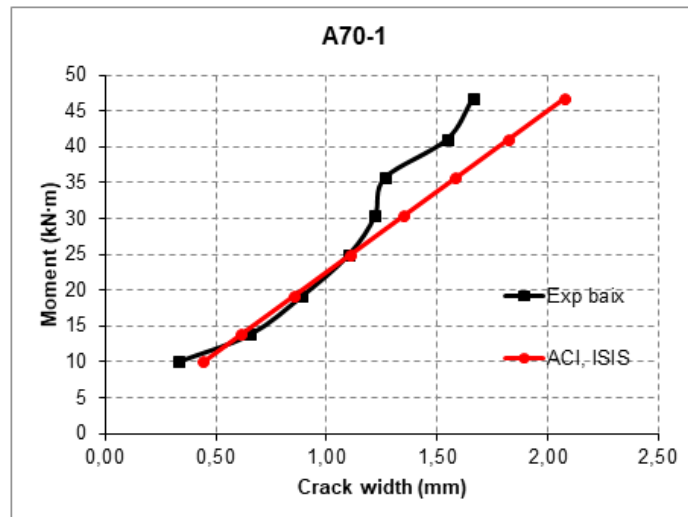


Figura 143. Amplada de fissura màxima de la biga A70-1 (Adam *et al.* 2015)

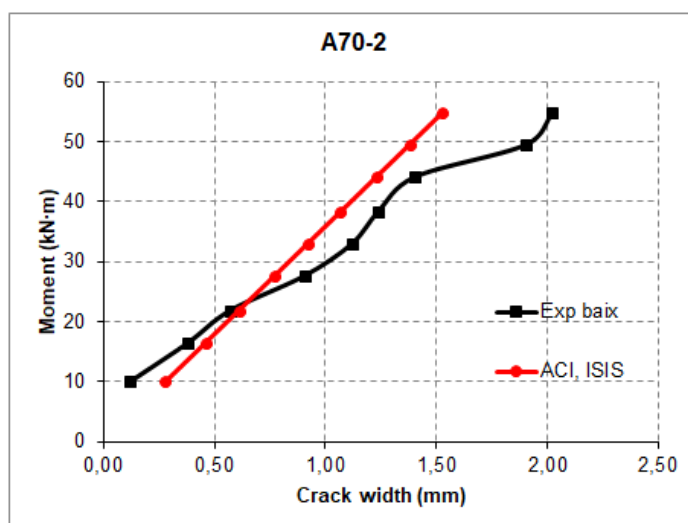


Figura 144. Amplada de fissura màxima de la biga A70-2 (Adam *et al.* 2015)

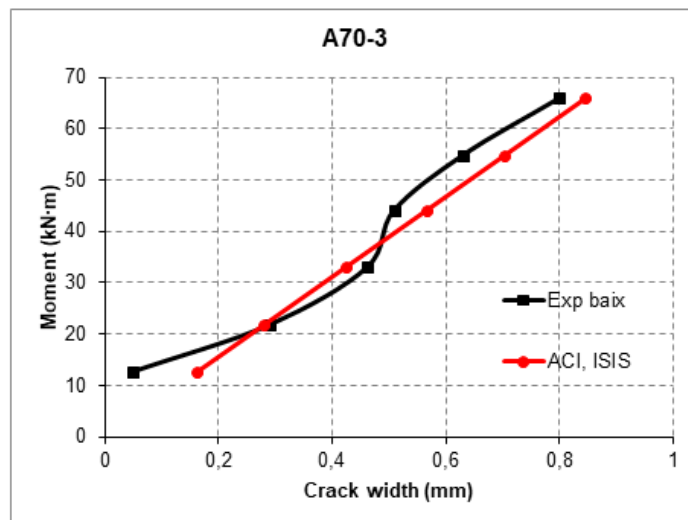


Figura 145. Amplada de fissura màxima de la biga A70-3 (Adam *et al.* 2015)

#### B.1.9. Gràfics obtinguts per l'article El-Nemr *et al.* 2016

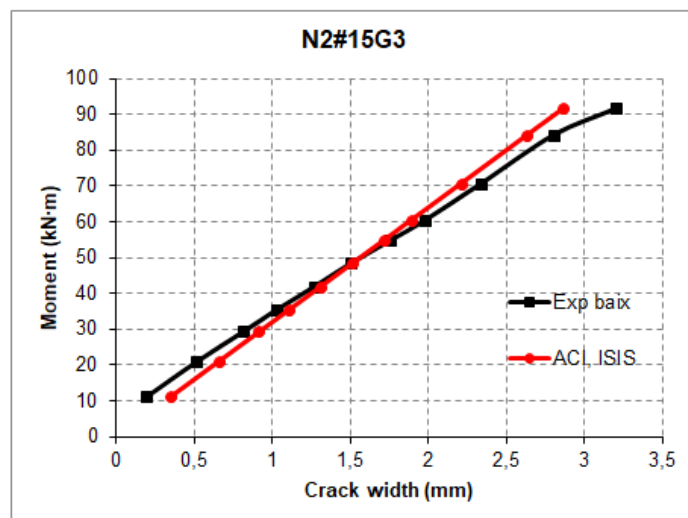


Figura 146. Amplada de fissura màxima de la biga N2#15G3 (El-Nemr *et al.* 2016)



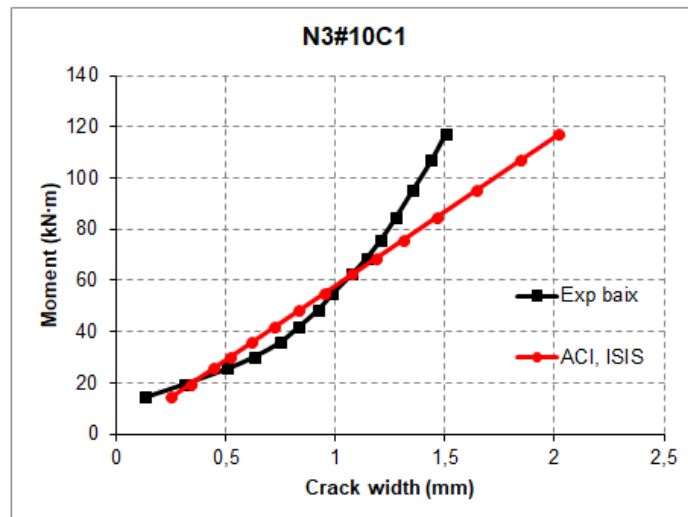


Figura 147. Amplada de fissura màxima de la biga N3#10C1 (El-Nemr *et al.* 2016)

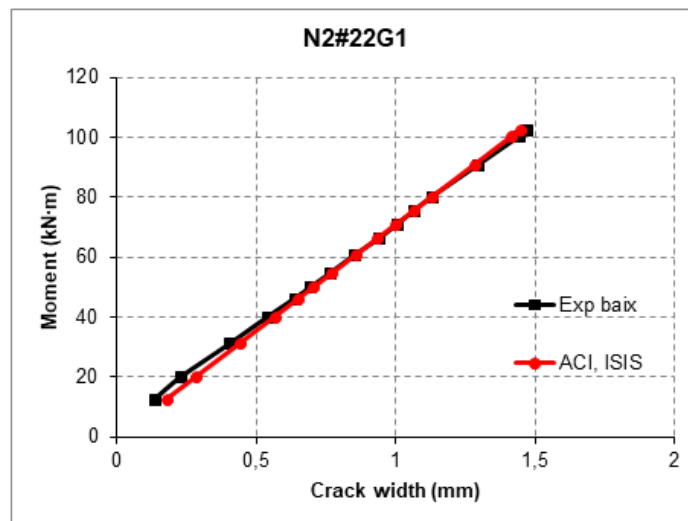


Figura 148. Amplada de fissura màxima de la biga N2#22G1 (El-Nemr *et al.* 2016)

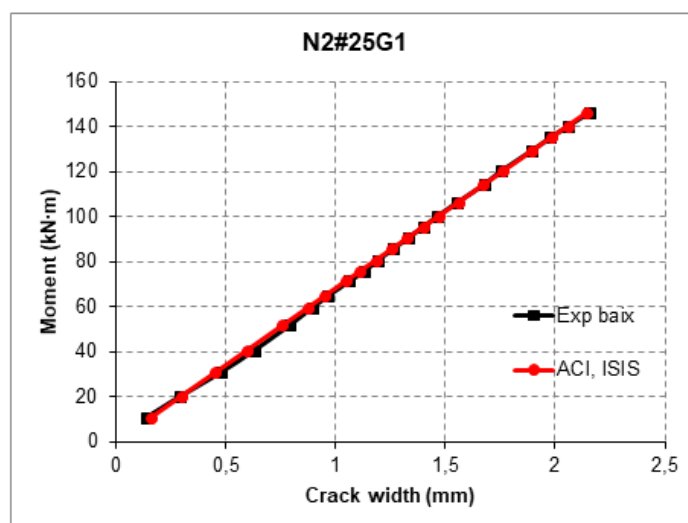


Figura 149. Amplada de fissura màxima de la biga N2#25G1 (El-Nemr *et al.* 2016)

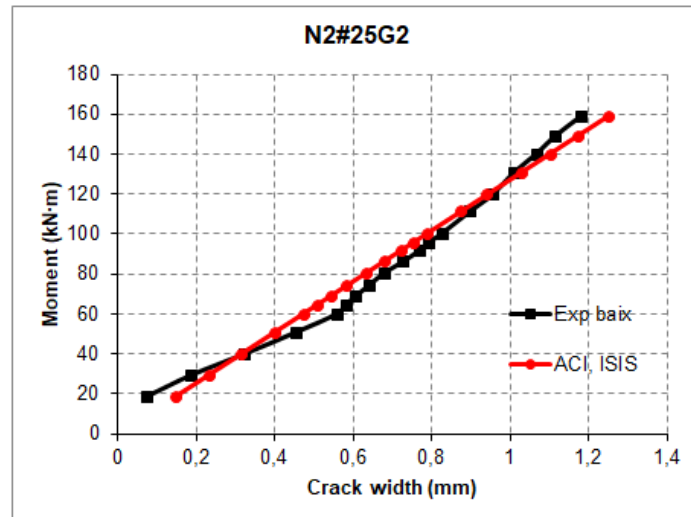


Figura 150. Amplada de fissura màxima de la biga N2#25G2 (El-Nemr *et al.* 2016)

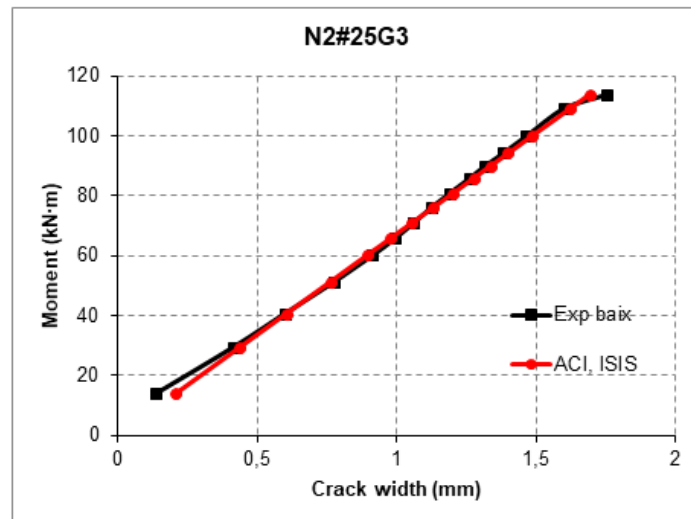


Figura 151. Amplada de fissura màxima de la biga N2#25G3 (El-Nemr *et al.* 2016)

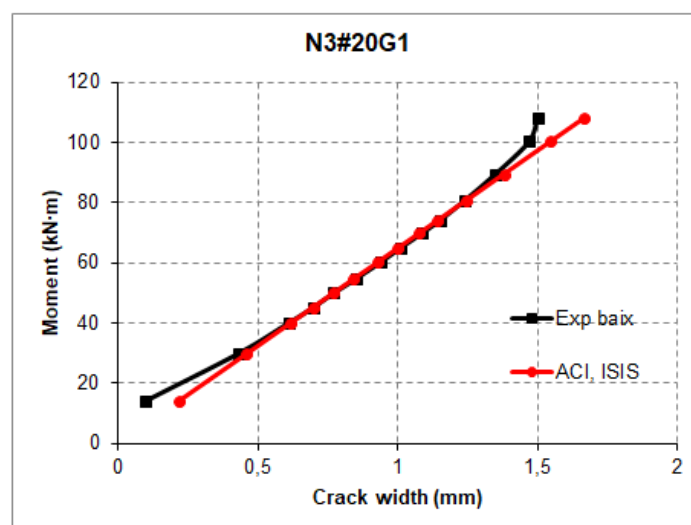


Figura 152. Amplada de fissura màxima de la biga N3#20G1 (El-Nemr *et al.* 2016)

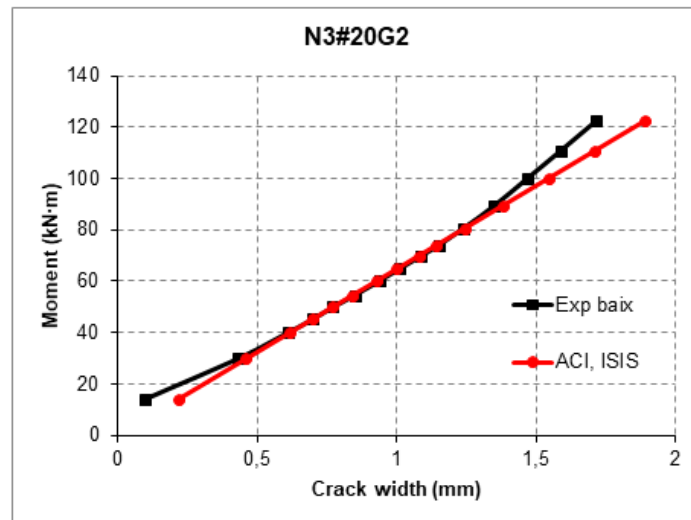


Figura 153. Amplada de fissura màxima de la biga N3#20G2 (El-Nemr *et al.* 2016)

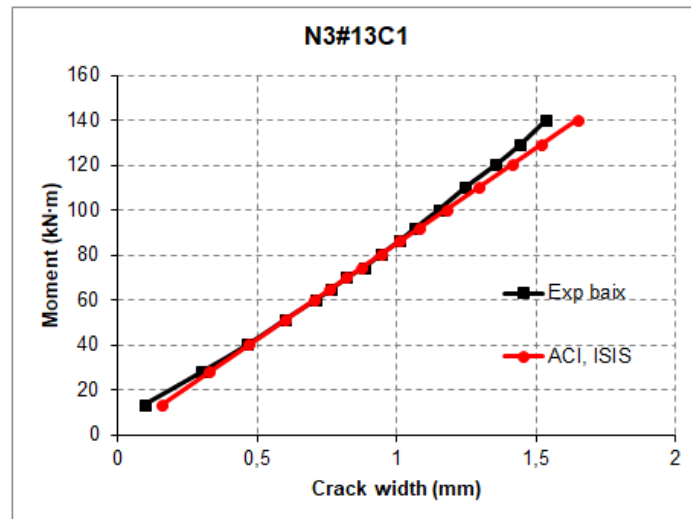


Figura 154. Amplada de fissura màxima de la biga N3#13C1 (El-Nemr *et al.* 2016)

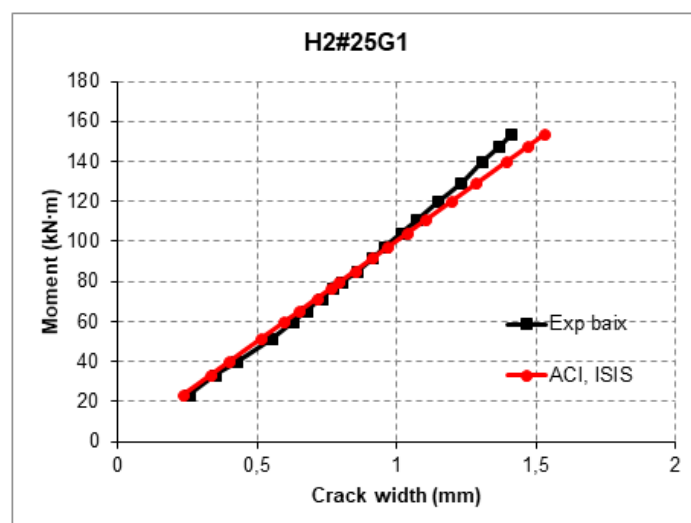


Figura 155. Amplada de fissura màxima de la biga H2#25G1 (El-Nemr *et al.* 2016)

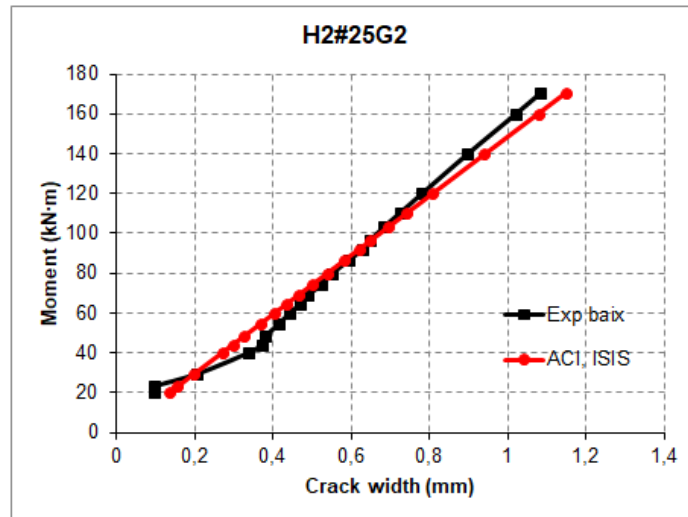


Figura 156. Amplada de fissura màxima de la biga H2#25G2 (El-Nemr *et al.* 2016)

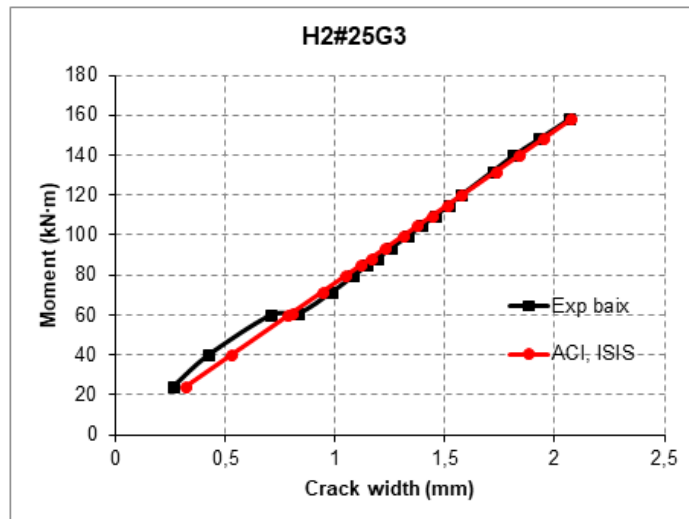


Figura 157. Amplada de fissura màxima de la biga H2#25G3 (El-Nemr *et al.* 2016)

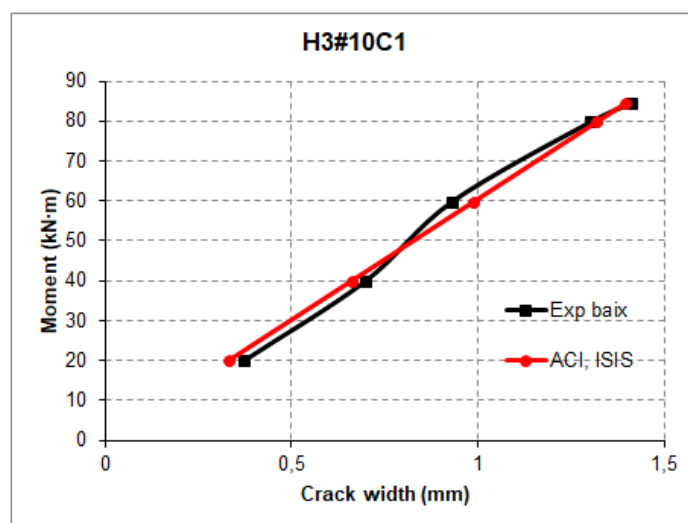


Figura 158. Amplada de fissura màxima de la biga H3#10C1 (El-Nemr *et al.* 2016)

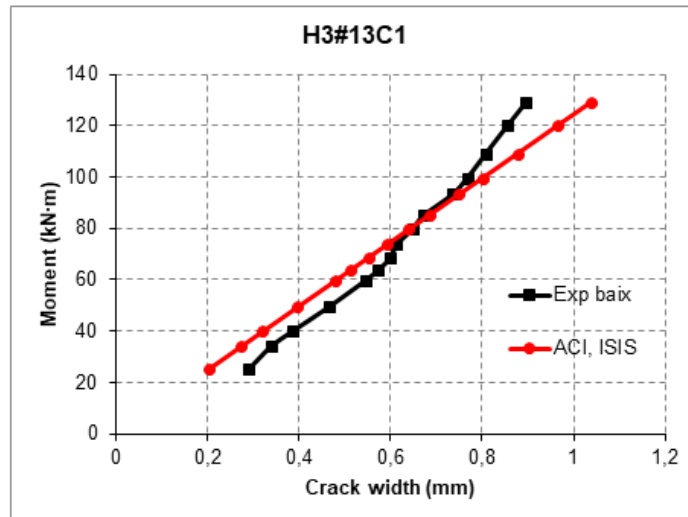


Figura 159. Amplada de fissura màxima de la biga H3#13C1 (El-Nemr *et al.* 2016)

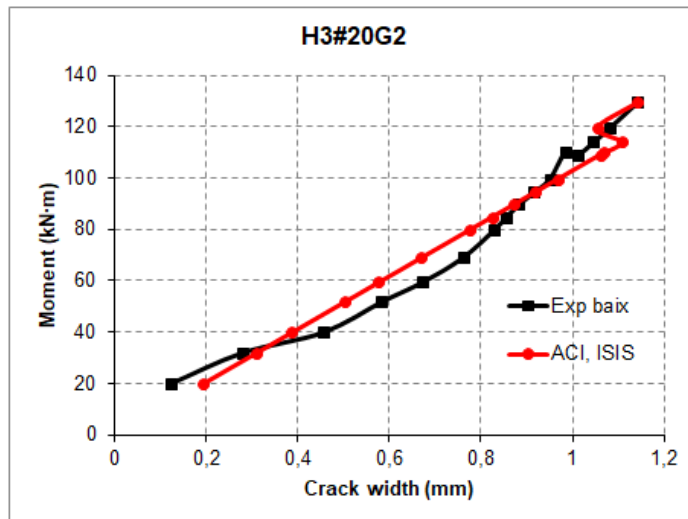


Figura 160. Amplada de fissura màxima de la biga H3#20G2 (El-Nemr *et al.* 2016)

**B.1.10. Gràfics obtinguts per l'article Barris *et al.* 2017**

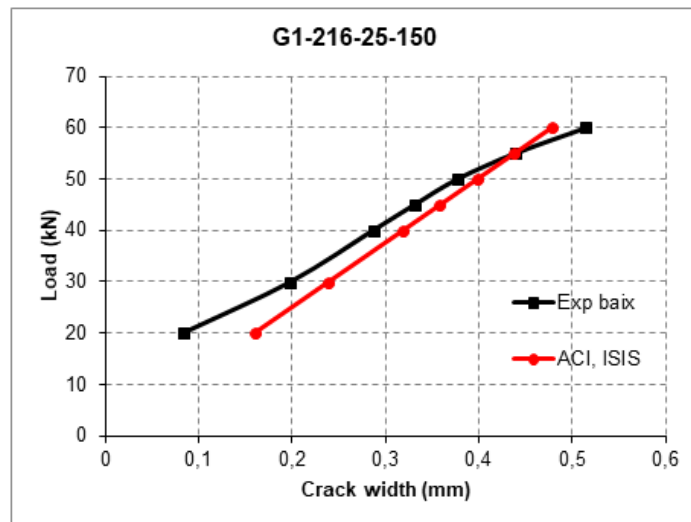


Figura 161. Amplada de fissura màxima de la biga G1-216-25-150 (Barris *et al.* 2017)

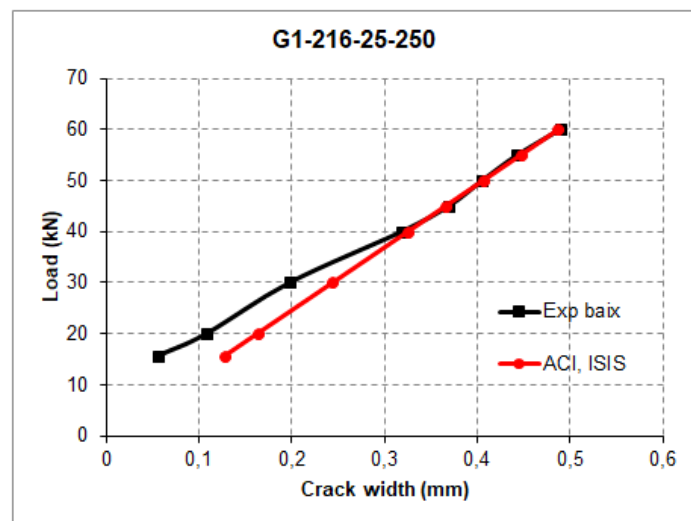


Figura 162. Amplada de fissura màxima de la biga G1-216-25-250 (Barris *et al.* 2017)

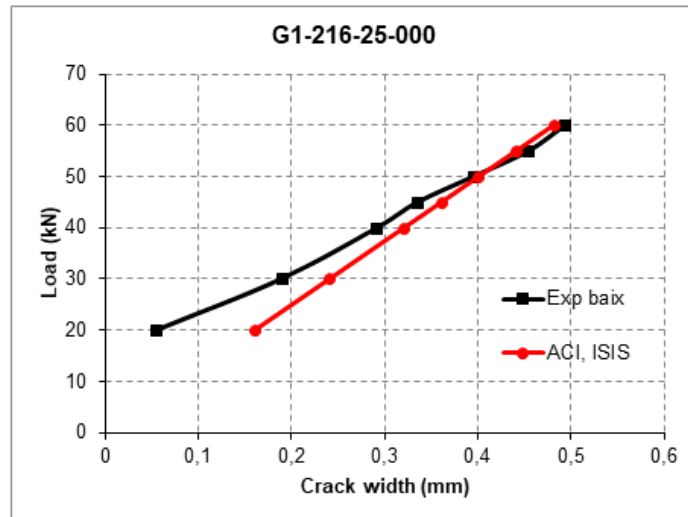


Figura 163. Amplada de fissura màxima de la biga G1-216-25-000 (Barris *et al.* 2017)

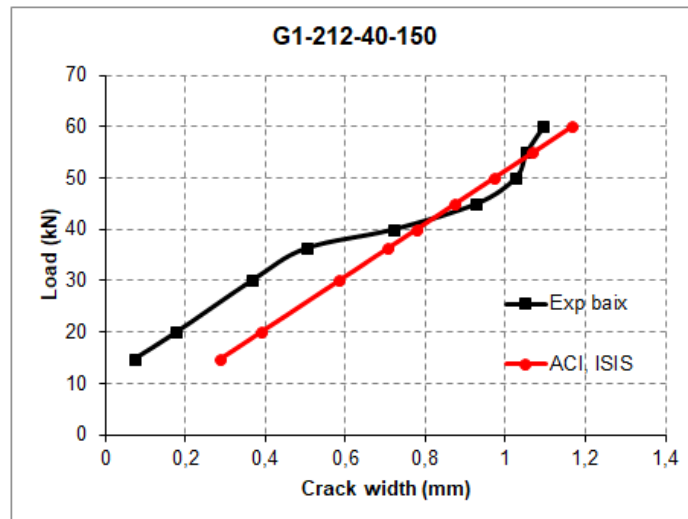


Figura 164. Amplada de fissura màxima de la biga G1-212-40-150 (Barris *et al.* 2017)

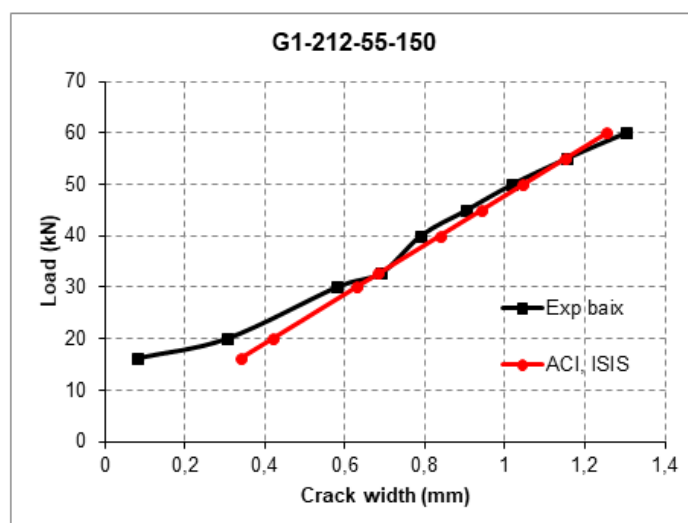


Figura 165. Amplada de fissura màxima de la biga G1-212-55-150 (Barris *et al.* 2017)

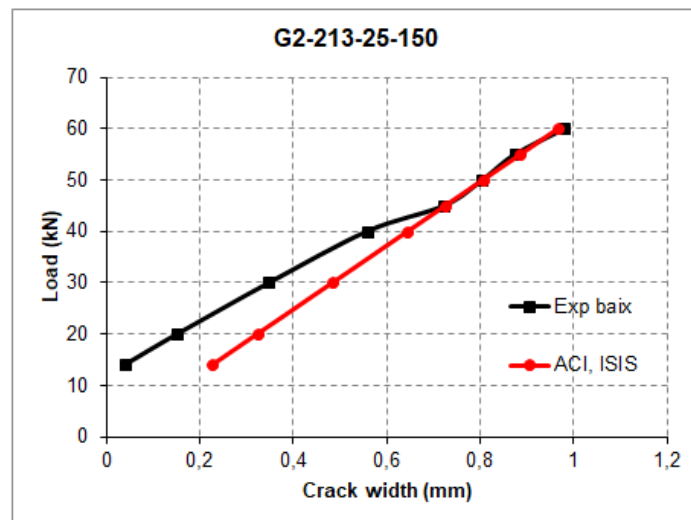


Figura 166. Amplada de fissura màxima de la biga G2-213-25-150 (Barris *et al.* 2017)

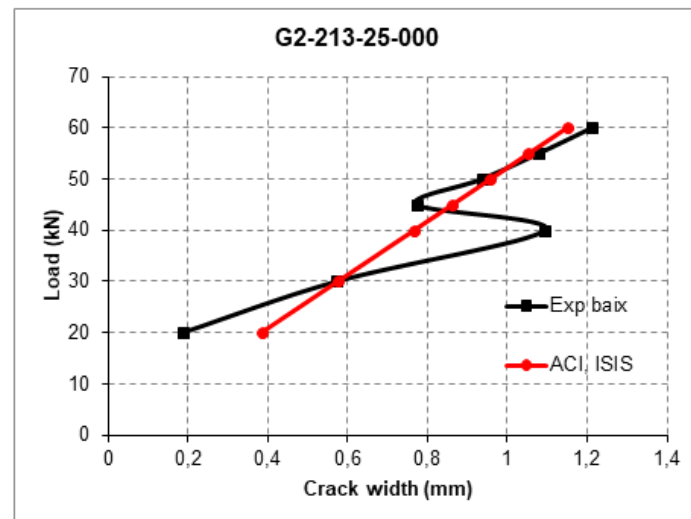


Figura 167. Amplada de fissura màxima de la biga G2-213-25-000 (Barris *et al.* 2017)

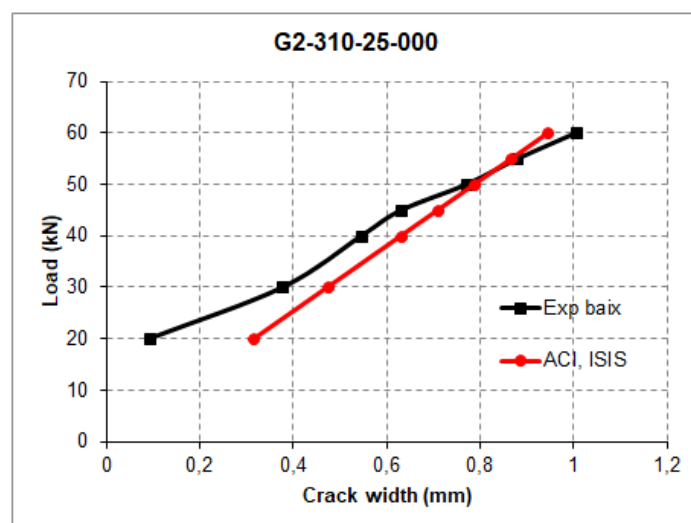


Figura 168. Amplada de fissura màxima de la biga G2-310-25-000 (Barris *et al.* 2017)



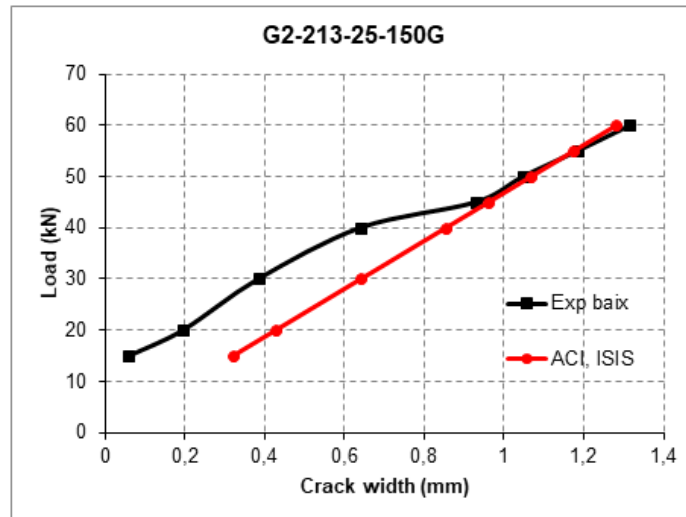


Figura 169. Amplada de fissura màxima de la biga G2-213-25-150G (Barris *et al.* 2017)

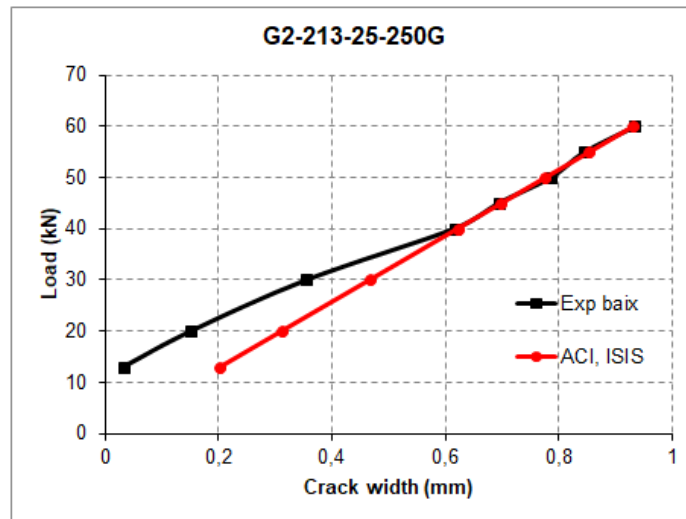


Figura 170. Amplada de fissura màxima de la biga G2-213-25-250G (Barris *et al.* 2017)

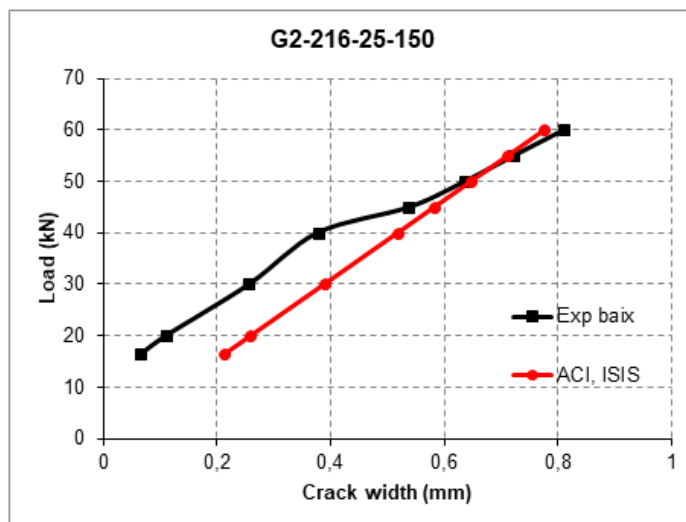


Figura 171. Amplada de fissura màxima de la biga G2-216-25-150 (Barris *et al.* 2017)

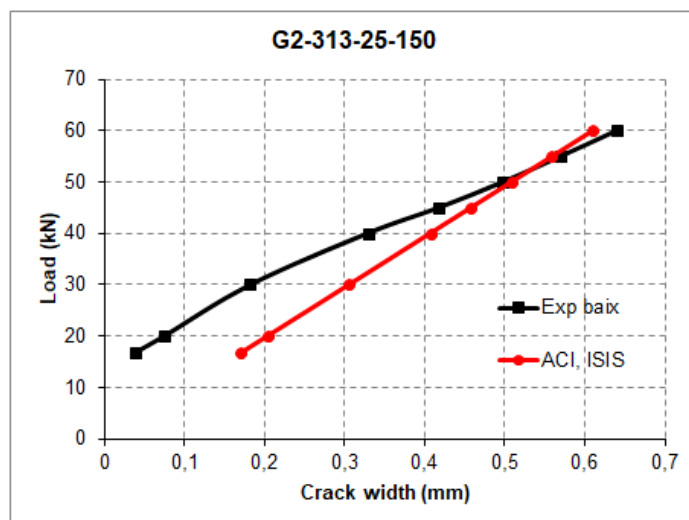


Figura 172. Amplada de fissura màxima de la biga G2-313-25-150 (Barris *et al.* 2017)

## B.2. Resultats obtinguts per a les normatives EC2-92 i EC2-04

En aquest apartat es representen tots els gràfics de resultats per a les normatives EC2-02 i EC2-04, les quals proporcionen amplades de fissura situades a l'alçada del reforç. Amb l'EC2-92 s'ha treballat en tot moment amb amplada de fissura mitjana, mentre que amb l'EC2-04 s'ha treballat tan amb amplada de fissura màxima com amb mitjana.

### B.2.1. Gràfics obtinguts per l'article Pecce *et al.* 2000

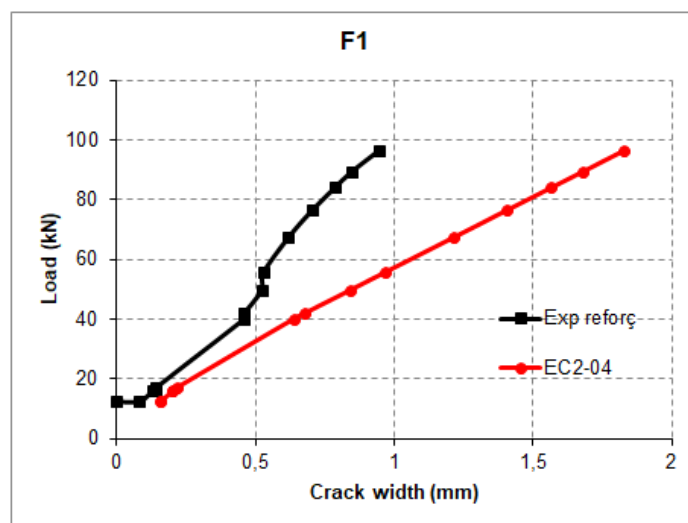


Figura 173. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga F1 (Pecce *et al.* 2000)

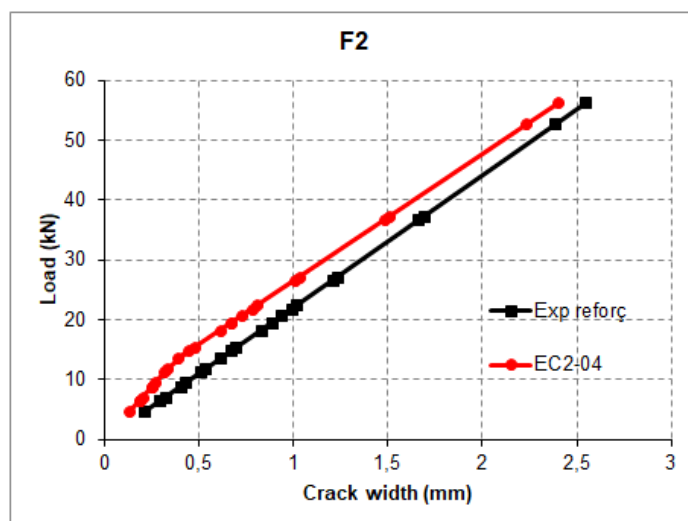


Figura 174. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga F2 (Pecce *et al.* 2000)

**B.2.2. Gràfics obtinguts per l'article Thériault & Benmokrane 2000**

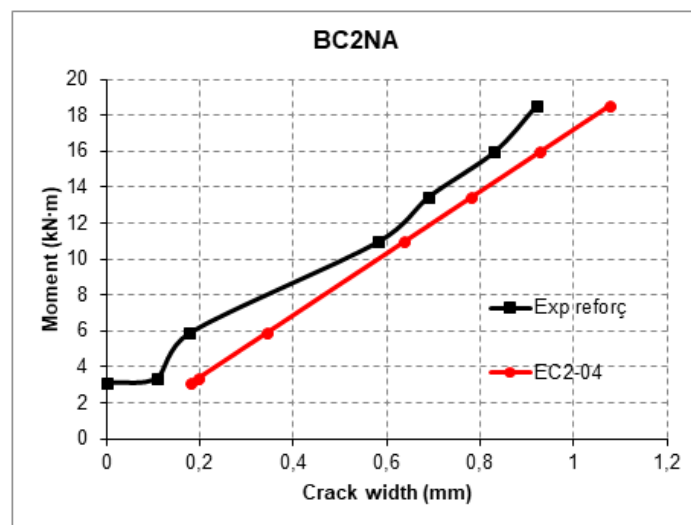


Figura 175. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga BC2NA (Thériault & Benmokrane 2000)

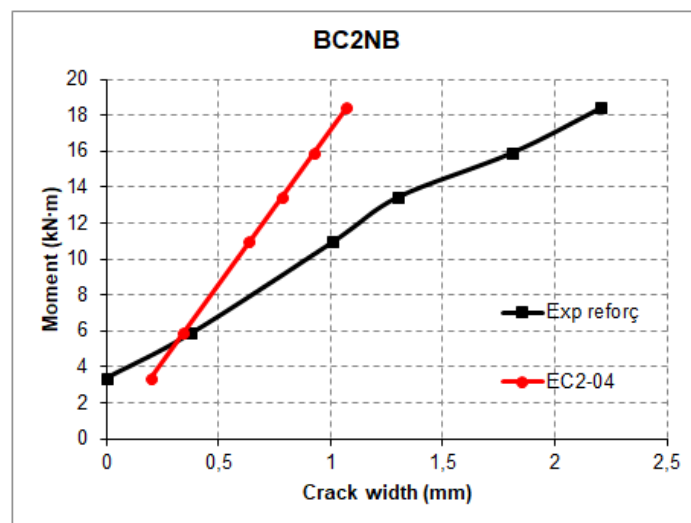


Figura 176. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga BC2NB (Thériault & Benmokrane 2000)

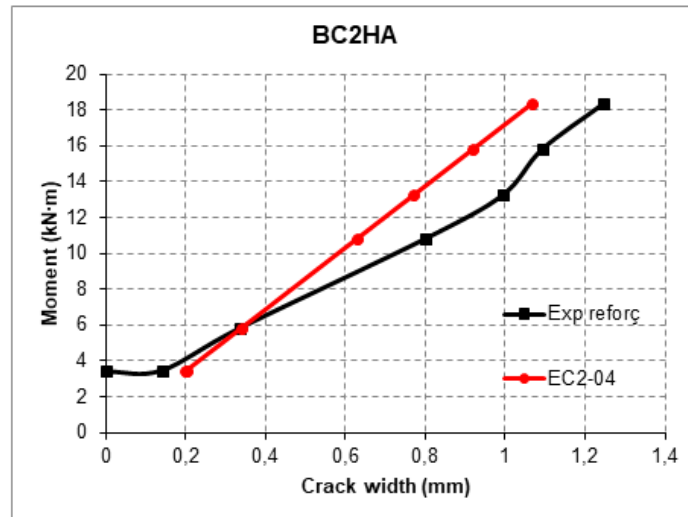


Figura 177. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga BC2HA (Thériault & Benmokrane 2000)

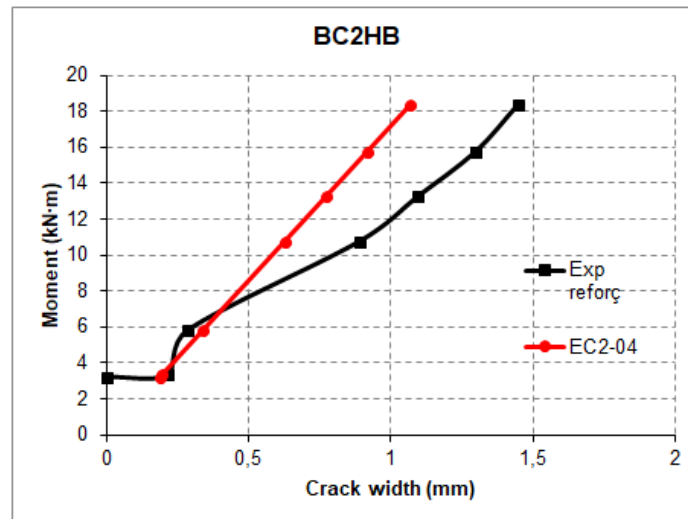


Figura 178. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga BC2HB (Thériault & Benmokrane 2000)

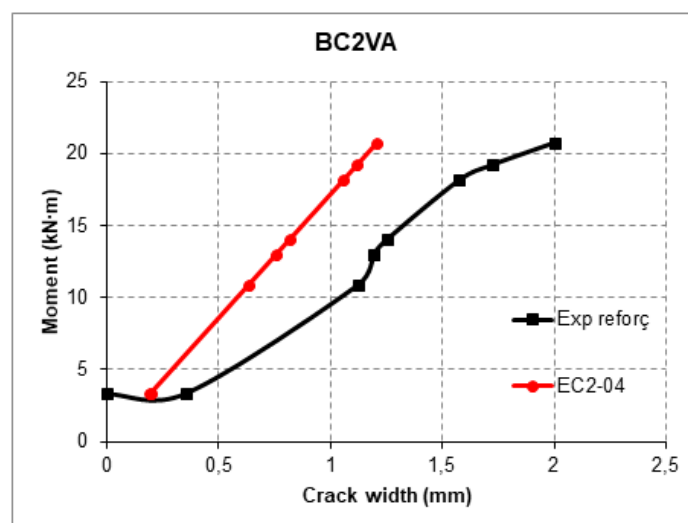


Figura 179. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga BC2VA (Thériault & Benmokrane 2000)

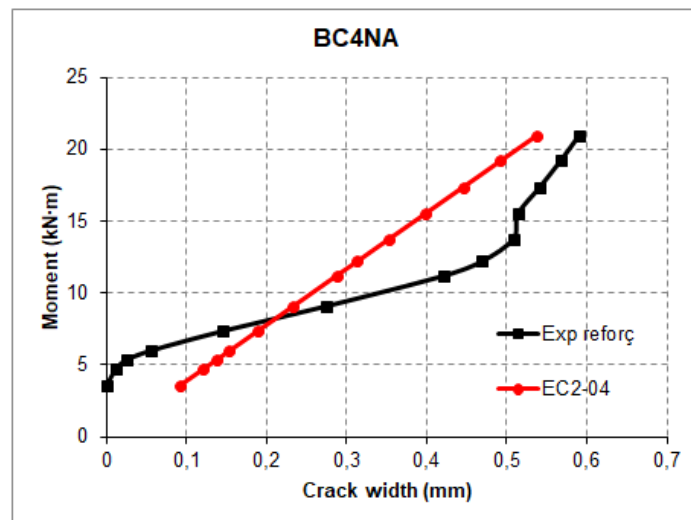


Figura 180. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga BC4NA (Thériault & Benmokrane 2000)

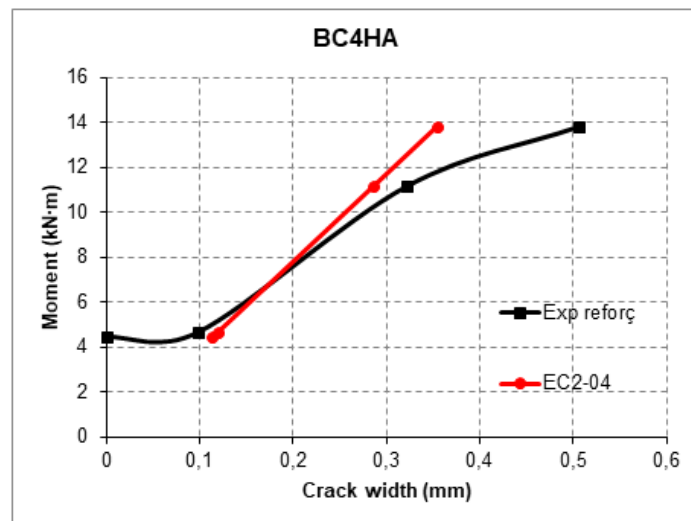


Figura 181. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga BC4HA (Thériault & Benmokrane 2000)

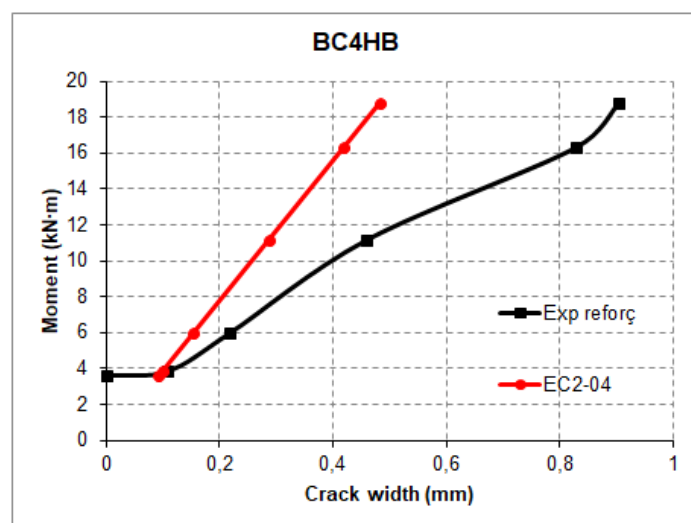


Figura 182. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga BC4HB (Thériault & Benmokrane 2000)

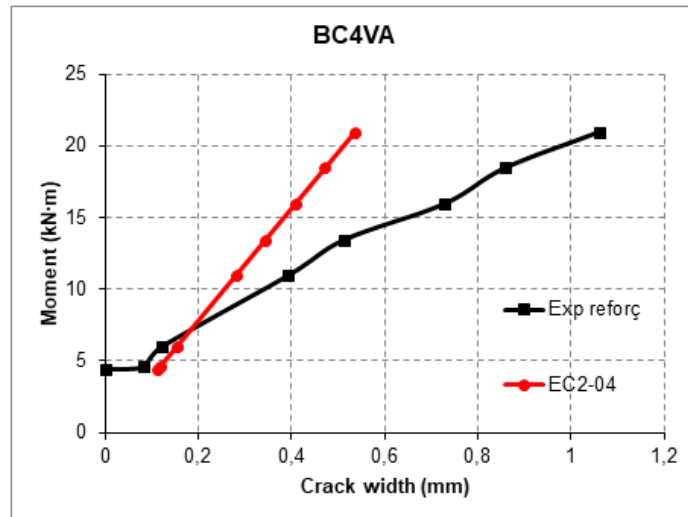


Figura 183. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga BC4VA (Thériault & Benmokrane 2000)

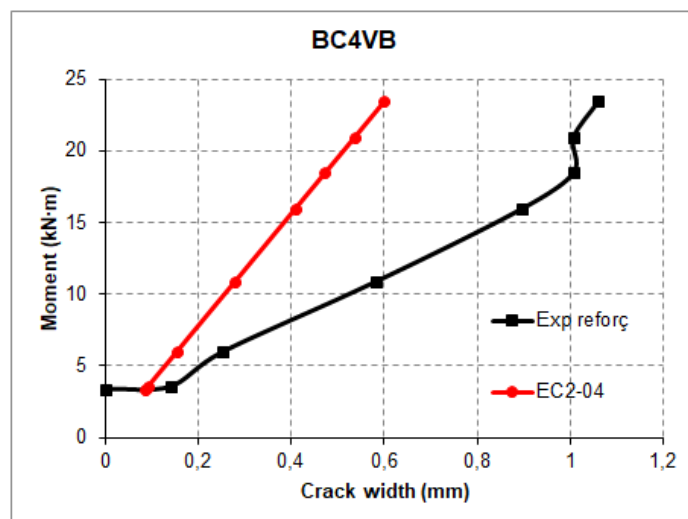


Figura 184. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga BC4VB (Thériault & Benmokrane 2000)

### B.2.3. Gràfics obtinguts per l'article Lee *et al.* 2010

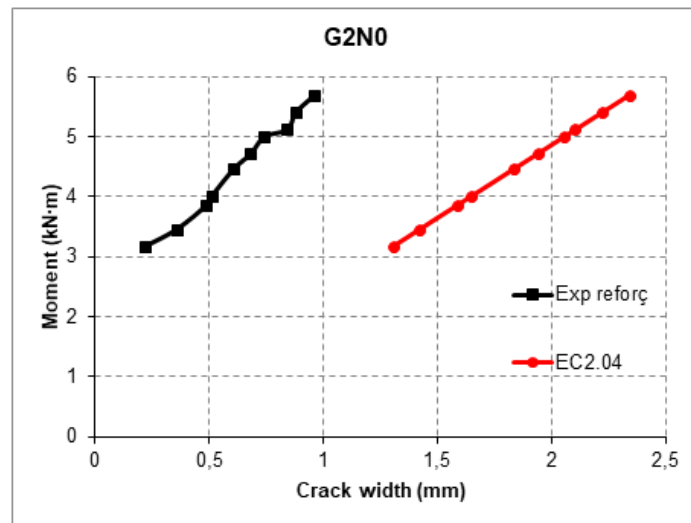


Figura 185. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G2N0 (Lee *et al.* 2010)

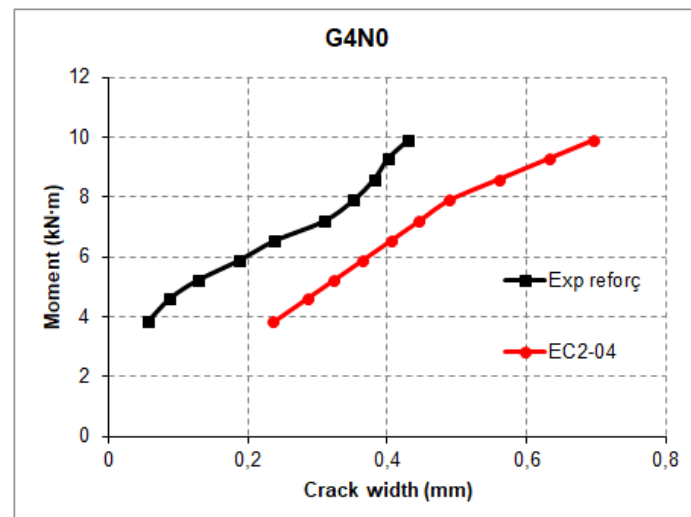


Figura 186. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G4N0 (Lee *et al.* 2010)

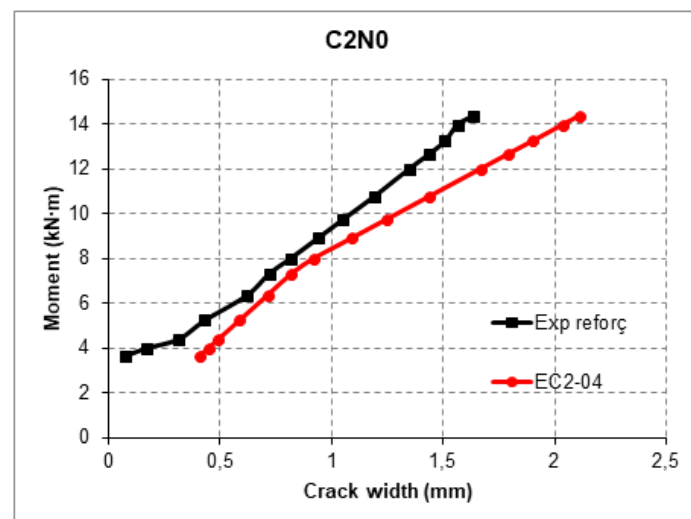


Figura 187. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga C2N0 (Lee *et al.* 2010)



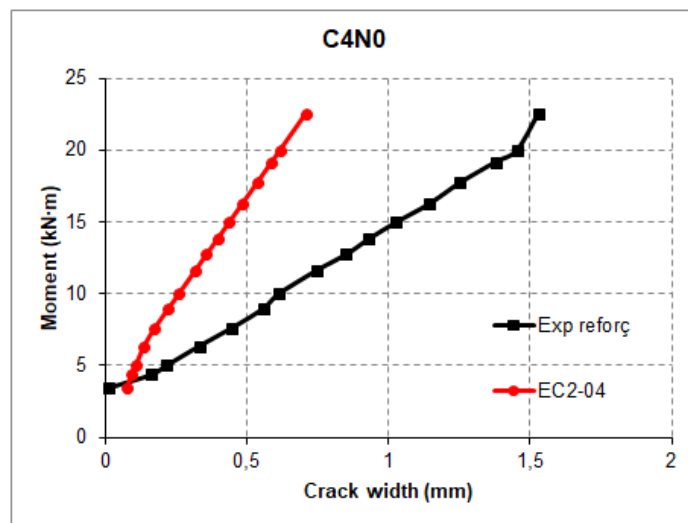


Figura 188. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga C4N0 (Lee *et al.* 2010)

#### B.2.4. Gràfics obtinguts per l'article Kassem *et al.* 2011

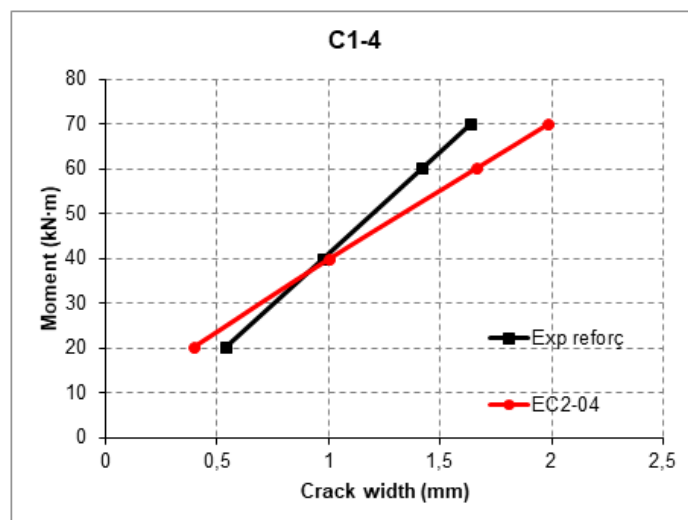


Figura 189. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga C1-4 (Kassem *et al.* 2011)

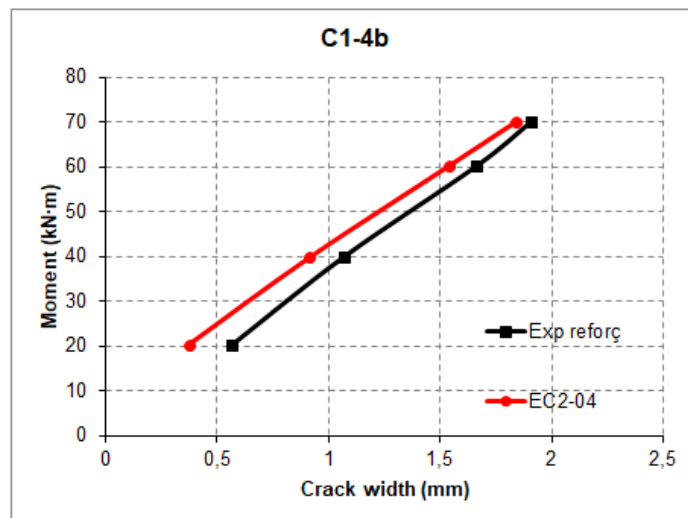


Figura 190. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga C1-4b (Kassem *et al.* 2011)

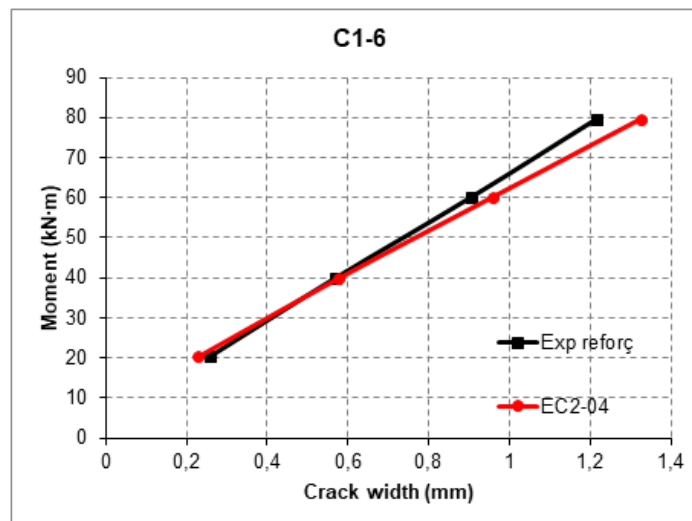


Figura 191. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga C1-6 (Kassem *et al.* 2011)

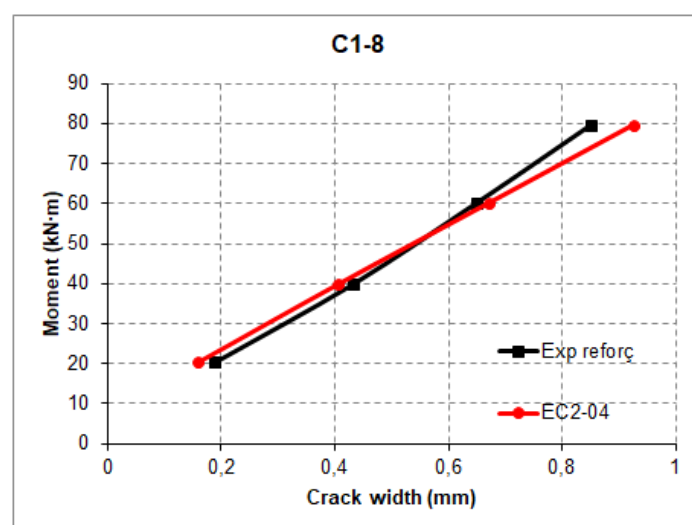


Figura 192. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga C1-8 (Kassem *et al.* 2011)

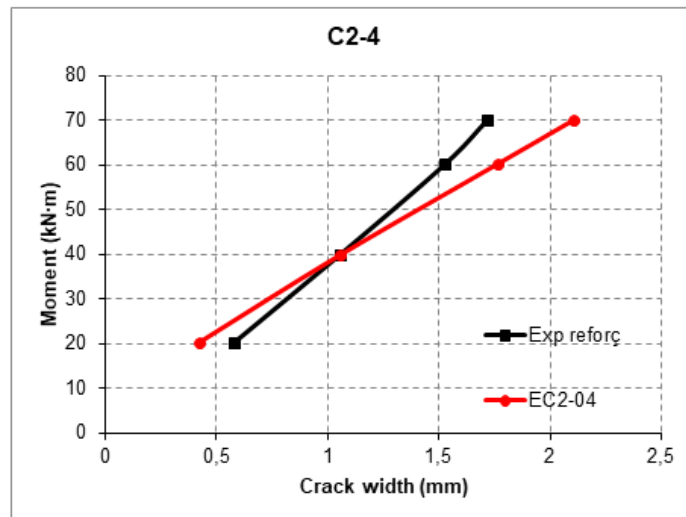


Figura 193. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga C2-4 (Kassem *et al.* 2011)

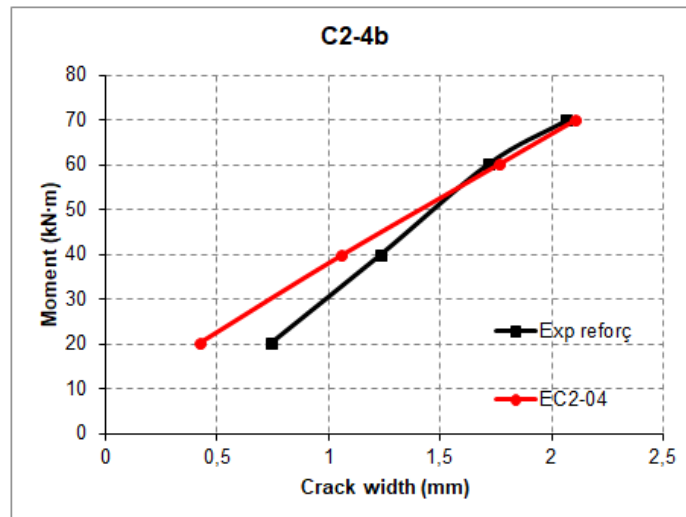


Figura 194. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga C2-4b (Kassem *et al.* 2011)

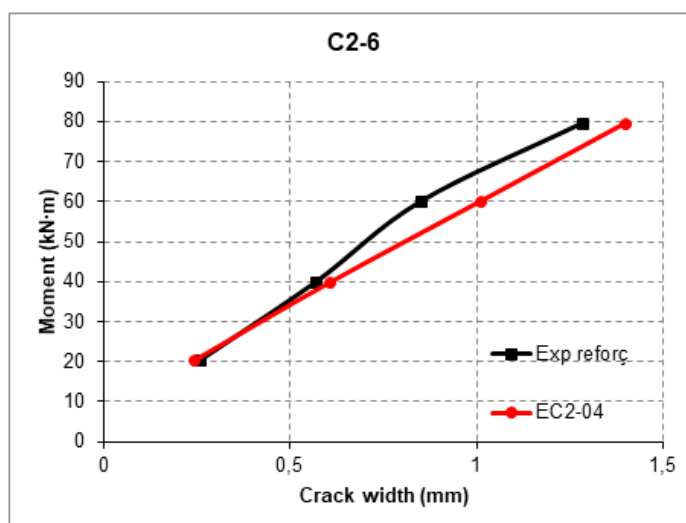


Figura 195. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga C2-6 (Kassem *et al.* 2011)

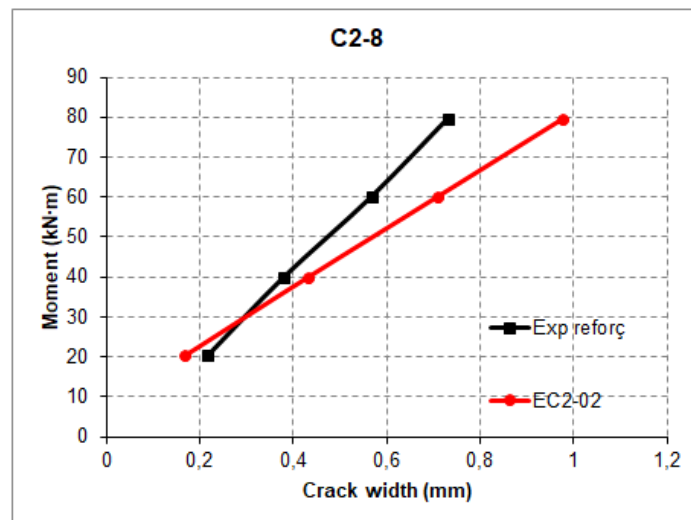


Figura 196. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga C2-8 (Kassem *et al.* 2011)

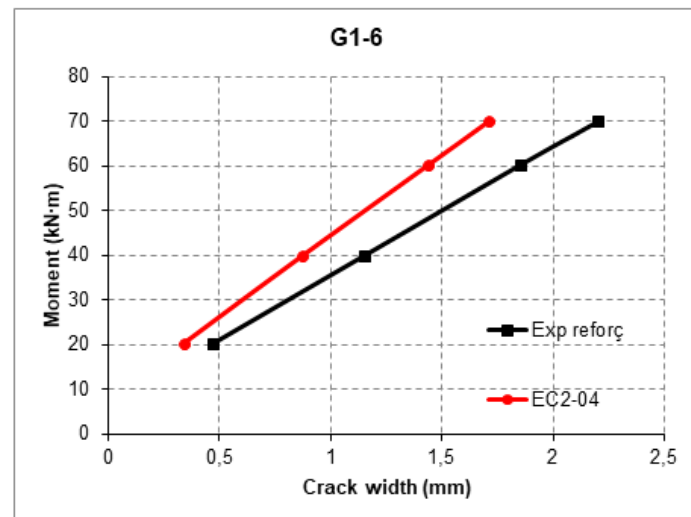


Figura 197. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G1-6 (Kassem *et al.* 2011)

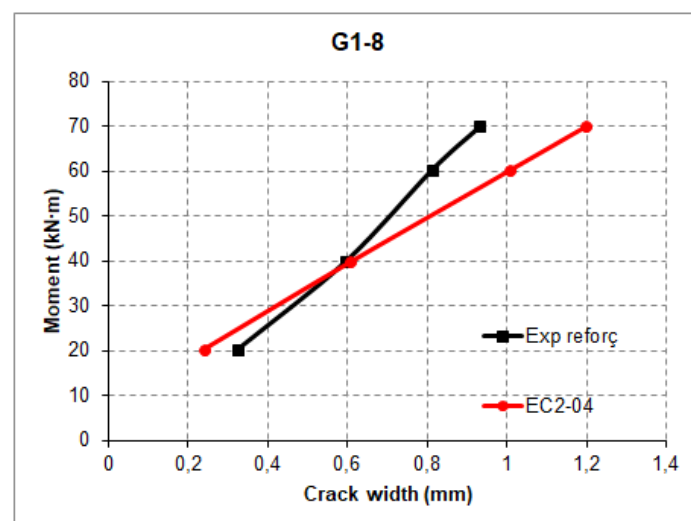


Figura 198. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G1-8 (Kassem *et al.* 2011)

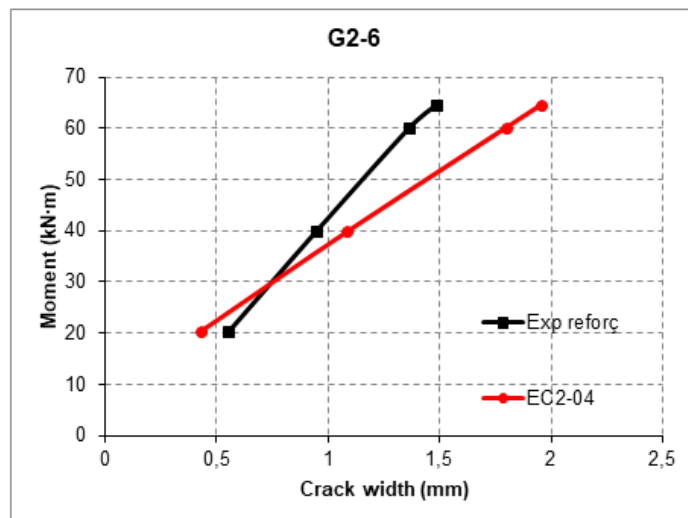


Figura 199. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G2-6 (Kassem *et al.* 2011)

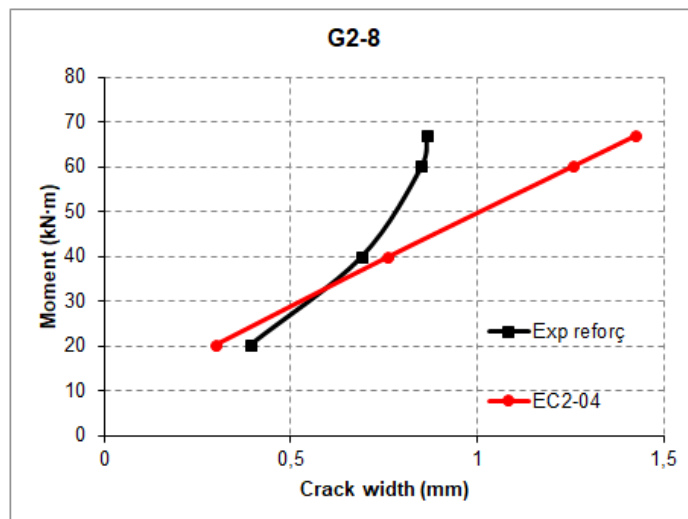


Figura 200. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G2-8 (Kassem *et al.* 2011)

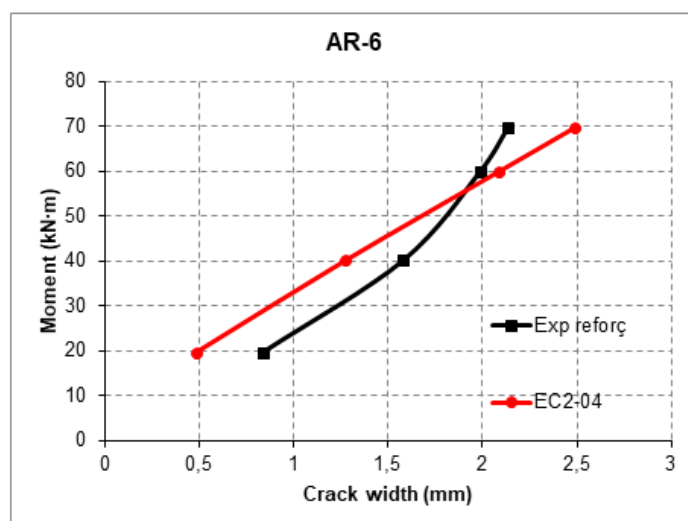


Figura 201. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga AR-6 (Kassem *et al.* 2011)

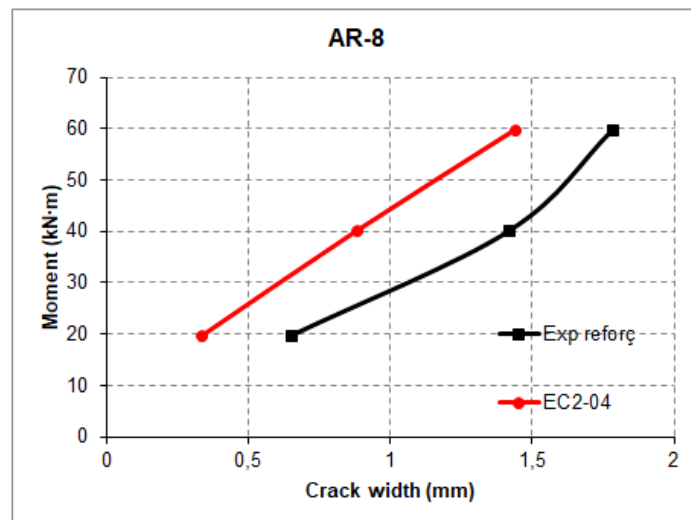


Figura 202. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga AR-8 (Kassem *et al.* 2011)

#### B.2.5. Gràfics obtinguts per l'article Barris *et al.* 2013

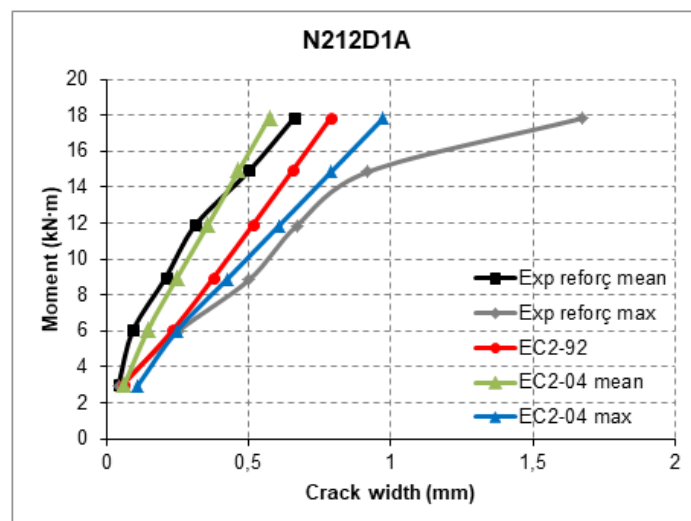


Figura 203. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N212D1A (Barris *et al.* 2013)

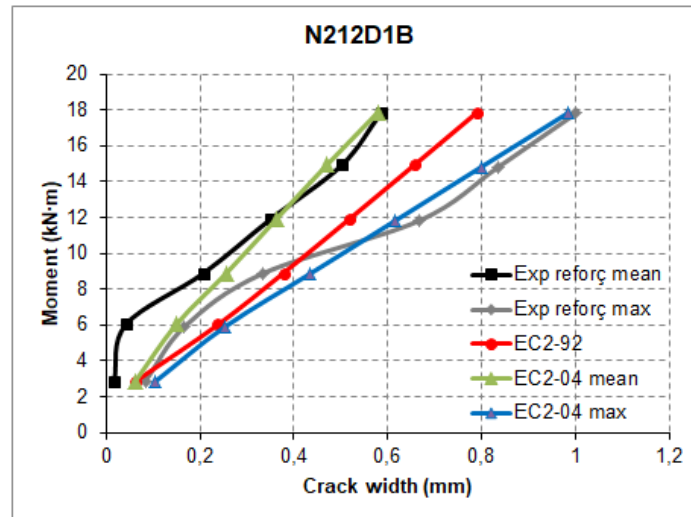


Figura 204. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N212D1B (Barris *et al.* 2013)

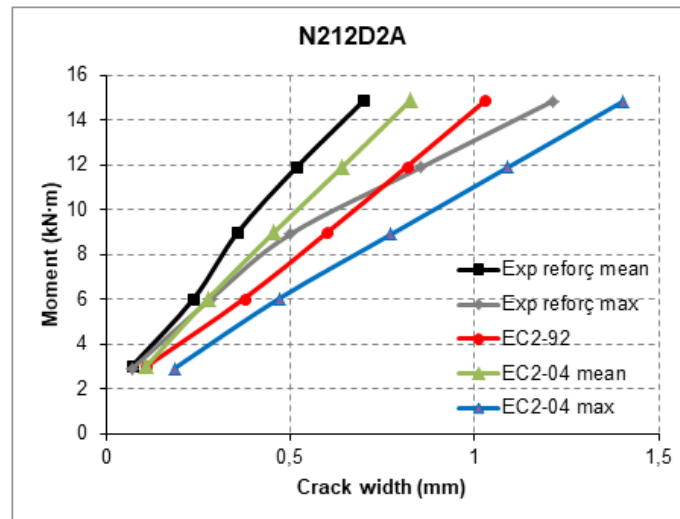


Figura 205. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N212D2A (Barris *et al.* 2013)

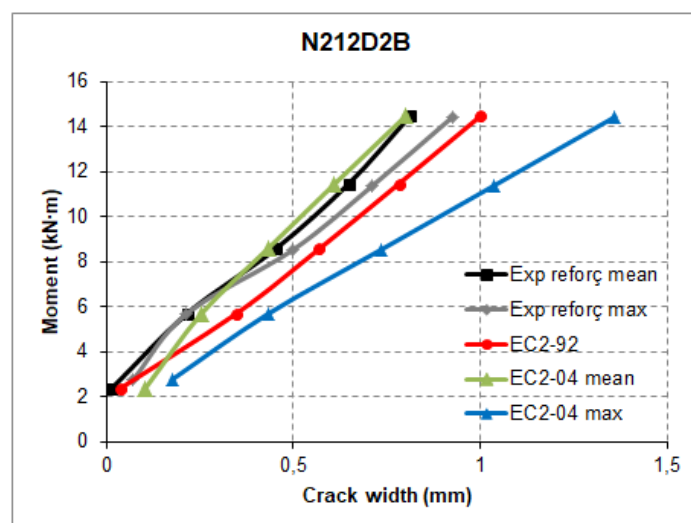


Figura 206. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N212D2B (Barris *et al.* 2013)

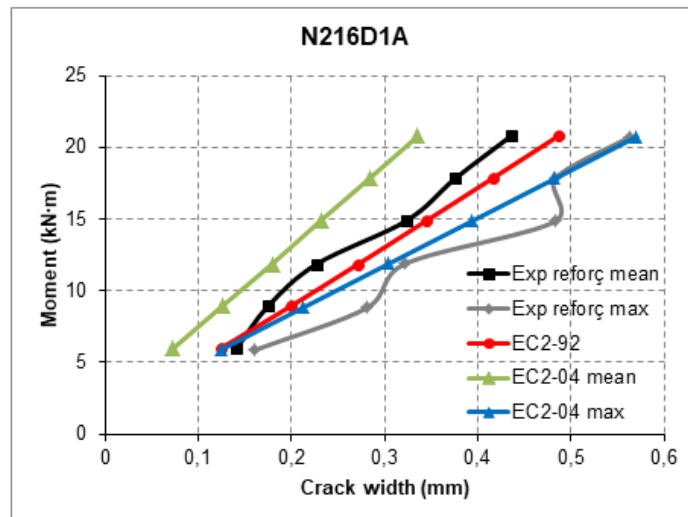


Figura 207. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N216D1A (Barris *et al.* 2013)

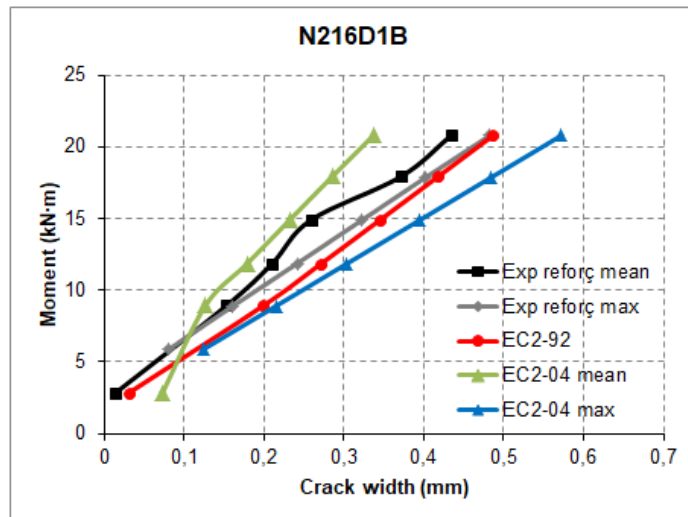


Figura 208. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N216D1B (Barris *et al.* 2013)

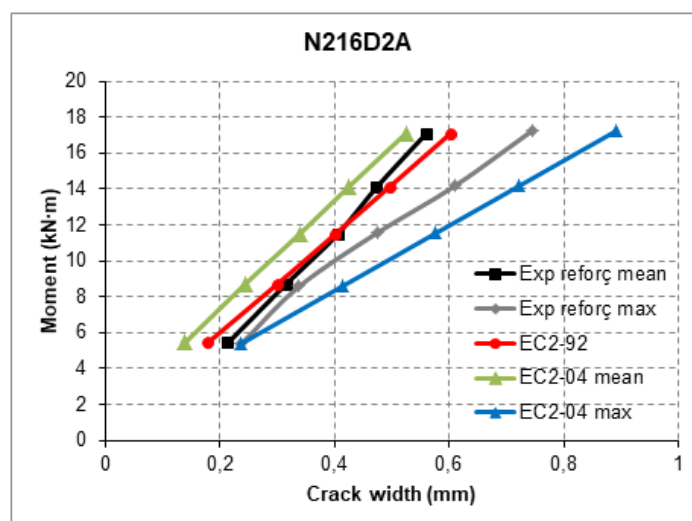


Figura 209. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N216D2A (Barris *et al.* 2013)



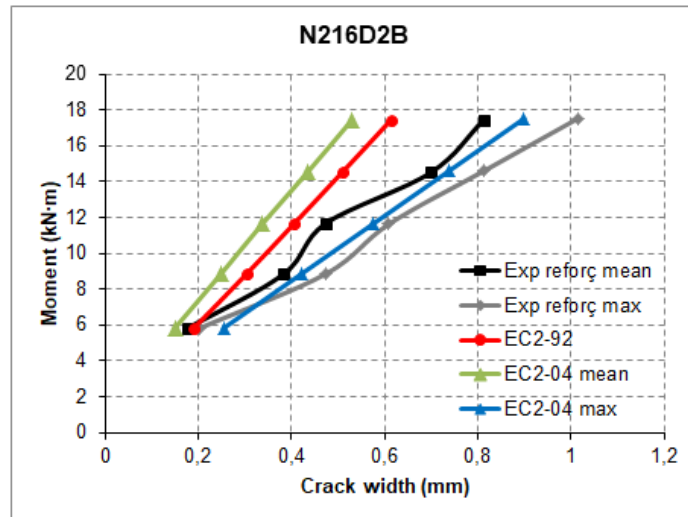


Figura 210. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N216D2B (Barris *et al.* 2013)

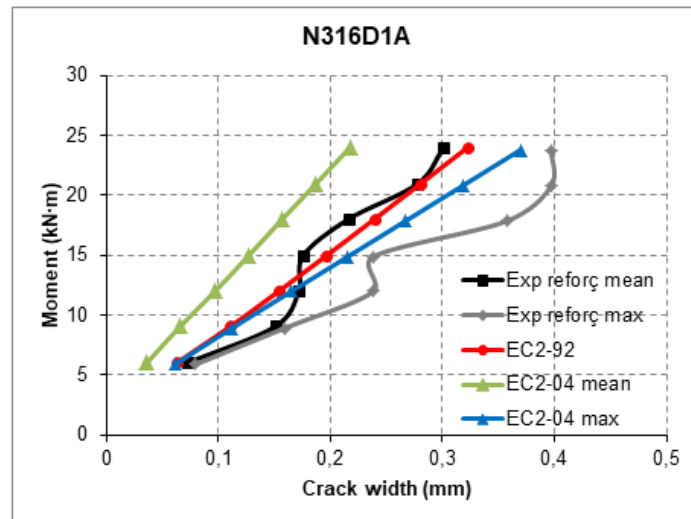


Figura 211. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N316D1A (Barris *et al.* 2013)

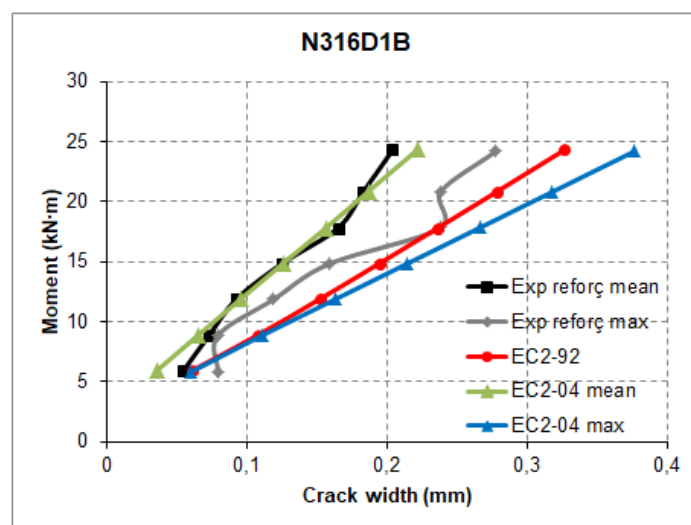


Figura 212. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N316D1B (Barris *et al.* 2013)

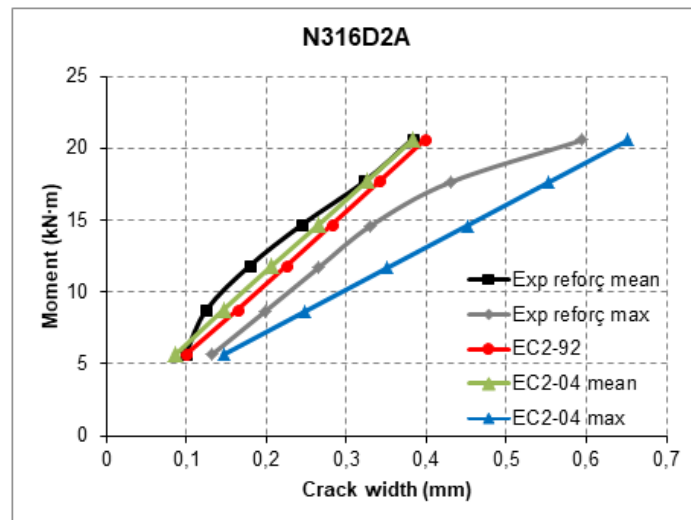


Figura 213. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N316D2A (Barris *et al.* 2013)

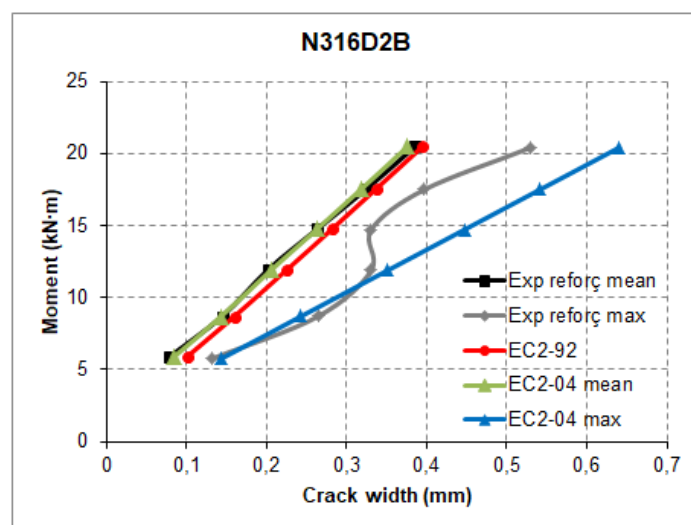


Figura 214. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N316D2B (Barris *et al.* 2013)

**B.2.6. Gràfics obtinguts per l'article Noël & Soudki 2014**

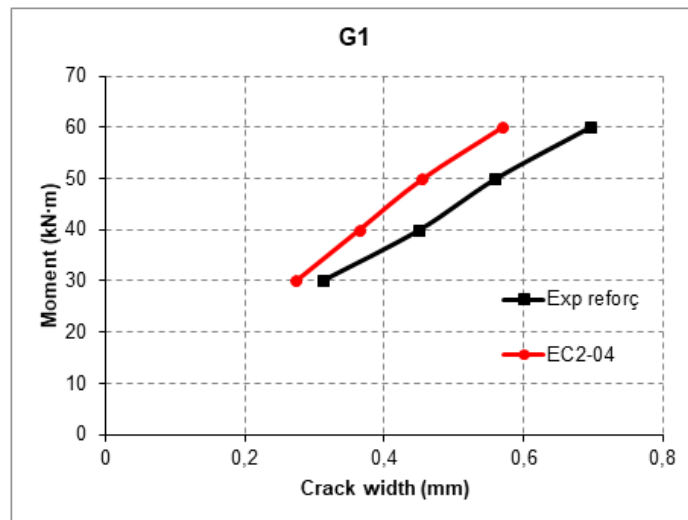


Figura 215. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G1 (Noël & Soudki 2014)

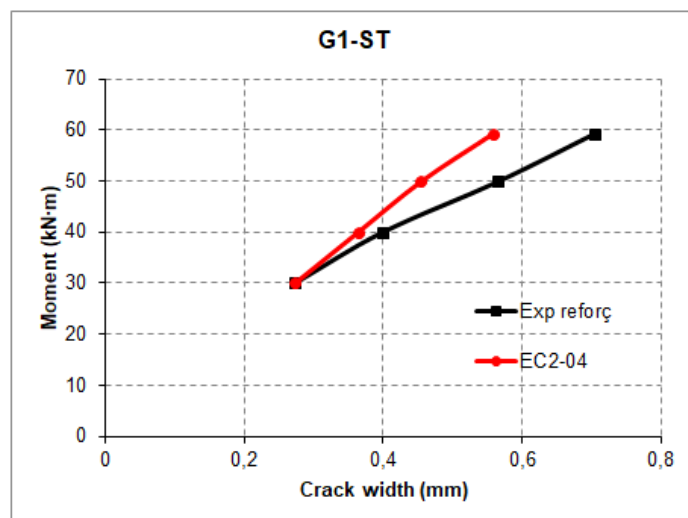


Figura 216. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G1-ST (Noël & Soudki 2014)

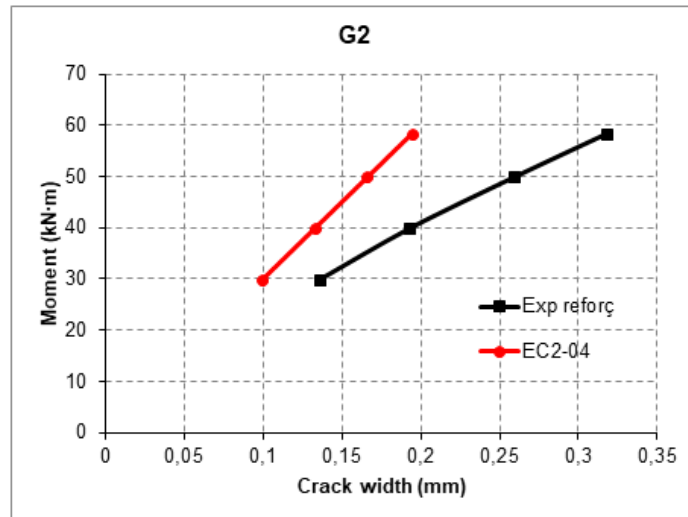


Figura 217. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G2 (Noël & Soudki 2014)

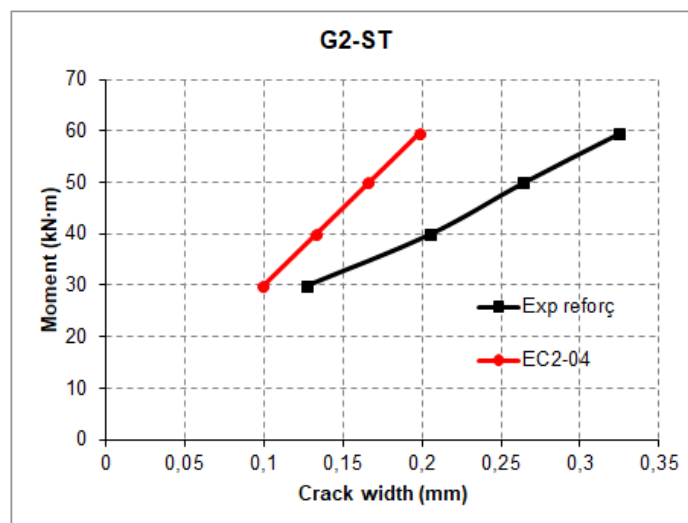


Figura 218. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G2-ST (Noël & Soudki 2014)

**B.2.7. Gràfics obtinguts per l'article Mias *et al.* 2015**

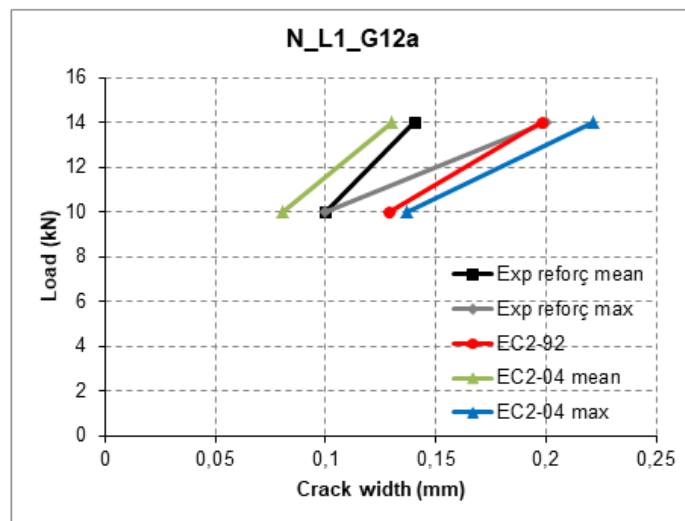


Figura 219. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N\_L1\_G12a (Mias *et al.* 2015)

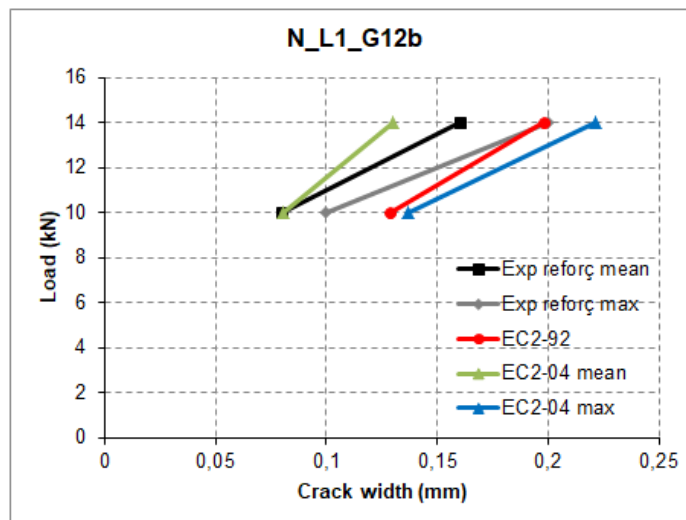


Figura 220. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N\_L1\_G12b (Mias *et al.* 2015)

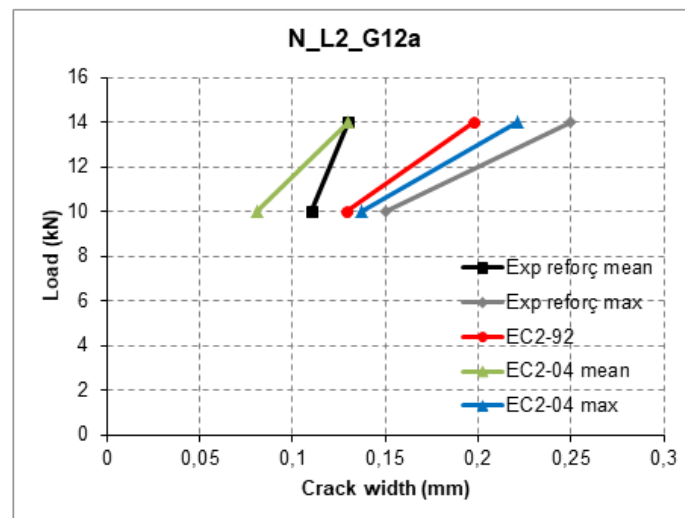


Figura 221. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N\_L2\_G12a (Mias *et al.* 2015)

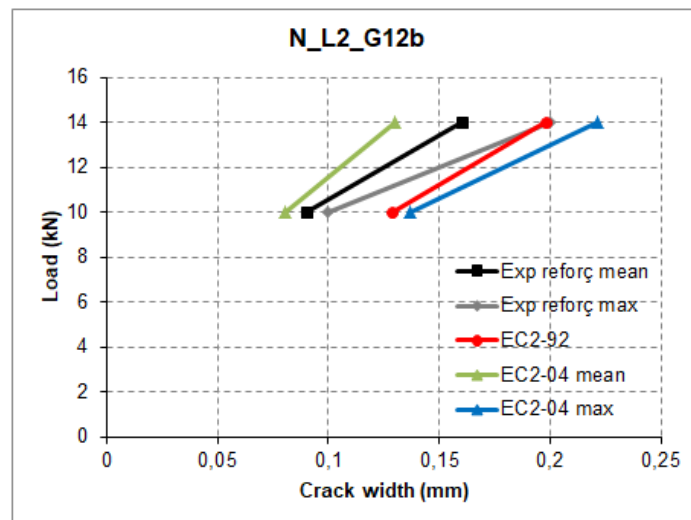


Figura 222. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N\_L2\_G12b (Mias *et al.* 2015)

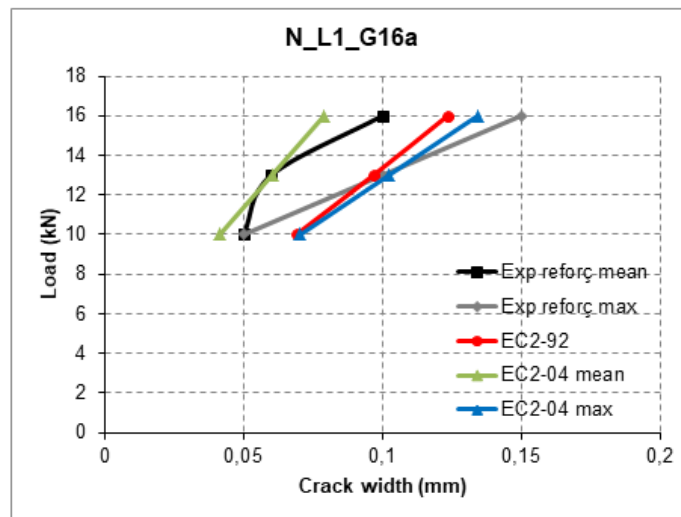


Figura 223. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N\_L1\_G16a (Mias *et al.* 2015)

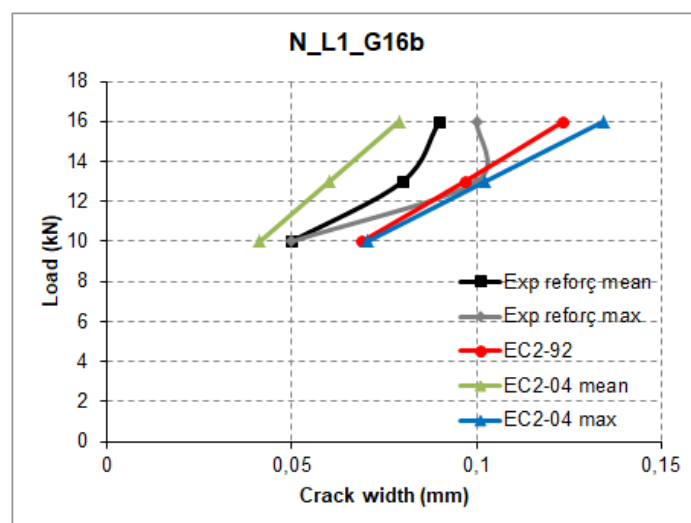


Figura 224. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N\_L1\_G16b (Mias *et al.* 2015)

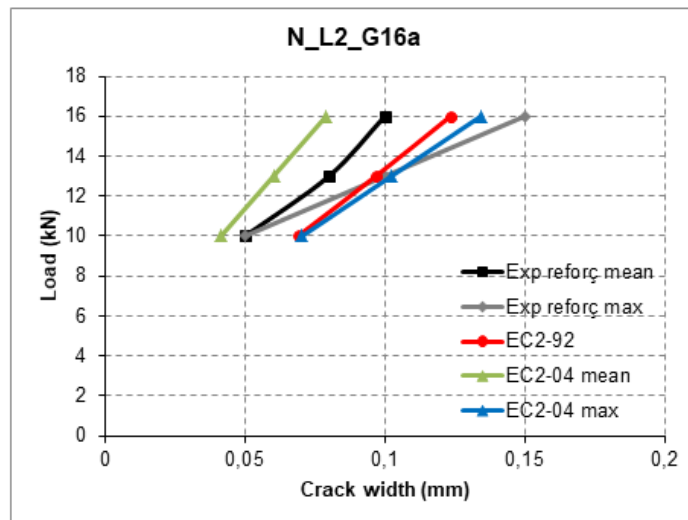


Figura 225. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N\_L2\_G16a (Mias *et al.* 2015)

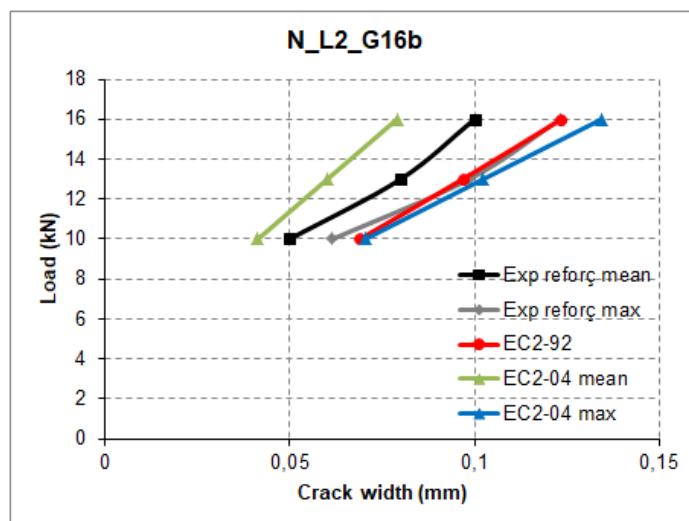


Figura 226. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N\_L2\_G16b (Mias *et al.* 2015)

**B.2.8. Gràfics obtinguts per l'article Adam *et al.* 2015**

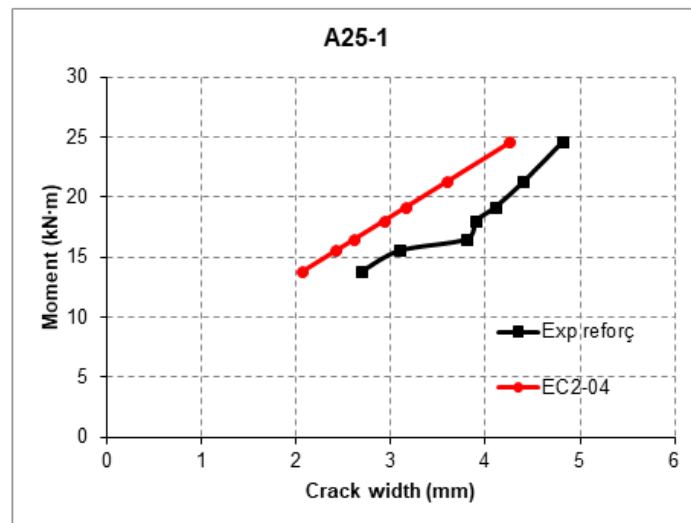


Figura 227. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga A25-1 (Adam *et al.* 2015)

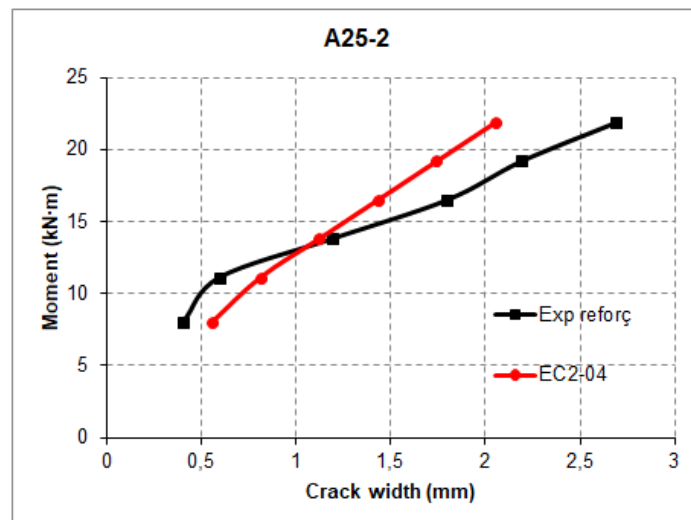


Figura 228. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga A25-2 (Adam *et al.* 2015)

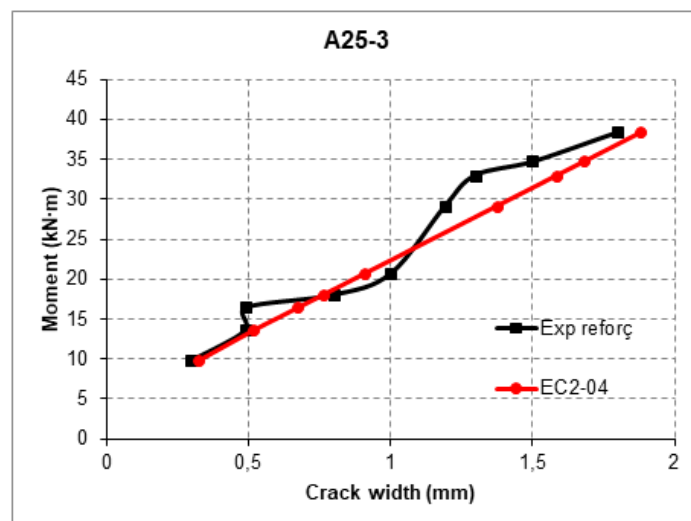


Figura 229. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga A25-3 (Adam *et al.* 2015)



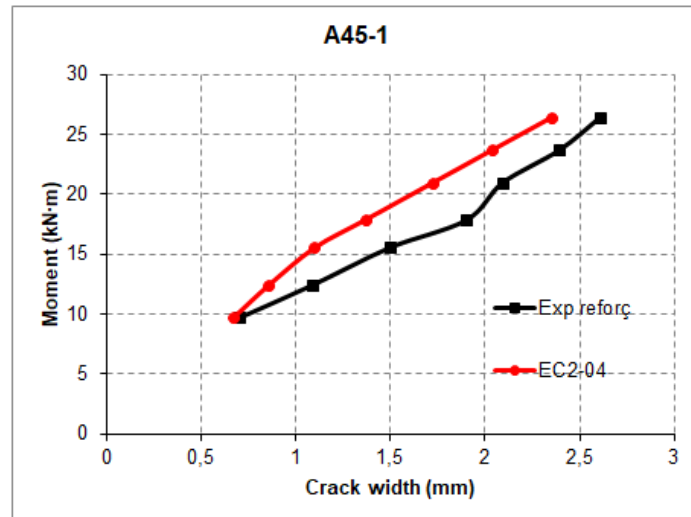


Figura 230. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga A45-1 (Adam *et al.* 2015)

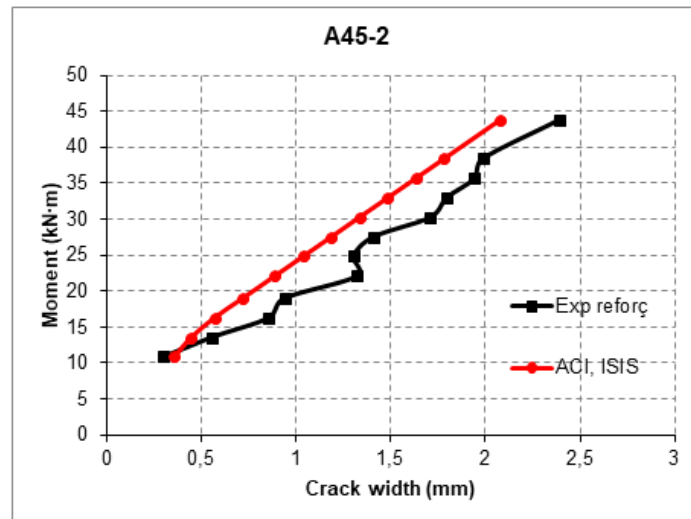


Figura 231. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga A45-2 (Adam *et al.* 2015)

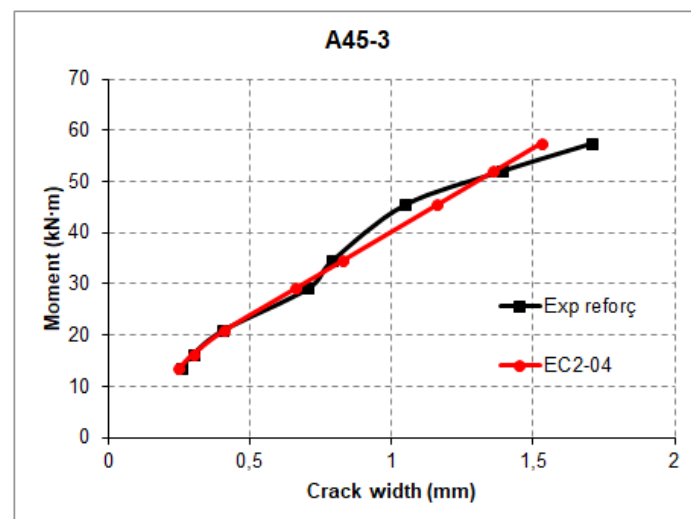


Figura 232. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga A45-3 (Adam *et al.* 2015)

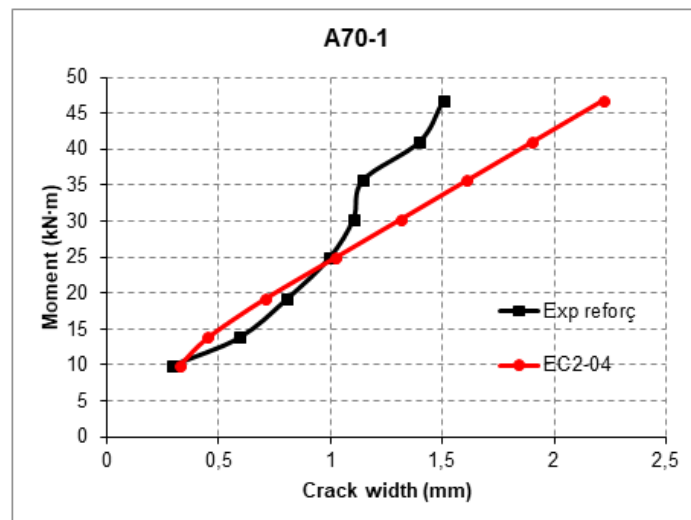


Figura 233. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga A70-1 (Adam *et al.* 2015)

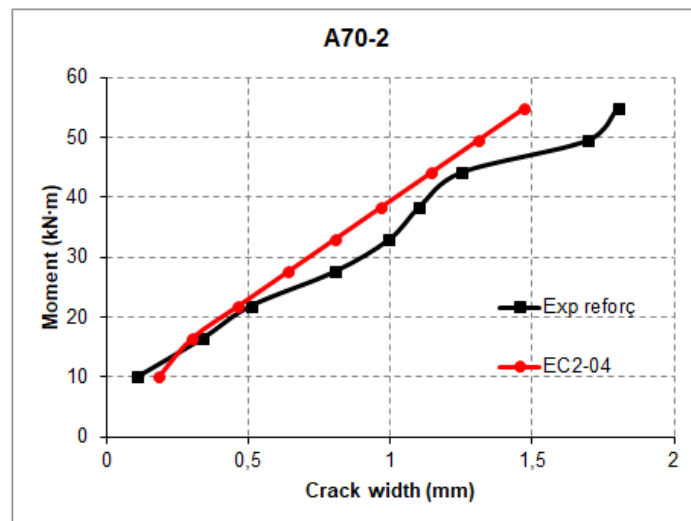


Figura 234. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga A70-2 (Adam *et al.* 2015)

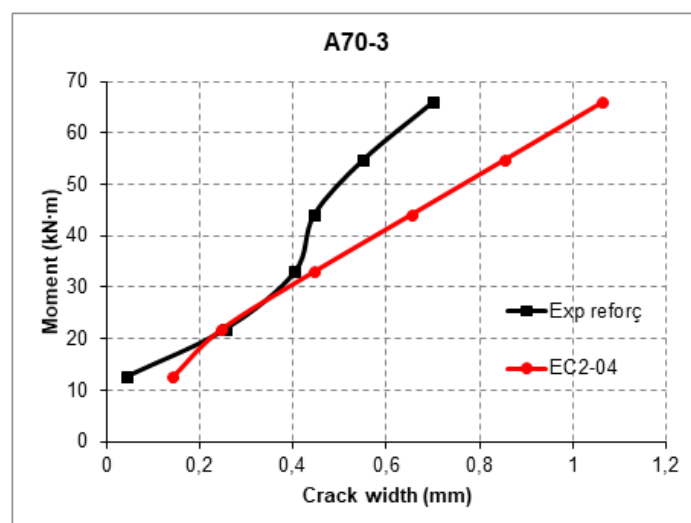


Figura 235. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga A70-3 (Adam *et al.* 2015)

**B.2.9. Gràfics obtinguts per l'article El-Nemr *et al.* 2016**

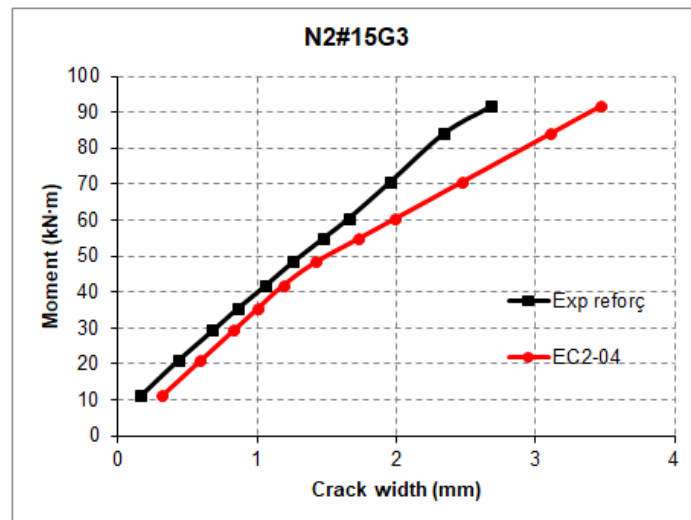
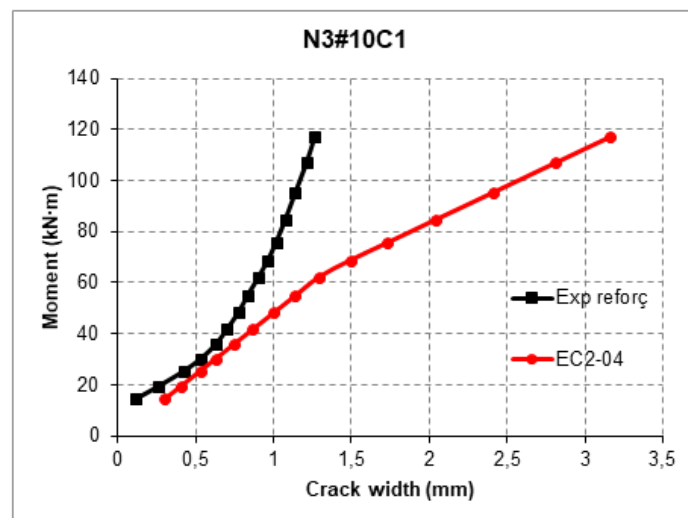


Figura 236. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N2#15G3 (El-Nemr *et al.* 2016)



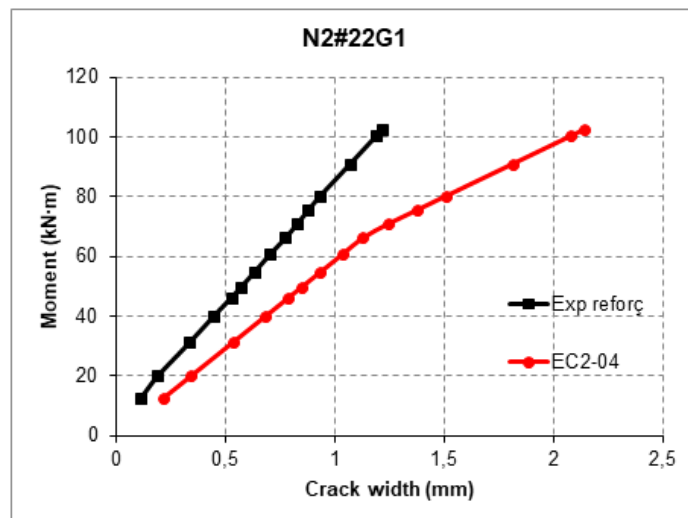


Figura 238. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N2#22G1 (El-Nemr *et al.* 2016)

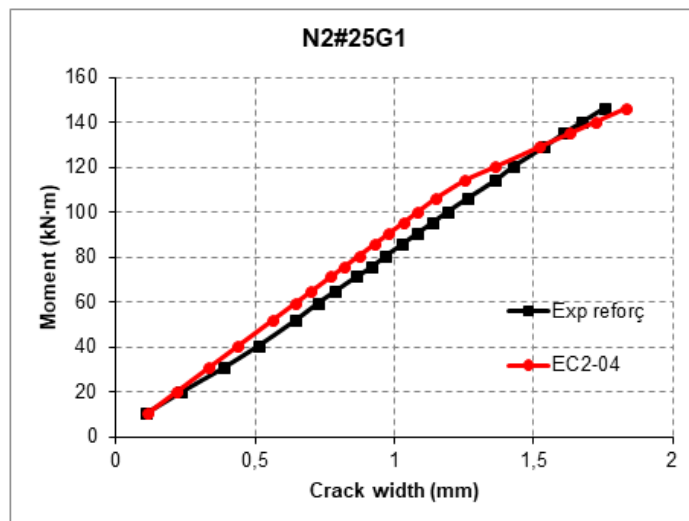


Figura 239. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N2#25G1 (El-Nemr *et al.* 2016)

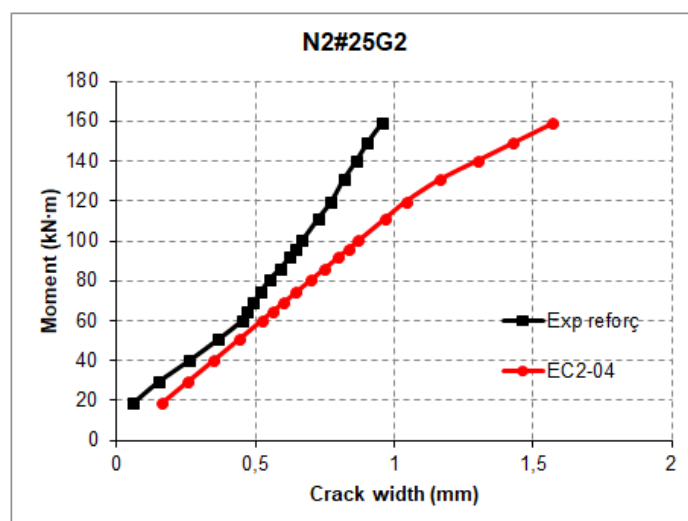


Figura 240. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N2#25G2 (El-Nemr *et al.* 2016)

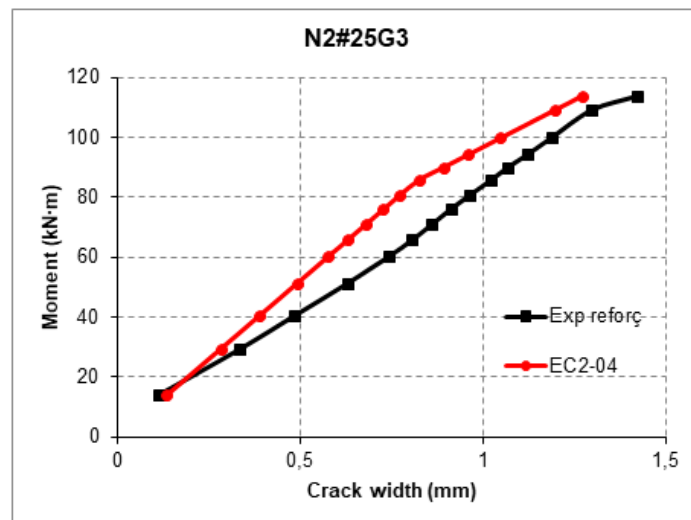


Figura 241. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N2#25G3 (El-Nemr *et al.* 2016)

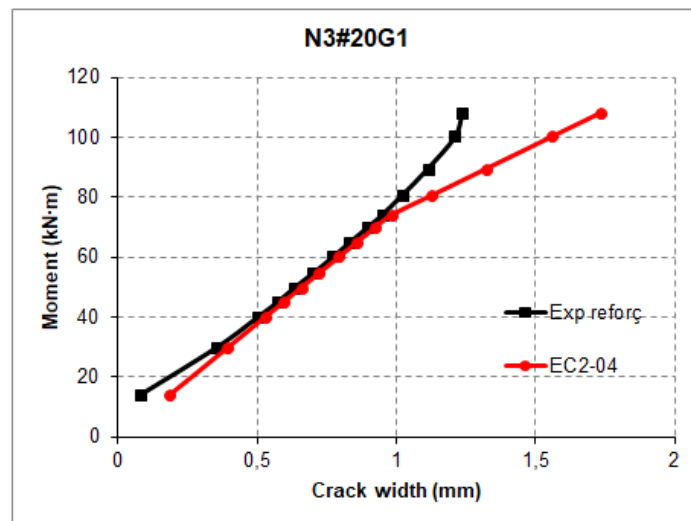


Figura 242. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N3#20G1 (El-Nemr *et al.* 2016)

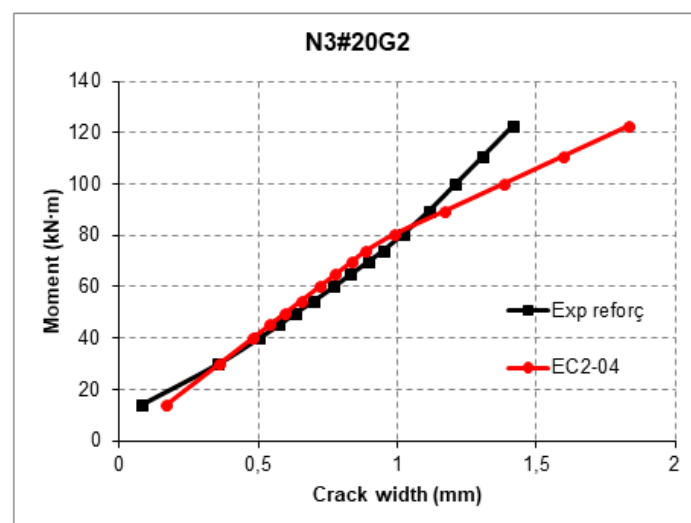


Figura 243. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N3#20G2 (El-Nemr *et al.* 2016)

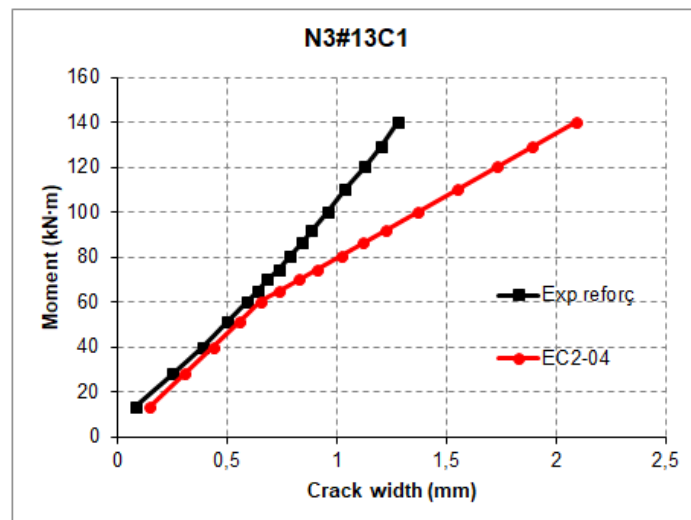


Figura 244. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga N3#13C1 (El-Nemr *et al.* 2016)

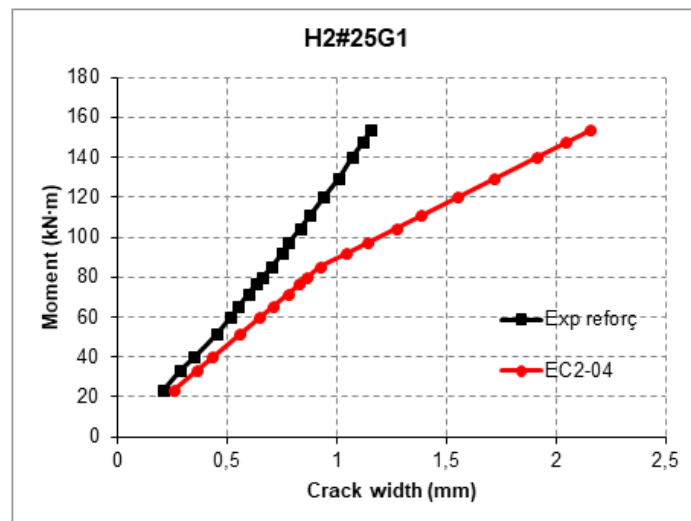


Figura 245. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga H2#25G1 (El-Nemr *et al.* 2016)

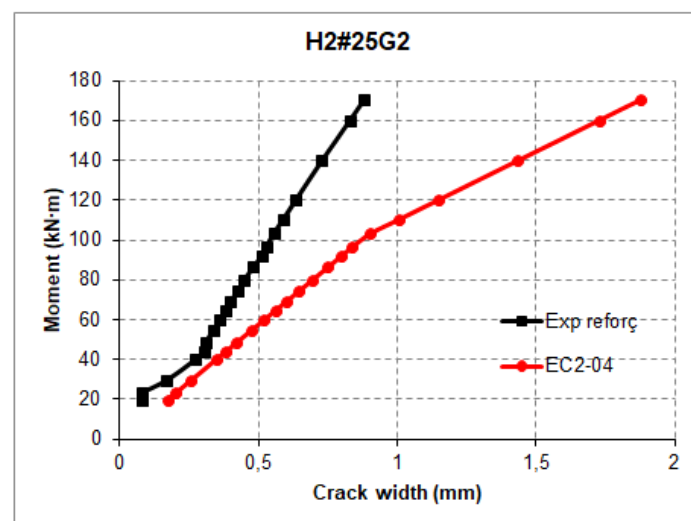


Figura 246. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga H2#25G2 (El-Nemr *et al.* 2016)

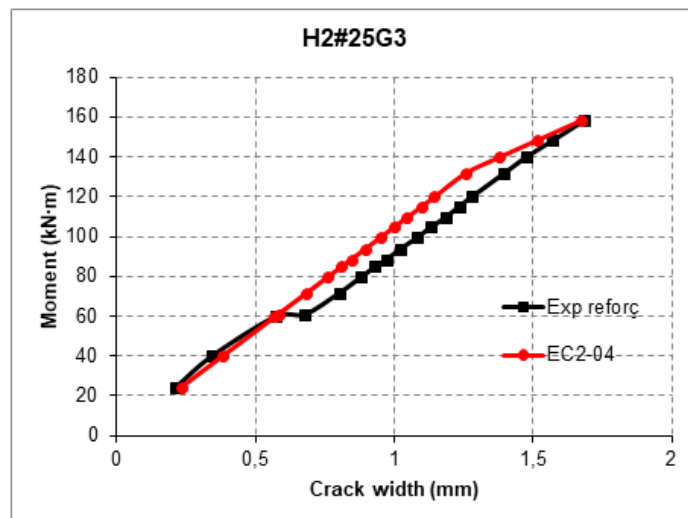


Figura 247. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga H2#25G3 (El-Nemr *et al.* 2016)

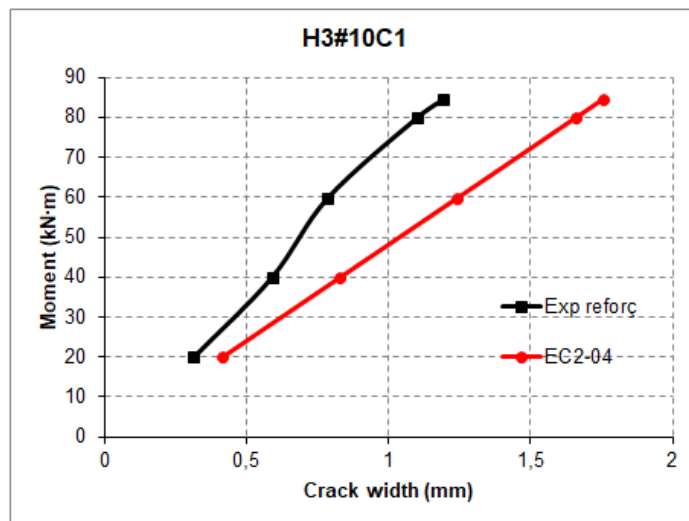


Figura 248. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga H3#10C1 (El-Nemr *et al.* 2016)

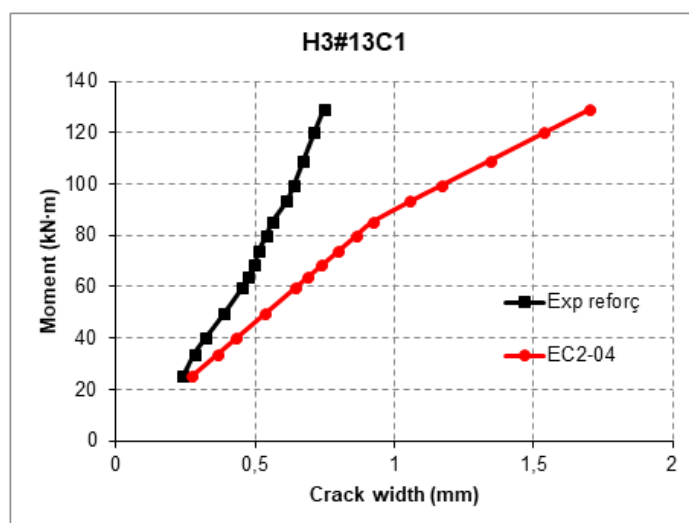


Figura 249. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga H3#13C1 (El-Nemr *et al.* 2016)

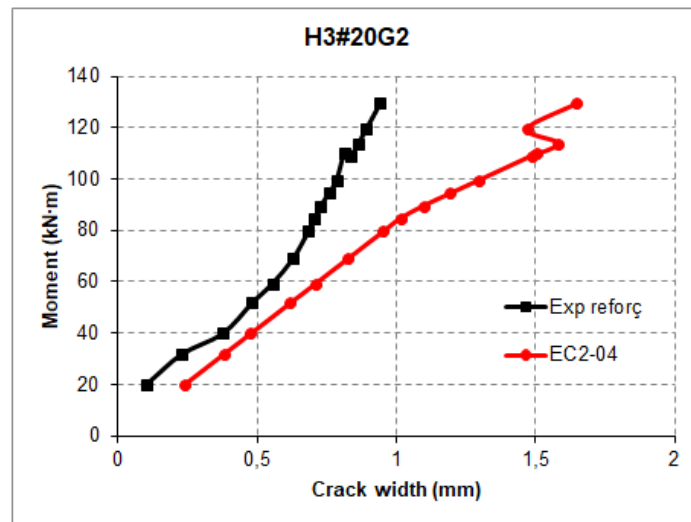


Figura 250. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga H3#20G2 (El-Nemr *et al.* 2016)

#### B.2.10. Gràfics obtinguts per l'article Barris *et al.* 2017

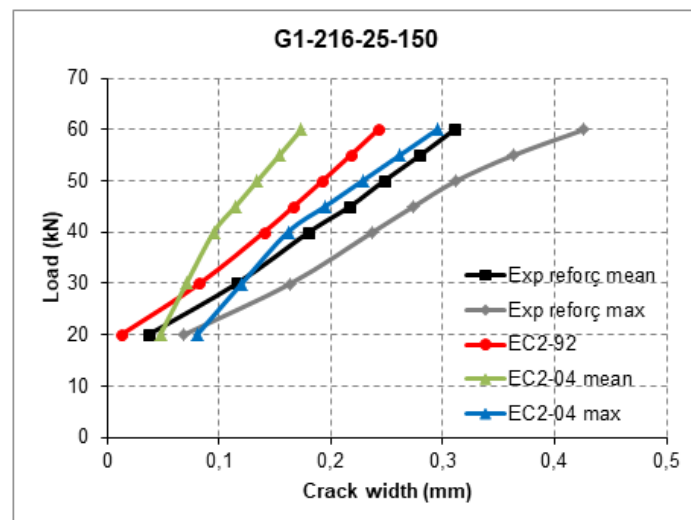


Figura 251. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G1-216-25-150 (Barris *et al.* 2017)



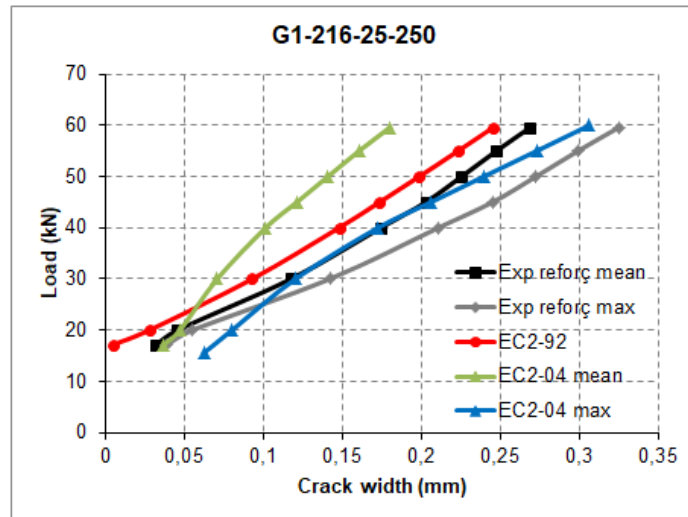


Figura 252. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G1-216-25-250 (Barris *et al.* 2017)

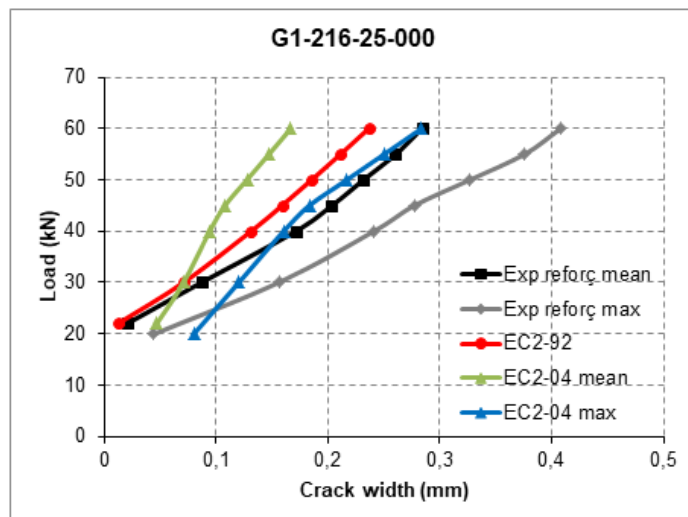


Figura 253. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G1-216-25-000 (Barris *et al.* 2017)

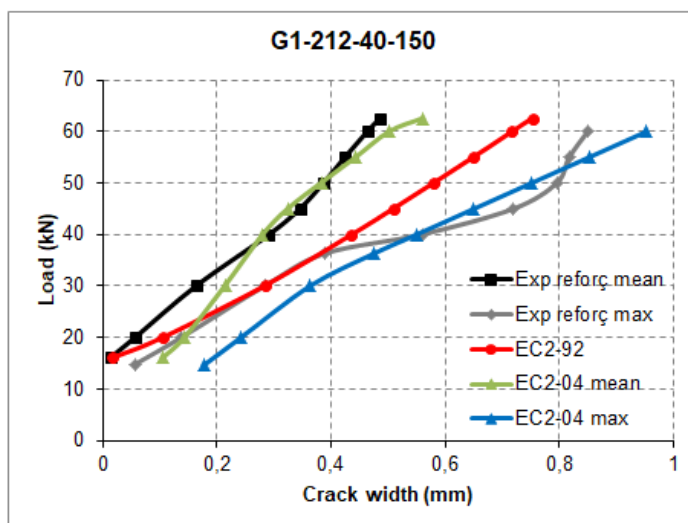


Figura 254. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G1-212-40-150 (Barris *et al.* 2017)

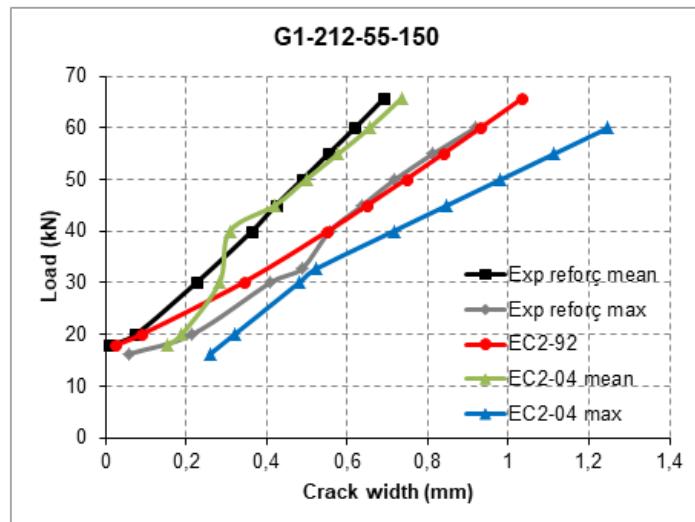


Figura 255. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G1-212-55-150 (Barris *et al.* 2017)

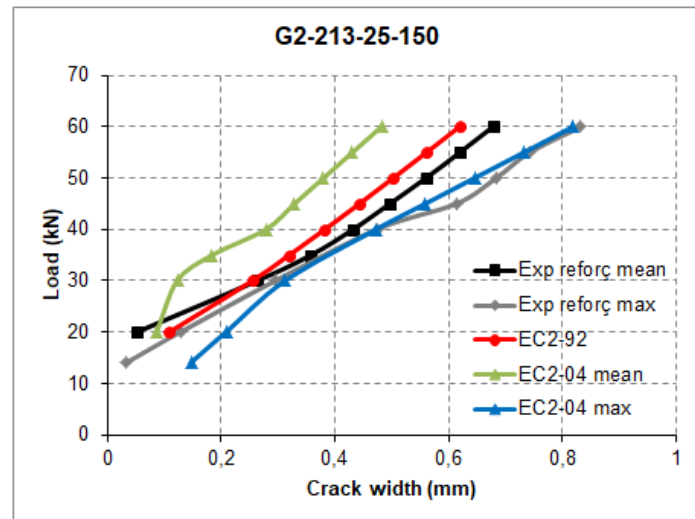


Figura 256. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G2-213-25-150 (Barris *et al.* 2017)

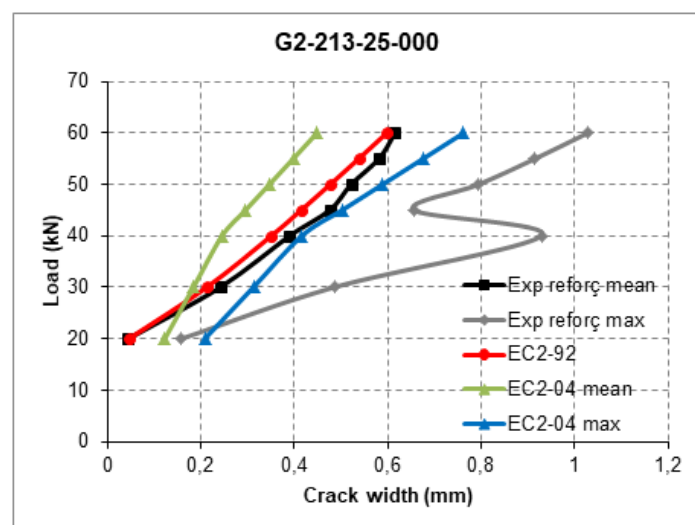


Figura 257. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G2-213-25-000 (Barris *et al.* 2017)

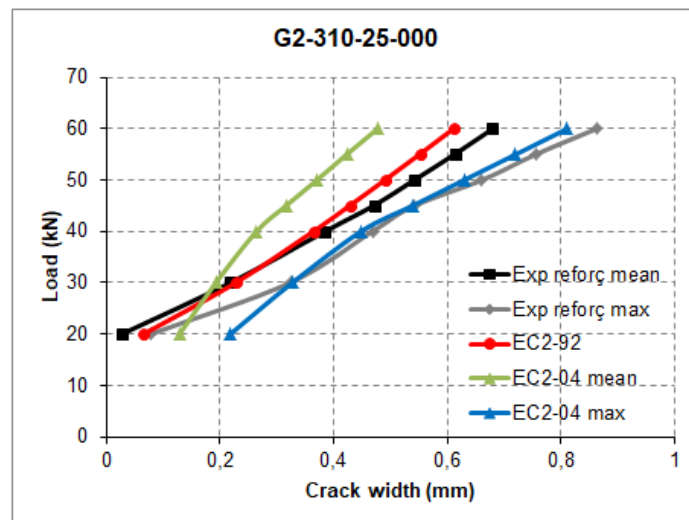


Figura 258. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G2-310-25-000 (Barris *et al.* 2017)

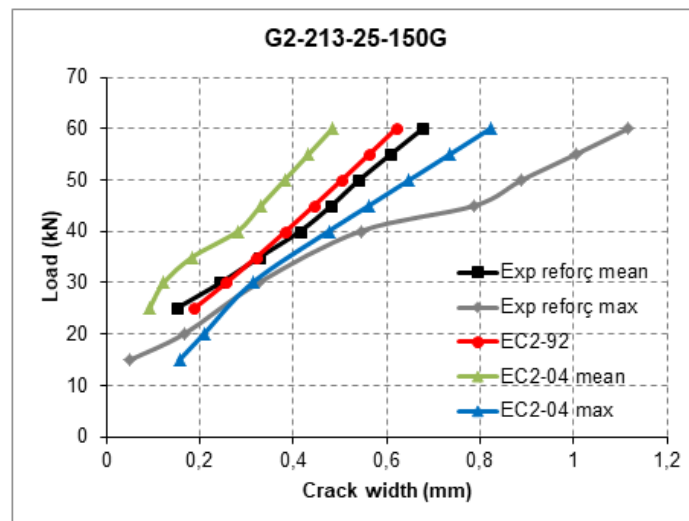


Figura 259. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G2-213-25-150G (Barris *et al.* 2017)

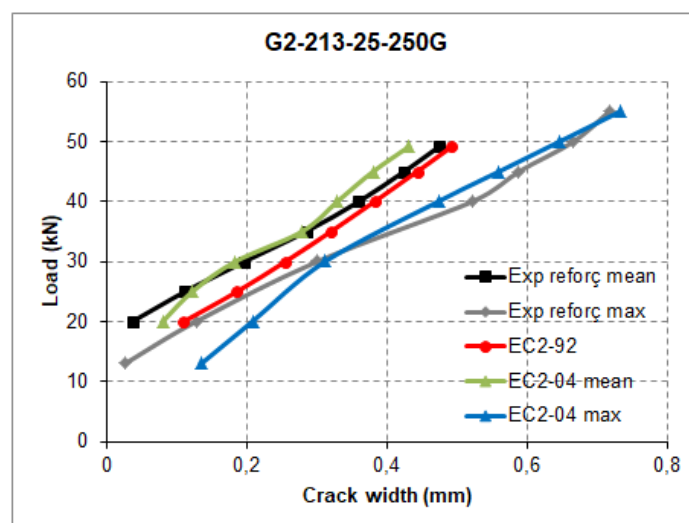


Figura 260. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G2-213-25-250G (Barris *et al.* 2017)

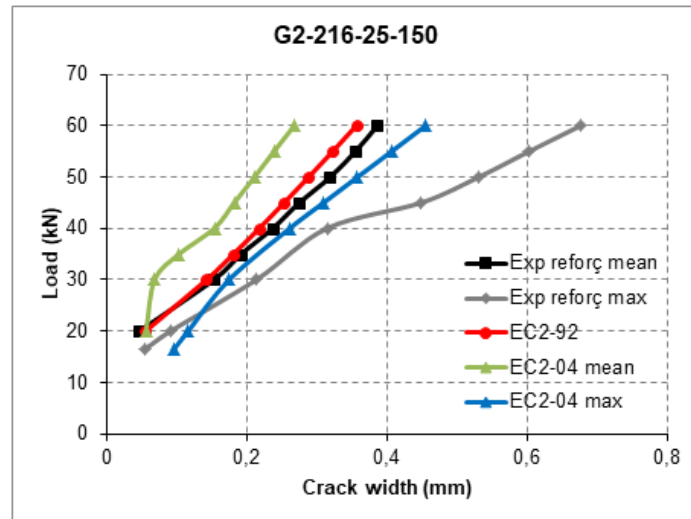


Figura 261. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G2-216-25-150 (Barris *et al.* 2017)

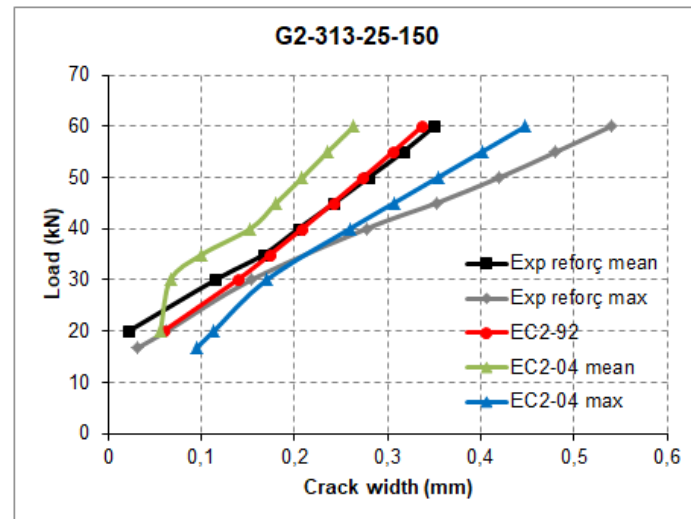


Figura 262. Amplada de fissura a l'alçada del reforç de la biga G2-313-25-150 (Barris *et al.* 2017)

### ANNEX C. PRESSUPOST

En aquest annex es documenta el pressupost que suposa l'elaboració d'aquest projecte, incloent el cost tant de l'elaboració de la base de dades com del posterior anàlisi de resultats i de la redacció del document.

Concepte	Amidament	Preu unitari	Preu total
Adquisició de coneixements	100 h	0 €/h	0 €
Recopilació de bibliografia	100 h	35 €/h	3.500 €
Realització de l'estudi	240 h	35 €/h	8.400 €
Reunions	10 h	0 €/h	0 €
Amortització de maquinària i programari	1 u	120 €/u	120 €
<b>TOTAL (sense IVA ni costos)</b>			12.020 €
Costos indirectes (9%)			1.082 €
<b>TOTAL (sense IVA)</b>			13.102 €
IVA (21%)			2.751 €
<b>TOTAL (IVA inclòs)</b>			15.853 €