

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Enginyeria Mecànica

**Títol:** Estudi comparatiu de les noves propostes de càlcul de l'amplada de fissura en elements de formigó armat.

**Document:** Memòria i annexos

**Alumne:** Jordi Sala Viñolas

**Tutor:** Lluís Torres Llinàs

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

**Àrea:** Enginyeria de la Construcció

**Convocatòria (mes/any) :** Setembre 2022



## ÍNDEX

<b>1. INTRODUCCIÓ .....</b>	<b>5</b>
1.1. Antecedents .....	5
1.2. Objecte .....	5
1.3. Abast.....	6
<b>2. FISSURACIÓ.....</b>	<b>7</b>
2.1. Fissuració degut a accions directes.....	8
2.1.1. Fases de fissuració.....	8
2.2. Presentació normatives.....	10
2.2.1. EHE-08.....	10
2.2.2. CE-2021 .....	13
2.2.3. EC-2 .....	15
<b>3. DESENVOLUPAMENT DE L'ESTUDI .....</b>	<b>18</b>
3.1. Parametrització .....	18
3.2. Metodologia .....	19
<b>4. SEPARACIÓ ENTRE FISSURES .....</b>	<b>21</b>
4.1. Quantia eficaç .....	23
4.2. Alçada eficaç.....	25
4.3. Comparativa de la separació entre fissures entre biga plana i de cantell. ....	28
4.3.1. Comparativa EHE-08:.....	28
4.3.2. Comparativa CE-2021: .....	29
4.3.3. Comparativa EC-2 .....	32
<b>5. DEFORMACIÓ RELATIVA DE L'ARMAT LONGITUDINAL I DEL FORMIGÓ .</b>	<b>33</b>
5.1. Deformació relativa EHE-08.....	35
5.1.1. Tensió de l'armadura en l'instant en que es fissura el formigó ( $\sigma_{sr}$ ).....	36
5.1.2. Resistència a flexo-tracció del formigó.....	37
5.1.3. Moment de fissuració.....	38
5.1.4. Coeficient d'equivalència entre acer i formigó ( $\alpha_e$ o $n$ ) .....	39

---

5.1.5.	Distància de l'armadura a la posició de la línia Neutra (y).....	40
5.1.6.	Inèrcia fissurada .....	40
5.2.	Deformació relativa CE-2021 .....	41
5.3.	Deformació relativa EC-2 .....	43
5.3.1.	Quantia eficaç.....	44
5.3.2.	Factor de curvatura $k_1/r$ .....	45
<b>6.</b>	<b>AMPLADA DE FISSURA .....</b>	<b>46</b>
6.1.	Amplada de fissura EHE-08 .....	48
6.2.	Amplada de fissura CE-2021.....	49
6.3.	Amplada de fissura EC-2 .....	50
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>51</b>
<b>8.</b>	<b>RELACIÓ DE DOCUMENTS.....</b>	<b>54</b>
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>55</b>
	<b>ANNEX A: Recapitulació dels paràmetres fixats .....</b>	<b>56</b>
	<b>ANNEX B: Càlculs previs i coeficients estipulats .....</b>	<b>58</b>
B.1.	Càlculs previs EHE-08 .....	59
B.2.	Càlculs previs CE-2021 .....	61
B.3.	Càlculs previs EC-2.....	62
	<b>ANNEX C: Resultats de l'estudi. Taules i gràfics suplementaris.....</b>	<b>63</b>
C.1.	Resultats i gràfics EHE-08 .....	64
C.2.	Resultats i gràfics CE-2021 .....	68
C.3.	Resultats i gràfics EC-2.....	72
C.4.	Gràfics suplementaris globals .....	75

## **1. INTRODUCCIÓ**

### **1.1. Antecedents**

El formigó es un material constructiu elaborat a base d'àrids barrejats amb aigua i ciment. Quan es sotmet a tracció, presenta una baixa resistència comparada amb la seva resistència quan es sotmet a compressió, de forma que es fa necessària la utilització d'armadures consistent en barres d'acer dins el mateix, que en conjunt forma el que es coneix com a formigó armat.

En tota construcció o estructura projectada, és necessari assolir certes exigències que verifiquen que aquestes siguin completament segures pels usuaris, sense risc a possibles a possibles fallides, aquests son els casos dels Estats Límits Últims (ELU). No obstant, també cal satisfer les necessitats funcionals, de confortabilitat, d'aparença o de durabilitat, agrupats en l'Estat Límit de Servei (ELS). Dins aquest grup, un dels aspectes més importants a controlar és la fissuració.

A causa de la baixa resistència a tracció del formigó, és habitual i acceptat que s'obrin petites fissures a les zones traccionades dels elements de formigó armat. Tot i ser acceptades però, els codis i normes de disseny, tant nacionals com internacionals, obliguen a verificar el compliment de l'Estat Límit de Fissuració presentant diferents models de predicció. A nivell nacional, recentment ha entrat en vigor el nou Codi Estructural, que presenta diversos canvis respecte de la fa poc derogada instrucció EHE-08, a la qual substitueix. A nivell internacional, actualment l'Eurocodi 2 per a estructures de Formigó, del qual es deriva el Codi Estructural (en la part de fissuració), esta sotmès a revisió, de forma que també s'inclouran nous procediments per la verificació de l'obertura màxima de les fissures.

### **1.2. Objecte**

L'objecte del treball consisteix en la realització d'un estudi comparatiu de les formulacions de les normatives anteriorment mencionades mitjançant un estudi paramètric per avaluar la incidència en l'obertura de fissura de les principals variables seleccionades.

L'estudi inclourà la comparativa de les normatives ja mencionades: la derogada EHE-08, la recentment entrada en vigor CE-2021 i la futura actualització de l' EC-2, a més de l'anàlisi i comparativa de resultats per cadascuna d'elles pels casos fixats, i posteriorment les conclusions del mateix.

### **1.3. Abast**

El projecte de l'estudi paramètric comparatiu de les noves propostes de càlcul de l'obertura de fissura es distribueix de la següent forma:

En el segon capítol, s'ofereix una breu introducció al fenomen de la fissuració: causes, propagació conseqüències.... , a més de la presentació de les formulacions de cadascuna de les normatives sotmeses a l'estudi.

Seguidament, en el tercer capítol es presenta el desenvolupament i la metodologia emprada per la realització de l'estudi, així com els paràmetres inicials que es fixaran i els valors que s'emprendran dels mateixos.

Del quart al sisè capítol, s'analitzaran els resultats obtinguts en l'estudi. Primerament s'analitzaran els paràmetres principals que modifiquen directament l'obertura de fissura, amb els conseqüents subparàmetres, des d'un punt de vista general o més centrat en la normativa corresponent, en funció de les variacions en la formulació i d'obtenir major facilitat de comprensió. Al final d'aquest bloc de capítols s'analitzarà l'obertura de fissura, realitzant primerament la comparativa directa entre normatives, i seguidament l'anàlisi específic de cada normativa

Finalment, en el setè capítol s'inclouran les conclusions finals de l'estudi, i a continuació en els annexos s'inclouran una recapitulació dels paràmetres fixats, així com el els càlculs previs per a la realització de l'estudi i els resultats de predicció numèrics a més de gràfics suplementaris realitzats per extreure major informació.

## **2. FISSURACIÓ**

La fissuració és el fenomen pel qual es produeixen obertures en el formigó, de diferents formes i dimensions en funció de la causant i d'altres factors com la geometria o el nivell de carrega entre d'altres.

Les causes que generen fissures al formigó es poden separar en tres principals grups:

- Fissuració deguda a accions directes.
- Fissuració deguda a accions indirectes.
- Altres

El primer grup, correspon a les fissures causades per les càrregues que s'apliquen a l'element estructural, i per defecte, a l'estat tensional al que es sotmet. Dins aquest grup, es localitzen tres possibles causants:

- Fissures produïdes per tracció del formigó, principalment per esforç tallant.
- Fissures causades per l'allargament de l'armadura, degut a la tracció o a la flexió de la mateixa.
- Fissures produïdes per sobrecompressió del formigó.

Així doncs com es pot observar la majoria de fissures es formen pels esforços a tracció, principalment com s'ha mencionat anteriorment a la baixa resistència a tals esforços.

En el segon grup, es situen orígens deguts més a fenòmens físics o naturals, que es poden produir durant l'enduriment del formigó com ara retraccions, variacions de temperatura o assentaments dels suports dels elements.

Finalment, en el tercer grup, es localitzen causes produïdes en el moment de la construcció dels elements, com ara assentaments i retraccions plàstiques, problemàtiques en l'encofrat o excessos de ciment que provoquin retraccions fortes i en un interval curt de temps.

De cares a l'estudi, únicament es consideraran el primer grup, és a dir les causades per accions directes, concretament pels esforços a flexió simple.

D'altra banda, predir els valors de la fissuració també comporta que els aquests rarament siguin els valors d'amplada que realment es produeixen en els elements. Probablement la forma més exacta de definir l'amplada pels casos de l'estudi consistiria en assajar i mesurar les fissures d'aquests, però, l'estudi prendria una complexitat major en quant a tractament i definició de paràmetres i sobretot de cost econòmic, pel qual estant en un rang de mesura de l'ordre de fraccions de mil·límetre on hi pot haver errors, resulti inviable, o com a molt es pugui realitzar en un o dos casos per comprovar l'aproximació a la realitat.

## **2.1. Fissuració degut a accions directes**

Com s'ha mencionat anteriorment, l'estudi es centrarà principalment en les obertures de fissura causades per l'acció directa de les càrregues aplicades, més concretament a flexió simple.

### **2.1.1. Fases de fissuració.**

El procés de fissuració d'un element sotmès a càrrega es pot dividir en tres fases: la primera fase on formigó i acer tenen la mateixa deformació i per tant, no s'originen fissures, una segona fase compresa des de l'aparició de la primera fissura fins la formació de la última, i finalment la fase on formades totes les fissures, aquestes incrementen l'amplada.

L'aparició de la primera fissura es produeix en el moment en que l'esforç a tracció provoca una tensió igual a la seva resistència a tracció, formant-la així en la secció més dèbil de l'element. En aquest punt les tensions i deformacions de l'acer augmentaran mentre que el formigó fissurat no contribuirà a resistència de la secció. També es produeix un lliscament entre els dos materials que serà màxim a la secció fissurada. En el tram entre dues fissures les tensions es transmeten des de l'acer al formigó per adherència, de forma que les tensions de l'acer tendeixen a disminuir i les del formigó a augmentar conforme més a prop s'estigui de la secció intermèdia entre dues fissures. L'obertura de les fissures serà la diferència entre els allargaments de l'acer i els del formigó en la zona compresa entre dues fissures.



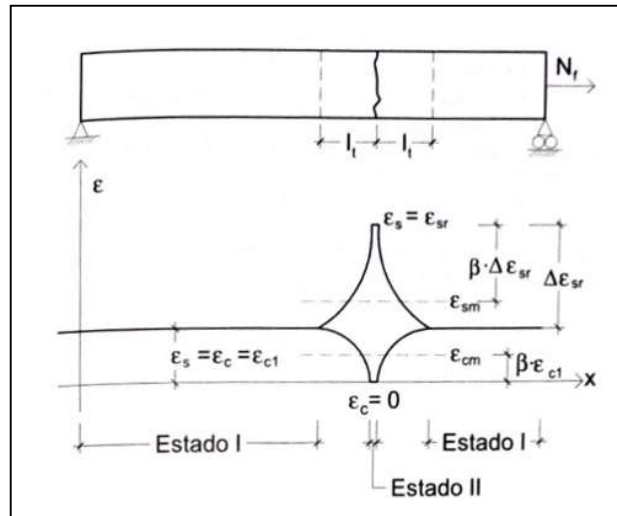


Figura 1: Formació de la primera fissura (Font: Jiménez Montoya, 2009)

Un cop formada la fissura, momentàniament la tensió torna a situar-se lleugerament per sota la resistència a tracció, provocant que ambdues deformacions tendeixin a igualar-se de nou fins que altre cop, sense necessitat que s'arribi en aquest punt, l'esforç sigui suficient per tornar a superar el límit per formar-se una nova fissura, repetint-se de nou el procés fins que arribat en un punt on no s'assolirà una tensió igual a la resistència a tracció, en aquell moment s'haurà format l'última fissura.

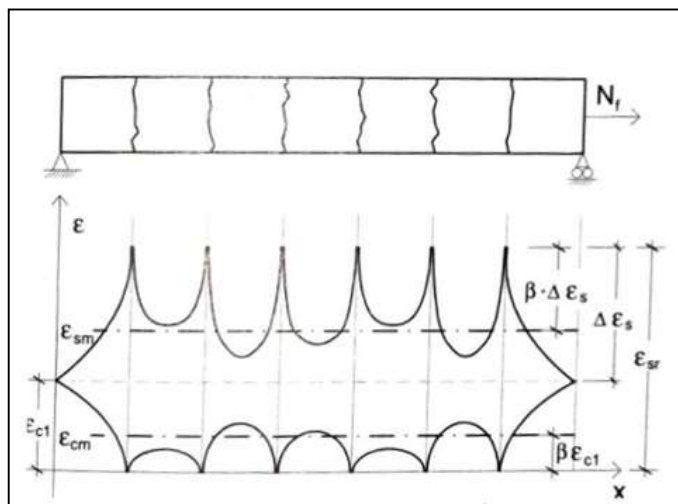


Figura 2: Final de formació de fissures (Font: Jiménez Montoya, 2009)

Formades totes les fissures, com la resistència a tracció no es podrà assolir de nou, l'augment de l'esforç només comportarà que les fissures ja formades s'ampliïn encara més, és per això que aquesta última fase s'anomena d'estabilització, ja que l'acer seguirà deformant-se, mentre que el formigó mantindrà la mateixa forma que en la formació de l'última fissura.

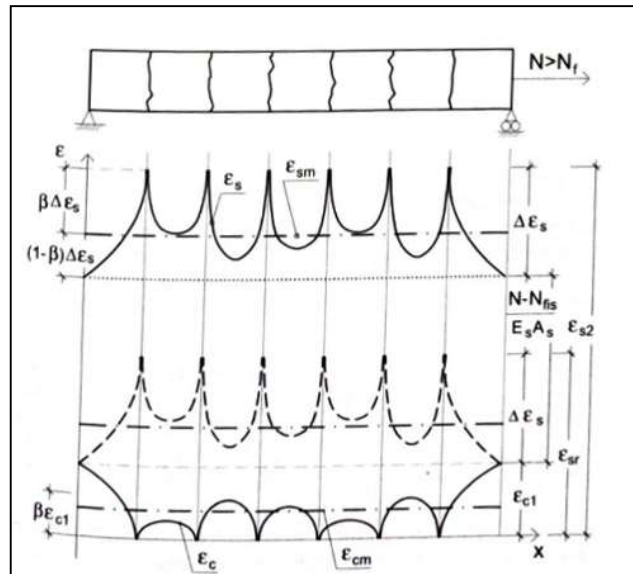


Figura 3: Estabilització i ampliació de fissures (Font: Jiménez Montoya, 2009)

## 2.2. Presentació normatives

### 2.2.1. EHE-08

La primera normativa de l'estudi és la *Instrucción del Hormigón Industrial* de l'any 2008 (d'ara en endavant EHE-08). Aquesta normativa d'àmbit nacional recentment derogada i substituïda pel nou Codi estructural, estableix com a límits per el seu compliment:

$$W_k \leq W_{lim} \quad [\text{Eq. 1}]$$

Classe d'exposició	$W_{k,max}$ [mm]	
	Formigó armat (combinació quasi-permanent)	Formigó pretensat (combinació freqüent)
I	0,4	0,2
IIa, IIb, H	0,3	0,2 <sup>(1)</sup>
IIIa, IIIb, IV, F	0,2	Descompressió
IIIc, Qa, Qb, Qc <sup>(2)</sup>	0,1	

Taula 1: Límits de l'obertura de fissura per l'EHE-08 (Font: EHE-08)

L'obertura de fissura es calcula per la següent equació:

$$W_k = \beta \cdot S_m \cdot \varepsilon_{sm} \quad [\text{Eq.2}]$$

On:

- $\beta$  : coeficient que converteix obertures mitjanes en característiques. Val 1,3 si només intervenen accions indirectes com la temperatura o la retracció, i 1,7 en la resta de casos on intervinguin accions tant directes com indirectes.
- $S_m$ : Separació mitjana entre fissures, que es calcula:

$$S_m = 2 \cdot c + 0,2 \cdot s + 0,4 \cdot k_1 \cdot \frac{\phi}{\rho_{ef}} \quad [\text{Eq.3}]$$

- $c$ : Recobriment de les armadures. Comprèn la distància entre l'extrem inferior de la biga fins al cercol de tallant, i el diàmetre d'aquest.
- $s$ : Separació entre barres longitudinals.
- $k_1$ : Coeficient que té en compte la distribució de tensions de la secció.

$$k_1 = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{8 \cdot \varepsilon_1} \quad [\text{Eq.4}]$$

<b>Flexió Simple</b>	$k_1 = 0,125$
<b>Tracció Composta</b>	$0,125 < k_1 < 0,25$
<b>Tracció Simple</b>	$k_1 = 0,25$

*Taula 2: coeficient  $k_1$  en funció tipus d'esforç*

- $\rho_{ef}$ : Quantia eficaç de l'armadura

$$\rho_{ef} = \frac{A_s}{A_{cef}} \quad [\text{Eq.5}]$$

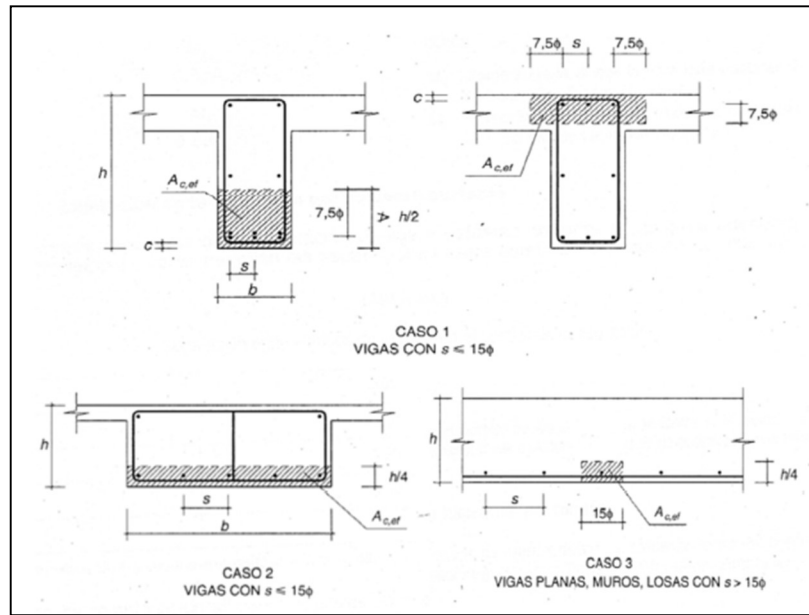


Figura 4: Àrea efectiva segons EHE-08 (Font: EHE-08)

- $\varepsilon_{sm}$ : Allargament mitjà entre fissures, que es calcula:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \left(1 - k_2 \cdot \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s}\right)^2\right) \geq 0,4 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad [\text{Eq.6}]$$

- $\sigma_s$ : tensió de l'armadura per al moment de Servei de les carregues quasi permanents:

$$\sigma_s = \frac{n \cdot M_a \cdot y}{I_f} \quad [\text{Eq.7}]$$

- $\sigma_{sr}$ : tensió de l'armadura per al moment de fissuració:

$$\sigma_{sr} = \frac{n \cdot M_a \cdot y}{I_f \cdot (d-x)} \quad [\text{Eq.8}]$$

### 2.2.2. CE-2021

La segona normativa de l'estudi és el *Código Estructural* de l'any 2021 (d'ara en endavant CE-2021). Aquesta normativa d'àmbit nacional recentment instaurada basada (la part de fissuració) en la versió de l'any 2004 de L'Eurocodi 2, estableix com a límits per el seu compliment:

$$W_k \leq W_{lim} \quad [\text{Eq.9}]$$

Classe d'exposició	W <sub>kmax</sub> [mm]	
	Formigó armat (combinació quasi-permanent)	Formigó pretesat (combinació freqüent)
X0 <sup>(2)</sup> , XC1 <sup>(2)</sup>	0,4	0,2
XC2, XC3, XF1, XF3, XC4	0,3	0,2 <sup>(1)</sup>
XS1, XS2, XD1, XD2, XD3, XF2, XF4, XA1 <sup>(3)</sup>	0,2	Descompressió
XS3, XA2 <sup>(3)</sup> , XA3 <sup>(3)</sup>	0,1	

Taula 3: Límits de l'obertura de fissura per CE-2021 (Font: CE-2021)

L'obertura de fissura es calcula per la següent equació:

$$W_k = S_{rmax} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad [\text{Eq.10}]$$

On:

- $S_{rmax}$ : Separació màxima entre fissures, que es calcula:

$$S_{rmax} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{p_{ef}} \quad [\text{Eq.11}]$$

- $k_1$ : coeficient que té en compte l'adherència de l'armadura. Valdrà 0,8 si és elevada i 1,6 si la superfície eficaç de la barra és llisa.
- $k_2$ : coeficient que té en compte la distribució de deformacions. Valdrà 0,5 si és per flexió i 1,0 per tracció pura.

- $k_3 = 3,4$
- $k_4 = 0,425$
- $\emptyset$  : Diàmetre de les barres de l'armadura longitudinal.
- $c$  : Recobriment de l'armat longitudinal.
- $\rho_{ef}$  : Quantia efectiva, es calcula de la mateixa forma que l'equació 5.

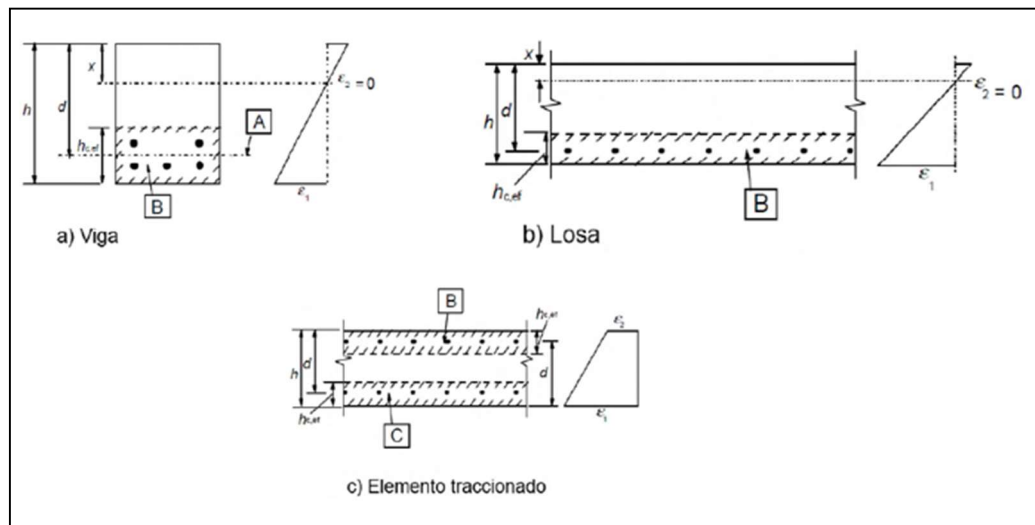


Figura 5: Àrea efectiva segons CE-2021 (Font: CE-2021)

- $\varepsilon_{sm}$ : Deformació mitjana de l'armadura en funció de la combinació de càrregues, i tenint en compte el efectes de les deformacions imposades i la rigidesa a tracció.
- $\varepsilon_{cm}$ : Deformació mitjana del formigó entre fissures.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctef}}{\rho_{ef}} (1 + \alpha_e \cdot \rho_{ef})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad [\text{Eq. 12}]$$

- $k_t$ : Coeficient de valor 0,5.
- $\alpha_e$ : Coeficient entre els mòduls d'elasticitat de l'acer i el formigó.

- $\sigma_s$ : Tensió de l'armadura suposant secció fissurada.

### 2.2.3. EC-2

La tercera normativa de l'estudi és una nova versió de L'Eurocodi 2 (en endavant EC-2), que futurament substituirà a l'última versió de l'any 2004. Aquesta normativa d'àmbit internacional encara no instaurada, principalment pel fet que encara està en fase de discussió, tindria com a límits :

$$W_k \leq W_{lim} \quad [Eq.13]$$

Classe d'exposició	W <sub>lim,cal</sub> [mm]				
	Elements reforçats i pretesats amb o sense tendons units amb protecció nivell 2 o 3		Elements pretesats amb o sense tendons units amb protecció nivell 1		
	Combinació d'accions		Combinació d'accions		
	Quasi permanent	Característica	Quasi permanent	Freqüent	Característica
X0, XC1	-		-	0,3 · K <sub>surf</sub>	
XC2, XC3, XC4		-	Descompressió	0,3 · K <sub>surf</sub>	-
XD1, XD2, XD3 XS1, XS2, XS3	0,3 · K <sub>surf</sub>	$\sigma_s \leq 0,6f_{ck}$	-	Descompressió	$\sigma_s \leq 0,6f_{ck}$
XF1, XF3 XF2, XF4,	-				
<b>K<sub>surf</sub>: coeficient diferencial entre l'increment de l'amplada de fissura i l'amplada mitja requerida en funció de la durabilitat. El seu valor varia entre 1-1,5 .</b>					

Taula 4: Límits de l'obertura de fissura per nou EC-2 (Font: EC-2)

L'obertura de fissura es calcula per la següent equació:

$$W_{kcal} = K_w \cdot S_{rmcal} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad [Eq.14]$$

On:

- $K_w$ : coeficient que converteix obertures mitjanes en característiques. Valdrà 1,7 tret que l'annex nacional especifiqui un valor diferent.
- $S_{rmcal}$ : Separació mitjana entre fissures, que es calcula:

$$S_{rmcal} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{ef}} \quad [\text{Eq.15}]$$

(Per tal d'obtenir la Separació màxima, cal multiplicar el valor de la Separació mitjana per 1,7)

- $k_1$ : Coeficient que té en compte l'adherència de l'armadura. Valdrà 0,8 si és elevada i 1,6 si la superfície eficaç de la barra és llisa.
- $k_2$ : Coeficient que té en compte la distribució de deformacions. Valdrà 0,5 si és per flexió i 1,0 per tracció pura.
- $k_3 = 3,4$
- $k_4 = 0,425$
- $\phi$ : Diàmetre de les barres de l'armadura longitudinal.
- $c$ : Recobriment de l'armat longitudinal.
- $\rho_{ef}$ : Quantia eficaç, es calcula de la mateixa forma que l'equació 5.

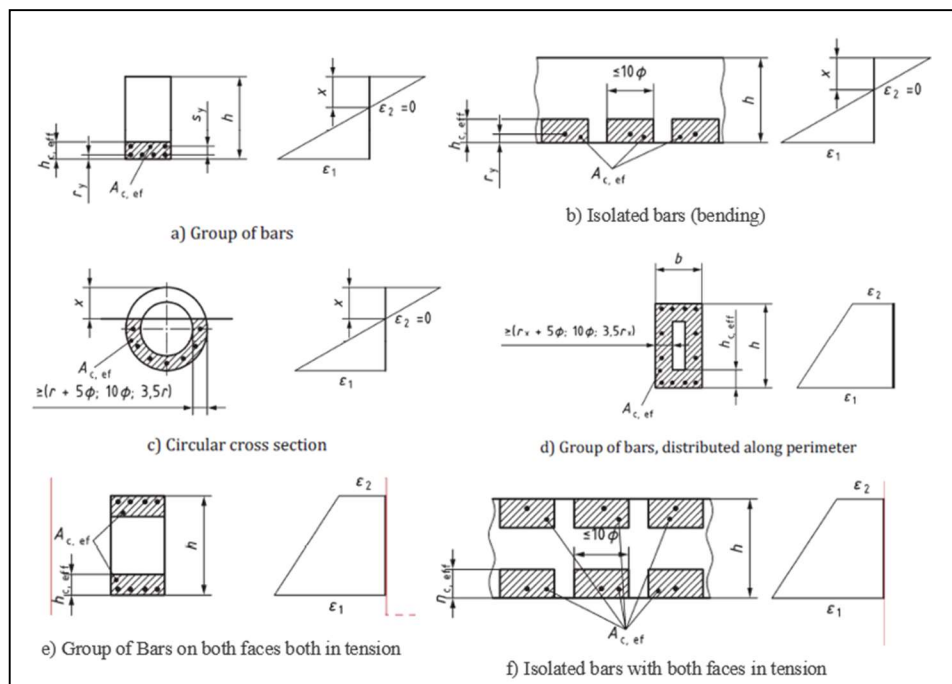


Figura 6: Àrea eficaç segons EC-2 (Font: EC-2)



- $\varepsilon_{sm}$ : Deformació mitjana de l'armadura en funció de la combinació de càrregues, i tenint en compte el efectes de les deformacions imposades i la rigidesa a tracció.
- $\varepsilon_{cm}$ : Deformació mitjana del formigó entre fissures.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = k_1/r \cdot \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctef}}{p_{ef}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot p_{ef})}{E_s} \geq 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad [\text{Eq.16}]$$

- $\alpha_e$ : Coeficient entre els mòduls d'elasticitat de l'acer i el formigó.
- $\sigma_s$ : Tensió de l'armadura suposant secció fissurada.
- $k_1/r$ : Coeficient que té en compte l'increment de deformació degut a la curvatura, es calcula:

$$k_1/r = \frac{h-x}{(h-a_{y,i}-x)} \quad [\text{Eq.17}]$$

- On  $a_{y,i}$  és la distància entre l'extrem inferior de la biga i el punt mig de l'armadura longitudinal:

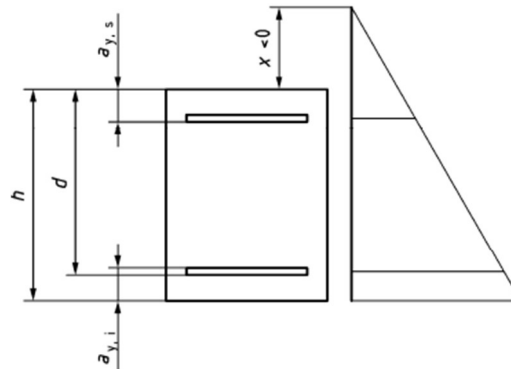


Figura 7: distància  $a_{y,i}$  (Font: EC-2)

$$a_{y,i} = h - d - \frac{\phi}{2} \quad [\text{Eq.18}]$$

### **3. DESENVOLUPAMENT DE L'ESTUDI**

Tal com s'ha esmentat anteriorment, l'estudi es centra en comparar els resultats predictius d'obertura de fissura per cadascuna de les normatives presentades anteriorment, pels elements de formigó armat que es presentaran a continuació.

Per la realització de l'estudi, s'empraran dos tipus de bigues de secció rectangular, ambdues sotmeses a flexió pura, però de dimensions totalment diferenciades, concretament una biga plana i una de cantell, conjuntament amb una sèrie de paràmetres per definir l'armat longitudinal, format per barres d'acer corrugades. En ambdós casos no es tindrà en compte l'armat passiu o de compressió.

Entre altres aspectes considerats a l'estudi, els esforços produïts als elements es deuran a accions permanents i constants, i que els resultats d'obertura de fissura obtinguts es consideren per l'instant de fissuració estabilitzada, és a dir, quan ja no se'n produeixen de noves.

#### **3.1. Parametrització**

Amb tot l'esmentat amb anterioritat, es procedeix a presentar les variables i els paràmetres usats de partida per cadascuna, per la realització de l'estudi.

- Dimensions de les bigues: es consideren dues tipologies de bigues rectangulars.  
Una primera biga plana de base (b) 1000 mm, i altura (h) 300 mm.  
Una biga de cantell de (b) 300 mm, i (h) 500 mm .
- La resistència característica a compressió del formigó ( $f_{ck}$ ) que es pren per la realització de l'estudi és de 30 MPa.
- Paràmetres de l'armat longitudinal.
  - Quantia geomètrica.  
Per tal de definir l'àrea d'armat, s'empren unes quanties de 0,005; 0,01 i 0,015.
  - Tensió de l'acer.  
S'estudiaran valors de tensió de 100, 200 i 300 MPa.

- Recobriment de l'armat.  
Per definir el cantell útil ( $d$ ) de l'element, i la posició de la línia neutra ( $x$ ), es defineixen uns recobriments de 20, 30 i 40mm. Addicionalment, es defineix un diàmetre les armadures a tallant de 10mm.
- Diàmetre de l'armat.  
S'empraran barres corrugades de diàmetres 12,16 i 20 mm.

Els paràmetres fixos restants, vindran definits per cadascuna de les normatives estudiades.

Així doncs, per cada normativa i tipologia de biga s'obtindran 81 combinacions de paràmetres a estudiar, les quals seguint les formulacions de l'Apartat 2.2 es predirà l'obertura de fissura teòrica que es podria produir.

### **3.2. Metodologia**

L'estudi comparatiu es realitzarà en dos segments diferenciats:

- Càlculs predictius: Partint de les 81 combinacions de paràmetres fixats de les variables, les dimensions dels elements i la tensió característica del formigó, es procedirà a obtenir l'obertura de fissura teòrica per cadascun dels casos.
- Estudi comparatiu: obtinguts tots els resultats, es procedirà a una anàlisi comparativa de la predicció d'obertura de fissura (valors segons tipologia de biga i normativa, tendències segons augment dels paràmetres fixos i linealitat, etc.) i de la influència de les diverses variables com ara:
  - La influència de la separació mitjana entre fissures, i de les variables que l'alteren:
    - La quantia eficaç: provinent de la relació entre l'àrea armada i l'àrea de formigó eficaç, aquesta obtinguda a partir de l'altura eficaç.

- El diàmetre de l'armadura i el recobriment, fixats des de l'inici.
- En alguna normativa, la separació entre barres.
- o La influència de la deformació relativa de l'armadura i del formigó, i de les variables que l'alteren com ara:
  - La quantia eficaç.
  - La tensió de servei de l'armadura, fixada prèviament, i la tensió de l'armadura en el moment de fissuració del formigó.
  - L'esforç a tracció i a flexo-tracció, el moment de fissuració i el coeficient que relaciona els mòduls de deformació de l'acer i del formigó.
- o Altres paràmetres emprats per segons quines normatives, per tenir en compte diversos efectes ( $\beta$ ,  $k_w$  o  $k_{1/r}$ ).

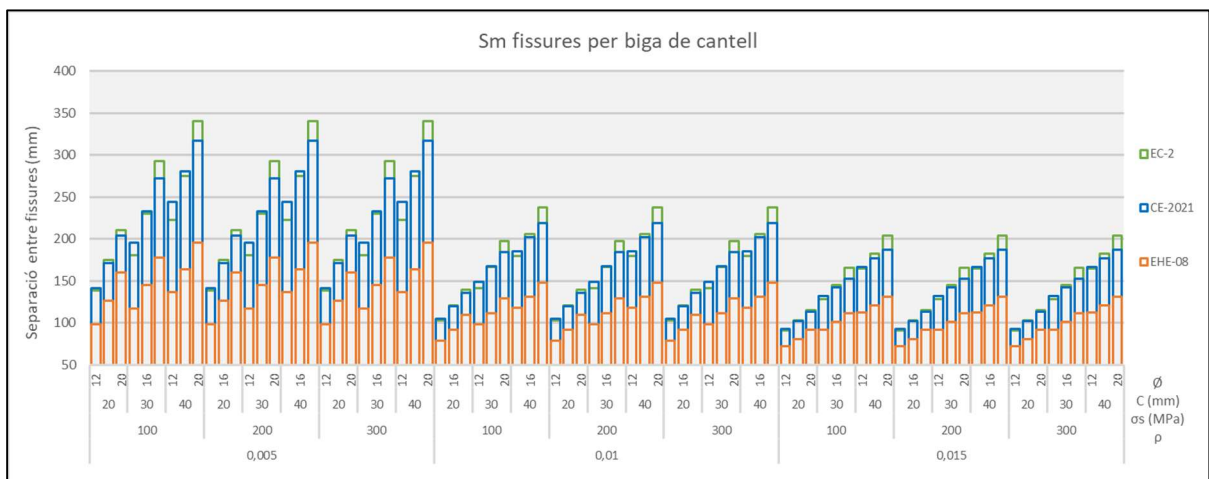
#### 4. SEPARACIÓ ENTRE FISSURES

Seguint doncs les formules predictives del càlcul d'amplada de fissura, el primer paràmetre a analitzar serà la separació entre fissures i conseqüentment, els paràmetres que poden alterar de forma directa o indirecta. Recapitulant dels apartats anteriors, les equacions que determinen aquest paràmetre son:

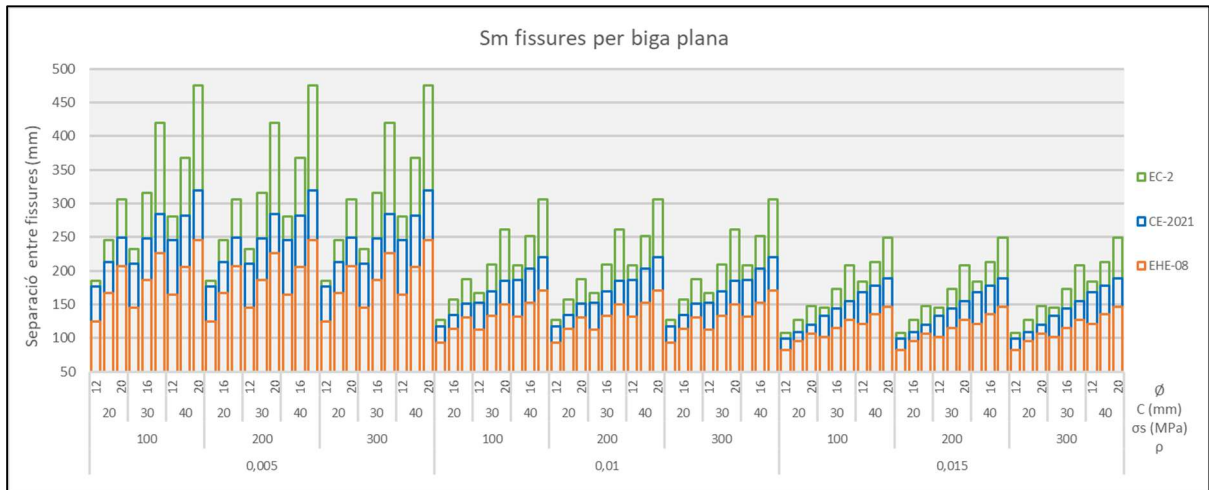
Normativa	Equació
<b>EHE-08</b>	$S_m = 2 \cdot c + 0.2 \cdot s + 0,4 \cdot k_1 \cdot \frac{\phi}{p_{ef}}$
<b>CE-2021</b>	$S_{rmax} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{p_{ef}}$
<b>EC-2</b>	$S_{rm} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{p_{ef}}$

Taula 5: formulació separació entre fissures segons normatives.

Predicts els 81 casos per cada una de les 3 normatives i tipus de biga, els resultats son els següents:



Gràfic 1 Resultats predictius separació mitjana entre fissures per biga de cantell.



Gràfic 2: Resultats predictius separació mitjana entre fissures per biga plana.

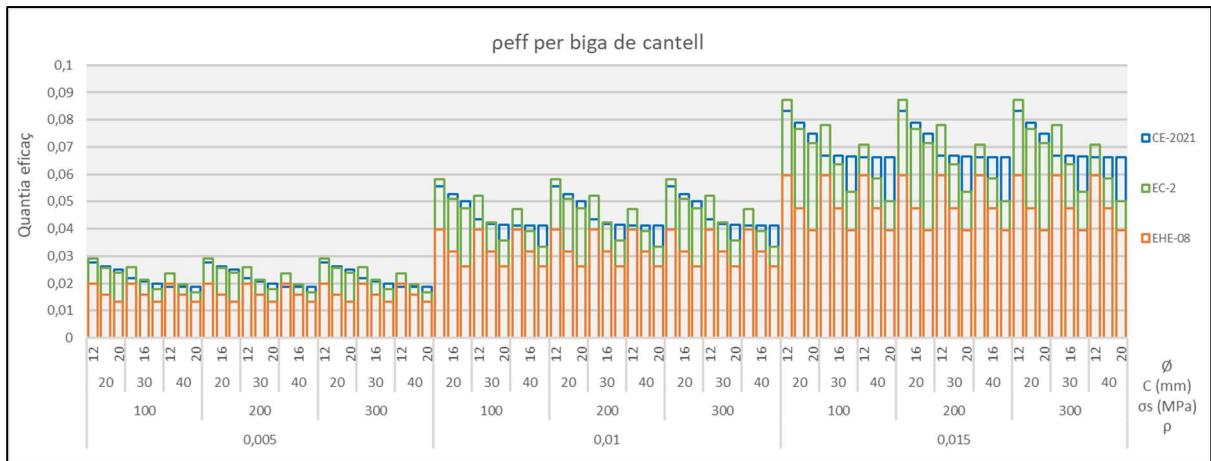
Així doncs, en ambdós casos la normativa que prediu una separació entre fissures major és el nou EC-2, seguit del CE-2021 i de l'EHE-08. Al final del capítol s'analitzarà normativa per normativa de forma global la diferència de resultats entre les dues geometries, però primerament, observant la comparativa directa amb els paràmetres fixats es pot veure que:

- Augmentant la quantia, augmenta l'àrea d'armat, fet que augmentaria el nombre de barres i disminuiria la separació entre elles (afecta directament només en l'EHE), el que resulta també en augment de la quantia efectiva, que es el paràmetre que més altera la predicció conjuntament amb el diàmetre i l'altura efectiva, els quals es veuran seguidament.
- La tensió de l'armadura no afecta en cap cas la separació entre fissures tal com es pot comprovar anteriorment en les equacions.
- Seguint les equacions de la Taula 5, el recobriment, juntament amb la relació diàmetre/quantia efectiva, condueixen a que el creixement de la separació entre fissures tingui una tendència lineal. Si es prescindís del recobriment, aquesta tendència seria en forma de dent de serra contínuament, tal com es pot veure en el Gràfic 39 de l'Annex C.1.
- El diàmetre conjuntament amb la quantia és un dels paràmetres que també afecten més a la separació. Principalment per la ràtio diàmetre/quantia efectiva, però també indirectament a aquesta última perquè modifica el cantell i de retruc la posició de la línia neutra i en conseqüència, l'altura efectiva en algun cas, principalment en el CE-2021.

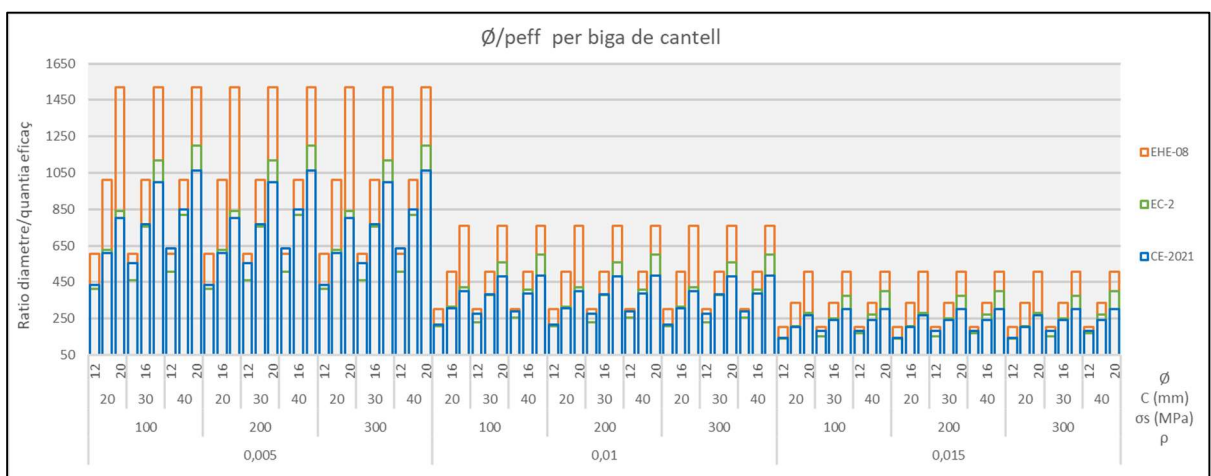
Amb aquesta visió global es procedeix a analitzar els principals paràmetres que modifiquen en major part la separació entre fissures.

#### 4.1. Quantia eficaç

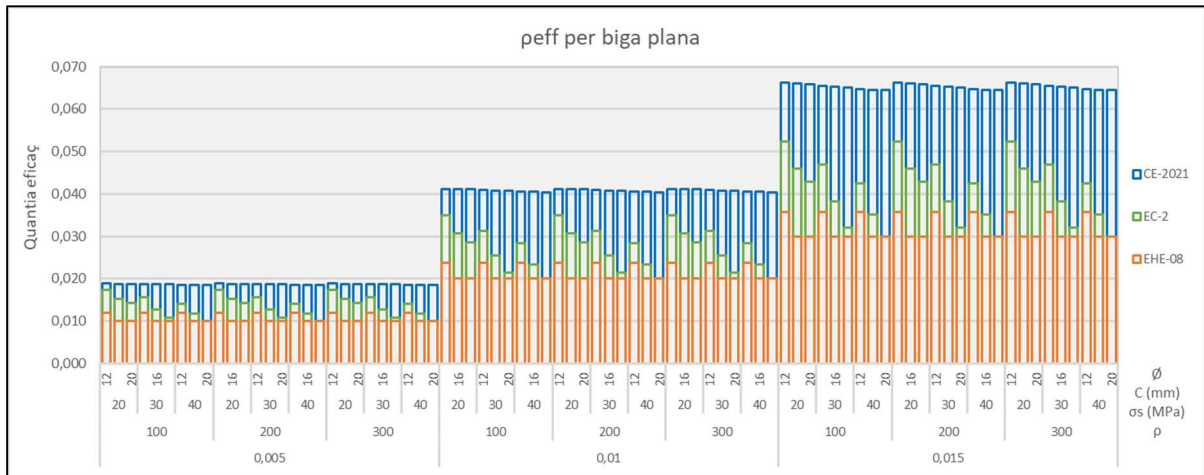
La quantia eficaç és el paràmetre que relaciona l'àrea d'armat amb l'àrea de formigó eficaç ( $\frac{A_s}{A_{cef}}$ ), tot i això en aquest estudi, el paràmetre que convé més estudiar és la ràtio entre el diàmetre de l'armat amb el paràmetre en qüestió. A continuació es presenten els resultats per la quantia eficaç i la ràtio amb el diàmetre de les barres d'armat.



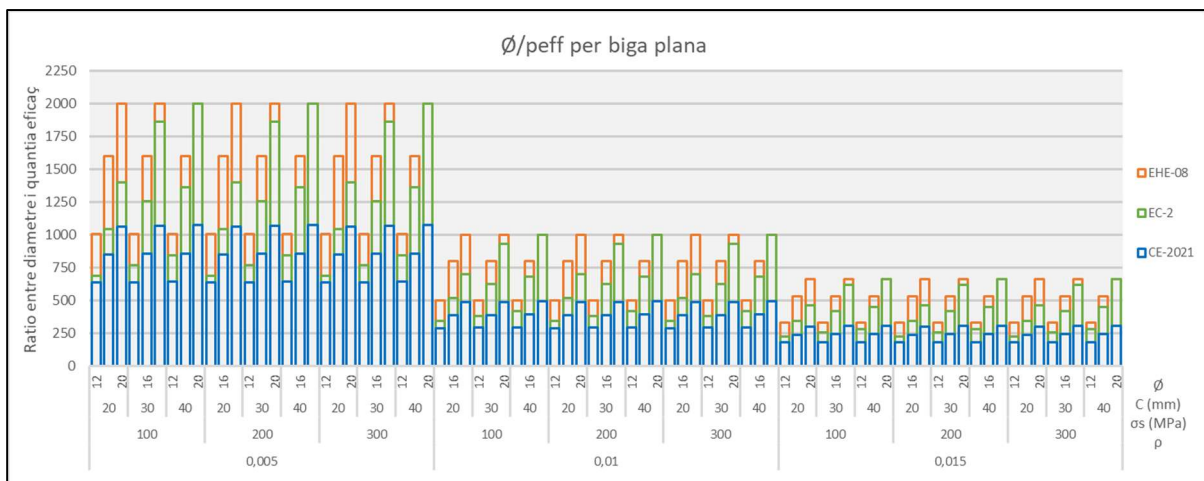
Gràfic 3: quantia eficaç per biga de cantell



Gràfic 4: relació  $\frac{\phi}{p_{ef}}$  per biga de cantell



Gràfic 5: quantia efectiva per biga plana



Gràfic 6: relació  $\frac{\phi}{p_{ef}}$  per biga plana

Primerament, es pot veure que l'únic paràmetre influent és la pròpia quantia geomètrica d'armat, i en menor part el diàmetre. A major quantia, major quantitat armadura i major quantia efectiva, per contra a major altura efectiva, major àrea efectiva de formigó i menor quantia efectiva. Ara bé, no sempre influeix de la mateixa forma, ja que per exemple l'EC-2 i el CE-2021 emprant la mateixa fórmula obtenen prediccions d'amplada de fissura diferents, però això es veurà al següent apartat.

Ara bé, el que si és necessari mirar les formulacions, és per entendre perquè si la ràtio diàmetre/quantia efectiva és la més gran per l'EHE-08, perquè en el moment de predir la separació entre fissures s'obté la menor entre les tres normatives.



Normativa	Multiplicador ràtio	Constants	Total
<b>EHE-08</b>	$0,4 \cdot k_1 \cdot \frac{\phi}{p_{ef}}$	$k_1 = 0,125$	$0,05 \cdot \frac{\phi}{p_{ef}}$
<b>CE-2021</b> <b>EC-2</b>	$k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{p_{ef}}$	$k_1 = 0,8$ $k_2 = 0,5$ $k_4 = 0,425$	$0,17 \cdot \frac{\phi}{p_{ef}}$

Taula 6: multiplicador terme  $\frac{\phi}{p_{ef}}$

Així doncs, per la formulació la ràtio pel CE-2021 i l'EC-2 es redueix de l'ordre de poc més del triple respecte la de l'EHE. Tenint en compte que, sense aplicar la formulació la diferència entre la ràtio comparant EHE i CE-2021, és de 2,5 vegades per la biga de cantell i de 2,1 per la biga plana, inferior comparant EHE i Eurocodi, al realitzar la minoració es produeix l'efecte esmentat anterior, al qual s'ha d'afegir la majoració del recobriment (2 per l'EHE i 3,4 per la resta), tot i que es compensa mínimament amb el 20% de la separació de les barres.

#### 4.2. Alçada eficaç

Com s'ha mencionat anteriorment, l'alçada eficaç és el paràmetre principal que modifica la quantia eficaç, ja que afecta directament a l'àrea eficaç del formigó ( $A_{cef} = b \cdot h_{ef}$ ), així com també és el paràmetre que diferenciava els valors de separació de fissura, entre el CE-2021 i l'EC-2. Recuperant de les formulacions es calcula:

Normativa	Alçada Eficaç	
<b>EHE-08</b>	$h_{ef} = \min\left(c + \frac{\phi}{2} + 7.5 \cdot \phi; \frac{h}{2}\right)$	[Eq.19]
<b>CE-2021</b>	$h_{ef} = \min\left(2.5 \cdot (h - d); \frac{h-x}{3}; \frac{h}{2}\right)$	[Eq.20]
<b>EC-2</b>	$h_{ef} = \min(Ay, i + 5\phi; 10\phi; 3.5 \cdot Ay, i)$	[Eq.21]

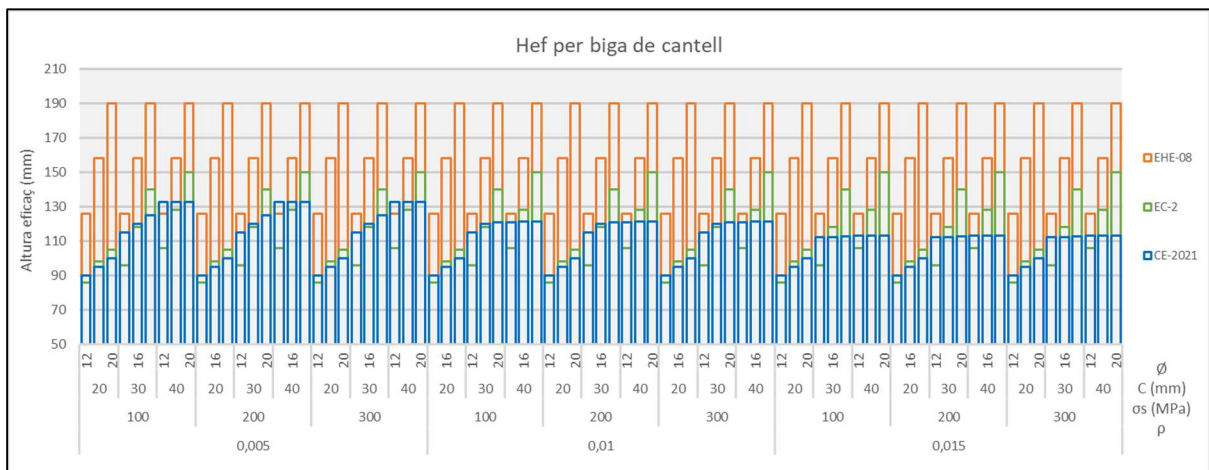
Taula 7: formulació alçada eficaç segons normativa

Com es pot veure doncs, la major part de les equacions venen definides per paràmetres prèviament definits per la realització de l'estudi com el recobriment, el diàmetre d'armat o l'alçada de la biga, ( $A_{y,i}$  equival a la suma del recobriment i la meitat del diàmetre d'armat, i  $d$  al cantell, que és la resta de la altura, amb el recobriment i la meitat del diàmetre, a fi de referència  $h-d$  equival a  $A_{y,i} + c + \phi/2$ ). Però també hi ha un paràmetre dins el CE-2021, que no es relaciona de forma tan directa amb els paràmetres fixats, aquest és la posició de la línia neutra ( $x$ ) que es calcula :

$$-b \cdot \frac{x^2}{2} + A_s \cdot n \cdot (d - x) = 0 \quad [\text{Eq.22}]$$

On  $n$  és la relació entre els mòduls de deformació de l'acer i el formigó, aquest últim variant en funció de la normativa.

A continuació es mostren els resultats per cadascun dels casos:

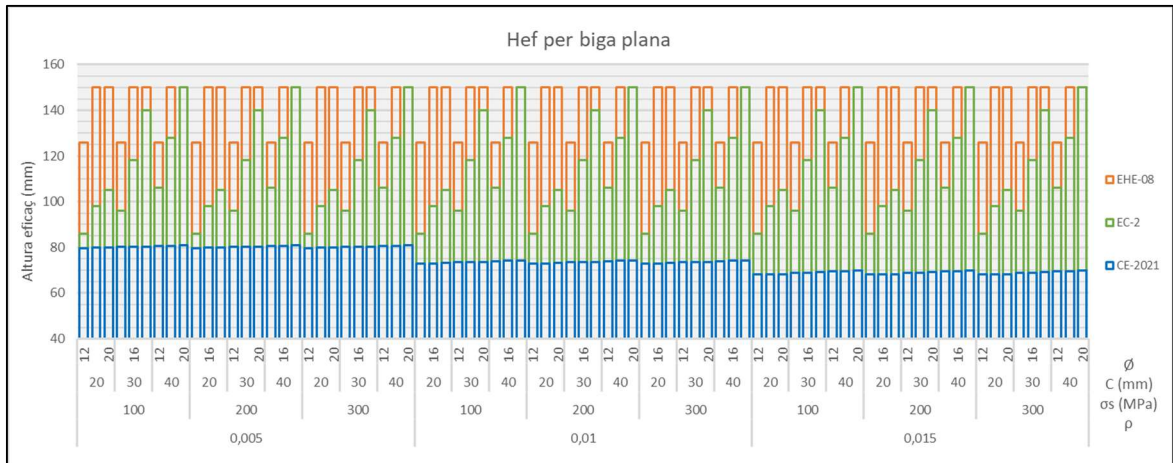


Gràfic 7: Valors de l'alçada efectiva segons normativa per biga de cantell

Contextualitzant el gràfic:

- Per aquesta geometria, per L'EHE s'utilitza sempre el primer terme de l'equació a comparar.
- Pel CE-2021, per quantia 0,005 s'empra sempre el primer terme, mentre que per 0,01, s'utilitza el segon terme per recobriment 40 i diàmetre 20 (molt ajustat amb ídem recobriment però diàmetre 16), i per quantia 0,015 també s'utilitza el segon terme en tots els casos amb recobriment 40, d'aquí aquesta tendència d'aplanament al final.

- Per l'EC-2 s'utilitza el primer terme en la majoria de casos, tret dels casos amb recobriment 20 i diàmetres 16 i 20 on s'empra el tercer. Destacar també els casos amb recobriment 30 i diàmetre 20 on el 1r i el 3r terme s'igualen.



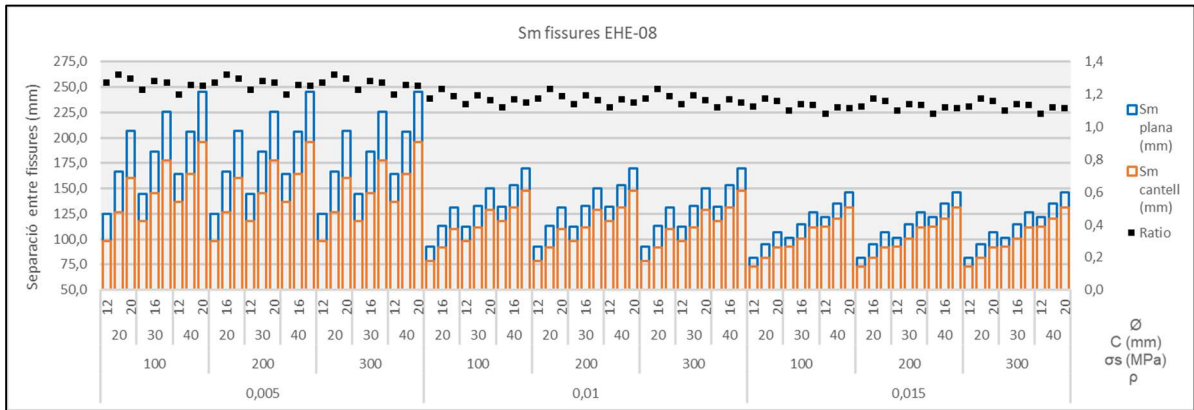
Gràfic 8: Valors de l'alçada efectiva segons normativa per biga plana

Contextualitzant el gràfic:

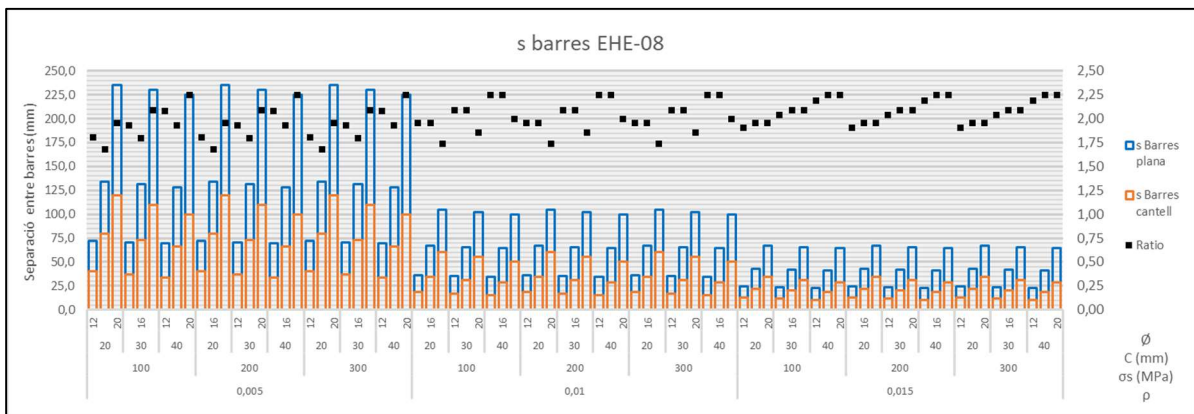
- Per aquesta geometria, per L'EHE s'utilitza sempre el primer terme de l'equació per diàmetre d'armat 12, en la resta de casos sempre és  $h/2$ .
- Pel CE-2021, per quantia 0,005 s'empra el primer terme per recobriment 20 i el segon per la resta, mentre que per 0,01, el comportament és similar pel mateix recobriment però només per diàmetres 12 i 16 i per quantia 0,015 idènticament però només per diàmetre 12, d'aquí a aquesta tendència cada cop més aplanada del gràfic.
- Per l'EC-2 no hi ha cap canvi respecte la biga de cantell perquè els valors són idèntics, ja que tot depèn dels paràmetres prèviament fixats, excepte l'altura de la biga, que seria el que trencaria la igualtat.

### 4.3. Comparativa de la separació entre fissures entre biga plana i de cantell.

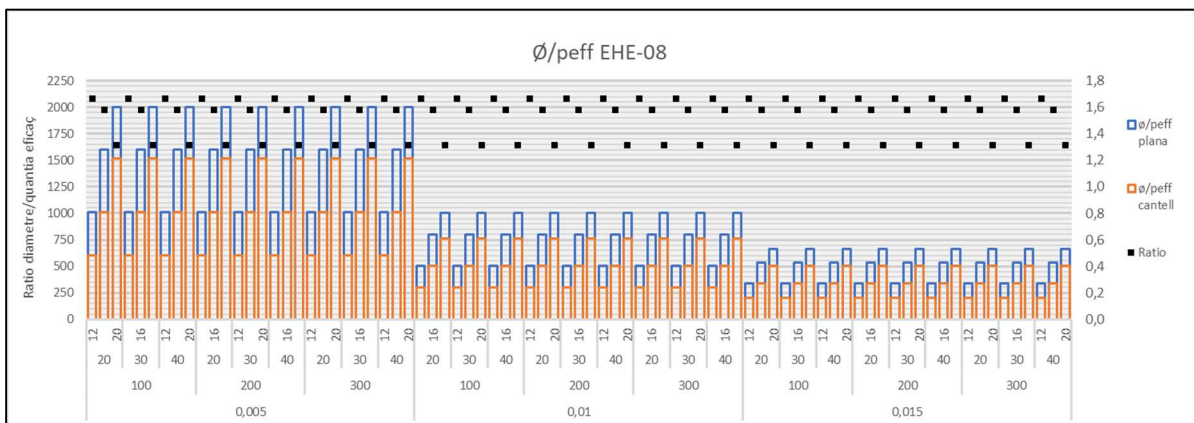
#### 4.3.1. Comparativa EHE-08:



Gràfic 9: Valors de la separació entre fissures segons EHE-08



Gràfic 10: Valors de la separació entre barres



Gràfic 11: relació  $\frac{\phi}{p_{ef}}$  per EHE-08

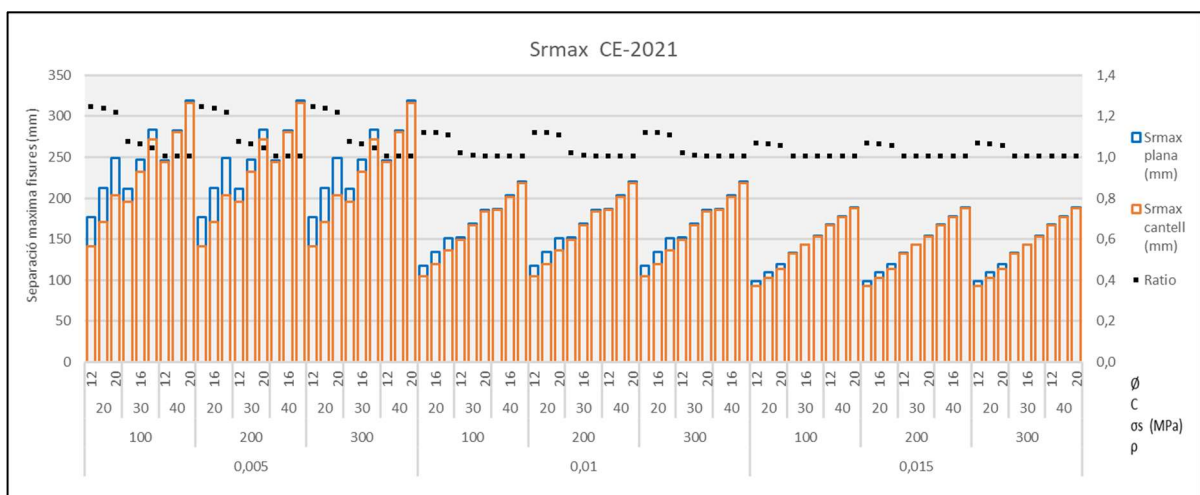
En general doncs, la biga plana té una separació entre fissures major per dos motius que deriven d'un mateix paràmetre: l'amplada. Primerament, en la separació entre barres, tot i que l'àrea de la biga plana sigui el doble que la de cantell i això implica que a mateixa quantia d'armat, doble d'àrea i doble de barres, al ser una amplada 1000 mm i l'altra 300, la separació entre elles és major a la plana.

I en segon lloc, en l'àrea efectiva, que implica la ràtio  $\frac{\phi}{p_{ef}}$ . Tret per  $\phi=20\text{mm}$  on la biga de cantell té major alçada efectiva, per la resta de diàmetres la diferència d'alçades efectiva és mínima per no dir nul·la ( $>5\%$ ).

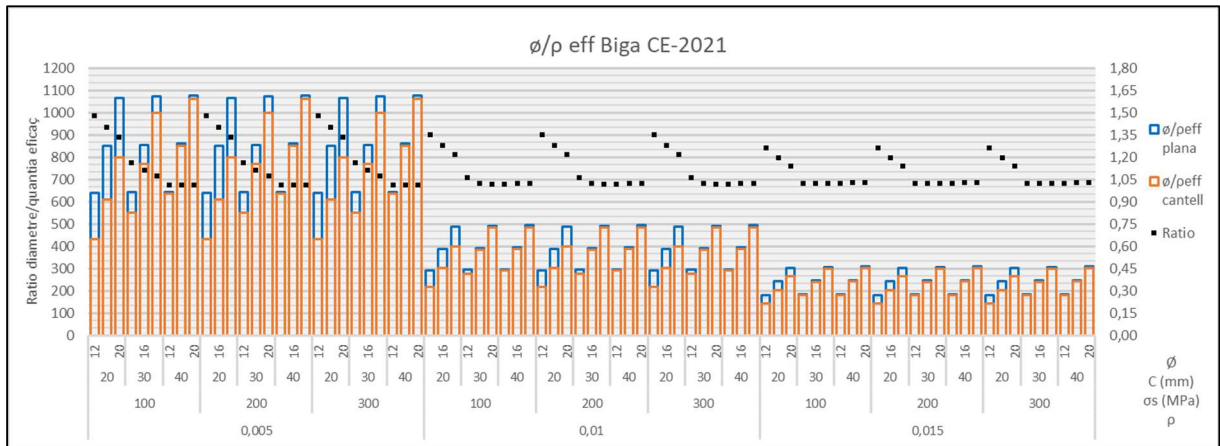
Per això com l'amplada de la biga és de més del doble, la biga de cantell té major quantia efectiva, la qual és converteix en menor ràtio  $\frac{\phi}{p_{ef}}$ , i sumat a la separació entre barres, menor separació entre fissures.

Respecte a la separació entre barres, algunes combinacions de paràmetres preestablerts obtenen unes separacions menors a les marcades per la normativa, estrictament aquestes combinacions s'haurien d'haver descartat, o s'hauria d'haver optat per agrupar barres calculant el diàmetre equivalent, o situar-les en vàries files, tot i això al ser un estudi plenament predictiu s'ha considerat no realitzar cap acció addicional.

**4.3.2. Comparativa CE-2021:**

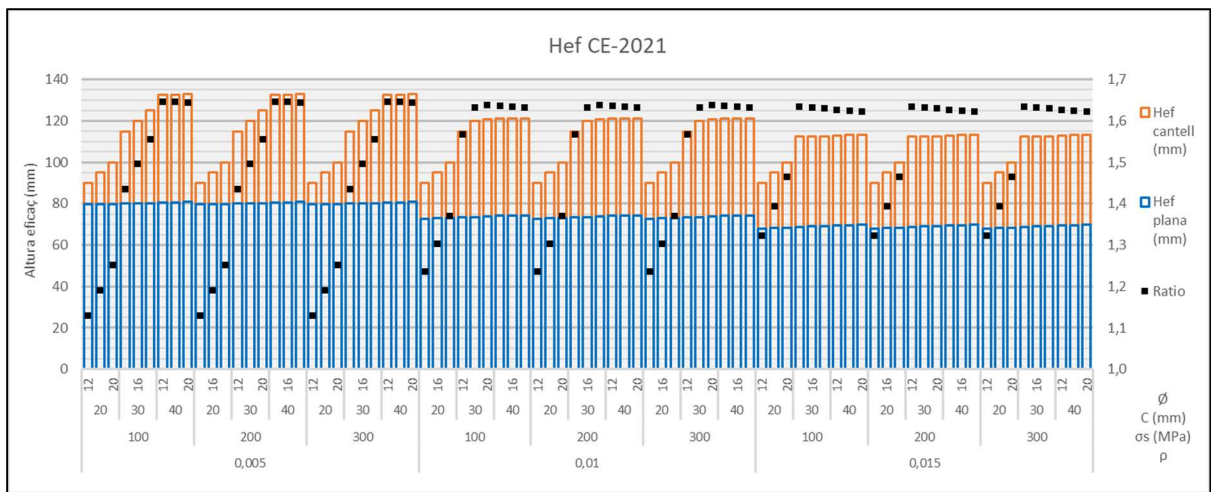


Gràfic 12: Valors de la separació entre fissures segons CE-2021



Gràfic 13: relació  $\frac{\phi}{p_{ef}}$  per CE-2021

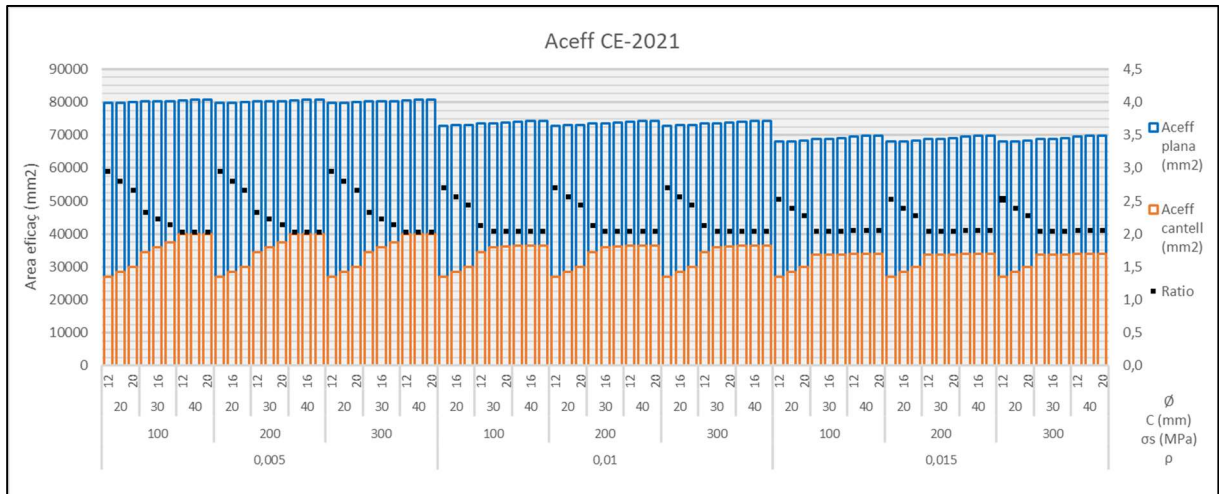
De primeres, es pot veure que a més armadura i més recobriment més igualtat entre les dues bigues. Ara bé, per entendre millor el motiu de perquè s'igualen les prediccions, és necessari recuperar les gràfiques comparatives, i els termes de l'equació de l'alçada efectiva.



Gràfic 14: Valors de l'alçada efectiva segons CE-2021

Com es veu l'alçada efectiva per la biga plana és pràcticament constant, tret pel recobriment mínim, en canvi, per la biga de cantell la tendència es més ascendent. Principalment, perquè en la majoria de casos, en el primer cas s'empra el terme relacionat amb l'altura de la biga i la posició de la línia neutra, i en el segon cas, principalment el terme relacionat amb l'altura i el cantell. Ara bé, la clau la igualtat obtinguda amb els paràmetres de l'estudi, es situa en la tendència de la relació entre les dues alçades, i és que aquesta va de 1,1 a 1,63.

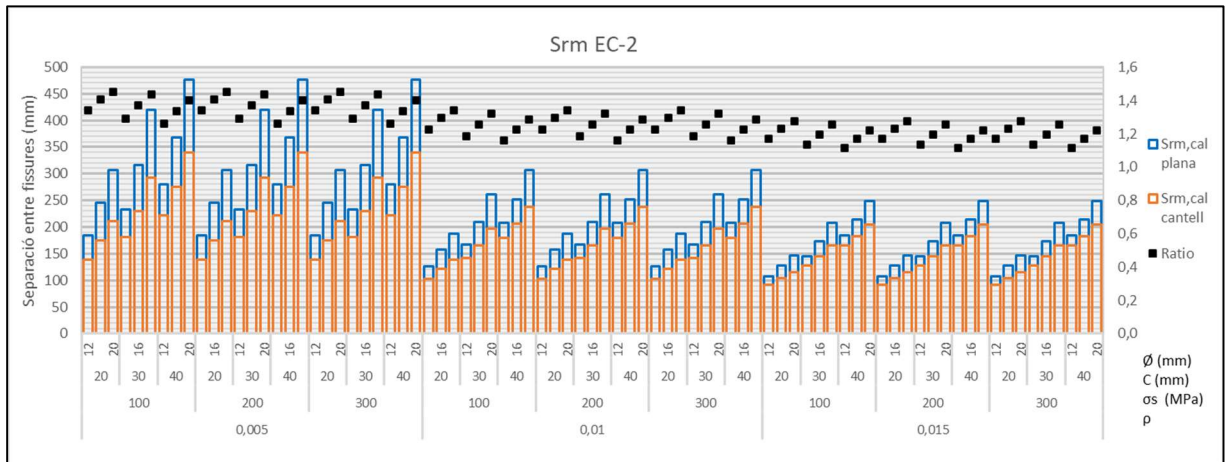
Amb els resultats de l'alçada efectiva s'obté l'àrea efectiva del formigó, que és el pas previ a obtenir la quantia efectiva:



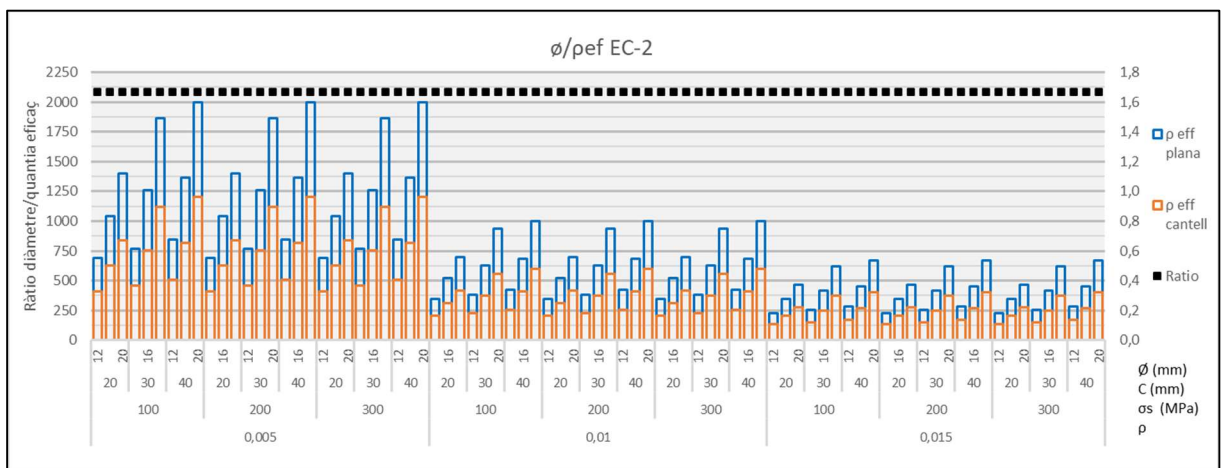
Gràfic 15: Valors de l'àrea efectiva per CE-2021

Observant les ràtios d'aquest últim gràfic, aquesta va de 3,33 a 2,0. Recapitulant de les dades inicials, les dimensions d'ambdues bigues eren de 1000x300 mm i 300x500 mm respectivament, per tant, l'amplada de la biga plana és 3,33 vegades major a la de la cantell, i a la vegada, té el doble de superfície que la de cantell. Si es divideix:  $\frac{3,33}{1,63} = 2,0$  que és la ràtio de l'  $A_{ceff}$ , per tant, a igual diferència entre superfície de la biga i àrea efectiva, amb quanties d'armadura comunes, fa que s'igualin les quanties efectiva, i recuperant l'equació de la separació entre fissures, com la resta de termes són constants o paràmetres fixats com és el recobriment, acaba resultant en la igualtat entre les dues bigues.

### 4.3.3. Comparativa EC-2



Gràfic 16: Valors de la separació entre fissures segons EC-2



Gràfic 17: relació  $\frac{\phi}{p_{ef}}$  per EC-2

En el cas del nou Eurocodi, la conclusió és similar a la de l'EHE-08, amb l'única diferència que tal com s'ha vist anteriorment, l'altura efectiva és la mateixa per tots els casos per ambdues bigues, tal com es pot veure en l'annex C.3, Gràfic 43, deixant així com únic paràmetre diferencial la superfície de la secció de les pròpies bigues, concretament l'amplada, apart del recobriment, que és el "culpable" de que la ràtio de separació entre fissures no sigui igual de constant que en els passos previs.



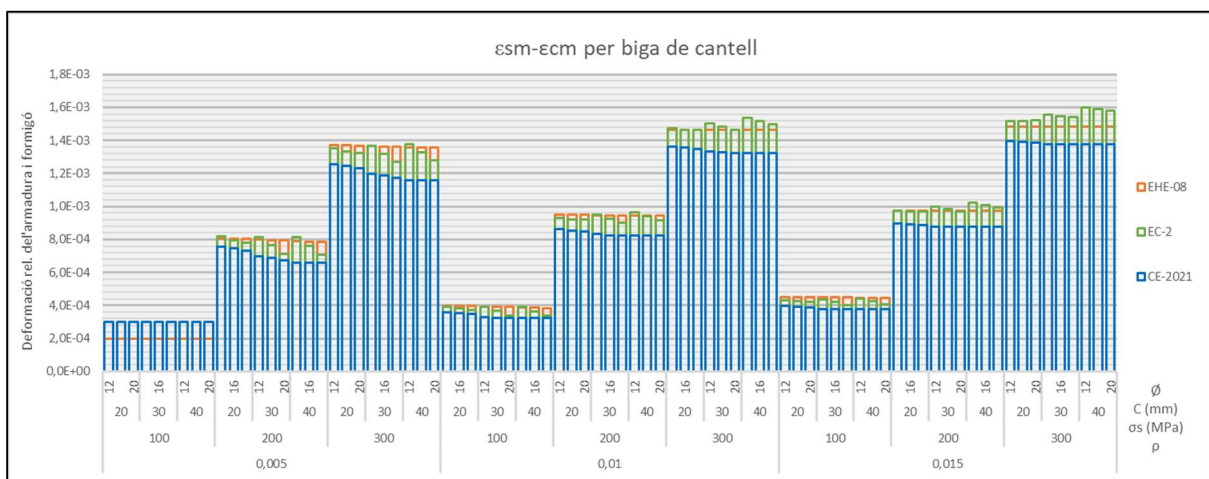
## 5. DEFORMACIÓ RELATIVA DE L'ARMAT LONGITUDINAL I DEL FORMIGÓ

El segon paràmetre principal a analitzar serà la deformació relativa de l'armat longitudinal i del formigó, i consegüentment els paràmetres que poden alterar de forma directa o indirecta. Recapitulant dels apartats anteriors, les equacions que determinen aquest paràmetre son:

Normativa	Equació
EHE-08	$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \left( 1 - k_2 \cdot \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right) \geq 0.4 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$
CE-2021	$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctef}}{p_{ef}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot p_{ef})}{E_s} \geq 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$
EC-2	$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = k_{1/r} \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctef}}{p_{ef}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot p_{ef})}{E_s} \geq 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$

Taula 8: Equacions de la deformació de l'armat longitudinal

Predits els 81 casos per cada una de les 3 normatives i tipus de biga, els resultats son els següents:



Gràfic 18: Deformació de l'armat per biga de cantell, en funció de cada normativa



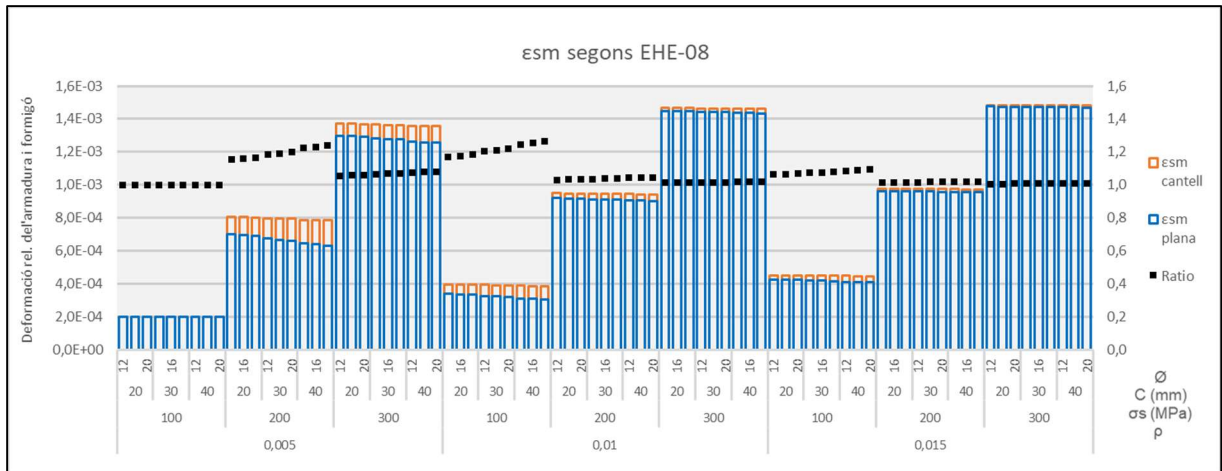
Gràfic 19: Deformació de l'armat per biga plana, en funció de cada normativa

A diferència de la separació entre fissures, no s'observa una tendència clara sobre quina normativa prediu una deformació més gran en la majoria de casos. Així com en els primers casos s'empra el segon terme de l'equació on el resultat és constant, tant el CE-2021 com l'EC-2 obtenen majors deformacions que l'EHE-08. Llavors, a partir de l'aplicació del terme principal, és l'EHE-08 el que obté major deformació seguit de l'EC-2 i el CE-2021 pel cas de la biga de cantell, i a la inversa per la biga plana, fins als últims casos on l'ordre és EC-2, EHE-08, CE-2021. Analitzant els 4 paràmetres predefinits inicialment:

- La tensió de l'armat és el paràmetre que més altera els gràfics i els càlculs. Òbviament es deu a que en totes les formulacions apareix el terme  $\frac{\sigma_s}{E_s}$ , fent que de partida a falta de la resta de l'equació, la deformació augmenti linealment amb la tensió.
- La quantia mecànica, el recobriment i el diàmetre tenen un efecte nul per l'EHE-08 i minoritari per la resta de normatives, ja que afecten només a la quantia eficaç.

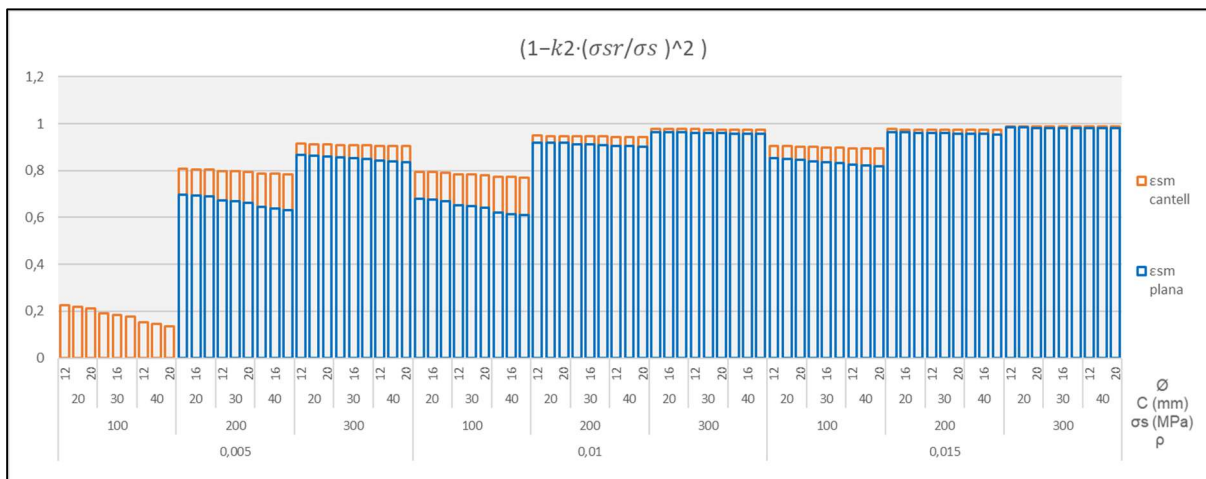
Amb aquesta visió global, i degut a la quantitat de diferents paràmetres que intervenen a cada normativa l'anàlisi de la deformació serà per cadascuna de les normatives, i posteriorment de cadascun dels paràmetres que hi intervenen.

5.1. Deformació relativa EHE-08



Gràfic 20: Deformació de l'armat per l'EHE-08

Analitzant l'equació de l'EHE, acaba resultant en  $\frac{\sigma_s}{E_s} \cdot ct$  on la constant és  $\left(1 - k_2 \cdot \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s}\right)^2\right)$ , on per tant quan aquesta constant és inferior a 0,4 és directament quan s'igualen ambdues deformacions. Així com es pot veure en el gràfic:



Gràfic 21: Constant multiplicadora del terme  $\frac{\sigma_s}{E_s}$

S'utilitza directament 0,4 per ambdues bigues en els casos de quantia mecànica 0,005 i tensió 100 MPa, on per la biga plana la constant és negativa, en canvi a majors tensions i quanties, la constant s'iguala, en part per la disminució de  $\sigma_{sr}$ , que com s'observa fa tendir-la cap a 1.

A continuació s'analitzaran els paràmetres que modifiquen aquesta constant:

### 5.1.1. Tensió de l'armadura en l'instant en que es fissura el formigó ( $\sigma_{sr}$ )

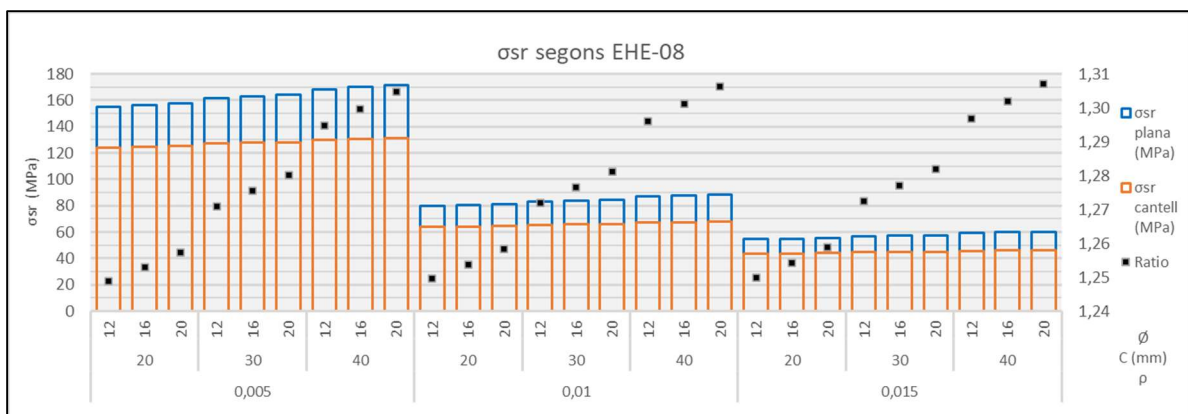
A diferència de la tensió predefinida de l'armadura  $\sigma_s$ , la qual és la de servei de la mateixa en la secció fissurada,  $\sigma_{sr}$ , en la mateixa secció fa referència al moment en el qual ja s'està fissurant.

La tensió en l'instant de fissuració només apareix de forma directa en l'EHE-08 i es calcula per:

$$\sigma_{sr} = \frac{n \cdot M_{fis} \cdot y}{I_f} \quad [\text{Eq.23}]$$

Ara bé tot i no aparèixer directament com a tal, per el CE-2021 i l'EC-2 el valor de la tensió es pot aproximar com es veurà quan s'analitzin aquestes dues normatives

Pels casos estudiats els resultats es mostren a continuació:



Gràfic 22: Tensió en l'instant de fissuració per l'EHE-08

Amb els resultats es pot veure es pot observar:

- La tensió a la que es sotmet l'armadura en servei, no influeix en la tensió en el moment en que es fissura el formigó, per aquest motiu i per no confondre no es representa en aquests gràfics.
- El paràmetre que més influeix és la quantia geomètrica que modifica principalment la inèrcia fissurada com es veurà seguidament.

- Tant el recobriment com el diàmetre tenen un efecte menor o gairebé nul ja que sols modifiquen el cantell a vistes de la posició de la línia neutra que altera l'altura  $y$ , i de nou, la inèrcia fissurada.

Per tant per entendre la diferencia de valors i de tendències de la tensió de l'armadura en l'instant de fissuració caldrà tornar a breument a la quantia eficaç, en el cas de l'EC-2 i del CE-2021, i de la inèrcia fissurada i la altura  $y$  per l'EHE-08, a més dels paràmetres que venen directa o indirectament fixats per la normativa o la geometria de la biga.

### 5.1.2. Resistència a flexo-tracció del formigó

Com el seu nom indica és la resistència del formigó a flexió en la part traccionada. Depèn de la resistència mitjana a tracció, definida en totes les normatives amb el valor de 2.9 MPa, per formigó de  $f_{ck} = 30$  MPa, i del cantell de la biga. Tot i que no apareix directament en l'EHE-08, es necessari obtenir-la per poder obtenir el moment de fissuració. Es calcula com:

$$Max\left(\left(1.6 - \frac{h}{1000}\right) \cdot f_{ctm}; f_{ctm}\right) \quad [\text{Eq.24}]$$

Els valors obtinguts son els següents:

Normativa	Geometria	Valor $f_{ctm}$ (MPa)	Valor $f_{ctm,fi}$ (MPa)
<b>EHE-08</b>	Plana	2,9	3,77
	Cantell		3,19
<b>CE-2021</b> <b>EC-2</b>	Ambdues	2,9	No s'aplica en formulació

*Taula 9: Valors de la resistència a flexo-tracció segons geometria i normativa*

Així doncs com s'observa la única diferència en la resistència a flexo-tracció recau en la geometria de cadascuna de les bigues, a major altura, menor resistència. Amb la resistència a flexo-tracció, es pot procedir a obtenir el moment de fissuració.

Per altra banda, tal com s'observa la resistència a flexo-tracció no s'empra ni en el CE-2021 ni en l'EC-2 sinó que s'utilitza directament la resistència a tracció sota la nomenclatura  $f_{ctef}$ , amb el valor de 2,9 MPa.

### 5.1.3. Moment de fissuració

Definit com l'esforç produït en el punt més extern de la secció en l'instant en què la tensió arriba al valor de la resistència a flexo-tracció, i per tant, es comencen a generar fissures.

El moment de fissuració es calcula:

$$f_{ctm} * W_b = f_{ctm,ft} * \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 \quad [\text{Eq.25}]$$

On  $W_b$  fa referència al mòdul resistent de la secció. Els valors obtinguts son:

Normativa	Geometria	Valor $M_f$ (KN/m)
<b>EHE-08</b>	Plana	56,48
	Cantell	39,83
<b>Per CE-2021 i EC-2 no s'aplica el moment de fissuració en la formulació.</b>		

*Taula 10: Moments de fissuració obtinguts segons normativa i geometria*

Com es pot observar novament, la diferencia recau únicament en la geometria de la biga.

Així com abans en la resistència es comprovava que disminuïa contràriament a l'augment d'altura, en aquest cas és més complex veure una clara tendència per el mòdul resistent, principalment pels casos escollits per aquest estudi, els resultats dels quals son:

Geometria	Valor $W_b$ (mm <sup>3</sup> )
Plana	$1,5 \cdot 10^7$
Cantell	$1,25 \cdot 10^7$

Taula 11: Moment resistent en funció de la geometria

#### 5.1.4. Coeficient d'equivalència entre acer i formigó ( $\alpha_e$ o $n$ )

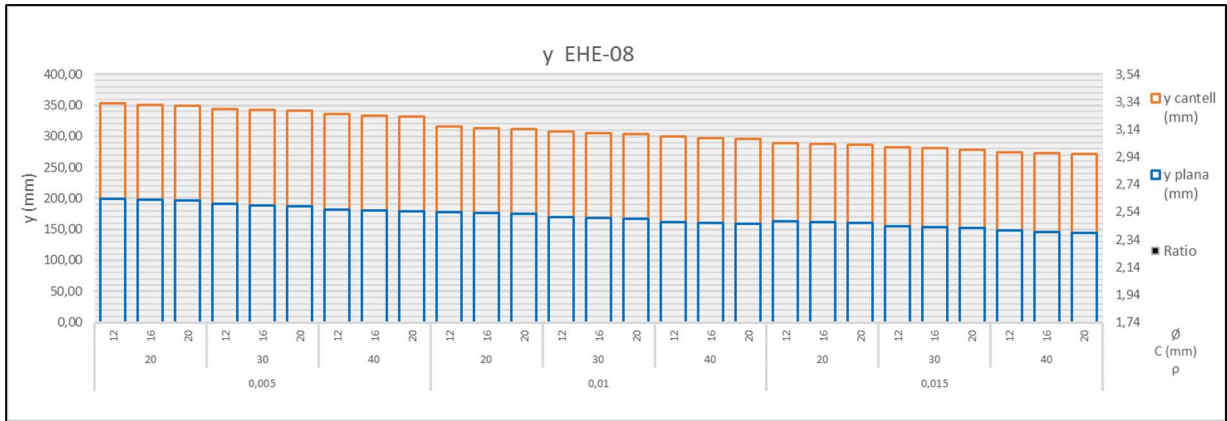
Aquest coeficient, no és més que la ràtio entre els mòduls elàstics de l'acer i del formigó. Com el seu nom indica, la finalitat d'aquest coeficient és igualar els efectes del material amb major mòdul elàstic amb el de menor, en qüestions com la posició de la línia neutra o les inèrcies, multiplicant l'àrea del primer per aquesta relació.

Normativa	$E_s$	Equació $E_{cm}$	$E_{cm}$	Valor $n$
EHE-08		$8500 * f_{cm}^{\frac{1}{3}}$	28577	6,99
CE-2021	200000	$22 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \cdot 1000$	32837	6,09
EC-2				

Taula 12: Relació dels mòduls elàstics de l'acer i del formigó segons cada Normativa

### 5.1.5. Distància de l'armadura a la posició de la línia Neutra (y)

La distància y només apareix en la formulació de l'EHE-08. Així doncs pels casos corresponents:



Gràfic 23: Distància y per l'EHE-08 en funció dels paràmetres definits.

D'aquí s'observa que els principals paràmetres que afecten a aquesta distància són el recobriment i el diàmetre, que són les que alteren directament el cantell de la biga, tot i que en menor part també afecten a la posició de la línia neutra, on la principal afectació recau en la quantia geomètrica.

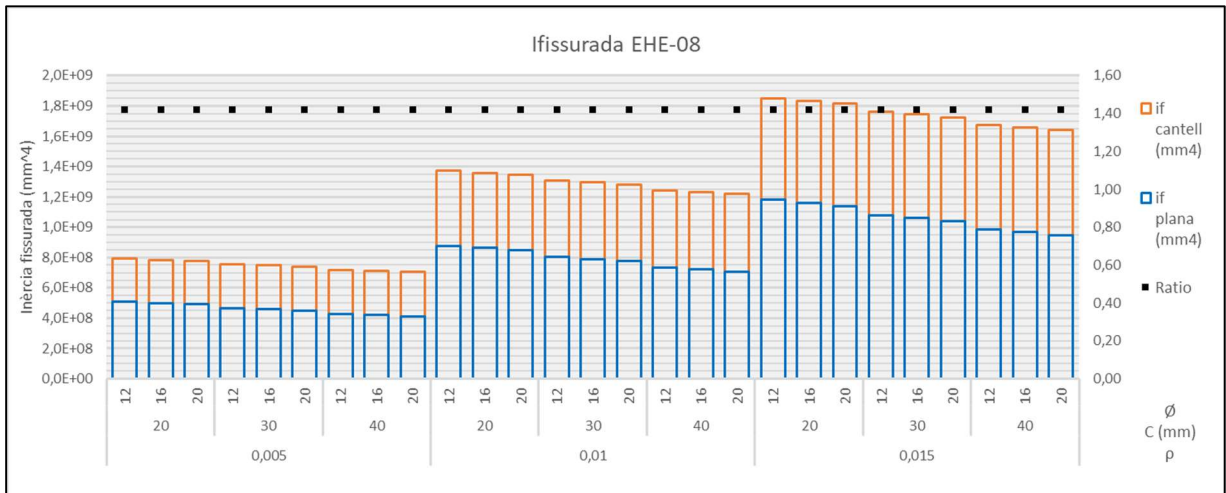
Així doncs, a major àrea d'armat, posició de la L.N més propera a l'extrem inferior, però per contra, a major recobriment i diàmetre, major cantell i per tant menor diferència entre ambdues

### 5.1.6. Inèrcia fissurada

Obtingudes la ràtio de entre els mòduls elàstics i la posició de la línia neutra es pot procedir a calcular la inèrcia fissurada a partir de :

$$I_f = \frac{b}{3} * x^3 + n \cdot A_s \cdot (D - x)^2 \quad [\text{Eq.26}]$$



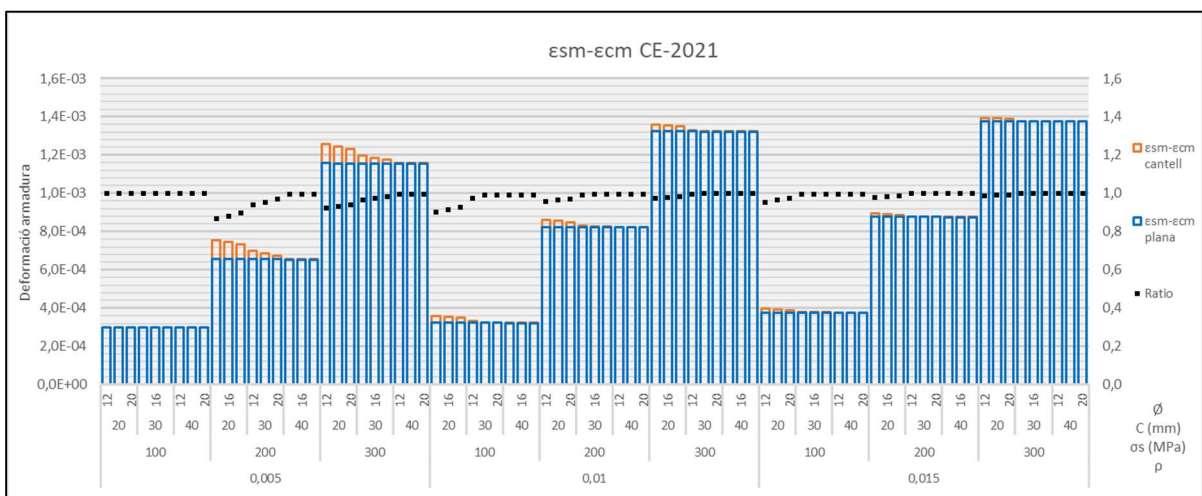


Gràfic 24: inèrcia fissurada per l'EHE-08 segons paràmetres definits

Com es pot observar, a major quantitat d'armadura més inèrcia, per contra, a menor cantell (es a dir, major recobriment i diàmetre), aquesta disminueix lleugerament, motiu també pel qual la biga de cantell té aquesta diferència considerable respecte la plana.

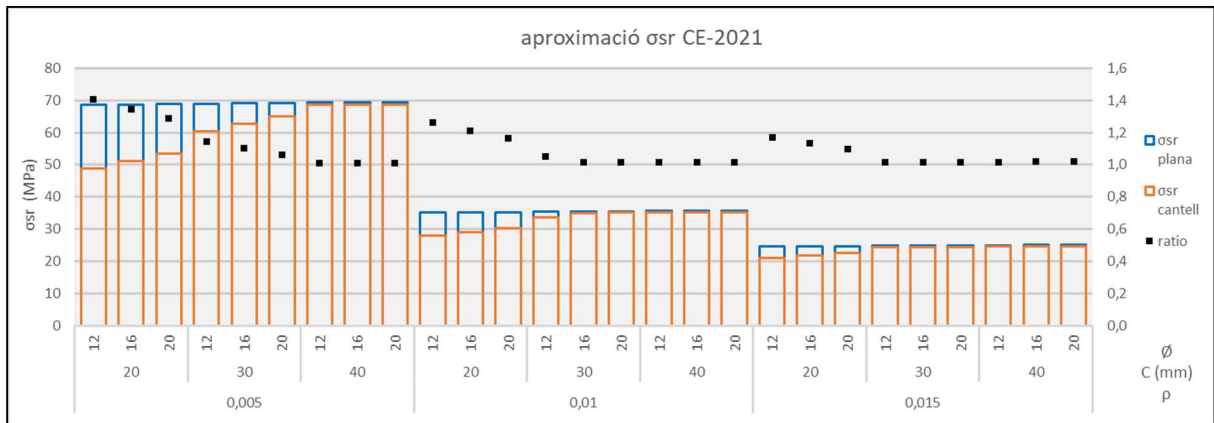
Així doncs, com la majoria tant la distància “y” com la inèrcia fissurada son els dos paràmetres principals que modifiquen la tensió a l'instant de fissuració i en menor mesura la deformació de l'armat, ja que en tots els casos és la relació  $\sigma_s/E_s$ . A menor distància i major inèrcia, menor és  $\sigma_{sr}$  i pertant la constant tendeix cap a 1, deixant sense efecte la geometria de la biga.

## 5.2. Deformació relativa CE-2021



Gràfic 25: Deformació de l'armat segons CE-2021

Desengrantant l'equació de l'EHE, acaba resultant en una aproximació de  $\frac{\sigma_s - \sigma_{sr}}{E_s}$  on l'aproximació de  $\sigma_{sr}$  com s'ha mencionat anteriorment és  $k_t \cdot \frac{f_{ctef}}{\rho_{ef}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{ef})$ , on  $k_t$ , tal com s'ha comentat a l'apartat 2.2.2 és un coeficient de valor 0,5. Per tant quan la diferència entre  $\sigma_s - \sigma_{sr}$  és de l'ordre de 0,6 vegades  $\sigma_s$ , és directament quan s'igualen ambdues deformacions per la utilització del segon terme. Així com es pot veure en el gràfic:

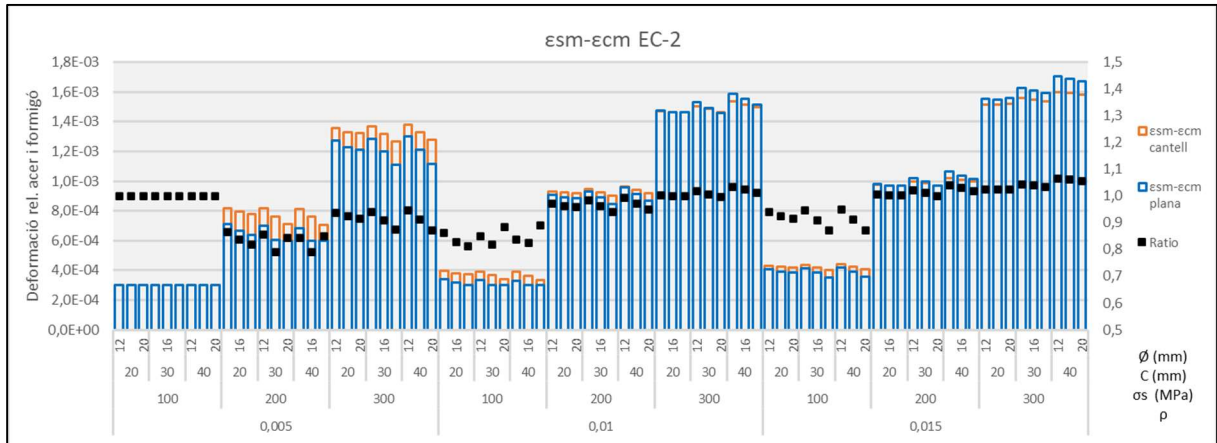


Gràfic 26 Aproximació de la tensió en l'instant de fissuració segons CE-2021

Així doncs, s'obtenen uns valors bastant menors respecte l'EHE-08, fet que comporta que la deformació també sigui inferior, de l'ordre d'entre un 5-15% per la biga plana, i fins a un 20% per la biga de cantell, tret dels casos amb menor armat i recobriment on s'utilitzava el terme constant, on és superior pel coeficient multiplicador de 0,6 vers el 0,4 de l'anterior normativa.

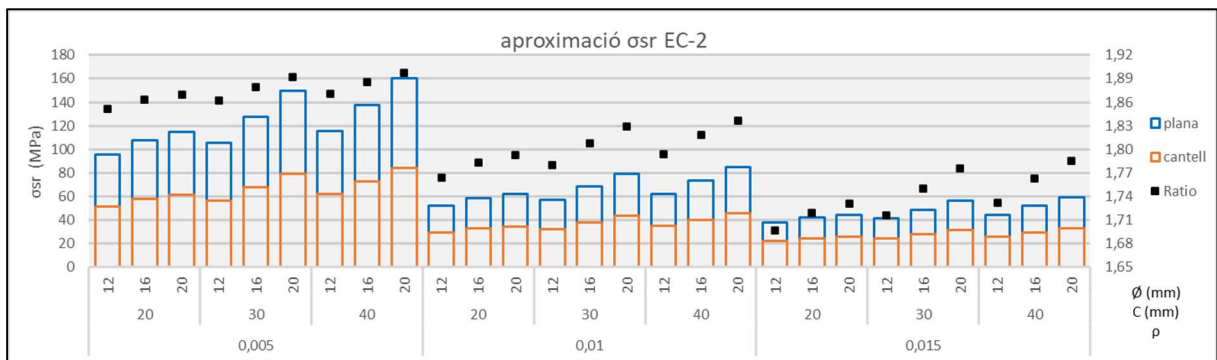
Abans de veure la quantia eficaç, es procedeix a veure la deformació segons l'EC-2 per poder realitzar una millor comparativa amb el CE-2021.

5.3. Deformació relativa EC-2



Gràfic 27: Deformació de l'armat segons EC-2

Desengrantant l'equació de l'EHE-08, acaba resultant en una aproximació de  $k_{1/r} \cdot \frac{\sigma_s - \sigma_{sr}}{E_s}$  on  $\sigma_{sr}$  torna a ser aproximadament  $k_t \cdot \frac{f_{ctef}}{p_{ef}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{ef})$  i  $k_t$  també pren el valor de 0,5. Aquí però també intervé el factor  $k_{1/r}$  que fa referència a la curvatura i que es veurà a continuació de l'aproximació de  $\sigma_{sr}$  i la comparativa de  $\rho_{ef}$ .

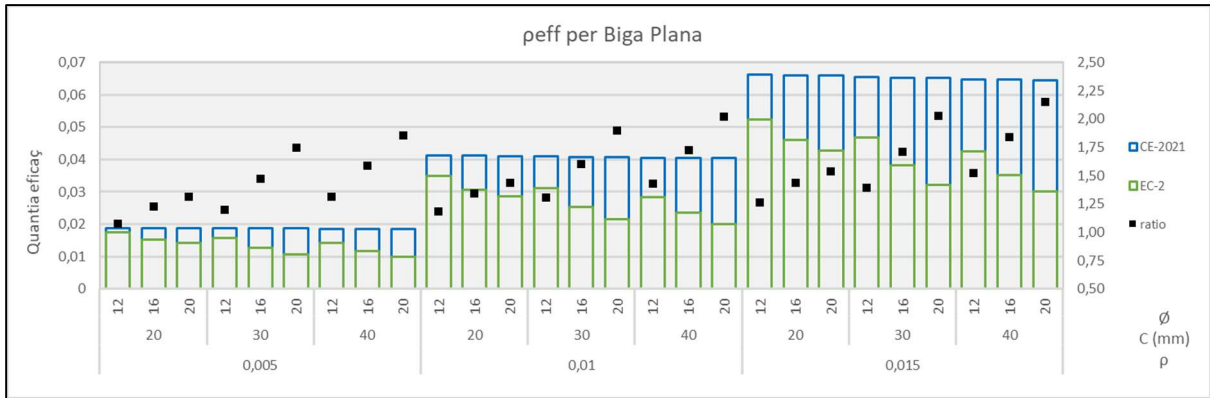


Gràfic 28: Aproximació de la tensió en l'instant de fissuració segons EC-2

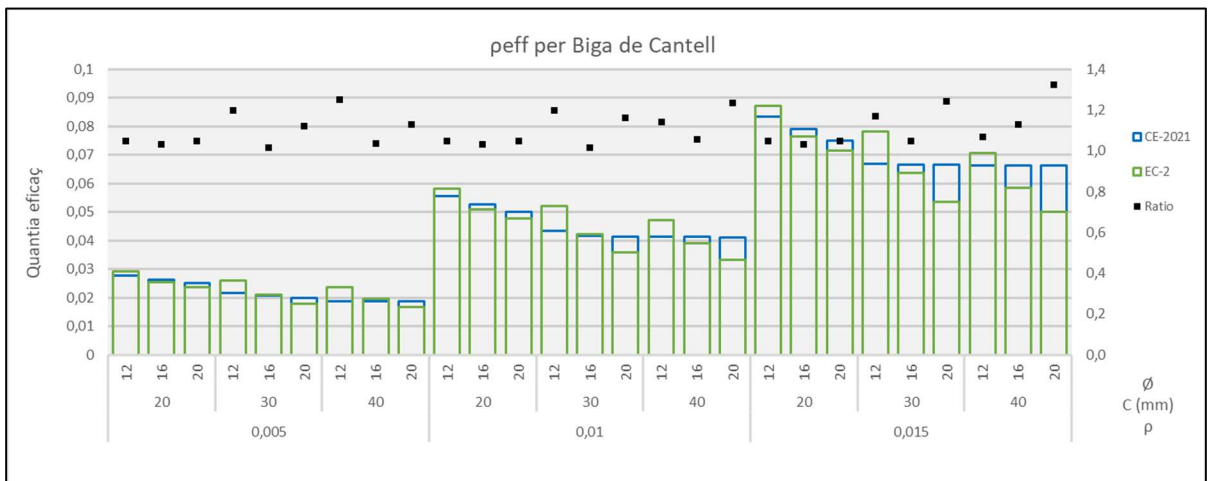
Comparant amb el CE-2021, els valors aproximats de la tensió en l'instant de fissuració son bastant superiors, principalment degut a l'efecte de la quantia eficaç, però determinant de primeres valors de deformació menors, a falta de veure l'efecte del factor de curvatura, com es veurà a continuació. D'altra banda però aquests valors segueixen lluny dels de l'EHE, tot i que a major quantitat d'armadura, aquests es comencen a aproximar, sobretot per les bigues planes, però com s'ha mencionat anteriorment, la comparativa directa només es realitzable amb el CE-2021.

### 5.3.1. Quantia eficaç

Com s'ha dit anteriorment per poder fer la comparativa directa entre normatives cal recuperar de l'apartat 4.1 la quantia eficaç, així doncs revisant els gràfics ara només per ambdues:



Gràfic 29: Quantia eficaç per biga plana segons CE-2021 i EC-2



Gràfic 30: Quantia eficaç per biga de cantell segons CE-2021 i EC-2

Tret d'algun cas puntual, es pot veure com el CE-21 tenia major quantia eficaç degut a que en general tenia menors alçades eficaç, que es tradueix en menors àrees eficaç. Això es tradueix en que clarament la diferència de tensions recaigui principalment en el terme  $\frac{f_{ctef}}{p_{ef}}$ , mentre que en el terme  $(1 + \alpha_e \cdot p_{ef})$ , l'efecte és molt menor.

Resumint en la següent taula:

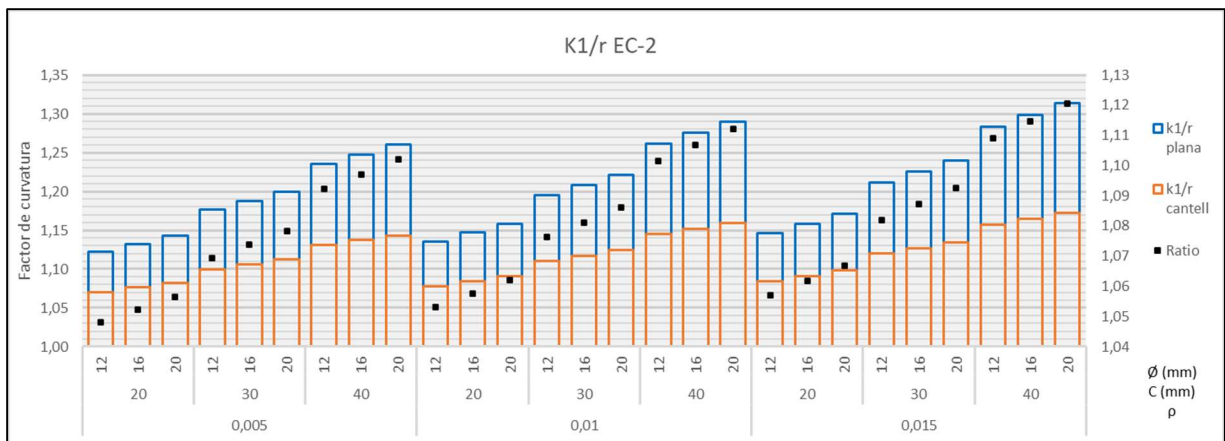
Normativa	Geometria	Rang aprox. valors	Rang aprox. valors
		$f_{ctef}/p_{ef}$	$(1 + \alpha_e \cdot p_{ef})$
CE-2021	Plana	55 - 200	1,1 - 1,4
	Cantell	30 - 160	1,1 - 1,7
EC-2	Plana	75 - 380	1,1 - 1,3
	Cantell	35 - 190	1,1 - 1,5

Taula 13: Valors multiplicands de l'aproximació de la tensió en l'instant de fissuració segons EC-2

### 5.3.2. Factor de curvatura $k_1/r$

Finalment, l'últim terme a veure en aquest apartat es el factor de curvatura. Aquest paràmetre s'aplica únicament en l'EC-2, i com el seu nom indica i s'ha mencionat anteriorment en la presentació de la normativa, és un multiplicador per considerar la curvatura de la biga en la deformació de l'armat, i que es calculava:

$$k_1/r = \frac{h-x}{(h-a_{y,i}-x)} \quad [\text{Eq.27}]$$



Gràfic 31: Valors del Factor de curvatura segons EC-2

Com es pot veure doncs la curvatura suposa un augment de la deformació d'entre un 7 a un 17% per la biga de cantell i d'un 12 a un 31% per les bigues planes. En el primer cas aquest augment suposa que les deformacions igualin o superin lleugerament a les del CE, mentre que per les planes, en la majoria de casos es compensen tret d'alguns ens que segueix essent inferior. Ara bé en els casos on l'efecte de la curvatura és major, com son els de major armat, amb màxim recobriment i menor diàmetre, aquesta arriba a superar fins i tot, la del EHE-08.

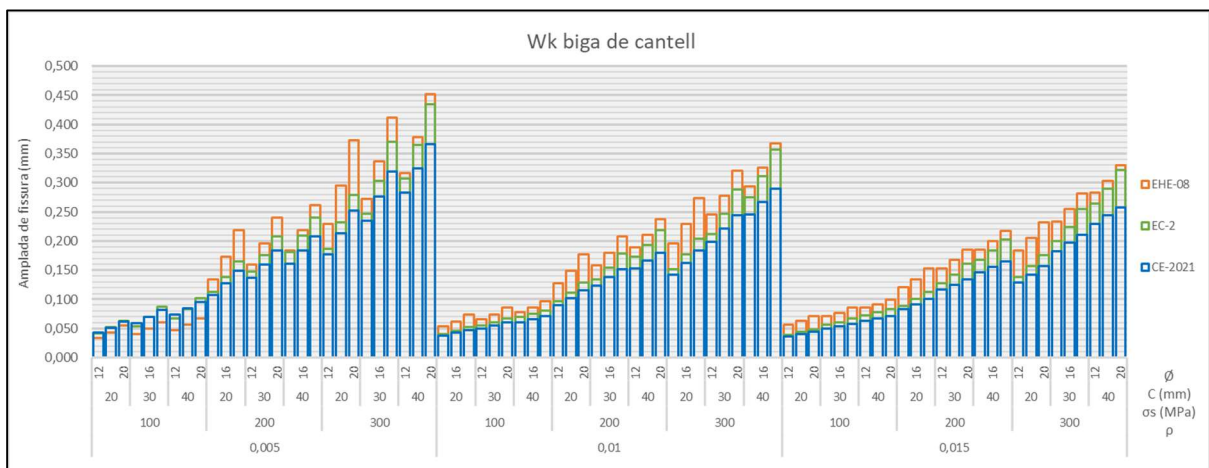
## 6. AMPLADA DE FISSURA

Vistos la separació entre fissures i la deformació de l'armat longitudinal, es pot procedir a veure el paràmetre que dona nom a l'estudi, l'amplada de fissura. Recapitulant dels apartats anteriors, les equacions que determinaven el paràmetre son:

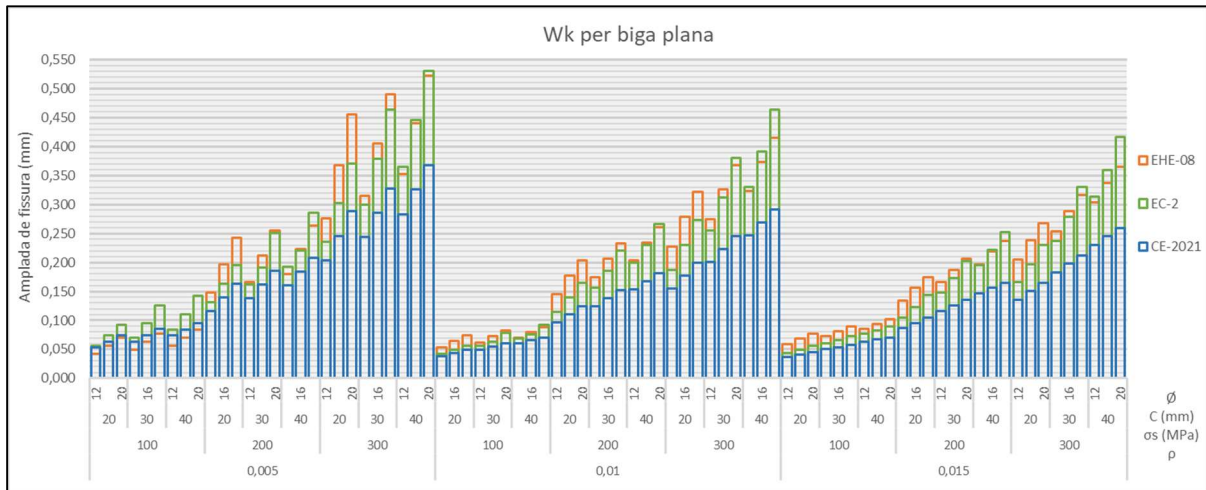
Normativa	Equació
<b>EHE-08</b>	$W_k = 1.7 \cdot S_m \cdot \varepsilon_{sm}$
<b>CE-2021</b>	$W_k = S_{rmax} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$
<b>EC-2</b>	$W_{kcal} = S_{rmcal} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$

Taula 14: Equacions de l'amplada de fissura

Pels 81 casos sotmesos a estudi, la predicció d'amplada de fissura és la següent:



Gràfic 32 Amplada de fissura per biga de cantell



Gràfic 33: Amplada de fissura per biga plana

Com s'observa així doncs l'EHE-08 és la norma que tret de casos puntuals, prediu majors amplades de fissura per les combinacions de paràmetres estudiats per ambdues tipologies de biga, seguit de l'EC-2, on puntualment es prediuen majors amplades, degudes a una diferència prou ampla de la separació entre fissures i/o una major deformació de l'armat. Finalment, el CE-2021 és la normativa que principalment prediu menors amplades de fissura, principalment degut a que és la que prediu menors deformacions, tot i que és la que prediu separacions més intermèdies.

Observant les equacions, pot semblar que l'EHE-08 fàcilment és la que preveurà les majors amplades degut a la constant multiplicadora d'1,7. Però recuperant les equacions de la separació entre fissures de l'apartat 4, taula 5, es pot observar que per l'EHE-08 el recobriment es multiplicava per 2, mentre que per les altres dues, on la separació era major, es multiplicava per 3,4, fet que compensa teòricament l'efecte d'aquest multiplicador de forma prèvia a la predicció de l'amplada.

Tot i això les ràtios de la diferència valors entre normatives és bastant considerable tal com s'observa en la següents taules:

Normativa	EHE-08 (valor superior)	CE-2021 (valor superior)	EC-2 (valor superior)
EHE-08			
CE-2021	1,45		1,24
EC-2	1,25		

Taula 15: Valor mitjà de les ràtios de diferencia de l'amplada per biga de cantell

Normativa	EHE-08 (valor superior)	CE-2021 (valor superior)	EC-2 (valor superior)
<b>EHE-08</b>			
<b>CE-2021</b>	1,42		1,16
<b>EC-2</b>	1,25		

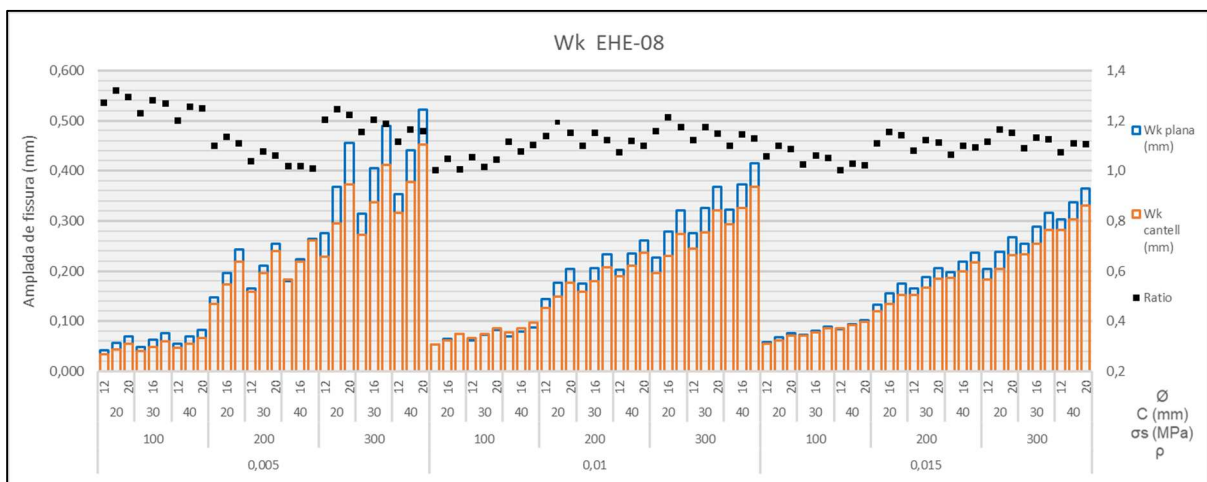
Taula 16: Valor mitjà de les ràtios de diferència de l'amplada per biga plana

La major o menor linealitat en el creixement depèn principalment de la tendència de creixement que tingui la separació entre fissures combinat amb els salts de la gràfica de la deformació i els ajustaments en que aquesta també pugui influir ja que tot i que majoritàriament la gràfica es molt estable, en alguns casos tenen alguna tendència decreixent més o menys pronunciada .

La importància dels paràmetres predefinits en l'amplada és la que s'observa en els gràfics: primerament la quantia mecànica, que influeix en la quantia eficaç per ambdós paràmetres de forma considerable, seguit de la tensió de servei de l'armat ( $\sigma_s$ ), que com s'ha vist influeix en els salts de la gràfica de la deformació, i finalment, tant el recobriment com el diàmetre que també influeixen en la quantia eficaç però amb un efecte menor, com directament en la separació entre fissures.

A continuació s'analitza l'amplada de fissura per les tres normatives:

### 6.1. Amplada de fissura EHE-08



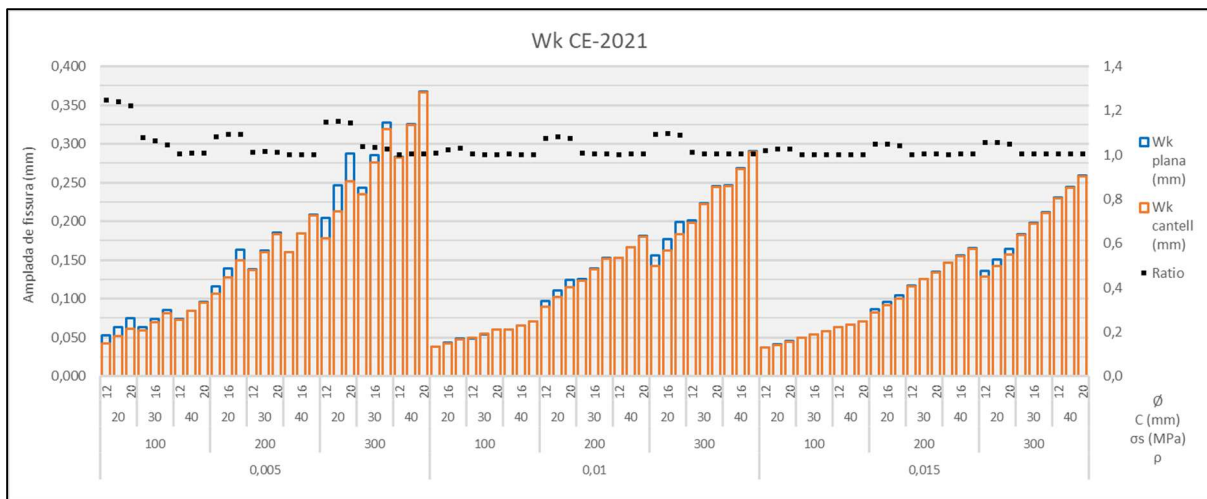
Gràfic 34 Amplada de fissura per l'EHE-08



Per l'EHE, s'observa com en general, per la biga plana, es prediuen uns valors d'amplada de fissura majors, degut principalment a la diferencia de separació entre fissures derivades de les quanties eficaces menor, i alhora que en part dels casos no compensa la diferencia amb la deformació de l'armat, que a majors quanties s'igualen, i per tant, es mantenen les diferències de la separació.

En quant la tendència de valors, s'observa com a menors tensions d'armat, el creixement de l'amplada es menor, i viceversa. Així com també a menors quantitats d'armat, el diàmetre, el recobriment i la geometria de la biga prenen major protagonisme de cares a la separació, que juntament amb les diferències en la deformació provoquen aquestes irregularitats en la gràfica, que en les majors quanties desapareixen, ja que els paràmetres anteriors perden part de la importància.

## 6.2. Amplada de fissura CE-2021



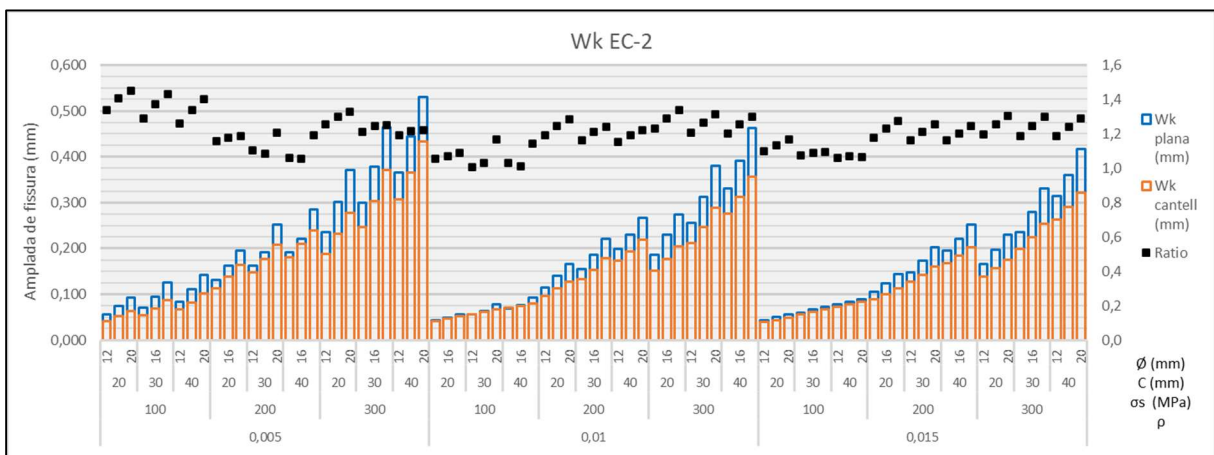
Gràfic 35 Amplada de fissura per el CE-2021

De les tres normatives, el Codi Estructural es la que ofereix un creixement de valors mes lineals, principalment degut, com s'ha comentat abans per la tendència de la separació entre fissures, que com s'ha comentat en l'apartat corresponent depenia principalment de l'alçada eficaç que principalment afectava l'alçada, el cantell i la posició de la línia neutra, i que s'acabaven igualant degut a la relació entre àrees.

Com amb l'anterior normativa, per la menor quantitat d'armat, també es troben algunes irregularitats en la tendència de creixement, tot i que menys pronunciats. També com en l'anterior cas, s'observa que a major armat el creixement de l'amplada es menys pronunciat.

Finalment també es pot veure que és la normativa on més igualtat hi ha entre les bigues planes i de cantell, on en la majoria de casos es situa per sota el 10%. Aquesta igualtat es dona en les tendències de les gràfiques dels dos principals paràmetres que determinen l'amplada tenint en compte en aquest cas, solament el recobriment i el diàmetre. D'una banda en la separació inicialment, és la biga plana la que té un valor major però que s'acaba gairebé igualant, i per contra, és la biga de cantell la que obté major deformació, però aquesta s'igualava pràcticament a major recobriment i diàmetre.

### 6.3. Amplada de fissura EC-2



Gràfic 36 Amplada de fissura per l'EC-2

En el cas de l'EC-2, no s'observa tanta linealitat com en l'anterior normativa, principalment degut al factor de curvatura  $k_{1/r}$  que alterava la constància de la gràfica de la deformació a diferència de les altres dues normatives, generant així aquests majors salts entre casos en les quanties mecàniques més baixes, o en altres casos igualant l'amplada de fissura entre ambdues bigues.

En quant a tendència de creixement, recuperant les gràfiques de la separació entre fissures, que és la que principalment determina la tendència de creixement de l'amplada, en ambdós casos en l'EC-2 és on creix més ràpidament, sobretot pel cas de la biga plana, on la diferència respecte les altres dues era considerable.

## **7. CONCLUSIONS**

Un cop realitzat l'estudi paramètric sobre l'amplada de fissura en bigues de formigó armat planes i de cantell, mitjançant 3 normatives diferents i 81 combinacions de paràmetres es pot concloure que:

Predir l'amplada de fissura és una tasca relativament complexa, principalment degut a la gran quantitat de paràmetres que hi intervenen a ella i la incidència que hi tenen, i si en els passos intermedis aquests tenen sentit o estan dins els marges establerts. Per això també les normatives s'actualitzen amb el temps afegint o corregint els factors que poden alterar l'amplada de fissura de forma directa o indirectament .

Relacionat amb aquesta última puntualització, l'estudi s'ha realitzat mitjançant tres models de predicció que presenten similituds i diferències entre ells, resultant diferències considerables en alguns casos. Cronològicament es pot dir que les normatives han passat del model que generalment dona les prediccions més elevades (EHE), al que les dona més baixes (CE) i que amb l'entrada del nou Eurocodi, el model de predicció es situarà en una posició intermèdia.

Així doncs, entre les normatives estudiades es conclou:

La ja derogada EHE-08 és la normativa amb una predicció d'obertura de fissura més desfavorable en 72 dels 81 casos per la biga de cantell, i en 65 dels 81 per la biga plana, principalment per ser la normativa que majors deformacions relatives prediu, tot i que per contra, ser alhora la que prediu menor separació de fissures. Els casos on no prediu la màxima obertura coincideixen amb els casos extrems de mínima armadura i mínima tensió de l'acer o els de màxima armadura i tensió, a més d'algun cas puntual on coincideix també el fet de màxima tensió de servei de l'armadura.

El recent CE-2021, és la normativa més favorable de les tres en quan a obertura de fissura. Tant sols en 8 casos no és la normativa més favorable per la biga de cantell, un cas més per la biga plana, degut a que és la normativa que prediu menors deformacions relatives, principalment en la biga de cantell. Només en els casos esmentats anteriorment, corresponents als de menor quantitat d'armadura on s'empra el terme fix de la formulació, és on obté una predicció més desfavorable respecte l'EHE-08 tal com s'ha comentat en el capítol 5.

Finalment, el futur nou EC-2, preveuria uns valors d'obertura intermedis entre les dues anteriors normatives. En els 9 casos per la biga de cantell i 13 per la plana on l'EHE-08 no era la més desfavorable, aquesta ho és. En general, els valors d'obertura són més propers al CE-2021 als casos amb menor tensió, recobriment i diàmetre, mentre que a mesura que augmenten aquests paràmetres els valors s'aproximen més a l'EHE-08 o fins i tot superar-los lleugerament com s'ha vist anteriorment. En quant a deformació relativa, pel cas de la biga de cantell també és la que prediu valors més intermedis mentre que per la biga plana a baixes tensions és la que menor obté, per tensions mitjanes, deformacions similars a les del CE-2021, i per tensions altes, la que majors deformacions obté. Apart, també es la normativa amb majors separacions entre fissures, sobretot en la biga plana, fet que també explica perquè en alguns casos supera a l'EHE-08 en obertura de fissures.

En quant als paràmetres predefinits per la realització de l'estudi es conclou:

El paràmetre que més afecta en l'amplada de fissura, és clarament la quantia mecànica, és a dir la relació entre la secció de la biga i l'àrea d'armat que conté. És el paràmetre que més modifica la quantia eficaç, que és la relació entre l'àrea d'armat i l'àrea eficaç de formigó, que alhora és el factor no definit prèviament més important en l'amplada ja que és present tant a la separació entre fissures com a la deformació relativa de l'armat, on al aparèixer com a terme divisor genera les diferències que altres paràmetres no ho fan amb tanta consideració.

El segon paràmetre dels definits inicialment que més altera l'amplada de fissura és la tensió de servei de l'armadura. Si bé el seu efecte en la separació entre fissures és nul, en la deformació de l'armat és el paràmetre que més incideix, fins i tot més que les quanties.

Finalment en quant al recobriment i al diàmetre, l'afectació que tenen és similar, principalment perquè son dos paràmetres purament geomètrics que tan sols afecten certes magnituds importants com l'altura eficaç, la posició de la línia neutra, etc.... que modifiquen lleugerament la quantia eficaç, i directament en la separació entre fissures, on la prioritat d'importància es decanta pel recobriment pel coeficient multiplicador major, i pel fet que el diàmetre es el numerador en la relació amb la quantia eficaç.

Finalment en quant a les diferències entre la biga plana i la de cantell:

En la gran majoria de casos, l'amplada de fissures es major per la biga plana, principalment per la separació entre fissures, on de nou pren importància la quantia efectiva, menor respecte la de cantell per l'àrea efectiva de formigó, i l'amplada de la biga més que per l'alçada efectiva, tret del CE-2021, on depèn de la posició de la línia neutra i el cantell a diferència de les altres dues que depenen més dels recobriments i els diàmetres d'armat.

La quantia efectiva però en la deformació realitza un efecte contrari. En aquest cas, a menor quantia major tensió de l'armat a l'instant de fissuració, el que es tradueix en menor deformació del mateix, tal com s'ha vist anteriorment, això comporta que les diferències del punt anterior es compensin parcialment.

## **8. RELACIÓ DE DOCUMENTS**

El llistat de documents que conformen l'estudi en qüestió són :

Document 1: Memòria i Annexos

Annex A: Recapitulació de paràmetres fixats

Annex B: Càlculs previs i coeficients estipulats

Annex C: Resultats de l'estudi. Taules i gràfics suplementaris.

Document 2: Pressupost

## 9. BIBLIOGRAFIA

Calavera Ruiz, José. *Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón : [en masa, armado, pretensado]* / J. Calavera. Instituto Técnico de Materiales y Construcciones INTEMAC, 1999.

Calavera Ruiz, José. *Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado* / J. Calavera. 2a ed., INTEMAC, 2005.

CE-2021 *Código Estructural (CE-2021)*. Espanya, 2021.

EHE-08. *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. Espanya, 2008.

EC-2 2004;. *EUROCÓDIGO 2:Proyectos de Estructuras de Hormigón*. Brusel·les, Bèlgica, 2004.

EC-2 2022;. *EUROCÓDIGO 2:Proyectos de Estructuras de Hormigón*. Brusel·les, Bèlgica, 2022. (en fase de discussió)

Jiménez Montoya, P., et al. *Hormigón armado* / Jiménez Montoya ; Álvaro García Meseguer, Francisco Morán Cabré, Juan Carlos Arroyo Portero. 15a ed. basada en la EHE-2008, ajustada al Código Modelo y al Eurocódigo EC-2, Gustavo Gili, 2009.

## **ANNEX A: Recapitulació dels paràmetres fixats**



En aquest annex es recullen els paràmetres i variables fixades per la realització de l'estudi paramètric.

• **Formigó**

Resistència del formigó	$f_{ck}$	30	MPa
-------------------------	----------	----	-----

• **Acer**

Mòdul elàstic de l'acer	$E_s$	200000	MPa
		100	
Tensió de l'acer	$\sigma_s$	200	MPa
		300	
		12	
Diàmetre armat longitudinal	$\emptyset$	16	mm
		20	
Diàmetre armat a tallant	$\emptyset_t$	10	mm
Tipus de barres		Corrugades	

• **Seccions**

Biga Plana	$b \times h$	1000 x 300	mm
Biga de Cantell	$b \times h$	500 x 300	mm
		0,005	
Quantia mecànica	$\rho$	0,010	-
		0,015	
		20	
Recobriments de l'armat	$c$	30	mm
		40	

• **Esforç**

Tipus d'esforç	Flexió Simple		
Duració de l'esforç	Llarg		

## **ANNEX B: Càlculs previs i coeficients estipulats**

Aquest annex inclou les formulacions sobre les propietats del formigó necessàries per poder realitzar l'estudi i que no s'han vist en l'apartat 2.2, a més de la recapitulació dels coeficients fixes de les formulacions vistes en el mateix.

### **B.1. Càlculs previs EHE-08**

- Resistència mitjana del formigó:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 30 + 8 = 38 \text{ MPa} \quad [\text{Eq.28}]$$

- Mòdul d'elasticitat del formigó:

$$E_{cm} = \sqrt[3]{f_{ck}} + 8500 = \sqrt[3]{38} + 8500 = 28576,8 \text{ MPa} \quad [\text{Eq.29}]$$

- Relació entre mòduls de deformació:

$$n = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200000}{28576,8} = 6,99 \dots \quad [\text{Eq.30}]$$

- Resistència mitjana a tracció del formigó: per  $f_{ck}$  menors o iguals a 50 MPa:

$$f_{ct,m} = \sqrt[3]{f_{ck}} \cdot 0,3 = \sqrt[3]{30^2} \cdot 0,3 = 2,896 \text{ MPa} \quad [\text{Eq.31}]$$

- Resistència mitjana a flexo-tracció:

$$f_{ct,m,fl} = \max\left(\left(1,6 - \frac{h}{1000}\right) \cdot f_{ct,m}; f_{ct,m}\right) \quad [\text{Eq.32}]$$

$$\text{(plana)} \quad = \max\left(\left(1,6 - \frac{300}{1000}\right) \cdot 2,896; 2,896\right) = 3,765 \text{ MPa}$$

$$\text{(cantell)} \quad = \max\left(\left(1,6 - \frac{500}{1000}\right) \cdot 2,896; 2,896\right) = 3,186 \text{ MPa}$$

- Moment resistent:

$$Wb = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \quad [Eq.33]$$

(plana)  $= Wb = \frac{1}{6} \cdot 1000 \cdot 300^2 = 1,5 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$

(cantell)  $= Wb = \frac{1}{6} \cdot 300 \cdot 500^2 = 1,25 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$

- Moment de fissuració :

$$Mf = f_{ct,m,fl} \cdot Wb \quad [Eq.34]$$

(plana)  $= 3,765 \cdot 1,5 \cdot 10^7 = 5,6 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$

(cantell)  $= 3,186 \cdot 1,25 \cdot 10^7 = 3,98 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$

- $\beta$ : 1,7
- $K_1$ : 0,125
- $K_2$ : 0,5

DADES EHE-08	fck (MPa)	fcm (MPa)	fctm (MPa)	fctm,fl plana (MPa)	fctm,fl cantell (MPa)
	30	38	2,896	3,765	3,186
	Es (MPa)	Ecm (MPa)	n	k1	k2
	200000	28576,79096	6,999	0,125	0,5
	b plana (mm)	h plana (mm)	Wb plana (mm <sup>3</sup> )	Mfis plana (Nmm/KNm)	
	1000	300	15000000	5,6E+07	56,481
	b cantell (mm)	h cantell (mm)	Wb cantell (mm <sup>3</sup> )	Mfis cantell (Nmm/KNm)	
	300	500	12500000	3,98E+07	39,826
	$\beta$	esforç	$\phi_t$ (mm)	t carrega	barra
	1,7	Flex. Simple	10	llarg	corrugada

Taula 17: Dades i coeficients emprats en l'EHE-08

**B.2. Càlculs previs CE-2021**

- Resistència mitjana del formigó:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 30 + 8 = 38 \text{ MPa} \quad [\text{Eq.35}]$$

- Mòdul d'elasticitat del formigó:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \cdot 10^3 = 22 \cdot \left(\frac{38}{10}\right)^{0.3} \cdot 10^3 = 32837 \text{ MPa} \quad [\text{Eq.36}]$$

- Relació entre mòduls de deformació:

$$n = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200000}{32837} = 6.09 \quad [\text{Eq.37}]$$

- $\beta$ : 1
- $K_1$ : 0,8
- $K_2$ : 0,5
- $K_3$ : 3,4
- $K_4$ : 0,425
- $K_t$ : 0,4

DADES CE-2021	fck (MPa)	fcm (MPa)	fctm (MPa)	fctm,fl plana (MPa)	fctm,fl cantell (MPa)
	30	38	2,90	3,77	3,19
	Es (MPa)	Ecm (MPa)	n	k1	k2
	200000	32837	6,09	0,8	0,5
	b plana (mm)	h plana (mm)	Wb plana (mm <sup>3</sup> )	k3	k4
	1000	300	1,50E+07	3,4	0,425
	b cantell (mm)	h cantell (mm)	Wb cantell (mm <sup>3</sup> )	$\beta$	kt
	300	500	1,25E+07	1	0,400
	esforç		$\phi t$ (mm)	t carrega	barra
	Flex. Simple		10	llarg	corrugada

Taula 18: Dades i coeficients emprats en el CE-2021

### B.3. Càlculs previs EC-2

- Resistència mitjana del formigó:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 30 + 8 = 38 \text{ MPa} \quad [\text{Eq.38}]$$

- Mòdul d'elasticitat del formigó:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \cdot 10^3 = 22 \cdot \left(\frac{38}{10}\right)^{0.3} \cdot 10^3 = 32837 \text{ MPa} \quad [\text{Eq.39}]$$

- Relació entre mòduls de deformació:

$$n = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200000}{32837} = 6.09 \quad [\text{Eq.40}]$$

- $K_w$ : 1,7
- $K_1$ : 0,8
- $K_2$ : 0,5
- $K_3$ : 3,4
- $K_4$ : 0,425
- $K_t$ : 0,4

DADES EC-2	f <sub>ck</sub> (MPa)	f <sub>cm</sub> (MPa)	f <sub>ctm</sub> (MPa)	f <sub>ctm,fl plana</sub> (MPa)	f <sub>ctm,fl cantell</sub> (MPa)
	30	38	2,90	3,77	3,19
	E <sub>s</sub> (MPa)	E <sub>cm</sub> (MPa)	α <sub>e</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
	200000	32837	6,091	0,8	0,5
	b plana (mm)	h plana (mm)	W <sub>b</sub> (mm <sup>3</sup> )	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>
	1000	300	1,50E+07	3,4	0,425
	b cantell (mm)	h cantell (mm)	W <sub>b cantell</sub> (mm <sup>3</sup> )	k <sub>w</sub>	k <sub>t</sub>
	300	500	12500000	1,7	0,400
	esforç		Ø <sub>t</sub> (mm)	t carrega	barra
	Flex. Simple		10	llarg	corrugada

Taula 19: Dades i coeficients emprats en l'EC-2

**ANNEX C: Resultats de l'estudi.  
Taules i gràfics suplementaris.**





EHE-08 Biga Plana																		
P	σ <sub>s</sub> (MPa)	C (mm)	∅ (mm)	A <sub>s</sub> (mm <sup>2</sup> )	n Barres	s Barres (mm)	hef (mm)	Ac eff (mm <sup>2</sup> )	peff	Sm (mm)	M actuant (kNm)	D (mm)	x (mm)	y (mm)	if (mm <sup>4</sup> )	σ <sub>sr</sub> (MPa)	ε <sub>sm</sub>	W <sub>k</sub> (mm)
0,015	100	20	12	4500	40	24,1	126	126000	0,0357	81,6	103,61	264	101,25	162,75	1,2E+09	54,51	4,3E-04	0,059
			16	4500	23	42,7	150	150000	0,0300	95,2	102,78	262	100,77	161,23	1,2E+09	54,95	4,2E-04	0,069
			20	4500	15	67,1	150	150000	0,0300	106,8	101,96	260	100,30	159,70	1,1E+09	55,40	4,2E-04	0,077
		30	12	4500	40	23,6	126	126000	0,0357	101,5	99,47	254	98,85	155,15	1,1E+09	56,78	4,2E-04	0,072
			16	4500	23	41,8	150	150000	0,0300	115,0	98,64	252	98,37	153,63	1,1E+09	57,26	4,2E-04	0,082
			20	4500	15	65,7	150	150000	0,0300	126,5	97,82	250	97,88	152,12	1,0E+09	57,74	4,2E-04	0,090
		40	12	4500	40	23,1	126	126000	0,0357	121,4	95,34	244	96,42	147,58	9,8E+08	59,24	4,1E-04	0,085
			16	4500	23	40,9	150	150000	0,0300	134,8	94,51	242	95,92	146,08	9,7E+08	59,76	4,1E-04	0,094
			20	4500	15	64,3	150	150000	0,0300	146,2	93,69	240	95,43	144,57	9,5E+08	60,29	4,1E-04	0,102
	200	20	12	4500	40	24,1	126	126000	0,0357	81,6	207,23	264	101,25	162,75	1,2E+09	54,51	9,6E-04	0,134
			16	4500	23	42,7	150	150000	0,0300	95,2	205,57	262	100,77	161,23	1,2E+09	54,95	9,6E-04	0,156
			20	4500	15	67,1	150	150000	0,0300	106,8	203,91	260	100,30	159,70	1,1E+09	55,40	9,6E-04	0,175
		30	12	4500	40	23,6	126	126000	0,0357	101,5	198,94	254	98,85	155,15	1,1E+09	56,78	9,6E-04	0,166
			16	4500	23	41,8	150	150000	0,0300	115,0	197,29	252	98,37	153,63	1,1E+09	57,26	9,6E-04	0,188
			20	4500	15	65,7	150	150000	0,0300	126,5	195,63	250	97,88	152,12	1,0E+09	57,74	9,6E-04	0,206
		40	12	4500	40	23,1	126	126000	0,0357	121,4	190,68	244	96,42	147,58	9,8E+08	59,24	9,6E-04	0,197
			16	4500	23	40,9	150	150000	0,0300	134,8	189,02	242	95,92	146,08	9,7E+08	59,76	9,6E-04	0,219
			20	4500	15	64,3	150	150000	0,0300	146,2	187,37	240	95,43	144,57	9,5E+08	60,29	9,5E-04	0,237
	300	20	12	4500	40	24,1	126	126000	0,0357	81,6	310,84	264	101,25	162,75	1,2E+09	54,51	1,5E-03	0,205
			16	4500	23	42,7	150	150000	0,0300	95,2	308,35	262	100,77	161,23	1,2E+09	54,95	1,5E-03	0,239
			20	4500	15	67,1	150	150000	0,0300	106,8	305,87	260	100,30	159,70	1,1E+09	55,40	1,5E-03	0,268
		30	12	4500	40	23,6	126	126000	0,0357	101,5	298,42	254	98,85	155,15	1,1E+09	56,78	1,5E-03	0,254
			16	4500	23	41,8	150	150000	0,0300	115,0	295,93	252	98,37	153,63	1,1E+09	57,26	1,5E-03	0,288
			20	4500	15	65,7	150	150000	0,0300	126,5	293,45	250	97,88	152,12	1,0E+09	57,74	1,5E-03	0,317
		40	12	4500	40	23,1	126	126000	0,0357	121,4	286,01	244	96,42	147,58	9,8E+08	59,24	1,5E-03	0,304
			16	4500	23	40,9	150	150000	0,0300	134,8	283,53	242	95,92	146,08	9,7E+08	59,76	1,5E-03	0,337
			20	4500	15	64,3	150	150000	0,0300	146,2	281,06	240	95,43	144,57	9,5E+08	60,29	1,5E-03	0,365

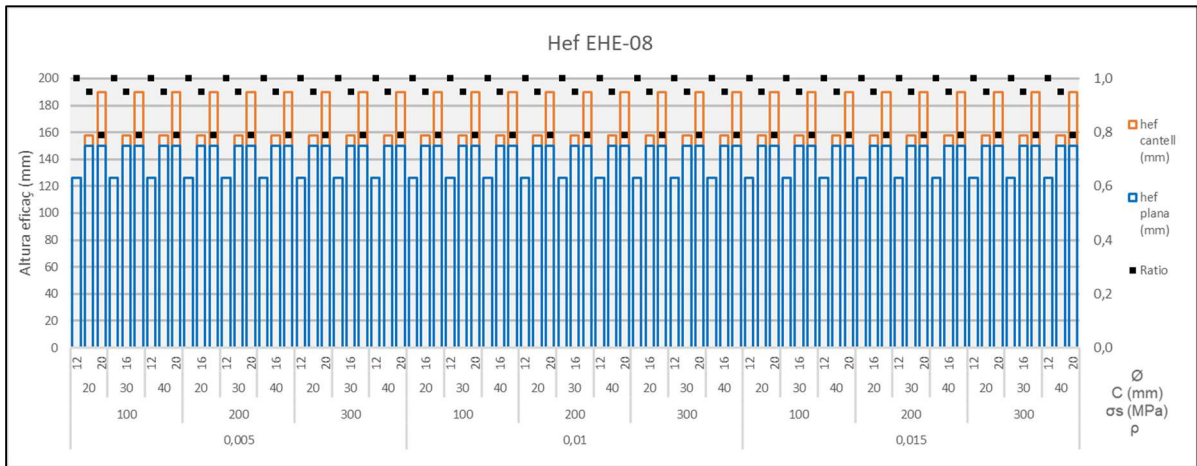
Taula 21: Resultats de l'EHE-08 per biga plana (part 2/2)

EHE-08 Biga de Cantell																		
P	σ <sub>s</sub> (MPa)	C (mm)	∅ (mm)	A <sub>s</sub> (mm <sup>2</sup> )	n Barres	s Barres (mm)	hef (mm)	Ac eff (mm <sup>2</sup> )	peff	Sm (mm)	M actuant (kNm)	D (mm)	x (mm)	y (mm)	if (mm <sup>4</sup> )	σ <sub>sr</sub> (MPa)	ε <sub>sm</sub>	W <sub>k</sub> (mm)
0,005	100	20	12	750	7	40,0	126	37800	0,0198	98,2	32,02	464	111,12	352,88	7,9E+08	124,37	2,0E-04	0,033
			16	750	4	80,0	158	47400	0,0158	126,6	31,88	462	110,85	351,15	7,8E+08	124,93	2,0E-04	0,043
			20	750	3	120,0	190	57000	0,0132	160,0	31,74	460	110,58	349,42	7,8E+08	125,49	2,0E-04	0,054
		30	12	750	7	36,7	126	37800	0,0198	117,6	31,31	454	109,76	344,24	7,5E+08	127,22	2,0E-04	0,040
			16	750	4	73,3	158	47400	0,0158	145,2	31,16	452	109,48	342,52	7,5E+08	127,80	2,0E-04	0,049
			20	750	3	110,0	190	57000	0,0132	178,0	31,02	450	109,20	340,80	7,4E+08	128,39	2,0E-04	0,061
		40	12	750	7	33,3	126	37800	0,0198	136,9	30,59	444	108,37	335,63	7,2E+08	130,19	2,0E-04	0,047
			16	750	4	66,7	158	47400	0,0158	163,9	30,45	442	108,09	333,91	7,1E+08	130,80	2,0E-04	0,056
			20	750	3	100,0	190	57000	0,0132	196,0	30,30	440	107,82	332,18	7,0E+08	131,42	2,0E-04	0,067
	200	20	12	750	7	40,0	126	37800	0,0198	98,2	64,04	464	111,12	352,88	7,9E+08	124,37	8,1E-04	0,135
			16	750	4	80,0	158	47400	0,0158	126,6	63,76	462	110,85	351,15	7,8E+08	124,93	8,0E-04	0,173
			20	750	3	120,0	190	57000	0,0132	160,0	63,47	460	110,58	349,42	7,8E+08	125,49	8,0E-04	0,218
		30	12	750	7	36,7	126	37800	0,0198	117,6	62,61	454	109,76	344,24	7,5E+08	127,22	8,0E-04	0,159
			16	750	4	73,3	158	47400	0,0158	145,2	62,33	452	109,48	342,52	7,5E+08	127,80	8,0E-04	0,196
			20	750	3	110,0	190	57000	0,0132	178,0	62,04	450	109,20	340,80	7,4E+08	128,39	7,9E-04	0,240
		40	12	750	7	33,3	126	37800	0,0198	136,9	61,18	444	108,37	335,63	7,2E+08	130,19	7,9E-04	0,183
			16	750	4	66,7	158	47400	0,0158	163,9	60,90	442	108,09	333,91	7,1E+08	130,80	7,9E-04	0,219
			20	750	3	100,0	190	57000	0,0132	196,0	60,61	440	107,82	332,18	7,0E+08	131,42	7,8E-04	0,261
	300	20	12	750	7	40,0	126	37800	0,0198	98,2	96,07	464	111,12	352,88	7,9E+08	124,37	1,4E-03	0,229
			16	750	4	80,0	158	47400	0,0158	126,6	95,64	462	110,85	351,15	7,8E+08	124,93	1,4E-03	0,295
			20	750	3	120,0	190	57000	0,0132	160,0	95,21	460	110,58	349,42	7,8E+08	125,49	1,4E-03	0,372
		30	12	750	7	36,7	126	37800	0,0198	117,6	93,92	454	109,76	344,24	7,5E+08	127,22	1,4E-03	0,273
			16	750	4	73,3	158	47400	0,0158	145,2	93,49	452	109,48	342,52	7,5E+08	127,80	1,4E-03	0,337
			20	750	3	110,0	190	57000	0,0132	178,0	93,06	450	109,20	340,80	7,4E+08	128,39	1,4E-03	0,412
		40	12	750	7	33,3	126	37800	0,0198	136,9	91,77	444	108,37	335,63	7,2E+08	130,19	1,4E-03	0,316
			16	750	4	66,7	158	47400	0,0158	163,9	91,34	442	108,09	333,91	7,1E+08	130,80	1,4E-03	0,378
			20	750	3	100,0	190	57000	0,0132	196,0	90,91	440	107,82	332,18	7,0E+08	131,42	1,4E-03	0,452

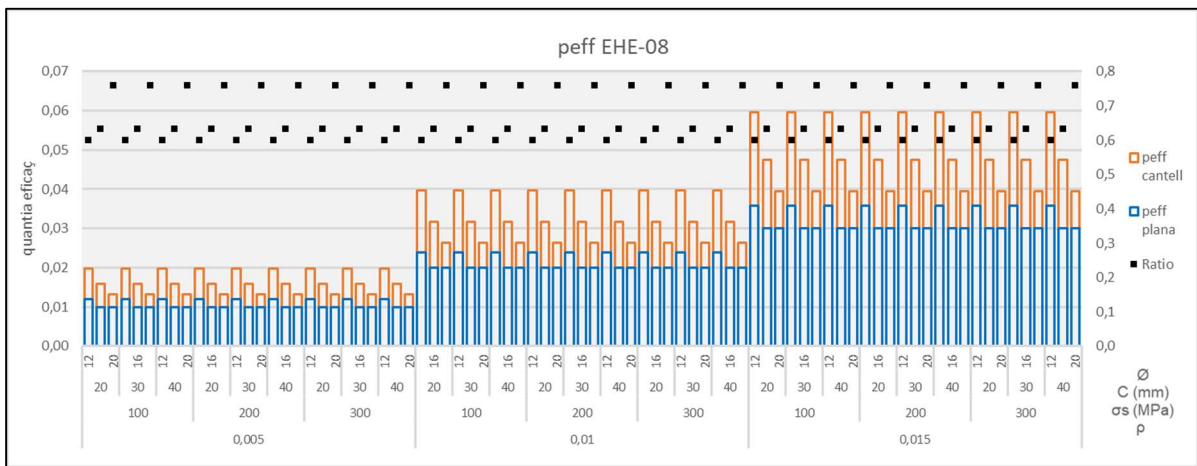
Taula 22: Resultats de l'EHE-08 per biga de cantell (part 1/2)

EHE-08 Biga Plana																				
P	$\sigma_s$ (MPa)	C (mm)	$\phi$ (mm)	As (mm <sup>2</sup> )	n Barres	s Barres (mm)	hef (mm)	Ac eff (mm <sup>2</sup> )	peff	Sm (mm)	M actuant (kNm)	D (mm)	x (mm)	y (mm)	if (mm <sup>4</sup> )	$\sigma_{sr}$ (MPa)	esm	Wk (mm)		
0,01	100	20	12	1500	14	18,5	126	37800	0,0397	78,8	62,17	464	148,58	315,42	1,4E+09	64,06	4,0E-04	<b>0,053</b>		
			16	1500	8	34,3	158	47400	0,0316	92,1	61,89	462	148,20	313,80	1,4E+09	64,35	4,0E-04	<b>0,062</b>		
			20	1500	5	60,0	190	57000	0,0263	110,0	61,61	460	147,81	312,19	1,3E+09	64,64	4,0E-04	<b>0,074</b>		
		30	12	1500	14	16,9	126	37800	0,0397	98,5	60,77	454	146,66	307,34	1,3E+09	65,54	3,9E-04	<b>0,066</b>		
			16	1500	8	31,4	158	47400	0,0316	111,6	60,49	452	146,28	305,72	1,3E+09	65,84	3,9E-04	<b>0,074</b>		
			20	1500	5	55,0	190	57000	0,0263	129,0	60,21	450	145,89	304,11	1,3E+09	66,15	3,9E-04	<b>0,086</b>		
		40	12	1500	14	15,4	126	37800	0,0397	118,2	59,36	444	144,72	299,28	1,2E+09	67,09	3,9E-04	<b>0,078</b>		
			16	1500	8	28,6	158	47400	0,0316	131,0	59,08	442	144,34	297,66	1,2E+09	67,41	3,9E-04	<b>0,086</b>		
			20	1500	5	50,0	190	57000	0,0263	148,0	58,80	440	143,94	296,06	1,2E+09	67,73	3,9E-04	<b>0,097</b>		
		200	20	12	1500	14	18,5	126	37800	0,0397	78,8	124,34	464	148,58	315,42	1,4E+09	64,06	9,5E-04	<b>0,127</b>	
				16	1500	8	34,3	158	47400	0,0316	92,1	123,78	462	148,20	313,80	1,4E+09	64,35	9,5E-04	<b>0,149</b>	
				20	1500	5	60,0	190	57000	0,0263	110,0	123,22	460	147,81	312,19	1,3E+09	64,64	9,5E-04	<b>0,177</b>	
	30		12	1500	14	16,9	126	37800	0,0397	98,5	121,53	454	146,66	307,34	1,3E+09	65,54	9,5E-04	<b>0,158</b>		
			16	1500	8	31,4	158	47400	0,0316	111,6	120,97	452	146,28	305,72	1,3E+09	65,84	9,5E-04	<b>0,179</b>		
			20	1500	5	55,0	190	57000	0,0263	129,0	120,41	450	145,89	304,11	1,3E+09	66,15	9,5E-04	<b>0,207</b>		
	40		12	1500	14	15,4	126	37800	0,0397	118,2	118,73	444	144,72	299,28	1,2E+09	67,09	9,4E-04	<b>0,190</b>		
			16	1500	8	28,6	158	47400	0,0316	131,0	118,17	442	144,34	297,66	1,2E+09	67,41	9,4E-04	<b>0,210</b>		
			20	1500	5	50,0	190	57000	0,0263	148,0	117,61	440	143,94	296,06	1,2E+09	67,73	9,4E-04	<b>0,237</b>		
	300		20	12	1500	14	18,5	126	37800	0,0397	78,8	186,51	464	148,58	315,42	1,4E+09	64,06	1,5E-03	<b>0,196</b>	
				16	1500	8	34,3	158	47400	0,0316	92,1	185,67	462	148,20	313,80	1,4E+09	64,35	1,5E-03	<b>0,230</b>	
				20	1500	5	60,0	190	57000	0,0263	110,0	184,83	460	147,81	312,19	1,3E+09	64,64	1,5E-03	<b>0,274</b>	
		30	12	1500	14	16,9	126	37800	0,0397	98,5	182,30	454	146,66	307,34	1,3E+09	65,54	1,5E-03	<b>0,245</b>		
			16	1500	8	31,4	158	47400	0,0316	111,6	181,46	452	146,28	305,72	1,3E+09	65,84	1,5E-03	<b>0,278</b>		
			20	1500	5	55,0	190	57000	0,0263	129,0	180,62	450	145,89	304,11	1,3E+09	66,15	1,5E-03	<b>0,321</b>		
		40	12	1500	14	15,4	126	37800	0,0397	118,2	178,09	444	144,72	299,28	1,2E+09	67,09	1,5E-03	<b>0,294</b>		
			16	1500	8	28,6	158	47400	0,0316	131,0	177,25	442	144,34	297,66	1,2E+09	67,41	1,5E-03	<b>0,326</b>		
			20	1500	5	50,0	190	57000	0,0263	148,0	176,41	440	143,94	296,06	1,2E+09	67,73	1,5E-03	<b>0,368</b>		
		0,015	100	20	12	2250	20	12,6	126	37800	0,0595	72,6	91,32	464	174,37	289,63	1,9E+09	43,61	4,5E-04	<b>0,056</b>
					16	2250	12	21,8	158	47400	0,0475	81,2	90,91	462	173,91	288,09	1,8E+09	43,81	4,5E-04	<b>0,062</b>
					20	2250	8	34,3	190	57000	0,0395	92,2	90,49	460	173,44	286,56	1,8E+09	44,01	4,5E-04	<b>0,071</b>
	30			12	2250	20	11,6	126	37800	0,0595	92,4	89,25	454	172,05	281,95	1,8E+09	44,63	4,5E-04	<b>0,071</b>	
				16	2250	12	20,0	158	47400	0,0475	100,9	88,83	452	171,58	280,42	1,7E+09	44,83	4,5E-04	<b>0,077</b>	
				20	2250	8	31,4	190	57000	0,0395	111,6	88,42	450	171,11	278,89	1,7E+09	45,04	4,5E-04	<b>0,085</b>	
	40			12	2250	20	10,5	126	37800	0,0595	112,2	87,17	444	169,70	274,30	1,7E+09	45,69	4,5E-04	<b>0,085</b>	
				16	2250	12	18,2	158	47400	0,0475	120,5	86,76	442	169,22	272,78	1,7E+09	45,91	4,5E-04	<b>0,092</b>	
				20	2250	8	28,6	190	57000	0,0395	131,0	86,34	440	168,75	271,25	1,6E+09	46,13	4,5E-04	<b>0,100</b>	
200	20			12	2250	20	12,6	126	37800	0,0595	72,6	182,64	464	174,37	289,63	1,9E+09	43,61	9,8E-04	<b>0,120</b>	
				16	2250	12	21,8	158	47400	0,0475	81,2	181,81	462	173,91	288,09	1,8E+09	43,81	9,8E-04	<b>0,135</b>	
				20	2250	8	34,3	190	57000	0,0395	92,2	180,98	460	173,44	286,56	1,8E+09	44,01	9,8E-04	<b>0,153</b>	
	30		12	2250	20	11,6	126	37800	0,0595	92,4	178,49	454	172,05	281,95	1,8E+09	44,63	9,8E-04	<b>0,153</b>		
			16	2250	12	20,0	158	47400	0,0475	100,9	177,66	452	171,58	280,42	1,7E+09	44,83	9,7E-04	<b>0,167</b>		
			20	2250	8	31,4	190	57000	0,0395	111,6	176,83	450	171,11	278,89	1,7E+09	45,04	9,7E-04	<b>0,185</b>		
	40		12	2250	20	10,5	126	37800	0,0595	112,2	174,35	444	169,70	274,30	1,7E+09	45,69	9,7E-04	<b>0,186</b>		
			16	2250	12	18,2	158	47400	0,0475	120,5	173,52	442	169,22	272,78	1,7E+09	45,91	9,7E-04	<b>0,199</b>		
			20	2250	8	28,6	190	57000	0,0395	131,0	172,69	440	168,75	271,25	1,6E+09	46,13	9,7E-04	<b>0,217</b>		
	300		20	12	2250	20	12,6	126	37800	0,0595	72,6	273,97	464	174,37	289,63	1,9E+09	43,61	1,5E-03	<b>0,183</b>	
				16	2250	12	21,8	158	47400	0,0475	81,2	272,72	462	173,91	288,09	1,8E+09	43,81	1,5E-03	<b>0,205</b>	
				20	2250	8	34,3	190	57000	0,0395	92,2	271,48	460	173,44	286,56	1,8E+09	44,01	1,5E-03	<b>0,233</b>	
30			12	2250	20	11,6	126	37800	0,0595	92,4	267,74	454	172,05	281,95	1,8E+09	44,63	1,5E-03	<b>0,233</b>		
			16	2250	12	20,0	158	47400	0,0475	100,9	266,50	452	171,58	280,42	1,7E+09	44,83	1,5E-03	<b>0,254</b>		
			20	2250	8	31,4	190	57000	0,0395	111,6	265,25	450	171,11	278,89	1,7E+09	45,04	1,5E-03	<b>0,281</b>		
40			12	2250	20	10,5	126	37800	0,0595	112,2	261,52	444	169,70	274,30	1,7E+09	45,69	1,5E-03	<b>0,283</b>		
			16	2250	12	18,2	158	47400	0,0475	120,5	260,27	442	169,22	272,78	1,7E+09	45,91	1,5E-03	<b>0,304</b>		
			20	2250	8	28,6	190	57000	0,0395	131,0	259,03	440	168,75	271,25	1,6E+09	46,13	1,5E-03	<b>0,330</b>		

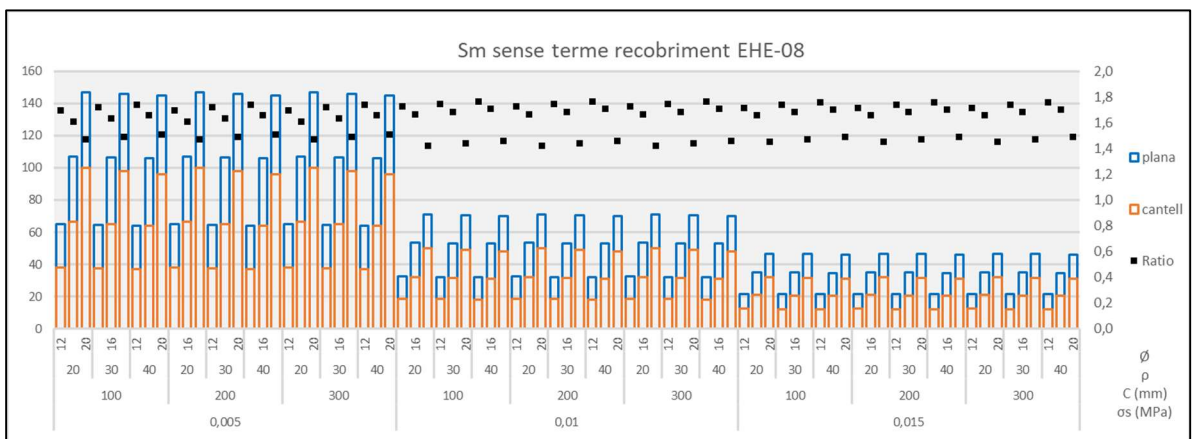
Taula 23: Resultats de l'EHE-08 per biga de cantell (part 2/2)



Gràfic 37: Altura efectiva segons EHE-08



Gràfic 38: Quantia efectiva per EHE-08



Gràfic 39: Separació entre fissures menyspreant el recobriment segons EHE-08

C.2. Resultats i gràfics CE-2021

CE-2021 Biga Plana														
$\rho$	$\sigma_s$ (MPa)	C (mm)	$\phi$ (mm)	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	D (mm)	x (mm)	y (mm)	hef (mm)	$A_c$ eff (mm <sup>2</sup> )	$\rho$ eff	Srmax (mm)	$\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm}$	Wk (mm)	
0,005	100	20	12	1500	264	60,92	203,08	79,69	79695	0,0188	176	3,00E-04	<b>0,053</b>	
			16	1500	262	60,66	201,34	79,78	79782	0,0188	213	3,00E-04	<b>0,064</b>	
			20	1500	260	60,39	199,61	79,87	79869	0,0188	249	3,00E-04	<b>0,075</b>	
		30	12	1500	254	59,60	194,40	80,13	80133	0,0187	211	3,00E-04	<b>0,063</b>	
			16	1500	252	59,33	192,67	80,22	80222	0,0187	247	3,00E-04	<b>0,074</b>	
			20	1500	250	59,07	190,93	80,31	80311	0,0187	284	3,00E-04	<b>0,085</b>	
		40	12	1500	244	58,26	185,74	80,58	80581	0,0186	246	3,00E-04	<b>0,074</b>	
			16	1500	242	57,99	184,01	80,67	80671	0,0186	282	3,00E-04	<b>0,085</b>	
			20	1500	240	57,71	182,29	80,76	80762	0,0186	319	3,00E-04	<b>0,096</b>	
		200	20	12	1500	264	60,92	203,08	79,69	79695	0,0188	176	6,57E-04	<b>0,116</b>
				16	1500	262	60,66	201,34	79,78	79782	0,0188	213	6,57E-04	<b>0,140</b>
				20	1500	260	60,39	199,61	79,87	79869	0,0188	249	6,56E-04	<b>0,163</b>
	30		12	1500	254	59,60	194,40	80,13	80133	0,0187	211	6,55E-04	<b>0,138</b>	
			16	1500	252	59,33	192,67	80,22	80222	0,0187	247	6,55E-04	<b>0,162</b>	
			20	1500	250	59,07	190,93	80,31	80311	0,0187	284	6,55E-04	<b>0,186</b>	
	40		12	1500	244	58,26	185,74	80,58	80581	0,0186	246	6,54E-04	<b>0,160</b>	
			16	1500	242	57,99	184,01	80,67	80671	0,0186	282	6,53E-04	<b>0,184</b>	
			20	1500	240	57,71	182,29	80,76	80762	0,0186	319	6,53E-04	<b>0,208</b>	
	300		20	12	1500	264	60,92	203,08	79,69	79695	0,0188	176	1,16E-03	<b>0,204</b>
				16	1500	262	60,66	201,34	79,78	79782	0,0188	213	1,16E-03	<b>0,246</b>
				20	1500	260	60,39	199,61	79,87	79869	0,0188	249	1,16E-03	<b>0,288</b>
		30	12	1500	254	59,60	194,40	80,13	80133	0,0187	211	1,16E-03	<b>0,244</b>	
			16	1500	252	59,33	192,67	80,22	80222	0,0187	247	1,15E-03	<b>0,286</b>	
			20	1500	250	59,07	190,93	80,31	80311	0,0187	284	1,15E-03	<b>0,328</b>	
40		12	1500	244	58,26	185,74	80,58	80581	0,0186	246	1,15E-03	<b>0,283</b>		
		16	1500	242	57,99	184,01	80,67	80671	0,0186	282	1,15E-03	<b>0,326</b>		
		20	1500	240	57,71	182,29	80,76	80762	0,0186	319	1,15E-03	<b>0,368</b>		
0,01		100	20	12	3000	264	81,64	182,36	72,79	72788	0,0412	117	3,24E-04	<b>0,038</b>
				16	3000	262	81,27	180,73	72,91	72910	0,0411	134	3,24E-04	<b>0,043</b>
				20	3000	260	80,90	179,10	73,03	73033	0,0411	151	3,24E-04	<b>0,049</b>
	30		12	3000	254	79,79	174,21	73,40	73403	0,0409	152	3,23E-04	<b>0,049</b>	
			16	3000	252	79,42	172,58	73,53	73528	0,0408	169	3,23E-04	<b>0,054</b>	
			20	3000	250	79,04	170,96	73,65	73653	0,0407	185	3,22E-04	<b>0,060</b>	
	40		12	3000	244	77,91	166,09	74,03	74030	0,0405	186	3,22E-04	<b>0,060</b>	
			16	3000	242	77,53	164,47	74,16	74157	0,0405	203	3,22E-04	<b>0,065</b>	
			20	3000	240	77,15	162,85	74,28	74285	0,0404	220	3,21E-04	<b>0,071</b>	
	200		20	12	3000	264	81,64	182,36	72,79	72788	0,0412	117	8,24E-04	<b>0,097</b>
				16	3000	262	81,27	180,73	72,91	72910	0,0411	134	8,24E-04	<b>0,110</b>
				20	3000	260	80,90	179,10	73,03	73033	0,0411	151	8,24E-04	<b>0,124</b>
		30	12	3000	254	79,79	174,21	73,40	73403	0,0409	152	8,23E-04	<b>0,125</b>	
			16	3000	252	79,42	172,58	73,53	73528	0,0408	169	8,23E-04	<b>0,139</b>	
			20	3000	250	79,04	170,96	73,65	73653	0,0407	185	8,22E-04	<b>0,153</b>	
		40	12	3000	244	77,91	166,09	74,03	74030	0,0405	186	8,22E-04	<b>0,153</b>	
			16	3000	242	77,53	164,47	74,16	74157	0,0405	203	8,22E-04	<b>0,167</b>	
			20	3000	240	77,15	162,85	74,28	74285	0,0404	220	8,21E-04	<b>0,181</b>	
		300	20	12	3000	264	81,64	182,36	72,79	72788	0,0412	117	1,32E-03	<b>0,156</b>
				16	3000	262	81,27	180,73	72,91	72910	0,0411	134	1,32E-03	<b>0,178</b>
				20	3000	260	80,90	179,10	73,03	73033	0,0411	151	1,32E-03	<b>0,200</b>
	30		12	3000	254	79,79	174,21	73,40	73403	0,0409	152	1,32E-03	<b>0,201</b>	
			16	3000	252	79,42	172,58	73,53	73528	0,0408	169	1,32E-03	<b>0,223</b>	
			20	3000	250	79,04	170,96	73,65	73653	0,0407	185	1,32E-03	<b>0,245</b>	
40	12		3000	244	77,91	166,09	74,03	74030	0,0405	186	1,32E-03	<b>0,246</b>		
	16		3000	242	77,53	164,47	74,16	74157	0,0405	203	1,32E-03	<b>0,269</b>		
	20		3000	240	77,15	162,85	74,28	74285	0,0404	220	1,32E-03	<b>0,291</b>		

Taula 24: Resultats del CE-2021 per biga plana (part 1/2)

CE-2021 Biga Plana														
$\rho$	$\sigma_s$ (MPa)	C (mm)	$\emptyset$ (mm)	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	D (mm)	x (mm)	y (mm)	hef (mm)	Ac eff (mm <sup>2</sup> )	$\rho$ eff	Srmax (mm)	esm-ecm	Wk (mm)	
0,015	100	20	12	4500	264	95,97	168,03	68,01	68009	0,0662	99	3,77E-04	<b>0,037</b>	
			16	4500	262	95,53	166,47	68,16	68157	0,0660	109	3,77E-04	<b>0,041</b>	
			20	4500	260	95,08	164,92	68,31	68306	0,0659	120	3,77E-04	<b>0,045</b>	
		30	12	4500	254	93,73	160,27	68,76	68756	0,0654	133	3,76E-04	<b>0,050</b>	
			16	4500	252	93,28	158,72	68,91	68908	0,0653	144	3,76E-04	<b>0,054</b>	
			20	4500	250	92,82	157,18	69,06	69059	0,0652	154	3,76E-04	<b>0,058</b>	
		40	12	4500	244	91,45	152,55	69,52	69518	0,0647	168	3,75E-04	<b>0,063</b>	
			16	4500	242	90,98	151,02	69,67	69672	0,0646	178	3,75E-04	<b>0,067</b>	
			20	4500	240	90,52	149,48	69,83	69826	0,0644	189	3,75E-04	<b>0,071</b>	
		200	20	12	4500	264	95,97	168,03	68,01	68009	0,0662	99	8,77E-04	<b>0,087</b>
				16	4500	262	95,53	166,47	68,16	68157	0,0660	109	8,77E-04	<b>0,096</b>
				20	4500	260	95,08	164,92	68,31	68306	0,0659	120	8,77E-04	<b>0,105</b>
	30		12	4500	254	93,73	160,27	68,76	68756	0,0654	133	8,76E-04	<b>0,117</b>	
			16	4500	252	93,28	158,72	68,91	68908	0,0653	144	8,76E-04	<b>0,126</b>	
			20	4500	250	92,82	157,18	69,06	69059	0,0652	154	8,76E-04	<b>0,135</b>	
	40		12	4500	244	91,45	152,55	69,52	69518	0,0647	168	8,75E-04	<b>0,147</b>	
			16	4500	242	90,98	151,02	69,67	69672	0,0646	178	8,75E-04	<b>0,156</b>	
			20	4500	240	90,52	149,48	69,83	69826	0,0644	189	8,75E-04	<b>0,165</b>	
	300		20	12	4500	264	95,97	168,03	68,01	68009	0,0662	99	1,38E-03	<b>0,136</b>
				16	4500	262	95,53	166,47	68,16	68157	0,0660	109	1,38E-03	<b>0,150</b>
				20	4500	260	95,08	164,92	68,31	68306	0,0659	120	1,38E-03	<b>0,165</b>
		30	12	4500	254	93,73	160,27	68,76	68756	0,0654	133	1,38E-03	<b>0,183</b>	
			16	4500	252	93,28	158,72	68,91	68908	0,0653	144	1,38E-03	<b>0,198</b>	
			20	4500	250	92,82	157,18	69,06	69059	0,0652	154	1,38E-03	<b>0,212</b>	
40		12	4500	244	91,45	152,55	69,52	69518	0,0647	168	1,38E-03	<b>0,230</b>		
		16	4500	242	90,98	151,02	69,67	69672	0,0646	178	1,38E-03	<b>0,245</b>		
		20	4500	240	90,52	149,48	69,83	69826	0,0644	189	1,37E-03	<b>0,260</b>		

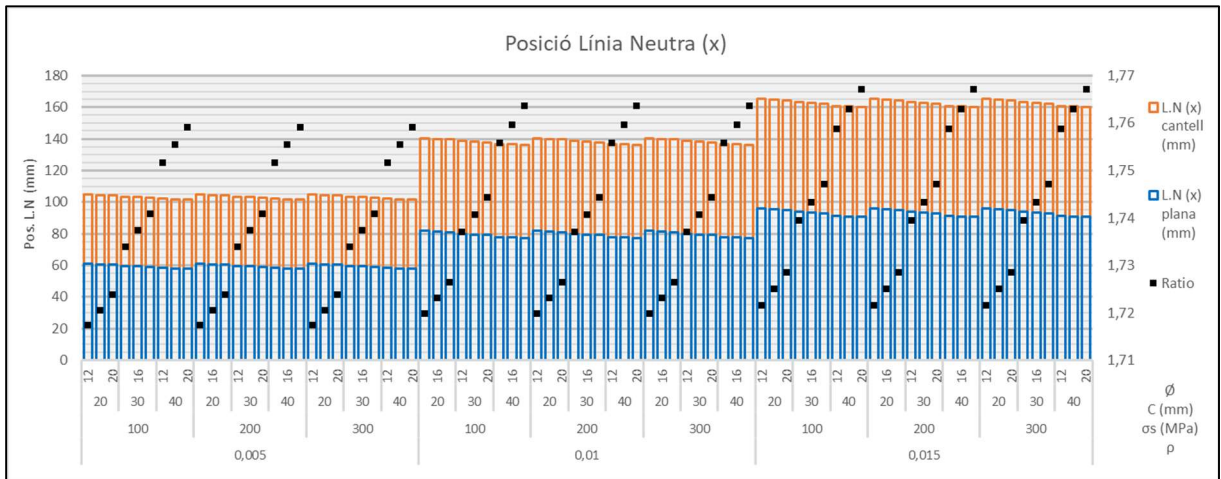
Taula 26: Resultats del CE-2021 per biga plana (part 2/2)

CE-2021 Biga Cantell														
$\rho$	$\sigma_s$ (MPa)	C (mm)	$\emptyset$ (mm)	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	D (mm)	x (mm)	y (mm)	hef (mm)	Ac eff (mm <sup>2</sup> )	$\rho$ eff	Srmax (mm)	esm-ecm	Wk (mm)	
0,005	100	20	12	750	464	104,62	359,38	90,00	27000	0,0278	141	3,00E-04	<b>0,042</b>	
			16	750	462	104,36	357,64	95,00	28500	0,0263	171	3,00E-04	<b>0,051</b>	
			20	750	460	104,11	355,89	100,00	30000	0,0250	204	3,00E-04	<b>0,061</b>	
		30	12	750	454	103,34	350,66	115,00	34500	0,0217	196	3,00E-04	<b>0,059</b>	
			16	750	452	103,08	348,92	120,00	36000	0,0208	233	3,00E-04	<b>0,070</b>	
			20	750	450	102,82	347,18	125,00	37500	0,0200	272	3,00E-04	<b>0,082</b>	
		40	12	750	444	102,05	341,95	132,65	39795	0,0188	244	3,00E-04	<b>0,073</b>	
			16	750	442	101,79	340,21	132,74	39821	0,0188	280	3,00E-04	<b>0,084</b>	
			20	750	440	101,53	338,47	132,82	39847	0,0188	317	3,00E-04	<b>0,095</b>	
		200	20	12	750	464	104,62	359,38	90,00	27000	0,0278	141	7,56E-04	<b>0,107</b>
				16	750	462	104,36	357,64	95,00	28500	0,0263	171	7,45E-04	<b>0,128</b>
				20	750	460	104,11	355,89	100,00	30000	0,0250	204	7,33E-04	<b>0,150</b>
	30		12	750	454	103,34	350,66	115,00	34500	0,0217	196	6,98E-04	<b>0,137</b>	
			16	750	452	103,08	348,92	120,00	36000	0,0208	233	6,87E-04	<b>0,160</b>	
			20	750	450	102,82	347,18	125,00	37500	0,0200	272	6,75E-04	<b>0,184</b>	
	40		12	750	444	102,05	341,95	132,65	39795	0,0188	244	6,57E-04	<b>0,161</b>	
			16	750	442	101,79	340,21	132,74	39821	0,0188	280	6,57E-04	<b>0,184</b>	
			20	750	440	101,53	338,47	132,82	39847	0,0188	317	6,57E-04	<b>0,208</b>	
	300		20	12	750	464	104,62	359,38	90,00	27000	0,0278	141	1,26E-03	<b>0,178</b>
				16	750	462	104,36	357,64	95,00	28500	0,0263	171	1,24E-03	<b>0,213</b>
				20	750	460	104,11	355,89	100,00	30000	0,0250	204	1,23E-03	<b>0,252</b>
		30	12	750	454	103,34	350,66	115,00	34500	0,0217	196	1,20E-03	<b>0,235</b>	
			16	750	452	103,08	348,92	120,00	36000	0,0208	233	1,19E-03	<b>0,276</b>	
			20	750	450	102,82	347,18	125,00	37500	0,0200	272	1,18E-03	<b>0,320</b>	
40		12	750	444	102,05	341,95	132,65	39795	0,0188	244	1,16E-03	<b>0,283</b>		
		16	750	442	101,79	340,21	132,74	39821	0,0188	280	1,16E-03	<b>0,324</b>		
		20	750	440	101,53	338,47	132,82	39847	0,0188	317	1,16E-03	<b>0,366</b>		

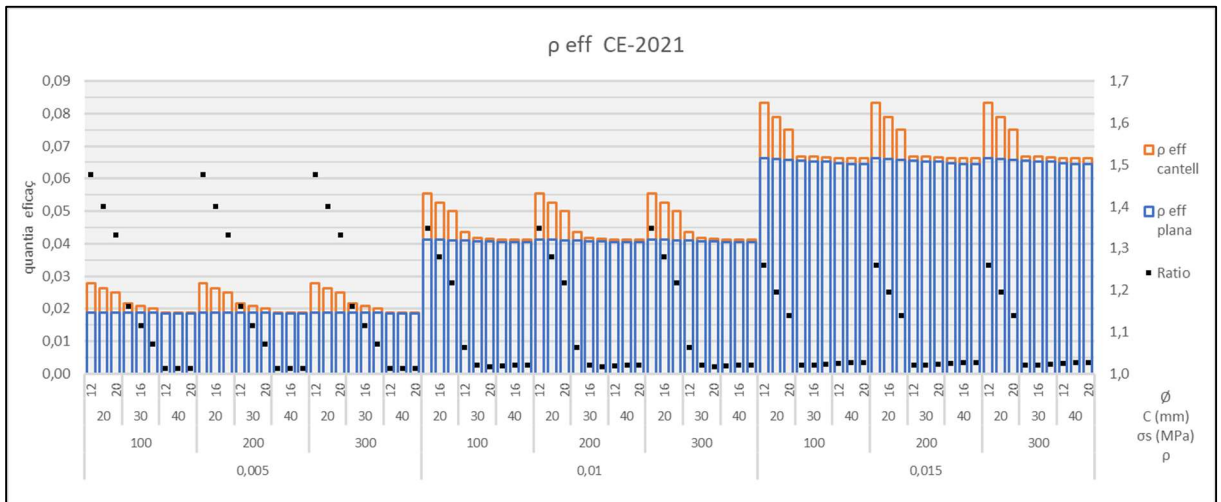
Taula 25: Resultats del CE-2021 per biga de cantell (part 1/2)

CE-2021 Biga Plana														
$\rho$	$\sigma_s$ (MPa)	C (mm)	$\emptyset$ (mm)	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	D (mm)	x (mm)	y (mm)	hef (mm)	$A_c$ eff (mm <sup>2</sup> )	$\rho$ eff	Srmax (mm)	esm-ecm	Wk (mm)	
0,01	100	20	12	1500	464	140,39	323,61	90,00	27000	0,0556	105	3,60E-04	0,038	
			16	1500	462	140,04	321,96	95,00	28500	0,0526	120	3,55E-04	0,042	
			20	1500	460	139,68	320,32	100,00	30000	0,0500	136	3,49E-04	0,047	
		30	12	1500	454	138,60	315,40	115,00	34500	0,0435	149	3,31E-04	0,049	
			16	1500	452	138,24	313,76	120,00	36000	0,0417	167	3,26E-04	0,054	
			20	1500	450	137,88	312,12	120,71	36212	0,0414	184	3,25E-04	0,060	
		40	12	1500	444	136,79	307,21	121,07	36321	0,0413	185	3,24E-04	0,060	
			16	1500	442	136,43	305,57	121,19	36357	0,0413	202	3,24E-04	0,065	
			20	1500	440	136,06	303,94	121,31	36394	0,0412	218	3,24E-04	0,071	
		200	20	12	1500	464	140,39	323,61	90,00	27000	0,0556	105	8,60E-04	0,090
				16	1500	462	140,04	321,96	95,00	28500	0,0526	120	8,55E-04	0,102
				20	1500	460	139,68	320,32	100,00	30000	0,0500	136	8,49E-04	0,115
	30		12	1500	454	138,60	315,40	115,00	34500	0,0435	149	8,31E-04	0,124	
			16	1500	452	138,24	313,76	120,00	36000	0,0417	167	8,26E-04	0,138	
			20	1500	450	137,88	312,12	120,71	36212	0,0414	184	8,25E-04	0,152	
	40		12	1500	444	136,79	307,21	121,07	36321	0,0413	185	8,24E-04	0,153	
			16	1500	442	136,43	305,57	121,19	36357	0,0413	202	8,24E-04	0,166	
			20	1500	440	136,06	303,94	121,31	36394	0,0412	218	8,24E-04	0,180	
	300		20	12	1500	464	140,39	323,61	90,00	27000	0,0556	105	1,36E-03	0,142
				16	1500	462	140,04	321,96	95,00	28500	0,0526	120	1,35E-03	0,162
				20	1500	460	139,68	320,32	100,00	30000	0,0500	136	1,35E-03	0,183
		30	12	1500	454	138,60	315,40	115,00	34500	0,0435	149	1,33E-03	0,198	
			16	1500	452	138,24	313,76	120,00	36000	0,0417	167	1,33E-03	0,222	
			20	1500	450	137,88	312,12	120,71	36212	0,0414	184	1,32E-03	0,244	
40		12	1500	444	136,79	307,21	121,07	36321	0,0413	185	1,32E-03	0,246		
		16	1500	442	136,43	305,57	121,19	36357	0,0413	202	1,32E-03	0,267		
		20	1500	440	136,06	303,94	121,31	36394	0,0412	218	1,32E-03	0,289		
0,015		100	20	12	2250	464	165,22	298,78	90,00	27000	0,0833	92	3,95E-04	0,037
				16	2250	462	164,78	297,22	95,00	28500	0,0789	102	3,91E-04	0,040
				20	2250	460	164,35	295,65	100,00	30000	0,0750	113	3,87E-04	0,044
	30		12	2250	454	163,04	290,96	112,32	33696	0,0668	133	3,78E-04	0,050	
			16	2250	452	162,60	289,40	112,47	33740	0,0667	143	3,78E-04	0,054	
			20	2250	450	162,16	287,84	112,61	33784	0,0666	153	3,78E-04	0,058	
	40		12	2250	444	160,84	283,16	113,05	33916	0,0663	167	3,77E-04	0,063	
			16	2250	442	160,40	281,60	113,20	33960	0,0663	177	3,77E-04	0,067	
			20	2250	440	159,95	280,05	113,35	34005	0,0662	187	3,77E-04	0,071	
	200		20	12	2250	464	165,22	298,78	90,00	27000	0,0833	92	8,95E-04	0,083
				16	2250	462	164,78	297,22	95,00	28500	0,0789	102	8,91E-04	0,091
				20	2250	460	164,35	295,65	100,00	30000	0,0750	113	8,87E-04	0,101
		30	12	2250	454	163,04	290,96	112,32	33696	0,0668	133	8,78E-04	0,116	
			16	2250	452	162,60	289,40	112,47	33740	0,0667	143	8,78E-04	0,125	
			20	2250	450	162,16	287,84	112,61	33784	0,0666	153	8,78E-04	0,134	
		40	12	2250	444	160,84	283,16	113,05	33916	0,0663	167	8,77E-04	0,146	
			16	2250	442	160,40	281,60	113,20	33960	0,0663	177	8,77E-04	0,155	
			20	2250	440	159,95	280,05	113,35	34005	0,0662	187	8,77E-04	0,164	
		300	20	12	2250	464	165,22	298,78	90,00	27000	0,0833	92	1,40E-03	0,129
				16	2250	462	164,78	297,22	95,00	28500	0,0789	102	1,39E-03	0,143
				20	2250	460	164,35	295,65	100,00	30000	0,0750	113	1,39E-03	0,157
	30		12	2250	454	163,04	290,96	112,32	33696	0,0668	133	1,38E-03	0,183	
			16	2250	452	162,60	289,40	112,47	33740	0,0667	143	1,38E-03	0,197	
			20	2250	450	162,16	287,84	112,61	33784	0,0666	153	1,38E-03	0,211	
40	12		2250	444	160,84	283,16	113,05	33916	0,0663	167	1,38E-03	0,230		
	16		2250	442	160,40	281,60	113,20	33960	0,0663	177	1,38E-03	0,244		
	20		2250	440	159,95	280,05	113,35	34005	0,0662	187	1,38E-03	0,258		

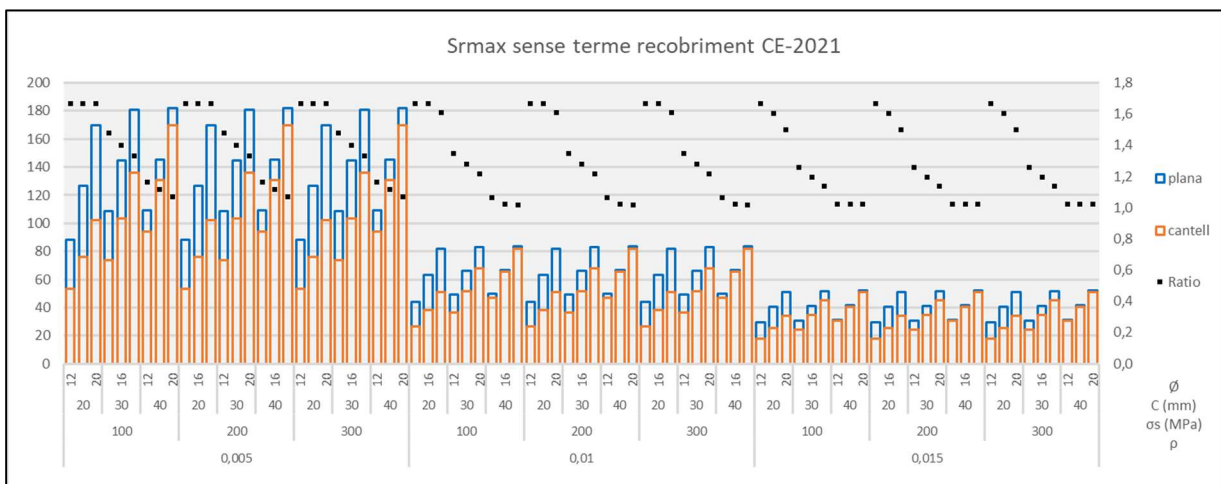
Taula 27: Resultats del CE-2021 per biga de cantell (part 2/2)



Gràfic 40: Posició de la línia neutra



Gràfic 41: Quantia efectiva segons CE-2021



Gràfic 42: Separació entre fissures menyspreant el recobriments segons CE-2021

C.3. Resultats i gràfics EC-2

EC-2 Biga Plana																
P	$\sigma_s$ (MPa)	C (mm)	$\phi$ (mm)	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	D (mm)	x (mm)	y (mm)	$A_{y,i}$ (mm)	hef (mm)	$A_c$ eff (mm <sup>2</sup> )	$\rho$ eff	S <sub>rm,cal</sub> (mm)	k <sub>1/r</sub>	esm-ecm max	W <sub>kcal</sub> EC-2	
0,005	100	20	12	1500	264	60,92	222	26,00	86	86000	0,0174	185,0	1,122	3,0E-04	0,055	
			16	1500	262	60,66	222	28,00	98	98000	0,0153	245,7	1,132	3,0E-04	0,074	
			20	1500	260	60,39	222	30,00	105	105000	0,0143	306,0	1,143	3,0E-04	0,092	
		30	12	1500	254	59,60	222	36,00	96	96000	0,0156	232,6	1,176	3,0E-04	0,070	
			16	1500	252	59,33	222	38,00	118	118000	0,0127	316,0	1,188	3,0E-04	0,095	
			20	1500	250	59,07	222	40,00	140	140000	0,0107	419,3	1,199	3,0E-04	0,126	
		40	12	1500	244	58,26	222	46,00	106	106000	0,0142	280,2	1,235	3,0E-04	0,084	
			16	1500	242	57,99	222	48,00	128	128000	0,0117	368,1	1,247	3,0E-04	0,110	
			20	1500	240	57,71	222	50,00	150	150000	0,0100	476,0	1,260	3,0E-04	0,143	
		200	20	12	1500	264	60,92	222	26,00	86	86000	0,0174	185,0	1,122	7,1E-04	0,131
				16	1500	262	60,66	222	28,00	98	98000	0,0153	245,7	1,132	6,6E-04	0,163
				20	1500	260	60,39	222	30,00	105	105000	0,0143	306,0	1,143	6,4E-04	0,195
	30		12	1500	254	59,60	222	36,00	96	96000	0,0156	232,6	1,176	7,0E-04	0,162	
			16	1500	252	59,33	222	38,00	118	118000	0,0127	316,0	1,188	6,0E-04	0,191	
			20	1500	250	59,07	222	40,00	140	140000	0,0107	419,3	1,199	6,0E-04	0,252	
	40		12	1500	244	58,26	222	46,00	106	106000	0,0142	280,2	1,235	6,9E-04	0,192	
			16	1500	242	57,99	222	48,00	128	128000	0,0117	368,1	1,247	6,0E-04	0,221	
			20	1500	240	57,71	222	50,00	150	150000	0,0100	476,0	1,260	6,0E-04	0,286	
	300		20	12	1500	264	60,92	222	26,00	86	86000	0,0174	185,0	1,122	1,3E-03	0,235
				16	1500	262	60,66	222	28,00	98	98000	0,0153	245,7	1,132	1,2E-03	0,302
				20	1500	260	60,39	222	30,00	105	105000	0,0143	306,0	1,143	1,2E-03	0,370
		30	12	1500	254	59,60	222	36,00	96	96000	0,0156	232,6	1,176	1,3E-03	0,299	
			16	1500	252	59,33	222	38,00	118	118000	0,0127	316,0	1,188	1,2E-03	0,378	
			20	1500	250	59,07	222	40,00	140	140000	0,0107	419,3	1,199	1,1E-03	0,464	
40		12	1500	244	58,26	222	46,00	106	106000	0,0142	280,2	1,235	1,3E-03	0,365		
		16	1500	242	57,99	222	48,00	128	128000	0,0117	368,1	1,247	1,2E-03	0,445		
		20	1500	240	57,71	222	50,00	150	150000	0,0100	476,0	1,260	1,1E-03	0,531		
0,01		100	20	12	3000	264	81,64	222	26,00	86	86000	0,0349	126,5	1,135	3,4E-04	0,043
				16	3000	262	81,27	222	28,00	98	98000	0,0306	156,9	1,147	3,2E-04	0,050
				20	3000	260	80,90	222	30,00	105	105000	0,0286	187,0	1,159	3,0E-04	0,057
	30		12	3000	254	79,79	222	36,00	96	96000	0,0313	167,3	1,195	3,3E-04	0,056	
			16	3000	252	79,42	222	38,00	118	118000	0,0254	209,0	1,208	3,0E-04	0,063	
			20	3000	250	79,04	222	40,00	140	140000	0,0214	260,7	1,221	3,0E-04	0,078	
	40		12	3000	244	77,91	222	46,00	106	106000	0,0283	208,1	1,261	3,3E-04	0,068	
			16	3000	242	77,53	222	48,00	128	128000	0,0234	252,1	1,275	3,0E-04	0,076	
			20	3000	240	77,15	222	50,00	150	150000	0,0200	306,0	1,289	3,0E-04	0,092	
	200		20	12	3000	264	81,64	222	26,00	86	86000	0,0349	126,5	1,135	9,1E-04	0,115
				16	3000	262	81,27	222	28,00	98	98000	0,0306	156,9	1,147	8,9E-04	0,139
				20	3000	260	80,90	222	30,00	105	105000	0,0286	187,0	1,159	8,8E-04	0,165
		30	12	3000	254	79,79	222	36,00	96	96000	0,0313	167,3	1,195	9,3E-04	0,156	
			16	3000	252	79,42	222	38,00	118	118000	0,0254	209,0	1,208	8,9E-04	0,186	
			20	3000	250	79,04	222	40,00	140	140000	0,0214	260,7	1,221	8,5E-04	0,221	
		40	12	3000	244	77,91	222	46,00	106	106000	0,0283	208,1	1,261	9,6E-04	0,199	
			16	3000	242	77,53	222	48,00	128	128000	0,0234	252,1	1,275	9,1E-04	0,231	
			20	3000	240	77,15	222	50,00	150	150000	0,0200	306,0	1,289	8,7E-04	0,266	
		300	20	12	3000	264	81,64	222	26,00	86	86000	0,0349	126,5	1,135	1,5E-03	0,186
				16	3000	262	81,27	222	28,00	98	98000	0,0306	156,9	1,147	1,5E-03	0,229
				20	3000	260	80,90	222	30,00	105	105000	0,0286	187,0	1,159	1,5E-03	0,273
	30		12	3000	254	79,79	222	36,00	96	96000	0,0313	167,3	1,195	1,5E-03	0,256	
			16	3000	252	79,42	222	38,00	118	118000	0,0254	209,0	1,208	1,5E-03	0,312	
			20	3000	250	79,04	222	40,00	140	140000	0,0214	260,7	1,221	1,5E-03	0,380	
40	12		3000	244	77,91	222	46,00	106	106000	0,0283	208,1	1,261	1,6E-03	0,331		
	16		3000	242	77,53	222	48,00	128	128000	0,0234	252,1	1,275	1,6E-03	0,391		
	20		3000	240	77,15	222	50,00	150	150000	0,0200	306,0	1,289	1,5E-03	0,463		

Taula 28: Resultats de l' EC-2 per biga plana (part 1/2)



EC-2 Biga Plana																
$\rho$	$\sigma_s$ (MPa)	C (mm)	$\phi$ (mm)	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	D (mm)	x (mm)	y (mm)	$A_{y,i}$ (mm)	hef (mm)	Ac eff (mm <sup>2</sup> )	$\rho$ eff	S <sub>rm,cal</sub> (mm)	k <sub>1/r</sub>	esm-ecm max	W <sub>kcal</sub> EC-2	
0,015	100	20	12	4500	264	95,97	222	26,00	86	86000	0,0523	107,0	1,146	4,1E-04	<b>0,043</b>	
			16	4500	262	95,53	222	28,00	98	98000	0,0459	127,2	1,159	3,9E-04	<b>0,050</b>	
			20	4500	260	95,08	222	30,00	105	105000	0,0429	147,3	1,172	3,9E-04	<b>0,057</b>	
		30	12	4500	254	93,73	222	36,00	96	96000	0,0469	145,5	1,211	4,1E-04	<b>0,060</b>	
			16	4500	252	93,28	222	38,00	118	118000	0,0381	173,3	1,225	3,8E-04	<b>0,066</b>	
			20	4500	250	92,82	222	40,00	140	140000	0,0321	207,8	1,239	3,5E-04	<b>0,073</b>	
		40	12	4500	244	91,45	222	46,00	106	106000	0,0425	184,1	1,283	4,2E-04	<b>0,077</b>	
			16	4500	242	90,98	222	48,00	128	128000	0,0352	213,4	1,298	3,9E-04	<b>0,083</b>	
			20	4500	240	90,52	222	50,00	150	150000	0,0300	249,3	1,314	3,6E-04	<b>0,089</b>	
		200	20	12	4500	264	95,97	222	26,00	86	86000	0,0523	107,0	1,146	9,8E-04	<b>0,105</b>
				16	4500	262	95,53	222	28,00	98	98000	0,0459	127,2	1,159	9,7E-04	<b>0,124</b>
				20	4500	260	95,08	222	30,00	105	105000	0,0429	147,3	1,172	9,7E-04	<b>0,143</b>
	30		12	4500	254	93,73	222	36,00	96	96000	0,0469	145,5	1,211	1,0E-03	<b>0,148</b>	
			16	4500	252	93,28	222	38,00	118	118000	0,0381	173,3	1,225	1,0E-03	<b>0,173</b>	
			20	4500	250	92,82	222	40,00	140	140000	0,0321	207,8	1,239	9,7E-04	<b>0,202</b>	
	40		12	4500	244	91,45	222	46,00	106	106000	0,0425	184,1	1,283	1,1E-03	<b>0,196</b>	
			16	4500	242	90,98	222	48,00	128	128000	0,0352	213,4	1,298	1,0E-03	<b>0,221</b>	
			20	4500	240	90,52	222	50,00	150	150000	0,0300	249,3	1,314	1,0E-03	<b>0,253</b>	
	300		20	12	4500	264	95,97	222	26,00	86	86000	0,0523	107,0	1,146	1,6E-03	<b>0,166</b>
				16	4500	262	95,53	222	28,00	98	98000	0,0459	127,2	1,159	1,6E-03	<b>0,197</b>
				20	4500	260	95,08	222	30,00	105	105000	0,0429	147,3	1,172	1,6E-03	<b>0,229</b>
		30	12	4500	254	93,73	222	36,00	96	96000	0,0469	145,5	1,211	1,6E-03	<b>0,236</b>	
			16	4500	252	93,28	222	38,00	118	118000	0,0381	173,3	1,225	1,6E-03	<b>0,279</b>	
			20	4500	250	92,82	222	40,00	140	140000	0,0321	207,8	1,239	1,6E-03	<b>0,331</b>	
40		12	4500	244	91,45	222	46,00	106	106000	0,0425	184,1	1,283	1,7E-03	<b>0,314</b>		
		16	4500	242	90,98	222	48,00	128	128000	0,0352	213,4	1,298	1,7E-03	<b>0,360</b>		
		20	4500	240	90,52	222	50,00	150	150000	0,0300	249,3	1,314	1,7E-03	<b>0,416</b>		

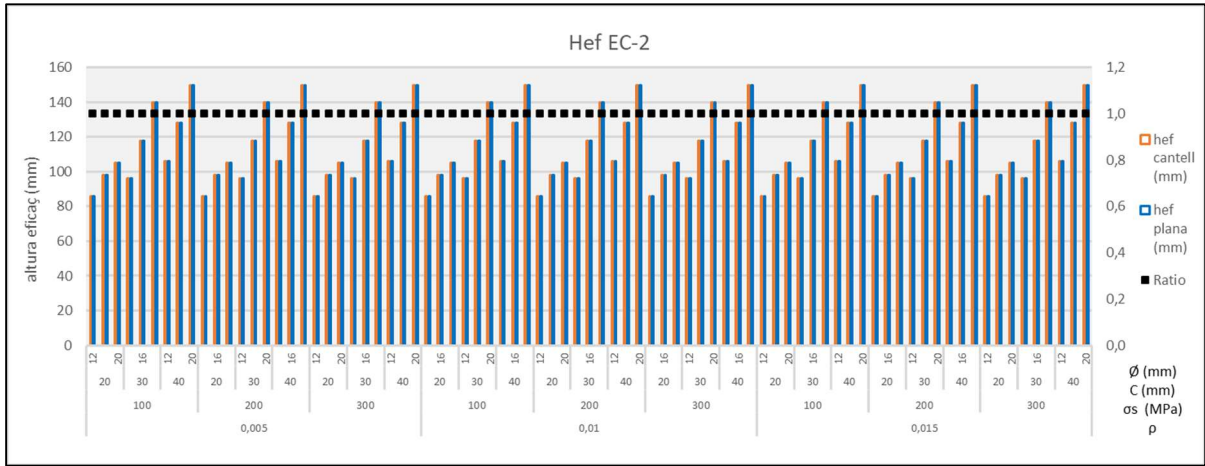
Taula 29: Resultats de l' EC-2 per biga plana (part 2/2)

EC-2 Biga Cantell																
$\rho$	$\sigma_s$ (MPa)	C (mm)	$\phi$ (mm)	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	D (mm)	x (mm)	y (mm)	$A_{y,i}$ (mm)	hef (mm)	Ac eff (mm <sup>2</sup> )	$\rho$ eff	S <sub>rm,cal</sub> (mm)	k <sub>1/r</sub>	esm-ecm max	W <sub>kcal</sub>	
0,005	100	20	12	750	464	104,62	222	26,00	86	25800	0,0291	138,2	1,070	3,0E-04	<b>0,041</b>	
			16	750	462	104,36	222	28,00	98	29400	0,0255	174,6	1,076	3,0E-04	<b>0,052</b>	
			20	750	460	104,11	222	30,00	105	31500	0,0238	210,8	1,082	3,0E-04	<b>0,063</b>	
		30	12	750	454	103,34	222	36,00	96	28800	0,0260	180,3	1,100	3,0E-04	<b>0,054</b>	
			16	750	452	103,08	222	38,00	118	35400	0,0212	230,4	1,106	3,0E-04	<b>0,069</b>	
			20	750	450	102,82	222	40,00	140	42000	0,0179	292,4	1,112	3,0E-04	<b>0,088</b>	
		40	12	750	444	102,05	222	46,00	106	31800	0,0236	222,5	1,131	3,0E-04	<b>0,067</b>	
			16	750	442	101,79	222	48,00	128	38400	0,0195	275,3	1,137	3,0E-04	<b>0,083</b>	
			20	750	440	101,53	222	50,00	150	45000	0,0167	340,0	1,143	3,0E-04	<b>0,102</b>	
		200	20	12	750	464	104,62	222	26,00	86	25800	0,0291	138,2	1,070	8,2E-04	<b>0,113</b>
				16	750	462	104,36	222	28,00	98	29400	0,0255	174,6	1,076	7,9E-04	<b>0,139</b>
				20	750	460	104,11	222	30,00	105	31500	0,0238	210,8	1,082	7,8E-04	<b>0,164</b>
	30		12	750	454	103,34	222	36,00	96	28800	0,0260	180,3	1,100	8,2E-04	<b>0,147</b>	
			16	750	452	103,08	222	38,00	118	35400	0,0212	230,4	1,106	7,6E-04	<b>0,176</b>	
			20	750	450	102,82	222	40,00	140	42000	0,0179	292,4	1,112	7,1E-04	<b>0,208</b>	
	40		12	750	444	102,05	222	46,00	106	31800	0,0236	222,5	1,131	8,1E-04	<b>0,181</b>	
			16	750	442	101,79	222	48,00	128	38400	0,0195	275,3	1,137	7,6E-04	<b>0,209</b>	
			20	750	440	101,53	222	50,00	150	45000	0,0167	340,0	1,143	7,1E-04	<b>0,240</b>	
	300		20	12	750	464	104,62	222	26,00	86	25800	0,0291	138,2	1,070	1,4E-03	<b>0,187</b>
				16	750	462	104,36	222	28,00	98	29400	0,0255	174,6	1,076	1,3E-03	<b>0,233</b>
				20	750	460	104,11	222	30,00	105	31500	0,0238	210,8	1,082	1,3E-03	<b>0,279</b>
		30	12	750	454	103,34	222	36,00	96	28800	0,0260	180,3	1,100	1,4E-03	<b>0,246</b>	
			16	750	452	103,08	222	38,00	118	35400	0,0212	230,4	1,106	1,3E-03	<b>0,303</b>	
			20	750	450	102,82	222	40,00	140	42000	0,0179	292,4	1,112	1,3E-03	<b>0,371</b>	
40		12	750	444	102,05	222	46,00	106	31800	0,0236	222,5	1,131	1,4E-03	<b>0,307</b>		
		16	750	442	101,79	222	48,00	128	38400	0,0195	275,3	1,137	1,3E-03	<b>0,365</b>		
		20	750	440	101,53	222	50,00	150	45000	0,0167	340,0	1,143	1,3E-03	<b>0,434</b>		

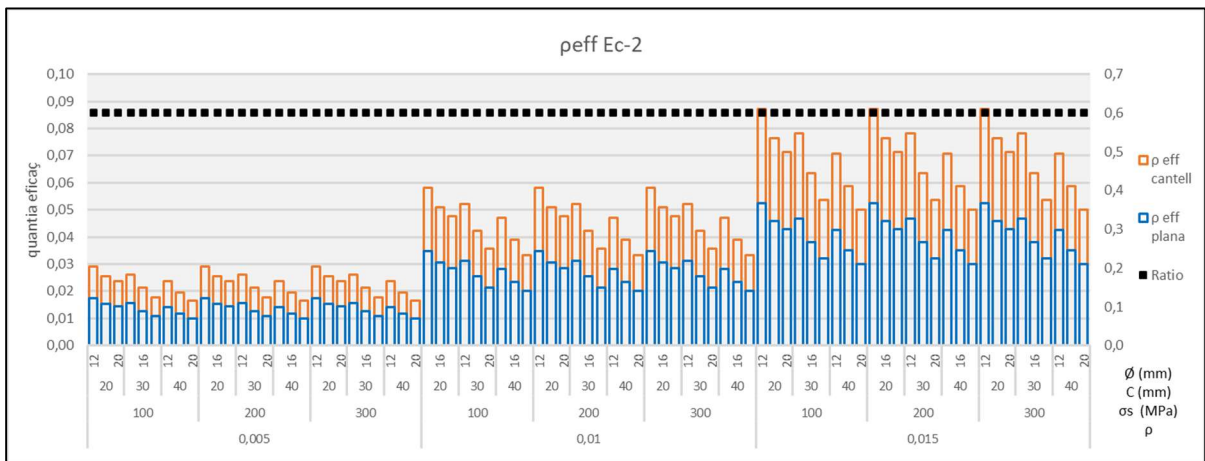
Taula 30 Resultats de l' EC-2 per biga de cantell (part 1/2)

EC-2 Biga Cantell																	
P	$\sigma_s$ (MPa)	C (mm)	$\phi$ (mm)	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	D (mm)	x (mm)	y (mm)	$A_{y,i}$ (mm)	hef (mm)	Ac eff (mm <sup>2</sup> )	$\rho$ eff	S <sub>rm,cal</sub> (mm)	k <sub>1/r</sub>	esm-ecm max	W <sub>kcal</sub>		
0,01	100	20	12	1500	464	140,39	222	26,00	86	25800	0,0581	103,1	1,078	3,9E-04	<b>0,041</b>		
			16	1500	462	140,04	222	28,00	98	29400	0,0510	121,3	1,084	3,8E-04	<b>0,046</b>		
			20	1500	460	139,68	222	30,00	105	31500	0,0476	139,4	1,091	3,7E-04	<b>0,052</b>		
		30	12	1500	454	138,60	222	36,00	96	28800	0,0521	141,2	1,111	3,9E-04	<b>0,055</b>		
			16	1500	452	138,24	222	38,00	118	35400	0,0424	166,2	1,117	3,7E-04	<b>0,061</b>		
			20	1500	450	137,88	222	40,00	140	42000	0,0357	197,2	1,124	3,4E-04	<b>0,067</b>		
		40	12	1500	444	136,79	222	46,00	106	31800	0,0472	179,2	1,145	3,9E-04	<b>0,070</b>		
			16	1500	442	136,43	222	48,00	128	38400	0,0391	205,6	1,152	3,6E-04	<b>0,075</b>		
			20	1500	440	136,06	222	50,00	150	45000	0,0333	238,0	1,159	3,4E-04	<b>0,080</b>		
		200	20	12	1500	464	140,39	222	26,00	86	25800	0,0581	103,1	1,078	9,3E-04	<b>0,096</b>	
				16	1500	462	140,04	222	28,00	98	29400	0,0510	121,3	1,084	9,2E-04	<b>0,112</b>	
				20	1500	460	139,68	222	30,00	105	31500	0,0476	139,4	1,091	9,2E-04	<b>0,128</b>	
	30		12	1500	454	138,60	222	36,00	96	28800	0,0521	141,2	1,111	9,5E-04	<b>0,134</b>		
			16	1500	452	138,24	222	38,00	118	35400	0,0424	166,2	1,117	9,2E-04	<b>0,154</b>		
			20	1500	450	137,88	222	40,00	140	42000	0,0357	197,2	1,124	9,0E-04	<b>0,178</b>		
	40		12	1500	444	136,79	222	46,00	106	31800	0,0472	179,2	1,145	9,6E-04	<b>0,173</b>		
			16	1500	442	136,43	222	48,00	128	38400	0,0391	205,6	1,152	9,4E-04	<b>0,193</b>		
			20	1500	440	136,06	222	50,00	150	45000	0,0333	238,0	1,159	9,2E-04	<b>0,218</b>		
	300		20	12	1500	464	140,39	222	26,00	86	25800	0,0581	103,1	1,078	1,5E-03	<b>0,152</b>	
				16	1500	462	140,04	222	28,00	98	29400	0,0510	121,3	1,084	1,5E-03	<b>0,178</b>	
				20	1500	460	139,68	222	30,00	105	31500	0,0476	139,4	1,091	1,5E-03	<b>0,204</b>	
		30	12	1500	454	138,60	222	36,00	96	28800	0,0521	141,2	1,111	1,5E-03	<b>0,212</b>		
			16	1500	452	138,24	222	38,00	118	35400	0,0424	166,2	1,117	1,5E-03	<b>0,247</b>		
			20	1500	450	137,88	222	40,00	140	42000	0,0357	197,2	1,124	1,5E-03	<b>0,289</b>		
		40	12	1500	444	136,79	222	46,00	106	31800	0,0472	179,2	1,145	1,5E-03	<b>0,275</b>		
			16	1500	442	136,43	222	48,00	128	38400	0,0391	205,6	1,152	1,5E-03	<b>0,312</b>		
			20	1500	440	136,06	222	50,00	150	45000	0,0333	238,0	1,159	1,5E-03	<b>0,356</b>		
		0,015	100	20	12	2250	464	165,22	222	26,00	86	25800	0,0872	91,4	1,084	4,3E-04	<b>0,039</b>
					16	2250	462	164,78	222	28,00	98	29400	0,0765	103,5	1,091	4,2E-04	<b>0,044</b>
					20	2250	460	164,35	222	30,00	105	31500	0,0714	115,6	1,098	4,2E-04	<b>0,049</b>
	30			12	2250	454	163,04	222	36,00	96	28800	0,0781	128,1	1,120	4,4E-04	<b>0,056</b>	
				16	2250	452	162,60	222	38,00	118	35400	0,0636	144,8	1,127	4,2E-04	<b>0,061</b>	
				20	2250	450	162,16	222	40,00	140	42000	0,0536	165,5	1,134	4,0E-04	<b>0,067</b>	
	40			12	2250	444	160,84	222	46,00	106	31800	0,0708	164,8	1,157	4,4E-04	<b>0,073</b>	
				16	2250	442	160,40	222	48,00	128	38400	0,0586	182,4	1,165	4,3E-04	<b>0,078</b>	
				20	2250	440	159,95	222	50,00	150	45000	0,0500	204,0	1,172	4,1E-04	<b>0,083</b>	
200	20			12	2250	464	165,22	222	26,00	86	25800	0,0872	91,4	1,084	9,7E-04	<b>0,089</b>	
				16	2250	462	164,78	222	28,00	98	29400	0,0765	103,5	1,091	9,7E-04	<b>0,100</b>	
				20	2250	460	164,35	222	30,00	105	31500	0,0714	115,6	1,098	9,7E-04	<b>0,112</b>	
	30		12	2250	454	163,04	222	36,00	96	28800	0,0781	128,1	1,120	1,0E-03	<b>0,128</b>		
			16	2250	452	162,60	222	38,00	118	35400	0,0636	144,8	1,127	9,8E-04	<b>0,143</b>		
			20	2250	450	162,16	222	40,00	140	42000	0,0536	165,5	1,134	9,7E-04	<b>0,161</b>		
	40		12	2250	444	160,84	222	46,00	106	31800	0,0708	164,8	1,157	1,0E-03	<b>0,168</b>		
			16	2250	442	160,40	222	48,00	128	38400	0,0586	182,4	1,165	1,0E-03	<b>0,184</b>		
			20	2250	440	159,95	222	50,00	150	45000	0,0500	204,0	1,172	9,9E-04	<b>0,203</b>		
	300		20	12	2250	464	165,22	222	26,00	86	25800	0,0872	91,4	1,084	1,5E-03	<b>0,139</b>	
				16	2250	462	164,78	222	28,00	98	29400	0,0765	103,5	1,091	1,5E-03	<b>0,157</b>	
				20	2250	460	164,35	222	30,00	105	31500	0,0714	115,6	1,098	1,5E-03	<b>0,176</b>	
30			12	2250	454	163,04	222	36,00	96	28800	0,0781	128,1	1,120	1,6E-03	<b>0,199</b>		
			16	2250	452	162,60	222	38,00	118	35400	0,0636	144,8	1,127	1,5E-03	<b>0,224</b>		
			20	2250	450	162,16	222	40,00	140	42000	0,0536	165,5	1,134	1,5E-03	<b>0,255</b>		
40			12	2250	444	160,84	222	46,00	106	31800	0,0708	164,8	1,157	1,6E-03	<b>0,264</b>		
			16	2250	442	160,40	222	48,00	128	38400	0,0586	182,4	1,165	1,6E-03	<b>0,290</b>		
			20	2250	440	159,95	222	50,00	150	45000	0,0500	204,0	1,172	1,6E-03	<b>0,323</b>		

Taula 31 Resultats de l' EC-2 per biga de cantell (part 2/2)

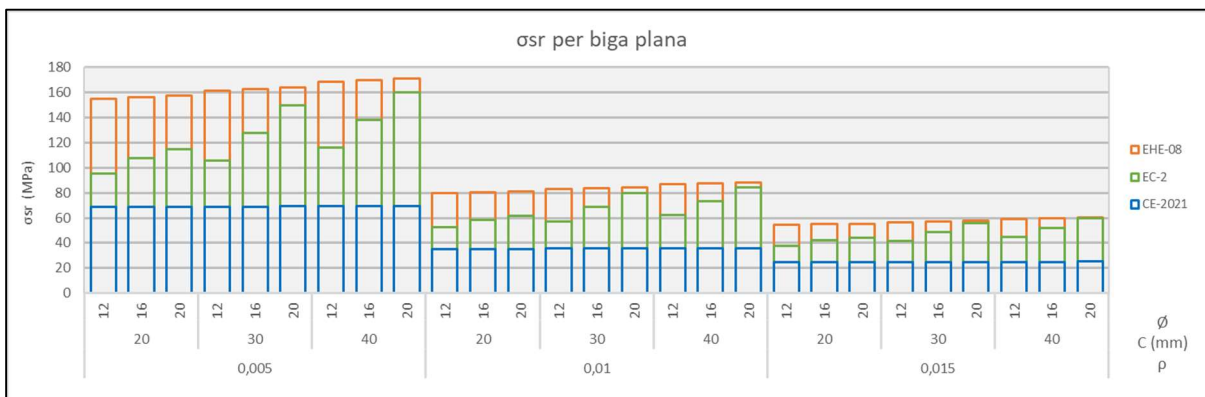


Gràfic 43: Altura efectiva segons EC-2

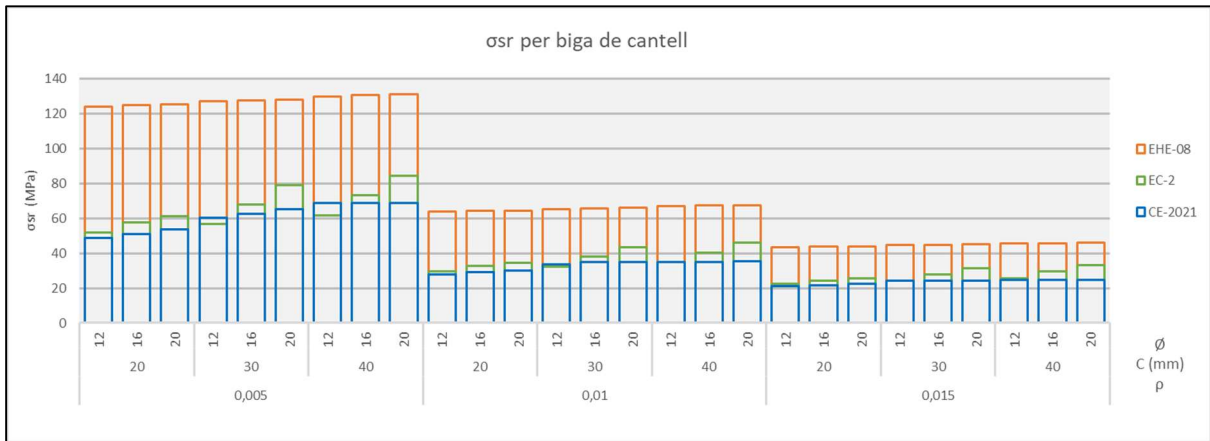


Gràfic 44: Quantia efectiva segons EC-2

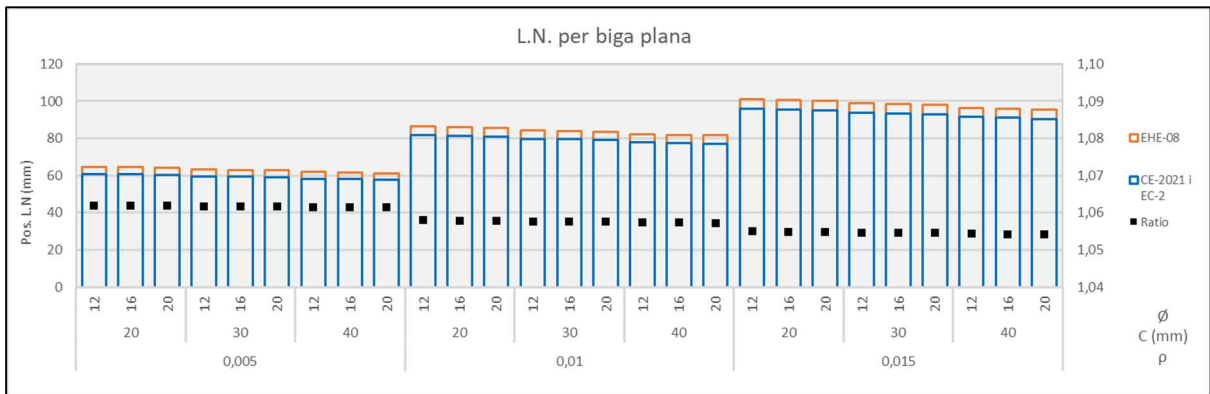
### C.4. Gràfics suplementaris globals



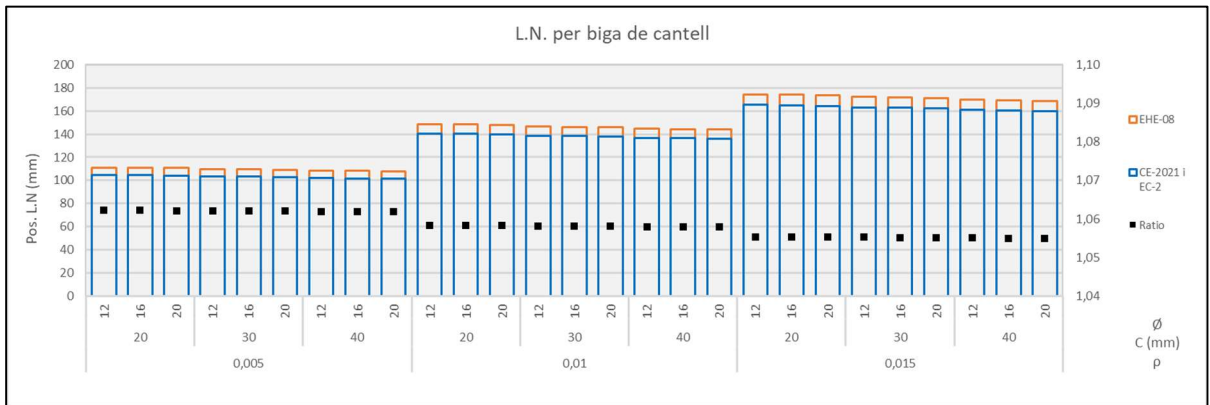
Gràfic 45: Comparativa tensió de l'armadura en l'instant en que es fissura el formigó per biga plana



Gràfic 46: Comparativa tensió de l'armadura en l'instant en que es fissura el formigó per biga de cantell



Gràfic 47: Comparativa de la posició de la L.N. per biga plana



Gràfic 48: Comparativa de la posició de la L.N. per biga de cantell

