

## **Treball final de grau**

**Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica**

**Títol: Estudi experimental de fissuració de les bigues de formigó reforçades amb materials compostos FRP amb la tècnica NSM**

**Document 1: Memòria i Annexos**

**Alumna: Anam Noureen**

**Tutor: Cristina Barris Peña**

**Departament: EMCI**

**Àrea: MMCTE**

**Convocatòria: Setembre 2019**

## ÍNDEX DE CONTINGUTS

### MEMÒRIA

<b>1. INTRODUCCIÓ.....</b>	<b>12</b>
1.1. Antecedents .....	13
1.2. Objecte del projecte.....	13
1.3. Especificacions i abast.....	14
1.3.1. Especificacions .....	14
1.3.2. Abast del projecte .....	15
<b>2. FISSURACIÓ EN ESTRUCTURES DE FORMIGÓ ARMAT REFORÇAT AMB FRP.....</b>	<b>15</b>
2.1. Estructures de formigó armat .....	15
2.2. Fissuració en elements de formigó armat.....	16
2.3. Càlcul de l'obertura de la fissura en elements de formigó armat.....	16
2.4. Materials compostos de fibres amb matriu polimèrica .....	19
2.5. Aplicació de FRP en elements de formigó armat .....	20
2.5. Fissuració en elements de formigó armat amb acer i reforçat amb NSM FRP .....	22
<b>3. CORRELACIÓ D'IMATGES DIGITALS .....</b>	<b>24</b>
3.1. Tècnica DIC.....	24
3.2. Qualitat de patró .....	26
3.3. Tècniques de correlació .....	26
<b>4. CAMPANYA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>27</b>
4.1. Disseny bigues .....	27
4.2. Configuració de l'assaig.....	29
4.3. Materials de les bigues.....	30
4.4. Instrumentació .....	31
4.5. Anàlisi de la Secció Fissurada .....	32
<b>5. ANÀLISI DELS RESULTATS EXPERIMENTALS .....</b>	<b>34</b>
5.1. Resultats de Càrrega – Fletxa .....	34
5.2. Avaluació de l'amplada de fissura mitjançant rutines d'usuari .....	36
5.3. Resultats de Fissuració .....	40

<b>6. CONCLUSIONS</b> .....	<b>48</b>
6.1. Problemàtiques trobades.....	49
6.2. Recomanacions per treballs futurs .....	51
<b>7. RELACIÓ DE DOCUMENTS</b> .....	<b>52</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>53</b>
<b>9. REFERÈNCIES</b> .....	<b>54</b>
<b>ANNEX A: CÀLCULS</b> .....	<b>56</b>
<b>A. INTRODUCCIÓ</b> .....	<b>58</b>
A.1. Disseny de les bigues a ELU de flexió.....	58
A.2. Disseny de les bigues a ELU de tallant .....	59
A.3. Càlcul del mòdul elàstic i resistència a tracció del formigó .....	61
A.4. Càlcul de càrrega en ELS .....	62
A.5. Càlcul de la càrrega de fissuració experimental i resistència tracció de formigó.....	63
A.6. Obertura característica de la fissura.....	64
A.7. Càlcul de l'amplada de la fissura amb VIC .....	66
<b>ANNEX B: ESPECIFICACIONS DELS ESPÈCIMENS</b> .....	<b>68</b>
<b>ANNEX C: PROCÉS DE FABRICACIÓ I ASSAIG DE LES BIGUES</b> .....	<b>72</b>
<b>C. INTRODUCCIÓ</b> .....	<b>74</b>
C.1. Fabricació de les bigues .....	74
C.2. Preparació de les bigues .....	77
C.3. Assaig de les bigues.....	78
C.4. Generació fitxers .mat.....	79
<b>ANNEX D: RESULTATS EXPERIMENTALS</b> .....	<b>81</b>
D.1. Càrrega – deformació formigó de cada biga.....	83
D.2. Amplada de fissures experimental .....	88
D.2.1. Biga referència (R) .....	89

D.2.2. Biga reforçada S1 .....	92
D.2.3. Biga reforçada S2 .....	98
D.2.4. Biga reforçada S3 .....	104
D.2.5. Biga reforçada S4 .....	110
D.2.6. Biga reforçada S5 .....	116
D.2.7. Biga reforçada S6 .....	122
D.2.8. Biga reforçada S7 .....	128

## ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1: Inserció del material compost en element de formigó. [2] .....	12
Figura 2: Principi del mètode de DIC. [3].....	13
Figura 3: Valors del coeficient K1. EHE08 [1] .....	17
Figura 4: Valors del l'àrea eficaç. EHE08 [1].....	18
Figura 5: Valors de l'obertura màxima permesa de la fissura. EHE08 [1].....	19
Figura 6: Gràfic resistència-deformació dels material compostos en comparació amb acer. [6] .....	20
Figura 7: Dues tècniques d'aplicació del reforç FRP en RC. [7] .....	21
Figura 8: Tècnica d'aplicació EBR del reforç FRP en biga de RC. [8] .....	21
Figura 9: Tècniques d'aplicació NSM del reforç FRP en biga de RC. [8] .....	22
Figura 10: Principi de rastrejar els mateixos subjets. [13].....	25
Figura 11: Sistema típic d'adquisició d'imatges per al mètode 2D – DIC i el patró de taques. [13] .....	25
Figura 12: Dimensions i disseny de les bigues a flexió i a tallant.....	28
Figura 13: Dimensions mínimes de les regates. [16].....	29
Figura 14: Configuració assaig de la biga a quatre punts.....	30
Figura 15: Diagrama dels comportament dels materials. [17].....	32
Figura 16: Distribució de forces i deformacions en secció fissurada. [17].....	32
Figura 17: Mode de ruptura de S1 per falla de material compost.....	36
Figura 18: Mode de ruptura de S7 per falla de adherència .....	36
Figura 19: Pestanya de matlab per introduir paràmetres.....	37
Figura 20: Imatge en l'escala de grisos per retallar fissura. ....	37
Figura 21: Matriu tridimensional per una fissura. ....	38
Figura 22: Pestanya de la rutina per introduir paràmetres.....	39
Figura 23: Mètode d'obtenció de l'alçada de reforç.....	39
Figura 24: Obtenció de l'escala de les imatges amb el VIC. ....	40
Figura 25: Posició ideal dels punts en el VIC per extreure desplaçaments i distàncies .....	50
Figura 26: Apreciació de la fissura a retallar en matlab.....	50
Figura 27: Condicioness i càrregues de les bigues.....	59
Figura 28: Càrrega en ELS de cada espècimen extret amb la rutina CSA.....	66

Figura 29: Especificacions dels Espècimens. ....	70
Figura 30: Estructura de la armadura.....	74
Figura 31: Col·locació de galgues extensomètriques en l'armadura .....	74
Figura 32: Formigonat dels espècimens.....	75
Figura 33: Bigues amb regates. ....	76
Figura 34: Col·locació de la galga a la barra de FRP. ....	77
Figura 35: Instal·lació de la lamine del FRP en els espècimens mitjançant la resina. ....	77
Figura 36: Superfície preparada del espècimen.....	77
Figura 37: Representació de la configuració de l'assaig .....	79
Figura 38: Exportar fitxers a matlab des de VIC. ....	80
Figura 39: Mètode de saber el nombre de fissures en el regó d'interès a la instant de càlcul. ....	88
Figura 40: Nombre de fissures en la biga R per instant de servei capturades per càmera 1.....	89
Figura 41: Nombre de fissures en la biga R per instant de servei capturades per càmera 2.....	89
Figura 42: Nombre de fissures en la biga R per instant de servei capturades per càmera 3.....	90
Figura 43: Nombre de fissures en la biga R per instant de servei capturades per càmera .....	90
Figura 44: Nombre de fissures en la biga S1 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 1.....	92
Figura 45: Nombre de fissures en la biga S1 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 2.....	92
Figura 46: Nombre de fissures en la biga S1 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 3.....	93
Figura 47: Nombre de fissures en la biga S1 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 4.....	93
Figura 48: Nombre de fissures en la biga S1 per instant de servei capturades per càmera 1.....	95
Figura 49: Nombre de fissures en la biga S1 per instant de servei capturades per càmera 2.....	95
Figura 50: Nombre de fissures en la biga S1 per instant de servei capturades per càmera 3.....	96
Figura 51: Nombre de fissures en la biga S1 per instant de servei capturades per càmera 4.....	96
Figura 52: Nombre de fissures en la biga S2 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 1.....	98
Figura 53: Nombre de fissures en la biga S2 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 2.....	98
Figura 54: Nombre de fissures en la biga S2 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 3.....	99
Figura 55: Nombre de fissures en la biga S2 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 4.....	99
Figura 56: Nombre de fissures en la biga S2 per instant de servei capturades per càmera 1.....	101
Figura 57: Nombre de fissures en la biga S2 per instant de servei capturades per càmera 2.....	101
Figura 58: Nombre de fissures en la biga S2 per instant de servei capturades per càmera 3.....	102

Figura 59: Nombre de fissures en la biga S2 per instant de servei capturades per càmera 4.....	102
Figura 60: Nombre de fissures en la biga S3 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 1.....	104
Figura 61: Nombre de fissures en la biga S3 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 2.....	104
Figura 62: Nombre de fissures en la biga S3 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 3.....	105
Figura 63: Nombre de fissures en la biga S3 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 4.....	105
Figura 64: Nombre de fissures en la biga S3 per instant de servei capturades per càmera 1.....	107
Figura 65: Nombre de fissures en la biga S3 per instant de servei capturades per càmera 2.....	107
Figura 66: Nombre de fissures en la biga S3 per instant de servei capturades per càmera 3.....	108
Figura 67: Nombre de fissures en la biga S3 per instant de servei capturades per càmera 4.....	108
Figura 68: Nombre de fissures en la biga S4 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 1.....	110
Figura 69: Nombre de fissures en la biga S4 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 2.....	110
Figura 70: Nombre de fissures en la biga S4 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 3.....	111
Figura 71: Nombre de fissures en la biga S4 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 4.....	111
Figura 72: Nombre de fissures en la biga S4 per instant de servei capturades per càmera 1.....	113
Figura 73: Nombre de fissures en la biga S4 per instant de servei capturades per càmera 2.....	113
Figura 74: Nombre de fissures en la biga S4 per instant de servei capturades per càmera 3.....	114
Figura 75: Nombre de fissures en la biga S4 per instant de servei capturades per càmera 4.....	114
Figura 76: Nombre de fissures en la biga S5 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 1.....	116
Figura 77: Nombre de fissures en la biga S5 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 2.....	116
Figura 78: Nombre de fissures en la biga S5 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 3.....	117
Figura 79 : Nombre de fissures en la biga S5 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 4.....	117
Figura 80: Nombre de fissures en la biga S5 per instant de servei capturades per càmera 1.....	119
Figura 81: Nombre de fissures en la biga S5 per instant de servei capturades per càmera 2.....	119
Figura 82: Nombre de fissures en la biga S5 per instant de servei capturades per càmera 3.....	120
Figura 83: Nombre de fissures en la biga S5 per instant de servei capturades per càmera 4.....	120
Figura 84: Nombre de fissures en la biga S6 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 1.....	122
Figura 85: Nombre de fissures en la biga S6 per la càrrega de 30kN capturades per camera 2.....	122
Figura 86: Nombre de fissures en la biga S6 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 3.....	123
Figura 87: Nombre de fissures en la biga S6 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 4.....	123
Figura 88: Nombre de fissures en la biga S6 per instant de servei capturades per càmera 1.....	125

Figura 89: Nombre de fissures en la biga S6 per instant de servei capturades per càmera 2. ....	125
Figura 90: Nombre de fissures en la biga S6 per instant de servei capturades per càmera 3. ....	126
Figura 91: Nombre de fissures en la biga S6 per instant de servei capturades per càmera 4. ....	126
Figura 92: Nombre de fissures en la biga S7 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 1. ....	128
Figura 93: Nombre de fissures en la biga S7 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 2. ....	128
Figura 94: Nombre de fissures en la biga S7 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 3. ....	129
Figura 95: Nombre de fissures en la biga S7 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 4. ....	129
Figura 96: Nombre de fissures en la biga S7 per instant de servei capturades per càmera 1. ....	131
Figura 97: Nombre de fissures en la biga S7 per instant de servei capturades per càmera 2. ....	131
Figura 98: Nombre de fissures en la biga S7 per instant de servei capturades per càmera 3. ....	132
Figura 99: Nombre de fissures en la biga S7 per instant de servei capturades per càmera 4. ....	132



## ÍNDIX DE TAULES

Taula 1: Requeriments i desitjos del present treball. ....	14
Taula 2: Tipus de criteris de correlació CC. ....	26
Taula 3: Tipus de criteris de correlació SSD. ....	27
Taula 4: Especificacions de reforç de cada biga. ....	28
Taula 5: Característiques del configuració de l'assaig.....	31
Taula 6: Resultats de l'anàlisi de la ruptura CSA per cada espècimen.....	33
Taula 7: Comparació de càrrega teòrica i experimental de tots els espècimens.....	35
Taula 8: Valors de les amplades de fissures de cada espècimen a càrrega 30kN.....	40
Taula 9: Valors de les amplades de fissures de cada espècimen a càrrega de servei.....	43
Taula 10: Rati de rigidesa i valors de les amplades de fissures de cada espècimen.....	44
Taula 11: Espai entre regates i resultat d'amplades de cada espècimen. ....	46
Taula 12: Valors de paràmetre perímetre exposat i resultat d'amplades de cada espècimen. ....	47
Taula 13: Càrrega en ELS de cada espècimen extret amb la rutina CSA ..... 63	63
Taula 14: Desplaçaments i distàncies dels dos punts extrets amb VIC per a 4 càmeres de la biga R... 66	66
Taula 15: Amplades de fissures calculades mitjançant VIC per a biga R..... 67	67
Taula 16: Propietats de les resines..... 76	76
Taula 17: Valors de les amplades de fissures de biga de referència a càrrega de 30kN..... 91	91
Taula 18: Valors de les amplades de fissures de biga S1 a càrrega de 30kN. .... 94	94
Taula 19: Valors de les amplades de fissures de biga S1 a càrrega de servei. .... 97	97
Taula 20: Valors de les amplades de fissures de biga S2 a càrrega de 30kN. .... 100	100
Taula 21: Valors de les amplades de fissures de biga S2 a càrrega de servei. .... 103	103
Taula 22: Valors de les amplades de fissures de biga S3 a càrrega de 30kN. .... 106	106
Taula 23: Valors de les amplades de fissures de biga S3 a càrrega de servei. .... 109	109
Taula 24: Valors de les amplades de fissures de biga S4 a càrrega de 30kN ..... 112	112
Taula 25: Valors de les amplades de fissures de biga S4 a càrrega de servei. .... 115	115
Taula 26: Valors de les amplades de fissures de biga S5 a càrrega de 30kN. .... 118	118
Taula 27: Valors de les amplades de fissures de biga S5 a càrrega de servei. .... 121	121
Taula 28: Valors de les amplades de fissures de biga S6 a càrrega de 30kN. .... 124	124

Taula 29: Valors de les amplades de fissures de biga S6 a càrrega de servei. ....	127
Taula 30: Valors de les amplades de fissures de biga S7 a càrrega de 30kN. ....	130
Taula 31: Valors de les amplades de fissures de biga S7 a càrrega de servei. ....	133

## **ÍNDIX DE GRÀFIQUES**

Gràfica 1: Càrrega - fletxa experimental de tots els espècimens.....	34
Gràfica 2: Amplada de fissura a 30kN pels espècimens amb FRP tipus S&P. ....	41
Gràfica 3: Amplada de fissura a 30kN pels espècimens amb FRP tipus SIKADUR.....	42
Gràfica 4: Amplada experimental de tots els espècimens en càrrega de servei. ....	43
Gràfica 5: Amplada de la fissura en funció de la rigidesa. ....	44
Gràfica 6: Amplada de la fissura en funció de la rigidesa normalitzada. ....	45
Gràfica 7: Càrrega – fletxa experimental de l'espècimen de referència R.....	63
Gràfica 8: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen R. ....	83
Gràfica 9: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen S1. ....	84
Gràfica 10: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen S2. ....	84
Gràfica 11: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen S3. ....	85
Gràfica 12: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen S4. ....	85
Gràfica 13: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen S5. ....	86
Gràfica 14: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen S6. ....	86
Gràfica 15: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen S7. ....	87

## **1. MEMÒRIA**



## 1. INTRODUCCIÓ

Aquest treball consisteix en la realització d'un estudi experimental de la fissuració de bigues de formigó armades amb acer i reforçades amb materials compostos, en anglès *Fibre Reinforced Polymer (FRP)*, mitjançant la tècnica de reforç inserit en el recobriment, en anglès *Near Surface Mounted (NSM)*.

En el camp de construcció, l'ús dels materials compostos (FRP), amb la tècnica NSM, és un dels mètodes més emprats per a millorar la capacitat resistent d'elements de formigó armat ja existents. D'aquesta forma, es pot aplicar una càrrega final superior a l'obtinguda en elements no reforçats i a més es pot reduir l'amplada de les fissures i la fletxa esperades, ja que s'augmenta la rigidesa de l'espècimen.

L'interès de conèixer l'amplada de fissura ve donat pel requeriment de l'estat límit de fissuració exposat en la normativa vigent (EHE-08, *instrucció de formigó armat* [1]), on estan establerts els valors màxims de les amplades de fissures, atès que la fissuració pot disminuir el rendiment de durabilitat, la funcionalitat i l'aparença de l'estructura.

Els principals motius per aplicar materials compostos com a reforç d'elements de formigó armat són que presenten millor resistència als ambient corrosius, baix pes i alta resistència en comparació amb l'acer.

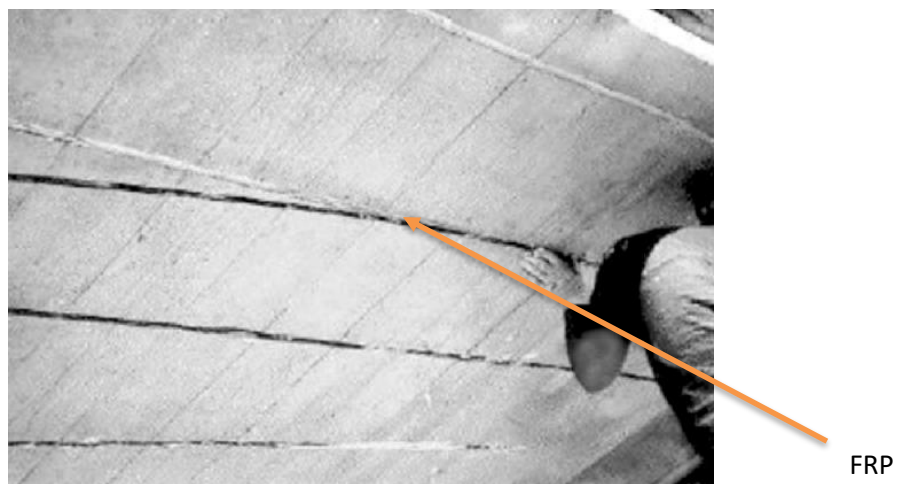


Figura 1: Inserció del material compost en element de formigó. [2]

En aquest treball, l'amplada de la fissura es mesurarà amb el mètode de correlació d'imatges digitals, en anglès *Digital Image correlation (DIC)*. El DIC és un mètode òptic que permet obtenir una mesura de desplaçaments i deformacions d'una determinada superfície sense estar en contacte amb la superfície d'estudi mitjançant la correlació de les imatges adquirides. Mitjançant unes càmeres digitals, es graven imatges d'una superfície determinada (Regió d'interès, ROI) de manera consecutiva durant l'assaig, que després s'analitzen per determinar la deformació i desplaçaments superficial.

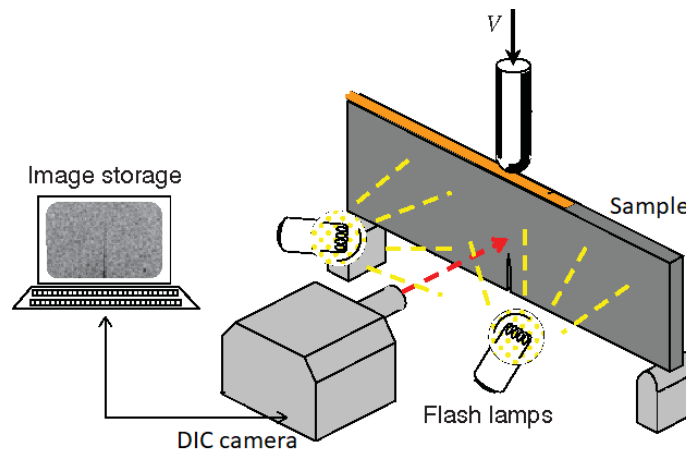


Figura 2: Principi del mètode de DIC. [3]

### 1.1. Antecedents

Actualment, existeixen normatives vigents disponibles per tal de calcular l'amplada teòrica de la fissura pels elements convencionals de formigó armat (EHE-08 [1], Eurocodi 2 [4], Codi Model 2010 [5]). No obstant, l'aplicació d'FRP en estructures de formigó és relativament recent, i és per aquest motiu que actualment es troben molt pocs estudis sobre fissuració dels elements de formigó reforçat amb NSM FRP. A més, no es troba cap normativa publicada (ni a nivell nacional ni internacional) que indiqui com calcular l'amplada de fissuració d'elements de formigó armat reforçats amb NSM FRP.

Per altra banda, existeix una dificultat a l'hora de poder mesurar experimentalment la fissuració d'elements de formigó. En els darrers anys, el grup de recerca AMADE ha desenvolupat unes rutines d'usuari per tal de mesurar objectivament i sistemàticament l'obertura de fissura mitjançant la tècnica de correlació d'imatges digitals (DIC). No obstant, aquests programes únicament s'han pogut aplicar en pocs espècimens i cal una implantació més sistemàtica.

### 1.2. Objecte del projecte

L'objectiu d'aquest treball final de grau és estudiar l'estat de fissuració de bigues de formigó reforçades amb materials compostos mitjançant un estudi experimental de 8 bigues, de les quals 7 seran reforçades amb material compost i una serà sense reforç per poder comparar els resultats obtinguts. Les 7 bigues reforçades amb NSM FRP també seran diferents en quant a la distribució, quantia i tipus del reforç.

A més a més, es pretén analitzar el sistema DIC emparant les rutines creades en Matlab per calcular l'amplada de la fissura de manera automàtica de les vuit bigues assajades en el laboratori. El càlcul d'amplada només es fa de les fissures verticals, és a dir, de les fissures que apareixen a la zona de la flexió pura.

La idea és, per un costat, comparar l'amplada de la fissura experimental de les set bigues reforçades amb la biga sense reforç i per altra banda, analitzar els resultats de les amplades de les fissures de les

set bigues reforçades amb NSM FRP amb la hipòtesis de que com més quantitat de reforç FRP hi ha instal·lat a la biga menor serà l'amplada de fissura en aquesta i major serà la seva càrrega última.

Les bigues es construeixen i s'assagen al laboratori d'estructures de l'Escola Politècnica Superior (Universitat de Girona).

### 1.3. Especificacions i abast

#### 1.3.1. Especificacions

Aquest apartat exposa les especificacions del present treball. Es defineixen dos tipologies de tasques a realitzar: les tasques que són un requeriment del treball i les que són tasques desitjades però no necessàries per al desenvolupament del treball. A continuació es presenta *Taula 1* on es troba detallada cada tasca i la seva tipologia.

Tasca	Requeriment/Desig	Descripció
Disseny, fabricació, assaig	R	Dissenyar, fabricar, i assajar vuit bigues de formigó armat reforçades amb NSM FRP.
Tipus de assaig	R	Realitzar l'assaig a quatre punts per analitzar la zona de flexió pura (zona central).
Tècnica de DIC	R	Mesurar l'amplada de les fissures en estat de servei mitjançant el mètode DIC i amb les rutines d'usuari.
Efectivitat del reforç NSM FRP en elements de RC	R	Discutir l'efectivitat del reforç NSM FRP en elements de RC i detallar de manera comparativa els resultats entre diferents espècimens per observar la influència dels paràmetres variables com quantitats, distribució i tipus del material del FRP.
Mode de ruptura	D	Analitzar el mode de ruptura dels espècimens i treure'n conclusions.
Càlcul càrrega última	R	Calcular la càrrega última teòrica dels espècimens per observar la influència de material compostos
Carrega última	D	Comparar la càrrega última experimental dels espècimens amb la càrrega última teòrica.
Fletxa màxima	D	Treure la fletxa màxima dels espècimens reforçat i observar la influència de material compostos.

Taula 1: Requeriments i desitjos del present treball.

### 1.3.2. Abast del projecte

El present projecte proporciona una discussió sobre l'efectivitat del reforç NSM FRP en la fissuració de bigues de formigó armat. Altrament es facilita els resultats per a la verificació de l'eficiència de la tècnica DIC conjuntament amb la rutines de Matlab creades per a poder mesurar objectivament i sistemàticament l'obertura de fissura. A més, es descriuen els principis teòrics del present treball per tal d'aclarir els conceptes bàsics relacionats amb el tema per poder seguir i entendre el treball objecte.

## 2. FISSURACIÓ EN ESTRUCTURES DE FORMIGÓ ARMAT REFORÇAT AMB FRP

Aquest capítol descriu breument les propietats mecàniques de les estructures de formigó armades i detalla el procediment que cal seguir per comprovar l'estat límit de fissuració en bigues de formigó armat sotmeses a flexió.

A més, s'explica què són els materials compostos, quines són les seves aplicacions en el camp de construcció estructural i el mètode de càlcul de l'estat de fissuració en els elements RC reforçats amb NSM FRP.

### 2.1. Estructures de formigó armat

El formigó armat, en anglès *Reinforced concrete (RC)*, és un dels materials més utilitzats en camp de la construcció estructural. Aquest material està compost per formigó i barres d'acer disposades de tal forma que absorbeixin els esforços que el formigó sol és incapaç de resistir, o sigui, els esforços de tracció. Les barres d'acer dins del formigó reben el nom d'armadures i generalment es col·loquen de forma que quedin protegides dels ambients corrosius. Les raons que han fet possible que el formigó armat arribi a treballar amb un resultat tan satisfactori, són:

- És un material ideal per a construccions monolítiques, sense junts ni unions, proporcionant un gran hiperestaticisme.
- És resistent al foc ja que el formigó és un mal conductor de la calor i el seu coeficient de dilatació tèrmica és sensiblement igual al de l'acer.
- És resistent als efectes climàtics i al desgast mecànic.
- És econòmic (els àrids solen ser barats) i les despeses de manteniment són baixes.
- Permet l'obtenció d'elements prefabricats.

En el moment de projectar una estructura de formigó armat cal establir les dimensions dels elements, el tipus de formigó, els additius, i l'acer que s'ha de col·locar, que depèn dels esforços que haurà de suportar i de les condicions ambientals a les quals es projectarà.

A més, quan es projecta una estructura de formigó armat a Espanya, cal tenir en compte els requisits establerts per la normativa vigent *Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)* per tal d'assolir els nivells de seguretat adequat.



## 2.2. Fissuració en elements de formigó armat

En les estructures de formigó armat sol ser inevitable l'aparició de fissures, que no suposen un inconvenient per a la seva utilització normal, però cal que siguin compatibles amb les exigències marcades en la normativa vigent, és a dir, que no superin els valors límits de l'amplada que depèn de les condicions ambientals a les que es troba exposat l'element.

Al projectar i construir una estructura s'utilitzen els Estats Límits perquè aquesta mantingui les condicions de resistència i ús requerides durant tot el període de vida útil. Una estructura supera els Estats Límits es quan deixa de complir alguna de les funcions per la qual ha estat dissenyada. Es defineixen dos tipus d'Estats Límits:

- **Estats Límits Últims (ELU):** es refereix als estats que poden fer perillar la integritat física de l'estructura o dels usuaris, per trencament o col·lapse de l'estructura o d'una part d'ella. Es poden considerar deguts a:
  - Deformacions plàstiques excessives, trencament o pèrdua d'estabilitat
  - Equilibri
  - Acumulació de deformacions o fatiga
- **Estats Límits a Servei (ELS):** es refereix a les situacions que poden fer perillar l'aspecte físic o estètic de l'edifici o inclòs la seva funcionalitat o comoditat, però sense posar en perill la seva integritat física. Es poden considerar els següents:
  - Fissuració (amplada de la fissura i separació entre les fissures)
  - Deformacions
  - Vibracions

## 2.3. Càlcul de l'obertura de la fissura en elements de formigó armat

A l'hora de fer els càlculs de l'amplada de fissura en els ELS sempre s'ha de determinar un valor màxim per tal d'evitar possibles oxidacions i/o corrosions, ja que aquesta és una de les causes més importants del deteriorament de les estructures. En aquest apartat s'exposa la formulació que proposa la EHE-08, als articles 49.2.3 i 49.2.4, per al mètode general de càlcul de l'obertura de fissura en el cas de la fissuració per tracció, per tant, les fissures degudes a la retracció plàstica, assentament plàstic o les produïdes per les reaccions químiques expansives en el formigó endurit.

L'obertura característica de la fissura es calcula mitjançant l'equació (1), i depèn de l'allargament de l'armadura i la separació entre fissures:

$$w_k = \beta \cdot S_m \cdot \varepsilon_{sm} \quad (1)$$

On  $\beta$  és el coeficient que relaciona l'obertura mitjana de fissura amb el valor característic i val 1,3 per a fissuració produïda per accions indirectes i 1,7 per a la resta de casos. La  $S_m$  és la separació mitjana de les fissures expressada en mil·límetres i es calcula amb l'expressió (2). I per últim, la  $\varepsilon_{sm}$  és l'elongació mitjana dels reforços, tenint en compte la col·laboració del formigó entre fissures es calcula amb l'expressió (3).

$$S_m = 2c + 0,2s + 0,4k_1 \cdot \frac{\phi \cdot A_{c,eficac}}{A_s} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[ 1 - k_2 \cdot \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \geq 0,4 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (3)$$

On  $c$  és el recobriment de les armadures traccionades i  $s$  és la distància entre barres longitudinals. Si  $s > 150$  es prendrà  $s = 150\text{mm}$ . En el cas de bigues armades amb  $n$  barres, es prendrà  $s=b/n$  essent  $b$  l'ample de la biga.  $k_1$  és el coeficient que representa la influència del diagrama de traccions a la secció, i tindrà el valor obtingut de l'equació (4).

$$k_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{8 \varepsilon_1} \quad (4)$$

$\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$  són les deformacions màxima i mínima calculades en secció fissurada, en els límits de la zona traccionada. El valor de  $k_1$  també és pot obtenir a partir de la *Figura 3*.

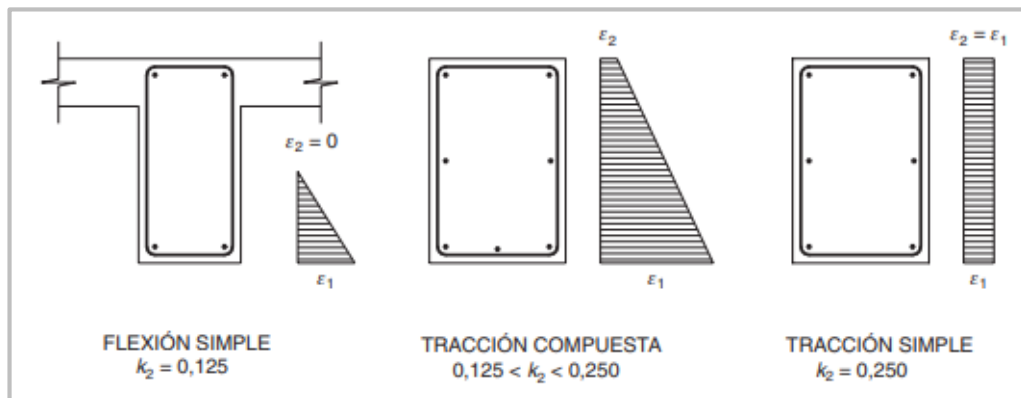


Figura 3: Valors del coeficient  $k_1$ . EHE08 [1]

$\phi$  és el diàmetre de la barra traccionada més gruixuda o diàmetre equivalent en el cas de grup de barres.  $A_{c,eficac}$  és l'àrea eficaç del formigó de la zona traccionada on les barres a tracció influeixen de forma efectiva en la obertura de fissura, el valor de la qual s'obté de la *Figura 4*.

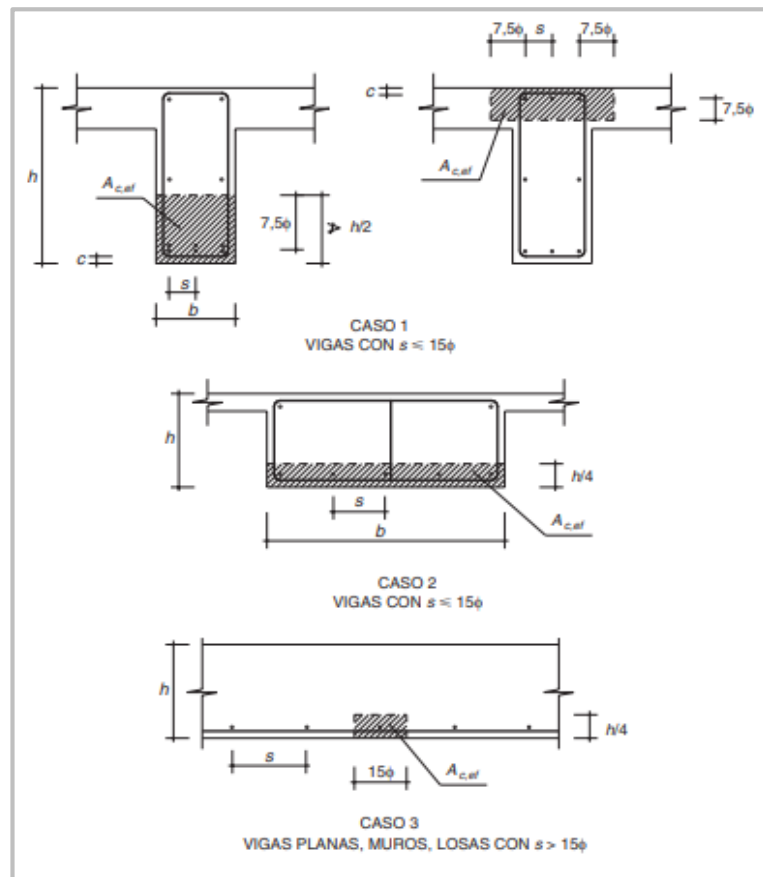


Figura 4: Valors del l'àrea eficaç. EHE08 [1]

On  $A_s$  és la secció total de les armadures situades a l'àrea  $A_{c,eficax}$ , la  $\sigma_s$  és la tensió de servei de la armadura passiva en la hipòtesis de secció fissurada,  $E_s$  és el mòdul de deformació longitudinal de l'acer,  $k_2$  és el coeficient de valor 1,0 per als casos de càrrega instantània no repetida i 0,5 per a la resta de casos i  $\sigma_{sr}$  és la tensió de la armadura en la secció fissurada en l'instant en que es fissura el formigó, que succeeix quan la tensió de tracció a la fibra més traccionada de formigó arriba al valor  $f_{ctm,fl}$ .

Un cop calculada l'amplada característica de la fissura, per comprovar si l'element compleix amb l'Estat Límit de Fissuració per tracció cal satisfer la inequació (5).

$$w_k \leq w_{m\grave{a}x} \quad (5)$$

On  $w_k$  és l'obertura característica de la fissura i  $w_{m\grave{a}x}$  és l'obertura màxima permesa de la fissura que es troba, d'acord amb la normativa EHE08, en la Figura 5.

Classe d'exposició	$w_{max}$ [mm]	
	Formigó armat (combinació quasi-permanent)	Formigó pretesat (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	

(1) Adicionalmente deberá comprobarse que las armaduras activas se encuentran en la zona comprimida de la sección, bajo la combinación de acciones cuasipermanentes.  
(2) La limitación relativa a la clase Q sólo será de aplicación en el caso de que el ataque químico pueda afectar a la armadura. En otros casos, se aplicará la limitación correspondiente a la clase general correspondiente.

Figura 5: Valors de l'obertura màxima permesa de la fissura. EHE08 [1]

Es pot observar en la Figura 5 que l'amplada màxima permesa de la fissura depèn de l'ambient on està exposat l'element, de forma que si l'ambient és molt agressiu (per exemple, un ambient IIIc o Q) l'amplada màxima permesa serà menor per tal d'evitar l'oxidació de les armadures o minimitzar la velocitat de reacció d'oxidació.

Actualment hi ha altres materials que poden ajudar al formigó armat per tal d'evitar aquests problemes, com per exemple els materials compostos (FRP) que ajuden a disminuir l'amplada de fissura.

#### 2.4. Materials compostos de fibres amb matriu polimèrica

Un material compost es pot definir com una combinació de dos o més materials que resulta en millors propietats que els components individuals utilitzats sols. Els compostos de polímer reforçat amb fibra (FRP), en anglès, *Fibre Reinforced Polymers* (FRP), són materials compostos fabricat a partir d'una matriu de polímers que es reforça amb una fibra. Les fibres proporcionen resistència i rigidesa per reforçar la matriu. La matriu polimèrica protegeix les fibres dels danys ambientals i externs i transfereix els esforços i deformacions a les fibres. El polímer sol ser un plàstic epoxi, de vinilèster o de polièster. Les fibres són normalment de vidre, carboni o aramida, encara que de vegades s'utilitzen altres fibres com el paper o la fusta o l'amiant.

Els FRP es poden classificar segons el tipus de fibra en: fibra de vidre (GFRP), fibra de carboni (CFRP) i fibra d'aramida (AFRP). En la Figura 6 es pot veure el gràfic tensió-deformació dels diferents materials compostos i l'acer. Es pot observar que, a diferència de l'acer, els FRP presenten un ventall relativament ampli de resultats. A més, la seva resistència a tracció és relativament alta en comparació amb l'acer i presenten un comportament lineal fins a ruptura.

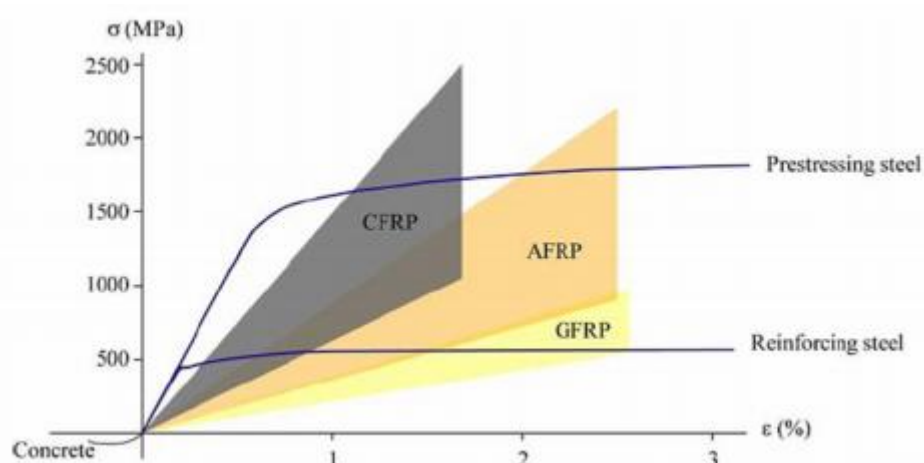


Figura 6: Gràfic resistència-deformació dels materials compostos en comparació amb acer. [6]

Els materials compostos FRP són lleugers, presenten una alta resistència i rigidesa, es poden construir fàcilment i poden adaptar-se per satisfer els requisits de rendiment i una resistència substancial a la corrosió i la fatiga. A causa d'aquestes característiques avantatjoses els FRP es consideren cada vegada més com una millora i / o substitució de components o sistemes d'infraestructura que es construeixen amb materials d'enginyeria civil tradicionals, concretament de formigó i acer.

Des d'un punt de vista d'enginyeria estructural, els problemes més greus amb els reforços de FRP són la manca de comportament plàstic i baixa resistència al tallant. Ja que la relació d'esforç- deformació dels FRP, a diferència del comportament dúctil de l'acer, és elàstica i lineal fins a la ruptura. A més, l'alt cost inicial del material FRP fa que aquest no pugui satisfer els requisits de baix cost per al material estructural. Una gran avantatge dels FRP és que tenen propietat ortotròpics (les seves propietats mecàniques varien en els tres plans ortogonals), això encara el fa més ideal per algunes construccions en concret.

Per totes aquestes propietats, els FRP resulten ser un material ideal per substituir l'acer i/o reforçar elements de formigó armat en ambients on acer es corrosiona i erosiona, per tal d'evitar els elevats costos de manteniment.

## 2.5. Aplicació de FRP en elements de formigó armat

Els polímers reforçats amb fibra (FRP) es poden aplicar en gairebé tots els tipus d'estructura d'enginyeria avançada. Apart de la seva aplicació en les estructures noves o en estructures de formigó armat com a substituïts de l'acer, els FRP es poden emprar per a millorar la capacitat de flexió de les estructures de formigó armat existents. Aquestes millores són sovint necessàries per diversos motius, com ara per a reparacions per danys produïts per factors ambientals, canvis d'ús de l'estructura o també per complir codis de disseny més nous o més estrictes.

Per a l'aplicació dels materials FRP com a reforç estructural del formigó, actualment s'han establert dues tècniques principals (Figura 7): reforç adherit externament (**Externally Bonded Reinforcement o EBR**) i reforç inserit al recobriment (**Near-Surface Mounted o NSM**).

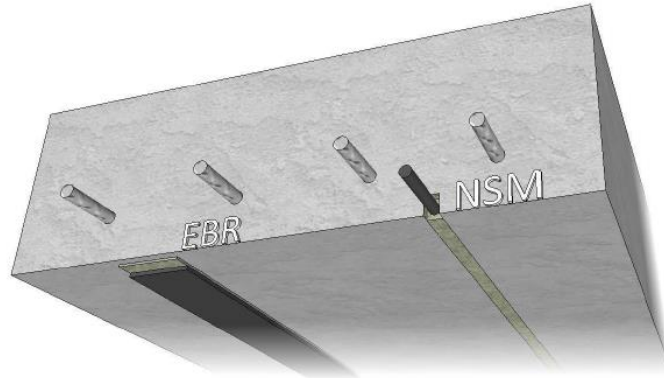


Figura 7: Dues tècniques d'aplicació del reforç FRP en RC. [7]

El mètode de reforçar bigues de formigó armat amb EBR FRP, mostrat a la Figura 8, consisteix en l'aplicació del material de reforç a la superfície externa de l'element estructural. En aquesta, el laminat d'FRP s'enganxa a la cara de tracció de l'element RC típicament amb una resina epoxídica. Aquesta tècnica de reforç pot provocar fallades prematures per desenganxament del laminat (en anglès, debonding), especialment quan s'utilitza gran quantitat d'FRP.

Per altra banda, l'FRP aplicat amb la tècnica EBR fàcilment podria rebre danys degut impactes externs i efectes ambientals atès que es troba sobre al nivell superficial del element estructural.

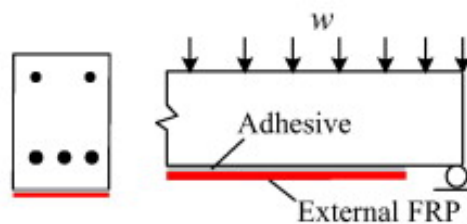


Figura 8: Tècnica d'aplicació EBR del reforç FRP en biga de RC. [8]

El mètode de reforç bigues de formigó armat amb NSM FRP és lleugerament més recent i eficaç. Aquesta tècnica consisteix en la instal·lació de barres o làmines de material compost dins d'una ranura prèviament tallada en el recobriment de les armadures de tracció de l'estructura de formigó i normalment s'hi uneix amb un adhesiu adequat com l'epòxid. Aquest mètode tendeix a proporcionar un millor rendiment dels enllaços entre els components de FRP i el formigó ja que hi ha més superfície de contacte, així com una millor distribució de la tensió en comparació amb els laminats EBR. A més, com que el NSM-FRP està instal·lat en ranures, també està més protegit davant els impactes externs.

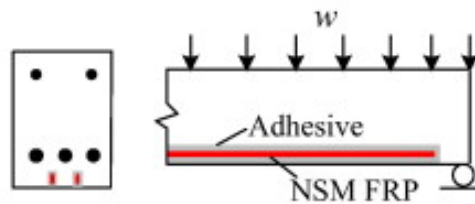


Figura 9: Tècniques d'aplicació NSM del reforç FRP en biga de RC. [8]

El sistema NSM FRP també pot col·lapsar a causa d'una fallada per adherència entre l'FRP, l'adhesiu i el formigó. L'adherència entre els elements depèn de diversos paràmetres com les propietats dels materials involucrats (formigó, adhesiu i FRP) i els detalls constructius relacionats amb la instal·lació.

En el cas de la tècnica NSM, el material de reforç pot consistir en barres (típicament de secció circular) o laminats (normalment de secció rectangular). L'acabat de l'FRP pot ser diferent en funció del subministrador, trobant-se actualment acabats totalment llisos, acabats amb un cert grau de rugositat proporcionat per una capa de sorra adherida a la superfície, o d'altres tipus d'acabats (helicoidals, corrugats, etc) en el cas de barres.

## 2.5. Fissuració en elements de formigó armat amb acer i reforçat amb NSM FRP

L'ús dels materials compostos (FRP) com a reforç en estructures de formigó armades (ja sigui amb la tècnica EBR o NSM) proporciona una fissuració més distribuïda, és a dir, més nombre de fissures però d'amplada menor (més estretes).

En els darrers anys i actualment, s'estan duent a terme nombrosos estudis, tant experimentals com numèrics, per ressaltar els beneficis i els desavantatges d'utilitzar EBR i NSM per reforçar estructures de formigó armat.

A alguns països s'han publicat codis o guies de disseny per a estructures reforçades amb FRP però el tema de fissuració encara no està ben estudiat. Per tant, actualment no es disposa d'una formulació clara per poder comprovar si l'amplada de l'esquerda s'assembla amb l'amplada teòrica, però en present treball es busca verificar que l'amplada de la fissura és menor en element reforçat amb NSM FRP en comparació amb un element no reforçat.

La versió actual de l'*Eurocodi 2* [4] no disposa de formulació per al càlcul de fissuració pels elements de formigó armat i reforçat amb material compostos, i la normativa espanyola vigent EHE-08 [1], tampoc. Fins i tot el Codi Model [5], considerat per molts organismes com el codi de referència d'estructures de formigó armat, tampoc disposa d'aquesta formulació. La guia de disseny americana *ACI 440.2R-17* [9] només limita tensió al formigó i a l'acer per complir amb estat límit de servei (ELS). És a dir, es realitza un control indirecte de la fissuració a través de limitar les tensions en els materials.

L'única fórmula de codi disponible per al càlcul la separació mitjana entre les fissures i l'amplada en els membres de RC reforçats per FRP amb la tècnica EBR s'ofereix a la fib Butlletí 14 [10]. No obstant això, hi ha altres recursos disponibles per a les prediccions sobre l'amplada i la separació de fissures a Ceroni & Pecce [11].

A nivell de recerca, es troba Zehetmaier & Zilch [12] per al càlcul de l'amplada en els membres de RC reforçats per FRP tan amb la tècnica EBR com la tècnica NSM. A continuació s'explica el procediment que cal seguir per calcular l'amplada de la fissura en elements de RC amb FRP NSM, d'acord amb el document Zehetmaier & Zilch.

Segons el document de Zehetmaier i Zilch (2008), el valor característic de l'amplada de fissura teòrica en membres RC reforçats amb FRP amb la tècnica NSM es pot avaluar utilitzant el mateix enfocament de Eurocodi2. El seu valor s'obté a partir de la fórmula 6:

$$w_k = S_{cr,max} (\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm}) \quad (6)$$

on  $S_{cr,max}$  és la separació màxima entre les fissures expressada en mil·límetres i es calcula amb l'expressió (7),  $\varepsilon_{fm}$  és l'allargament mitjà dels reforços FRP en la secció fissurada i es calcula amb l'equació (8), i per últim,  $\varepsilon_{cm}$  és la deformació mitjana del formigó entre fissures, calculada a partir de l'equació (9) o considerada, per simplicitat, igual a zero.

$$S_{cr,max} = \frac{A_{c,eff} \cdot f_{ct,eff}}{\tau_{fm}} \cdot \frac{E_f \cdot t_f \cdot \xi_f}{E_s A_s + E_f A_f \xi_f} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{fm} = \varepsilon_f \cdot \eta_f - 0,5 \cdot A_{c,eff} \cdot f_{ct,eff} \left( \frac{\xi_f^2}{E_s A_s + E_f A_f \xi_f^2} \right) \quad (8)$$

$$\varepsilon_{cm} = 0,4 \cdot \frac{f_{ct,eff}}{E_{cm}} \quad (9)$$

A l'expressió (7),  $A_{c,eff}$  és l'àrea eficaç del formigó de la zona de traccionada que influeix en la obertura de fissura,  $f_{ct,eff}$  és el valor mitjà de la resistència efectiva a tracció del formigó en el moment en què es pot esperar que es produeixin les esquerdes. i el  $t_f$  és el gruix del laminat FRP. A l'expressió (8),  $\varepsilon_f$  és l'allargament dels reforços FRP entre fissures,  $\eta_f$  és la relació de deformació ponderada per la respectiva rigidesa axial del reforç extern i intern,  $\xi_f$  és un coeficient d'enllaç que descriu la diferència en el comportament de la unió derivada de les condicions de contorn de l'estat d'un sola fissura, i per últim,  $\tau_{fm}$  és l'esforç tallant mitjà de l'enllaç de l'armadura.



### 3. CORRELACIÓ D'IMATGES DIGITALS

Aquesta secció del treball explica el mètode de correlació d'imatges digitals, en anglès *Digital Image Correlation* (DIC), que s'ha emparat per poder determinar l'amplada de la fissura de les bigues del formigó armat. A més, es presenta les seves aplicacions en el grup de recerca AMADE de la Universitat de Girona.

La tècnica DIC és una eina flexible i útil per a l'anàlisi experimental de desplaçaments deformacions de superfícies. En comparació amb els aparells d'extensometria clàssica, la quantitat d'informació recopilada s'incrementa gràcies a la capacitat de proporcionar les dades de tota la superfície tractada. És un mètode amb una configuració experimental senzilla, baixa exigència en entorns experimentals, àmplia gamma d'aplicabilitat però té un elevat cost per estudiar la distribució de la deformació amb alta precisió.

#### 3.1. Tècnica DIC

El DIC és un mètode òptic que permet obtenir una mesura de desplaçaments i deformacions d'una determinada superfície sense estar en contacte amb la superfície d'estudi mitjançant la correlació d'imatges. Mitjançant unes càmeres digitals, es graven imatges d'una superfície determinada (Regió d'interès, ROI) de manera consecutiva durant l'assaig. Aquestes imatges, en format digital, són posteriorment processades per determinar la deformació i desplaçament superficial.

Per a poder emprar aquesta tècnica, cal preparar la superfície de la mostra estudiada de manera que sigui possible la correlació d'imatges. Per aconseguir-ho, s'aplica un patró de taques (en anglès, *speckles*) negres sobre fons blanc (o a l'inrevés). Aquest patró ha de ser isotròpic, no repetitiu i amb un elevat contrast, utilitzant diferents tècniques en funció del tipus de material i la mida de la mostra objectiu. Amb això s'aconsegueix obtenir un camp de variacions de tonalitats de gris totalment aleatòria que permetrà la diferenciació entre grups de píxels anomenats *subsets* en anglès. Atès que un sol punt no té prou informació per ser rastrejat, la imatge es fragmenta en múltiples *subsets* i els centres de les quals estan separats entre ells una determinada distància anomenada *stepsize* en anglès. La informació de cada *subset* es recollirà en una posició de la matriu de correlació. La funció de correlació consisteix en trobar la posició del *subset* al llarg de l'assaig, de manera que queda registrat el seu desplaçament.

El principi bàsic del mètode DIC és localitzar els mateixos subset situats a la imatge de referència i la imatge deformada per recuperar els desplaçaments i consegüentment, la deformació de cada centre de subset. Finalment, per obtenir el camp de desplaçaments i deformacions en tota la superfície, el software realitza interpolacions entre els diferents centres de subset.

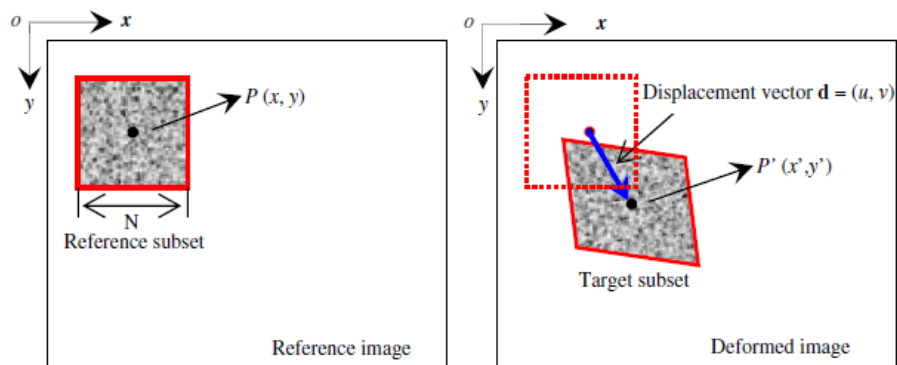


Figura 10: Principi de rastrejar els mateixos subconjunts. [13]

La mida dels subconjunts pot ser, per exemple de 11 x 11, 15 x 15, 21 x 21 píxels i poden trobar-se sobreposats si les distàncies horitzontals i verticals entre centres de subconjunt són inferiors a la mida d'aquests. Com a norma general, l'*stepsize* es considera entre 1/3 i 1/4 de la mida del *subset*. Això implica que els *subsets* no estaran perfectament encaixats, sinó que estaran parcialment solapats, per tal de tenir més *subsets* a la nostra àrea d'interès, i a l'hora de fer la correlació, obtenir més dades.

La tècnica de DIC diferencia dues modalitats: la 2D i la 3D. En el cas de dues dimensions del DIC (2D-DIC), mostrat a la *Figura 11* la càmera està situada completament perpendicular a la superfície d'interès de la peça i és necessari que la mostra pateixi una deformació plana. En canvi, en el cas de tres dimensions del DIC (3D-DIC) les càmeres estan col·locades a un cert angle del pla perpendicular de la superfície del material i s'usa per poder observar els moviments de fora del pla.

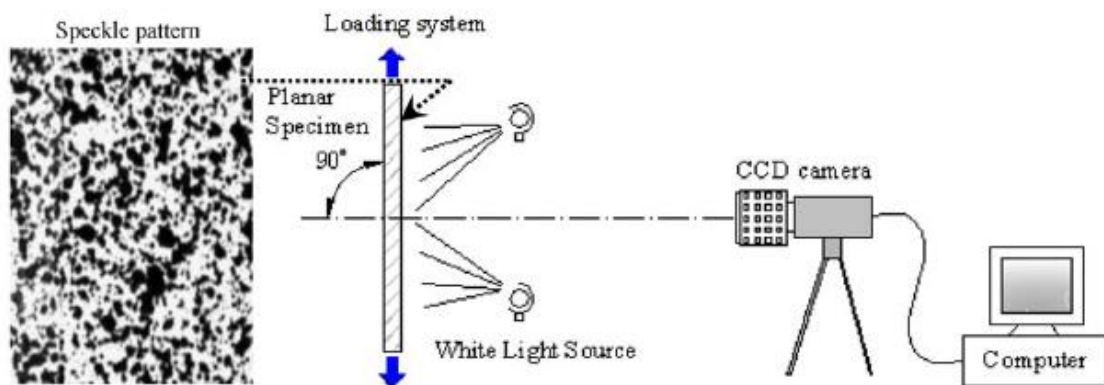


Figura 11: Sistema típic d'adquisició d'imatges per al mètode 2D – DIC i el patró de taques. [13]

### 3.2. Qualitat de patró

El factor qualitat de patró és molt important per a que correlació sigui possible. El patró consisteix en pintar una sèrie de punts negres o blancs, en funció de si tenim una superfície blanca o negra, de manera que hi hagi el màxim contrast amb el fons, i obtenir un gradient de color el més gran possible. Aquest patró d'*speckles* permet que cada zona de la superfície (subset) tingui una informació única i diferent, de manera que es pugui diferenciar cada zona a cada instant de temps.

Per controlar el nivell de grisos, i per tant, la qualitat del patró d'*speckles*, existeixen diversos mètodes, però el més usat és el MIG (*Mean Intensity Gradient*), proposat per Pan [13], en el que es calcula el gradient de grisos entre els píxels de tota la imatge i dóna una idea general del contrast de grisos a tota l'àrea d'interès. La qualitat del patró requerida serveix de guia per a realitzar un bon tractament superficial previ a l'assaig i permet fer un ús òptim del mètode DIC. El valor del MIG que Pan considerava acceptable és a partir de 10 adimensional.

### 3.3. Tècniques de correlació

El principi bàsic de la tècnica DIC és la correlació. Per a determinar els *subsets* en els diferents instants de temps hi ha una gran varietat de mètodes de correlació, basats en funcions matemàtiques. Per tant, cal definir un criteri de correlació abans d'iniciar el procés de correlació mitjançant el software del mètode DIC.

Els criteris de correlació serveixen per quantificar la diferència entre les dues matrius de grisos en diferents instants de temps, a l'hora de fer el procés iteratiu de cerca del centre del *subset*. Els principals criteris de correlació es divideixen en dos grups: els criteris de correlació CC (Correlació Creuada) i SSD (Sumatori de Diferències Creuades). En cadascun d'aquests criteris de correlació es defineixen els coeficients exposats en la *Taula 2* i la *Taula 3*.

Criteris de correlació CC	Expressió
Correlació Creuada (CC)	$C_{CC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{i'=-M}^M [f(x_i, y_i) \cdot g(x'_i, y'_i)]$
Correlació Creuada Normalitzada (NCC)	$C_{NCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{i'=-M}^M \left[ \frac{f(x_i, y_i) \cdot g(x'_i, y'_i)}{\bar{f} \cdot \bar{g}} \right]$
Correlació Creuada Normalitzada a Zero (ZNCC)	$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{i'=-M}^M \left[ \frac{(f(x_i, y_i) - f_m) \cdot (g(x'_i, y'_i) - g_m)}{\Delta f \cdot \Delta g} \right]$

Taula 2: Tipus de criteris de correlació CC.

Criteris de correlació SSD	Expressió
Sumatori de Diferències Quadrades (SSD)	$C_{SSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{i=-M}^M [f(x_i, y_i) - g(x'_i, y'_i)]^2$
Sumatori de Diferències Quadrades Normalitzades (NSSD)	$C_{NSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{i=-M}^M \left[ \frac{f(x_i, y_i)}{\bar{f}} - \frac{g(x'_i, y'_i)}{\bar{g}} \right]^2$
Sumatori de Diferències Quadrades Normalitzades a Zero (ZNSSD)	$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{i=-M}^M \left[ \frac{(f(x_i, y_i) - f_m)}{\bar{f}} - \frac{(g(x'_i, y'_i) - g_m)}{\bar{g}} \right]^2$

Taula 3: Tipus de criteris de correlació SSD.

En les expressions de les Taules 2 i 3, M és la meitat d'un subret,  $f(x_i, y_i)$  la matriu de grisos en la imatge inicial i  $g(x'_i, y'_i)$  és la matriu de grisos en instants final.

#### 4. CAMPANYA EXPERIMENTAL

En aquest capítol es descriu de manera exhaustiva el procediment i punts importants que s'han tingut en compte per dissenyar, construir i assajar les bigues experimentals. Per tal de dur a terme la part experimental, s'ha previst el disseny de vuit bigues de formigó armades reforçades amb material compost amb la tècnica NSM.

##### 4.1. Disseny bigues

Totes les bigues assajades tenen les mateixes mides externes (Figura 12) i tenen la mateixa configuració pel reforç intern de les armadures longitudinals (armadura a flexió) i les armadures transversals (armadura a tallant) d'acer. En canvi, totes les bigues presenten una diferència en el reforç de material compost FRP, bé sigui la quantitat, distribució o el tipus d'FRP.

Les mides de les bigues (longitud, amplada i alçada) s'han adaptat a assaigs anteriors realitzats al laboratori d'Estructures de EPS. Totes les bigues assajades tenen longitud de 2400 mm, l'amplada de 140 mm i l'alçada de 180 mm.

En quant al dimensionament de l'armadura longitudinal per a la fallada per flexió s'ha adoptat d'un treball realitzat anteriorment pel grup de recerca AMADE [15]. Per tant, totes les bigues tenen dues armadures longitudinals de diàmetre 10 mm a la zona de tracció i dues armadures longitudinals del diàmetre 6 mm a la zona de compressió. S'ha comprovat les quanties mínimes mecàniques i geomètriques de les armadures longitudinals d'acord amb la normativa EHE08.

Per altra banda, s'ha realitzat el dimensionament i la comprovació de l'armadura a tallant, per tal d'evitar les ruptures fràgils. Així, totes les bigues tenen 1 estrep de diàmetre 8mm cada 100mm al llarg de tota la biga sense diferenciar entre la zona on hi ha tallant màxim i tallant nul. Els càlculs de l'armadura a tallant, realitzats d'acord amb la normativa EHE08, estan adjuntats en l'ANNEX A.

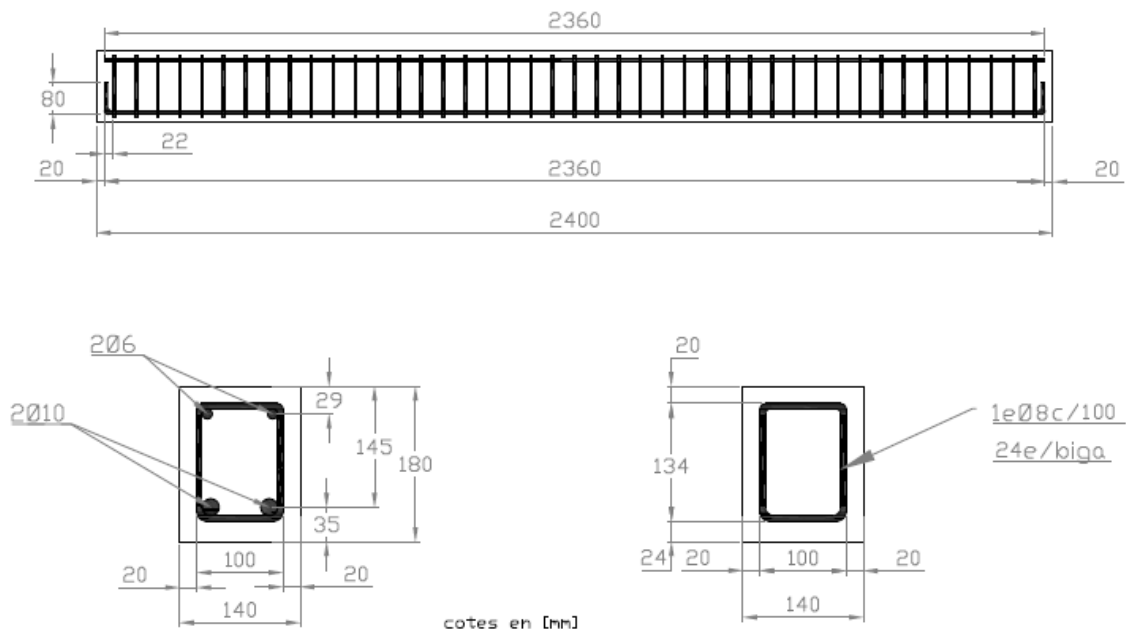


Figura 12: Dimensions i disseny de les bigues a flexió i a tallant.

El reforç de les bigues pel material compost FRP amb la tècnica NSM s’ha fet de manera subjectiva per tal de aconseguir l’objectiu del treball present. De les vuit bigues de formigó armat que es fabriquen, set seran reforçades amb NSM FRP i una serà sense aquest reforç per tal d’observar l’efectivitat de NSM FRP. Per la inserció del FRP en les bigues de formigó armades s’han fet unes regates a la zona de tracció, i les seves dimensions van en funció del material FRP que hi s’introdueix.

Espècimens	Tipus FRP	Quantia FRP	Núm laminees FRP	Dimensions regata
R	-	-	0	-
S1	S &P	1,4 x 10	1	6x16
S2	S &P	1,4 x 10	2	6x16
S3	S &P	2,8 x 10	2	10x16
S4	S &P	2 x 1,4 x 10 + 2,8 x 10	3	2x6x16 i 10x16
S5	SIKA	3 x 10	1	10x16
S6	SIKA	3 x 10	2	10x16
S7	SIKA	3 x 10	3	10x16

Taula 4: Especificacions de reforç de cada biga.

En la Taula 4 es pot veure el resum de les variables de cada espècimen, a més en l’ANNEX B, d’especificacions del espècimens, es pot observar més detalladament el reforç intern FRP en les bigues així com la distribució del material compost en aquestes i les mides de les regates.

Les mides de regates mostrades en la *Taula 4* s'han decidit d'acord amb la *Figura 13*, on les dimensions mínimes depenen del gruix i d'amplada del material composts FRP. Per tant, les regates on s'instal·la FRP de gruix 1,4mm, l'amplada de regata és de 6mm i les regates on s'instal·la FRP del gruix 2,8mm i 3mm la amplada de regata és de 10mm. L'alçada de la regata és la mateixa per a totes les bigues, ja que l'alçada de l'FRP és sempre de 10mm i per tant, l'alçada de regata s'ha fet de 16mm.

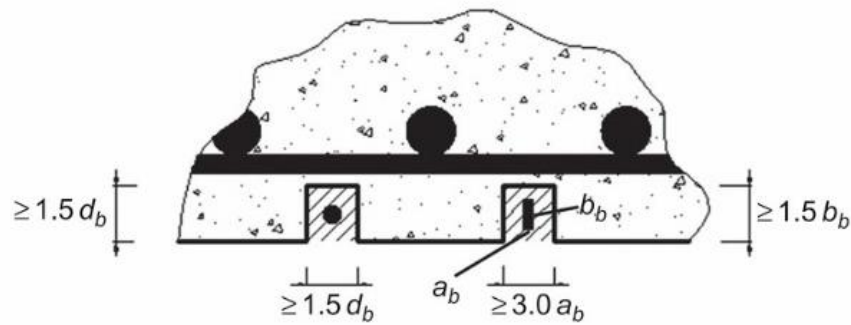


Figura 13: Dimensions mínimes de les regates. [16]

Per altra banda, també s'ha tingut en compte la distància mínima entre regates i la distància mínima entre el lateral de la biga i la regata, d'acord amb l'ACI 440.2R-17 [9].

#### 4.2. Configuració de l'assaig

L'assaig a flexió s'ha realitzat a quatre punts tal com es mostra a la *Figura 14*. La càrrega s'ha aplicat mitjançant un gat hidràulic en funció del desplaçament controlat a una velocitat de 0,01 mm/sec. Per aplicar la càrrega en dos punts s'ha emprat una biga metàl·lica distribuïdora de longitud 1200 mm.

La biga a assajar es recolza sobre dos suports metàl·lics separats entre ells de 2100 mm, de manera que per un punt la biga queda perfectament articulada i per l'altre punt només recolzada. Les càrregues estan separades entre elles 1100 mm a fi d'obtenir una zona central de flexió pura més ampla, per obtenir un nombre significatiu de fissures de flexió en aquesta zona.

El motiu de realitzar l'assaig a quatre punts era per obtenir la zona de flexió pura, és a dir, zona on tallant sigui nul, de manera que s'obtidrien les fissures rectes sense cap influència d'esforços tallants. Totes les bigues s'han assajat a curt termini i fins a la ruptura.

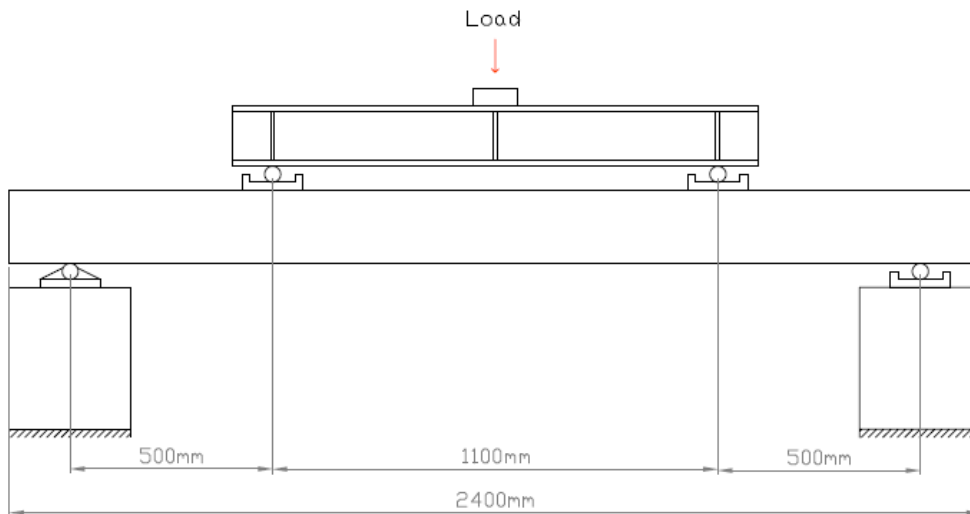


Figura 14: Configuració assaig de la biga a quatre punts

### 4.3. Materials de les bigues

Els materials principals que s'han usat per dissenyar les bigues són: formigó, acer, material comport FRP i adhesiu. A continuació es descriuran propietats mecàniques de cada material.

Les propietats mecàniques del formigó s'han obtingut a partir de les proves de compressió de tres provetes cilíndriques. D'aquesta forma, la resistència a la compressió real mitjana era de 36,9 MPa, el mòdul elàstic 33146 MPa i la resistència a tracció 5,7MPa.

A mode comparatiu, s'ha calculat els valors de mòdul d'elasticitat i resistència a tracció a partir de la resistència a compressió 36,9MPa, d'acord amb la normativa EHE08 (ANNEX A). S'obté el valor de la resistència a tracció igual a 2,3MPa i el mòdul elàstic pren un valor de 33240,6MPa.

Finalment, s'ha obtingut el valor de la resistència a tracció a partir de la càrrega de fissuració experimental (ANNEX A), obtenint un valor de 4,6 MPa.

Les propietats mecàniques de les barres d'acer no s'han obtingut experimentalment, sinó que s'han agafat uns valors estàndards, on la resistència a tracció és de 620 MPa, el límit de fluència és de 515 MPa i el mòdul elàstic és de 205000 MPa.

Les característiques de material compost i d'adhesiu depenen de cada fabricant. En aquest treball s'ha treballat amb dos fabricants diferents: SIKA i S&P. Les propietats del FRP de tipus SIKADUR30 s'han obtingut després de realitzar proves en el laboratori, on resistència a tracció és 3206 MPa i el mòdul elàstic és 169318 MPa. Les propietats del FRP tipus S&P 200 s'ha obtingut d'un projecte realitzat anteriorment, on el valor de la resistència a tracció és 2400 MPa i el valor del mòdul elàstic és 160 GPa.

Per últim, les propietats de l'adhesiu pel material compost S&P 220 i per SIKADUR30 són diferents. La resistència a tracció és 20 MPa i 27,5 MPa i el mòdul elàstic és 6600 MPa i 10700 MPa respectivament.

#### 4.4. Instrumentació

La instrumentació usada durant la realització dels assajos s'indica a continuació.

- Unacèl·lula de càrrega per tal mesurar la càrrega real aplicada sobre la biga.
- Els LVDTs (*transformador diferencial de variació lineal*) per mesurar els desplaçaments verticals del punt central de la biga i dels dos punt laterals, d'aquesta manera es pot obtenir la fletxa real del punt central de la biga.
- Les galgues per a mesurar la deformació de la secció central de l'armadura de tracció, del FRP i la deformació del formigó de la zona de compressió, per obtenir el comportament deformacional de la secció instrumentada.
- Les Càmeres reflex ubicades per adquirir desplaçaments de les zones de tallant amb una velocitat de 1data /30 sec (malgrat aquestes imatges no s'utilitzen en el present treball).
- El sistema DIC per tal de mesurar el camp de desplaçament de la superfície de la biga. En la *Taula 5* es mostren les característiques de configuració de l'assaig.

Característiques de configuració de l'assaig	
Numero de càmeres	4
Velocitat d'adquisició (Hz)	1Hz
Lent usada	Xenonplan x23
Distancia focal (mm)	23
Resolució (píxel)	2452 x 2056
Precisió (mm/píxels)	1,3233
Obertura del diafragma (f)	5,6
Temps de tancament del diafragma ( $\mu$ s)	500
Distancia respecte espècimen (cm)	88
Regió d'interès (mm <sup>2</sup> )	300 x 178 aprox
Subset i stepsize (píxels)	21 x 21 i 5
Valor mitjà del MIG	15
Tipus de correlació	NSSD

Taula 5: Característiques del configuració de l'assaig



#### 4.5. Anàlisi de la Secció Fissurada

L'anàlisi de la secció fissurada, en anglès *Cracked section analysis* (CSA), serveix per avaluar teòricament el comportament de flexió dels espècimens assumint que hi ha una secció totalment fissurada, considerant la unió perfecta entre materials, seccions planes després de la flexió i sense efectes temporals es calcula la relació moment-curvatura de cada secció amb i sense reforç de NSM.

Per fer l'anàlisi CSA, cal tenir en compte els diferents comportaments dels materials tal com mostra la *Figura 15*. Pel que fa al reforç de tracció intern, l'acer, es considera un comportament elàstic-plàstic, mentre que el reforç extern, l'FRP, té un comportament elàstic fins a la ruptura. Finalment, el comportament del formigó a compressió és tipus parabòlic, on una petita part inicial es pot considerar que comporta de manera lineal.

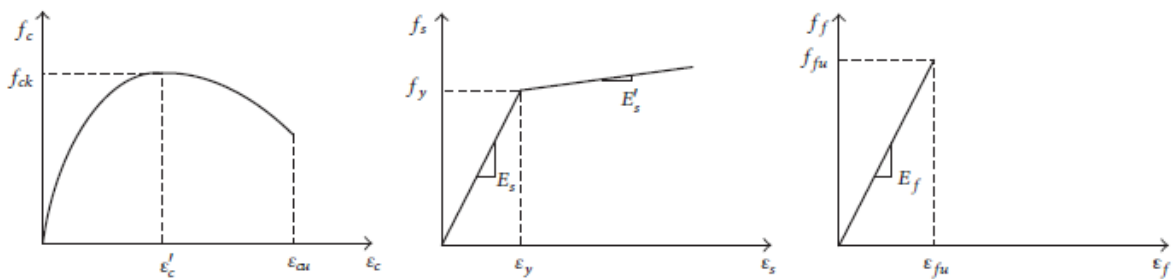


Figura 15: Diagrama dels comportaments dels materials. [17]

L'anàlisi de seccions s'efectua utilitzant la condició de compatibilitat de deformació i equilibri de les forces per predir el comportament a flexió dels exemplars reforçats (*Figura 16*).

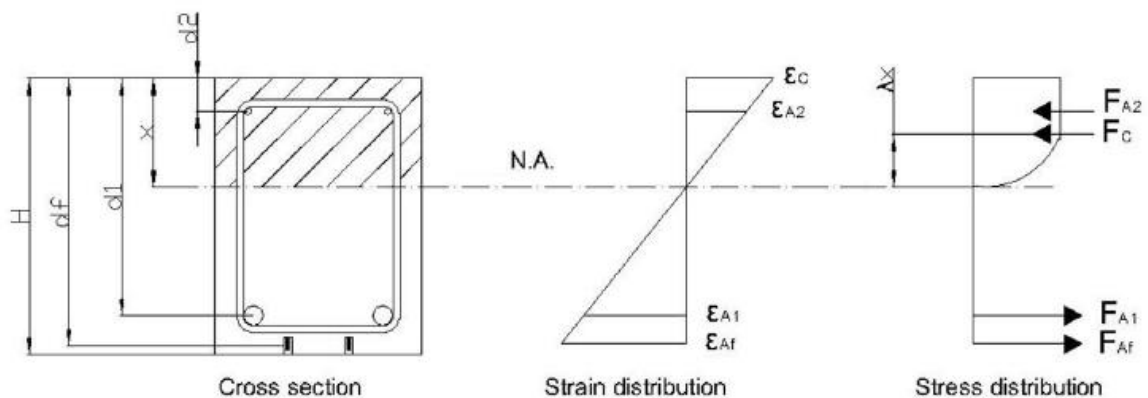


Figura 16: Distribució de forces i deformacions en secció fissurada. [17]

Per tant, per l'equilibri de la secció, les forces totals desenvolupades a la secció han de ser iguals a zero (Equació 10) i la suma dels moments interns al llarg de la secció ha de ser igual al moment aplicat (Equació 11). L'equilibri dels moments s'avalua en la posició de l'eix neutre. A més, s'ha d'aconseguir l'equació de compatibilitat, que estableix que les seccions planes abans de flexió continuen també ser planes després de flexió (hipòtesi de Bernoulli) (Equació 12).

$$\sum F = 0 \rightarrow F_{Af} + F_{A1} - F_c - F_{A2} = 0 \quad (10)$$

$$\sum M = F_{A1} \cdot (d_1 - x) + F_{Af} \cdot (d_f - x) + F_c \cdot \lambda \cdot x + F_{A2} \cdot (x - d_2) = M_a \quad (11)$$

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_{A1}}{d_1 - x} = \frac{\varepsilon_f}{d_f - x} = \frac{\varepsilon_{A2}}{x - d_2} \quad (12)$$

La rutina de CSA s'avalua per a una deformació de formigó  $\varepsilon_c$  variant des de 0 fins a  $\varepsilon_{cu}$ , essent  $\varepsilon_{cu}$  la deformació última de formigó. A cada pas, es comprova que les tensions i les deformacions en els materials no superin als seus valors límits.

Quan un dels materials arriba al seu estat final, es considera que la secció falla per aquest material. Els diferents modes de ruptures previstes són: i) l'aixafament de formigó per la part comprimida de la biga quan la deformació per compressió de formigó supera el 0,45% i la tensió de la resta de materials es troba per sota dels seus valors màxims, ii) Si acer arriba a la tensió de fluència, el comportament d'aquest material es convertirà en plàstic i la secció podrà suportar més moment fins a la ruptura de l'acer (2%), malgrat aquest és difícil d'aconseguir, ja que normalment el formigó o el FRP arribaran abans a les seves màximes tensions, iii) la ruptura del material compost quan aquesta està sotmesa a una tensió superior a la seva resistència màxima abans que els altres materials arribin als seus valors màxims.

També, cal dir que el mode de falla per debonding (ruptura de desenganxament de FRP amb formigó) no es pot preveure amb aquest anàlisi, ja que s'està assumint adherència perfecta entre materials.

Aquesta anàlisi teòrica CSA s'ha fet abans de dissenyar el programa experimental, de manera que s'han obtingut la càrrega última de cada espècimen i el seu mode de falla. La *Taula 6* mostra càrrega de fluència, càrrega última, mode de falla i la força tallant associada a la càrrega última per a cada espècimen.

Espècimen	Py (kN)	Pu (kN)	Mode de falla	V (kN)
R	42.62	45.72	Plastificació d'armadura	22.86
S1	46.97	64.93	Ruptura FRP	32.47
S2	50.81	83.68	Ruptura FRP	41.84
S3	59.13	108.07	Aixafament Formigó	54.03
S4	58.91	107.92	Aixafament Formigó	53.96
S5	51.03	86.22	Ruptura FRP	43.11
S6	59.72	110.55	Aixafament Formigó	55.27
S7	69.63	125.66	Aixafament Formigó	<b>62.83</b>

Taula 6: Resultats de l'anàlisi de la ruptura CSA per cada espècimen.

Per la realització de CSA, el valor de la resistència de càlcul del formigó s'ha considerat de  $33 \text{ N/mm}^2$  i el mòdul elàstic de  $30 \text{ GPa}$ , ja que en aquell moment no disposava de resultats de les provetes de formigó.

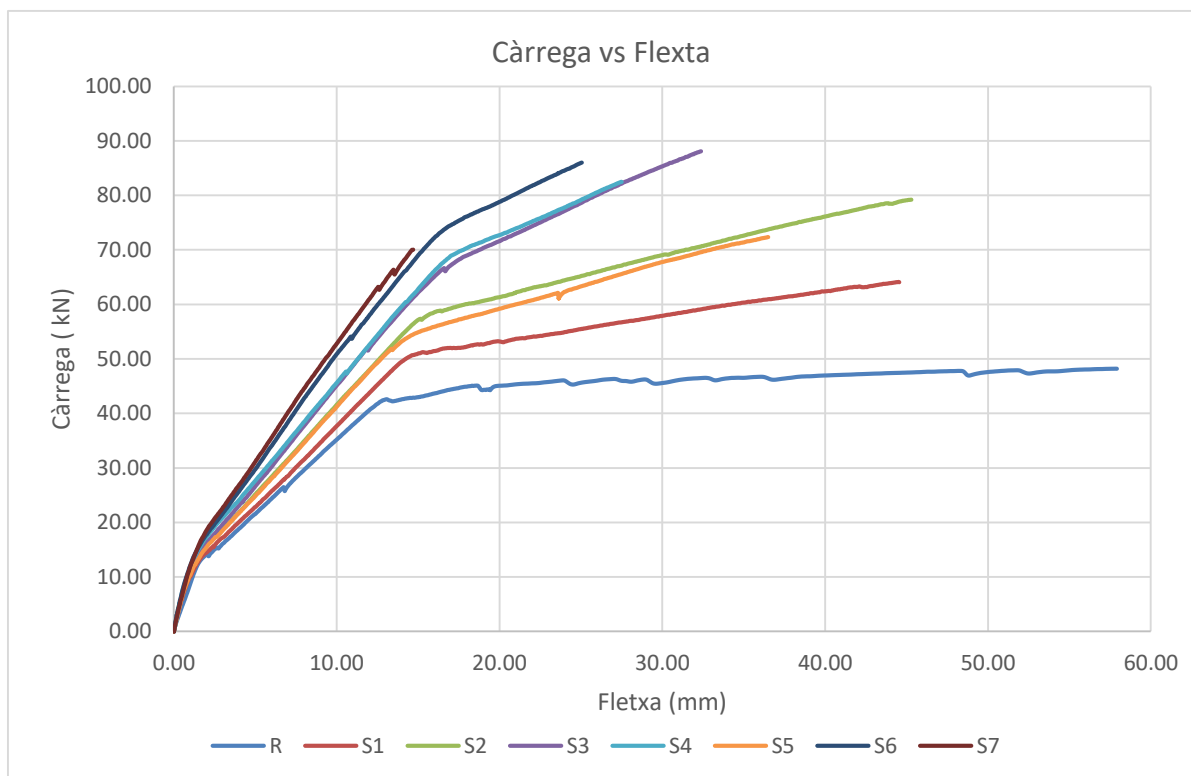
A partir de la càrrega última major de la Taula 6 ( $S7 \rightarrow V = 62,83 \text{ kN} \cong 63 \text{ kN}$ ) s'ha relitzat el disseny de les bigues a ELU de tallant (vegis A.2).

## 5. ANÀLISI DELS RESULTATS EXPERIMENTALS

Aquest capítol mostra els resultats experimentals i conclusions per complir amb l'objectiu del treball present. Per tant, inclou resultats de càrrega – fletxa i amplada de fissura en ELS de tots els espècimens. A més s'explica el procediment que s'ha seguit per obtenir els valors de les amplades de fissures.

### 5.1. Resultats de Càrrega – Fletxa

Aquest apartat proporciona els resultats obtinguts de cada espècimen durant la realització de l'assaig en termes de la relació càrrega-fletxa. Les dades són tractades de manera simplificada, ja que estudiar la càrrega última o mode de falla no és l'objectiu principal del present treball. Cal mencionar que a partir de les dades experimentals s'han obtingut la càrrega de fissuració, càrrega última i la instants de càrrega de servei per poder calcular l'amplada de fissura. A més s'ha pogut comprovar que la càrrega en servei és inferior a la càrrega de plastificació.



Gràfica 1: Càrrega - fletxa experimental de tots els espècimens.

La *Gràfica 1* representa el comportament de tots els espècimens, és a dir, la fase de fissuració, la fase de plastificació i la fase de ruptura. A més, es pot comprovar si la càrrega última de les bigues amb reforç és menor o major a la de la biga sense reforç.

Es pot observar que tots els espècimens amb reforç tenen una càrrega última major a la càrrega última del espècimen sense reforç. Però cal dir que gairebé tots els espècimens van patir un ruptura prematura, per debonding (essent la biga S7 la que va patir la fallada més prematura). Aquest mode de falla no es podia preveure amb la anàlisi de CSA.

A més, s'observa que els espècimen S3 i S4 es comporten de la mateixa manera malgrat les càrregues últimes són diferents, ja que tenen la mateixa quantia de reforç FRP, i els espècimens S2 i S5 també comporten de manera semblant ja que tenen la quantia de reforç FRP semblant. L'única diferència en aquestes és la distribució del FRP (*vegis Taula 4*), l'efecte del qual no es veu molt rellevant en cas de càrrega-fletxa.

A continuació s'adjunta la *Taula 7*, on es mostra la càrrega última teòrica esperada d'acord amb l'anàlisi de CSA i la obtinguda experimental de cada espècimen. S'observa que malgrat gairebé totes les bigues van fallar de forma prematura, no hi molta variació en la càrrega de plastificació teòrica i experimental dels espècimens. La càrrega última únicament es prediu adequadament en els espècimens R i S1, que van ser els únics que no van fallar per *debonding*.

Espècimens	CSA		Experimental		Exp/CSA	
	Py (kN)	Pu (kN)	Py (kN)	Pu (kN)	Py (kN)	Pu (kN)
R	43,14	46,47	42,31	48,19	0,98	1,04
S1	48,06	64,19	50,67	64,07	1,05	1,00
S2	52,40	83,43	57,30	79,20	1,09	0,95
S3	61,66	114,09	66,31	88,08	1,08	0,77
S4	61,52	113,94	69,12	82,45	1,12	0,72
S5	52,88	84,73	52,58	72,34	0,99	0,85
S6	62,61	116,79	73,14	82,50	1,17	0,71
S7	67,76	133,34	65,50	70,54	0,97	0,53

*Taula 7: Comparació de càrrega teòrica i experimental de tots els espècimens*

A continuació s'adjunten fotografies (*Figura 17 i 18*) realitzades al final de l'assaig dels espècimen on es veu el mode de ruptura per falla de FRP de S1 i ruptura prematura de la biga S7.

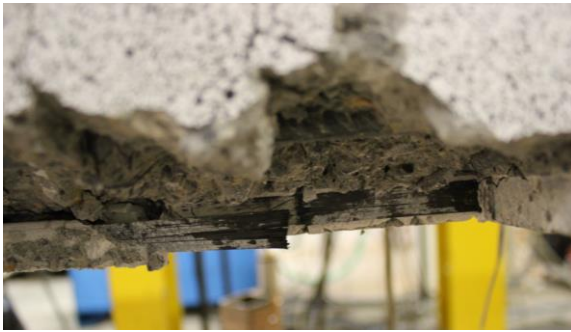


Figura 17: Mode de ruptura de S1 per falla de material compost



Figura 18: Mode de ruptura de S7 per falla de adherència

Caldria comentar, que encara que s'ha fet el disseny de les bigues en ELU de tallant, la ruptura prematura es va seguir degut les fissures de tallant. Primer es van allargar les fissures de tallant i al final es va produir la falla per deboding. L'espècimen R va fallar per aixafament de formigó després de plastificar l'acer, l'espècimen S1 es va fallar degut la ruptura de material compost FRP, i les restes totes (S2, S3, S4, S5, S6, S7) van fallar degut el tallant i desenganxament del material compost.

Per últim, en l'ANNEX D, s'adjunten unes gràfiques que serveix per fer la comparació entre el comportament teòrics esperats de CSA i el comportament experimental obtingut de l'assaig. Les gràfiques representen càrrega vers deformació de formigó, amb la finalitat de mostrar la semblança entre comportament teòric i experimental de formigó. Es veu que la variació entre resultats és molt poca, gairebé no hi ha, per tant es podria afirmar que els espècimens estaven en bones condicions, i/o iguals a suposats teòricament perquè resultats siguin tan exactes.

## 5.2. Avaluació de l'amplada de fissura mitjançant rutines d'usuari

Per determinar l'amplada de la fissura s'han emprat les rutines d'usuari prèviament desenvolupades pel grup de recerca AMADE. Aquestes rutines requereixen els arxius *.mat* que es poden extreure del programa VIC-2D un cop s'ha realitzat la correlació. El procediment per generar-los està explicat a l'ANNEX C. Un cop disponibles aquests arxius que contenen la informació d'interès de cadascun dels subsets distribuïts per la zona de la mostra estudiada, el procés per mesurar l'amplada de la fissura és relativament fàcil per la qual s'usen dos rutines de matlab.

La primera rutina, anomenada "AmpladesMATS" proporciona les matrius de dades tridimensionals per cada fissura (amplada de fissura, alçada i temps) a partir de arxiu *.mat*. En primer lloc, es demanarà per seleccionar el primer arxiu *.mat*, és a dir, entre tots els arxius *.mat* generats pel software VIC, l'usuari ha d'indicar el corresponent al primer instant de temps analitzat, el que es fa servir com a referència pel procés de correlació que es duu a terme. En segon lloc, es demanarà seleccionar la imatge de l'instant final obtinguda amb el mètode DIC. Cal tenir en compte que en la imatge carregada les fissures es puguin veure bé. Després s'obrirà la pestanya mostrada a la Figura 19 on s'han de definir els paràmetres necessaris per a la posterior computació de les amplades de fissura.

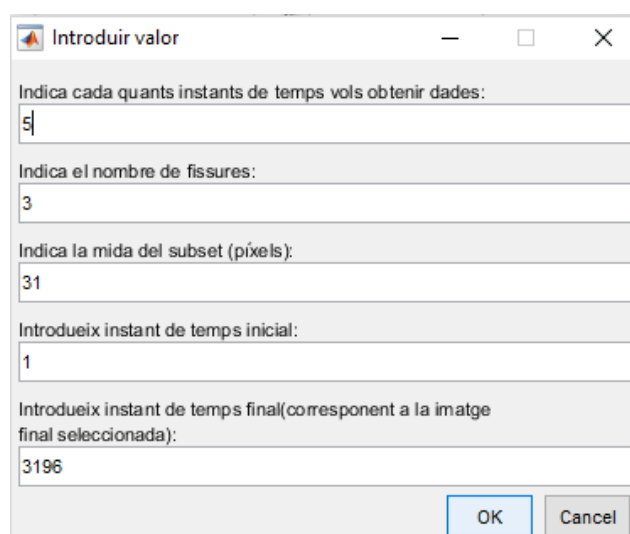


Figura 19: Pestanya de matlab per introduir paràmetres.

Dels paràmetres demanats, els nombre de fissures de cada biga estan mostrats en l'ANNEX D i la mida de subset s'ha decidit prèviament en la correlació d'imatges en el software VIC.

El següent pas és retallar localment cada fissura, és a dir, definir els límits laterals de les fissures mitjançant un cursors mòbils (Figura 20). Per a seleccionar la fissura, en l'eix y, marcar el punt a l'alçada de reforç per dues bandes de la fissura a analitzar. I en l'eix x, si la fissura és molt ampla, marcar una distància horitzontal més ampla i si la fissura és estreta marcar una amplada horitzontal més estreta.

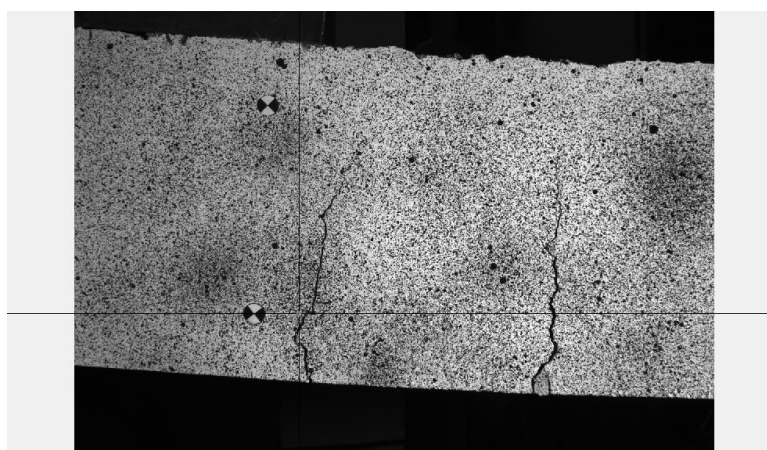


Figura 20: Imatge en l'escala de grisos per retallar fissura.

Al final s'obté una matriu tridimensional (vegis Figura 21) de cada fissura que el programa guardarà en la mateixa carpeta de treball amb el nom: *fissuraN.mat*, on *N* pren valors enters superiors a 0 i indica el nombre de fissura. Cada matriu tridimensional està formada per un conjunt de matrius simples característiques de cada instant de temps analitzat, en les quals es guarda el valor de l'alçada en la primera columna i l'amplitud de l'esquerda en la segona.

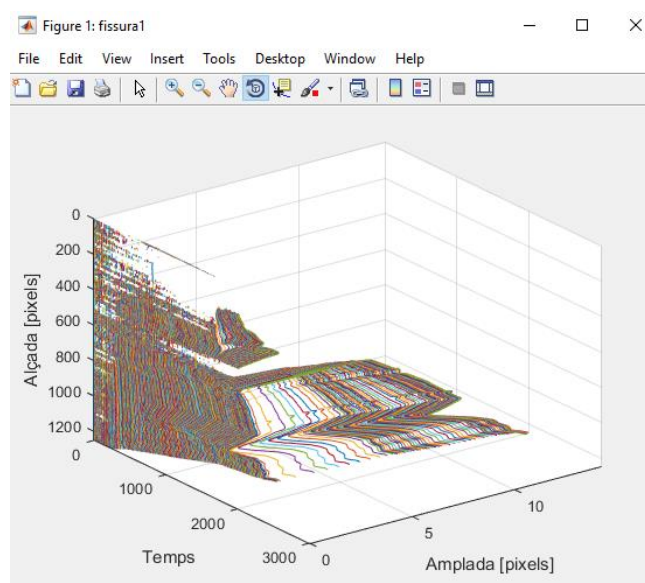


Figura 21: Matriu tridimensional per una fissura.

El programa calcula l'amplada de les fissures a partir dels arxius .mat proporcionats pel software del mètode DIC. Per cada instant de temps i alçada s'aplica la fórmula 13, a partir de la qual s'obté el valor de l'amplada de fissura en píxels.

$$w = \sqrt{(x_2 + u_2 - x_1 - u_1)^2 + (y_2 + v_2 - y_1 - v_1)^2} - \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (13)$$

On:

X: Coordenada x del centre de subset, posició horitzontal [píxels]

Y: Coordenada y del centre de subseu, posició vertical [píxels]

U: Desplaçament horitzontal [píxels]

V: Desplaçament vertical [píxels]

Els valors de cada paràmetre són extrets dels arxius .mat esmentats.

Tal com ja s'ha comentat, la rutina "Amplades MATS" proporciona les matrius tridimensionals de cada fissura. Per tal d'aconseguir el valor de la fissura en ELS a l'alçada de reforç, la segona rutina que cal usar s'anomena "tractament Dades". Aquesta rutina treballa a partir de la matriu generada de l'amplada de la fissura.

En primer lloc, es demana l'arxiu .mat de l'instant inicial de l'assaig i en segon lloc, es demana per seleccionar la matriu tridimensional en .mat de la fissura que es vol estudiar. Després s'obrirà la pestanya mostrada a la Figura 22 on s'han de definir els paràmetres necessaris per a trobar l'amplada de fissura.

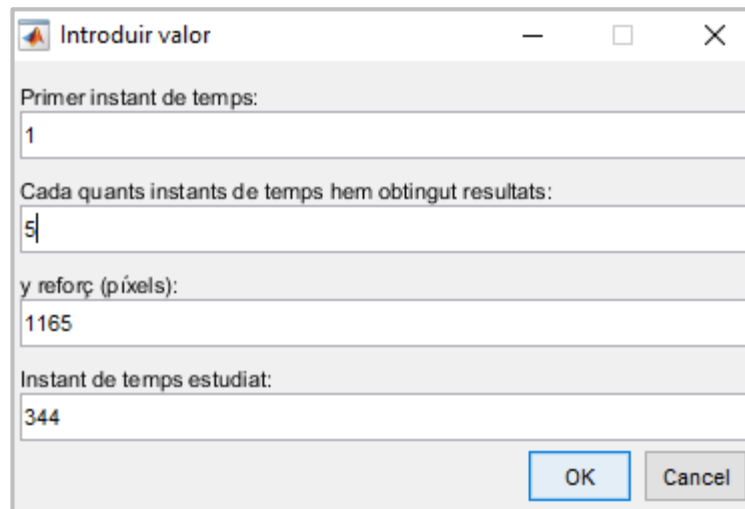


Figura 22: Pestanya de la rutina per introduir paràmetres.

Dels paràmetres demanats, l'alçada de reforç en píxels es troba mitjançant del Software VIC, col·locant el cursor per sobre la l'enganxina, tal com es mostra la Figura 23.

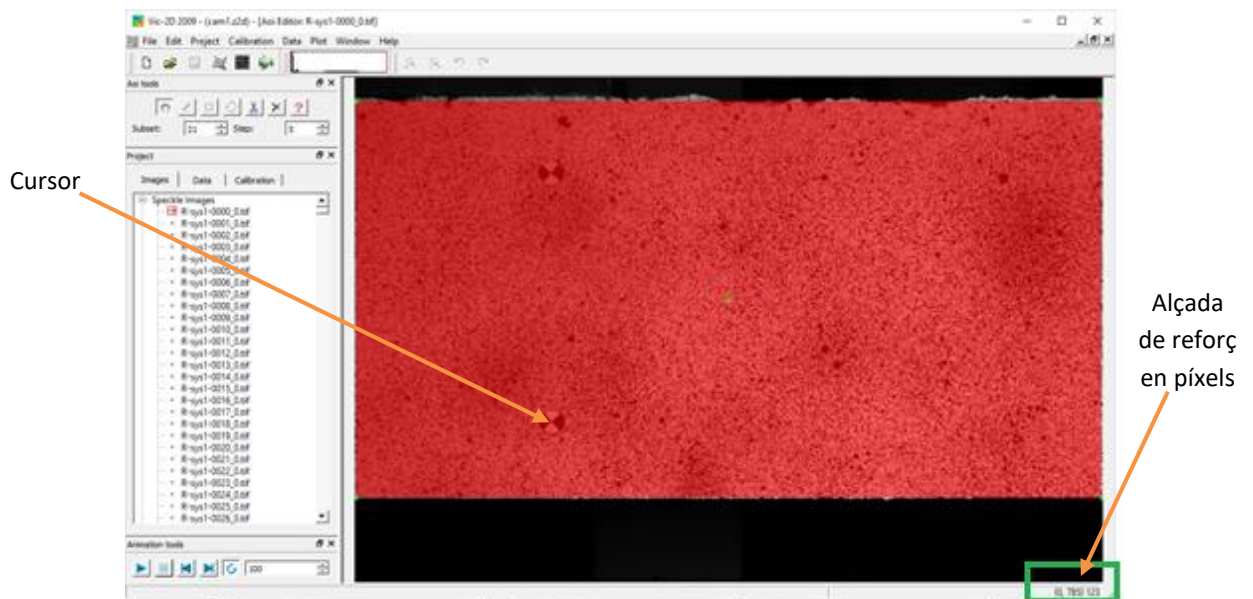


Figura 23: Mètode d'obtenció de l'alçada de reforç.

L'instant de temps estudiat, en el cas del present treball, és l'instant que es considera com a càrrega de servei. El detall del càlcul de la càrrega de servei es troba a l'ANNEX A.4. A partir de les dades de l'assaig, s'obté l'instant de temps corresponent a la càrrega de servei.

Després de realitzar tots aquests passos, la rutina facilita el valor de l'amplada de la fissura (en píxels) a l'instant i alçada desitjats. Per poder convertir el valor d'amplada de píxels a mm, s'utilitza la relació mm/píxels que calcula el software VIC tal com es mostra en la Figura 24.



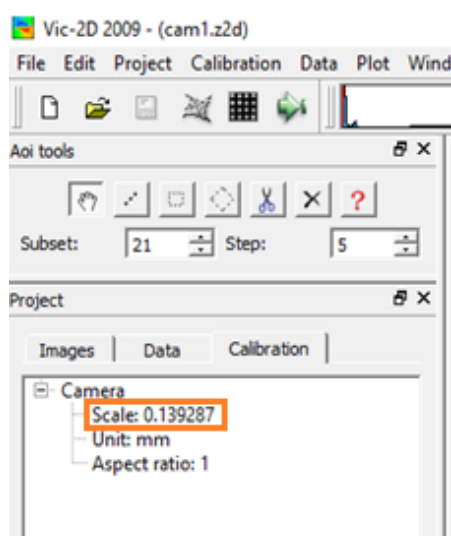


Figura 24: Obtenció de l'escala de les imatges amb el VIC.

Aquest procediment s'ha de repetir per cada fissura. Els resultats de tots els espècimens es mostren a l'ANNEX D.

### 5.3. Resultats de Fissuració

Els resultats de fissuració mostren les amplades de fissures en dos instants diferents, la primera en l'instant de servei del espècimen de referència (R) i la segona en la instant de servei propi de cada espècimen. En el present apartat s'exposa l'amplada de fissura mitjana ( $w_m$ ) i màxima ( $w_{max}$ ) de cada biga en els instants mencionats anteriorment. Per a veure més detalls de fissuració vegis ANNEX D.

La Taula 8 mostra les amplades de fissures mitjanes i màximes i el nombre de fissures de tots els espècimens a l'instant de servei del espècimen de referència (R) que és a càrrega de 30kN ( $P_{s1}$ ).

Espècimen	FRP	Núm fissures	$w_m (P_{s1})$ (mm)	$w_{max} (P_{s1})$ (mm)
R	0	13	0.138	0.180
S1	1x10x1.4	14	0.131	0.165
S2	2x10x1.4	13	0.116	0.139
S3	2x10x2.8	14	0.088	0.120
S4	2x10x1.4 + 1x10x2.8	16	0.077	0.100
S5	1x10x3	14	0.104	0.145
S6	2x10x3	13	0.092	0.104
S7	3x10x3	17	0.058	0.080

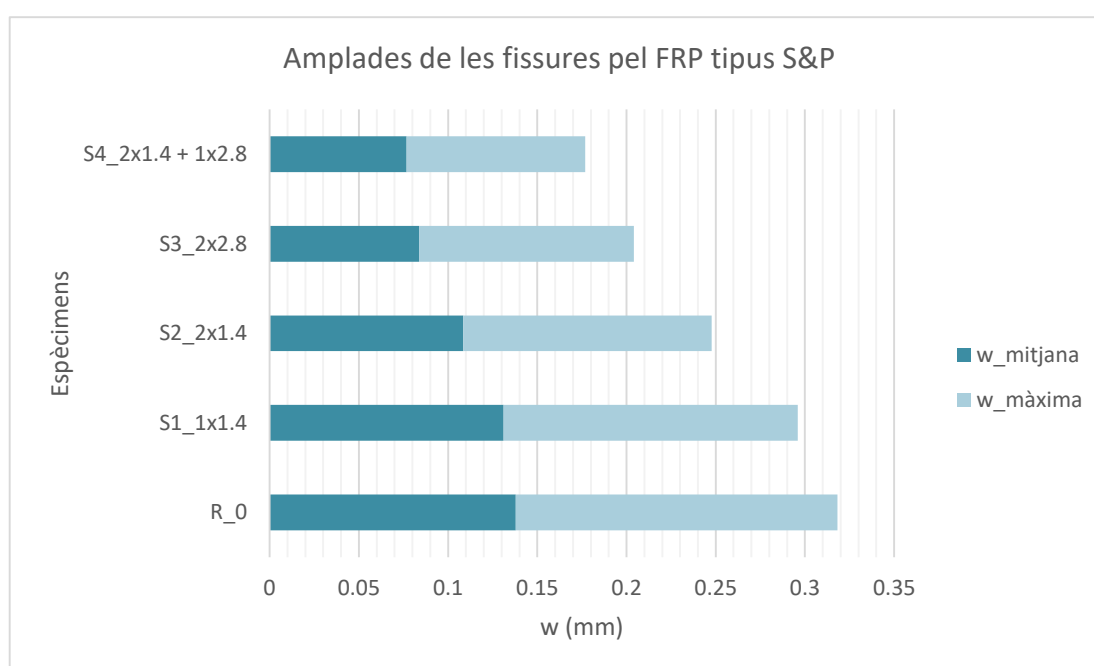
Taula 8: Valors de les amplades de fissures de cada espècimen a càrrega 30kN.

L'amplada de fissura característica teòrica de la biga de referència en instant de servei, d'acord amb l'ANNEX A, és de 0,186mm i l'amplada de fissura experimental màxima de la biga de referència en instant de servei surt de 0,180mm (vegis *Taula 8*). Es pot veure que no hi ha un diferència significativa entre els dos valors.

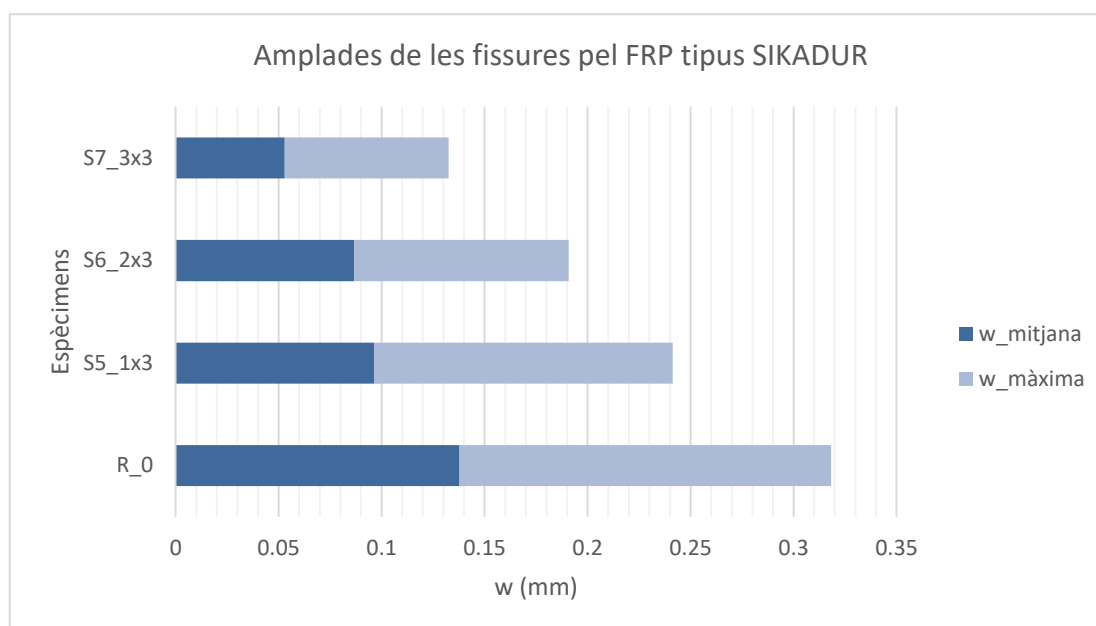
A més, també es pot comentar que l'amplada de fissura mitjana de la biga de referència en instant de servei calculada amb el software VIC calculat en l'ANNEX A és de 0,138mm i l'amplada de fissura experimental mitjana de la biga de referència en instant de servei surt de 0,138mm (vegis *Taula 8*). Es pot veure, doncs, que no hi ha gens de diferència entre aquests dos valors.

Amb aquestes dues comparacions es podria justificar que els valors obtinguts amb les rutines de matlab són fiables.

Tot seguit es representa unes gràfiques per poder visualitzar i comparar millor les amplades de fissures dels espècimens reforçat amb l'espècimen sense reforç R a l'instant de 30kN. La *Gràfica 2* indica els resultats dels espècimens del material del reforç S & P i la *Gràfica 3* indica els resultats dels espècimens del material del reforç SIKADUR.



Gràfica 2: Amplada de fissura a 30kN pels espècimens amb FRP tipus S&P.



Gràfica 3: Amplada de fissura a 30kN pels espècimens amb FRP tipus SIKADUR.

Es pot veure fàcilment, en les gràfiques, l'efecte de cosir que fa el material compost FRP amb la tècnica NSM observant que les amplades de fissures tan mitjanes com les màximes en els espècimens reforçats són menors que l'espècimen sense reforç. A part d'això, també s'observa l'efecte d'incrementar la rigidesa de la secció en estat de fissuració. És a dir, com més quantitat del material compost FRP té un espècimen, l'amplada de fissura és encara més petita, independentment del tipus d'FRP emprat. D'aquesta manera, es justifica l'efectivitat de FRP NSM en cas de estat límit de fissuració.

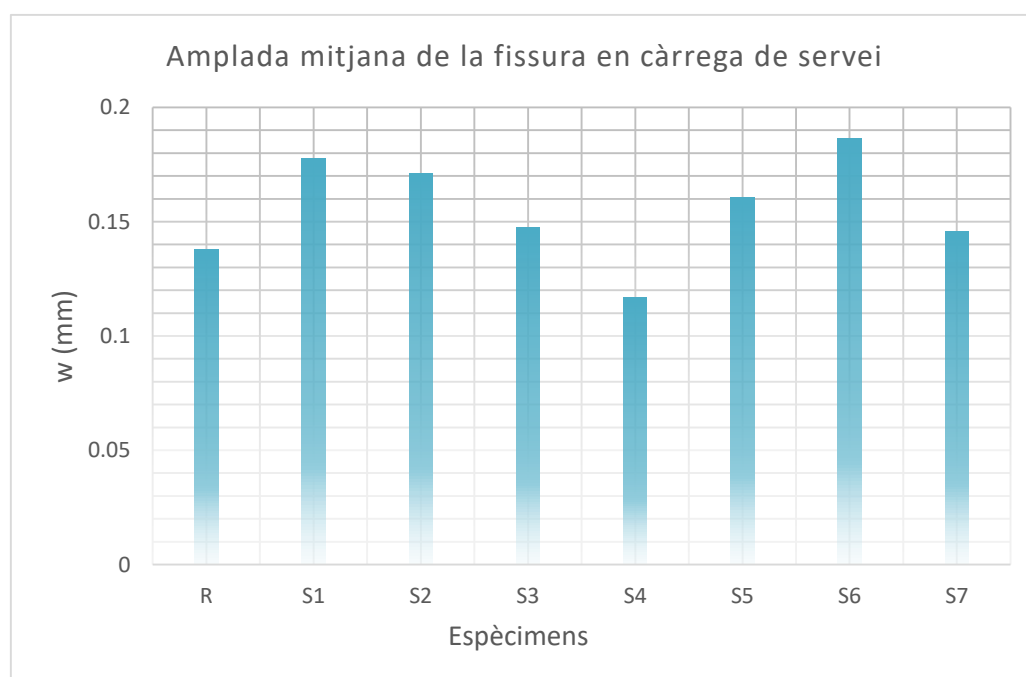
A més, cal remarcar que els espècimens S3 i S4, malgrat que tenen la mateixa quantitat de reforç de FRP, tenen l'amplada de fissura lleugerament diferent. L'única diferència en el disseny de aquests dos espècimens és la distribució del material FRP: l'espècimen S3 disposa de dues regates, i a cada una s'hi allotja un FRP de gruix 2,8mm, essent el total de gruix de 5,6mm, mentre que l'espècimen S4 té tres regates, en dues té FRP de gruix 1,4mm i en una té FRP de gruix 2,8mm, de manera que total gruix del FRP també és 5,6mm. Això voldria dir que com més distribuït es troba el material de reforç, més capacitat de distribució de tensions presenta la interfície entre materials i com a conseqüència les amplades de les fissures són menors.

Per altra banda, també es podria analitzar les amplades de fissures en instant de servei de cada espècimen ( $P_{s2}$ ), per poder observar l'efecte del material compost. La Taula 9 mostra l'amplades de fissura mitjana, la càrrega de servei ( $P_{s2}$ ) i el nombre de fissures de tots els espècimens.

Espècimen	FRP	Núm de fissures	$P_{s2}$ (kN)	$w_m (P_{s2})$ (mm)
R	0	13	30.02	0.138
S1	1x10x1.4	15	41.67	0.178
S2	2x10x1.4	18	50.87	0.171
S3	2x10x2.8	21	61.50	0.148
S4	2x10x1.4 + 1x10x2.8	25	61.50	0.117
S5	1x10x3	18	51.61	0.161
S6	2x10x3	15	62.71	0.187
S7	3x10x3	19	70.25	0.146

Taula 9: Valors de les amplades de fissures de cada espècimen a càrrega de servei.

Seguidament es representa la Gràfica 4 per poder determinar la relació de disminució de l'amplada de la fissura degut el FRP a càrrega de servei de cada espècimen.



Gràfica 4: Amplada experimental de tots els espècimens en càrrega de servei.

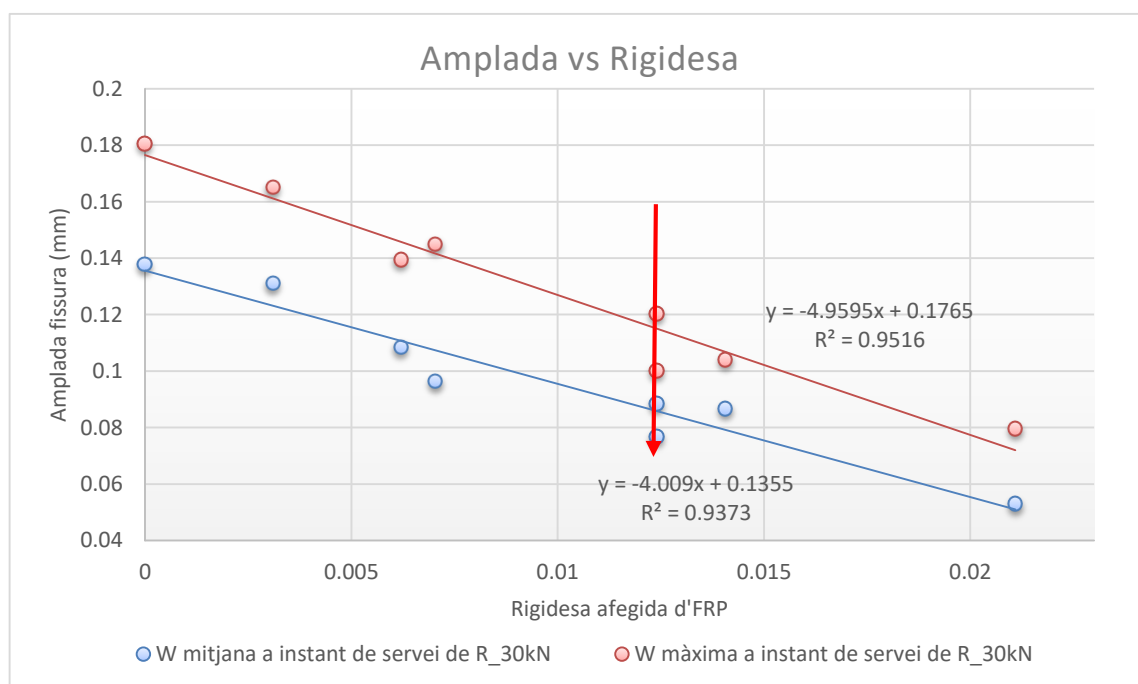
Observant la gràfica 4, s'observa que hi ha espècimens que tenen l'amplada de fissura major que l'amplada de fissura de l'espècimen sense reforç. Cal tenir en compte que els resultats mostrats en aquesta gràfica són obtinguts a càrregues diferents, ja que la càrrega de servei de cada espècimen s'ha calculat en funció de la seva càrrega última. Els espècimens S3 i S4, malgrat tenen la mateixa quantitat del FRP i mateix instant de servei, obtenen amplades de fissura relativament diferents. Això s'atribueix degut a la distribució del FRP en aquests.

A continuació es mostra una *Taula 10* amb les variables/paràmetres de cada espècimen, on el primer paràmetre a estudiar és  $n \cdot \rho_f$  que representa de la rigidesa de la quantitat de reforç afegida, essent  $n$  la relació entre el mòdul d'elasticitat de l'FRP i el formigó i  $\rho_f$  la quantia d'FRP. Amb aquest paràmetre només s'estudiarà la amplada de fissura mitjana i màxima a càrrega  $P_{s1} = 30\text{kN}$  (càrrega de servei de l'espècimen de referència) perquè l'amplada de fissura en instant de servei de cada biga és diferent i amb aquest rati no s'aconsegueix veure cap relació entre resultats.

Espècimen	$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d_f}$	$n \cdot \rho_f$	$w_m / (n \cdot \rho_f)(P_{s1})$	$w_{\max} / (n \cdot \rho_f)(P_{s1})$
R	0	0	0	0
S1	0.0006	0.0031	42.26	53.22
S2	0.0012	0.0062	18.72	22.47
S3	0.0023	0.0124	7.13	9.71
S4	0.0023	0.0124	6.19	8.07
S5	0.0012	0.0070	14.72	20.62
S6	0.0025	0.0141	6.58	7.40
S7	0.0037	0.0211	2.76	3.77

Taula 10: Rati de rigidesa i valors de les amplades de fissures de cada espècimen.

Tot seguit, es presenta la *Gràfica 5* que representa l'amplada de la fissura mitjana i màxima en la instant de 30kN en funció de la rigidesa afegida de reforç ( $n \cdot \rho_f$ ) de tots els espècimen. Teòricament, com més rigidesa s'afegeix a la secció, l'amplada de la fissura serà menor.

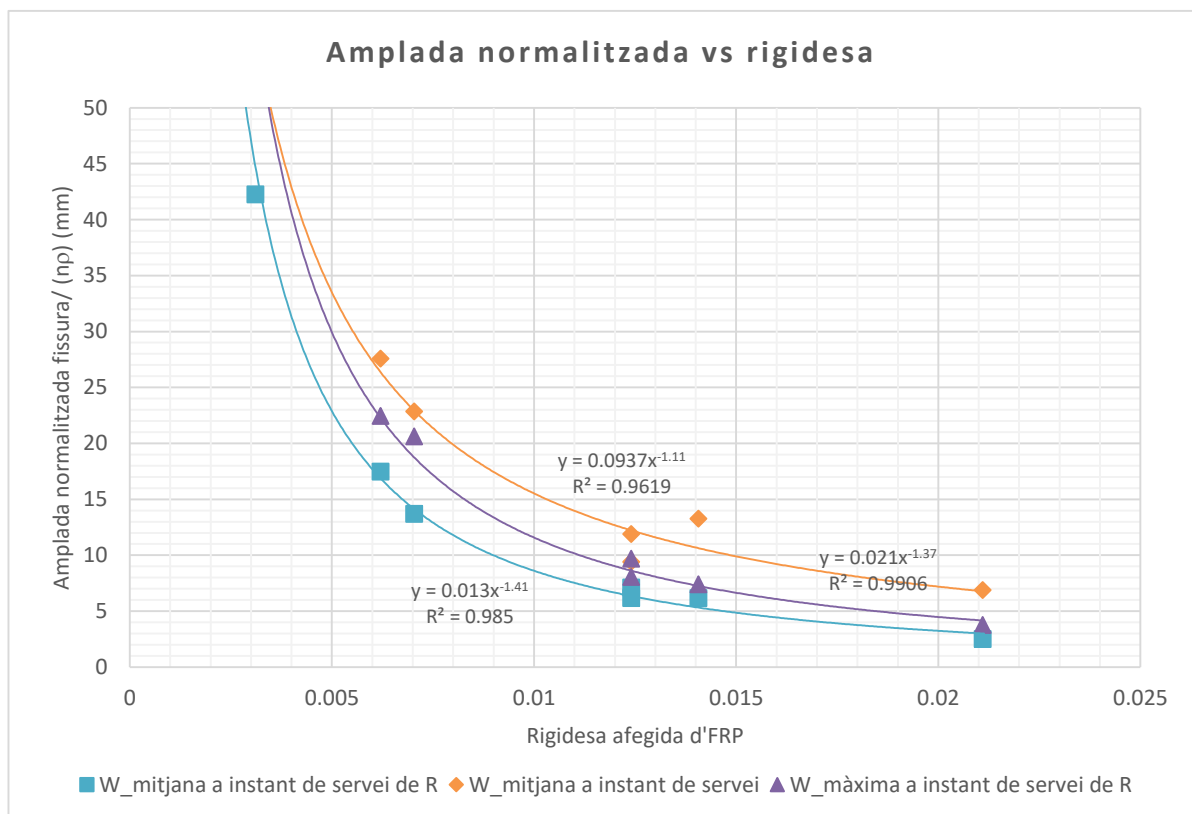


Gràfica 5: Amplada de la fissura en funció de la rigidesa.

A partir de la Gràfica 5 es pot comprovar que, de forma general, com més elevat és el factor de la rigidesa afegida, menor és l'amplada de la fissura, tant la fissura mitjana com la màxima. Aquesta relació entre la rigidesa afegida i l'amplada de la fissura matemàticament segueixen la tendència lineal amb una valor de  $R^2$  molt proper a 0,95 o superior, la qual justificaria que és una bona correlació. També es poden observar quatre punts marcats en vermell, que estan sobre el mateix valor de la rigidesa però tenen l'amplada de fissura diferent, això és degut l'efecte de distribució del material FRP.

El segon paràmetre en funció del qual es vol analitzar els resultats és el rati de l'amplada normalitzada, és a dir,  $w/(n \cdot \rho_f)$  (vegis Taula 10). Amb aquest coeficient també es podrà estudiar la amplada de fissura en instant de servei de cada espècimen apart de amplada màxima i mitjana en instant de 30kN.

En la Gràfica 6 s'observa que com més rigidesa s'afegeix a la secció, menys ample serà la fissura però la diferència amb la gràfica anterior és que també es pot analitzar amb quina proporció l'amplada de la fissura es disminueix independentment de l'instant estudiat. Es veu la relació matemàtica directa entre la rigidesa afegida d'FRP i l'amplada normalitzada de la fissura: les amplades normalitzades de fissura disminueixen de manera potencial amb l'augment de la rigidesa afegida. Es podria justificar que és una bona correlació ja que el valor de  $R^2$  són superiors a 0,95 les tres corbes.



Gràfica 6: Amplada de la fissura en funció de la rigidesa normalitzada.

El tercer paràmetre que es desitja estudiar és la distància entre regates. En aquest cas, només es consideren els espècimens que tenen dos o més regates, i només s'analitza l'amplada de fissura a l'instant de 30kN ja que l'instant de servei de cada espècimen és diferent ( $P_{s2}$ ) i no es podrà obtenir conclusions coherents. A més, l'efecte de la distància entre regates només es pot comparar en el cas que les quanties siguin iguals o molt similars. La *Taula 11* mostra les característiques i dades dels espècimens que es poden comparar.

Espècimens	Espai entre regates (mm)	W_30kN, mitjana (mm)	W_30kN,màxima (mm)
S3_2x2.8	60	0.084	0.120
S4_2x1.4 + 1x2.8	39	0.077	0.100
S6_2x3	60	0.087	0.104

*Taula 11: Espai entre regates i resultat d'amplades de cada espècimen.*

En primer lloc, en la *Taula 11*, es veu que els espècimens S3 i S4 tenen la mateixa quantitat de FRP però els valors de les amplades de fissures són diferents. El S4 té una menor amplada de fissura, tan mitjana com la màxima, respecte S3. L'espècimen S4 té un espai menor entre regates, ja que té el material compost inserit en tres regates no en dos com l'espècimen S3, la qual cosa fa que tingui una amplada de fissura menor. En segon lloc, es pot observar que la S6 té la quantitat de FRP una mica major però un espai entre regates també respecte a la S4 la qual cosa fa que la S6 tingui una obertura de fissura major. En tercer lloc, es veu que el S3 i S6 tenen la mateixa distància entre regates i S6 té una mica més del FRP però la S3 té l'amplada de fissura menor, això és per tipus de FRP inserit en aquests.

La finalitat d'estudiar aquest paràmetre és demostrar que apart de quantitat de material compost FRP, la distància entre regates o més ben dit la distribució del FRP en els espècimens també afecte de manera considerada en estat de fissuració.

L'últim paràmetre que es vol estudiar és  $p_f^2/A_f$ , on  $p_f$  és el perímetre exposat d'FRP i  $A_f$  és l'àrea del FRP. S'espera una millor adherència amb l'augment d'aquest paràmetre, i en a conseqüència les amplades de fissura haurien de ser menors. Tot i això, aquest paràmetre afectaria més a càrrega última i hi hauria menys probabilitat de la ruptura prematura (debonding). En la *Taula 12* és mostren les dades i els resultat per analitzar relació entre amplades de fissures i el paràmetre. S'ha vist que és millor comparar entre ells només els espècimens que tenen més o menys la mateixa quantitat del FRP, per la qual cosa s'han fet dos grups (color blau: Grup 1, color verd: Grup 2).

Espècimen	$\gamma_f = \frac{p_f^2}{A_f}$	W_30kN,mitjan (mm)	W_30kN,màxima (mm)
S2_2x1.4	74.263	0.116	0.139
S3_2x2.8	46.811	0.088	0.120
S4_2x1.4 + 1x2.8	90.526	0.077	0.100
S5_1x3	22.533	0.104	0.145
S6_2x3	45.067	0.092	0.104

Taula 12: Valors de paràmetre perímetre exposat i resultat d'amplades de cada espècimen.

En primer lloc, la S2 i S5 tenen la quantitat de FRP semblant, la S5 una mica més, es veu que la relació entre perímetre exposat el quadrat/àrea del S2 és elevat però la seva amplada mitjana de fissura és major, al contrari del que s'esperava. Però en tot cas cal mirar els valors de les amplades màximes, on es veu que l'amplada de fissura màxima de la S5 és major que l'amplada màxima de S3.

En segon lloc, la S3, S4, i S6 tenen la quantitat del FRP semblant, la S4 té una relació elevada de perímetre exposat el quadrat/àrea i com a resultat té una major amplada de fissura tan mitjana com la màxima en comparant amb la S3 i S6. La S3 té un valor major del paràmetre estudiat, i com a resultat té una amplada mitjana de fissura menor respecte S6. Però també s'ha de dir que l'amplada màxima de fissura de S6 és menor però també és cert que aquest té una quantitat de FRP major.

La finalitat d'estudiar aquest paràmetre és demostrar que apart de quantitat de material compost FRP i la distància entre regates o més ben dit la distribució del FRP, el factor perímetre exposat (elevat al quadrat) dividit per l'àrea en els espècimens també afecte d'alguna manera en estat de fissuració. Tot i això, s'ha de dir que no s'ha observat una relació clara i directe d'aquest factor amb l'amplada de fissura.



## 6. CONCLUSIONS

Un cop finalitzat el treball, es pot afirmar que s'han pogut complir tots els objectius plantejats prèviament en aquest. Primerament, es pretenia estudiar l'estat de fissuració de bigues de formigó reforçades amb materials compostos mitjançant un estudi experimental de 8 bigues. Segon, es volia analitzar el sistema DIC i emprar les rutines creades en Matlab per calcular l'amplada de la fissura. Els resultats experimentals es troben a l'ANNEX D i l'anàlisi de resultats al capítol 5. Gràcies a la realització d'aquest treball s'han pogut extreure diverses conclusions, les qual s'exposaran a continuació.

Primer de tot, es pot afirmar que els materials compostos aplicats amb la tècnica NSM en elements de formigó armat tenen un efecte de "cosit" en les amplades de fissures. El factor més important en el valor de l'amplada de fissura és la rigidesa afegida d'FRP en la secció, fent que disminueixi l'amplada de fissura de manera potencial, però també s'ha pogut observar que la distribució del reforç també influeix en l'amplada de fissura de manera positiva. Com més ben distribuït, o menys distància entre regates, menor serà l'amplada. En quant al tipus del material, SIKADUR té un elevat mòdul de Young, per tant, presenta una rigidesa superior i com a conseqüència menys amplada de la fissura respecta S & P per a la mateixa quantitat de material.

En segon lloc, s'han validat les rutines d'usuari prèviament generades, mitjançant la comparació del valors de les amplades de fissures obtingues emprant les rutines de matlab amb el valor calculat manualment amb VIC. Per altra banda també s'ha fet la comparació amb el valor calculat teòricament de l'amplada de fissura del espècimen R, resultant que el valor màxim de fissura obtinguda de manera experimental és igual al valor de fissura característica obtinguda teòricament, d'acord amb EHE08. Aquestes dues comprovacions justifiquen la fiabilitat del mètode de mesurar les amplades de fissura amb el sistema DIC emparant les rutines de matlab.

En tercer lloc, s'ha observat i analitzat la càrrega última i el mode de ruptura de cada espècimen, encara que era únicament un requeriment desitjat del present treball. Els espècimens reforçats amb FRP van fallar a una càrrega superior respecte l'espècimen no reforçat, per tant, es pot concloure que el material compost FRP NSM fa augmentar la càrrega última real suportada. Tot i això, les càrregues últimes dels espècimens menys rígids calculades amb CSA i les obtingudes de l'assaig són gairebé iguals, mentre que en els espècimens més rígids hi ha una variació entre càrregues. Això és degut a que les bigues amb més quantitat d'FRP fallaven abans d'arribar a la càrrega última esperada. El principal motiu d'aquesta fallada prematura van ser les fissures de tallant que van conduir a ruptures prematures per desenganxament del laminat. Si s'hagués pogut preveure i eliminar el mode de ruptura prematura, es podria comprovar i circumstanciar amb detall de quina manera afecta de la distribució d'FRP i el perímetre exposat d'FRP en càrrega última.

Per altra banda, també s'ha observat que els espècimens assajats en el laboratori segueixen el mateix comportament que s'havia determinat prèviament amb la rutina de CSA.

Per últim, s'han calculat, analitzat i discutit els valors de les amplades de fissures obtingudes de manera experimental. Un cop analitzades, s'ha observat que compleixen amb la hipòtesi de que com més rigidesa s'afegeix a la secció, les fissures estan millor distribuïdes i més estretes, la qual cosa justifica l'efectivitat del FRP NSM en els espècimens de RC. Les tres variables que es volien estudiar eren quantitat, tipus i distribució del FRP per estudiar el seu efecte en estat de fissuració. La quantitat és la variable que modifica de manera potencial els valors de les amplades, com més elevada és la quantitat, més rigidesa té la secció i menor és l'amplada de fissura. El segon, el factor de distribució del FRP o una distància menor entre regates, també fa que les amplades de fissures siguin menors. Per tant, posant la mateixa quantitat d'FRP però millorant la seva distribució en els espècimens de RC es podria aconseguir o complir amb estat de fissuració. L'últim factor estudiat és el perímetre exposat al quadrat dividit per l'àrea del FRP en els espècimens. S'han comparat entre ells només els espècimens que tenen aproximadament la mateixa quantitat del FRP per tal d'observar el seu efecte en estat de fissuració. S'ha vist que aquest paràmetre també afecta d'alguna manera en l'estat de fissuració però no s'ha pogut observar una relació clara d'aquest factor amb l'amplada de fissura.

Finalment, per concloure l'estudi realitzat en el projecte, es pot confirmar l'efectivitat del FRP NSM en els espècimens de RC, afegint que tots els paràmetres analitzats afecten estat de fissuració. Per tant, es pot buscar un disseny més òptim controlant tots els factors que afecten a l'estat de fissuració tan com a la càrrega última.

### **6.1. Problemàtiques trobades**

Les problemàtiques que s'han tingut durant la realització del treball es poden resumir en següents punts:

1) A l'hora de calcular l'amplada de la fissura de manera experimental, no s'obtenia l'amplada de la fissura semblant que donava la manera teòrica o manual (VIC). Es va observar que amb les rutines si es clicava molt apropa al voltant de l'esquerda o més lluny d'1 cm resultats de VIC trets manualment no s'assemblaven amb amplades mesurades amb la rutina de matlab. Finalment, es va adoptar com a criteri d'extreure les dades a 1 cm de la fissura per a tots els casos.

El problema a l'hora de calcular l'amplada de fissura en el VIC era la posició del punt marcat per extreure els desplaçaments. La posició ideal del punt a marcar està mostrat en la *Figura 25*, on el punt no està ni molt proper a l'esquesda ni molt lluny d'aquesta. Si es posiciona el punt molt aprop, els desplaçaments obtinguts són molts i molt petits, i si posiciona molt lluny, resulten petits respecte el punt A marcat en la figura. Es va observar que en la zona de tracció sortien les deformacions negatives més enllà d'una certa distància de la fissura, que feien que si mesures el punt més lluny sortissin amplades més petites. Es va interpretar que això seria per algun problema de correlació de dades.

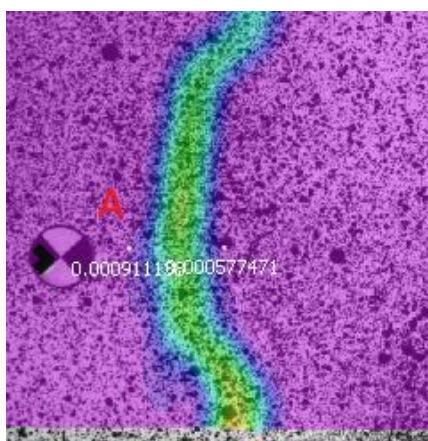


Figura 25: Posició ideal dels punts en el VIC per extreure desplaçaments i distàncies

2) Per altra banda, a l'hora de mesurar l'amplada de fissura amb les rutines de matlab no es podien apreciar les fissures, ja que eren fissures molt estretes. Aquest problema es va resoldre obtenint els mapes de deformacions en VIC en la qual era molt fàcil saber el nombre de fissures i després a l'hora de retallar la fissura en matlab s'agafava com a referència el patró de taques negres i repetia el procés fins aconseguir mesurar coherent. En la Figura 26 es pot veure que la fissura a retallar no és gens apreciable.

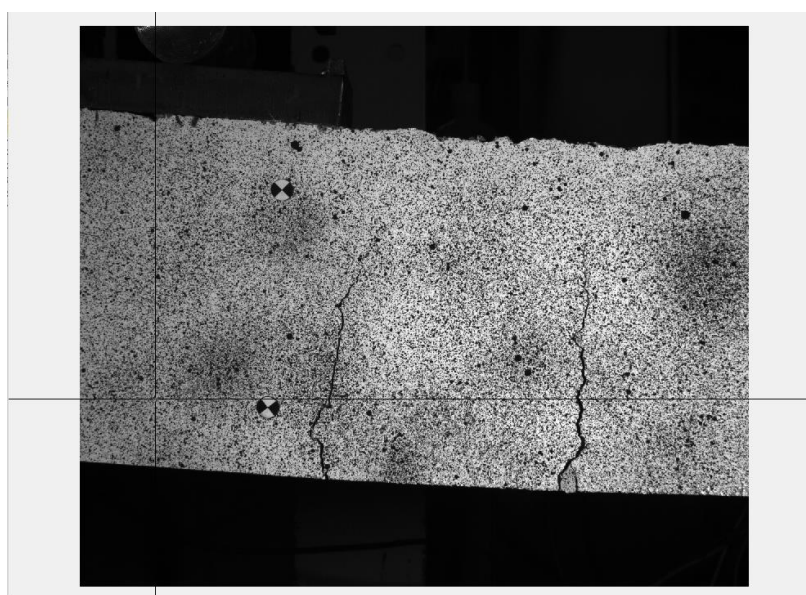


Figura 26: Apreciació de la fissura a retallar en matlab

Com a treball futur, es podria millorar la rutina de matlab, fent que l'imatge es pugui ampliar i així retallar bé les fissures o fer que les amplades es vegin en algun altre color, etc.

3) Un cosa més a comentar seria que per complir amb l'objectiu del treball es volia estudiar una zona central (flexió pura) més ampla per tenir més fissures rectes i estudiar-les. Per això es buscava una L (longitud de recolzament fins a punt d'aplicació de càrrega) òptim per tal d'obtenir una zona central més gran conjuntament amb bona resolució en les dades del assaig. Això comportava que el valor de tallant també fos més gran i concentrat pels laterals de la biga. Això va portar que les fissures de tallant fossin més amples i com a conseqüència s'obtingués una ruptura prematura per desenganxament de FRP amb resina. Si s'hagués pogut utilitzar una L major el tallant no seria tan elevat i les fissures de tallant no afavoririen aquestes ruptures, encara que això no ha afectat al compliment de l'objectiu de present treball. També cal indicar que aquest mode de falla encara no està molt ben estudiat i per tant era difícil preveure en el seu disseny.

## **6.2. Recomanacions per treballs futurs**

Amb la realització d'aquest treball i a partir de les conclusions i problemàtiques trobades és possible proporcionar diferents recomanacions per treballs futurs, exposades en aquest apartat.

Primer, es podria calcular la flexa teòrica de tots els espècimens, emprant la rutina CSA i realitat una doble integració de la curvatura al llarg de la biga, per comparar amb la flexa experimental per tal d'observar si els tres factors, quantitat, distribució i el perímetre exposat afecten a aquest comportament.

Segon, es podria calcular les amplades en la càrrega de servei suposant altres nivells de càrrega, com per exemple el cas de tenir 60% de càrregues permanents i 40% de càrregues variables, i veure si segueix la relació potencial entre amplada de fissura i rigidesa afegida a la secció. També es podria extreure l'amplada de fissura a un altre nivell de càrrega fixa per a tots els espècimens (com per exemple de 40kN) i veure si tots els paràmetres estudiats segueix afectant de la mateixa manera.

L'última, es podria veure o estudiar el comportament en deformació de les armadures, deformació de FRP o compressió de formigó experimental amb el teòric i veure de quina manera afecta la inserció del material compost FRP i també analitzar si segueixen el comportament teòric.

## **7. RELACIÓ DE DOCUMENTS**

El projecte consta dels següents documents:

- Document 1: Memòria i Annexos

Annex A: Càlculs

Annex B: Especificacions dels espècimens

Annex C: Procés de fabricació i assaig de les bigues

Annex D: Resultats experimentals

- Document 2: Pressupost

Annex A: Annex del pressupost

## 8. BIBLIOGRAFIA

1) Treball final de grau udg:

<https://dugidoc.udg.edu/bitstream/handle/10256/622/Mem%C3%B2ria.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

2) Estructures de formigó armat: WEB UDG

3) Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes:

<https://www.intechopen.com/books/fiber-reinforced-polymers-the-technology-applied-for-concrete-repair/introduction-of-fibre-reinforced-polymers-polymers-and-composites-concepts-properties-and-processes>

4) Tesi Doctoral de la xarxa: A study of the bond and flexural behaviour of reinforced concrete elements strengthened with near surface mounted (NSM) FRP reinforcement:

<https://www.tdx.cat/handle/10803/128331>

5) El comportament d'estructures de formigó reforçades amb la tècnica NSM-FRP:

<http://www2.udg.edu/larecerca/Not%C3%ADciesiagenda/Reculldenot%C3%ADcies/tabid/11506/p/37308/language/ca-ES/Default.aspx>

6) Regates:

[https://www.researchgate.net/publication/308679692\\_NSM\\_FRP\\_Reinforcement\\_for\\_Strengthening\\_Reinforced\\_Concrete\\_Beams-Overview](https://www.researchgate.net/publication/308679692_NSM_FRP_Reinforcement_for_Strengthening_Reinforced_Concrete_Beams-Overview)

7) Fire behavior of concrete T- beams strengthened with near-surface mounted FRP reinforcement:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143816615002158>

8) Digital image correlation:

<https://www.dantecdynamics.com/digital-image-correlation>

9) Development of digital image correlation method to analyse crack variations of masonry wall:

<https://www.ias.ac.in/article/fulltext/sadh/033/06/0767-0779>

10) A fast digital image correlation method for deformation measurement:

<http://www.ncorr.com/download/publications/panfast2.pdf>

11) Digital Image Correlation

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702110702352>

## 9. REFERÈNCIES

- [1] EHE08, Instrucció de formigó armat, 2008.
- [2] Parretti R, Nanni A. Strengthening of RC members using near-surface mounted FRP composites. *Advance Structure Engineering*, Desembre 2004.
- [3] Lee D., Tippur H., Kirugulige M., Boger P. Experimental Study of Dynamic Crack Growth in Unidirectional Graphite/Epoxy Composites using Digital Image Correlation Method and High-speed Photography, Juliol 2009.
- [4] Eurocode 2. Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for Buildings, British Standard Institution, 2004.
- [5] Codi Model. La fib para estructuras portantes de hormigón, 2010.
- [6] Vilanova I., Instrumentació i anàlisi de dades d'assaigs de bigues de formigó armades amb barres de FRP, Gener 2008.
- [7] Martínez R. Refuerzo a flexión por el sistema NSM (Near Surface Mounted). *Obras Urbanas*, 2017.
- [8] Yu B., Kodur V. Fire behavior of concrete T-beams strengthened with near-surface mounted FRP reinforcement. *Engineering Structures*. Science Direct, 2014.
- [9] ACI Committee 440. ACI 440.2R-17. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. USA, 2017.
- [10] Federació Internacional per al Butlletí de Formigó Estructural (fib). Externally Bonded FRP reinforcement for RC Structures, 2014.
- [11] Ceroni F., Pecce M. Design provisions for crack spacing and width in RC elements externally bonded with FRP, 2009.
- [12] *Zehetmaier G., Zilc K. h. Restricció d'amplada de fissures quan es reforça amb barres de CFRP, 2008.*
- [13] Pan B., Lu Z., Xie H. Mean intensity gradient: An effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation, *Optics and Lasers in Engineering* 2010.
- [14] Barris C., Torres L., Vilanova I., Miàs C., Llorens M.. Experimental study on crack width and crack spacing for Glass-FRP reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 2016.
- [15] Moawad M., Torres L., Barris C., Baena M., Emara M. Flexural behaviour of NSM FRP strengthened RC beams under sustained loading. *Proceedings of the 19th International Conference on Composite Materials*, Porto, September 2016.
- [16] Al-Mahaidi R., Kalfat R. Rehabilitation of Concrete Structures with Fiber-Reinforced Polymer, Novembre 2018.
- [17] Jung W., Park J., Kang J., Keum M. Flexural Behavior of Concrete Beam Strengthened by Near-Surface Mounted CFRP Reinforcement Using Equivalent Section Model, *Research Article*, 2017.

[18] Sala P., Barris C. Flexural analysis of steel and Fibre Reinforced Polymer (FRP) reinforced concrete beams strengthened with Near Surface Mounted (NSM) technique.



**ANNEX A: CÀLCULS**



## A. INTRODUCCIÓ

L'objectiu d'aquest annex A és justificar els valors i resultats obtinguts i demostrar el disseny correcte de les bigues. Aquest està dividit en tres apartats; en primer i segon es justifica el disseny de les bigues a ELU de flexió i de tallant, i en tercer justificar el valor de l'amplada característica de la fissura en la biga R (sense reforç) d'acord amb la normativa EHE-08.

### A.1. Disseny de les bigues a ELU de flexió

El propòsit d'aquest apartat és comprovar el disseny de la secció les bigues de formigó armat a ELU de flexió d'acord amb la normativa EHE-08.

Totes les bigues de formigó armat tenen dues armadures de tracció de diàmetre 10mm i dues armadures de compressió de diàmetre 6mm. D'aquesta forma hi ha una àrea de l'armadura de tracció de 157,08mm<sup>2</sup> i una àrea de l'armadura de compressió de 56,55mm<sup>2</sup>.

La comprovació del disseny de les seccions de les bigues s'ha fet mitjançant la quantia mecànica mínima i quantia geomètrica mínima de les armadures. La quantia mecànica mínima de l'armadura de tracció es calcula mitjançant l'expressió 14.

$$A_{s\_M} \geq 0,04 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h \quad (14)$$

On  $f_{cd}$  és la resistència del càlcul de formigó,  $f_{yd}$  és la resistència del càlcul de l'acer,  $b$  és l'amplada i  $h$  és l'alçada de la secció de la biga.

La quantia geomètrica mínima de l'armadura de tracció es calcula a partir de la fórmula (15):

$$A_{s\_G} \geq \frac{2,8}{1000} \cdot b \cdot h \quad (15)$$

A més, es recomana disposar a la cara oposada una armadura mínima igual al 30% de la consignada, és a dir, de la quantia 30% de la  $A_{s\_G}$ .

Sabent que la resistència de càlcul de l'acer és de 515 N/mm<sup>2</sup>, la resistència de càlcul del formigó és de 33 N/mm<sup>2</sup>, la secció de la biga és de 180mm x 140mm. Per tant la quantia mecànica mínima de l'armadura de tracció és de 64,5 mm<sup>2</sup> i la quantia geomètrica mínima és de 70,56 mm<sup>2</sup>, es veu que les bigues tenen una quantitat de l'armadura de tracció superior a aquestes dues, 157,08 mm<sup>2</sup>.

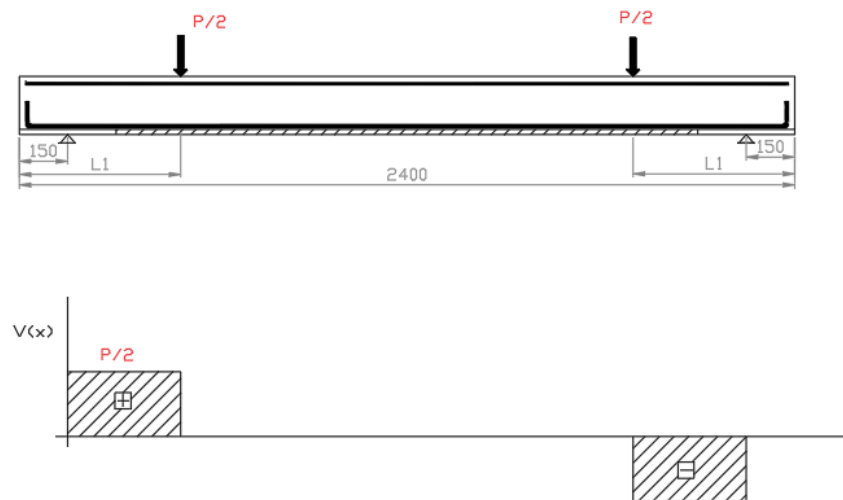
Per altre banda, la quantitat recomanada de l'armadura de compressió és de 21,2mm<sup>2</sup> i es pot observar que les bigues tenen una quantitat de l'armadura de compressió superior a aquesta, 56,55mm<sup>2</sup>.

Donat que és compleix amb totes les condicions i recomanacions, es pot afirmar que el disseny de les bigues a ELU de flexió s'ha fet correctament.

## A.2. Disseny de les bigues a ELU de tallant

El propòsit d'aquest apartat és dimensionar la secció de les bigues de formigó armat a ELU de tallant per tal d'evitar la ruptura fràgil de la biga, d'acord amb la normativa EHE-08.

Totes les bigues de formigó armat tenen dues armadures de tracció de diàmetre 10mm i dues armadures de compressió de diàmetre 6mm. D'aquesta forma hi ha una àrea de l'armadura de tracció de 157,08mm<sup>2</sup> i una àrea de l'armadura de compressió de 56,55mm<sup>2</sup>. L'assaig de les bigues es realitza a quatre punts, i les condicions i càrregues aplicades es representes en la *Figura 27*.



*Figura 27: Condiciones i càrregues de les bigues*

Pel dimensionament de la secció de les bigues es fa mitjançant el compliment de les dues inequacions següents (16) i (17):

$$V_{d1} \leq V_{u1} \quad (16)$$

$$V_{d2} \leq V_{u2} \quad (17)$$

On  $V_{u1}$  és l'esforç tallant d'esgotament per compressió obliqua de l'ànima,  $V_{u2}$  és l'esforç tallant d'esgotament per tracció de l'ànima,  $V_{d1}$  és tallant en la biga al punt de recolzament i  $V_{d2}$  és tallant en la biga a una distància  $d$  del recolzament.

Totes les bigues que s'assagen per present treball tenen un tram de tallant constant, es pot veure en la figura x, per tant  $V_{d1} = V_{d2} = P/2$ . El tallant es calcula mitjançant la rutina del Excel amb el mètode de CSA, d'on obté que el valor màxim de tallant (*vegis apartat 4.5*) per aquestes bigues serà de 63kN.

Primer, es comprova la inequació 3, on el valor de  $V_{u1}$  s'obté de l'expressió següent (18):

$$V_{u1} = 0,3 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d \quad (18)$$

On  $f_{cd}$  és la resistència del càlcul de formigó,  $b$  és la base de la secció i  $d$  és l'alçada del reforç en la secció de la biga.

Sabent que el valor de la resistència de càlcul del formigó és de  $33 \text{ N/mm}^2$ , la base és de  $140 \text{ mm}$  i l'alçada de reforç és de  $147 \text{ mm}$ . Per tant, el valor del  $V_{u1}$  d'acord amb l'expressió (5) és de  $204 \text{ kN}$ , que és superior a  $V_{d1}$ ,  $63 \text{ kN}$ .

Segon, es comprovar la inequació 4, on el valor de  $V_{u2}$  s'obté de l'expressió següent (19):

$$V_{u2} = V_{cu} + V_{su} \quad (19)$$

On  $V_{cu}$  és la contribució formigó a la resistència a tallant i  $V_{su}$  és la contribució de l'armadura transversal a la resistència a tallant. El valor de  $V_{cu}$  pot calcular mitjançant la fórmula següent (20):

$$V_{cu} = \frac{0,15}{\gamma_c} \cdot \delta \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b \cdot d \quad (20)$$

On  $\gamma_c$  és el coeficient de seguretat del formigó,  $f_{ck}$  és la resistència característica del formigó,  $b$  és l'amplada de la secció de la biga, i  $d$  és l'alçada del reforç en la secció. El valor del  $\delta$  i de  $\rho_1$  es calculen amb les expressions següents (21) i (22):

$$\delta = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad (21)$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \quad (22)$$

Sabent que el valor de  $d$  és de  $147 \text{ mm}$ ,  $b$  és de  $140 \text{ mm}$  i  $A_{s1}$  és de  $157,08 \text{ mm}^2$ , s'obté el valor de  $\delta$  de 2 i el valor de  $\rho_1$  de  $7,76849 \cdot 10^{-3}$ . A més, quan  $\gamma_c = 1,5$  i la resistència característica del formigó és de  $33 \text{ N/mm}^2$ .

D'acord amb l'equació 11, el valor de la resistència a tallant del formigó és de  $12,1 \text{ kN}$ .

Considerant el cas límit de quan l'esforç tallant d'esgotament per tracció de l'ànima és igual a tallant en la biga a una distància  $d$  del recolzament s'obté l'equació següent (23):

$$V_{d2} = V_{u2} \rightarrow V_{d2} = V_{cu} + V_{su} \quad (23)$$

Sabent que el tallant a la biga és de  $63 \text{ kN}$  i la resistència a tallant del formigó és de  $12,1 \text{ kN}$ , s'obté el valor de la resistència a tallant que ha de tenir l'armadura transversal, que és de  $50,9 \text{ kN}$ . Ara bé, amb aquest valor de la resistència es pot calcular la distància entre les armadures transversals i l'àrea de l'armadura necessària emparant l'equació següent (24):

$$V_{su} = \frac{A_{90}}{S} \cdot f_{yd} \cdot 0,9 \cdot d \quad (24)$$

On  $A_{90}$  és l'àrea total de les branques d'armadura transversal situada en el mateix pla,  $S$  és a separació entre estreps i  $f_{yd}$  és la resistència del càlcul de l'acer que com a màxim pot prendre el valor de  $400 \text{ N/mm}^2$ .

Per l'estrep s'escollí una barra d'acer del diàmetre de  $8 \text{ mm}$  i d'acord amb la normativa, en general la separació transversal entre branques d'un mateix pla és igual a  $d$ , és a dir  $147 \text{ mm}$  però com que la

base és de 140mm es prou posar només un estrep en la secció, és a dir 2 branques d'armadura en la secció. D'aquesta forma l'àrea total de les branques d'armadura transversal situada en el mateix pla és de 100,53mm<sup>2</sup>.

Donat que el valor de la resistència a tallant de l'armadura transversal és de 50,9 kN, la separació màxima entre estreps és de 104 mm.

Segons EHE, cal fer una altra comprovació de la separació màxima entre estreps aplicant el criteri següent:

$$Si \rightarrow V_{d1} \leq 0,2 \cdot V_{u1} \rightarrow S = 0,75 \cdot d \quad (25)$$

$$Si \rightarrow 0,2 \cdot V_{u1} < V_{d1} \leq 0,67 \cdot V_{u1} \rightarrow S = 0,6 \cdot d \quad (26)$$

$$Si \rightarrow V_{d1} < 0,67 \cdot V_{u1} \rightarrow S = 0,3 \cdot d \quad (27)$$

Comprovant les tres inequacions 25, 26 i 27, es veu que compleix la inequació 18, per tant la separació màxima entre estreps ha de ser de 88,2mm.

Per altra banda, d'acord amb l'Eurocodi 2 apartat 9.2.2, la separació màxima entre estreps no pot ser superior a 0,75·d, sabent que d és 145mm, el valor de la separació màxima entre estreps és 108,7mm. D'aquesta manera, posant un numero rodó a la separació màxima entre estreps de 100mm, el disseny de les bigues a ELU de tallant és de **1e8mm/100mm** per tal d'evitar la ruptura fràgil de les bigues.

### A.3. Càlcul del mòdul elàstic i resisenica a tracció del formigó

L'objectiu d'aquest apartat és determinar el mòdul elàstic i la resistència a tracció de formigó, d'acord amb la normativa vigent EHE-08, a partir de la resistència a compressió obtinguda de forma experimental en el laboratori d'EPS.

Es considera que el valor de la resistència compressió és igual al valor de la resistència a compressió mitjana, i que val 36,9MPa. En primer lloc es calcula el mòdul elàstic inicial amb l'equació (28).

$$E_c = \beta_E \cdot E_{cm} \quad (28)$$

On  $\beta_E$  i el modul elàstic secant és calcula amb l'expressió (29) i (30) , respectivament.

$$\beta_E = 1,30 - \frac{f_{ck}}{400} \leq 1,175 \quad (29)$$

$$E_{cm} = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (30)$$

Sabent el valor de la resistència de compressió mitjana és de 36,9MPa, es calcula el valor de  $\beta_E$  que pren un valor de 1,175 i el valor de modul elàstic secant és 28289,856MPa.

Sabent el valor de  $\beta_E$  i el valor de modul elàstic secant, el mòdul elàstic inicial de formigó pren un valor de 33240,58MPa.

En segon lloc, es calcula la resistència a tracció de formigó amb l'expressió (31).

$$f_{ct,k} = 0,7 \cdot f_{ct,m} \quad (31)$$

On  $f_{ct,m}$  es calcula amb l'equació (32) sempre i quan la resistència característica a compressió és inferior o igual a 50MPa. En cas del treball present la resistència característica a compressió és 36,9MPa.

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (32)$$

Un cop calculat el valor de la  $f_{ct,m}$  que és 3,3MPa, el valor de la resistència a tracció de formigó pren un valor de 2,3MPa.

#### A.4. Càlcul de càrrega en ELS

El propòsit d'aquest apartat és determinar la càrrega en Estat Límit de Servei (ELS) de cada espècimen, d'acord amb la normativa EHE-08, mitjançant les rutines d'Excel CSA.

La càrrega en estat límit de servei es necessita per poder calcular la l'amplada de fissura en aquell instant i el valor del qual s'obté amb l'expressió (33).

$$P_{SLS} = \frac{P_u}{\gamma} \quad (33)$$

Els valor del coeficient de seguretat parcial per a les accions permanents i variables per a l'estudi dels Estats Límits Últims, d'acord amb EHE-08, per a situacions persistents i transitòries, són 1,35 per càrregues permanents ( $C_p$ ) i 1,5 per a càrregues variables ( $C_v$ ). A més, considerant 40% de  $C_p$  i 60%  $C_v$ , es calcula el coeficient ( $\gamma$ ) mitjançant l'expressió (34).

$$1,35 \cdot C_p + 1,5 \cdot C_v \quad (34)$$

D'aquesta forma, el valor del coeficient és de 1.44.

Per determinar la càrrega última en ELU de cada espècimes es posen els coeficients parcials de seguretat dels materials en la rutina CSA. Els valors dels coeficients parcials de seguretat dels materials, d'acord amb EHE-08, per formigó és 1,5, per acer és 1,15 i per material compost és 1,2.

D'aquesta forma s'obté el valor de la càrrega última ( $P_u$ ) mitjançant la rutina de CSA a partir del qual es calcula la càrrega en servei de cada espècimen. La *Taula 13* mostra la càrrega última en ELU i càrrega en ELS de cada espècimen.

Espècimens	Pu (kN)	Ps (kN)
R	43.24	30.02
S1	60.00	41.67
S2	73.26	50.87
S3	88.56	61.50
S4	88.56	61.50
S5	74.33	51.61
S6	90.31	62.71
S7	101.16	70.25

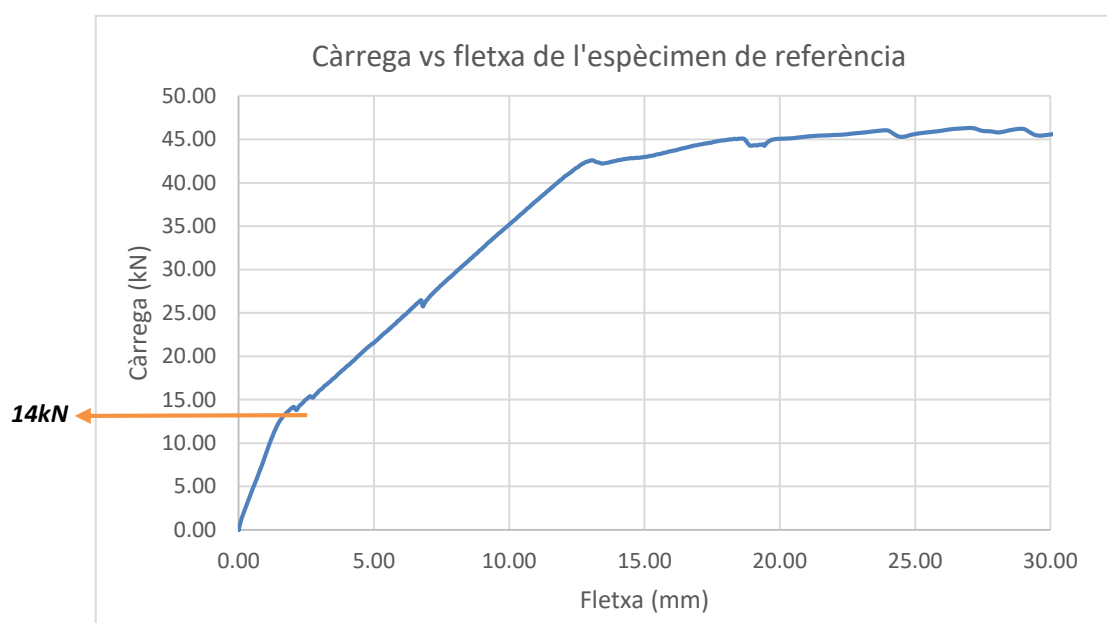
Taula 13: Càrrega en ELS de cada espècimen extret amb la rutina CSA

Un cop obtingut el valor de la càrrega en servei, es troba l'instant en que arriba en aquest càrrega cada biga i com a conseqüència es pot troba l'amplada de la fissura en aquest instant. A més, es pot troba la relació que hi ha entre la càrrega de fissuració i la del servei.

#### A.5. Càlcul de la càrrega de fissuració experimental i resistència tracció de formigó

L'objectiu d'aquest apartat és determinar la càrrega de fissuració experimental de l'espècimen de referència i la resistència a tracció de formigó, a partir de les dades obtingudes durant l'assaig.

En primer lloc, es determinar la càrrega de fissuració a partir del Gràfic 7 de càrrega – fletxa experimental de l'espècimen de referència R, en el qual està marcat la fase de fissuració d'on és treu la càrrega de fissuració.



Gràfic 7: Càrrega – fletxa experimental de l'espècimen de referència R.



La càrrega de fissuració es troba en el punt de canvi de pendent del diagrama càrrega-fletxa fins on és considera lineal. En vist el gràfic, la càrrega de fissuració de l'espècimen és de aproximadament de 14kN.

En segon lloc, es determinar la resistència a tracció del formigó a partir de la càrrega de fissuració de 14kN. Sabent que l'assaig es realitza a quatre punt i que la primera fissura a la part traccionada de l'espècimen apareix quan la tensió a formigó en aquesta part és igual a la resistència a tracció formigó. De manera que la resistència a tracció de formigó es calcula amb l'expressió (35).

$$f_{ct} = \sigma_{ct} = \frac{M_{fissuració} \cdot 6}{b \cdot h^2} \quad (35)$$

On b és l'amplada de la secció de la biga que és 140mm, la h és l'alçada de la secció de la biga que és 180mm i el  $M_{fissuració}$  és el moment aplicat quan apareix la primera fissura que és calcula amb l'equació (36).

$$M_{fissuració} = V_{fissuració} \cdot L \quad (36)$$

On la L és la distància des del recolzament fins al punt de càrrega que val 500mm i  $V_{fissuració}$  és el tallant en el moment que apareix la primera fissura que val  $14/2 = 7$ kN, amb aquests valors el moment de fissuració surt de 3500kNmm.

Al final aplicant l'equació (35), la resistència a tracció del formigó pren un valor de 4,6MPa.

## A.6. Obertura característica de la fissura

El propòsit d'aquest apartat és determinar l'amplada de la fissura de la biga de referencia (R) en estat Límit de servei (ELS), d'acord amb la normativa EHE-08, explicat en l'apartat 2.2 del present treball. Totes les bigues de formigó armat tenen dues armadures de tracció de diàmetre 10mm i dues armadures de compressió de diàmetre 6mm. D'aquesta forma hi ha una àrea de l'armadura de tracció de 157,08mm<sup>2</sup> i una àrea de l'armadura de compressió de 56,55mm<sup>2</sup>. L'assaig de les bigues es realitza a quatre punts, i les condicions i càrregues aplicades es representes en l'apartat 4.2. La secció de la biga és de 140x180 i l'alçada d'armadura ( $d_1$ ) és de 146,6mm.

El càlcul de la fissura es fa mitjançant l'expressió (1) on el valor del coeficient que relaciona l'obertura mitja de fissura amb el valor característic val 1,3. La separació mitjà de les fissures es calcula amb l'expressió (2).

El recobriment de les armadures traccionades és de 33.5mm, la distància entre barres longitudinals 64mm, el coeficient que representa la influència del diagrama de traccions a la secció per flexió és de 0,125 i l'àrea eficaç és de 12600mm<sup>2</sup>. Un cop es té els valors de tots els paràmetres, es calcula el valor de separació mitjà que és de 119,8mm.

L'elongació mitjana dels reforços es calcula mitjançant la fórmula (4), on el mòdul elàstic d'acer és de 20500Mpa i el  $k_2$  val 1.

Per una banda, la tensió de la armadura en la secció fissurada en el instant de fissuració del formigó es calcula de manera aproximada mitjançant l'expressió (37).

$$\sigma_{sr} = \frac{M_{fissuració}}{0.8 \cdot d \cdot A_s} \quad (37)$$

On el moment de fissuració es calcula a partir de la càrrega experimental de fissuració de la biga de referència R i mitjançant l'expressió (38).

$$M_{fissuració} = \frac{P_{fissuració}}{2} \cdot L \quad (38)$$

La càrrega de fissuració per la biga de referència és 14kN (vegis apartat A.5) i L és la longitud des de recolzament fins a la càrrega que val 500mm. D'aquesta forma, el moment de fissuració és de 3.500.000Nmm i la tensió de la armadura en la secció fissurada aplicant l'expressió (20) pren un valor de 190,05MPa.

Per l'altra banda, la tensió a l'armadura per al moment de servei del formigó es calcula de manera aproximada mitjançant l'expressió (39).

$$\sigma_s = \frac{M_{ELS}}{0.8 \cdot d \cdot A_s} \quad (39)$$

On el moment de servei es calcula a aplicant el coeficient de 2.14 en el moment de fissuració, amb l'expressió (40).

$$M_{ELS} = 2.14 \cdot M_{fissuració} \quad (40)$$

El valor d'aquest coeficient és la relació que hi ha entre la càrrega de fissuració experimental i la càrrega de servei calculat en l'apartat A.7. De manera que el moment de servei és 7490000Nmm i la tensió a l'armadura per al moment de servei aplicant l'expressió (39) pren un valor de 406,71MPa. Un cop se sap tots els paràmetres, es calcula el valor de l'elongació mitjana dels reforços que és de 0.00155.

Al final, es calcula l'obertura característica de la fissura aplicant l'expressió (1) que dona el valor de fissura característica 0,186mm a càrrega de servei.

Per tal de complir amb l'EHE08, l'amplada de la fissura en la biga de referència per el moment de servei ha de ser inferior al valor de l'obertura màxima permesa mostrat en la *Figura 5*. Sabent que és simplement formigó armat exposat en l'ambient tipus I, l'obertura màxima permesa és 0,4mm.

Donat que l'obertura característica de la fissura és inferior a l'obertura màxima permesa, es pot dir que el disseny compleix amb l'Estat límit de fissuració.

### A.7. Càlcul de l'amplada de la fissura amb VIC

El propòsit d'aquest apartat és determinar l'amplada de la fissura de la biga de referència (R) en estat Límit de servei (ELS) i a l'alçada de reforç.

Per fer-ho, cal accedir al projecte del software VIC corresponent a l'assaig que s'analitza i escollir dos punts propers a la frontera de la fissura en l'alçada de reforç tal com es pot observar en la *Figura 28*. Tot seguit, s'extreuen les matrius x, y, u i v de cada punt a l'instant de servei.

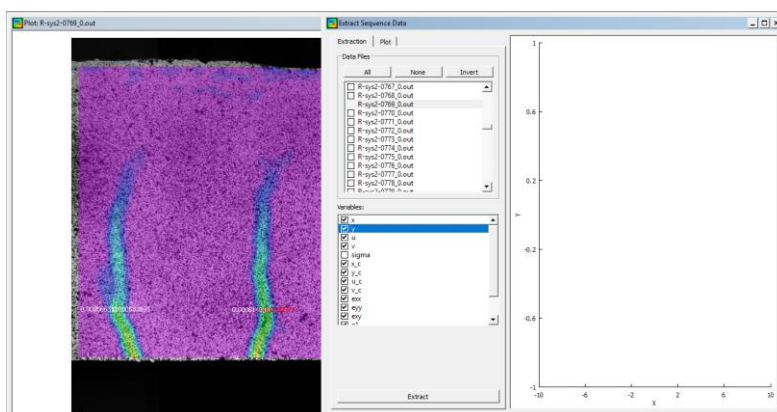


Figura 28: Càrrega en ELS de cada espècimen extret amb la rutina CSA.

Per ambdós punts marcats, el programa genera un arxiu en format .csv (de l'anglès, *comma-separated values*) on es guarda el valor de les variables en instant de temps escollit. De manera que els resultats de variables obtinguts de es mostren a la *Taula 14*.

Càm	Núm. fissura	Punt 1				Punt 2			
		x	y	u	v	x	y	u	v
1	1	108	1115	10.08	38.08	225	1115	10.94	39.29
1	2	724	1115	10.91	43.15	862	1115	12.06	44.35
1	3	1718	1115	11.69	49.38	1820	1115	12.69	49.89
2	1	108	1085	13.31	51.96	245	1085	14.27	52.54
2	2	758	1085	14.10	54.29	865	1085	15.07	54.59
2	3	1618	1085	14.66	55.84	1727	1085	15.73	55.96
3	1	321	1060	15.48	56.15	450	1060	16.56	56.17
3	2	989	1060	16.41	55.65	1113	1060	17.30	55.49
3	3	1621	1060	17.04	54.19	1743	1060	18.00	53.95
4	1	109	1068	18.76	51.04	227	1068	19.79	50.57
4	2	832	1068	19.64	47.38	935	1068	20.91	46.91
4	3	1544	1068	20.53	42.59	1635	1068	21.30	41.88
4	4	2130	1068	20.95	37.75	2252	1070	21.77	36.55

Taula 14: Desplaçaments i distàncies dels dos punts extrems amb VIC per a 4 càmeres de la biga R.

Un cop s'obtenen els valors dels paràmetres ja es pot calcular l'amplada de la fissura mitjançant l'equació (6). Els valors de l'amplada de cada fissura es demostren la *Taula 15*, que per passar de píxel a mm s'usa el factor de calibració.

Càmera	Núm. fissura	W (píxels)	mm/píxel	W (mm)
1	1	0.8699	0.13929	0.12116
1	2	1.1520	0.13929	0.16046
1	3	1.0050	0.13929	0.13998
2	1	0.9651	0.13947	0.13461
2	2	0.9682	0.13947	0.13504
2	3	1.0644	0.13947	0.14845
3	1	1.0809	0.13976	0.15107
3	2	0.8933	0.13976	0.12484
3	3	0.9562	0.13976	0.13364
4	1	1.0285	0.14029	0.14430
4	2	1.2736	0.14029	0.17867
4	3	0.7680	0.14029	0.10775
4	4	0.8010	0.14029	0.11237
				<b>0.13787</b>

*Taula 15: Amplades de fissures calculades mitjançant VIC per a biga R.*

Al final s'obté que el valor de l'amplada de la fissura mitjana a l'instant de servei és 0,13787mm i el valor de l'amplada de la fissura màxima a càrrega de servei és de 0,17867mm.

## **ANNEX B: ESPECIFICACIONS DELS ESPÈCIMENS**



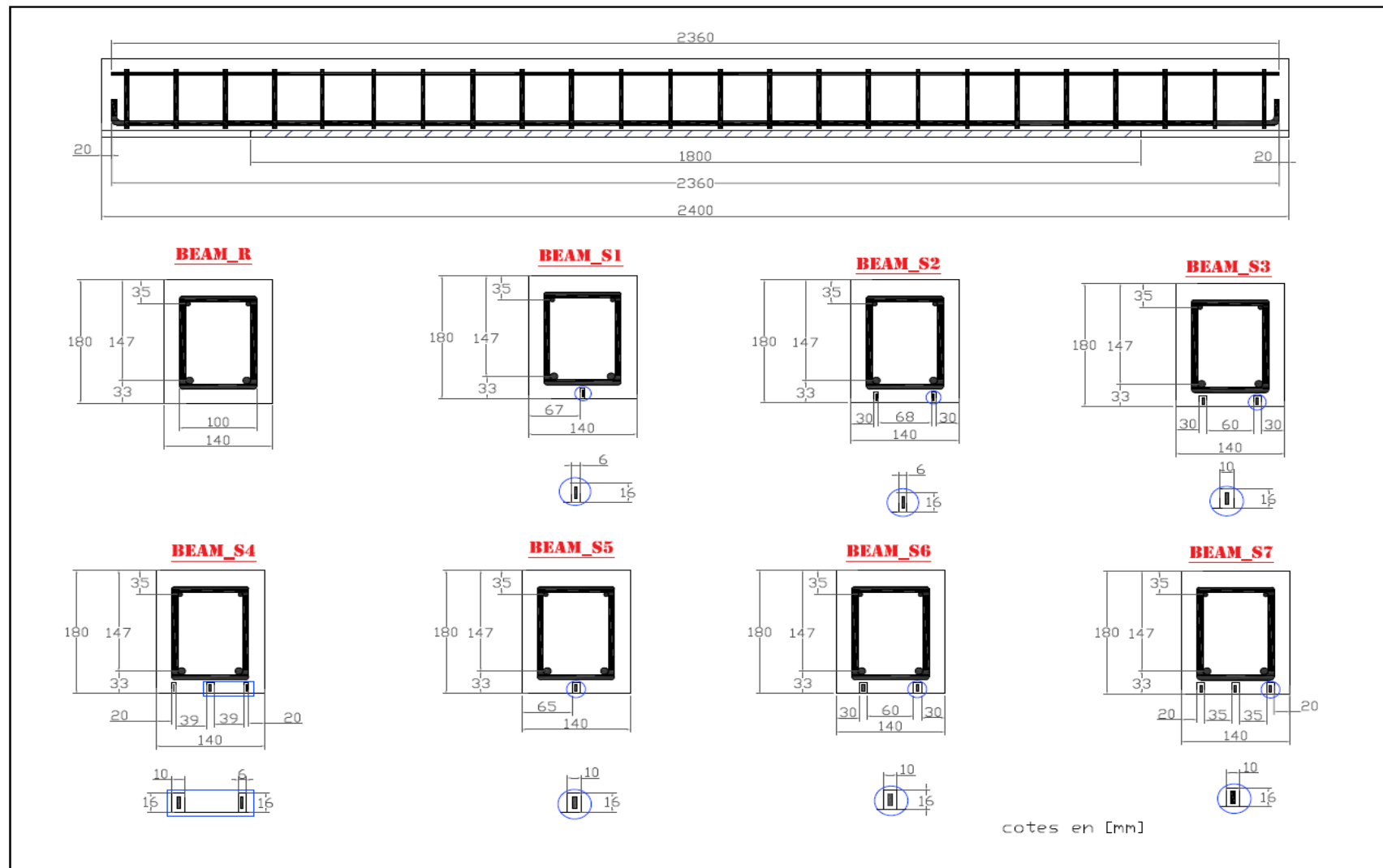


Figura 29: Especificacions dels Espècimens.





## **ANNEX C: PROCÉS DE FABRICACIÓ I ASSAIG DE LES BIGUES**



## C. INTRODUCCIÓ

L'objectiu principal d'aquest ANNEX C és descriure de manera detallada tot el procediment que s'ha seguit per dur a terme la part experimental del present treball. Aquest annex està estructurat en quatre parts: en la primera s'explica el procés que s'ha seguit per la fabricació de les bigues, en la segona s'exposa la preparació de les bigues prèvia a l'assaig, en la tercera es presenta l'assaig dut a terme i la quarta s'explica com es generen els fitxer .mat a partir de les imatges del sistema DIC.

Tot el procediment que es detalla en aquest ANNEX s'ha realitzat des de febrer a abril de 2019 en el laboratori d'Estructures de l'EPS.

### C.1. Fabricació de les bigues

El procés de fabricació de les bigues es va començar un cop decidit les mides de les bigues, el tipus material FRP, quantitat i distribució d'aquest en les bigues. La meua participació en la realització de les tasques es va començar a partir de la estructura de la armadura representada en la *Figura 30*.

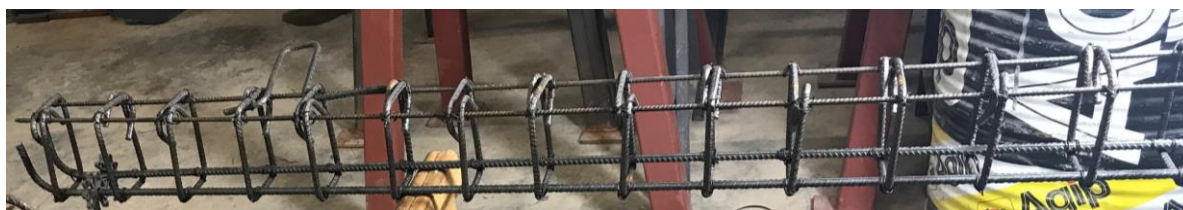


Figura 30: Estructura de la armadura

Les tasques realitzades són els següents:

- **Col·locació de galgues extensomètriques en l'armadura d'acer:** En primer lloc cal preparar la superfície de l'armadura en la zona on es col·loca la galga. La galga es col·loca amb un adhesió, aquest adhesió s'activa amb temperatura i una mica de pressió, que posant el dit per sobre la galga durant aprox 1min s'aconseguia. Alhora d'enganxar-la cal que sigui paral·lela a la armadura de tracció per tal d'evitar les lectures errònies. Seguidament, s'ha li aplica el protector de galgues amb la finalitat de protegir-les de substàncies i brutícies. En aquest cas, la galga s'enganxa en una secció propera a la central fent-la coincidir amb la secció on posteriorment es realitzaria una entalla per assegurar la propagació de l'esquerda en aquell punt. En la *Figura 31* es pot veure una galga enganxada i els seus cables lligats amb l'armadura per tenir-los fora de la biga.



Figura 31: Col·locació de galgues extensomètriques en l'armadura

- **Col·locació de la caixa d'armadura en el motlle:** Aquest pas consisteix en col·locar l'estructura de l'armadura dins als encofrats. Primer de tot, es col·loquen separadors a la part inferior del motlle per tal d'assegurar un recobriment geomètric mínim de 33 mm. Després introdueix l'estructura dins en els encofrats es col·loquen els separadors dels laterals per assegurar un recobriment de 20mm. Al final es comprova que totes les caixes d'armadura en el motlle estiguin rectes o sigui no inclinades. Un cop fet això, s'agafen les mides del recobriment mecànic mitjançant amb un peu de rei que hauria de ser de 33mm teòricament.
- **Formigonat dels espècimens:** Aquest pas consisteix en abocament de formigó preparat en els encofrats, anat en compte amb els cables de les galgues. A més a més, mentre s'omplen els motlles amb formigó s'hi passa un vibrador per tal d'aconseguir compactar i homogeneïtzar la massa del formigó, i eliminar l'aire que es queda atrapat durant l'abocament. A part dels espècimens, es van formigonar unes provetes cilíndriques de 150 mm de diàmetre i 300 mm de profunditat per tal de determinar la resistència a compressió, resistència a tracció i mòdul d'elasticitat del formigó. Previ al formigonat, es va comprovar la consistència del formigó amb el con d'Abrams, obtenint una consistència tipus fluïda. Tots els espècimens es curen durant un temps mínim d'una setmana.



Figura 32: Formigonat dels espècimens

- **Realització de regates:** El procés de fer regates és necessari per a instal·lar els FRP amb la tècnica de NSM. La regata se situa a la part inferior de les bigues, ja que és la zona que treballa a tracció on s'instal·la els FRP. Per iniciar el procés, es marca l'amplada de regata sobre la superfície de la biga i després es realitzen les regates mitjançant una màquina radial. Les dimensions de les regates són 6x16mm per FRP del gruix 1.4mm i 10x16mm pel FRP de gruix 2.8mm i 3mm. En la Figura 33 es pot veure les vuit bigues, on hi han algunes que ja porten fet les regates.



Figura 33: Bigues amb regates.

Al final, a totes les bigues es va fer una pre-fissura en el punt molt proper a la secció central amb l'objectiu de facilitar l'aparició de les fissures en aquest punt i poder registrar la deformació d'aquesta secció fissurada mitjançant les galgues.

- **Instal·lació del FRP i galgues:** Primer de tot, es tallen els laminats de cada tipus del material, que eren: i) 5 barres de FRP del tipus S&P i de gruix 1,4mm, ii) 3 barres del FRP del tipus S&P i de gruix 2,8mm, iii) 6 barres del FRP del tipus SIKA i de gruix 3mm. Després es netegen totes les barres amb acetona per treure les impureses i pols d'aquests que podrien generar seva mala adhesió amb la resina. Un cop el material tallat i netejat se li marca el punt central per enganxar una galga, per la qual s'ha seguit el mateix procediment comentat anteriorment en l'apartat de "enganxar les galgues" d'aquest annex. Al segon pas és preparar la resina que és diferent per cada tipus de FRP, les propietats de les quals estan a la Taula 16:

Tipus material FRP	Densitat ( $\rho$ )	Relació components de la resina (A:B)
S&P	1,7 kg/dm <sup>3</sup>	4:1
SIKA	1,65kg/dm <sup>3</sup>	3:1

Taula 16: Propietats de les resines.

$$Resina (kg) = V (dm^3) \cdot \rho \quad (41)$$

Sabent el volum de la regates, densitat de la resina, i la relació entre els components de cada resina, es calculava els kg de resina mitjançant una balança i després durant 5min es barregen els dos components de la resina. Al final, s'introdueix la FRP en les regates per sobre els separadors del cartó per centrar el material i s'abocava la resina en aquestes regates. Un cop omplertes les regates se li treuen aquets cartrons i es deixa a sacar.

En la Figura 34 es pot veure que es mateix tipus de la galga que es va usar per l'armadura, i en la Figura 35 la instal·lació del FRP en les bigues.



Figura 34: Col·locació de la galga a la barra de FRP.

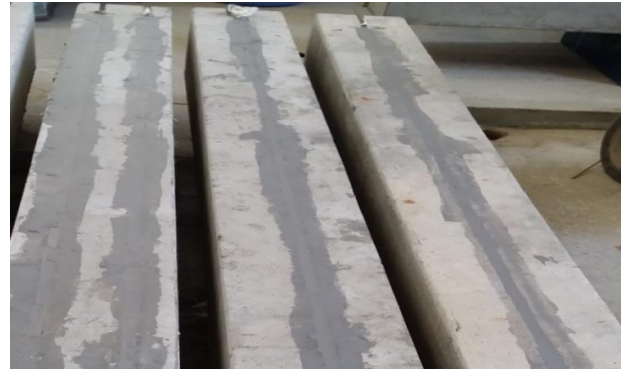


Figura 35: Instal·lació de la lamines del FRP en els espècimens mitjançant la resina.

## C.2. Preparació de les bigues

El procés de preparació de les bigues és un pas molt important per tal d'aconseguir l'objectiu del treball que és estudi de fissuració mitjançant el sistema DIC i rutines matlab per tant es procedeix a realitzar la preparació de la superfície. Primer de tot quan ja es tenen totes les bigues fabricades, es repara la superfície sobre la que es disposarà el sistema DIC. Per reparar-la s'ha fet l'emplenament dels petits forats que trobaven en la superfície amb el ciment de reparació i després es pinta la regió del interès de la biga amb el color blanc. Un cop la pintura està seca, s'ha li aplica el patró de clapejat mitjançant la tècnica esprai de color negre. Amb això s'aconsegueix obtenir una imatge en escala de grisos amb un patró de gris variat i característic que permetrà la diferenciació entre grups de píxels.

En la *Figura 36* es pot observar la superfície preparada amb les taques negres sobre la pintura blanca, per projectar davant el sistema DIC.



Figura 36: Superfície preparada del espècimen.

### **C.3. Assaig de les bigues**

Les bigues preparades es recolzen sobre uns recolzaments metàl·lics mitjançant un pont grua. En un extrem de la biga es troba un recolzament fixe i en l'altre extrem hi ha el recolzament mòbil. A continuació es col·loquen els punts d'aplicació de càrrega una biga metàl·lica repartidora sobre la biga de formigó per realitzar un assaig a 4 punts.

Un cop la biga es troba situada al pòrtic de càrrega, s'enganxa una galga a la cara superior de la biga a la secció central per poder obtenir els valors de deformació del formigó. Per altra banda, es col·loquen tres transductors, dos als laterals sobre els punts de suport i un a la secció central, per a poder obtenir la fletxa màxima de la biga.

Després es prepara el sistema DIC, és a dir, es col·loquen les quatre càmeres del sistema DIC de forma perpendicular a la superfície preparada de la biga i a una distància de 88 cm d'aquesta, per tal d'aconseguir una bona resolució de les imatges (en termes de relació mm/píxel) i cobrir tot el ROI amb 4 càmeres. La velocitat d'adquisició de les dades amb el sistema DIC és 1 dada/sec. A més, es van posar dues lluminàries per tal d'obtenir una il·luminació regular i independent d'altres fonts d'il·luminació variables. Un cop preparat el sistema DIC es calcula el valor del MIG emparant una rutina de matlab, i el valor mitjà acceptat era al voltant de 15 adimensional en quant en Pan [13] ho considerava a partir de 10.

Al final es prepara el sistema del cilindre hidràulic per aplicar la càrrega sobre la biga amb una velocitat d'assaig de 0,01mm/segon. Totes les bigues s'han assajat fins a la seva ruptura per poder obtenir la càrrega última i observar el mode de ruptura de les bigues, malgrat en aquest treball s'ha analitzat únicament el comportament en servei de fissuració.

La *Figura 37* mostra la realització de l'assaig on es pot veure la biga de formigó armat, la biga distribuïdora de carrega, el sistema DIC, les càmeres del lateral, la cèl·lula de càrrega, els transductors.

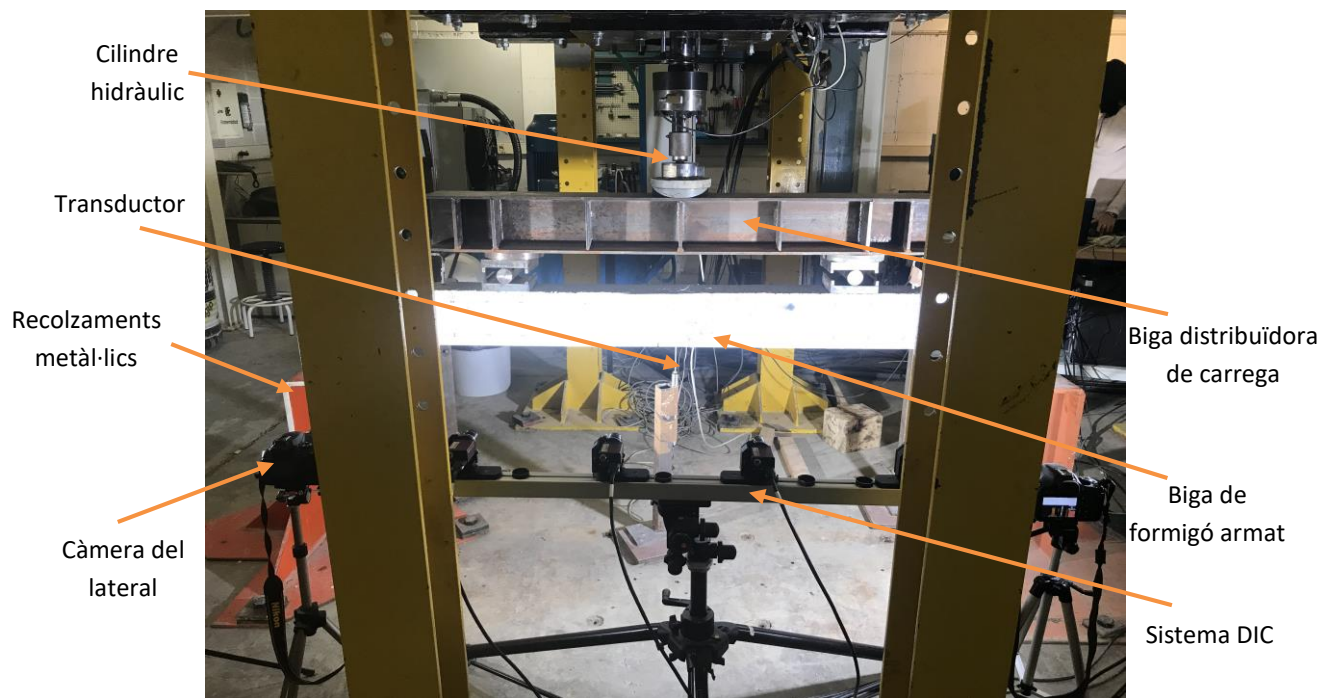


Figura 37: Representació de la configuració de l'assaig

Totes les imatges adquirides amb sistema DIC són processades al software VIC per tal de generar els fitxer .mat que s'usen per complir l'objectiu del treball, és a dir per poder estudiar l'estat de fissuració amb les rutines del MATLAB.

A part de les imatges, també s'obté uns fitxers Excels on hi dades de l'assaig, que inclouen la càrrega aplicada, la fletxa del punt central, les deformació de les armadures, la compressió del punt central del formigó, i les deformació del FRP en cada segon.

#### C.4. Generació fitxers .mat

En el present treball s'ha fet ús del software comercial VIC-2D per processar les imatges adquirides amb sistema DIC per tal de generar els fitxers .mat.

Per obtenir el camp de desplaçaments mitjançant aquest programa, primer de tot s'obra un projecte nou en VIC, allà s'adjunten les imatges en escala de grisos capturades amb sistema DIC i s'indica la mida de subret i step que pel present projecte és 21x21 píxels i 5 píxels, respectivament. Després s'importa una imatge de calibració per poder obtenir la resolució píxels/mm i fer correlació correcta. A continuació es selecciona el mètode de correlació i variables que es volen obtenir. Finalment, s'escull el tipus d'interpolació que aplica el software per obtenir mesures en tots els píxels de la imatge. Així començar el procés de correlació d'imatges que genere els fitxer .OUT.

Un cop acaba el procés de correlació d'imatges es poden exportar els fitxer OUT en .mat tal com es mostra la Figura 38.



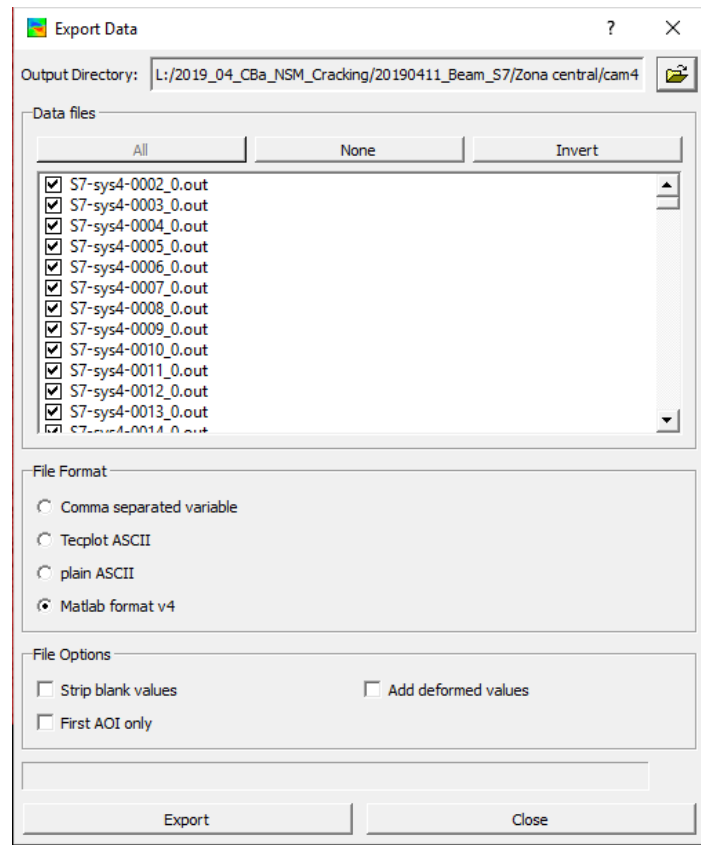


Figura 38: Exportar fitxers a matlab des de VIC.

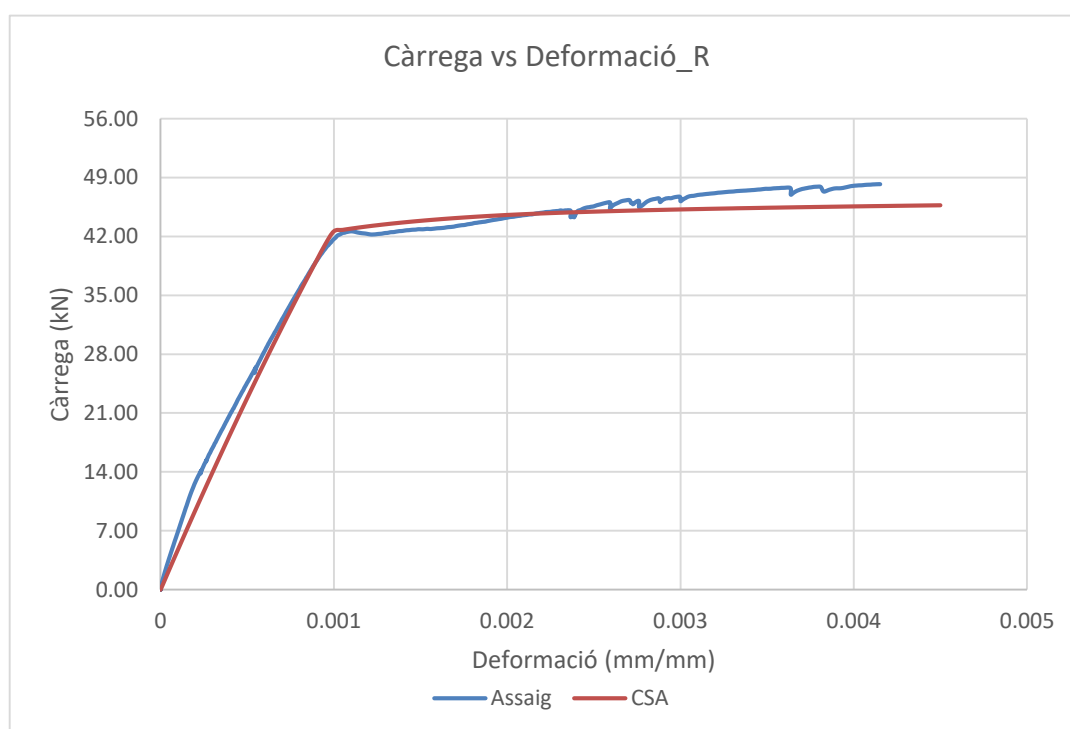
## **ANNEX D: RESULTATS EXPERIMENTALS**



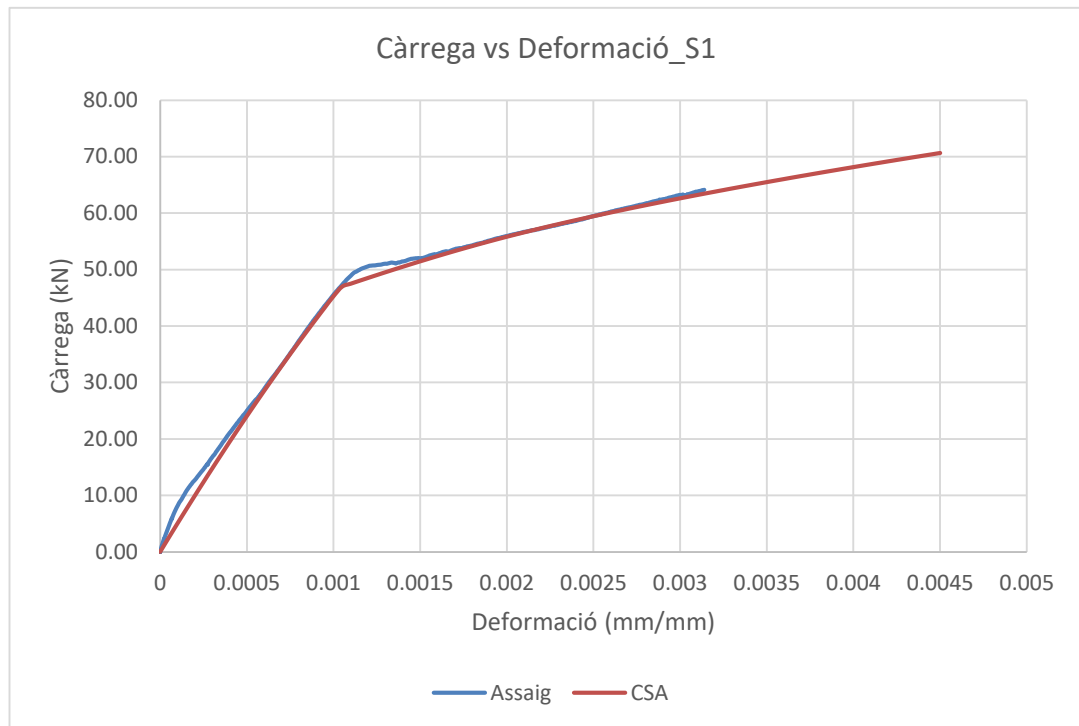
### D.1. Càrrega – deformació formigó de cada biga

En aquest apartat de l'annex s'adjunten unes gràfiques de càrrega – deformació experimental i teòrica del formigó. La finalitat d'aquest apartat és ensenyar i/o mostrar la semblança entre el comportament teòric calculat amb la rutina de CSA i el comportament experimental obtingut de l'assaig. Es pot dir que la diferència entre resultats és molt poca, gairebé no hi ha, per tant es podria afirmar que els espècimens estaven en bones condicions, i/o iguals a suposats teòricament perquè resultats siguin tan exactes.

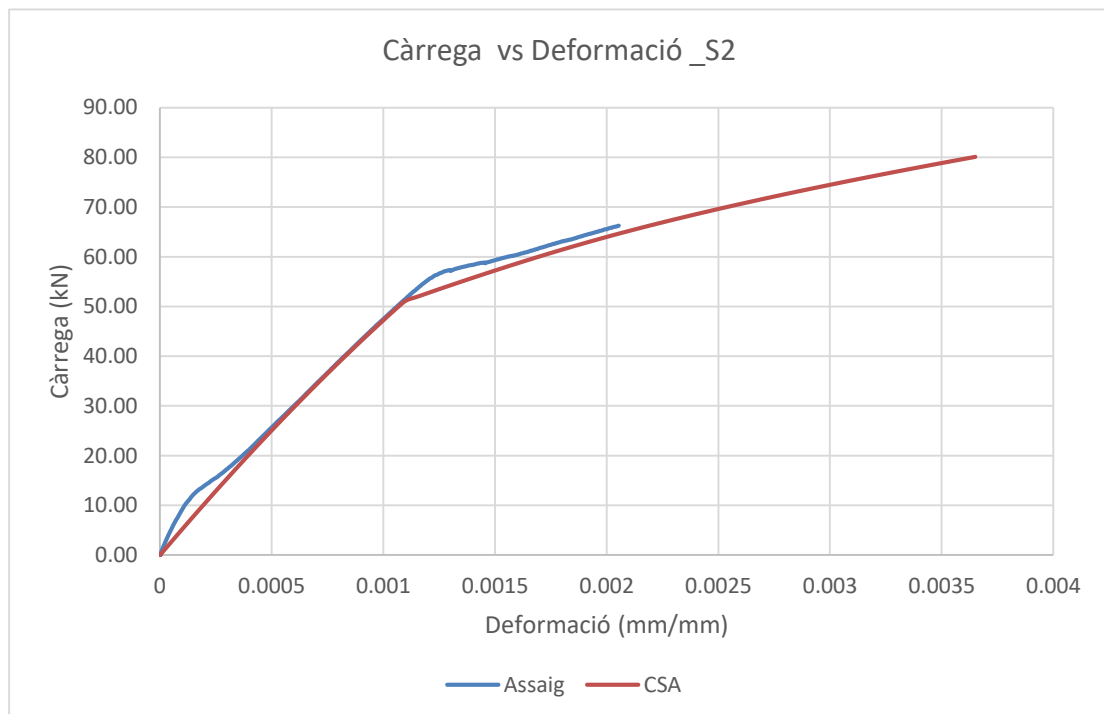
L'únic problema, el que no efecte en la realització de l'estudi, és el mode de falla no previst, és a dir la ruptura prematura (debonding). Per aquest motiu els espècimens assajats no segueixen el comportament teòric fins a la càrrega última esperada. A continuació es mostren les gràfiques de càrrega- deformació del formigó de tots els espècimens.



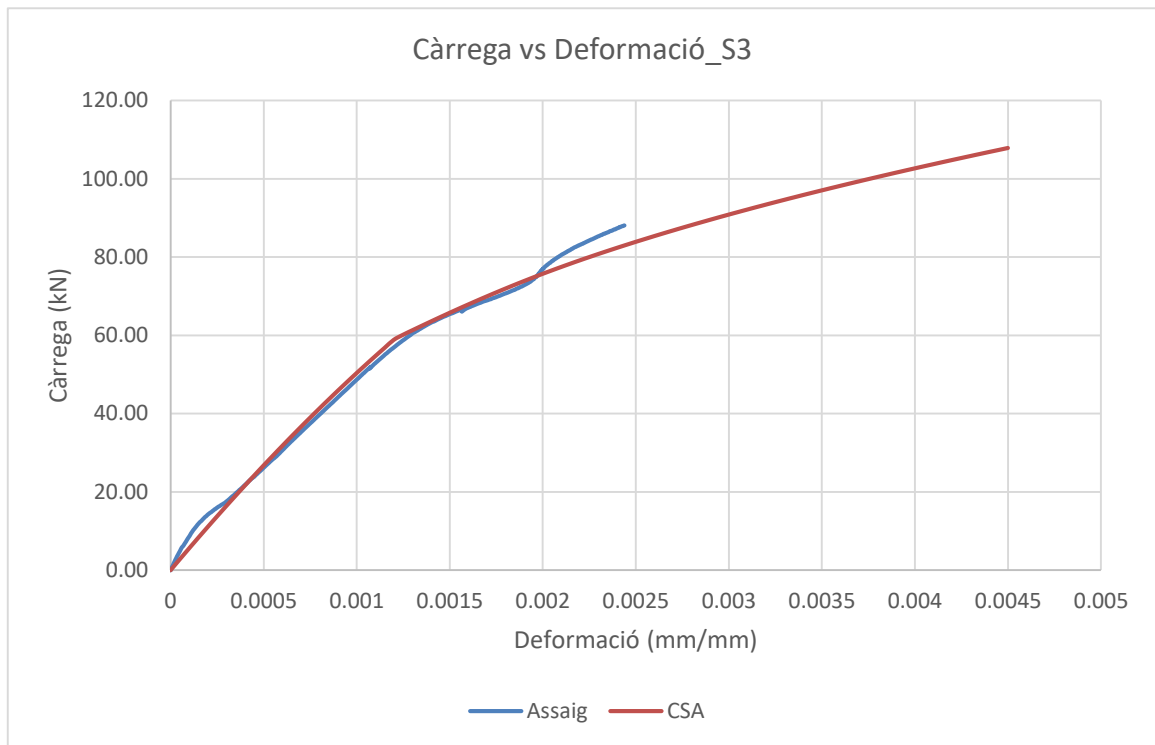
Gràfica 8: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen R.



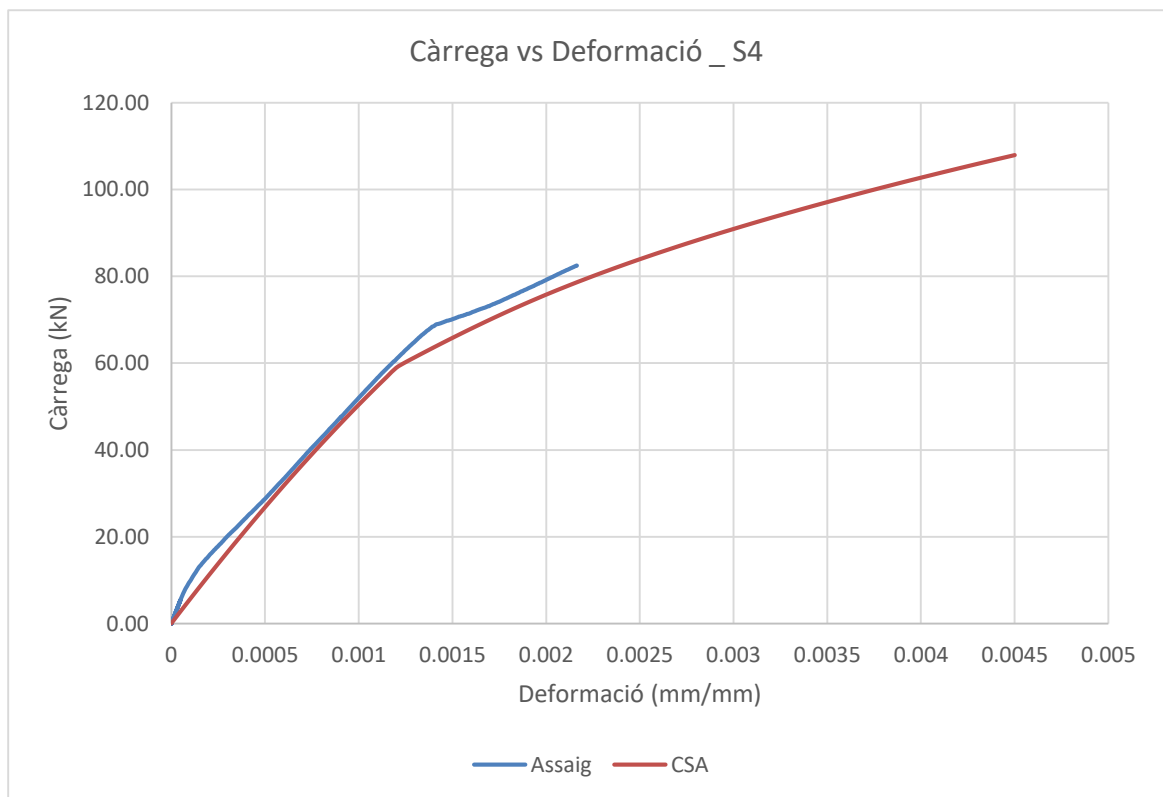
Gràfica 9: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen S1.



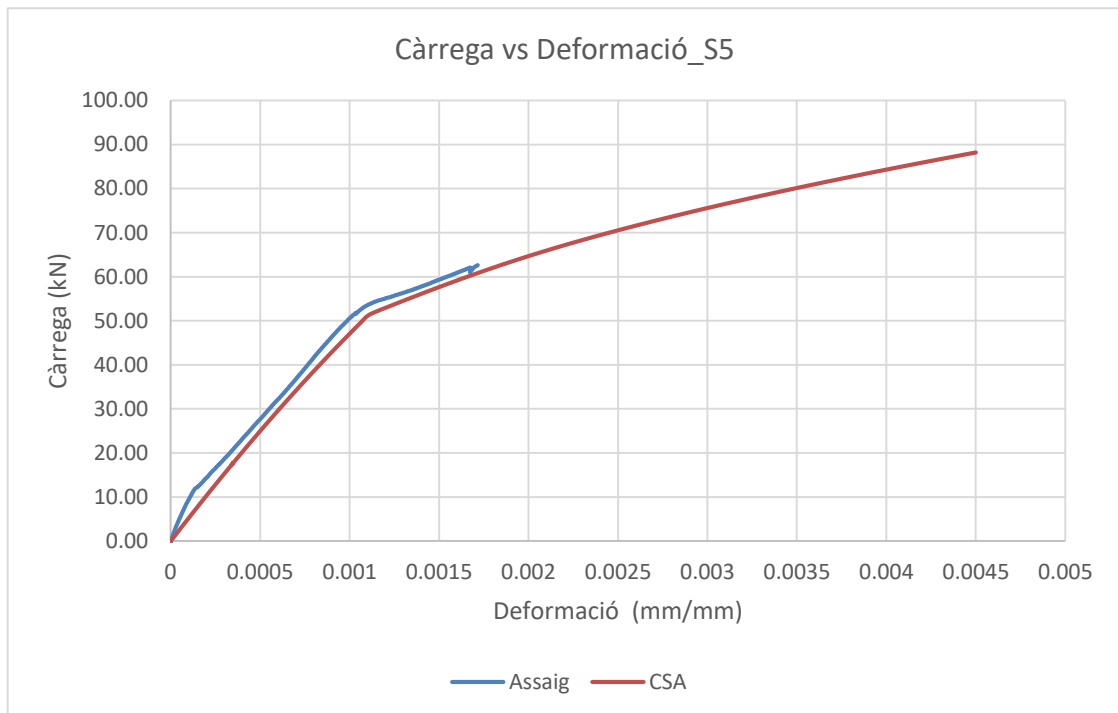
Gràfica 10: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen S2.



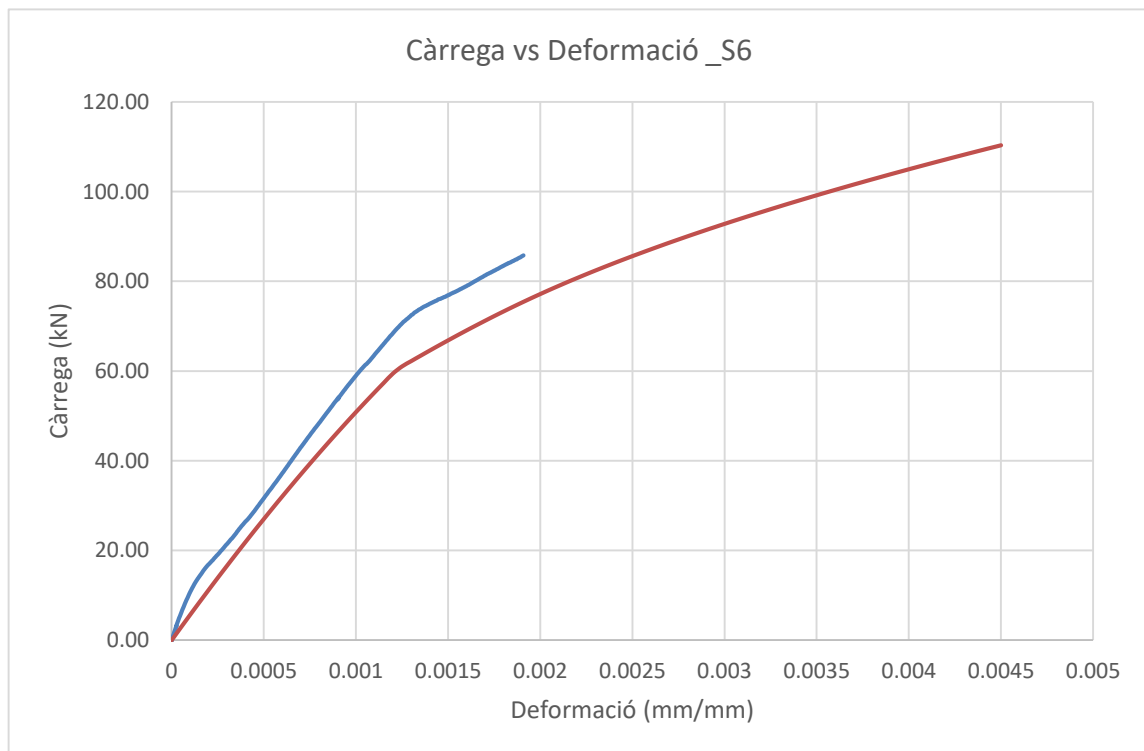
Gràfica 11: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen S3.



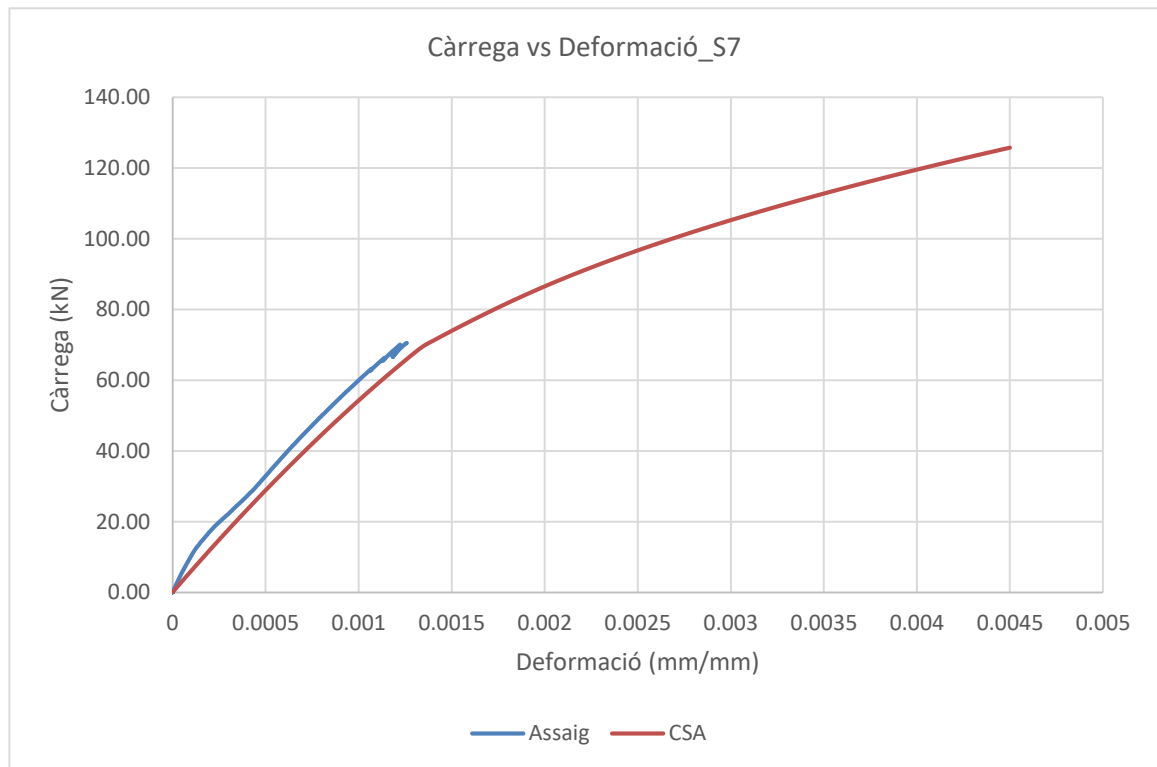
Gràfica 12: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen S4.



Gràfica 13: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen S5.



Gràfica 14: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen S6.



Gràfica 15: Representació del comportament teòric i experimental de l'espècimen S7.



## D.2. Amplada de fissures experimental

L'amplada de la fissura es calcula a partir del sistema DIC i les rutines del matlab. Aquest ANNEX proporcionar els resultats de les fissures de cada biga i més mostra imatges de les fissures mesurades de cada biga en instant de servei i a càrrega de 30kN de les quatre càmeres DIC, extretes de software VIC.

Per veure el nombre de fissures a l'instant a estudiar s'ha seguit el següent procediment. Primer de tot, s'obre el projecte en VIC i després es clica per la pestanya *Data*, s'obre la imatge en instant de servei i en *variable* es marca la deformació, d'aquesta manera s'obté la imatge de la *Figura 39*.

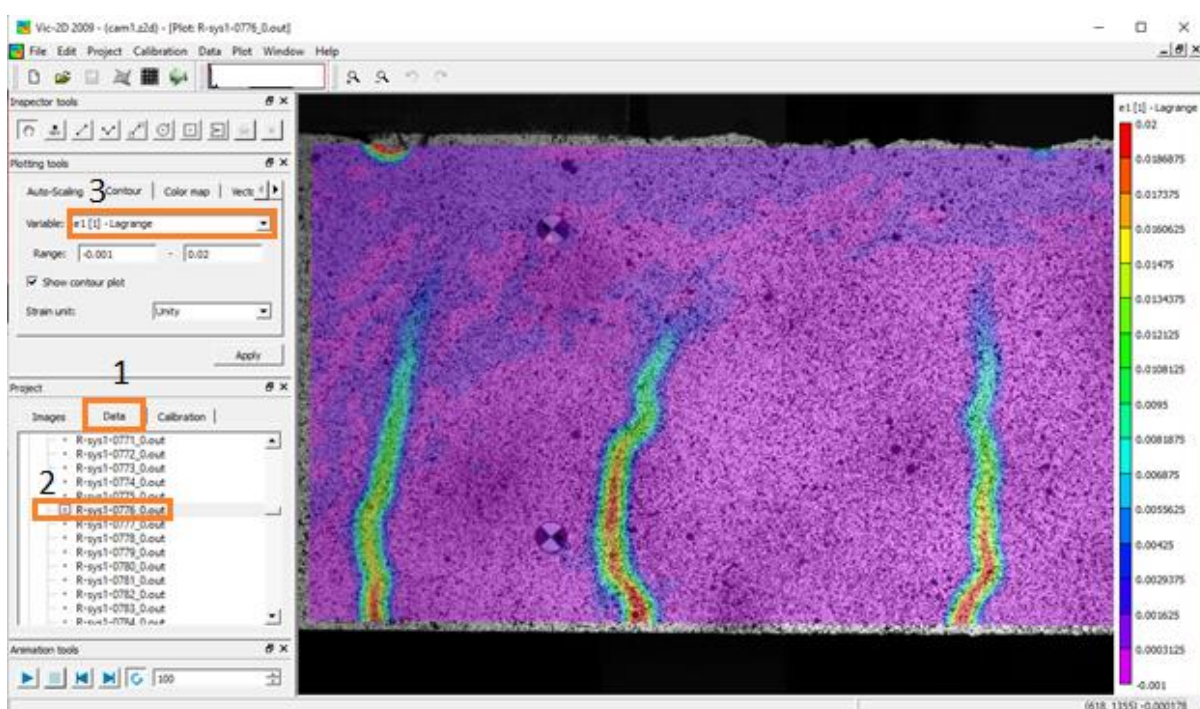


Figura 39: Mètode de saber el nombre de fissures en el regó d'interès a la instant de càlcul.

Aquest procediment s'ha seguit per obtenir totes les imatges que mostren en aquest apartat d'Annex, ja que era molt difícil apreciar les fissures en un instant molt baix o perquè eren molt estretes, Les imatges adjuntades són per cada càmera a l'instant de càlcul que mostren les fissures marcades i després analitzades. Per altra banda, també s'adjunten les taules que mostren els resultats de les amplades de cada fissura apareguda en regió d'interès en l'instant de càlcul i a més proporciona el valor de la mitjana de totes la fissura. Per altra banda també es podria observar el valor de l'amplada mínima i màxima.

### D.2.1. Biga referència (R)

Les fissures mesurades de la biga de referència en l'instat de servei en total són 13, les qual estan mostrades en les Figures 40, 41, 42, i 43 per cada càmera.

Càmera 1:

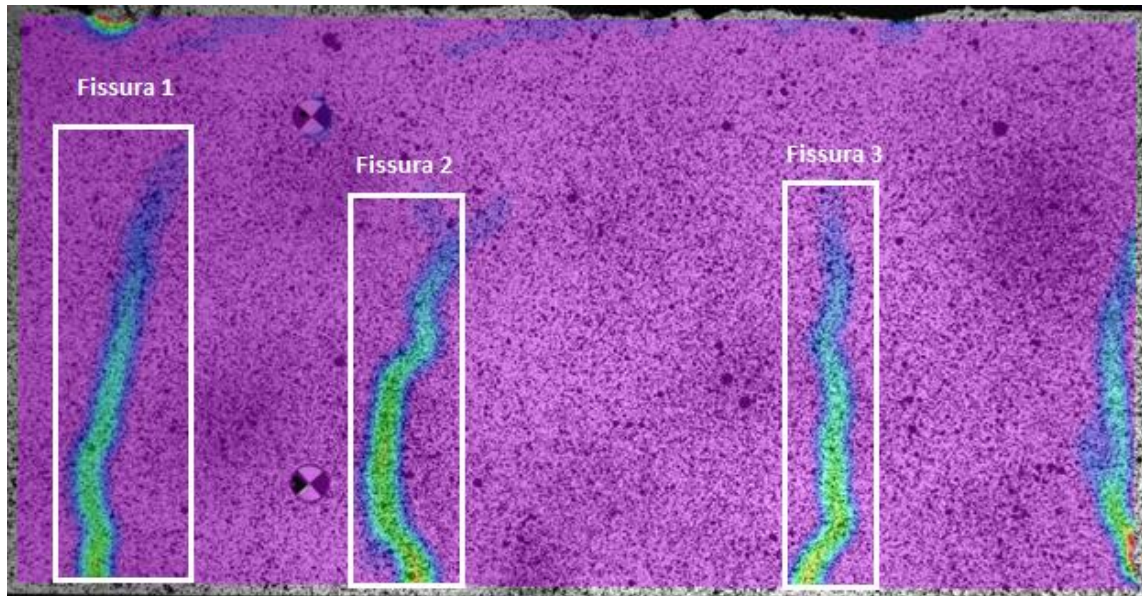


Figura 40: Nombre de fissures en la biga R per instant de servei capturades per càmera 1.

Càmera 2:

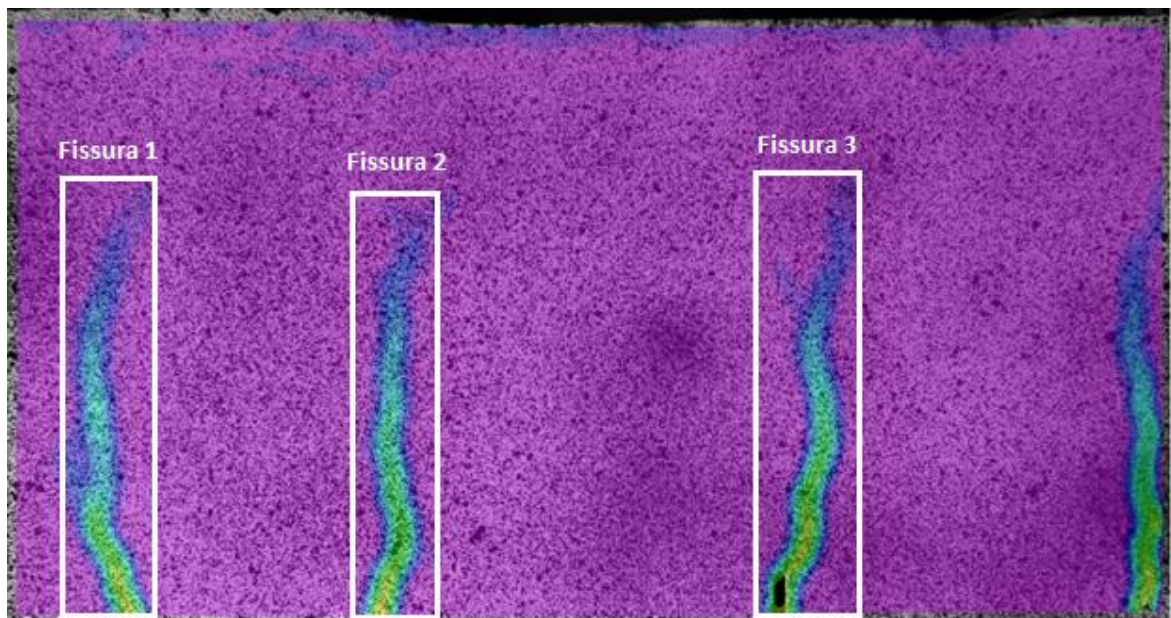


Figura 41: Nombre de fissures en la biga R per instant de servei capturades per càmera 2.

Càmera 3:

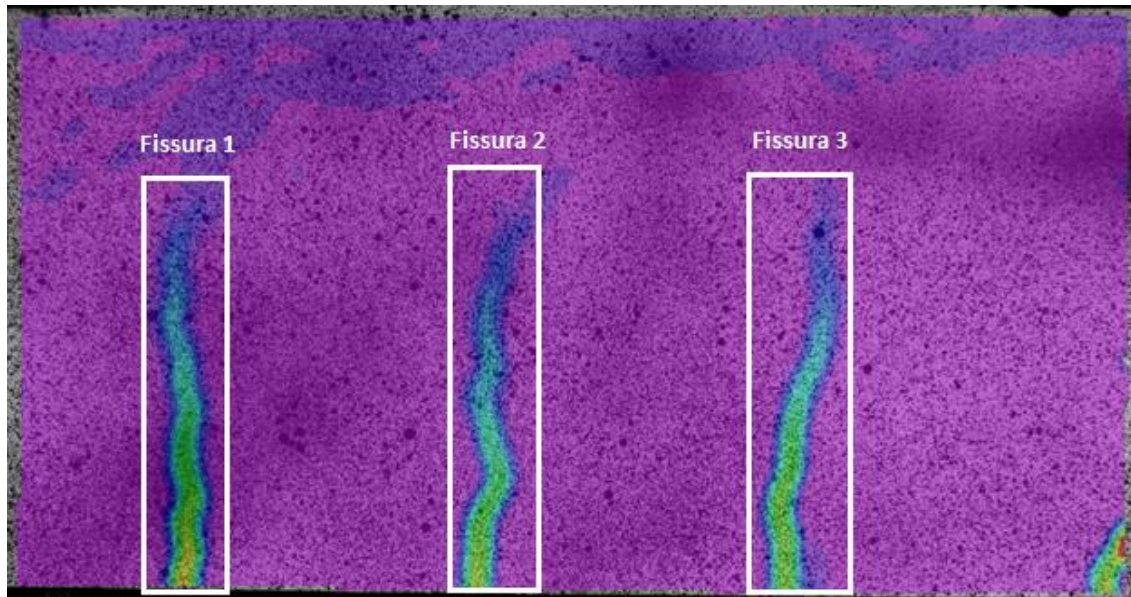


Figura 42: Nombre de fissures en la biga R per instant de servei capturades per càmera 3.

Càmera 4:

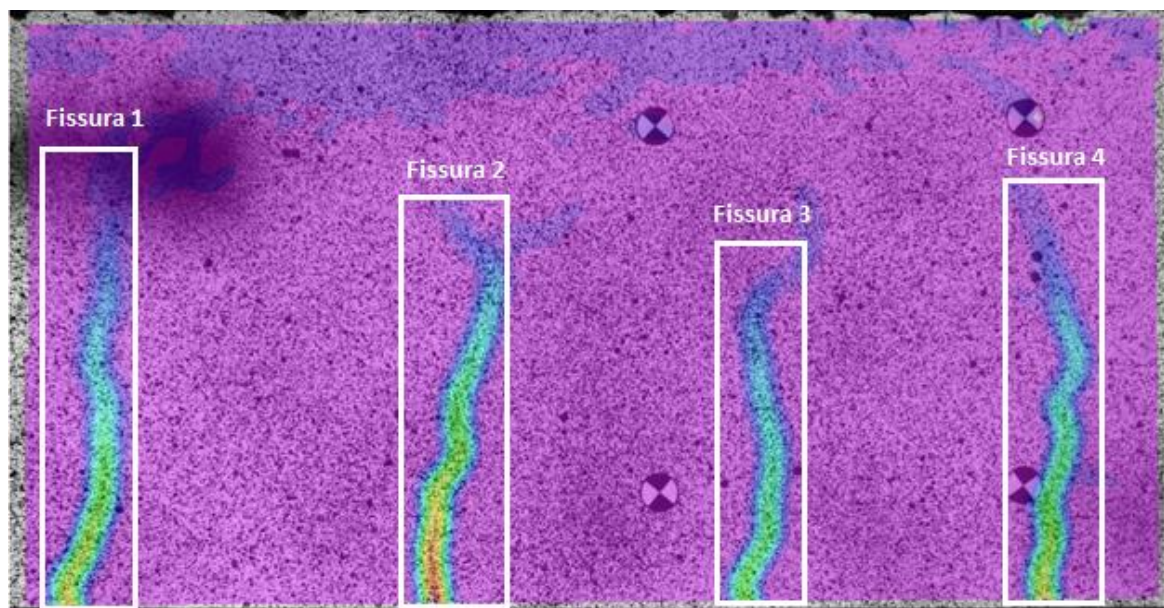


Figura 43: Nombre de fissures en la biga R per instant de servei capturades per càmera 4.

Tot seguit, s'adjunta la *Taula 17* on es mostren els resultats obtinguts de les amplades de fissures per les quatre càmeres DIC a instant de 30kN.

Valors experimentals									
Biga	sys	Núm. fissura	Instant	mm/píxel	c (mm)	c (píxels)	y reforç (píxels)	w (píxels)	w(mm)
R	1	1	769	0.1393	33.5	240.511	1115	0.8700	0.1212
	1	2	769	0.1393	33.5	240.511	1115	1.1518	0.1604
	1	3	769	0.1393	33.5	240.511	1115	1.0054	0.1400
	2	1	769	0.1395	33.5	240.190	1094	0.9557	0.1333
	2	2	769	0.1395	33.5	240.190	1094	0.9555	0.1333
	2	3	769	0.1395	33.5	240.190	1094	1.0740	0.1498
	3	1	769	0.1398	33.5	239.700	1061	1.0731	0.1500
	3	2	769	0.1398	33.5	239.700	1061	0.8560	0.1196
	3	3	769	0.1398	33.5	239.700	1061	0.9312	0.1301
	4	1	769	0.1403	33.5	238.786	1067	1.0480	0.1470
	4	2	769	0.1403	33.5	238.786	1067	1.2861	0.1804
	4	3	769	0.1403	33.5	238.786	1067	0.7745	0.1087
	4	4	769	0.1403	33.5	238.786	1067	0.8441	0.1184
									<b>0.13787</b>

Taula 17: Valors de les amplades de fissures de biga de referència a càrrega de 30kN.

### D.2.2. Biga reforçada S1

Les fissures mesurades de la biga de referència en l'instat de càrrega 30kN, en total, són 14, les qual estan mostrades en les figures 44, 45, 46 i 47 per cada càmera.

Càmera 1:

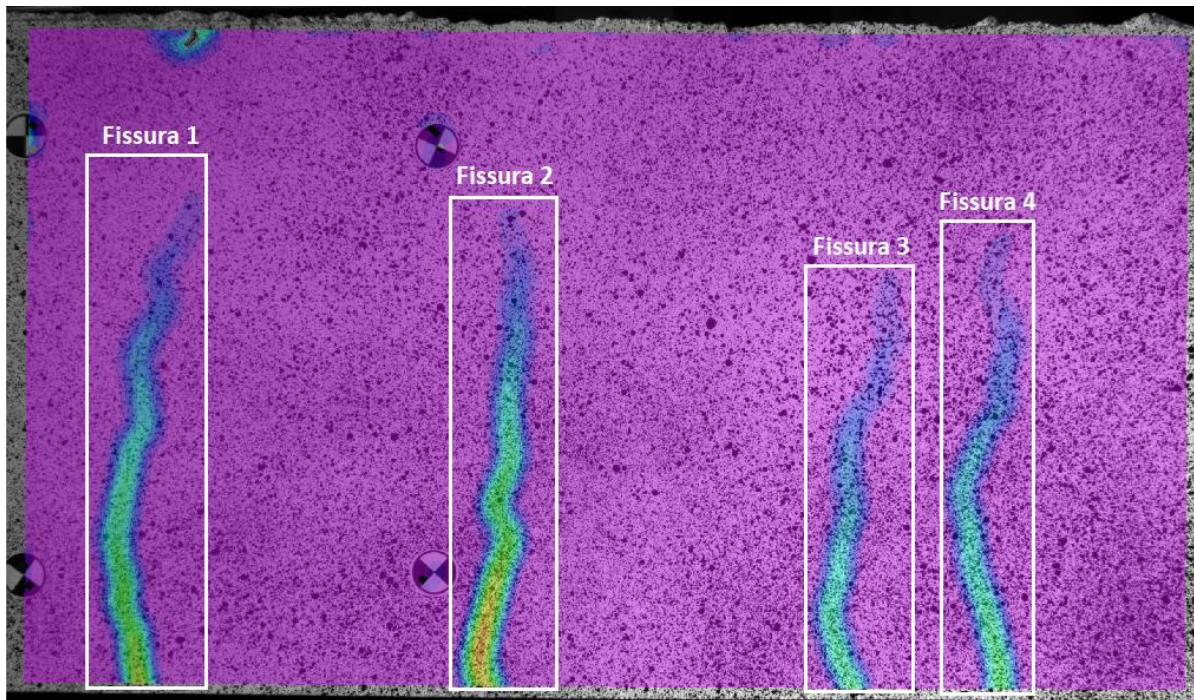


Figura 44: Nombre de fissures en la biga S1 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 1.

Càmera 2:

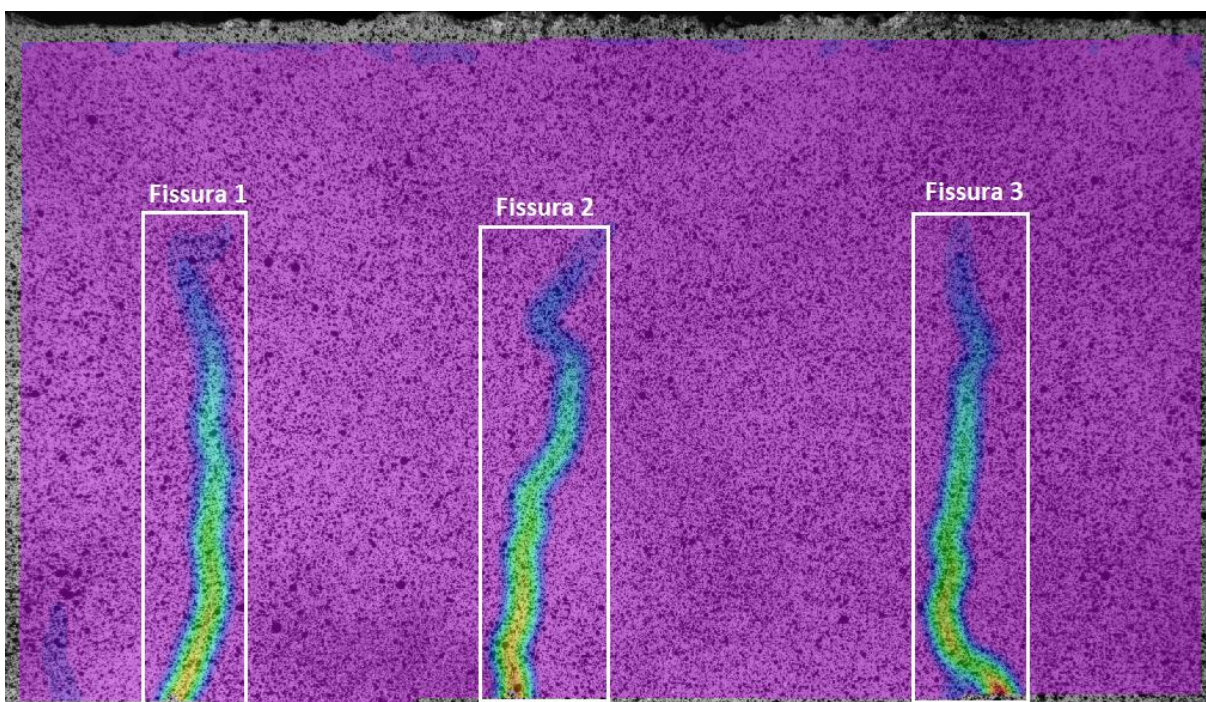


Figura 45: Nombre de fissures en la biga S1 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 2.

Càmera 3:

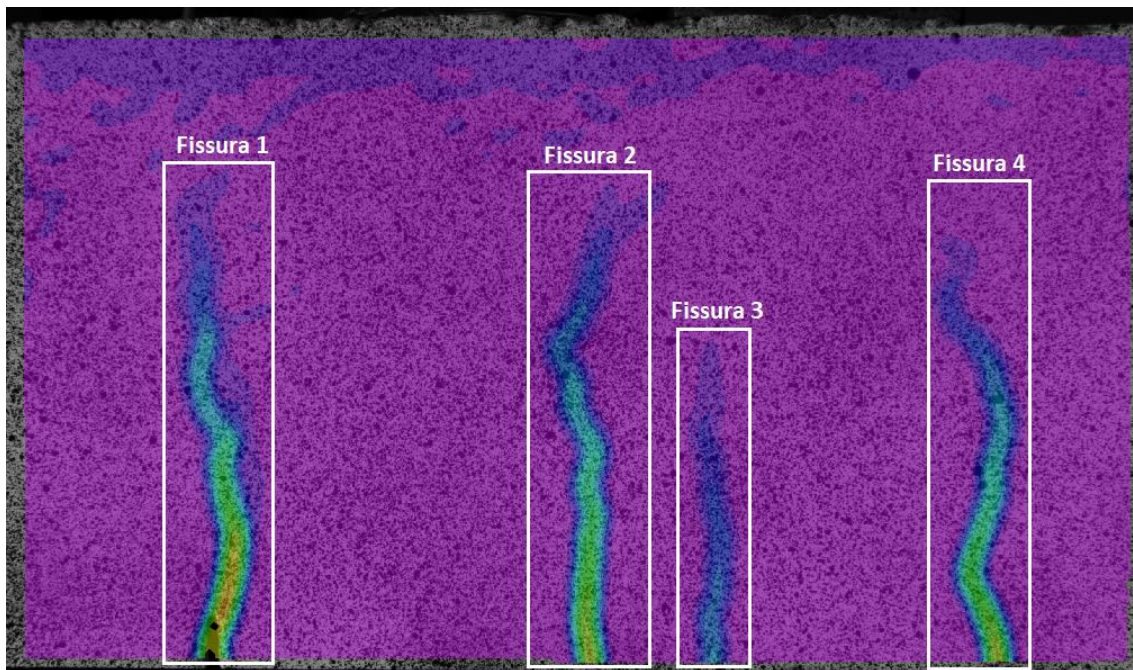


Figura 46: Nombre de fissures en la biga S1 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 3.

Càmera 4:

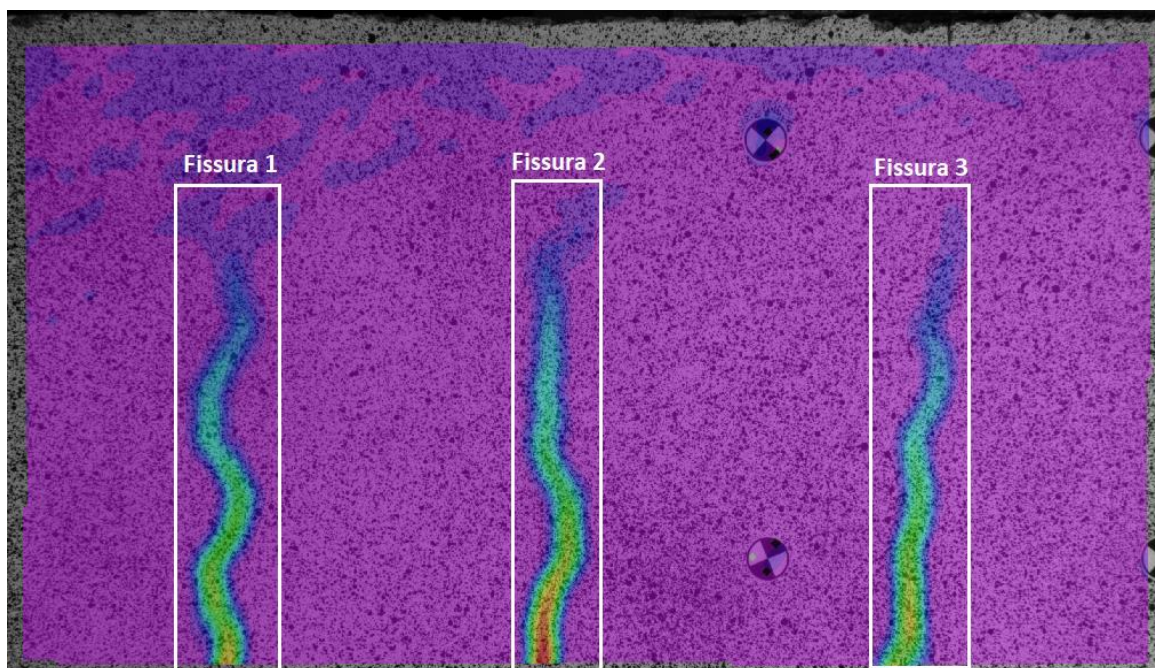


Figura 47: Nombre de fissures en la biga S1 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 4.

Tot seguit, s'adjunta la *Taula 18* on es mostren els resultats obtinguts de les amplades de fissures per les quatre càmeres DIC a l' instant de 30kN.

Valors experimentals										
Biga	sys	Núm. fissura	Instant_1	mm/píxel	c (mm)	c (píxels)	y reforç (píxels)	w (píxels)_1	w (mm)_1	
S1	1	1	724	0.1298	33	254.258	1193	0.9568	0.1242	
	1	2	724	0.1298	33	254.258	1193	1.2078	0.1567	
	1	3	724	0.1298	33	254.258	1193	0.6958	0.0903	
	1	4	724	0.1298	33	254.258	1193	0.7426	0.0964	
	2	1	724	0.1299	33	254.052	1189	1.1516	0.1496	
	2	2	724	0.1299	33	254.052	1189	1.2297	0.1597	
	2	3	724	0.1299	33	254.052	1189	1.1714	0.1521	
	3	1	724	0.1302	33	253.471	1178	1.2677	0.1650	
	3	2	724	0.1302	33	253.471	1178	1.0199	0.1328	
	3	3	724	0.1302	33	253.471	1179	0.3710	0.0483	
	3	4	724	0.1302	33	253.471	1178	0.8535	0.1111	
	4	1	724	0.1303	33	253.202	1245	1.1229	0.1463	
	4	2	724	0.1303	33	253.202	1245	1.2510	0.1630	
	4	3	724	0.1303	33	253.202	1245	1.0674	0.1391	
										<b>0.13104</b>

Taula 18: Valors de les amplades de fissures de biga S1 a càrrega de 30kN.

Les fissures mesurades de la biga de referència en l'instat de servei en total són 15, les qual estan mostrades en les Figures 48, 49, 50 i 51 per cada càmera.

Càmera 1:

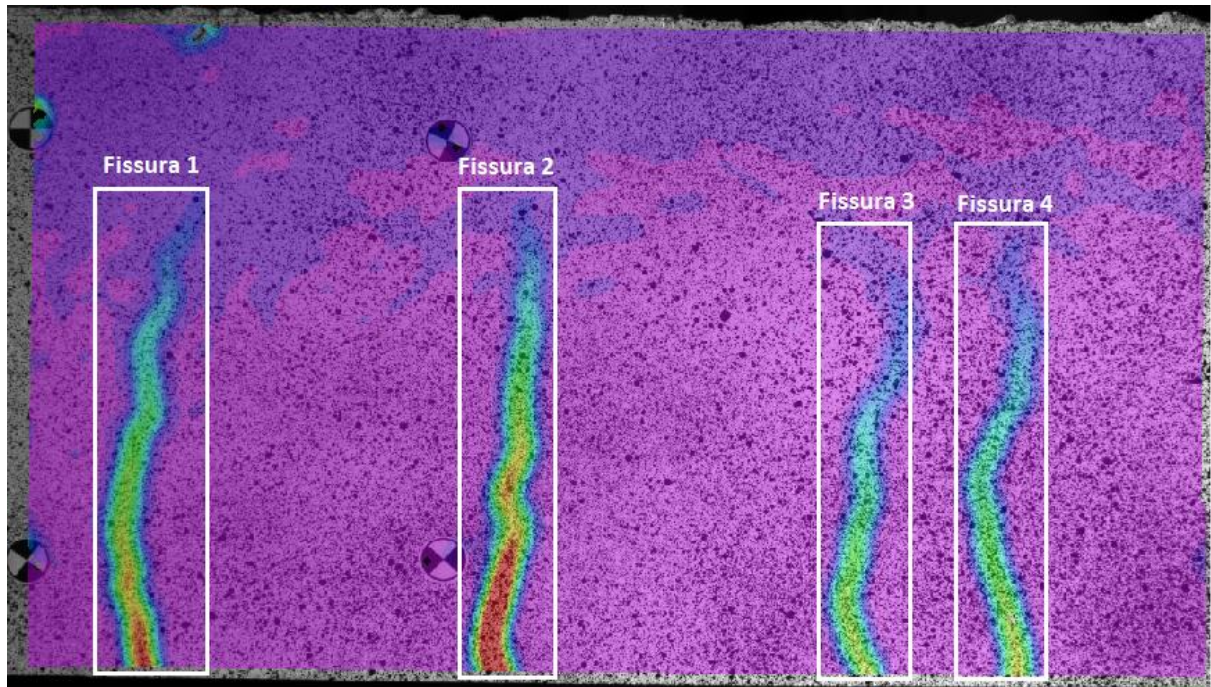


Figura 48: Nombre de fissures en la biga S1 per instant de servei capturades per càmera 1

Càmera 2:

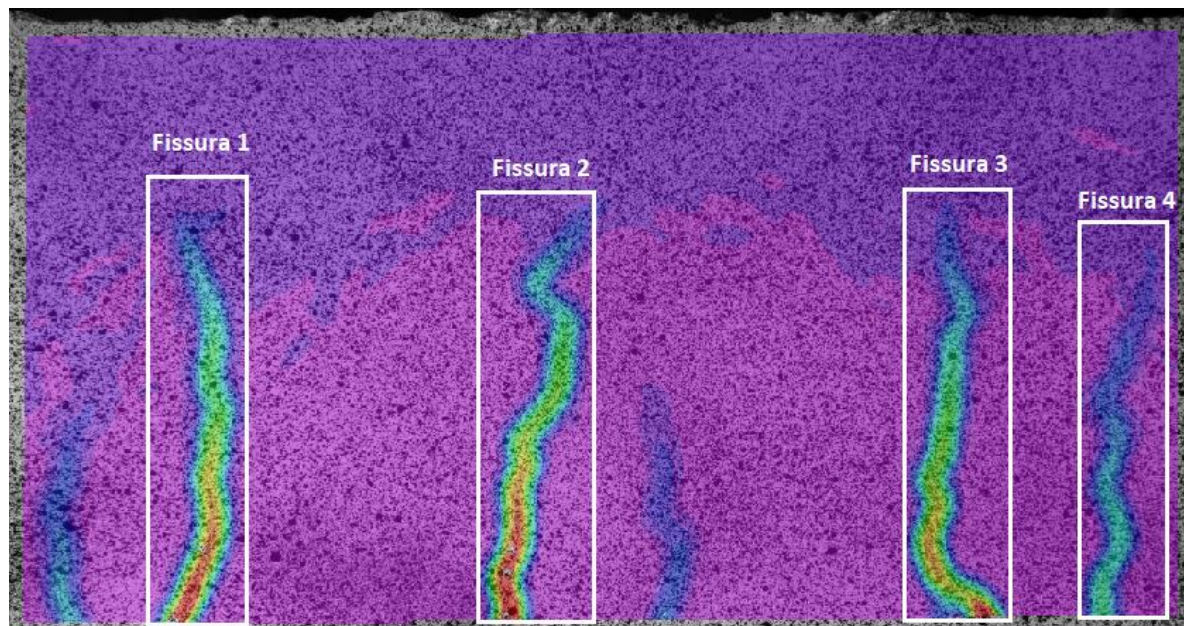


Figura 49: Nombre de fissures en la biga S1 per instant de servei capturades per càmera 2



Càmera 3:

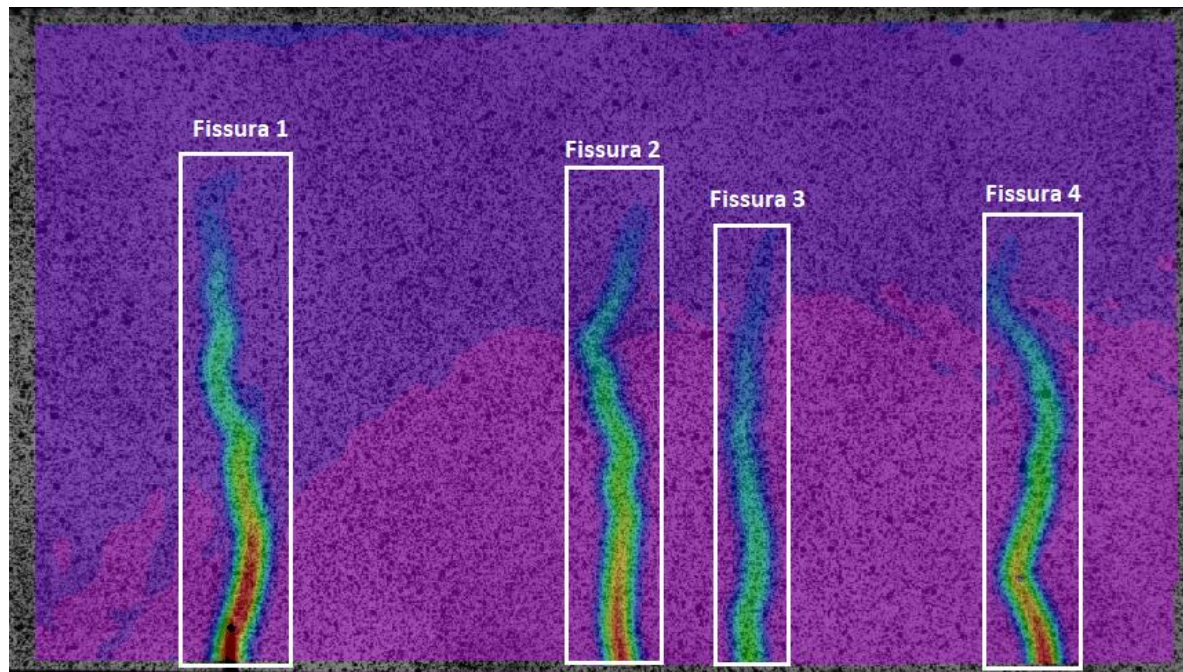


Figura 50: Nombre de fissures en la biga S1 per instant de servei capturades per càmera 3.

Càmera 4:

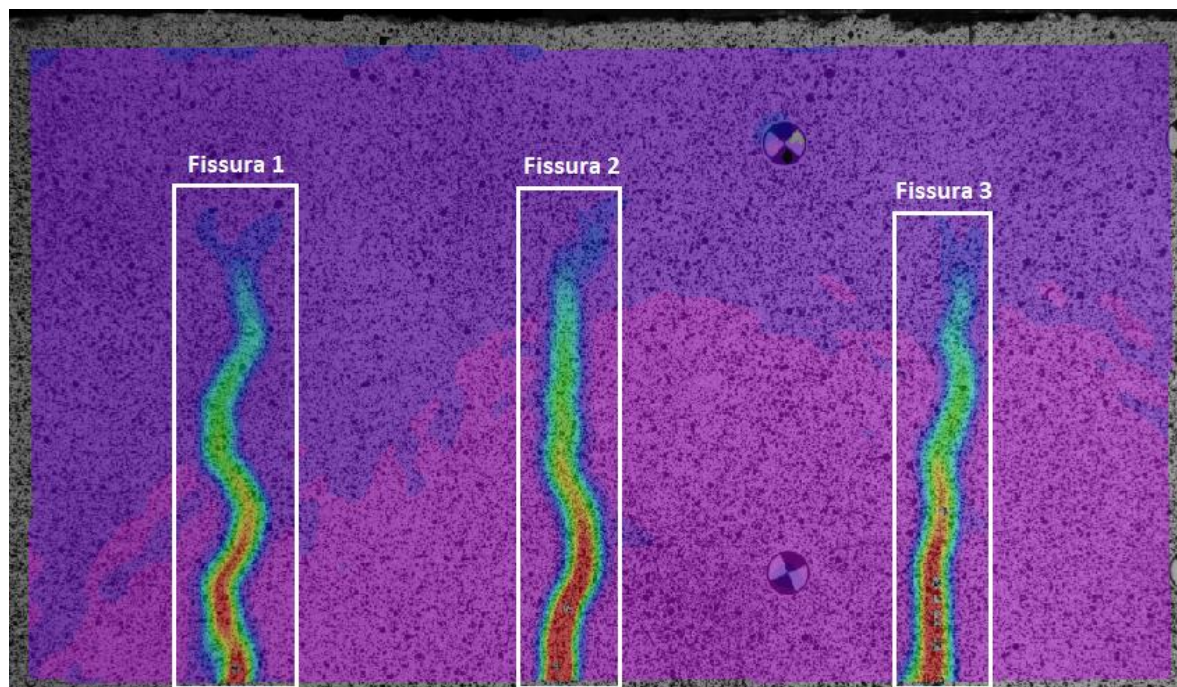


Figura 51: Nombre de fissures en la biga S1 per instant de servei capturades per càmera 4.

Tot seguit, s'adjunta la *Taula 19* on es mostra els resultats obtinguts de les amplades de les fissures per les quatre càmeres DIC a l'instant de càrrega de servei.

Valors experimentals									
Biga	sys	Núm. fissura	Instant_2	mm/píxel	c (mm)	c (píxels)	y reforç (píxels)	w (píxels)_2	w(mm)_2
S1	1	1	1039	0.1298	33	254.258	1193	1.3174	0.1710
	1	2	1039	0.1298	33	254.258	1193	1.7929	0.2327
	1	3	1039	0.1298	33	254.258	1193	1.0114	0.1312
	1	4	1039	0.1298	33	254.258	1193	1.0089	0.1309
	2	1	1039	0.1299	33	254.052	1189	1.5089	0.1960
	2	2	1039	0.1299	33	254.052	1189	1.6147	0.2097
	2	3	1039	0.1299	33	254.052	1189	1.3450	0.1747
	2	4	1039	0.1299	33	254.052	1189	0.6459	0.0839
	3	1	1039	0.1302	33	253.471	1178	1.6221	0.2111
	3	2	1039	0.1302	33	253.471	1178	1.3444	0.1750
	3	3	1039	0.1302	33	253.471	1179	0.7954	0.1035
	3	4	1039	0.1302	33	253.471	1178	1.2365	0.1610
	4	1	1039	0.1303	33	253.202	1245	1.6376	0.2134
	4	2	1039	0.1303	33	253.202	1245	1.8647	0.2430
	4	3	1039	0.1303	33	253.202	1245	1.7419	0.2270

Taula 19: Valors de les amplades de fissures de biga S1 a càrrega de servei.

### D.2.3. Biga reforçada S2

Les fissures mesurades de la biga de referència en l'instat de càrrega 30kN, en total, són 13, les qual estan mostrades en les figues 52, 53, 54 i 55 per cada càmera.

Càmera 1:

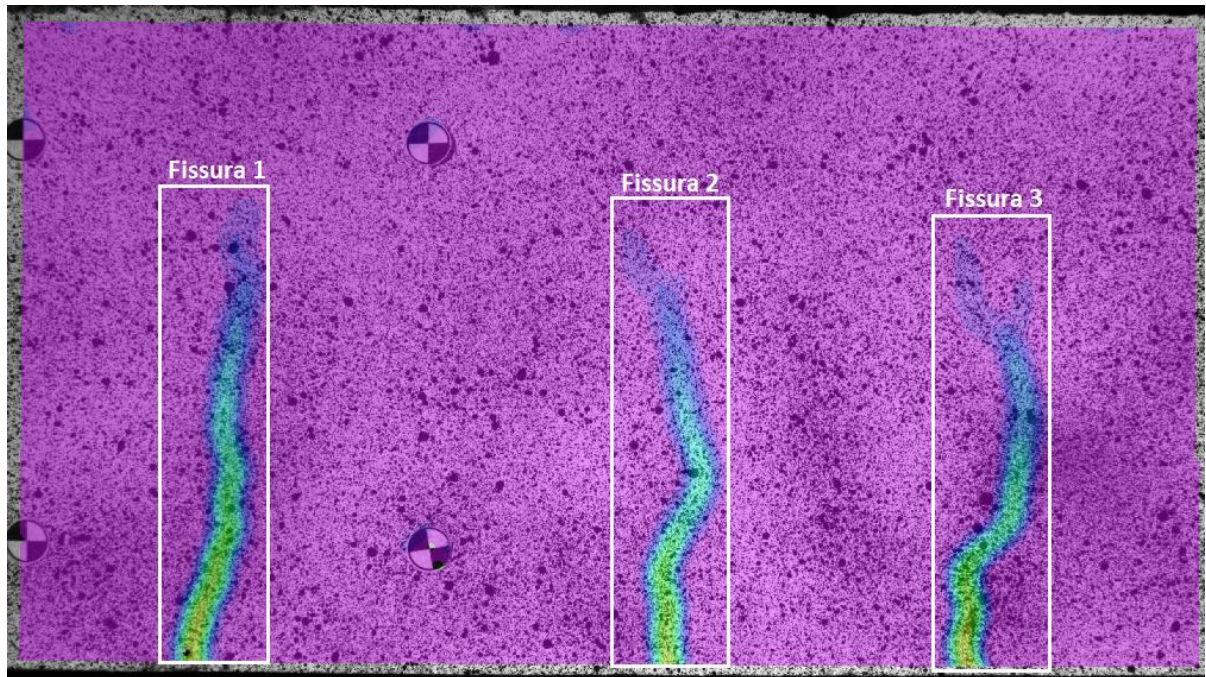


Figura 52: Nombre de fissures en la biga S2 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 1.

Càmera 2:

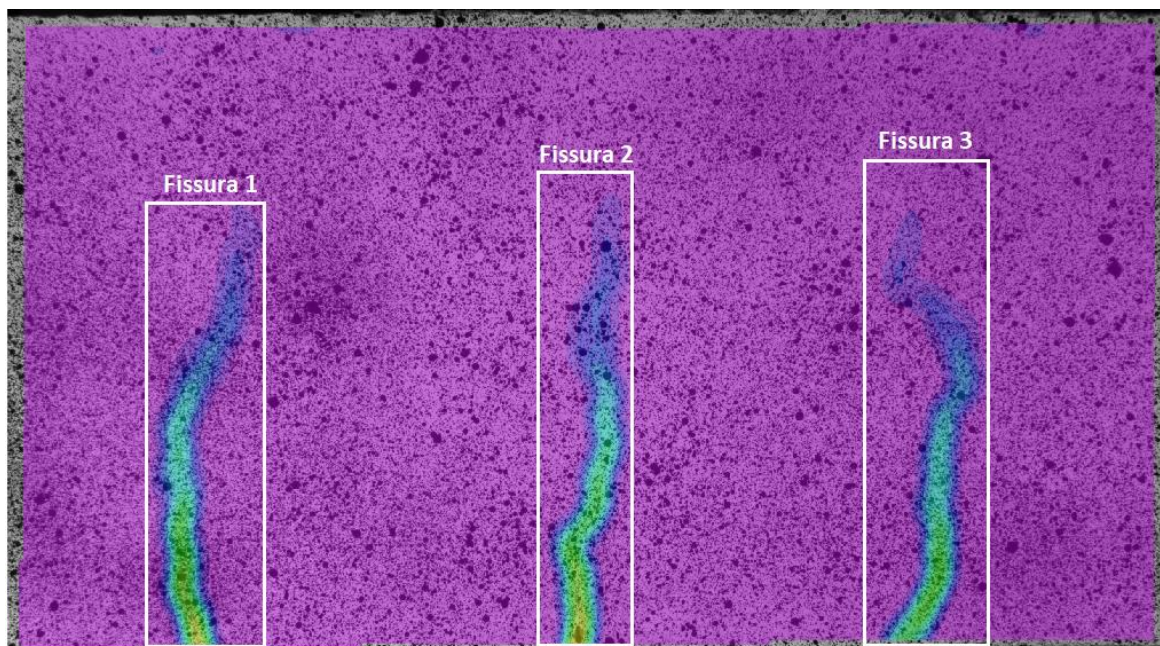


Figura 53: Nombre de fissures en la biga S2 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 2.

Càmera 3:

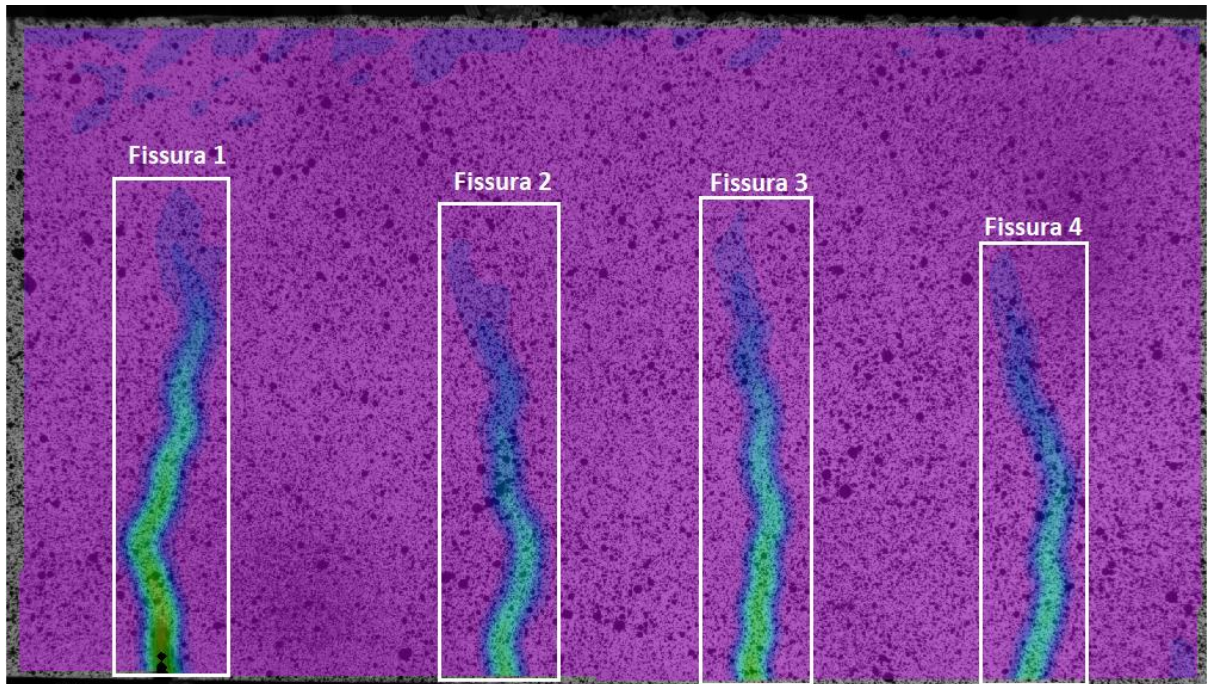


Figura 54: Nombre de fissures en la biga S2 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 3.

Càmera 4:

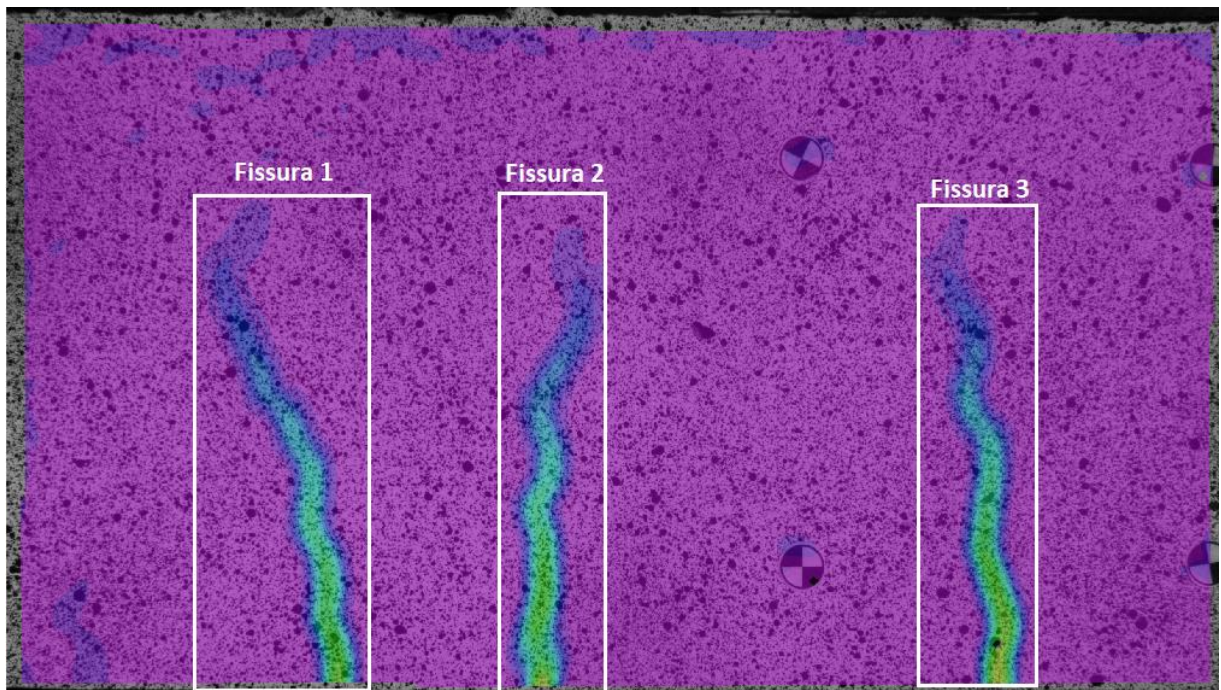


Figura 55: Nombre de fissures en la biga S2 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 4.

Tot seguit, s'adjunta la Taula 20 on es mostren els resultats obtinguts de les amplades de fissures per les quatre càmeres DIC a l'instant de càrrega de 30kN.

Valors experimentals										
Biga	sys	Núm. fissura	Instant_1	mm/píxel	c (mm)	c (píxels)	y reforç (píxels)	w (píxels)_1	w (mm)_1	
S2	1	1	662	0.1326	34	256.04	1171	1.0109	0.1341	
	1	2	662	0.1326	34	256.04	1171	0.9390	0.1246	
	1	3	662	0.1326	34	256.04	1171	0.8855	0.1175	
	2	1	662	0.1324	34	256.49	1166	0.9814	0.1299	
	2	2	662	0.1324	34	256.49	1166	1.0039	0.1329	
	2	3	662	0.1324	34	256.49	1166	0.9001	0.1192	
	3	1	662	0.1324	34	256.43	1149	1.0523	0.1394	
	3	2	662	0.1324	34	256.43	1149	0.6470	0.0857	
	3	3	662	0.1324	34	256.43	1149	0.7972	0.1056	
	3	4	662	0.1324	34	256.43	1149	0.6370	0.0844	
	4	1	662	0.1321	34	257.02	1231	0.8190	0.1082	
	4	2	662	0.1321	34	257.02	1231	0.8560	0.1131	
	4	3	662	0.1321	34	257.02	1231	0.8701	0.1150	
										<b>0.11611</b>

Taula 20: Valors de les amplades de fissures de biga S2 a càrrega de 30kN.

Les fissures mesurades de la biga S2 en l'instat de servei en total són 18, les qual estan mostrades en les figures 56, 57, 58 i 59 per cada càmera.

Càmera 1:

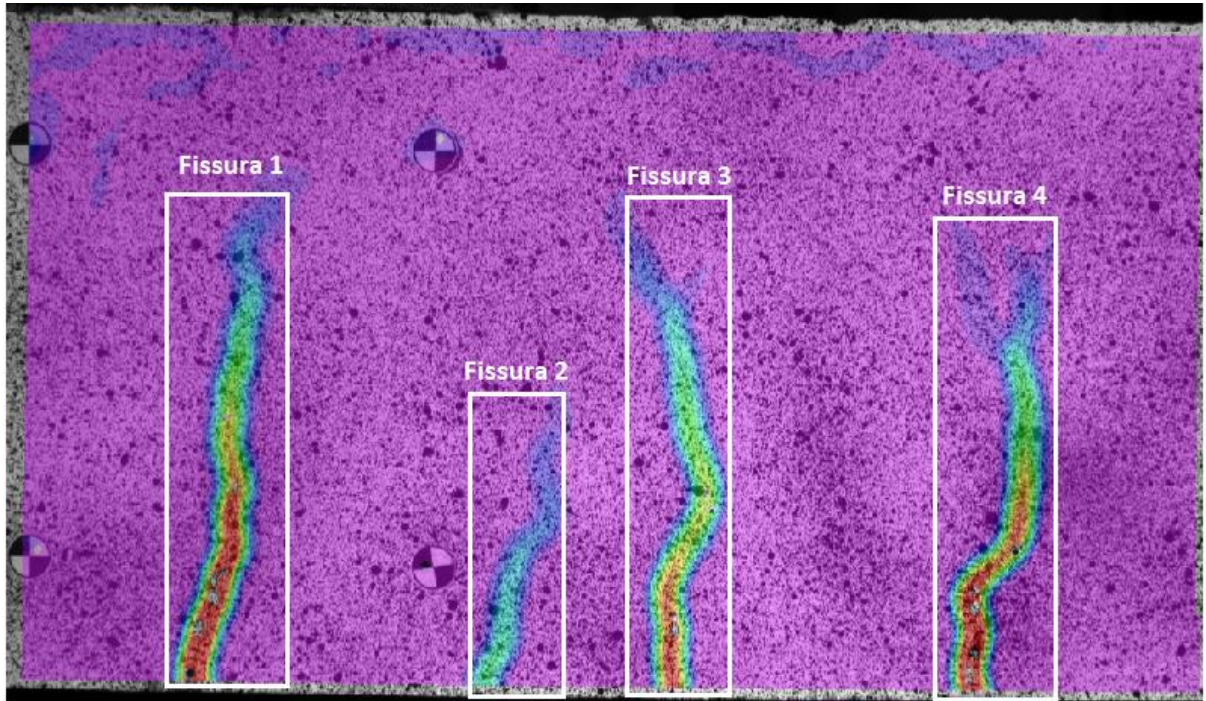


Figura 56: Nombre de fissures en la biga S2 per instant de servei capturades per càmera 1.

Càmera 2:

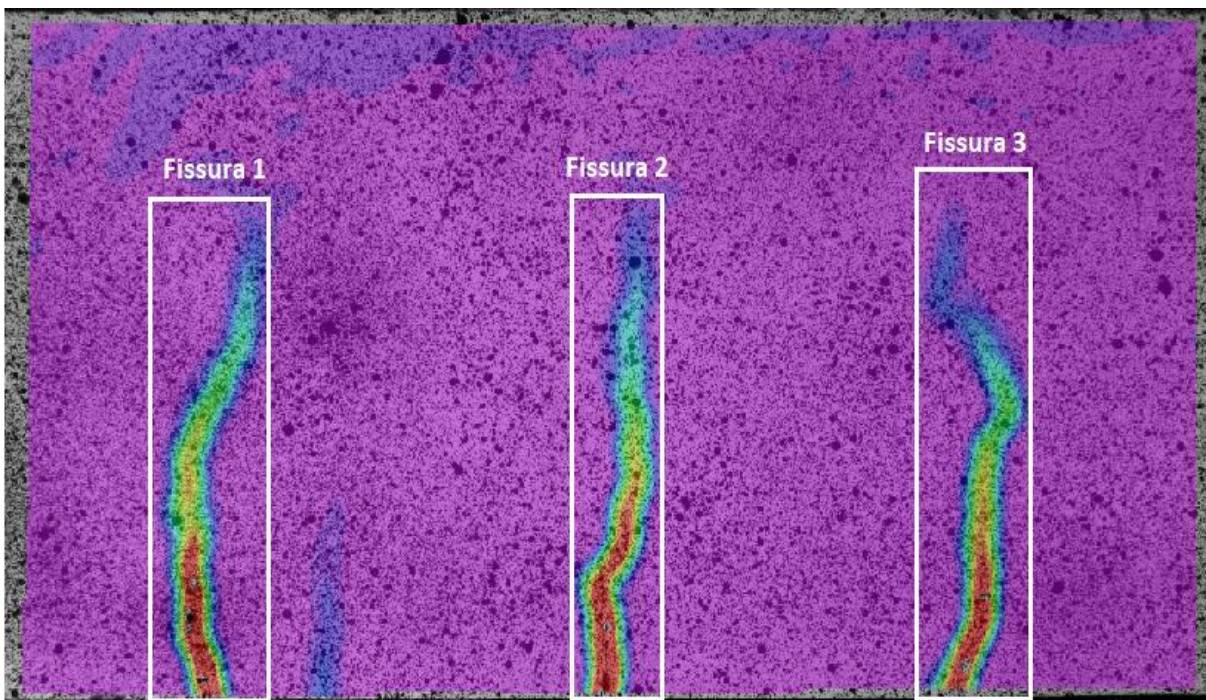


Figura 57: Nombre de fissures en la biga S2 per instant de servei capturades per càmera 2.

Càmera 3:

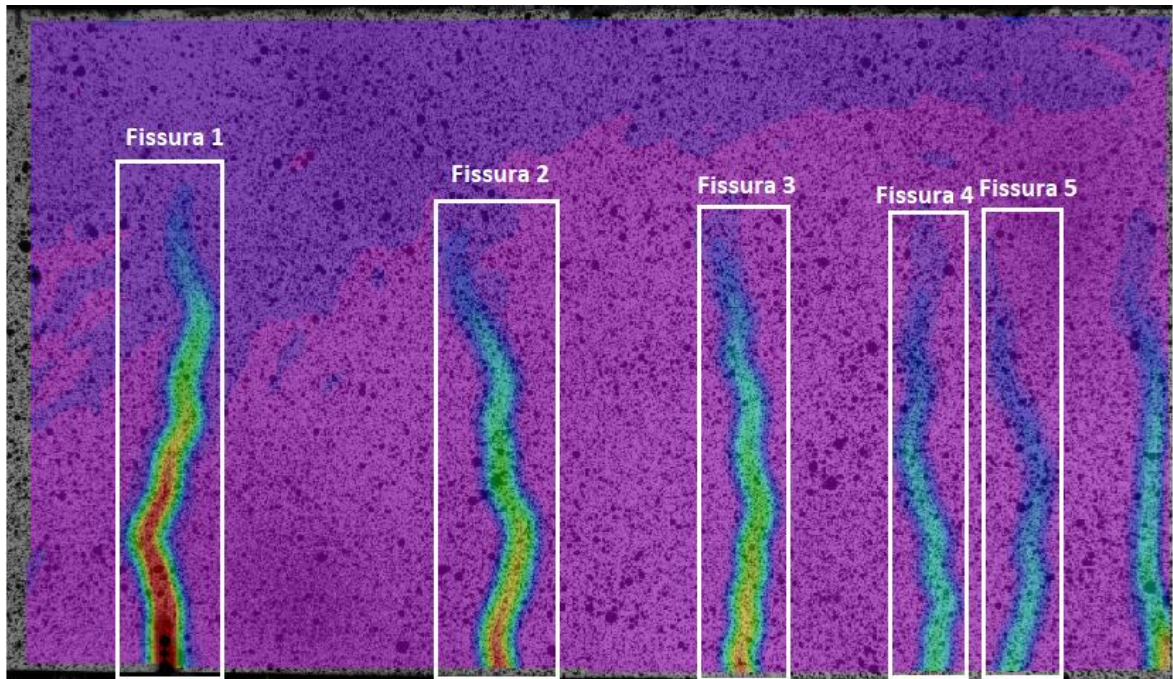


Figura 58: Nombre de fissures en la biga S2 per instant de servei capturades per càmera 3.

Càmera 4:

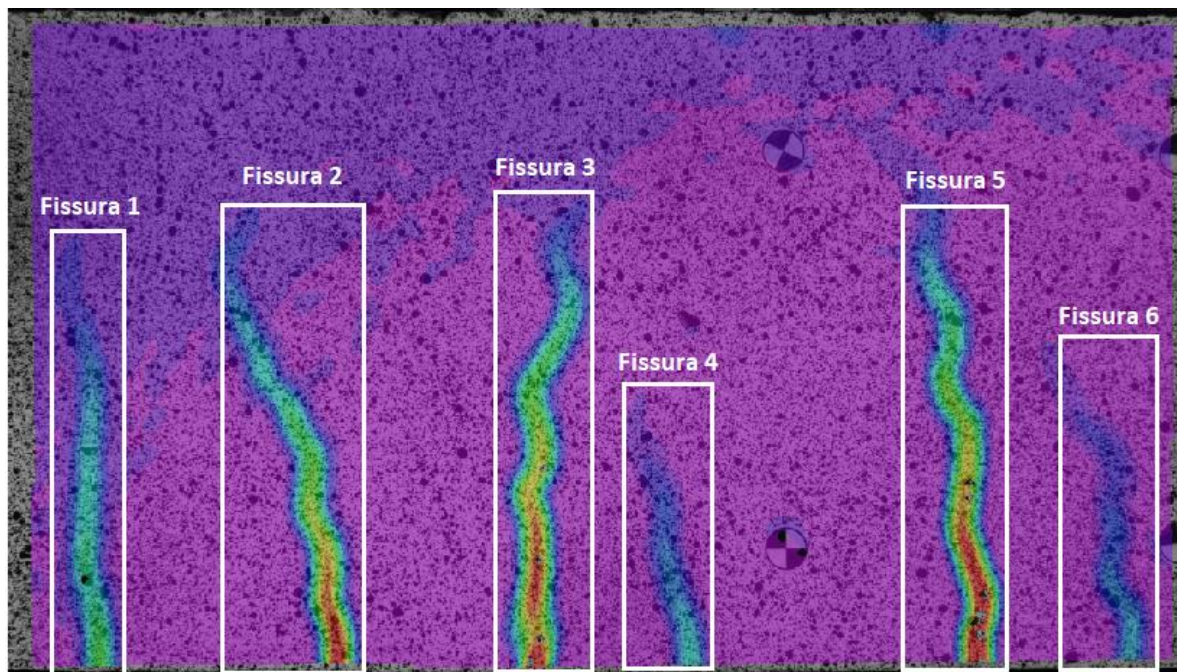


Figura 59: Nombre de fissures en la biga S2 per instant de servei capturades per càmera 4.

Tot seguit, s'adjunta la *Taula 21* on es mostren els resultats obtinguts de les amplades de fissures per les quatre càmeres DIC a l'instant de càrrega de servei.

Valors experimentals										
Biga	sys	Núm. fissura	Instant_2	mm/píxel	c (mm)	c (píxels)	y reforç (píxels)	w (píxels)_2	w(mm)_2	
S2	1	1	1180	0.1326	34	256.04	1171	1.9257	0.2554	
	1	2	1180	0.1326	34	256.04	1171	0.5034	0.0668	
	1	3	1180	0.1326	34	256.04	1171	1.4965	0.1985	
	1	4	1180	0.1326	34	256.04	1171	1.7489	0.2320	
	2	1	1180	0.1324	34	256.49	1166	1.8096	0.2396	
	2	2	1180	0.1324	34	256.49	1166	1.8615	0.2465	
	2	3	1180	0.1324	34	256.49	1166	1.7545	0.2323	
	3	1	1180	0.1324	34	256.43	1149	1.9165	0.2538	
	3	2	1180	0.1324	34	256.43	1149	1.2938	0.1714	
	3	3	1180	0.1324	34	256.43	1149	1.1221	0.1486	
	3	4	1180	0.1324	34	256.43	1149	0.6696	0.0887	
	3	5	1180	0.1324	34	256.43	1149	0.4722	0.0624	
	4	1	1180	0.1321	34	257.02	1231	0.7608	0.1005	
	4	2	1180	0.1321	34	257.02	1231	1.2904	0.1705	
	4	3	1180	0.1321	34	257.02	1231	1.5120	0.1998	
	4	4	1180	0.1321	34	257.02	1231	0.3393	0.0448	
	4	5	1180	0.1321	34	257.02	1231	1.4838	0.1961	
	4	6	1180	0.1321	34	257.02	1231	0.3725	0.0492	
										<b>0.17104</b>

Taula 21: Valors de les amplades de fissures de biga S2 a càrrega de servei.



#### D.2.4. Biga reforçada S3

Les fissures mesurades de la biga S3 en l'instat de càrrega 30kN, en total, són 14, les qual estan mostrades en les figures 60, 61, 62 i 63 per cada càmera.

Càmera 1:

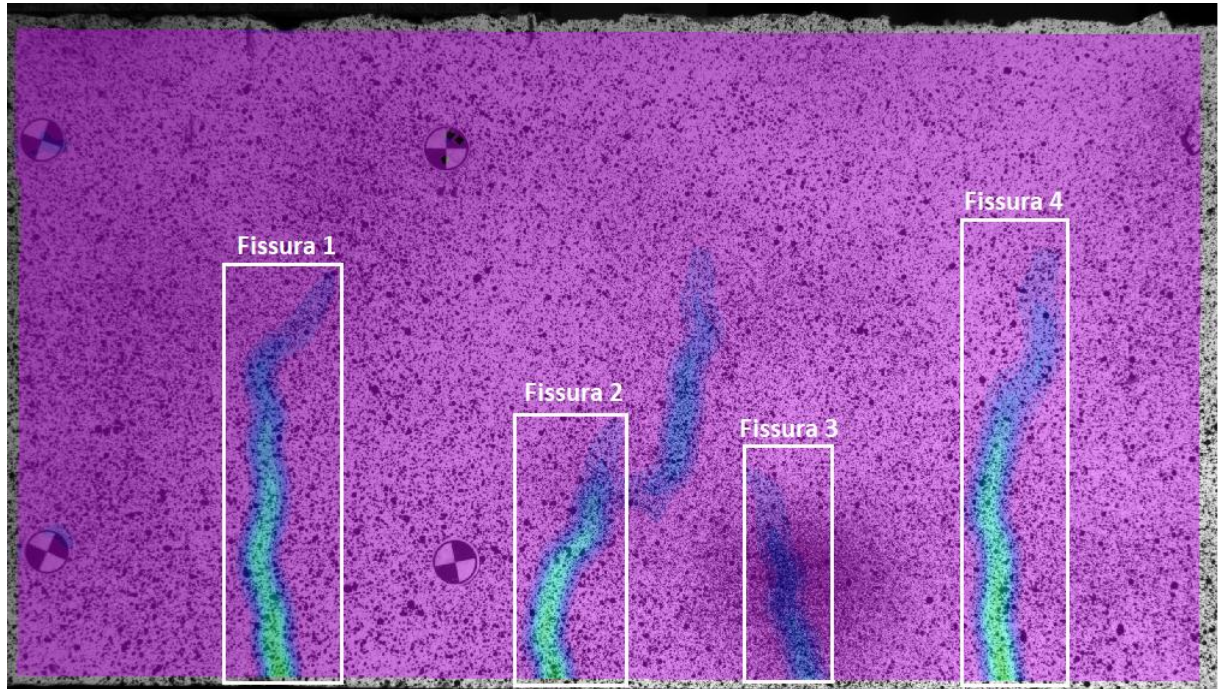


Figura 60: Nombre de fissures en la biga S3 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 1.

Càmera 2:

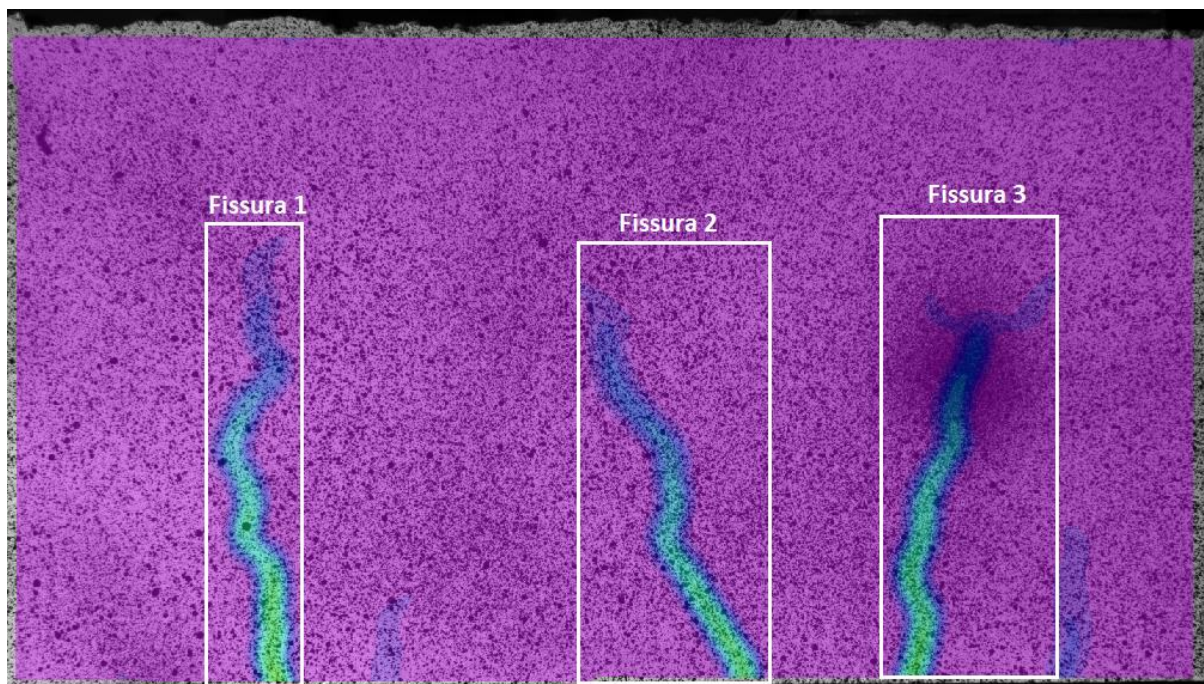


Figura 61: Nombre de fissures en la biga S3 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 2.

Càmera 3:

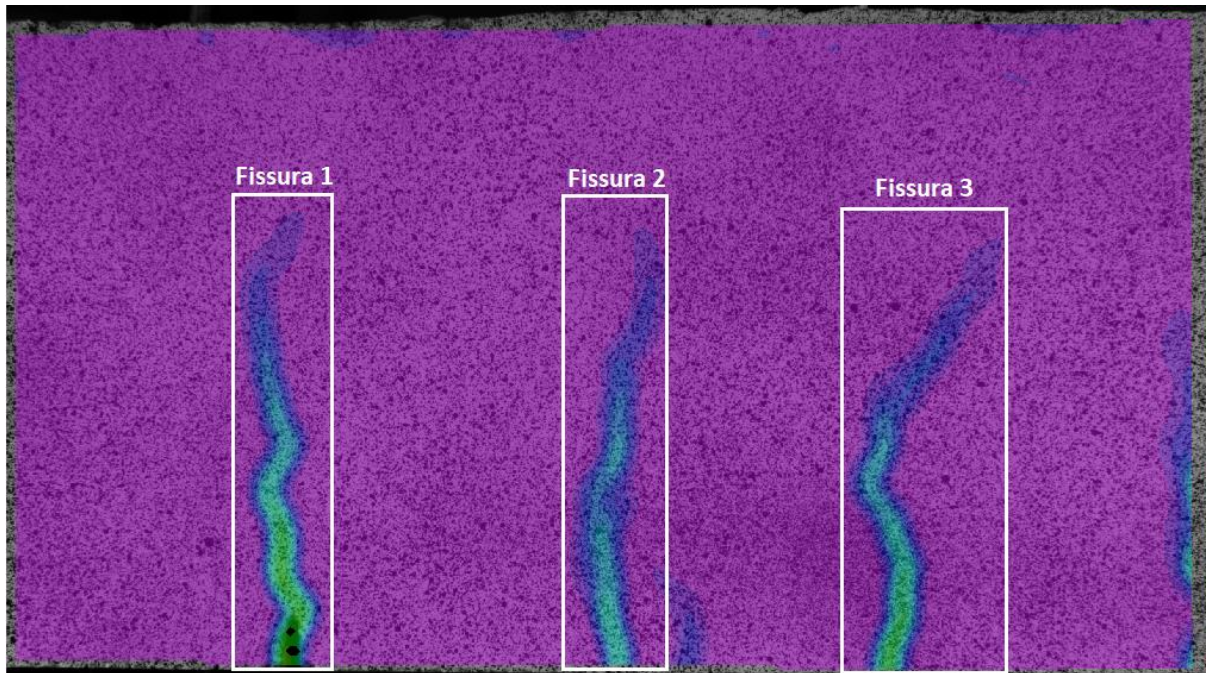


Figura 62: Nombre de fissures en la biga S3 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 3.

Càmera 4:

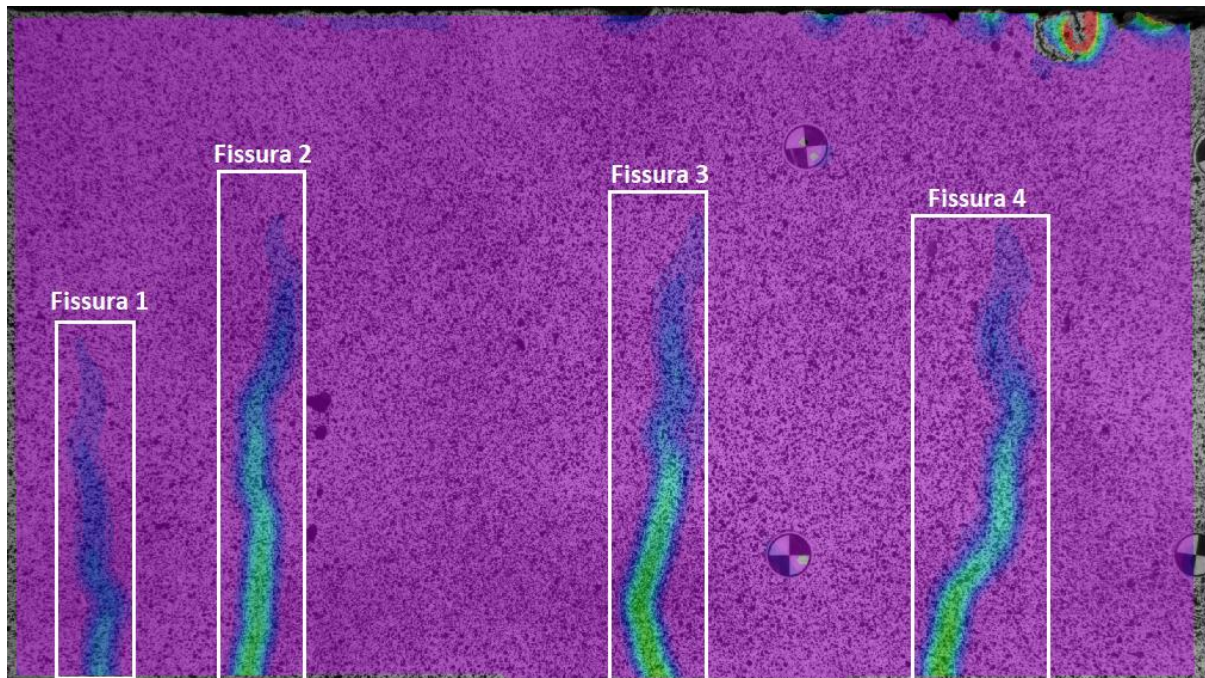


Figura 63: Nombre de fissures en la biga S3 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 4.

Tot seguit, s'adjunta la *Taula 22* on es mostren els resultats obtinguts de les amplades de fissures per les quatre càmeres DIC a l'instant de càrrega de 30kN.

Valors experimentals										
Biga	sys	Núm. fissura	Instant_1	mm/píxel	c (mm)	c (píxels)	y reforç (píxels)	w (píxels)_1	w (mm)_1	
S3	1	1	579	0.132208	33.9625	256.8869	1169	0.6938	0.091726	
	1	2	579	0.132208	33.9625	256.8869	1169	0.6469	0.085525	
	1	3	579	0.132208	33.9625	256.8869	1169	0.232	0.030672	
	1	4	579	0.132208	33.9625	256.8869	1169	0.7584	0.100267	
	2	1	579	0.132061	33.9625	257.1728	1162	0.8073	0.106732	
	2	2	579	0.132061	33.9625	257.1728	1162	0.6616	0.087469	
	2	3	579	0.132061	33.9625	257.1728	1162	0.7559	0.099936	
	3	1	579	0.132094	33.9625	257.1086	1147	0.9119	0.120426	
	3	2	579	0.132094	33.9625	257.1086	1147	0.5666	0.074826	
	3	3	579	0.132094	33.9625	257.1086	1147	0.6516	0.086072	
	4	1	579	0.131796	33.9625	257.6899	1217	0.3444	0.045493	
	4	2	579	0.131796	33.9625	257.6899	1217	0.7279	0.096151	
	4	3	579	0.131796	33.9625	257.6899	1217	0.8353	0.110338	
	4	4	579	0.131796	33.9625	257.6899	1217	0.7785	0.102603	
										<b>0.08845</b>

Taula 22: Valors de les amplades de fissures de biga S3 a càrrega de 30kN.

Les fissures mesurades de la biga S3 en l'instat de servei en total són 21, les qual estan mostrades en les figures 64, 65, 66 i 67 per cada càmera.

Càmera 1:

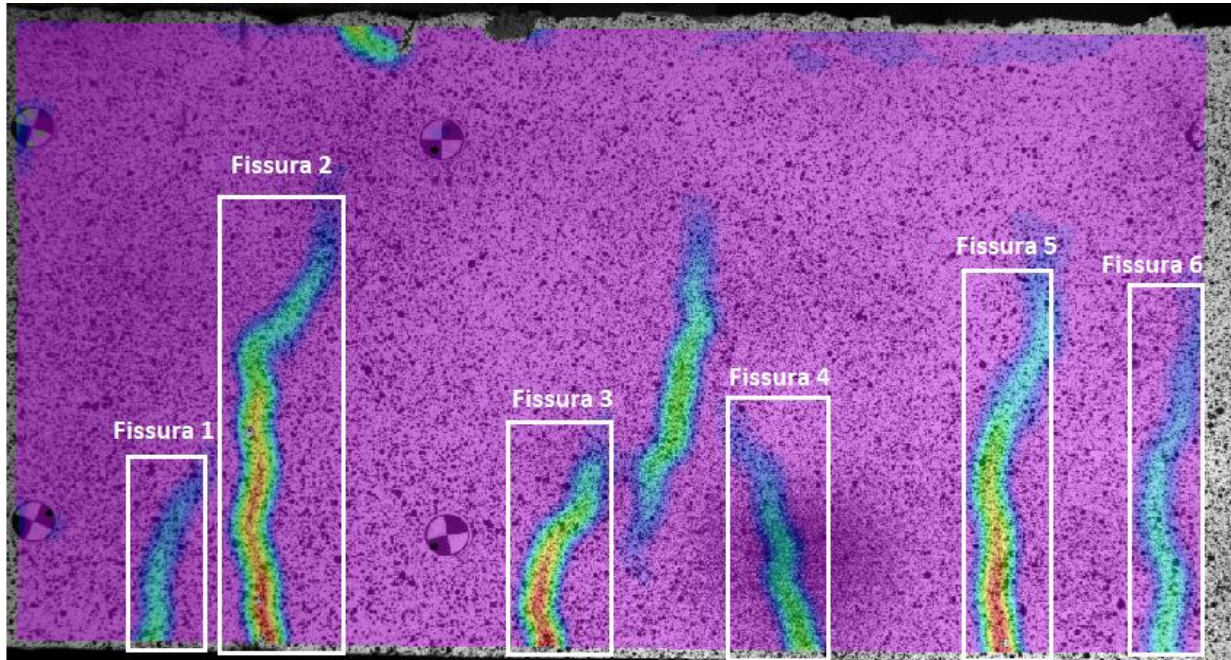


Figura 64: Nombre de fissures en la biga S3 per instant de servei capturades per càmera 1.

Càmera 2:

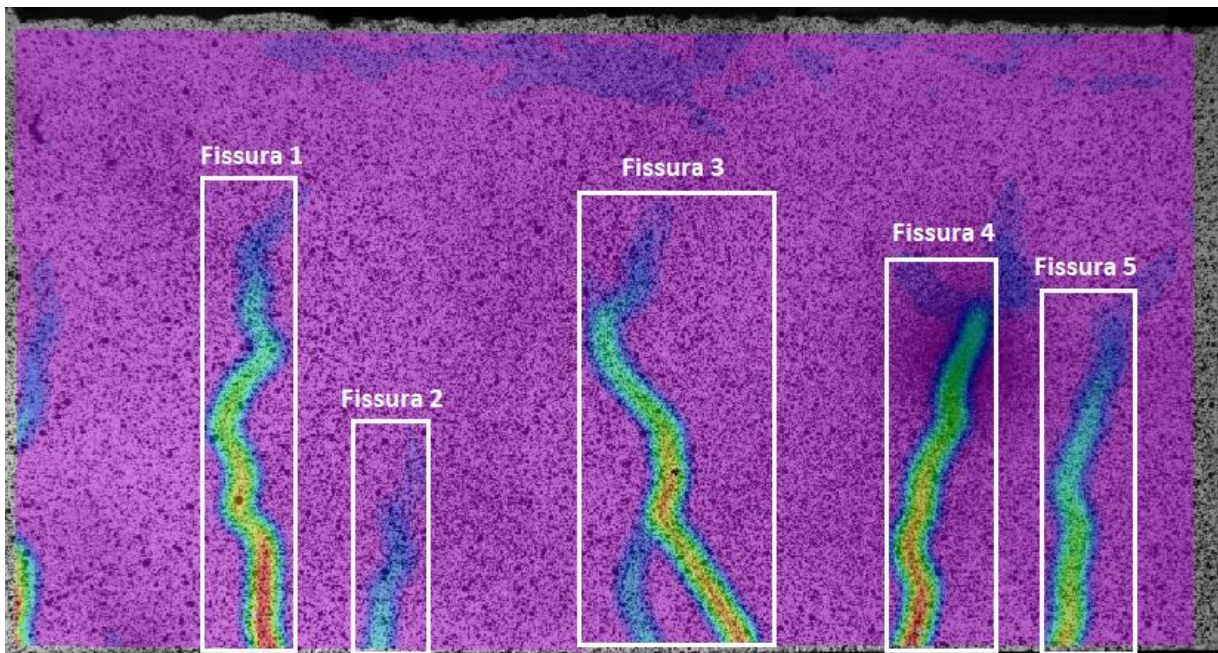


Figura 65: Nombre de fissures en la biga S3 per instant de servei capturades per càmera 2.

Càmera 3:

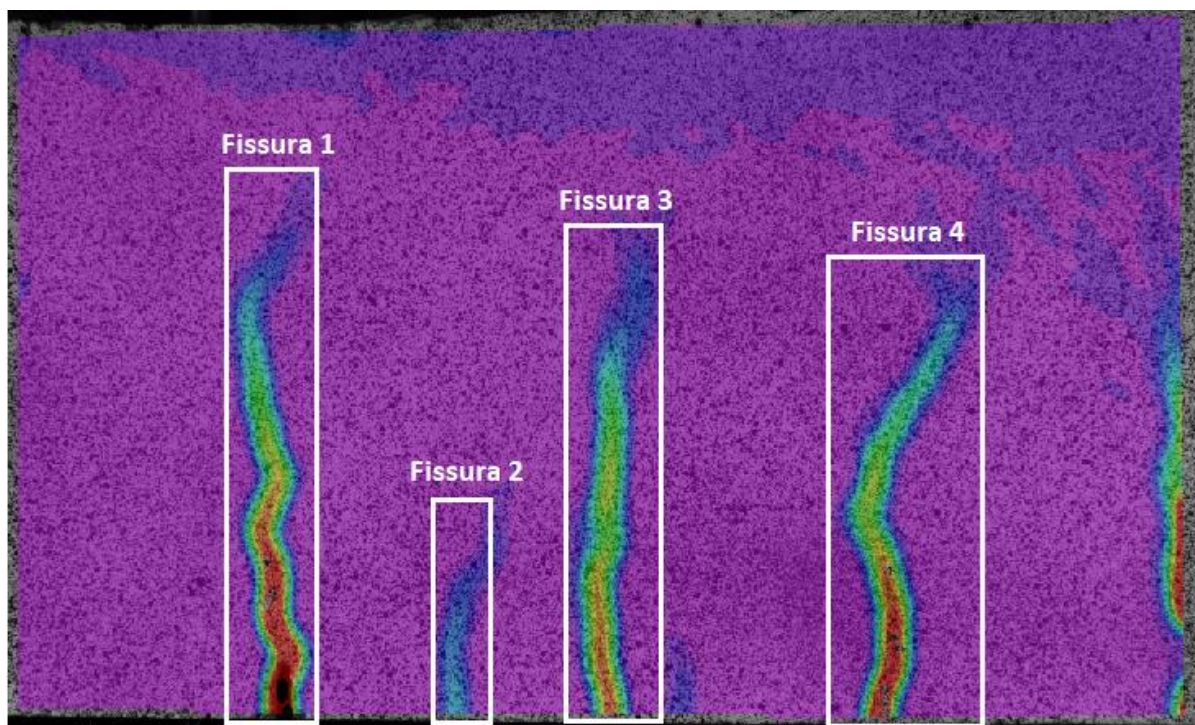


Figura 66: Nombre de fissures en la biga S3 per instant de servei capturades per càmera 3.

Càmera 4:

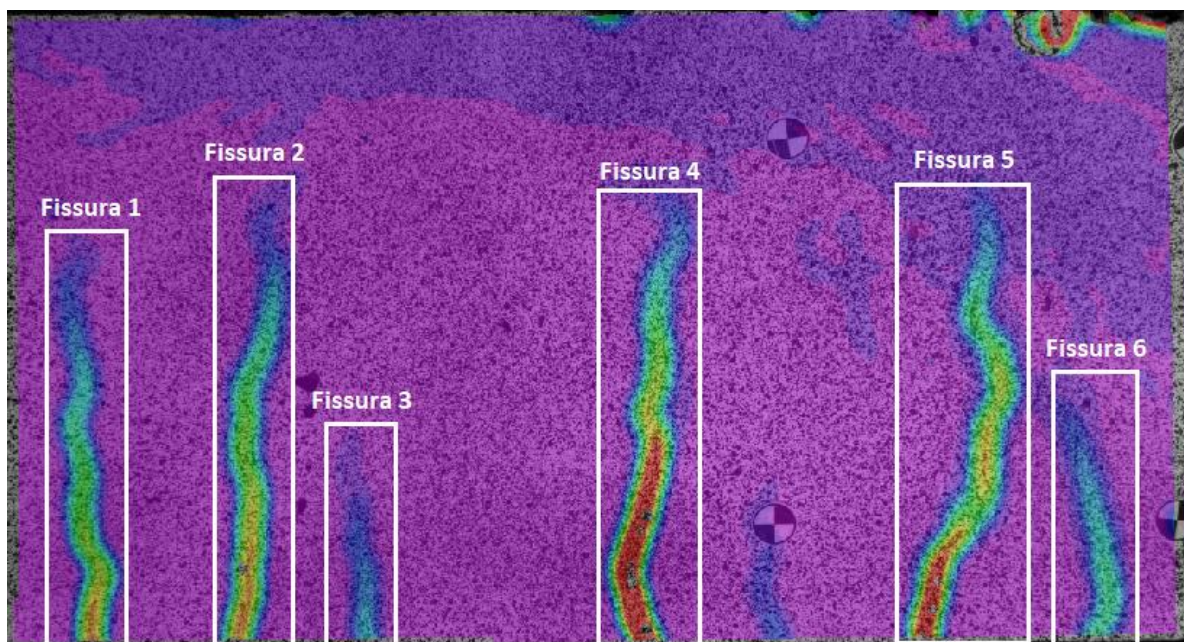


Figura 67: Nombre de fissures en la biga S3 per instant de servei capturades per càmera 4.

Tot seguit, s'adjunta la Taula 23 on es mostren els resultats obtinguts de les amplades de fissures per les quatre càmeres DIC a l'instant de càrrega de servei.

Valors experimentals										
Biga	sys	Núm. fissura	Instant_2	mm/píxel	c (mm)	c (píxels)	y reforç (píxels)	w (píxels)_2	w(mm)_2	
S3	1	1	1303	0.13221	34	256.887	1169	0.3615	0.0478	
	1	2	1303	0.13221	34	256.887	1169	1.4477	0.1914	
	1	3	1303	0.13221	34	256.887	1169	1.1215	0.1483	
	1	4	1303	0.13221	34	256.887	1169	0.6075	0.0803	
	1	5	1303	0.13221	34	256.887	1169	1.4668	0.1939	
	1	6	1303	0.13221	34	256.887	1169	0.6556	0.0867	
	2	1	1303	0.13206	34	257.173	1162	1.4889	0.1968	
	2	2	1303	0.13206	34	257.173	1162	0.3163	0.0418	
	2	3	1303	0.13206	34	257.173	1162	1.6026	0.2119	
	2	4	1303	0.13206	34	257.173	1162	1.4072	0.1860	
	2	5	1303	0.13206	34	257.173	1162	1.0256	0.1354	
	3	1	1303	0.13209	34	257.109	1147	1.9666	0.2597	
	3	2	1303	0.13209	34	257.109	1147	0.2533	0.0335	
	3	3	1303	0.13209	34	257.109	1147	1.4040	0.1854	
	3	4	1303	0.13209	34	257.109	1147	1.5600	0.2061	
	4	1	1303	0.13180	34	257.690	1217	1.1196	0.1479	
	4	2	1303	0.13180	34	257.690	1217	1.2707	0.1679	
	4	3	1303	0.13180	34	257.690	1217	0.2770	0.0366	
	4	4	1303	0.13180	34	257.690	1217	1.9893	0.2628	
	4	5	1303	0.13180	34	257.690	1217	1.5269	0.2012	
	4	6	1303	0.13180	34	257.690	1217	0.5917	0.0782	
										<b>0.14760</b>

Taula 23: Valors de les amplades de fissures de biga S3 a càrrega de servei.

### D.2.5. Biga reforçada S4

Les fissures mesurades de la biga S4 en l'instant de càrrega 30kN, en total, són 16, les qual estan mostrades en les figures 68, 69, 70 i 71 per cada càmera.

Càmera 1:

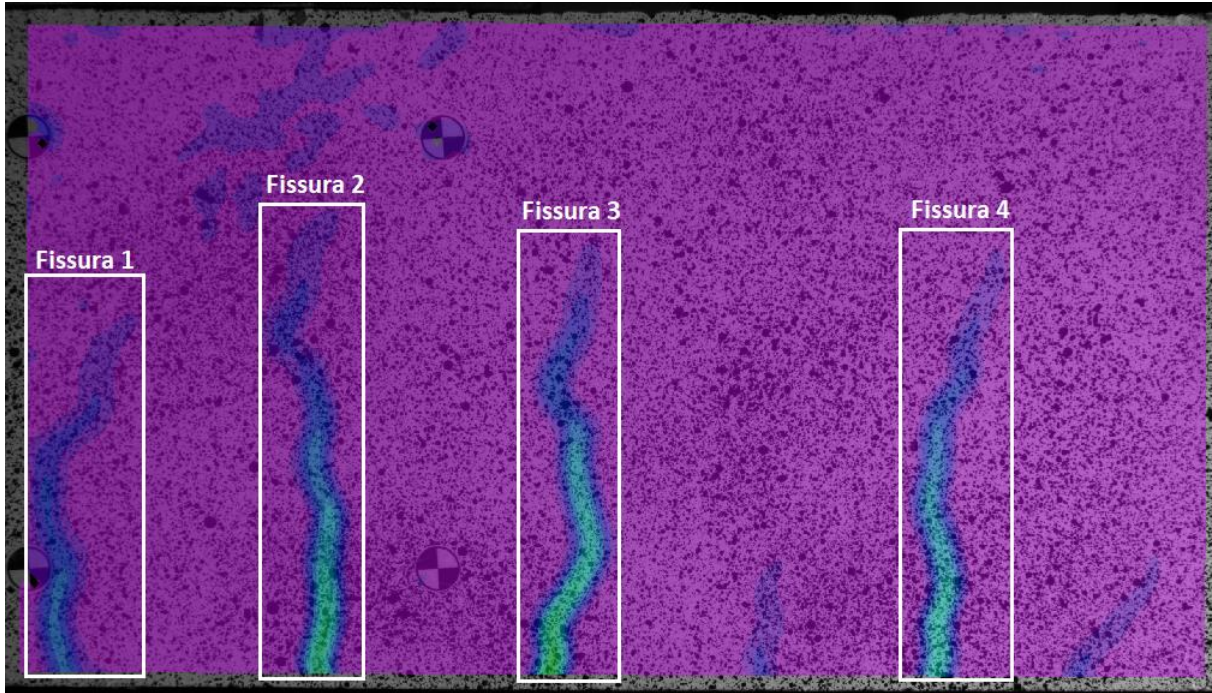


Figura 68: Nombre de fissures en la biga S4 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 1.

Càmera 2:

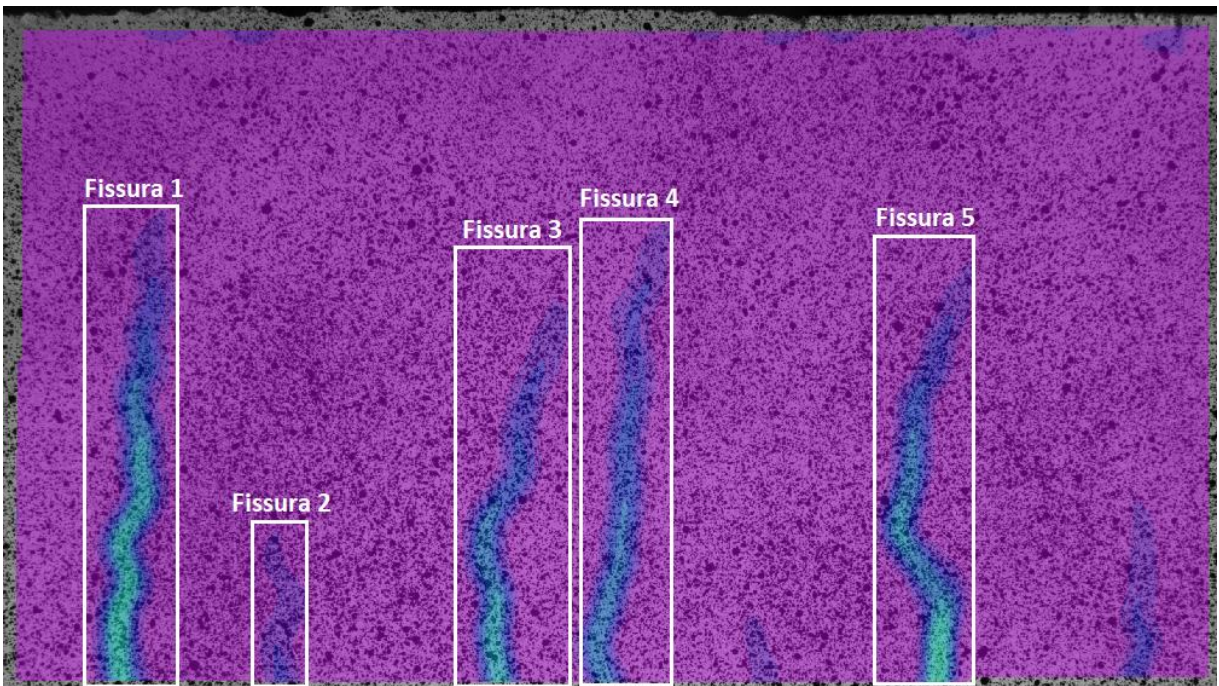


Figura 69: Nombre de fissures en la biga S4 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 2.

Càmera 3:

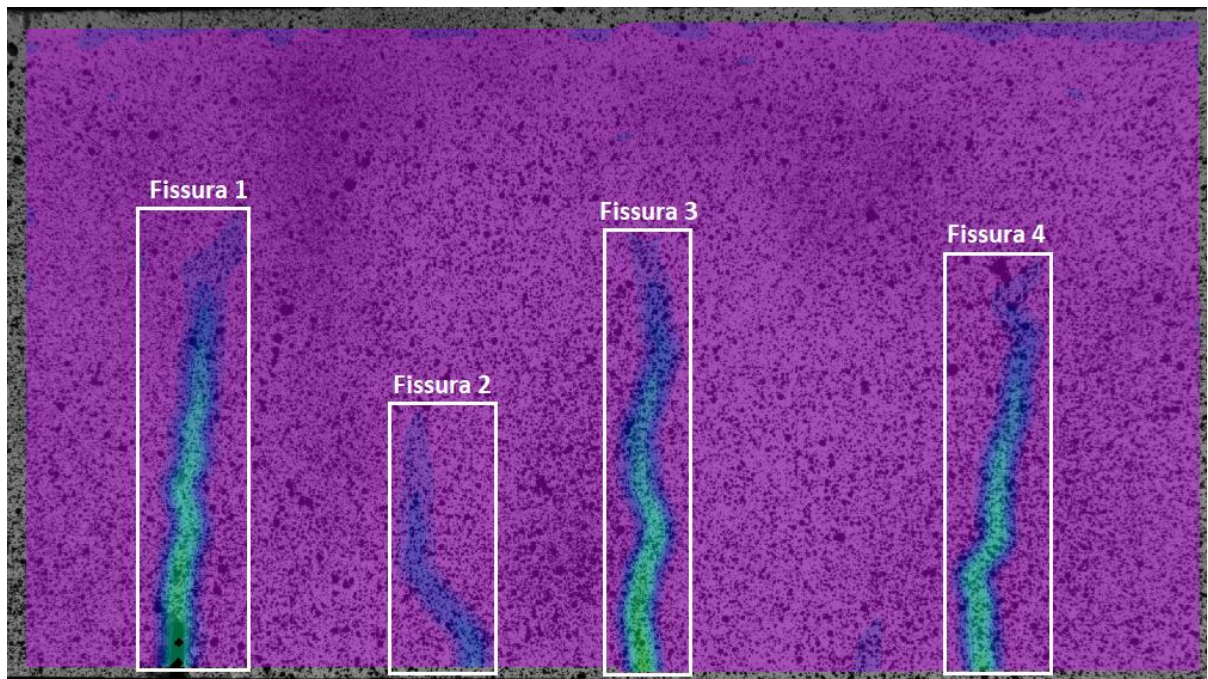


Figura 70: Nombre de fissures en la biga S4 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 3

Càmera 4:

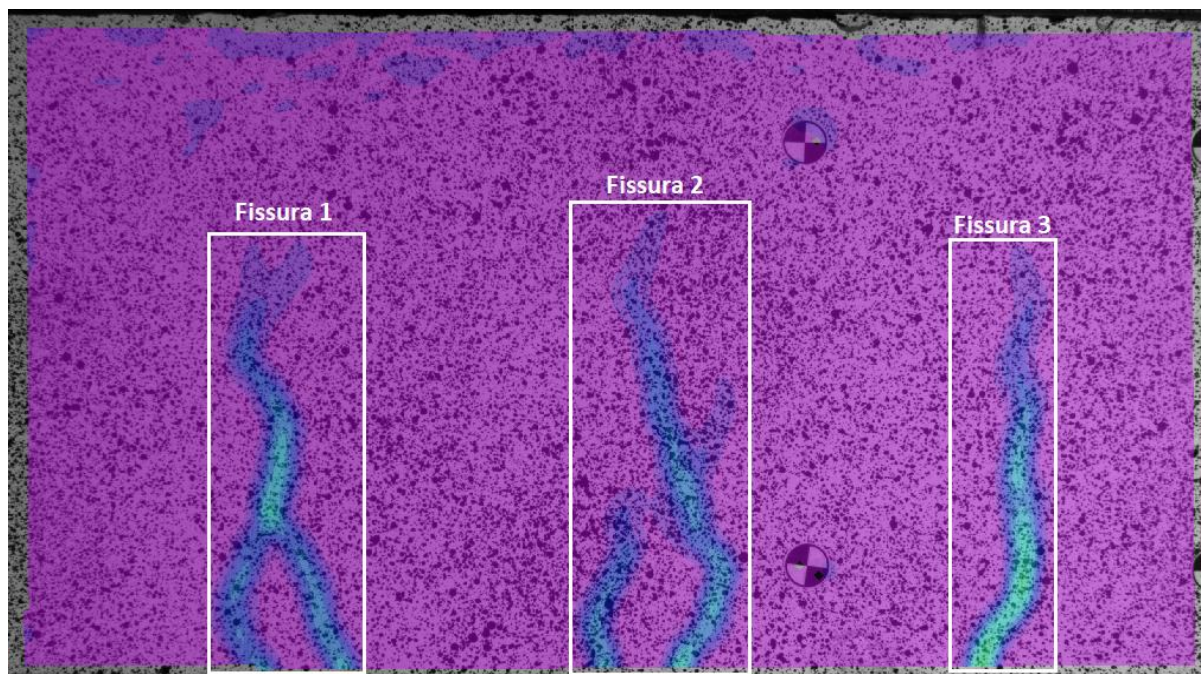


Figura 71: Nombre de fissures en la biga S4 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 4

Tot seguit, s'adjunta la *Taula 24* on es mostren els resultats obtinguts de les amplades de fissures per les quatre càrmeres DIC a l'instant de càrrega de 30kN.



Valors experimentals										
Biga	sys	Núm. fissura	Instant_1	mm/píxel	c (mm)	c (píxels)	y reforç (píxels)	w (píxels)_1	w (mm)_1	
S4	1	1	716	0.1307	34	259.27	1152	0.4008	0.0524	
	1	2	716	0.1307	34	259.27	1152	0.6417	0.0839	
	1	3	716	0.1307	34	259.27	1152	0.7224	0.0944	
	1	4	716	0.1307	34	259.27	1152	0.5921	0.0774	
	2	1	716	0.1307	34	259.39	1148	0.6701	0.0876	
	2	2	716	0.1307	34	259.39	1148	0.4678	0.0611	
	2	3	716	0.1307	34	259.39	1148	0.4263	0.0557	
	2	4	716	0.1307	34	259.39	1148	0.5924	0.0774	
	2	5	716	0.1307	34	259.39	1148	0.1313	0.0172	
	3	1	716	0.1311	34	258.53	1134	0.7548	0.0990	
	3	2	716	0.1311	34	258.53	1134	0.2465	0.0323	
	3	3	716	0.1311	34	258.53	1134	0.7286	0.0955	
	3	4	716	0.1311	34	258.53	1134	0.6809	0.0893	
	4	1	716	0.1312	34	258.37	1215	0.7631	0.1001	
	4	2	716	0.1312	34	258.37	1215	0.7548	0.0990	
	4	3	716	0.1312	34	258.37	1215	0.6784	0.0890	
										<b>0.07678</b>

Taula 24: Valors de les amplades de fissures de biga S4 a càrrega de 30kN

Les fissures mesurades de la biga S4 en l'instat de servei en total són 25, les qual estan mostrades en les figures 72, 73, 74 i 75 per cada càmera.

Càmera 1:

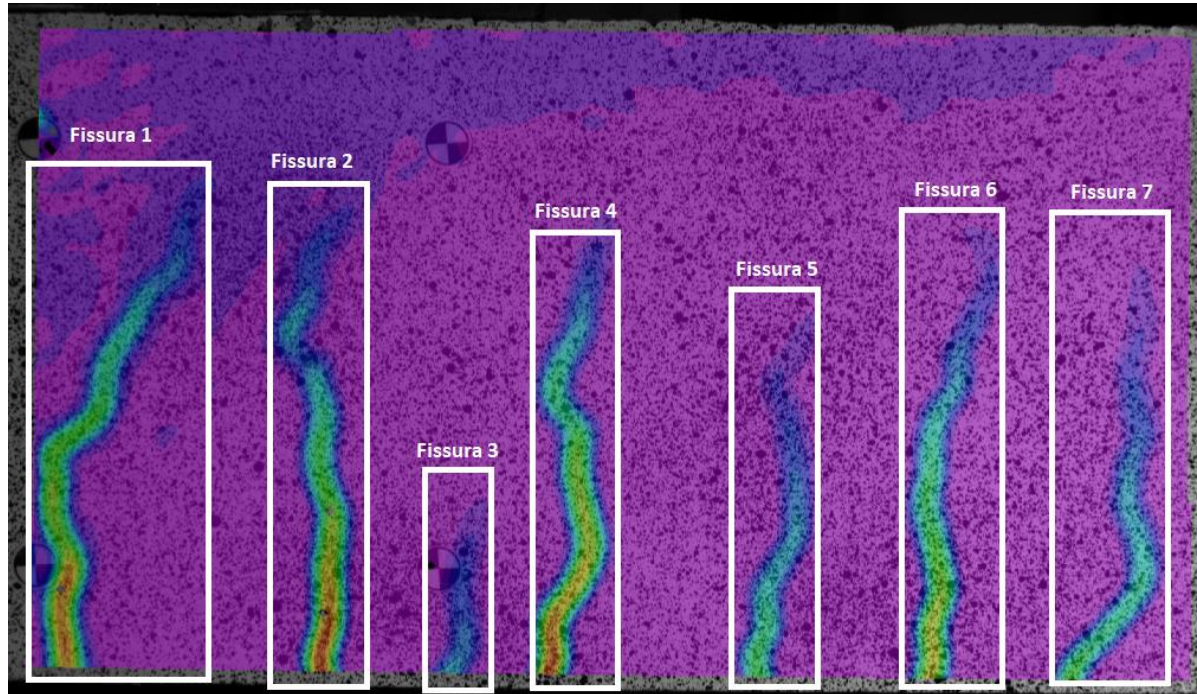


Figura 72: Nombre de fissures en la biga S4 per instant de servei capturades per càmera 1.

Càmera 2:

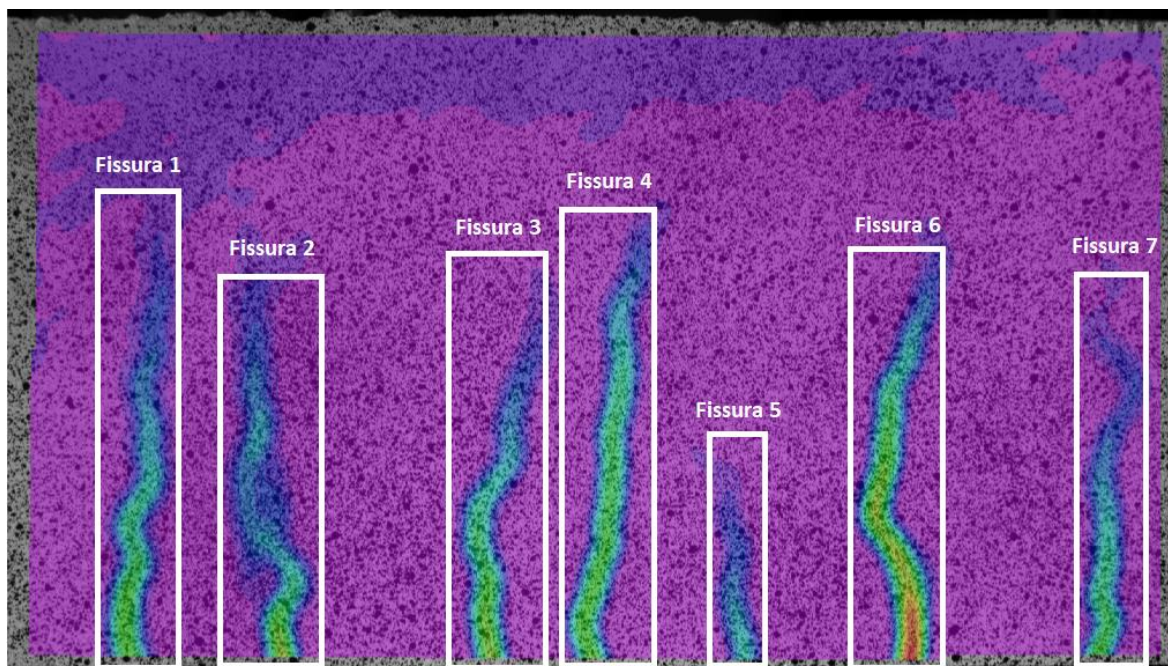


Figura 73: Nombre de fissures en la biga S4 per instant de servei capturades per càmera 2.

Càmera 3:

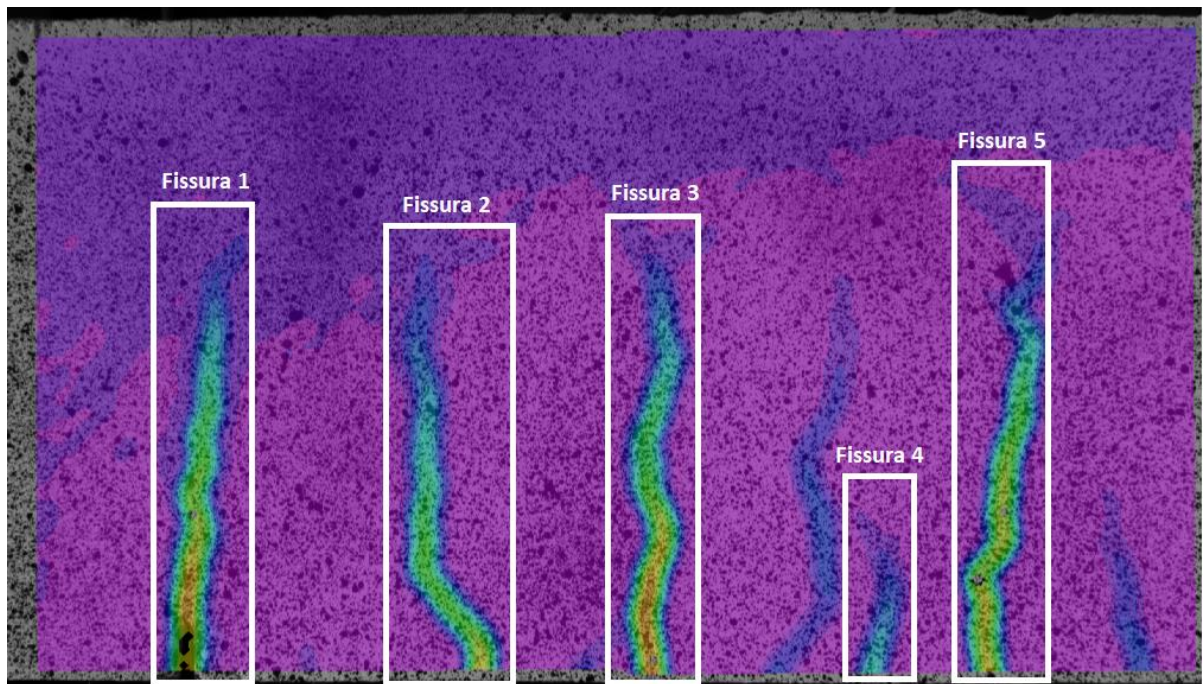


Figura 74: Nombre de fissures en la biga S4 per instant de servei capturades per càmera 3.

Càmera 4:

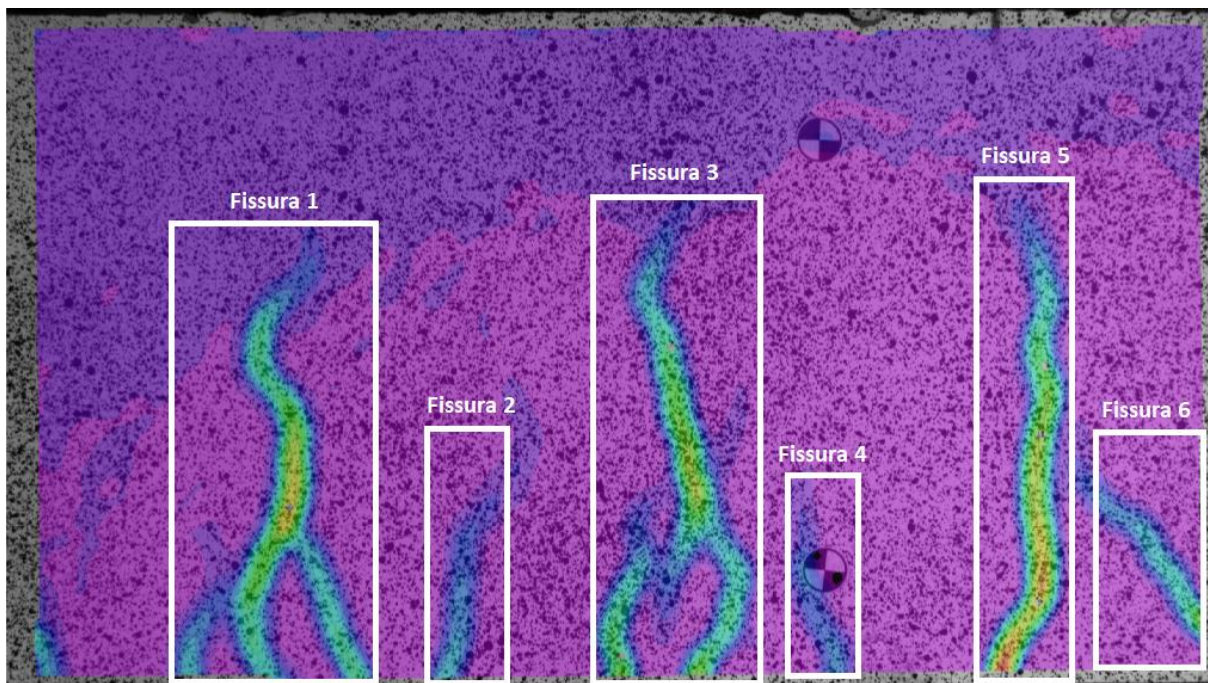


Figura 75: Nombre de fissures en la biga S4 per instant de servei capturades per càmera 4.

Tot seguit, s'adjunta la *Taula 25* on es mostren els resultats obtinguts de les amplades de fissures per les quatre càmeres DIC a l'instant de càrrega de servei.

Valors experimentals										
Biga	sys	Núm. fissura	Instant_2	mm/píxel	c (mm)	c (píxels)	y reforç (píxels)	w (píxels)_2	w(mm)_2	
S4	1	1	1456	0.13073	34	259.27	1152	1.3589	0.1776	
	1	2	1456	0.13073	34	259.27	1152	1.3023	0.1702	
	1	3	1456	0.13073	34	259.27	1152	0.2436	0.0318	
	1	4	1456	0.13073	34	259.27	1152	1.3208	0.1727	
	1	5	1456	0.13073	34	259.27	1152	0.6308	0.0825	
	1	6	1456	0.13073	34	259.27	1152	1.0282	0.1344	
	1	7	1456	0.13073	34	259.27	1152	0.6741	0.0881	
	2	1	1456	0.13067	34	259.39	1148	0.8596	0.1123	
	2	2	1456	0.13067	34	259.39	1148	0.8631	0.1128	
	2	3	1456	0.13067	34	259.39	1148	0.8810	0.1151	
	2	4	1456	0.13067	34	259.39	1148	0.9258	0.1210	
	2	5	1456	0.13067	34	259.39	1148	0.3413	0.0446	
	2	6	1456	0.13067	34	259.39	1148	1.2945	0.1691	
	2	7	1456	0.13067	34	259.39	1148	0.6962	0.0910	
	3	1	1456	0.13110	34	258.53	1134	1.3565	0.1778	
	3	2	1456	0.13110	34	258.53	1134	1.0094	0.1323	
	3	3	1456	0.13110	34	258.53	1134	1.3285	0.1742	
	3	4	1456	0.13110	34	258.53	1134	0.1659	0.0217	
	3	5	1456	0.13110	34	258.53	1134	1.2840	0.1683	
	4	1	1456	0.13118	34	258.37	1215	1.7040	0.2235	
	4	2	1456	0.13118	34	258.37	1214	0.2729	0.0358	
	4	3	1456	0.13118	34	258.37	1215	1.5385	0.2018	
	4	4	1456	0.13118	34	258.37	1216	0.3043	0.0399	
	4	5	1456	0.13118	34	258.37	1215	1.3058	0.1713	
	4	6	1456	0.13118	34	258.37	1215	0.5048	0.0662	
										<b>0.11689</b>

Taula 25: Valors de les amplades de fissures de biga S4 a càrrega de servei.

### D.2.6. Biga reforçada S5

Les fissures mesurades de la biga S5 en l'instant de càrrega de 30kN són 14, les qual estan mostrades en les figues 76, 77, 78 i 79 per cada càmera.

Càmera 1:

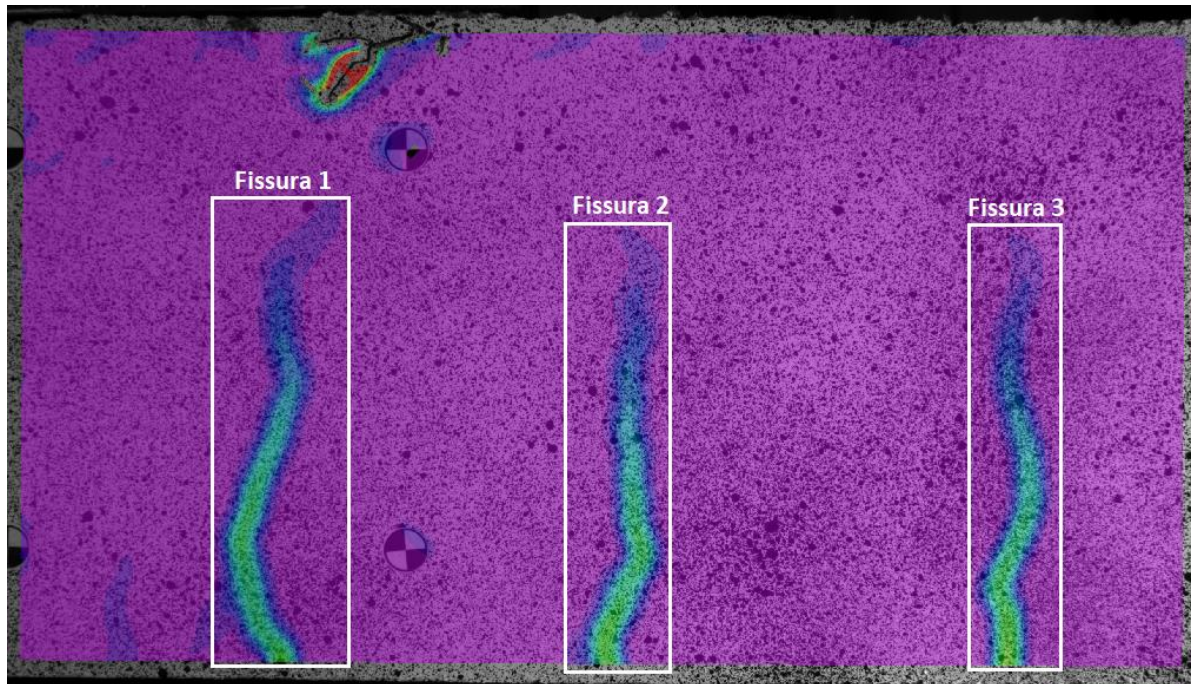


Figura 76: Nombre de fissures en la biga S5 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 1.

Càmera 2:

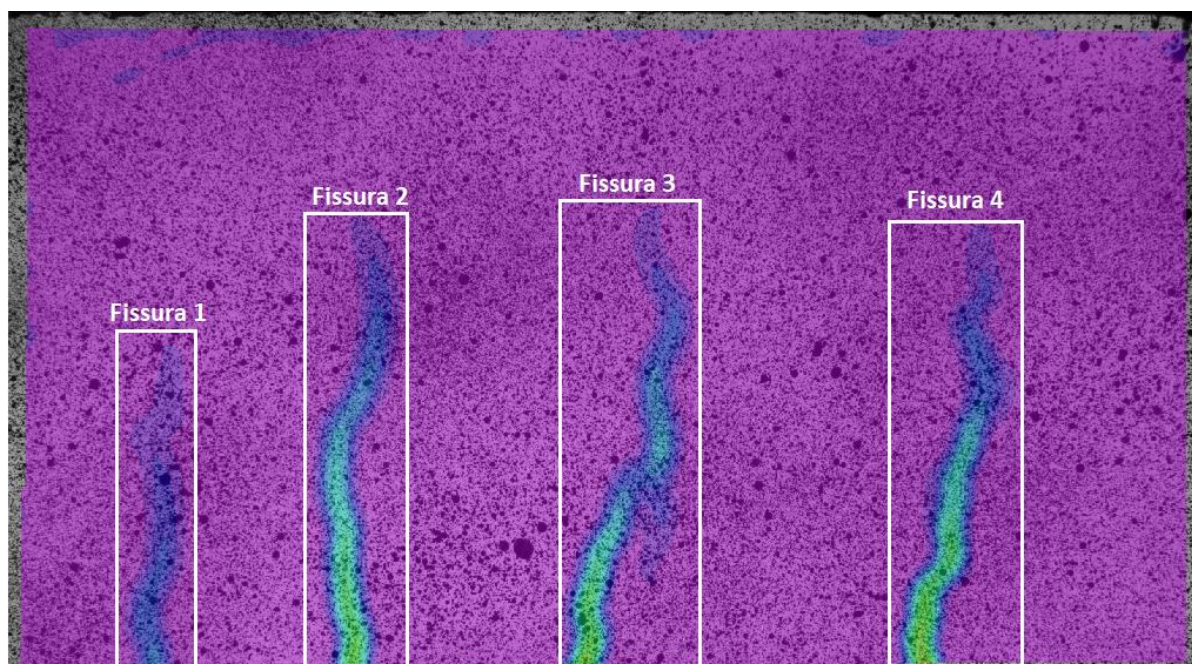


Figura 77: Nombre de fissures en la biga S5 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 2.

Càmera 3:

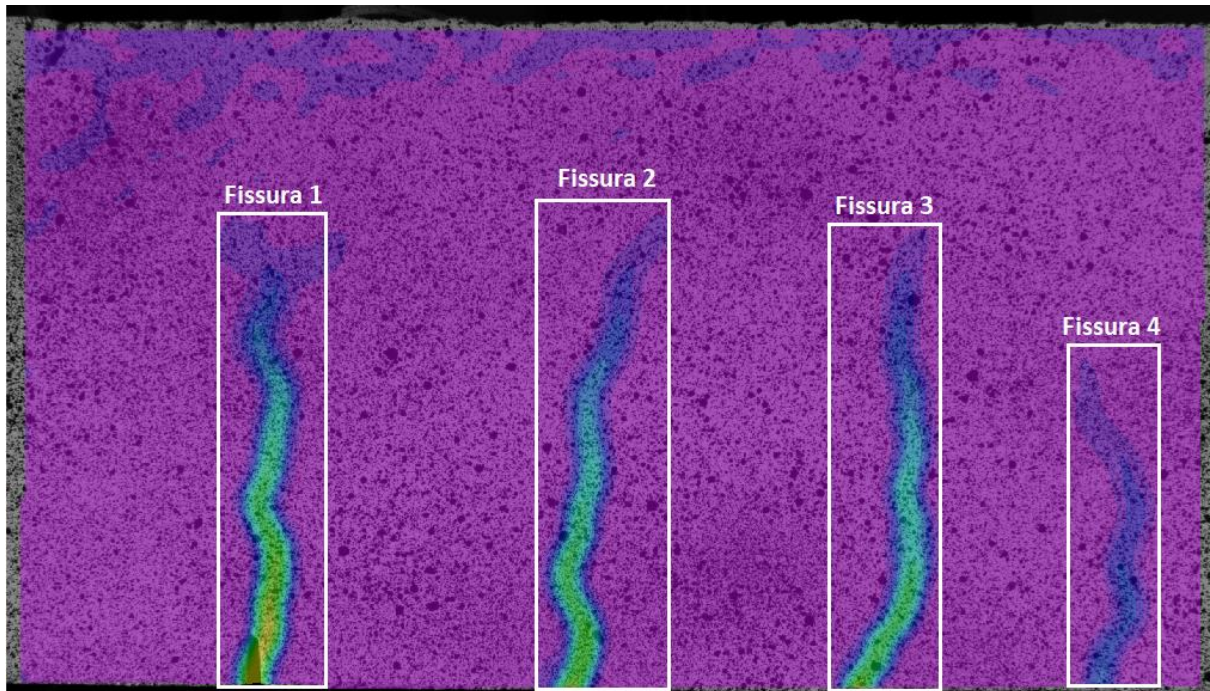


Figura 78: Nombre de fissures en la biga S5 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 3.

Càmera 4:

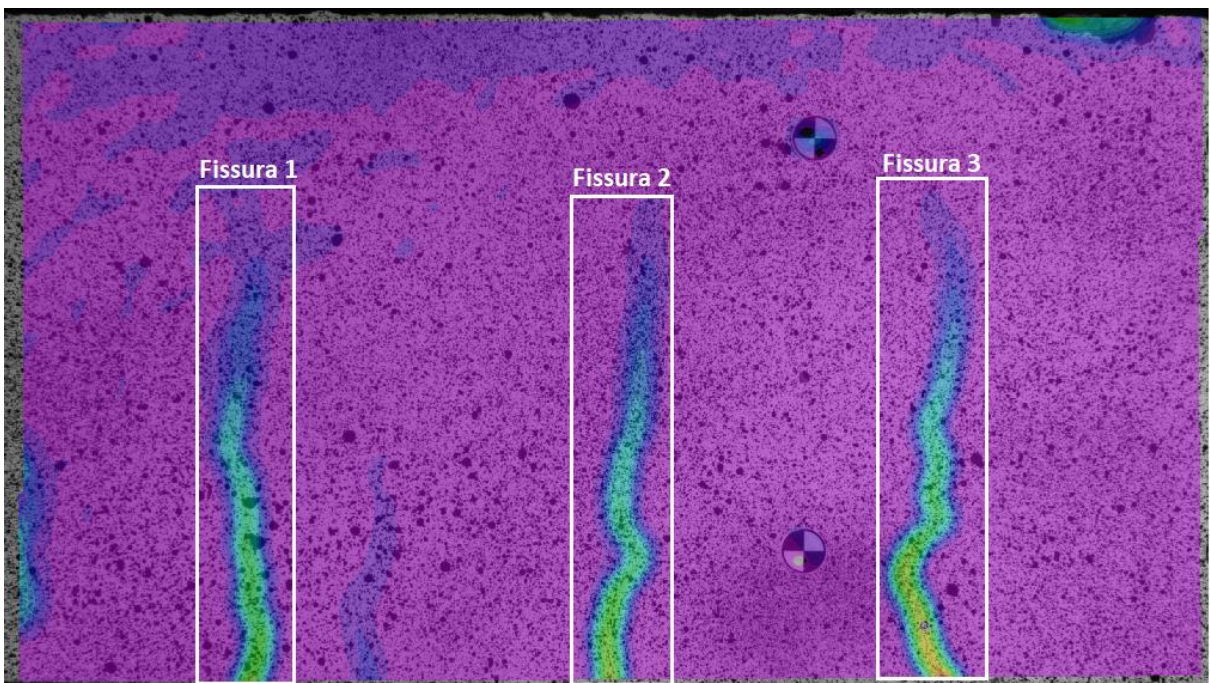


Figura 79 : Nombre de fissures en la biga S5 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 4.

Tot seguit, s'adjunta la *Taula 26* on es mostren els resultats obtinguts de les amplades de fissures per les quatre càmeres a l'instant de càrrega de 30kN.

Valors experimentals										
Biga	sys	Núm. fissura	Instant_1	mm/píxel	c (mm)	c (píxels)	y reforç (píxels)	w (píxels)_1	w (mm)_1	
S5	1	1	959	0.1312	34	260.05	1156	0.9386	0.1231	
	1	2	959	0.1312	34	260.05	1156	0.8765	0.1150	
	1	3	959	0.1312	34	260.05	1156	0.8286	0.1087	
	2	1	959	0.1309	34	260.62	1153	0.2808	0.0368	
	2	2	959	0.1309	34	260.62	1153	0.7849	0.1028	
	2	3	959	0.1309	34	260.62	1153	0.6628	0.0868	
	2	4	959	0.1309	34	260.62	1153	0.8807	0.1153	
	3	1	959	0.1310	34	260.53	1139	1.1072	0.1450	
	3	2	959	0.1310	34	260.53	1139	0.8568	0.1122	
	3	3	959	0.1310	34	260.53	1139	0.7889	0.1033	
	3	4	959	0.1310	34	260.53	1139	0.2486	0.0326	
	4	1	959	0.1308	34	260.81	1223	0.8976	0.1174	
	4	2	959	0.1308	34	260.81	1223	0.8512	0.1114	
	4	3	959	0.1308	34	260.81	1223	1.0612	0.1388	
										<b>0.10351</b>

Taula 26: Valors de les amplades de fissures de biga S5 a càrrega de 30kN.

Les fissures mesurades de la biga S5 en l'instat de servei en total són 18, les qual estan mostrades en les figures 80, 81, 82 i 83 per cada càmera.

Càmera 1:

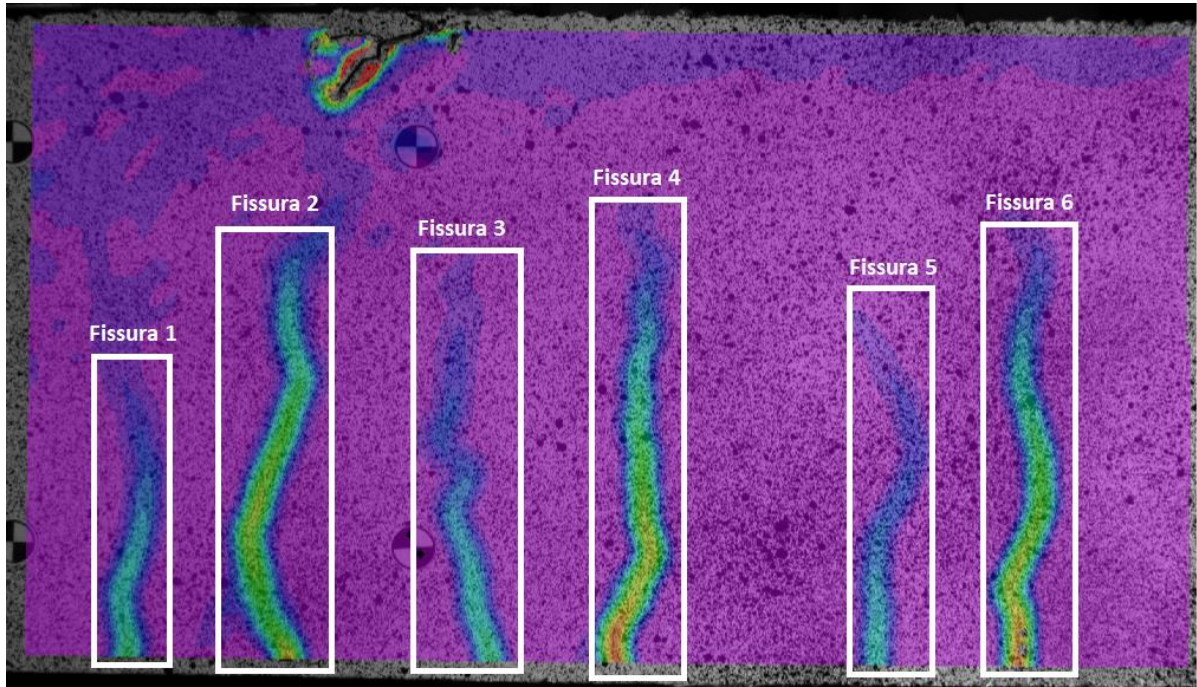


Figura 80: Nombre de fissures en la biga S5 per instant de servei capturades per càmera 1.

Càmera 2:

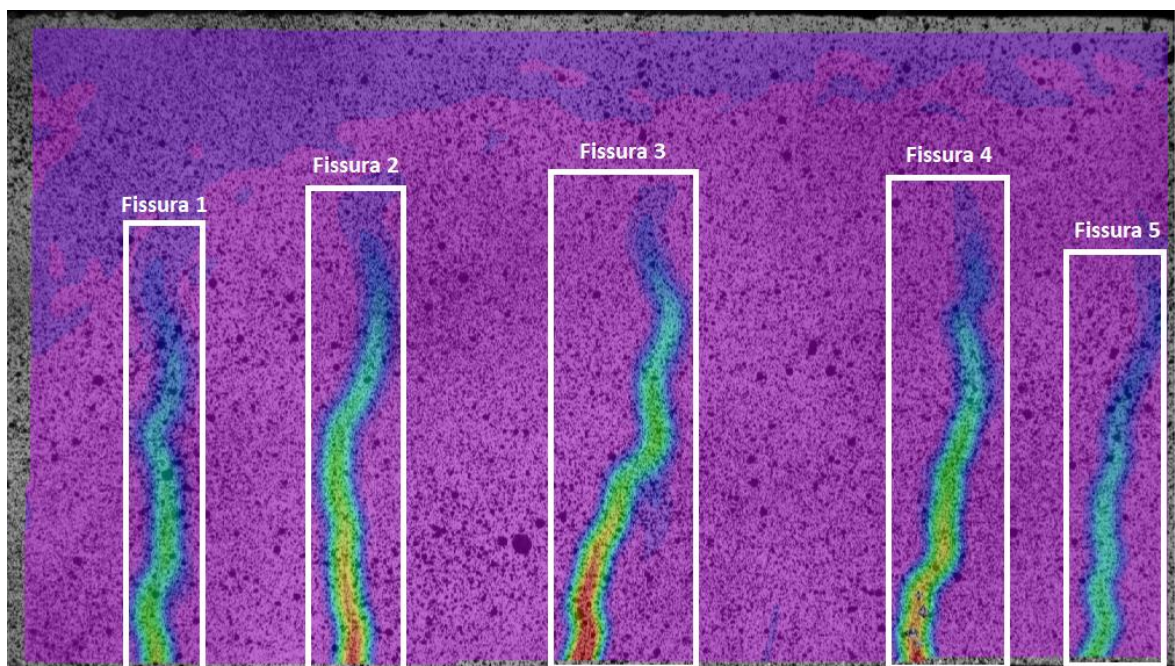


Figura 81: Nombre de fissures en la biga S5 per instant de servei capturades per càmera 2.



Càmera 3:

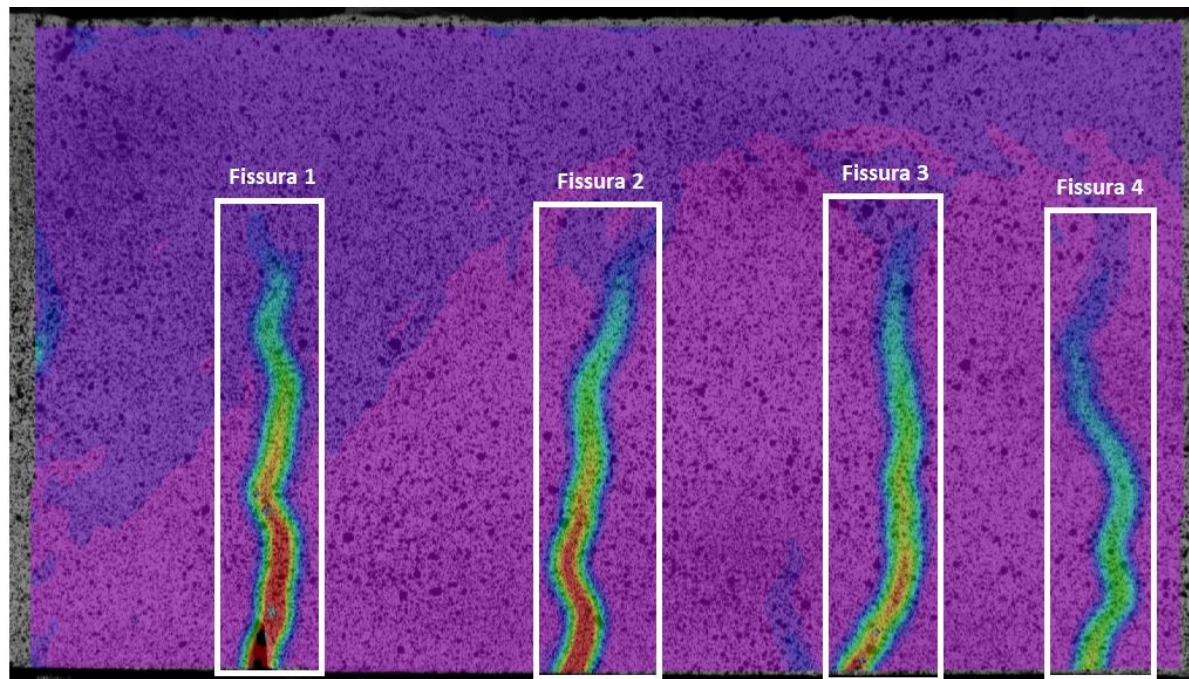


Figura 82: Nombre de fissures en la biga S5 per instant de servei capturades per càmera 3.

Càmera 4:

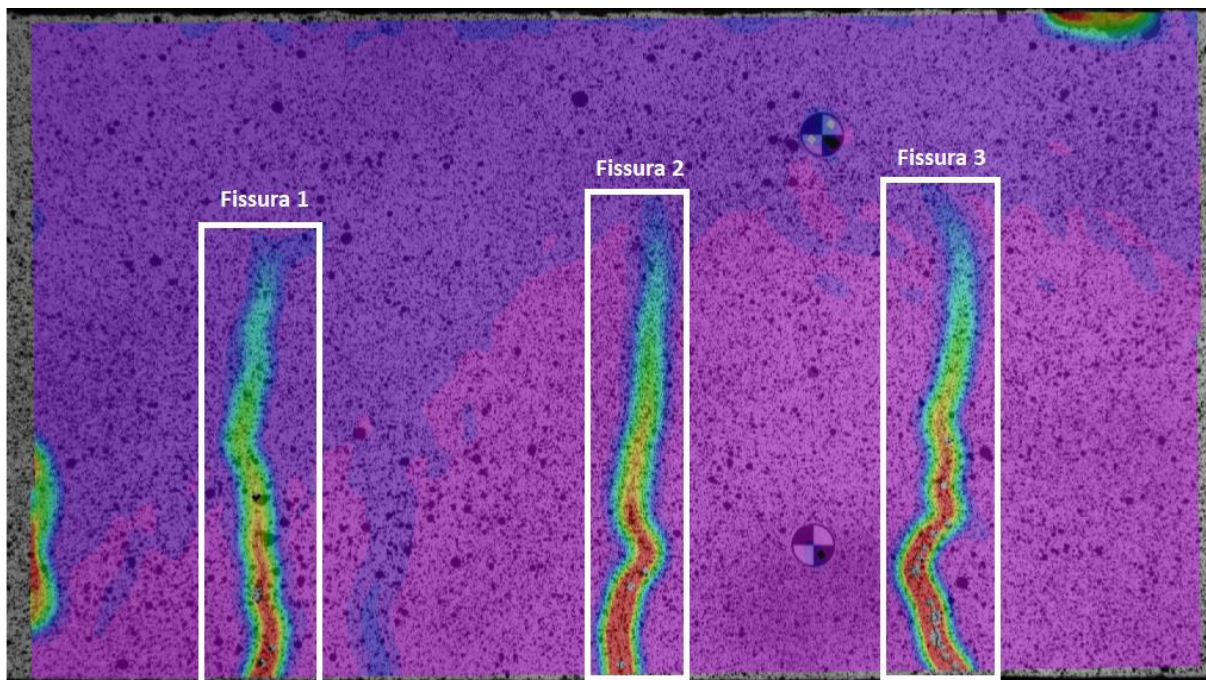


Figura 83: Nombre de fissures en la biga S5 per instant de servei capturades per càmera 4.

Tot seguit, s'adjunta la Taula 27 on es mostren els resultats obtinguts de les amplades de fissures per les quatre càmeres DIC a l'instant de càrrega de servei.

Valors experimentals										
Biga	sys	Núm. fissura	Instant_2	mm/píxel	c (mm)	c (píxels)	y reforç (píxels)	w (píxels)_2	w(mm)_2	
S5	1	1	1509	0.1312	34	260.05	1156	0.6028	0.0791	
	1	2	1509	0.1312	34	260.05	1156	1.2826	0.1683	
	1	3	1509	0.1312	34	260.05	1156	0.5984	0.0785	
	1	4	1509	0.1312	34	260.05	1156	1.3071	0.1715	
	1	5	1509	0.1312	34	260.05	1156	0.4463	0.0586	
	1	6	1509	0.1312	34	260.05	1156	1.1582	0.1520	
	2	1	1509	0.1309	34	260.62	1153	0.8762	0.1147	
	2	2	1509	0.1309	34	260.62	1153	1.2697	0.1662	
	2	3	1509	0.1309	34	260.62	1153	1.3552	0.1774	
	2	4	1509	0.1309	34	260.62	1153	1.2969	0.1698	
	2	5	1509	0.1309	34	260.62	1153	0.6567	0.0860	
	3	1	1509	0.1310	34	260.53	1139	1.8564	0.2431	
	3	2	1509	0.1310	34	260.53	1139	1.6080	0.2106	
	3	3	1509	0.1310	34	260.53	1139	1.3805	0.1808	
	3	4	1509	0.1310	34	260.53	1139	0.8915	0.1168	
	4	1	1509	0.1308	34	260.81	1223	1.5930	0.2084	
	4	2	1509	0.1308	34	260.81	1223	1.8352	0.2401	
	4	3	1509	0.1308	34	260.81	1223	2.0790	0.2720	
										<b>0.16076</b>

Taula 27: Valors de les amplades de fissures de biga S5 a càrrega de servei.

### D.2.7. Biga reforçada S6

Les fissures mesurades de la biga S6 en l'instant de càrrega de 30kN són 12, les qual estan mostrades en les figures 84, 85, 86 i 87 per cada càmera.

Càmera 1:

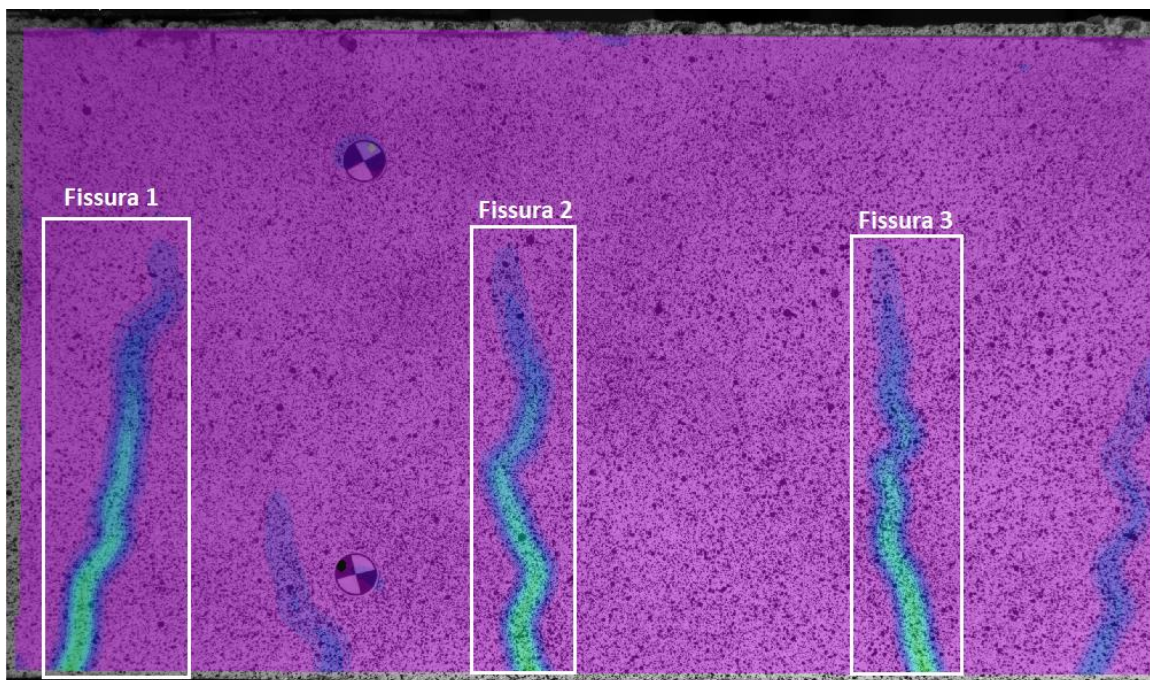


Figura 84: Nombre de fissures en la biga S6 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 1.

Càmera 2:

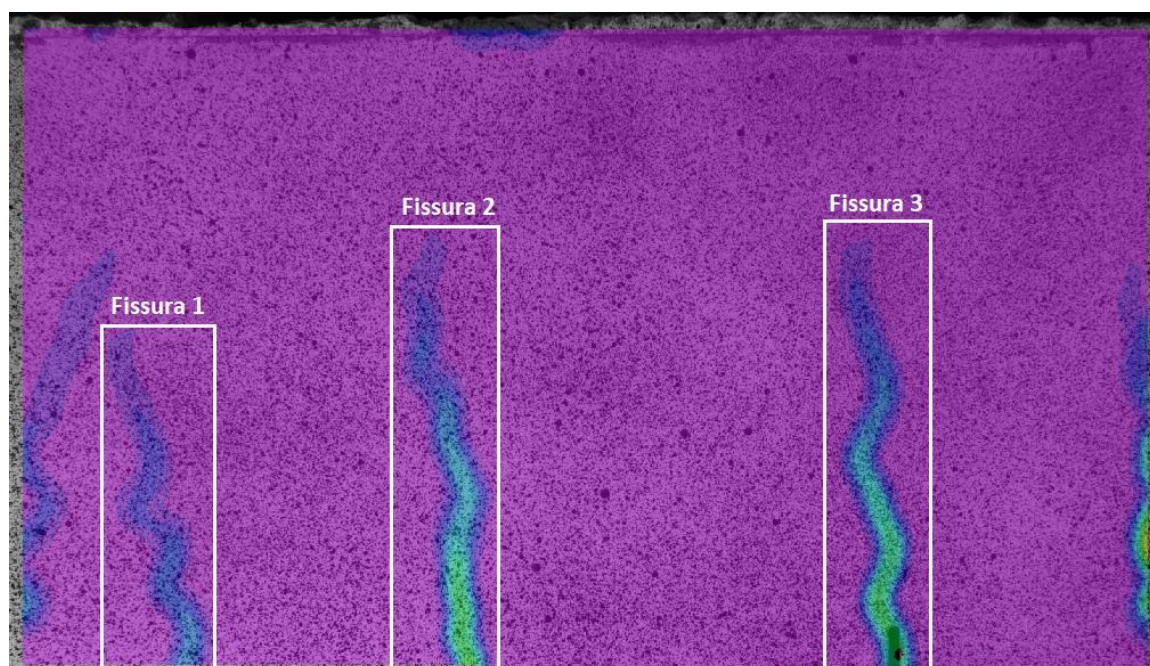


Figura 85: Nombre de fissures en la biga S6 per la càrrega de 30kN capturades per camera 2.

Càmera 3:

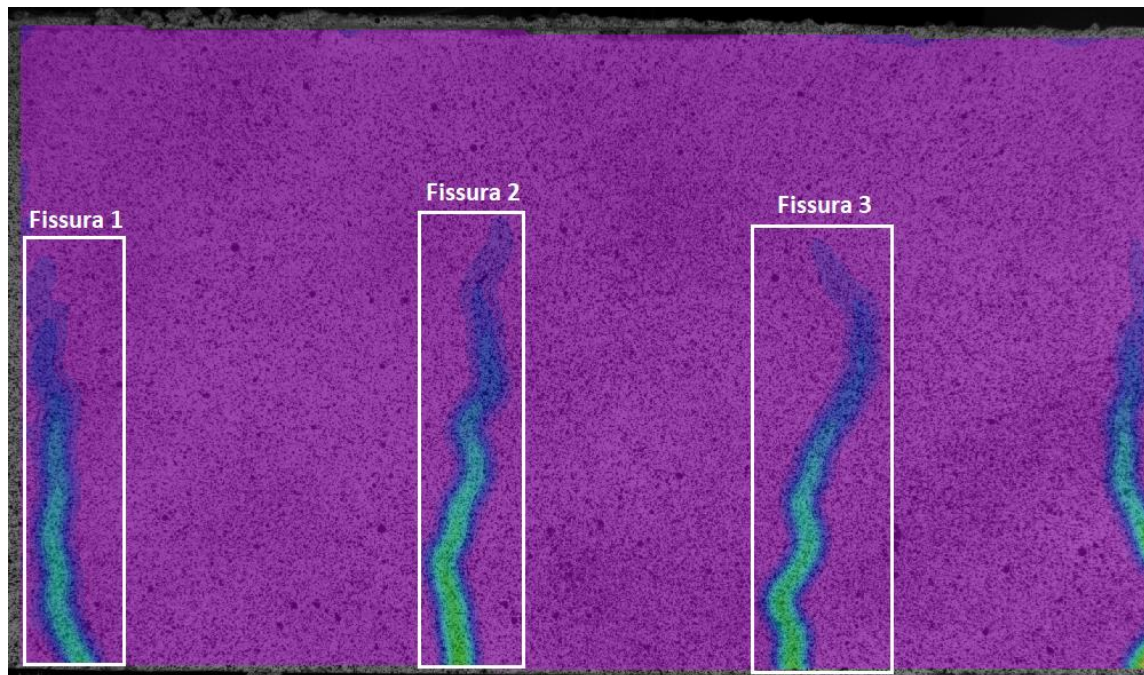


Figura 86: Nombre de fissures en la biga S6 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 3.

Càmera 4:

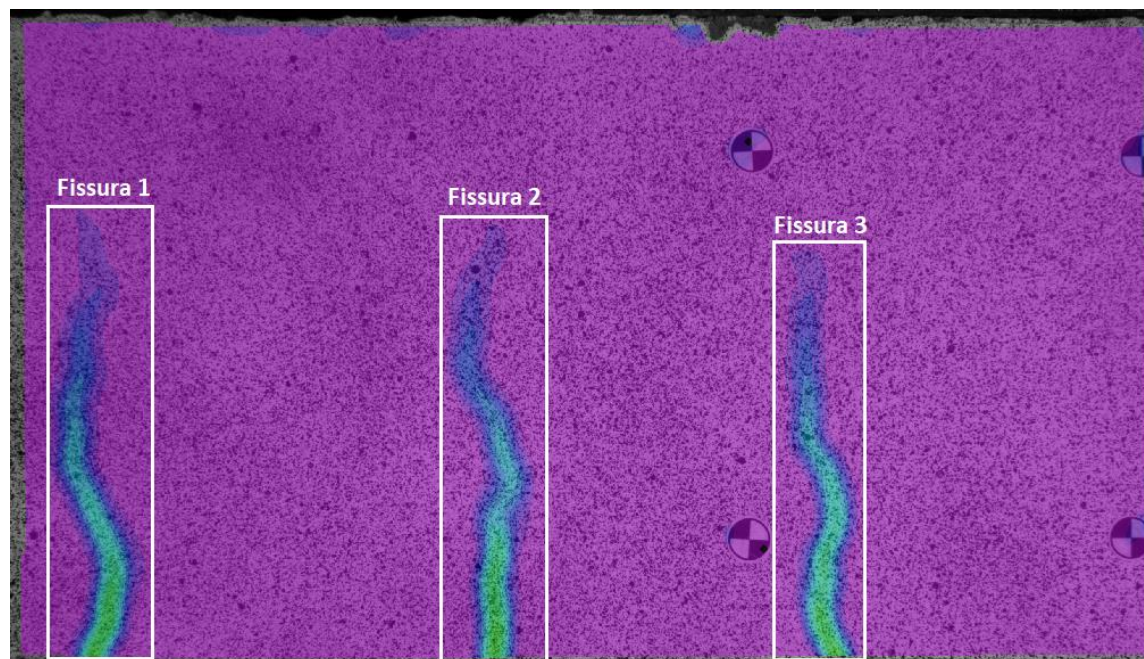


Figura 87: Nombre de fissures en la biga S6 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 4.

Tot seguit, s'adjunta la *Taula 28* on es mostren els resultats obtinguts de les amplades de fissures per les quatre càmeres DIC a l'instant de càrrega de 30kN.

Valors experimentals										
Biga	sys	Núm. fissura	Instant_1	mm/píxel	c (mm)	c (píxels)	y reforç (píxels)	w (píxels)_1	w (mm)_1	
S6	1	1	537	0.1309	33	254.690	1174	0.6903	0.0904	
	1	2	537	0.1309	33	254.690	1174	0.7228	0.0946	
	1	3	537	0.1309	33	254.690	1174	0.6688	0.0876	
	2	1	537	0.1310	33	254.509	1170	0.3306	0.0433	
	2	2	537	0.1310	33	254.509	1170	0.7833	0.1026	
	2	3	537	0.1310	33	254.509	1170	0.7940	0.1040	
	3	1	537	0.1313	33	254.044	1162	0.6432	0.0844	
	3	2	537	0.1313	33	254.044	1162	0.7870	0.1033	
	3	3	537	0.1313	33	254.044	1162	0.7328	0.0962	
	4	1	537	0.1312	33	254.148	1246	0.7889	0.1035	
	4	2	537	0.1312	33	254.148	1246	0.7819	0.1026	
	4	3	537	0.1312	33	254.148	1246	0.7401	0.0971	
										<b>0.09247</b>

Taula 28: Valors de les amplades de fissures de biga S6 a càrrega de 30kN.

Les fissures mesurades de la biga S6 en l'instat de servei en total són 15, les qual estan mostrades en les figures 88, 89, 90 i 91 per cada camera.

Càmera 1:

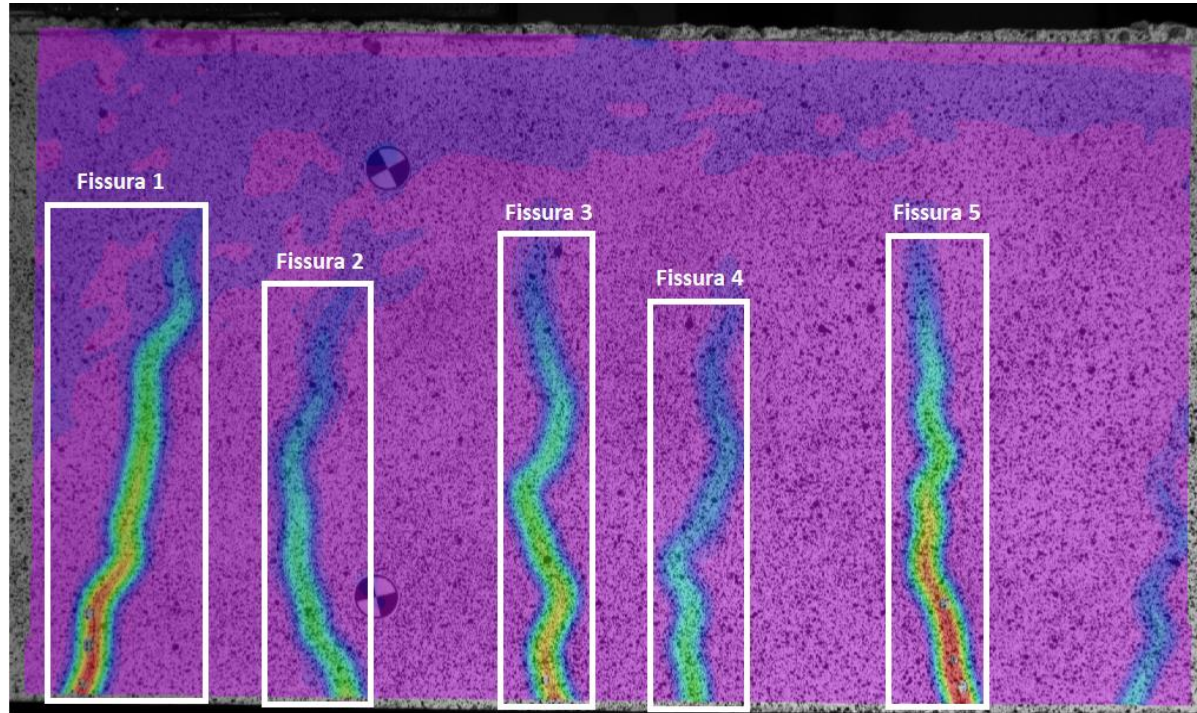


Figura 88: Nombre de fissures en la biga S6 per instant de servei capturades per càmera 1.

Càmera 2:

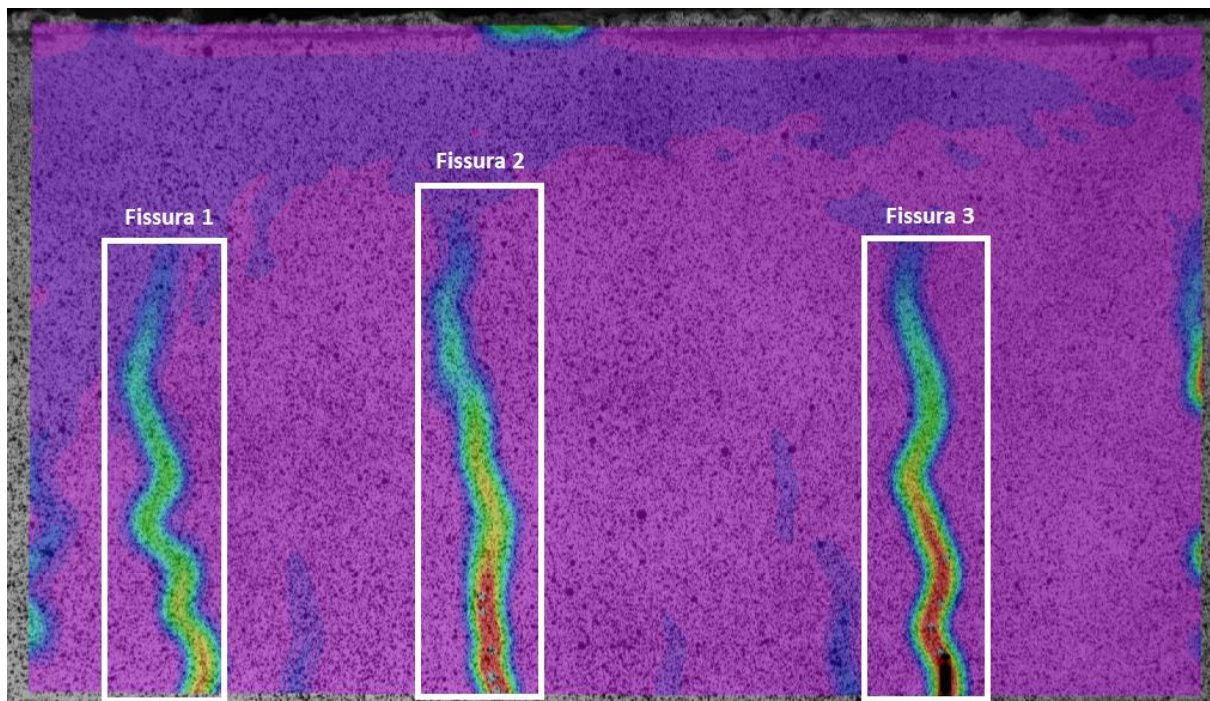


Figura 89: Nombre de fissures en la biga S6 per instant de servei capturades per càmera 2.

Càmera 3:

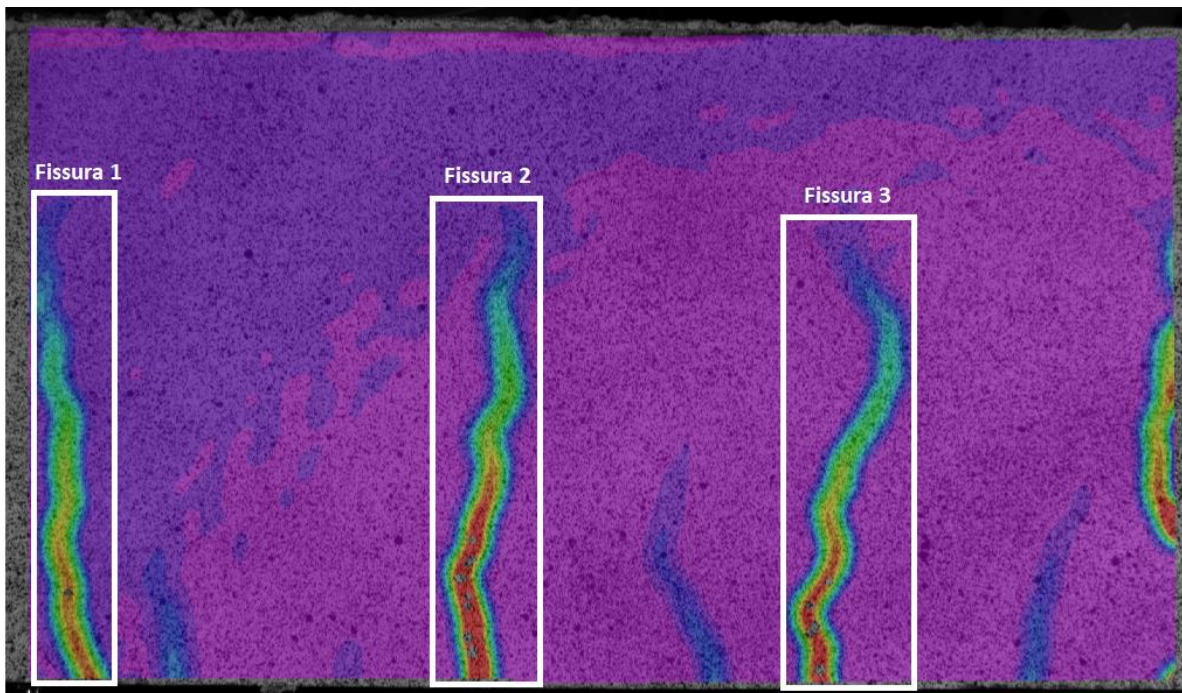


Figura 90: Nombre de fissures en la biga S6 per instant de servei capturades per càmera 3.

Càmera 4:

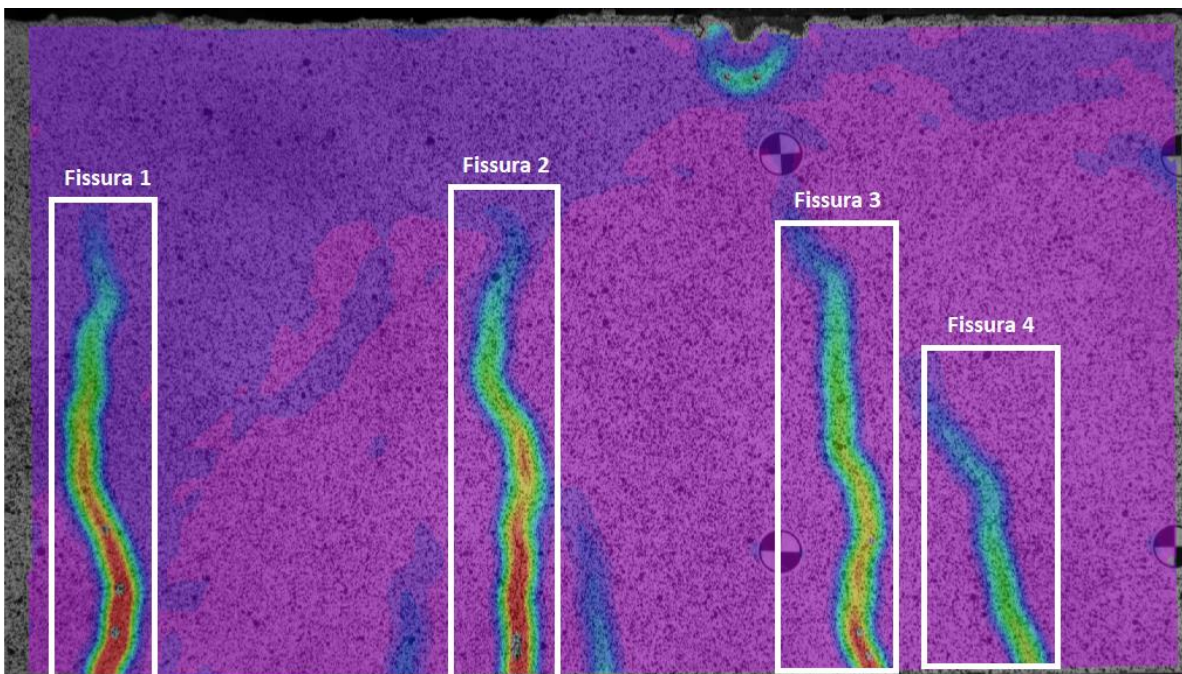


Figura 91: Nombre de fissures en la biga S6 per instant de servei capturades per càmera 4.

Tot seguit, s'adjunta la *Taula 29* on es mostren els resultats obtinguts de les amplades de fissures per les quatre càmeres DIC a l'instant de 30kN.

Valors experimentals									
Biga	sys	Núm. fissura	Instant_2	mm/píxel	c (mm)	c (píxels)	y reforç (píxels)	w (píxels)_2	w(mm)_2
S6	1	1	1244	0.1309	33	254.690	1174	1.4807	0.1939
	1	2	1244	0.1309	33	254.690	1174	0.8478	0.1110
	1	3	1244	0.1309	33	254.690	1174	1.2460	0.1631
	1	4	1244	0.1309	33	254.690	1174	0.6343	0.0830
	1	5	1244	0.1309	33	254.690	1174	1.5538	0.2034
	2	1	1244	0.1310	33	254.509	1170	1.2052	0.1579
	2	2	1244	0.1310	33	254.509	1170	1.8138	0.2376
	2	3	1244	0.1310	33	254.509	1170	1.7416	0.2282
	3	1	1244	0.1313	33	254.044	1162	1.5332	0.2012
	3	2	1244	0.1313	33	254.044	1162	1.9157	0.2514
	3	3	1244	0.1313	33	254.044	1162	1.5794	0.2073
	4	1	1244	0.1312	33	254.148	1246	1.8753	0.2460
	4	2	1244	0.1312	33	254.148	1246	1.8065	0.2370
	4	3	1244	0.1312	33	254.148	1246	1.3856	0.1818
	4	4	1244	0.1312	33	254.148	1246	0.7251	0.0951

Taula 29: Valors de les amplades de fissures de biga S6 a càrrega de servei.



### D.2.8. Biga reforçada S7

Les fissures mesurades de la biga S7 en l'instant de càrrega de 30kN són 17, les qual estan mostrades en les figues 92, 93, 94 i 95 per cada càmera.

Càmera 1:

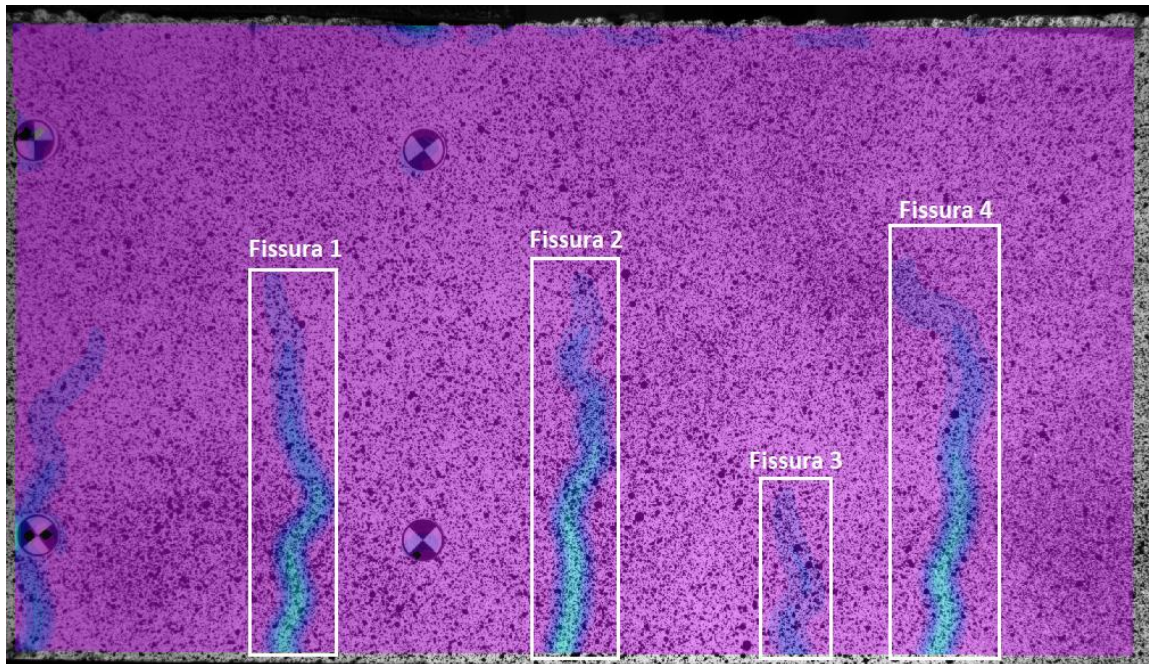


Figura 92: Nombre de fissures en la biga S7 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 1.

Càmera 2:

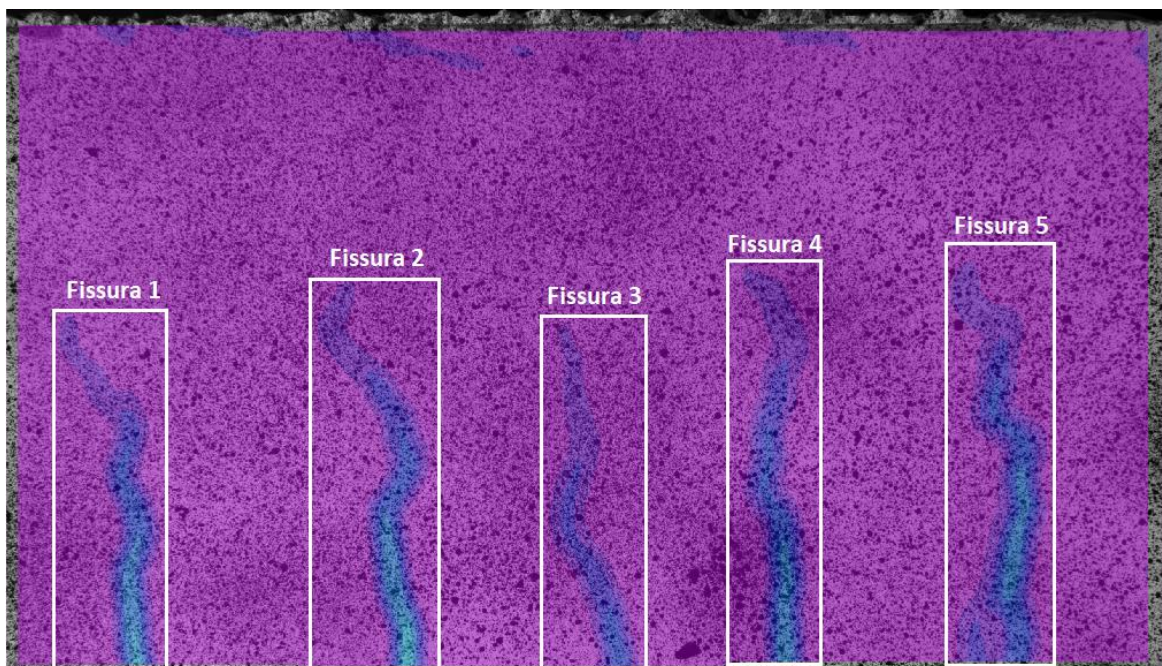


Figura 93: Nombre de fissures en la biga S7 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 2.

Càmera 3:

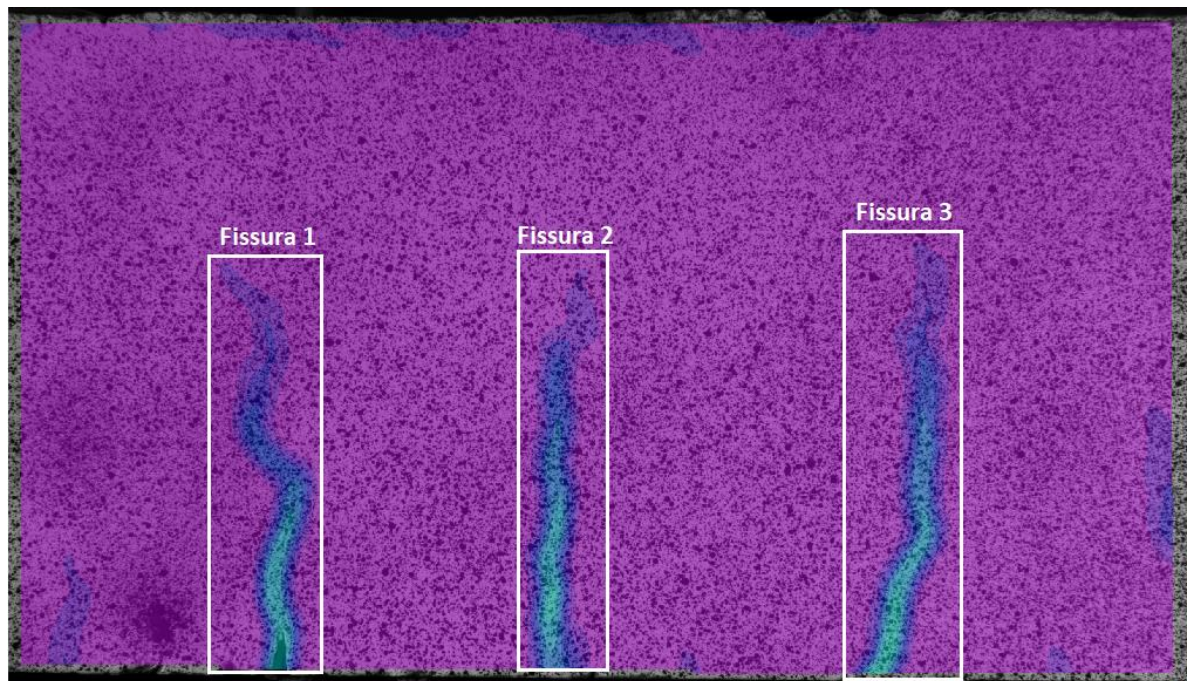


Figura 94: Nombre de fissures en la biga S7 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 3.

Càmera 4:

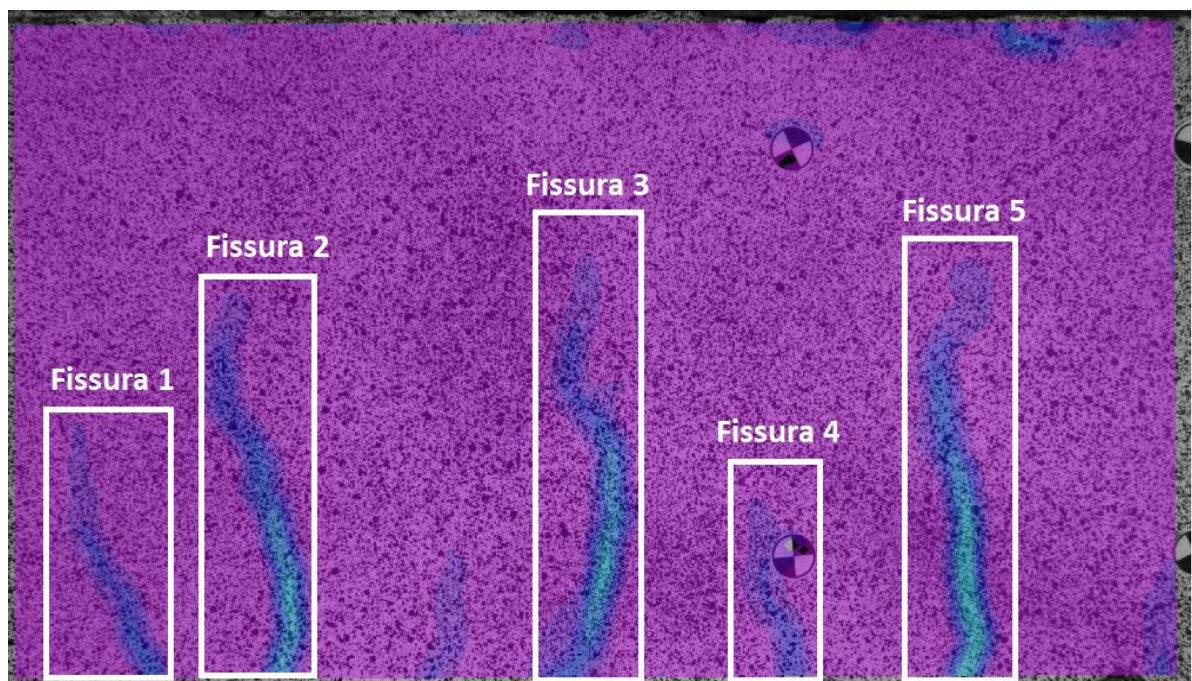


Figura 95: Nombre de fissures en la biga S7 per la càrrega de 30kN capturades per càmera 4.

Tot seguit, s'adjunta la *Taula 30* on es mostren els resultats obtinguts de les amplades de fissures per les quatre càmeres DIC a l'instant de càrrega de 30kN.

Valors experimentals										
Biga	sys	Núm. fissura	Instant_1	mm/píxel	c (mm)	c (píxels)	y reforç (píxels)	w (píxels)_1	w (mm)_1	
S7	1	1	535	0.13185	34	258.862	1175	0.4760	0.0628	
	1	2	535	0.13185	34	258.862	1175	0.5472	0.0721	
	1	3	535	0.13185	34	258.862	1175	0.1601	0.0211	
	1	4	535	0.13185	34	258.862	1175	0.5229	0.0689	
	2	1	535	0.13174	34	259.074	1157	0.3979	0.0524	
	2	2	535	0.13174	34	259.074	1157	0.4142	0.0546	
	2	3	535	0.13174	34	259.074	1157	0.2072	0.0273	
	2	4	535	0.13174	34	259.074	1157	0.3960	0.0522	
	2	5	535	0.13174	34	259.074	1157	0.4862	0.0641	
	3	1	535	0.13174	34	259.084	1164	0.6042	0.0796	
	3	2	535	0.13174	34	259.084	1164	0.5831	0.0768	
	3	4	535	0.13017	34	262.209	1161	0.5919	0.0770	
	4	1	535	0.13141	34	259.727	1255	0.2305	0.0303	
	4	2	535	0.13141	34	259.727	1255	0.5208	0.0684	
	4	3	535	0.13141	34	259.727	1255	0.5139	0.0675	
	4	4	535	0.13141	34	259.727	1255	0.2871	0.0377	
	4	5	535	0.13141	34	259.727	1255	0.5887	0.0774	
										<b>0.05825</b>

Taula 30: Valors de les amplades de fissures de biga S7 a càrrega de 30kN.

Les fissures mesurades de la biga S7 en l'instat de servei en total són 19, les qual estan mostrades en les figures 96, 97, 98 i 99 per cada càmera.

Càmera 1:

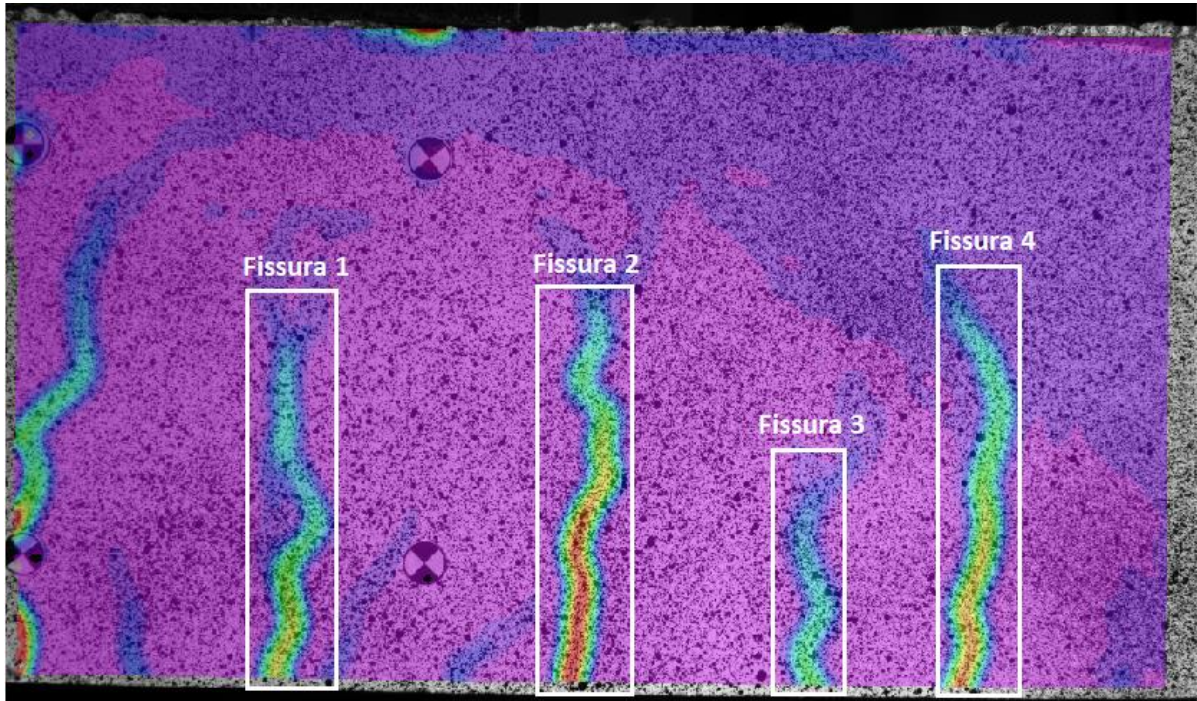


Figura 96: Nombre de fissures en la biga S7 per instant de servei capturades per càmera 1.

Càmera 2:

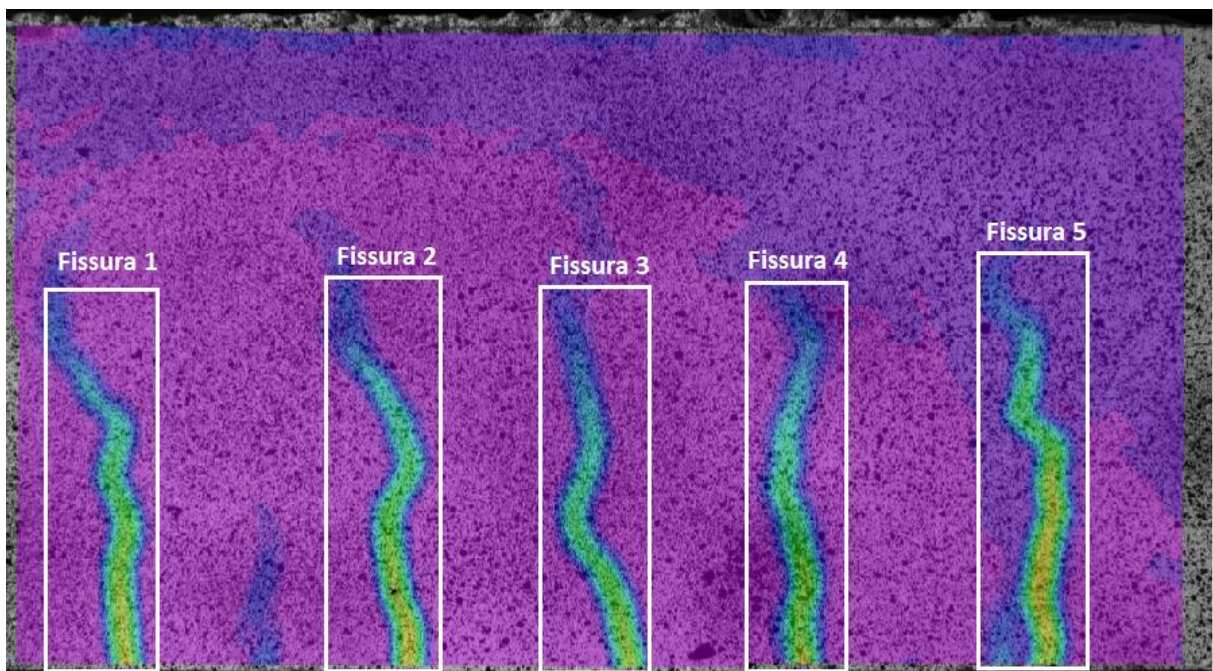


Figura 97: Nombre de fissures en la biga S7 per instant de servei capturades per càmera 2.

Càmera 3:

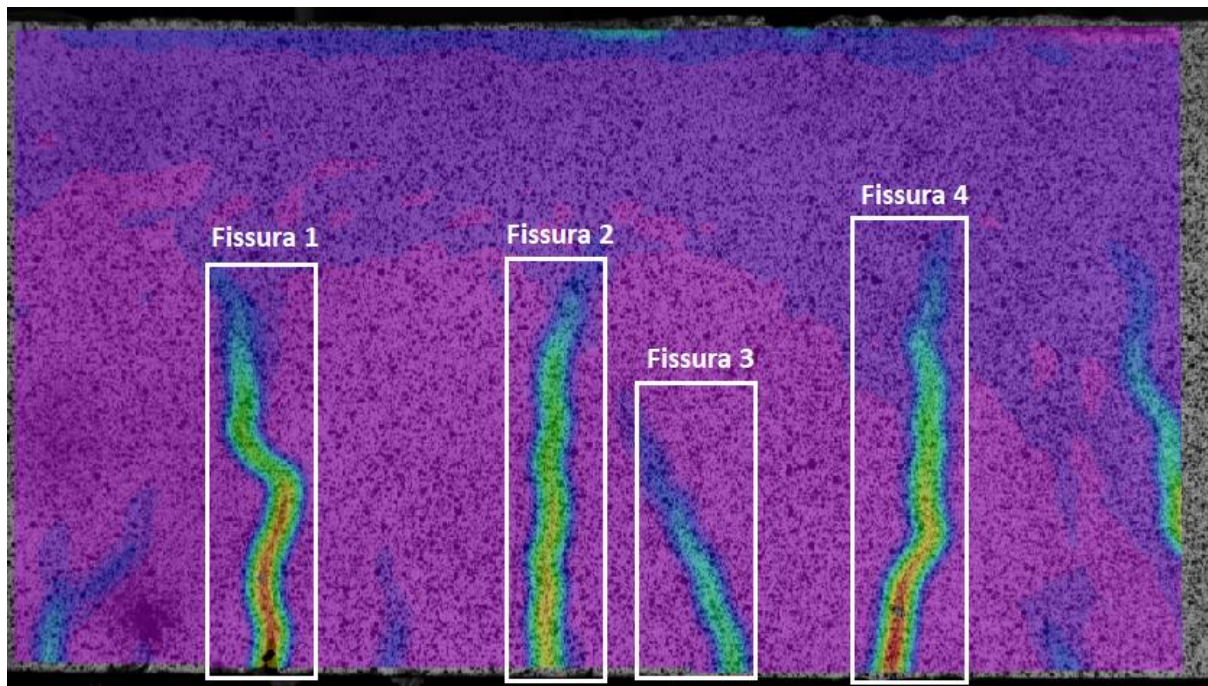


Figura 98: Nombre de fissures en la biga S7 per instant de servei capturades per càmera 3.

Càmera 4:

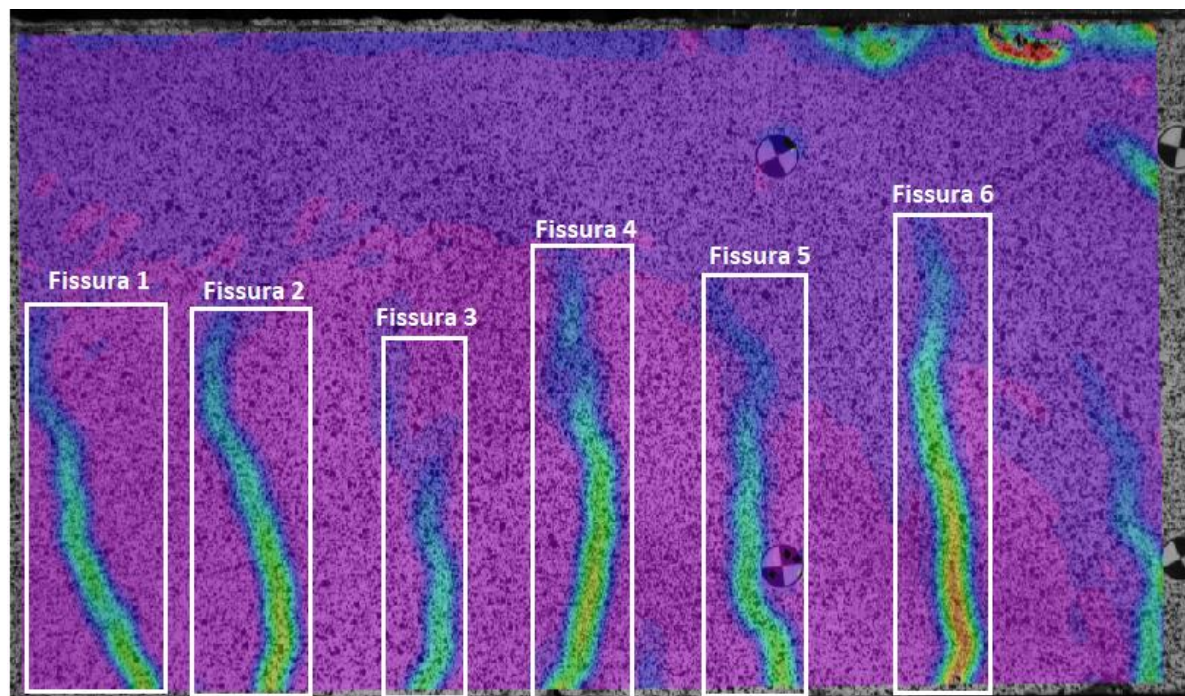


Figura 99: Nombre de fissures en la biga S7 per instant de servei capturades per càmera 4.

Tot seguit, s'adjunta la *Taula 31* on es mostra els resultats obtinguts de les amplades de fissures per les quatre càmeres DIC a l'instant de càrrega de servei.

Valors experimentals									
Biga	sys	Núm. fissura	Instant_2	mm/píxel	c (mm)	c (píxels)	y reforç (píxels)	w (píxels)_2	w(mm)_2
<b>S7</b>	1	1	1543	0.13185	34	258.862	1175	1.0372	0.1368
	1	2	1543	0.13185	34	258.862	1175	1.6333	0.2154
	1	3	1543	0.13185	34	258.862	1175	0.6000	0.0791
	1	4	1543	0.13185	34	258.862	1175	1.3390	0.1765
	2	1	1543	0.13174	34	259.074	1157	1.0600	0.1396
	2	2	1543	0.13174	34	259.074	1157	1.0714	0.1411
	2	3	1543	0.13174	34	259.074	1157	0.8879	0.1170
	2	4	1543	0.13174	34	259.074	1157	0.9955	0.1312
	2	5	1543	0.13174	34	259.074	1157	1.3782	0.1816
	3	1	1543	0.13174	34	259.084	1164	1.4670	0.1933
	3	2	1543	0.13174	34	259.084	1164	1.2659	0.1668
	3	3	1543	0.13017	34	262.209	1161	0.6036	0.0786
	3	4	1543	0.13017	34	262.209	1161	1.4517	0.1890
	4	1	1543	0.13141	34	259.727	1255	0.9696	0.1274
	4	2	1543	0.13141	34	259.727	1255	1.0719	0.1409
	4	3	1543	0.13141	34	259.727	1255	0.6628	0.0871
	4	4	1543	0.13141	34	259.727	1255	1.2357	0.1624
	4	5	1543	0.13141	34	259.727	1255	0.8531	0.1121
	4	6	1543	0.13141	34	259.727	1255	1.4654	0.1926

Taula 31: Valors de les amplades de fissures de biga S7 a càrrega de servei.

Girona, 19 d'agost del 2019

Anam Noureen

