

## INDEX

1	INTRODUCCIÓ .....	3
1.1	ANTECEDENTS.....	3
1.2	OBJECTE .....	3
1.3	ABAST.....	4
2	FORMIGÓ ARMAT AMB FRP.....	6
2.1	FORMIGÓ.....	6
2.2	FORMIGÓ ARMAT AMB ACER.....	9
2.3	FRP (Fiber Reinforced Polymers).....	11
2.4	FORMIGÓ AMB FRP .....	13
3	DESCRIPCIÓ DE L'ASSAIG.....	15
3.1	OBJECTIU .....	15
3.2	DESCRIPCIÓ DE L'ASSAIG .....	17
3.3	MATERIALS.....	19
3.3.1	FORMIGÓ.....	19
3.3.2	FRP UTILITZADES EN L'ASSAIG.....	21
4	INSTRUMENTACIÓ .....	22
4.1	OBJECTIU DE LA INSTRUMENTACIÓ.....	22
4.2	MÈTODES I APARELLS PER L'OBTENCIÓ DE RESULTATS EN L'ASSAIG.....	22
4.3	APARELLS UTILITZATS EN L'ASSAIG.....	25
5	ANÀLISI DE DADES.....	28
5.1	CARACTERITZACIÓ DELS MATERIALS.....	28
5.1.1	FORMIGÓ.....	28
5.1.1.1	RESISTÈNCIA A COMPRESSIÓ ( $f_c$ ): .....	28
5.1.1.2	TRACCIÓ INDIRECTA ( $f_{ct,sp}$ ): .....	30
5.1.1.3	MÒDUL D'ELASTICITAT ( $E_c$ ) .....	32
5.1.2	FRP .....	32
5.2	ANÀLISI DE LA CURVATURA .....	33
5.2.1	ANÀLISI DE LA CURVATURA DEL FORMIGÓ 25MPa (C1) .....	33
5.2.2	ANÀLISI DE LA CURVATURA DEL FORMIGÓ 50MPa (C2) .....	34
5.2.3	DETERMINACIÓ DE LES CURVATURES .....	35
5.3	MOMENT DE FISSURACIÓ.....	38
5.4	RESPOSTA CÀRREGA-DEFORMACIÓ.....	40
5.4.1	TRANSDUCTOR VERTICAL.....	40
5.4.2	INCLINÒMETRES.....	41
5.4.3	EXTENSÒMETRE MECÀNIC .....	41
5.5	AMPLADA DE FISSURA.....	45
5.6	SEPARACIÓ ENTRE FISSURES.....	52
6	COMPARACIÓ DELS RESULTATS EXPERIMENTALS AMB ELS TEÒRICS.....	54
6.1	CARACTERITZACIÓ DEL FORMIGÓ .....	54
6.1.1	RESISTÈNCIA A FLEXO-TRACCIÓ ( $f_{ct,fl}$ ).....	54
6.1.2	MÒDUL ELÀSTIC ( $E_c$ ).....	57
6.2	COMPROVACIÓ DEL MOMENT DE FISSURACIÓ.....	58
6.3	RESPOSTA CÀRREGA-DEFORMACIÓ.....	59
6.3.1	ACI 440 (2006).....	59
6.3.2	ACI 318 (2002).....	60
6.4	AMPLADA DE FISSURA.....	61
6.5	SEPARACIÓ ENTRE FISSURES.....	64
7	RESUM DEL PRESSUPOST.....	66
8	CONCLUSIONS .....	67

9	RELACIÓ DE DOCUMENTS .....	70
10	BIBLIOGRAFIA.....	71
11	AGRAÏMENTS.....	72

# 1 INTRODUCCIÓ

## 1.1 ANTECEDENTS

Les estructures de formigó armades amb acer exposades a ambients agressius, com poden ser els marins, veuen reduïda la seva durabilitat a causa de la corrosió de les barres de reforç (progressiu deteriorament dels elements metàl·lics per acció d'agents externs), ocasionant importants costos de manteniment, reparació o substitució.

Actualment a la Universitat de Girona, concretament dins el departament d'EMCI (*Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial*), s'està fent un estudi experimental del comportament de bigues de formigó armades amb barres de materials compostos de matriu polimèrica (en anglès *Fiber Reinforced Polymers, en endavant FRP*) una possible solució al problema esmentat anteriorment.

Els FRP són materials compostos de matriu polimèrica, els més emprats són els de fibra de vidre (GFRP), de carboni (CFRP) o d'aramida (AFRP). Els analitzats en l'estudi són els GFRP.

Als EUA ja fa temps que s'utilitza en la construcció, la base dels càlculs es refereix en la norma americana ACI – 440.1R-06 que estudia la seva utilització.

Un punt molt important a tenir en compte, a l'hora de parlar de la substitució de les barres d'acer per les de l'FRP, és que, a diferència de l'acer, els FRP tenen el mòdul de Young inferior (de l'ordre de  $40 \div 60$  GPa per GFRP comparat amb 210 GPa de l'acer), això provoca que en la seva utilització es creïn més fissures i més deformacions. També hem de tenir en compte que els FRP tenen un comportament lineal de tensió deformació ( $\sigma - \varepsilon$ ) lineal fins a ruptura, provocant que la falla de la secció sigui de tipus fràgil.

## 1.2 OBJECTE

L'objecte d'aquest treball és estudiar la instrumentació i fer l'anàlisi de dades d'assaigs de bigues de formigó armades amb FRP. Tal com s'ha explicat en els antecedents l'acer té un mòdul de Young més alt que l'FRP, per tant en la utilització d'aquest material hi ha un augment en la deformació i apareixen més fissures. És per aquest motiu que interessa fer l'estudi de les bigues amb càrregues de servei.

La primera part del projecte consta de l'estudi de la instrumentació de les bigues que és necessària per tal d'analitzar el comportament d'aquestes en l'assaig. Els paràmetres que interessin són: mesures de curvatura, fissures (ample i separació), deformacions i fletxes, sense oblidar la caracterització dels materials (Formigó i FRP), per tant, haurem de fer un estudi del aparells de mesura segons les nostres necessitats.

La segona part del projecte es basa en el tractament de les dades obtingudes en l'assaig, trobant així els valors experimentals esmentats anteriorment per tal de poder-los comparar amb resultats teòrics. Aquest tractament s'ha fet amb l'ajuda de suport informàtic com MS Excel i el Matlab.

Les bigues han estat dissenyades variant la relació dels paràmetres de quantia geomètrica, cantell útil i la resistència del formigó per tal de tenir els resultats de diferents tipus de bigues i que ens permetin conèixer el comportament dels materials amb diferents situacions.

Per tal de poder estudiar millor la fissuració s'han assajat dues bigues de cada tipus fent que una de les dues tingui una pre-fissura (just en el centre de la biga) d'aquesta manera es pot estudiar millor la repetabilitat del comportament i els efectes de fissuració,

En total s'han estudiat un total de 24 bigues assajades amb les següents diferències:

- dos tipus de formigó: HA-25 (formigó de resistència 25MPa, C1) i HA-50 (formigó de resistència 50MPa, C2).
- dos diàmetres diferents de les barres de reforç: de 12mm i de 16mm
- dos recobriments diferents: recobriment de 20mm(D1) i recobriment de 40mm (D2)
- diferent número de barres: 2 o 3 barres
- bigues amb pre-fissura (a/b)

Per últim s'ha contrastat els resultats obtinguts experimentalment amb les següents normes: Instrucció Hormigón Estructural (EHE), American Concrete Institute (ACI), Eurocodi (EC-2) i Model Code (MC-90).

### **1.3 ABAST**

El projecte s'ha estructurat en tres grans blocs:

#### 1- Instrumentació de les bigues:

- Fer un estudi de la instrumentació utilitzada en l'assaig, estudiant-ne algunes de les característiques físiques més importants en la seva elecció per tal d'obtenir les mesures experimentals que ens interessin.

2- Anàlisi experimental de les bigues de formigó armades amb material compost:

- Caracterització del materials
- Curvatura
- Moment de fissuració
- Càrrega deformació
- Amplada de fissura
- Separació de fissura

3- Contrast de les dades experimentals amb les teòriques.

- Caracterització dels materials (Formigó): ACI, EHE, MC-90 i EC 2, cal afegir que la norma ACI només dóna valors de  $f_{ct}$  a partir dels assaigs a compressió.
- Moment de fissuració, comprovació amb l'ajuda de l'ACI 440 i 318
- Càrrega deformació: ACI 440 i 318
- Amplada de fissura: ACI
- Separació de fissura: EC-2

## 2 FORMIGÓ ARMAT AMB FRP

### 2.1 FORMIGÓ

El formigó és un material que resulta de la barreja i fraguat (refredament i enduriment) de grava, sorra, ciment, aigua i additius, obtenint així unes característiques determinades que el fan ideal per la construcció.

Àrids: s'afegeixen a la mescla i donen resistència i durabilitat al formigó. Els àrids no poden ser reactius amb el ciment, ja que, quan el formigó fragua es produeix una reacció química entre el ciment i l'aigua.

- Àrids no adients: pedres sedimentàries i volcàniques.
- Àrids adients: pedres sílices, grafitiques i calcàries.

Classificació dels àrids en funció del gra:

- Grava: àrid gruixut >5mm
- Sorra: gruixuda >2mm  
fina < 2mm i > 0.5mm
- Llims: < 0.5mm
- Argila:  $\mu\text{m}$

La resistència del formigó depèn del ciment, dels àrids i de la relació aigua/ciment.

Es combinen diferents mides d'àrids perquè un cop estigui feta la mescla hi hagi el mínim d'espais buits.

Ciment: és un conglomerat hidràulic artificial inorgànic que endureix barrejat amb aigua. És un dels materials de construcció més importants.

Hi ha diferents tipus de ciment segons la seva composició:

- Ciment pòrtland: format per silicats i aluminats càlcics que han fet presa amb aigua. La seva resistència mecànica augmenta amb el pas del temps.

- Ciment amb addicions: ciment pòrtland al qual s'hi han afegit substàncies però no superior a un 5% per tal de millorar-ne les propietats.
- Ciment d'aluminat càlcic: Format per calcàries i bauxites. Adquireix la resistència en un termini força més breu que el ciment pòrtland.
- Ciments naturals: ciments formats per la clinquerització de roques. De forma natural hi ha barrejats carbonat càlcic i silicats.
  - o Ciment natural ràpid: endureix en qüestió de minuts i pastat només amb aigua, és un morter de poca resistència.
  - o Ciments naturals lents: té les propietats molt semblants al ciment pòrtland però amb menys resistència.

Aigua (H<sub>2</sub>O): per la millor reacció entre l'aigua i el ciment l'aigua hauria de ser pura natural, però com que a la natura no es pot trobar, no totes les aigües van bé per la barreja amb el ciment, hem de procurar que no portin substàncies perjudicials per la reacció. Per tant, hem d'estudiar el contingut de sulfats (pH), el total de substàncies dissoltes, els hidrats de carboni i les substàncies orgàniques solubles en èter per saber si es pot utilitzar o no.

A més, hi ha substàncies que porta l'aigua que encara que no siguin perjudicials per el formigó ho poden ser per l'acer. Per tant, l'aigua del mar només es permet per formigons que no hagin de portar armadura ni que estiguin en contacte amb armadures, encara que no siguin la mateixa biga o el mateix formigonat.

Additius: substàncies que s'afegeixen abans de l'amasat per millorar alguna les propietats del formigó a l'hora de fraguar.

Tipus d'additius:

- Airejants: modifiquen la porositat i els buits del formigó mitjançant bombolles d'aire. Augmenten la resistència a la congelació sense augmentar la retracció.
- Anticongelants: permeten formigonar en temps de gelades.
- Colorant: per aconseguir un color diferent del formigó, que normalment és gris.
- Fluidificant: aconseguix que el formigó sigui més líquid amb la mateixa resistència.
- Retardant: fa que el forjat tardi més del normal.
- Superfluidificants: a l'igual que el fluidificant, però amb més quantitat.

Addicions: per millorar les seves propietats mecàniques. Les addicions poden ser puçolànics o amb hidraulicitat latent (només reacciona amb el ciment).

- Cendres volants (fa que la resistència no variï en el període de curat del formigó)
- Fum de silici (augmenta la resistència)
- Escòria (són les impureses de l'acer que es treuen i es posen al formigó per augmentar-ne la resistència)

#### Nomenclatura del formigó:

HA-25/P/20/IIa

On:

**HA** és la resistència:  $f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$  en 28 dies

**P** consistència: pot ser S= 0-2cm seca

P= 3-5cm plàstica

B= 6-10cm blanda

F= 10-15cm fluida

L= 15cm líquida

Per determinar la consistència del formigó es fa amb l'anomenat con d'Abrams, just abans de formigonar, quan arriba la cuba a l'obra, s'agafa el con i s'omple una tercera part, es barreja. Tot seguit s'omple una segona tercera part i es barreja sense arribar a la part de sota. Finalment s'omple la última part del con i es barreja sense arribar a les altres parts.

Un cop s'ha barrejat la tercera part del formigó es treu el con, es posa al costat del formigó i es comparen les alçades, segons l'alçada que baixa el formigó respecte el con es pot determinar la consistència d'aquest.

**20** tamany màxim: és el tamany màxim que té l'àrid del formigó: si és de 20mm és un formigó ordinari, si està entre 15 i 12 mm és un formigó d'alta resistència.

**IIa** ambient: segons la situació de l'obra et dona la relació d'aigua/ciment que ha de tenir el formigó.

Com més baixa la relació aigua ciment més impermeable, més durabilitat i més resistència tindrà el formigó, però per altra banda, més costarà d'amassar. És per això que s'ha d'intentar trobar un terme mig, els valors recomanables són entre 0,45 i 0,54.

#### Característiques físiques del formigó:

Resistència del formigó: De 15 a 50 MPa per el formigó ordinari, però actualment n'hi ha que arriben a 200 MPa.

Densitat: al voltant de 2350 kg/m<sup>3</sup>



Resistència a tracció: menyspreable

Temps d'enduriment: En 24/48 hores pots aconseguir la resistència mitja. Però no és a partir dels 28 dies quan pots aconseguir la resistència total. Cal afegir que el formigó, en el pas del temps, augmenta la resistència, però dels 28 dies als 5 anys és una creixement asimptota.

#### Provetes de formigó:

Degut a que el valor real de la resistència del formigó és pràcticament impossible de conèixer, en l'obra es realitzen provetes de formigó. A l'hora del formigonat de l'obra es creen uns cilindres de 30cm d'alçada i 15cm de diàmetre. Un cop ha passat el temps d'enduriment es realitzen tres assaigs diferents:

- resistència a compressió
- resistència a tracció indirecte
- resistència a flexo tracció

Veure en l'annex A.1 Provetes de formigó

## **2.2 FORMIGÓ ARMAT AMB ACER**

L'ús del formigó armat data del 1848, encara que se sap que els romans ja l'utilitzaven. Però no és fins el 1868 que Joseph Monier el patentava i el comença a utilitzar, primer en la jardineria i després en la construcció de les bigues.

El formigó armat resulta de la combinació de barres d'acer (armadures) amb el formigó. Ja que el formigó treballa molt bé a compressió (però no a tracció) i l'acer a tracció i tallant. A més, com que els dos materials tenen coeficients de dilatació tèrmica del mateix ordre fa que pugin treballar conjuntament sense cap problema sempre que hi hagi una bona adherència. També cal afegir que el formigó dona a l'acer una important protecció en els temes de oxidació i corrosió.

El formigó armat és el mètode més emprat en la construcció actual, s'utilitza en pilars, bigues aconseguint construir obres de gran importància com poden ser; ponts, camins i/o túnels.

Per dissenyar o calcular una estructura de formigó armada amb acer s'utilitzen els Estats Límits, quan una estructura supera els Estats Límits és quan deixa de complir alguna de les funcions per la qual ha estat dissenyada.

Hi ha dos passos per estudiar els Estats Límits del formigó:

- ELU (Estats Límits Últims), l'estudi del formigó quan es causen errors en les deformacions, pèrdua d'equilibri, errors per l'acumulació de deformacions i fissures.
- ELS (Estats Límits a Servei), l'estudi de l'estructura quan deixa de ser funcional, danys estructurals locals, deformacions a causa de danys d'elements no estructurals i vibracions.

En els ELU s'estudia:

- Esgotament
- Inestabilitat
- Esgotament de tallant
- Esgotament per torsió
- Fatiga

En els ELS s'estudia:

- Deformació
- Fissuració: Separació de fissures i Amplada de fissura

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 tal i com es pot veure en la Figura 1.



Figura 1: Deteriorament a causa de l'oxidació o corrosió de l'acer

Actualment hi ha més materials que poden ajudar al formigó en la construcció per tal d'evitar aquests problemes, com per exemple la fibra de vidre.

### 2.3 FRP (Fiber Reinforced Polymers)

Els materials Polimèrics Reforçats Fibres (FRP) van ser descobert en la segona Guerra Mundial al Regne Unit en la construcció civil; barques. També han estat utilitzats per la indústria aeroespacial, naval i esportiva però actualment s'està utilitzant en la construcció.

Durant molt de temps s'ha buscat un material adient que pogués substituir l'acer en ambients on aquest es corrossiona i erosiona, per tal d'evitar els elevats costos de manteniment.

L'FRP s'extreu de fibra de vidre (GFRP), carbó (CFRP) o aramida (AFRP), amb l'ajuda d'una resina polimèrica es pot utilitzar amb barres. Aquesta resina distribueix les tensions uniformement i protegeix les fibres.

La superfície de les barres pot ser llisa, helicoidal,...

Es poden utilitzar diferents tipus de resines: expòsidic, vinilèster i polièster.

Un gran avantatge dels FRP és que tenen propietat anisotropica (les seves propietats mecàniques varien segons l'eix o direccions), això encara el fa més ideal per algunes construccions en concret.

En la Figura 2 es pot veure la resistència dels tres tipus de FRP més utilitzats en comparació amb l'acer:

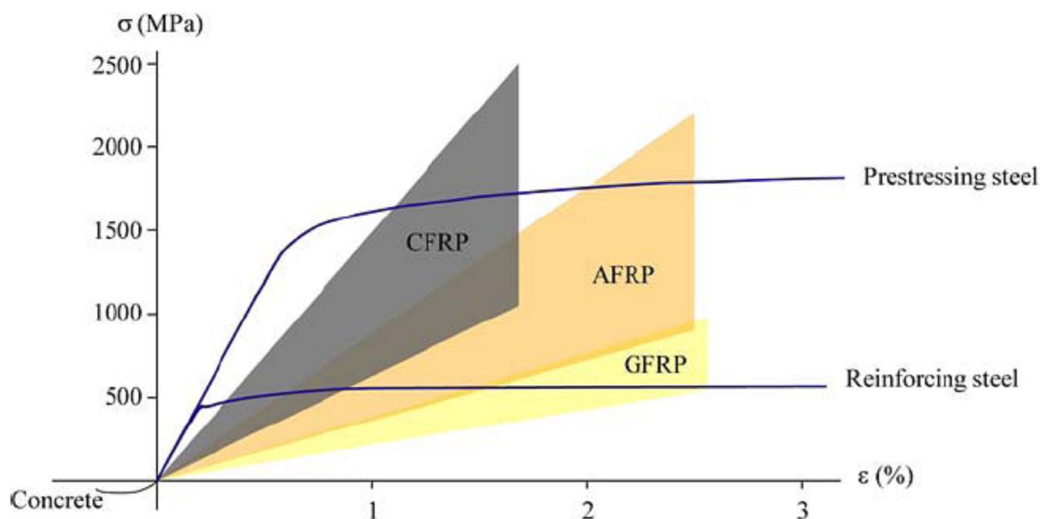


Figura 2: Comportament FRP/Acer

La relació d'esforç- deformació dels materials de FRP es compara amb l'acer de reforç. A diferència del comportament dúctil de l'acer, els materials d'FRP no són dúctils, tenen un comportament lineal fins a la ruptura. Aquest fet, si es sap utilitzar el reforç d'FRP

apropiadamment, pot conservar o incrementar la ductilitat en les bigues, columnes,... on s'hagi utilitzat aquest material.

A l'igual que el formigó armat, la resina que uneix les fibres té molta resistència a compressió però no a tracció, en canvi les fibres tenen una alta resistència a tracció i no a compressió, això fa que sigui una unió important i molt pràctica en la construcció actual perquè poden treballar tan a compressió com a tracció.

En la Figura 3 es pot observar un cas d'aplicació de GFRP en una línia de metro d'Amsterdam (Nord- Sud).



Figura 3: Línia de metro d'Amsterdam

En la següent Taula 1 es poden observar les característiques bàsiques dels FRP en comparació amb l'acer.

CARACTERISITQUES	GFRP	CFRP	AFRP	Acer
Densitat (kg/m <sup>3</sup> )	1.25÷2.10	1.50÷1.60	1.25÷1.40	7.90
Coeficient de dilatació (x10-6/°C) α <sub>L</sub>	6÷10	-9÷0	-6÷-2	11.7
Coeficient de dilatació (x10-6/°C) α <sub>T</sub>	21÷23	74÷104	60÷80	11.7
Límit elàstic (MPa)	-	-	-	400÷500
Resistència a tracció (MPa)	480÷1600	600÷3690	1720÷2540	550
Mòdul elàstic (GPa)	35÷50	120÷580	41÷125	200
Allargament límit elàstic (%)	-	-	-	0.2÷0.25
Allargament en ruptura(%)	1.2÷3.1	0.5÷1.7	1.9÷4.4	15÷20

Taula 1: Característiques FRP

## 2.4 FORMIGÓ AMB FRP

En aquest apartat s'explicaran les condicions que s'han tingut en compte per tal de dissenyar les bigues, tant a ELU (Estats Límits Últims) com a ELS (Estats Límits a Servei). Per altra banda també s'estudien els paràmetres que varien en les bigues: Resistència, Quantia i Cantell útil.

El mètode de càlcul utilitzat per fer el disseny de les bigues és la norma American Concrete Institute 440 (ACI 440) que estudia el comportament de les estructures de formigó armades amb barres de FRP.

Tal i com ja hem citat anteriorment, en aquest projecte, es vol estudiar el Moment de Fissuració, la Càrrega en funció de la deformació i la Curvatura (ELU), per altra banda també s'estudia la fissuració i la deformació (ELS).

A l'hora del disseny de les bigues en ELU s'han tingut en compte els següents aspecte:

- El formigó a tracció no es considera.
- El comportament del FRP és elàstic fins a ruptura.
- Tenim una adherència perfecte entre el formigó i FRP.

S'han dissenyat les bigues per tal que el formigó es trenqui abans que les barres, per tal d'aportar una certa ductilitat en el moment previ a la ruptura.

En el cas dels ELS es busca l'amplada de fissura i la separació d'aquestes, en la

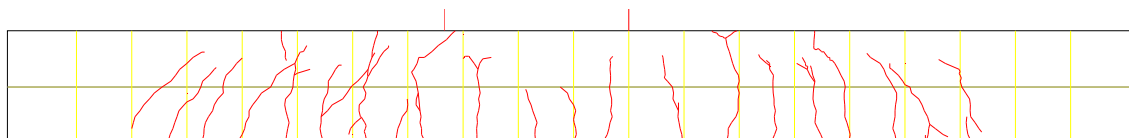


Figura 4 es pot veure les fissures que poden tenir lloc, en el nostre cas, en un assaig a quatre punts.

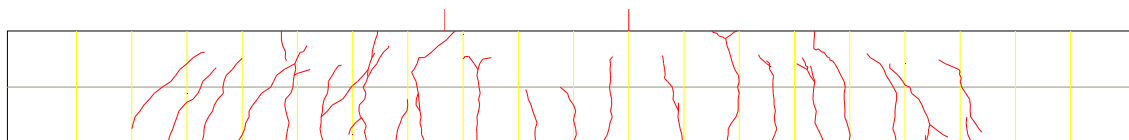


Figura 4: Mapa de fissures

Tal com s'ha estudiat en l'apartat 3.2 Descripció de l'assaig, en la zona de flexió pura (zona central) les fissures van rectes, mentre que en la zona de flexió simple (les bandes) les fissures s'inclinen degut a l'efecte de les tensions tallants.

Les bigues es dissenyen amb GFRP (material compòsit de fibra de vidre), tenen una longitud de 2005mm i una distància de 1800mm entre recolzaments.

S'han dissenyat les bigues amb un cantell total de 190mm. La base de la secció varia per tal de mantenir la quantia  $\rho_r$  (0,99%, 1,77% i 2,66%) igual per els diferents recobriments (20 i 40mm).

Com que  $\rho_r = \frac{A_{FRP}}{b \cdot d}$

On:

$A_{FRP}$ : secció total de les barres longitudinals

b: amplada de la biga

d: cantell útil

Obtenim un total de 6 Bigues Tipus diferents:

Biga Tipus	b(mm)	R (mm)	Reforç	Pr (%)
1	140	20	2Ø12	0.99
2	160	40	2Ø12	0.99
3	140	20	2Ø16	1.77
4	160	40	2Ø16	1.77
5	140	20	3Ø16	2.66
6	160	40	3Ø16	2.66

Com que també treballem amb dos formigons de resistència diferent (25MPa i 50MPa) obtenim un total de 12 bigues.

### 3 DESCRIPCIÓ DE L'ASSAIG

#### 3.1 OBJECTIU

Tal com ja hem citat en la introducció, les estructures de formigó armades amb acer exposades a ambients agressius veuen reduïda la seva durabilitat a causa de la corrosió de les barres de reforç ocasionant importants costos de manteniment, reparació o substitució.

Des de ja fa algun temps s'està treballant amb possibles substitutius per solucionar aquest problema, un dels més estudiats és l'FRP (explicats en l'apartat 2.3).

Actualment dins el departament d'EMCI de la Universitat de Girona s'està treballant amb un projecte que estudia el comportament d'aquestes barres en bigues de formigó.

Concretament s'han realitzat 24 assaigs, utilitzant-ne:

- dos tipus de formigó:
  - o HA-25 (formigó de resistència 25MPa)
  - o HA-50 (formigó de resistència 50MPa).
- dos diàmetres diferents de barres:
  - o de 12mm
  - o de 16mm
- dos recobriments diferents:
  - o recobriment de 20mm(D1)
  - o recobriment de 40mm (D2)
- diferent número de barres:
  - o 2 barres
  - o 3 barres
- bigues amb pre-fissura
  - o a: sense pre-fissura
  - o b: amb pre-fissura

Les bigues es resumeixen en la Taula 2 :

Formigó	Diàmetre i núm. de barres	Recobriments	Denominació Biga	B (mm)
HA-25 (C1)	2Ø12	20 mm (D1)	C1_212_D1-a	140
	2Ø12	40 mm (D2)	C1_212_D2-a	160
	2Ø16	20 mm (D1)	C1_216_D1-a	140
	2Ø16	40 mm (D2)	C1_216_D2-a	160
	3Ø16	20 mm (D1)	C1_316_D1-a	140
	3Ø16	40 mm (D2)	C1_316_D2-a	160
	2Ø12	20 mm (D1)	C1_212_D1-b	140
	2Ø12	40 mm (D2)	C1_212_D2-b	160
	2Ø16	20 mm (D1)	C1_216_D1-b	140
	2Ø16	40 mm (D2)	C1_216_D2-b	160
	3Ø16	20 mm (D1)	C1_316_D1-b	140
	3Ø16	40 mm (D2)	C1_316_D2-b	160
HA-50 (C2)	2Ø12	20 mm (D1)	C2_212_D1-a	140
	2Ø12	40 mm (D2)	C2_212_D2-a	160
	2Ø16	20 mm (D1)	C2_216_D1-a	140
	2Ø16	40 mm (D2)	C2_216_D2-a	160
	3Ø16	20 mm (D1)	C2_316_D1-a	140
	3Ø16	40 mm (D2)	C2_316_D2-a	160
	2Ø12	20 mm (D1)	C2_212_D1-b	140
	2Ø12	40 mm (D2)	C2_212_D2-b	160
	2Ø16	20 mm (D1)	C2_216_D1-b	140
	2Ø16	40 mm (D2)	C2_216_D2-b	160
	3Ø16	20 mm (D1)	C2_316_D1-b	140
	3Ø16	40 mm (D2)	C2_316_D2-b	160

Taula 2: Resum bigues

En la següent Figura 5 es poden veure els detalls geomètrics del reforç de cada biga.



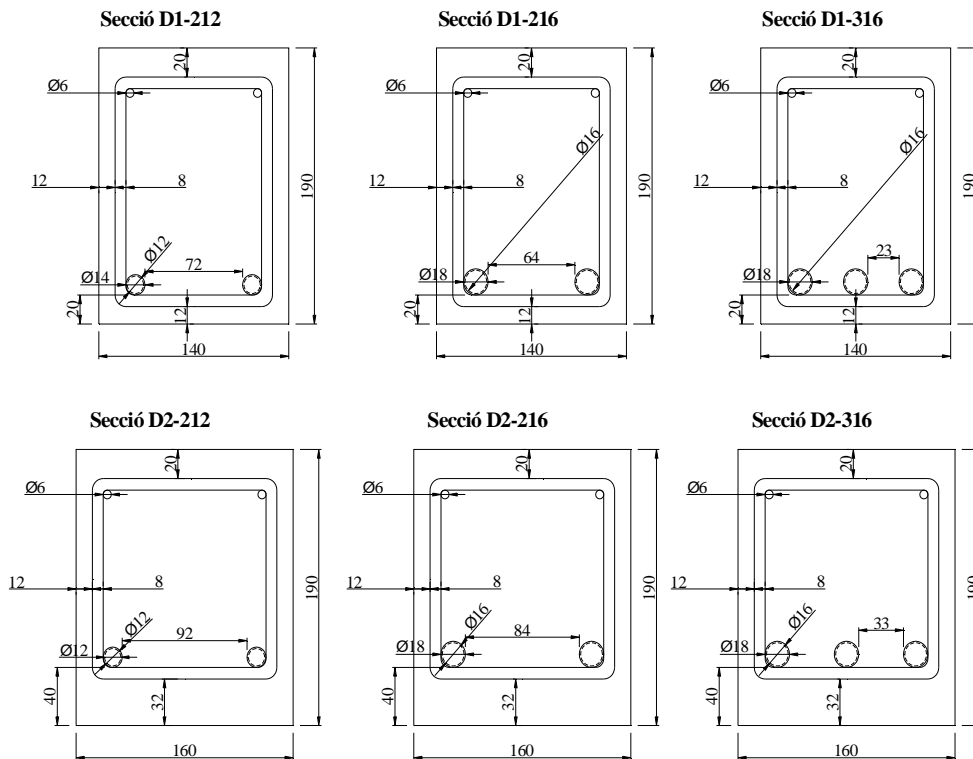


Figura 5: Geometria per cada biga

### 3.2 DESCRIPCIÓ DE L'ASSAIG

L'assaig realitzat analitza una biga a flexió a quatre punts, de manera que una part de la biga treballa a flexió simple (esforç tallant i moment flector) i la part central treballa a flexió pura (únicament moment flector) tal com es pot veure en el diagrama de la Figura 9.

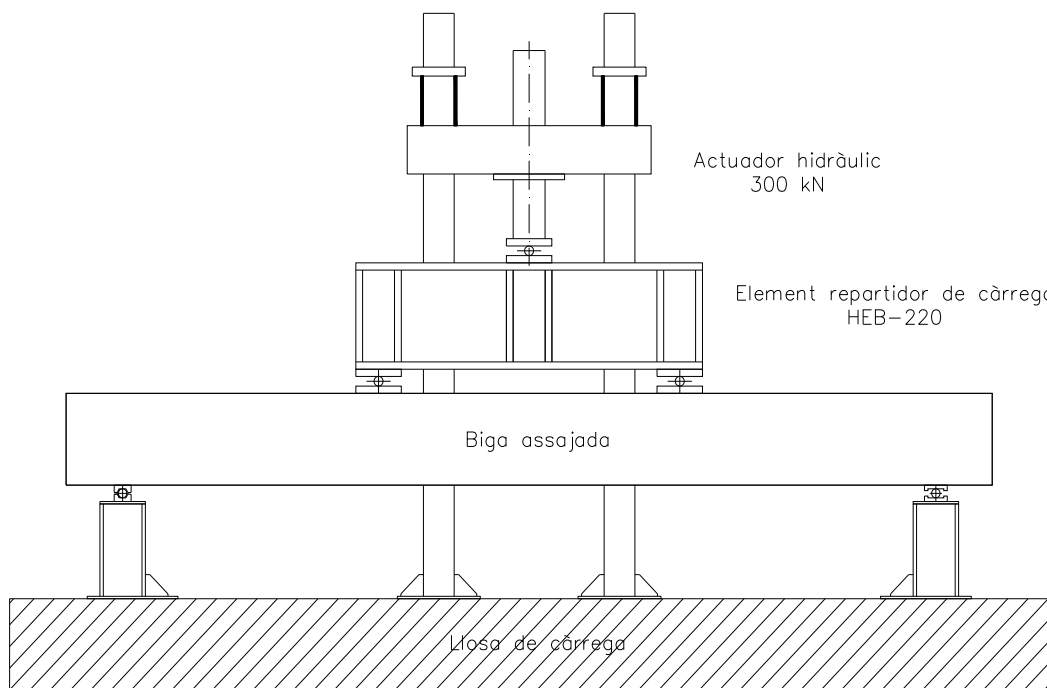


Figura 6: Assaig de bigues

En la següent Figura 7 es representen les forces aplicades a les bigues simplificades.

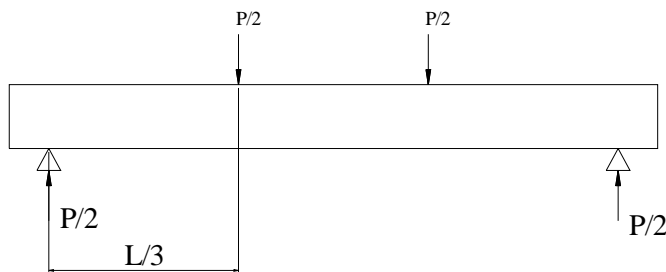


Figura 7: Esquema de les forces aplicades

Diagrama d'esforç tallants teòrics (Figura 8)



Figura 8: Diagrama d'esforç tallant

Diagrama de moments flectors teòric (Figura 9)

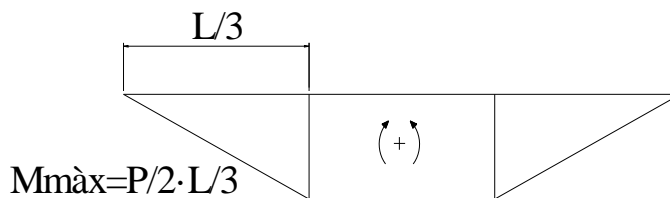


Figura 9: Diagrama de moments

Es decideix fer aquest estil d'assaig per poder estudiar dos estats de tensions diferents amb la mateixa biga.

Abans de fer els assaigs varem realitzar uns treballs previs en les bigues i en la zona d'assaig.

L'assaig es va realitzar al Laboratori de Resistència de Materials i Estructures. Es va utilitzar un pòrtic ancorat a la llosa de càrrega que sostenia l'actuador hidràulic. Per a la transmissió de la càrrega es va emprar un biga repartidora a base d'un perfil d'acer laminat tipus HEB, de manera que es recolzava sobre la biga a assajar en dos punts que eren els d'aplicació de la càrrega. Les conciliacions de recolzament es van materialitzar amb dos corròns, un de fix i l'altre mòbil, per tal d'obtenir un comportament de biga isostàtica simplement recolzada (veure en la Figura 10).

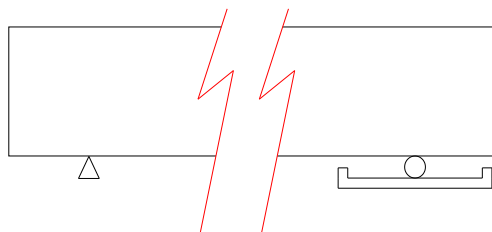


Figura 10: Recolzaments de les bigues

Per altra banda, en les bigues es varen dibuixar una quadrícula per tal de tenir distribuïda tota la biga per zones. A més, es van col·locar uns petits discs metàl·lics (Figura 11) cada 150mm per tal de poder mesurar les deformacions entre aquests a partir d'un extensòmetre mecànic durant els assaigs.



Figura 11: Disc metàl·lic

També en les bigues que tenien pre-fissura es varen col·locar galgues extensomètriques, a l'igual que les bigues que tenien galgues extensomètriques en l'FRP, per tal d'estudiar-ne el seu comportament.

Amb l'ajuda del pont grua es van col·locar les bigues sobre els recolzaments, es va col·locar la biga petita per poder transmetre la càrrega del pistó hidràulic i la cèl·lula de càrrega. Tot seguit es va procedir en la col·locació de tots els aparells de mesura.

Es varen col·locar els transductors, inclinòmetres i LVDT i es va fer la seva connexió en l'equip d'adquisició de dades. Tot seguit es va procedir a la realització dels assaig.

Es van fer parades per tal d'aconseguir dades durant l'assaig, marcar les fissures anomenant-les segons les parades. A més amb l'ajuda de l'equip d'adquisició podem aconseguir les dades en cada instant de temps que nosaltres prèviament havíem programat en l'equip.

Un cop l'assaig s'ha acabat i la biga ha estat trencada, el sistema es descarrega i la biga assajada es transporta a fora de la zona d'assaig mitjançant un pont grua. Amb l'ajuda d'un paper vegetal es fa un mapa de fissures, es calquen totes les fissures i es marquen les parades a les quals s'han creat.

### 3.3 MATERIALS

#### 3.3.1 FORMIGÓ

En els assaigs de les 24 bigues s'han utilitzats dues classes de formigó.

Formigó C1 formigonat per cuba (Taula 3):

Dosificació	Aigua (kg/m <sup>3</sup> )	162
	Ciment CEM I tipus 42.5 (kg/m <sup>3</sup> )	310 (+-15)
	Relació a/c	0.58 (+-0.02)
	Sorra (kg/m <sup>3</sup> )	
	Grava (kg/m <sup>3</sup> )	
	Superfluidificant SIKAME 290 (kg/m <sup>3</sup> )	
Propietats resistents	Resistència a compressió $f_c$ (MPa)	32.07
	Resistència a flexo -tracció $f_{ct,fl}$ (MPa)	2.4
	Mòdul d'elasticitat $E_c$ (MPa)	25845

Taula 3: Formigó C1

Empresa Hanson Hispania, S.A.

Tipus de formigó: HA-25/F/12/IIa

Contingut del ciment: 310 (+-15) k/m<sup>3</sup>

Relació aigua/ciment: 0.58 +- 0.02

Ciment: ASLAND II/A-V-42.5R

Additiu: SIKAME.290 Tipus: SUPERFLUIDIF Marca :SIKAMENT-500 Tipus: SUPERFLUIDIFI

Addicions: no n'hi havia.

Formigó C2 fabricat in situ (Taula 4):

Dosificació	Aigua (kg/m <sup>3</sup> )	162
	Ciment CEM I tipus 52.5 (kg/m <sup>3</sup> )	385
	Relació a/c	0.42
	Sorra (kg/m <sup>3</sup> )	842
	Grava (kg/m <sup>3</sup> )	940
	Superplastificant Glenium ACE 325 (kg/m <sup>3</sup> )	3.46
Propietats resistents	Resistència a compressió $f_c$ (MPa)	47.8
	Resistència a flexo -tracció $f_{ct,fl}$ (MPa)	3.6
	Mòdul d'elasticitat $E_c$ (MPa)	27565

Taula 4: Formigó C2

Per tal d'obtenir més informació sobre els àrids i la sorra que es va utilitzar en la fabricació del formigó en els assaigs del C2 es va procedir a fer una granulometria, els resultats es poden observar en la següent Taula 5. (Annex A.2 Granulometria).

ÀRIDS		
Tamís	gr	percentatge
16mm		
10mm	554,8	30,45%
8mm	435,4	23,90%
5mm	697,1	38,26%
4mm	65,9	3,62%
2mm	42,6	2,34%
1mm	9,2	0,50%
restes	16,8	0,92%

SORRA		
Tamís	gr	percentatge
2mm	45	7,02%
1mm	141,9	22,13%
0,63mm	145	22,61%
0,50mm	80,7	12,58%
0,250mm	168,6	26,29%
0,125mm	41,4	6,46%
restes	18,7	2,92%

suma	1821,8	100,00%
------	--------	---------

suma	641,3	100,00%
------	-------	---------

pesat	1821,9
-------	--------

pesat	641,2
-------	-------

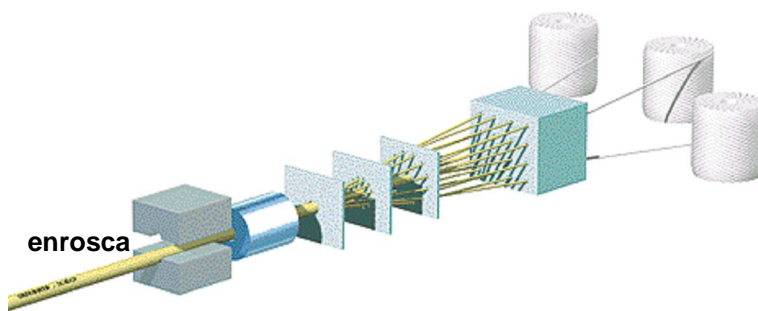
Taula 5: Resum granulometria

### 3.3.2 FRP UTILITZADES EN L'ASSAIG

Per l'armat de les bigues s'han utilitzat barres de reforç de FRP, concretament GFRP. Barres utilitzades de tipus Combar, de l'empresa alemanya Schöck Bauteile GmbH.

Aquestes barres es creen per el sistema de pultrusió (Figura 12). La corruga es mecanitza i per evitar que les fibres trencades es puguin fer malbé un cop mecanitzades se'ls hi fa un bany de resina.

¡Error!



labeling & coating

Concentració de les fibres

Figura 12: Esquema de pultrusió

En aquest cas les barres estudiades tenen una concentració més elevada de fibres que les d'altres fabricants, és per aquest motiu que donen uns valors elevats.

Les nostres barres de matriu polimèrica són de tipus VEU (Vinil Ester Uretano) i fibra de vidre tipus ECR (Electrically and Corrossion Resistant, molt més alta qualitat que un vidre tipus E).

## 4 INSTRUMENTACIÓ

### 4.1 OBJECTIU DE LA INSTRUMENTACIÓ

En el aquest cas, l'objectiu de fer l'estudi de la instrumentació és simple, necessitem uns aparells per mesurar desplaçaments, deformacions, amplades de fissures, les separacions,.. Quan vaig entrar a fer el projecte dins l'estudi, tot l'equip d'instrumentació ja estava escollit, però com que una part molt important del projecte és la realització i l'anàlisi de dades, necessitava saber què era cada aparell, perquè sabia, quina models hi havia,.. Per aquest motiu, en primer lloc vaig haver d'ampliar els meus coneixements en el tema a l'igual que la seva correcta utilització.

### 4.2 MÈTODES I APARELLS PER L'OBTENCIÓ DE RESULTATS EN L'ASSAIG

Per tal de decidir la instrumentació necessària per trobar els resultats oportuns en l'assaig hem de saber uns principis bàsics.

Tota medició extreu de la mesura una energia, això fa que la mesura quedi modificada. Per tant, una medició perfecte és impossible. Els bons instruments es dissenyen per tal de reduir al màxim l'efecte de mesura.

Per fer el nostre estudi hem d'utilitzar aparells capaços de mesurar deformacions molt petites, per aquest motiu s'estudien aparells amb gran precisió i capaços d'apreciar aquestes mesures.

Sensors: és un dispositiu que a partir de l'energia del que es mesura dona una senyal de mesura proporcional en funció de la variable de mesura. Té la capacitat de mesurar magnituds físiques pel seu coneixement i control. Són indispensables en qualsevol estudi experimental de l'enginyeria actual. La selecció d'un sensor ve condicionada de la sensibilitat, exactitud i l'estabilitat de l'aparell.

Els sensors es poden classificar segons tres criteris (Taula 6):

Criteri	Classe	Exemples
Aporten energia	Modulars	Termistor
	Generadors	Termopar
Senyal de sortida	Analògics	potenciòmetre
	Digitals	Codificador de posició
Forma de funcionar	Deflexió	-
	Comparació	-

Taula 6: Classificació de sensors

Una classe de sensors són els transductors: s'anomena transductor a tot tipus de dispositiu que converteix una senyal física en una altra. Els transductors tenen la capacitat de realitzar un canvi d'energia mantenint la relació d'energia.

Tenim 6 tipus de senyals: mecànica, elèctrica, tèrmica, òptica, magnètica i molecular (química).

En el nostre cas els transductors ens convertiran la senyal d'energia mesurada en l'assaig en una senyal elèctrica, ja que d'aquesta manera podem detectar més ràpidament qualsevol variació, podem ampliar la senyal (modificar-la) i ens és més fàcil de registrar, tant en forma numèrica com amb gràfics.

Galgues extensomètriques: permeten llegir un increments de resistències que es tradueixen en deformacions unitàries, ja que són resistències elèctriques.

La lupa ens pot ajudar a veure les amplades de les esquerdes que es generaran en l'assaig de les bigues.

Inclinòmetres: són sensors preparats per obtenir mesures d'angles amb una elevada precisió.

Extensòmetre mecànic: ens donen mesures de longitud entre dos punts en concret. D'aquesta manera pots aconseguir deformacions unitàries en un moment concret dins el mateix assaig, si mesurem la longitud inicial i la de l'instant que ens interessa, les restem i la multipliquem per un factor que ens converteix la mesura de longitud en una deformació mitja.

Per poder obtenir els valors utilitzarem un equip d'adquisició, gràcies a ell podem connectar tots els aparells de mesura a través de canals i poder aconseguir així totes les dades mesurades en els assaigs.

La calibració dels sensors, amb l'ajuda de l'equip d'adquisició, es realitza de la següent manera: es connecten tots els sensors i es posen totes les entrades en un valor fixe constant menys una. L'entrada no utilitzada es varia molt lentament dins un marge de mesura (actua com un patró de referència que ha de ser 10 vegades més gran que el sensor que s'ha de calibrar) i s'observen els valors de sortida. La representació gràfica dels valors de sortida en funció dels d'entrada dona una corba de calibració.

Moltes vegades, com en el nostre cas, no fa falta calibrar els sensors ja que els equips d'adquisició estan preparats per fer-ho.

El procés de mesura consta de diverses fases (Figura 13):

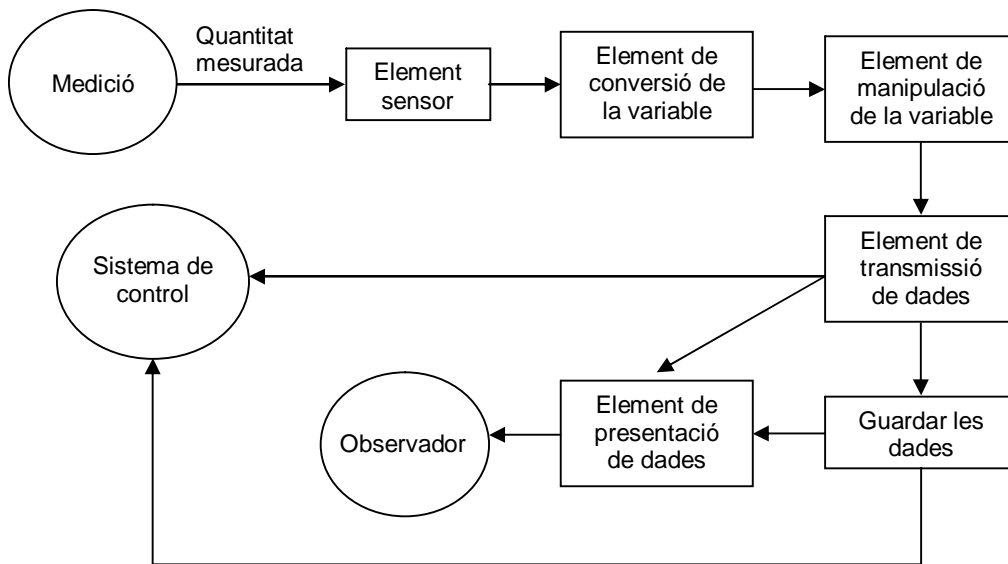


Figura 13: Esquema del procés de mesura

Cal afegir que no sempre ha de seguir el mateix ordre i que algun dels elements pot no ser-hi.

- Element sensor: s'encarrega de rebre l'energia provocada pel desplaçament, la mesura.
- Element conversor: canvia la senyal d'energia de desplaçament per la senyal elèctrica mantenint la informació.
- Element manipulador: la manipulació és un canvi, en el nostre cas numèric, per tant, quan parlem de l'ampliació de la senyal estem modificant un valor numèric, encara que el multipliquem per un valor constant.
- Element de transmissió de dades: la seva funció és enviar les senyals, les dades, a un lloc físicament més lluny, tant pot ser amb ones, amb cables,...
- Element de presentació de dades: tradueix la quantitat mesurada a una forma que l'ésser humà ho pugui interpretar. Ho pot fer de manera contínua (gràfics) com discreta (valors).

A l'hora d'escollir un instrument o altre hem de tenir en compte els següents paràmetres bàsics:

- Precisió d'un aparell: És l'aptitud de l'aparell per donar resultats amb l'error mínim.
- Aproximació d'un aparell: Mínima fracció que és capaç de mesurar un instrument.
- Rang de mesura: la longitud que és capaç de mesurar l'aparell.
- Error: Diferència entre el valor obtingut a la mesura i el valor vertader de la magnitud mesurada. L'error no es pot determinar, però si acotar, a través dels intervals de tolerància.



Hi ha tres classes d'errors:

- Aleatori – variable, no es pot eliminar però si reduir.
- Sistemàtic – constant, de correcció sistemàtica.
- Gruixut – variable i es pot eliminar a través dels criteris de rebuig.

Junt amb l'error hem de conèixer la incertesa (I): el valor obtingut que considera tots els possibles errors que apareixen en una mesura i que s'expressa juntament amb el resultat final de la mesura (x):  $x \pm I$ .

### 4.3 APARELLS UTILITZATS EN L'ASSAIG

#### Índex d'aparells utilitzats en els assaigs

Veure fitxes tècniques dels aparells en l'annex nº

1. Transductor: HLS/100/01
  - a. Dades tècniques: Sensibilitat: 0,2mV/mm, Rang de mesura: 101.97mm, Calibració: a 5VDC i a 20°C
  - b. Objectiu: mesurament de la fletxa al centre de la biga
2. Transductor: HLS/25/04
  - a. Dades tècniques: Sensibilitat:  $515 \cdot 10^{-6}$ /mm, Rang de mesura: 25,8mm, Calibració: Factor de galga 2 Vols:5,21 VDC i Temperatura 20°C
  - b. Objectiu: observar el desplaçament horitzontal en el C2
3. Transductor: HLS/10/01
  - a. Dades tècniques: Sensibilitat:  $914 \cdot 10^{-6}$ /mm, Rang de mesura: 11.0mm, Calibració: Factor de galga 2 Vols:5,21 VDC i Temperatura 20°C
  - b. Objectiu: observar el desplaçament dels recolzaments
4. Transductor: HLS/10/02
  - a. Dades tècniques: Sensibilitat:  $887 \cdot 10^{-6}$ /mm, Rang de mesura: 11,0mm, Calibració: Factor de galga 2 Vols:5,21 VDC i Temperatura 20°C
  - b. Objectiu: observar el desplaçament dels recolzaments
5. Transductor: HLS/10/03
  - a. Dades tècniques: Sensibilitat:  $894 \cdot 10^{-6}$ /mm, Rang de mesura:11,0mm, Calibració: Factor de galga 2 Vols:5,21 VDC i Temperatura 20°C
  - b. Objectiu: observar l'amplada de fissura en les bigues amb pre-fissura
6. Transductor: LVDT/150/01
  - a. Dades tècniques: Rang de mesura: 150mm

- b. Objectiu: permet estudiar les deformacions de la biga a 450mm dels recolzaments, a l'esquerra, assaig C1.
- 7. Transductor: LVDT/150/03
  - a. Dades tècniques: Rang de mesura: 150mm
  - b. Objectiu: permet estudiar les deformacions de la biga a 450mm dels recolzaments, a la dreta. assaig C1.
- 8. Inclínòmetre: INC/10/01
  - a. Dades tècniques: Sensibilitat: 9,6 mV/deg., Incertesa: +/- 10°, Desfasament: 2,49V
  - b. Objectiu: ens permet estudiar l'angle de deformació de la biga
- 9. Inclínòmetre: INC/10/02
  - a. Dades tècniques: Sensibilitat: 9,6 mV/deg., Incertesa: +/- 10°, Desfasament: 2,48V
  - b. Objectiu: ens permet estudiar l'angle de deformació de la biga
- 10. Galgues extensomètriques formigó
  - a. Dades tècniques: Factors de galga: 2,12 (C1), 2,09 (C2) i 2,11(C2), Resistència: 120Ω (C1), 120Ω (C1)
  - b. Objectiu: fer l'estudi de la línia neutra
- 11. Galgues extensomètriques FRP
  - a. Dades tècniques: Factors de galga: 2,07 (C1) i 2,04 (C2) , Resistència: 350Ω (C1) i 350Ω (C1)
  - b. Objectiu: estudiar el comportament de les barres dins el formigó.
- 12. Extensòmetre mecànic
  - a. Dades tècniques: Capacitat: 0,0016/150=  $1.067 \cdot 10^{-5}$  Rang de mesura: 150mm
  - b. Objectiu: trobar les deformacions entre cada piu
- 13. Lupa d'augment
  - a. Dades tècniques: Precisió: 0,05mm, Rang de mesura: 30mm
  - b. Objectiu: observar les fissures
- 14. Cèl·lula de càrrega
  - a. Dades tècniques: Precisió: 0,2%, Càrrega de 20Tn
  - b. Objectiu: controlar la força que fa l'actuador hidràulic
- 15. Equip d'adquisició de dades
  - a. Dades tècniques: Model: Vishay System 5100
  - b. Objectiu: permetre la transformació de les dades per tal que nosaltres les puguem entendre.
- 16. Actuador hidràulic.
  - a. Dades tècniques: Capacitat de 30Tn, Rang del pistó: 280mmm
  - b. Objectiu: dóna la força necessària per fer els assaigs

En la Figura 14 es pot veure la situació dels instruments utilitzats en els assaig:

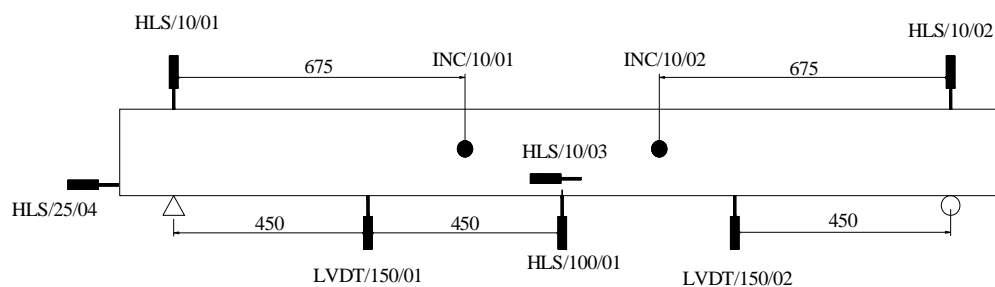


Figura 14: Instrumentació en la biga

## 5 ANÀLISI DE DADES

En aquest apartat s'estudiaran els diferents resultats experimentals extrets a partir dels aparells estudiats anteriorment.

### 5.1 CARACTERITZACIÓ DELS MATERIALS

Les provetes ens permeten fer l'estudi de la caracterització dels materials. En aquest apartat del treball s'estudien dos tipus de provetes, les de formigó i les de FRP.

#### 5.1.1 FORMIGÓ

Tal i com està explicat en l'annex A.1 Provetes de formigó, les provetes de formigó es creen en el mateix moment de formigonat, tenen unes dimensions de 30cm d'alçada i 15cm de diàmetre. Per tal de determinar les propietats del formigó es fan tres tipus d'assaig:

- resistència a compressió (assaig experimental)
- tracció indirecte (assaig experimental)
- resistència a flexo-tracció (comparació amb la norma, explicació en l'apartat ....)

A vegades, per tal de tenir un estudi més acorat del formigó s'extreuen testimonis. Els testimonis s'extreuen directament de l'estructura, un cop han passat un mínim de 28 dies.

##### 5.1.1.1 RESISTÈNCIA A COMPRESSIÓ ( $f_c$ ):

L'assaig de resistència a compressió del C1 i del C2 es varen realitzar als laboratoris de l'empresa CECAM.

L'assaig de resistència a compressió consisteix en aplicar una càrrega fins a la ruptura de la proveta a partir d'una premsa hidràulica (veure en la Figura 15).



Figura 15: Assaig a compressió

## **C1**

Com s'ha explicat anteriorment el formigonat de l'assaig C1 prové d'una sola cuba i s'han obtingut tres provetes per tal de poder assajar-les a compressió.

Dates:

- Data formigonat: 22-05-07 / Data assaig: 22-06-07 com que els assaigs es van realitzar entre 28 i 35 dies després del formigonat, s'adopta una resistència intermèdia de data d'assaig de 31 dies.
- Hem de passar els resultats a 28 dies per poder-los comparar amb els teòrics. Per fer-ho utilitzem la norma MC 90 que ens dóna les següents fórmules:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm}$$

On:

$f_{cm}(t)$ : la resistència a compressió a la data que volem

$f_{cm}$ : resistència a compressió que tenim

on:  $\beta_{cc}(t) = e^{s(1-\sqrt{28/t})}$ , s = coeficient segons el tipus de ciment (0,25 normal)

	31 dies	28 dies
Compressió 1	32.8 MPa	31.21 MPa
Compressió 2	31.1 MPa	29.59 MPa
Compressió 3	32.3 MPa	30.73 MPa
Mitja:	<u>32.07 MPa</u>	<u>30.51MPa</u>

En aquest cas es pot observar que la resistència que ens donen les provetes és més elevada que l'estimada en un principi (25 MPa).

## **C2**

Bigues formigonades de dos en dos (a i b). El formigó es va fabricar in situ. S'han fet assaigs de provetes i testimonis de les bigues.

### PROVETES

Sèrie D1: Provetes a compressió (20-04-2007) a 29 dies

- Ref. 2: 46,1 MPa
- Ref. 2: 44,1 MPa
- Ref. 2: 45,5 MPa

Mitja: 45,23 MPa (45,03 MPa a 28 dies)

Sèrie D2: Provetes a compressió (02-05-2007) a 41 dies

- Ref. 1: 52,0 MPa
- Ref. 1: 49,9 MPa
- Ref. 2: 49,2 MPa

Mitja: 50,37 MPa (48,23 MPa a 28 dies)

TESTIMONIS (02-05-2007) a 41 dies

- C2-212-D1: Biga a: 65,2 MPa, Biga b: 50,6 MPa  
Mitja: 57,9 MPa (55,44MPa a 28 dies)
- C2-216-D1-b: 55,1 MPa (52,75 MPa a 28 dies)
- C2-316-D1-a: 50,7 Mpa(48,54 MPa a 28 dies)
- C2-212-D2 a: 34,6 MPa (41d) (33,13MPa a 28 d)
- C2-212-D2 b: 40,7 MPa (63 d) (37,44MPa a 28 d)  
Mitja: 35,28 (28 d)

RESUM PROVETES I TESTIMONIS (Resultats a 35 dies)

Resum 35 dies	Provetes	Testimonis (28d)	<u>Adoptem</u>
C2_212_D1	46.23	55.44	<u>46.23MPa</u>
C2_216_D1	46.23	52.75	<u>46.23MPa</u>
C2_316_D1	46.23	48.54	<u>46.23MPa</u>
C2_212_D2	49.51	36.22(35d)	<u>36.22MPa</u>
C2_216_D2	49.51	NO	<u>49.51MPa</u>
C2_316_D2	49.51	NO	<u>49.51MPa</u>

Adoptem sempre el resultat de la proveta, excepte en el cas de les bigues C2\_212\_D2. En aquestes hem adoptat la compressió del testimoni perquè van ser les de les primeres amassades i donen uns resultats molt inferiors als esperats.

Tal com es pot observar en el resum anterior, la resistència que tenim és inferior a la teòrica, ja que nosaltres volíem que el nostre formigó C2 tingues una resistència de 50 MPa.

**5.1.1.2 TRACCIÓ INDIRECTA (fct,sp):**

Assaig a tracció normalitzat segons UNE 83.306/85 (Assaig brasileny). Realitzat als laboratoris del CECAM Figura 16.

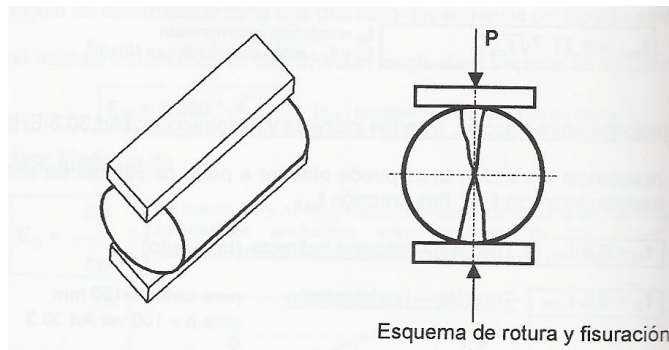


Figura 16: Assaig a tracció indirecta

Normalment no ens podem fiar de la resistència a tracció del formigó, sabem que té una resistència a la tracció a causa de l'adherència, esforç tallant, però no molt elevat, és per això que ens els ELU es considera que el formigó no treballa a tracció. Per exemple la norma espanyola EHE valora la resistència a tracció com a 1/10 part de la resistència a compressió.

### C1

Dates:

- Data formigonat: 22-05-07 / Data assaig: 22-06-07, a l'igual que abans també fem la mitja dels dies d'assaig i agafem els resultats a 29 dies
- Hem de passar els resultats a 28 dies per poder-los comparar amb els teòrics. Per fer-ho transformem la resistència a tracció a la de compressió, passem aquesta a 28 dies, després a 29 dies i la tornem a passar a resistència de tracció

	31 dies	29 dies
Tracció Indirecta 1	3.2 MPa	3.16 MPa
Tracció Indirecta 2	3.2 MPa	3.16 MPa
Mitjana:	<u>3.2 MPa</u>	<u>3.16 MPa</u>

### C2

Sèrie D1 Tracció indirecta (20-04-2007) a 29 dies

- Ref. 2: 19,28 Tn = 2,68 MPa
  - Ref. 2: 21,50 Tn = 2,98 MPa
- Mitja: 2,83 MPa (2,82 MPa a 28 d)

Sèrie D2 Tracció indirecta (02-05-2007) a 41 dies

- Ref. 1: 25,32 = 3,51 MPa
  - Ref. 1: 31,01 = 4,30 MPa
- Mitja: 3,91 MPa (3.78 MPa a 29 d)

### 5.1.1.3 MÒDUL D'ELASTICITAT ( $E_c$ )

Assaig segons norma ASTM C 469/87. Realitzat als laboratoris d'AMADE.

C1

Assaig	35 dies (26/06/07)	28 dies
Ref_2_1	25925 MPa	
Ref_2_2	25765 MPa	
Mitja	<u>25845 MPa</u>	<u>25506.2 MPa</u>

C2

Assaig	42 dies	28 dies
Ref_1_1	27576	26950.7 MPa
Ref_1_2	28854	28199.4 MPa
Ref_0_1	26507	25905.9 MPa
Ref_0_2	27321	26701.4 MPa
Mitja	<u>27564.5 MPa</u>	<u>26939.3 MPa</u>

Valor adoptat per al càlcul: el corresponent a 28 dies: 26939.3 MPa.

### 5.1.2 FRP

Assaig a tracció (Figura 17) realitzat al laboratori de Resistència de Materials de la Universitat de Girona amb una màquina universal d'assaigs a tracció.

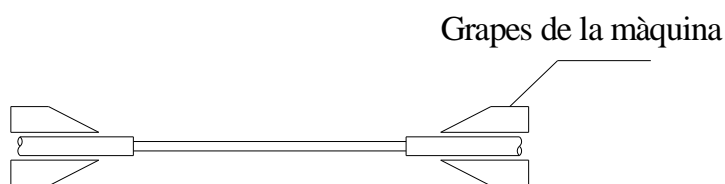


Figura 17: Assaig a tracció

Les normes utilitzades en la realització dels assaigs són: CSA S806-02 i la ACI 440.3R-04

#### Resultats d'assaigs de les barres assajades:

S'han realitzat tres assaigs a tracció de barres de 12mm de diàmetre i dos de diàmetre 16mm (Taula 7 i Taula 8).



	DIÀMETRE 12				DIÀMETRE 16		
	COMBAR 01/12	COMBAR 02/12	COMBAR 02/12	VALOR MIG	COMBAR 01/16	COMBAR 02/16	VALOR MIG
$f_{fu}$	1035.89	1071.29	1330.71	<b>1145.96</b>	1062.35	929.46	<b>995.91</b>
$E_f$	63399.58	93627.13*	63105.07	<b>63252.33</b>	65611.92	62692.35	<b>64152.14</b>

Taula 7: Resultats assaig FRP

Diàmetre nominal (mm)	Tensió de ruptura $f_{fu}$ (MPa)	Mòdul de Elasticitat $E_f$ (MPa)	Propietats mecàniques segons fabricant	
			$f_{fu}$ (MPa)	$E_f$ (MPa)
12	1145.96	63252.33	1000	60000
16	995,41	64152,14	1000	60000

Taula 8: Resultats assaigs FRP

Com es pot veure en els resultats dels assaigs a tracció hi ha una barra de diàmetre 12mm\* que dona el mòdul d'elasticitat molt més elevat, per tant l'hem descartat. Això pot ser degut als passadors que subjectaven les barres a l'hora dels assaigs, ja que en algun cas ni va haver alguna que es va trencar just per el punt d'unió.

## 5.2 ANÀLISI DE LA CURVATURA

### 5.2.1 ANÀLISI DE LA CURVATURA DEL FORMIGÓ 25MPa (C1)

Per poder trobar els resultats experimentals de curvatura s'han seguit els següents passos:

En primer lloc s'ha fet un recull de tots els valors extrets en l'assaig. S'han recopilat les dades de l'extensòmetre mecànic, tal com es pot veure en la Figura 18, s'han pres dades de deformació entre els punts 1 i 3 (superior) entre 1 i 2 (tallant) i finalment entre 2 i 4 (inferior).

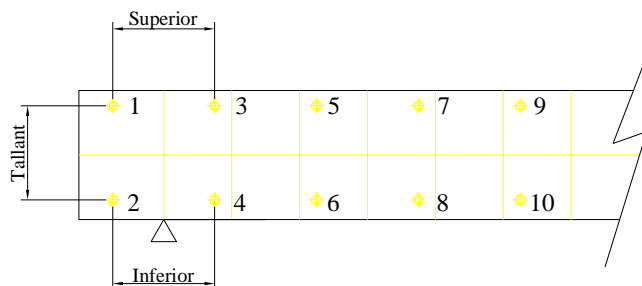


Figura 18: Esquema de mesures de curvatura C1

Després de recopilar totes les dades de l'extensòmetre mecànic s'ha calculat el valor absolut. Posteriorment s'han buscat els valors unitaris, multiplicant-los per 0,16 (factor de l'extensòmetre) i dividint-los per 150 (distàncies entre dos discs metàl·lics).

Per tal de trobar les curvatures s'han seguit els següents passos:

- Les curvatures dels extrems són nul·les.
  - Per trobar la curvatura, sempre en funció de la parada, ja que és cada quan tenim les dades de l'extensòmetre, s'ha fet amb la següent formula:  $(-def. Unit. Sup. + def. unit inf.) / 150$  (distància vertical entre les dos deformacions). D'aquesta manera obtenim un total de 11 curvatures més les dels extrems
- Figura 19.

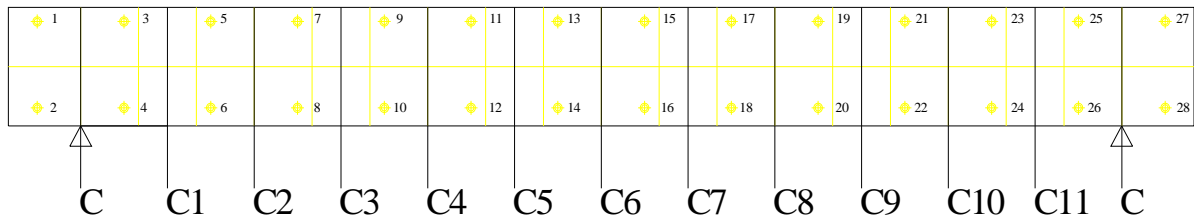


Figura 19: Curvatures C1

Cal recordar que les bigues tenen una longitud de 2.05metres, però com que estan recolzades a una distància de 125mm dels extrems es prendrà com a zero en longitud el punt del primer recolzament (just on la curvatura és 0).

### 5.2.2 ANÀLISI DE LA CURVATURA DEL FORMIGÓ 50MPa (C2)

Cal afegir que en el cas del C2 només es varen col·locar 8 pins en la zona central de la biga, ja que en aquest cas només es volia estudiar la zona de flexió pura (Figura 20).

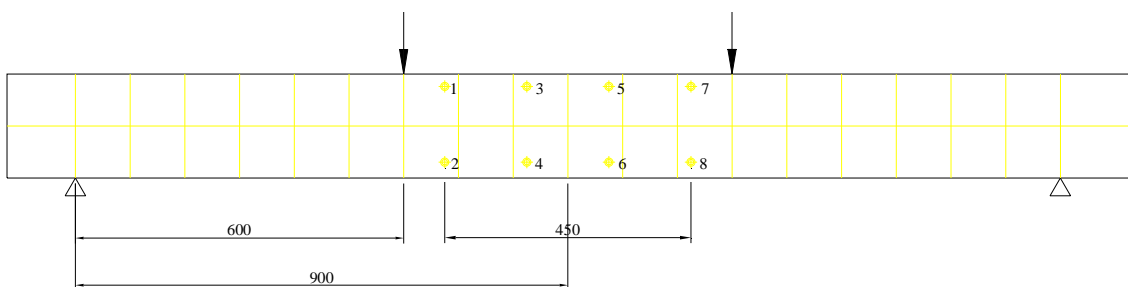


Figura 20: Esquema de mesures de curvatura C2

Un cop tenim preses les distàncies entre pins amb l'extensòmetre manual passem les mesures a valor absolut, igual que en el C1.

Trobem les deformacions unitàries de les dades anteriors. (\*0.16(factor))/150 (distància entre dos pius) i tot seguit calculem les curvatures Figura 21:

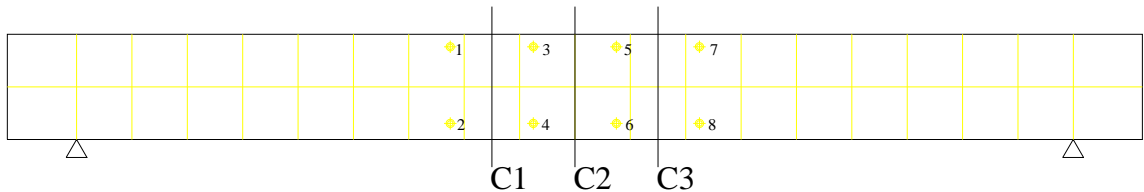


Figura 21: Curvatures C2

Per obtenir els valors de deformació ho fem a partir de la següent fórmula i Figura 22:

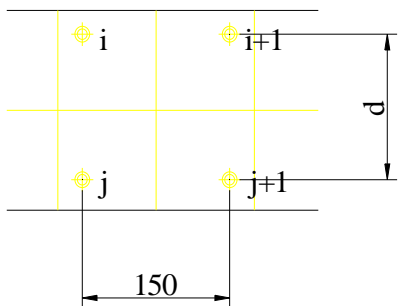


Figura 22: Dades extensòmetre mecànic

$$C^t = \frac{\varepsilon_{i-(i+1)}^t + \varepsilon_{j-(j+1)}^t}{d}$$

On:

C: curvatura en la parada

$$\varepsilon_{i-(i+1)} = 0,16 \left( \frac{\Delta_{i-(i+1)}^t - \Delta_{i-(i+1)}^{t-1}}{150} \right)$$

t: parada

0,16: factor de l'extensòmetre mecànic

150: distància entre discs

### 5.2.3 DETERMINACIÓ DE LES CURVATURES

Per trobar les curvatures hem de saber el moment de fissuració (apartat 5.3 MOMENT DE FISSURACIÓ), ja que en funció de la càrrega de fissuració tenim una fórmula o una altra per trobar els valors de curvatures

Un cop tenim el moment de fissuració tenim dos casos a estudiar, quan el moment que s'està aplicant a la biga és més petit que el moment de fissuració i quan el moment és més gran.

Per altra banda, els inclinòmetres també ens donen dades de curvatura. La curvatura llegida per els inclinòmetres ens dóna un valor mig de la curvatura en la zona de flexió pura.

La curvatura extreta a partir dels inclinòmetres es calcula amb la següent fórmula:

$$C_m = \frac{\pi}{180} \left( \frac{abs(\theta_1) + abs(\theta_2)}{450} \right)$$
 on  $\theta_1$  i  $\theta_2$  són els valors dels inclinòmetres calculats amb valors absoluts Figura 23.

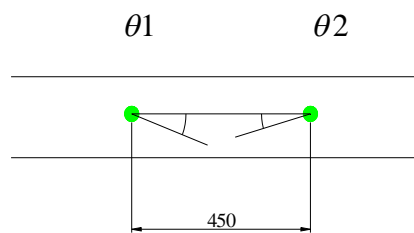


Figura 23: Inclinòmetres

A partir d'aquesta  $C_m$  es dedueix l'evolució de la curvatura al llarg de tota la biga i amb l'ajuda del Matlab es crea una rutina perquè les dades que es calculen siguin en funció de les parades.

- Si el moment és més gran que el de fissuració:

- la curvatura pren el valor de  $\frac{C_m \cdot x}{600}$  on;

X: distància des del primer suport.

$C_m$ : curvatura dels inclinòmetres  $C_m = \frac{\pi}{180} \left( \frac{abs(\theta_1) + abs(\theta_2)}{0.45} \right)$

- Si el moment és més petit que el de fissuració la secció no està fissurada:

- la curvatura pren el valor de  $\frac{P_{cr} \cdot 1000 \cdot x}{2 \cdot (E_c / I_g)}$  on:

$P_{cr}$ : càrrega de fissuració

X: la distància des del primer suport

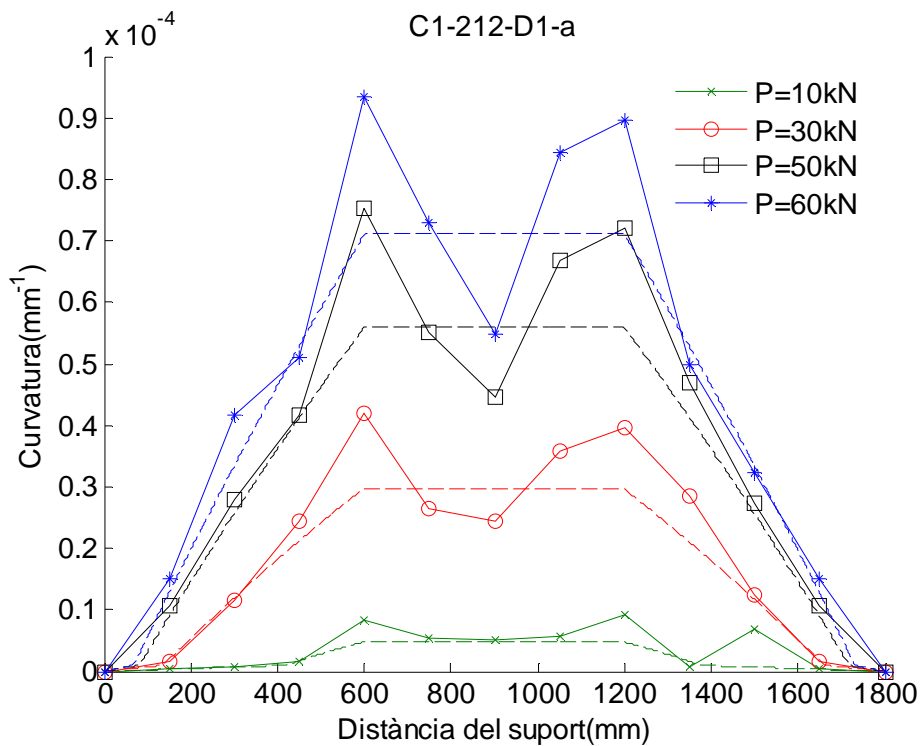
$E_c$ : mòdul d'elasticitat (Taula 9)

$I_g$ : inèrcia de la secció:  $1/12 \cdot b \cdot h^3$  Taula 9

Biga tipus	Ec	Ib
C1-212-D1	25845	80021666,7
C1-216-D1		80021666,7
C1-316-D1		80021666,7
C1-212-D2		91453333,3
C1-216-D2		91453333,3
C1-316-D2		91453333,3
C2-212-D1	2764,5	80021666,7
C2-216-D1		80021666,7
C2-316-D1		80021666,7
C2-212-D2*	25845	91453333,3
C2-216-D2	2764,5	91453333,3
C2-316-D2		91453333,3

Taula 9: Ec i Ib per cada biga

Gràcies a l'obtenció d'aquest resultat es pot procedir a extreure gràfics per començar-los a estudiar.



Aquests gràfics ens mostren l'evolució de la curvatura en funció de la parada i per cadascuna de les curvatures trobades.

La figura amb línies contínues són els valors extrets de l'extensòmetre mecànic, mentre que els valors amb línia discontinua són a partir dels inclinòmetres.

Tal i com es pot observar en l'annex A.3 Anàlisi de la curvatura, en la primera parada els valors dels inclinòmetres i els de l'extensòmetre són molt semblants, però a mesura que es va aplicant càrrega la diferència entre els dos és més gran.

També es pot observar que el supòsit de curvatura constant en la zona de flexió pura no es compleix en les lectures extrems de l'extensòmetre mecànic.

### 5.3 MOMENT DE FISSURACIÓ

Tal com s'ha explicat a l'apartat anterior, l'anàlisi de la curvatura al llarg de la biga va en funció del moment de fissuració, ja que depenen d'aquest ens trobem en un estat (biga no fissurada) o en un altre (biga fissurada).

Existeixen molts mètodes per definir el moment de fissuració, en aquest treball ens basem en dues rectes simbòliques del gràfic de la Figura 24 que ens mostra la progressió de la fletxa donada per el transductor segons la càrrega:

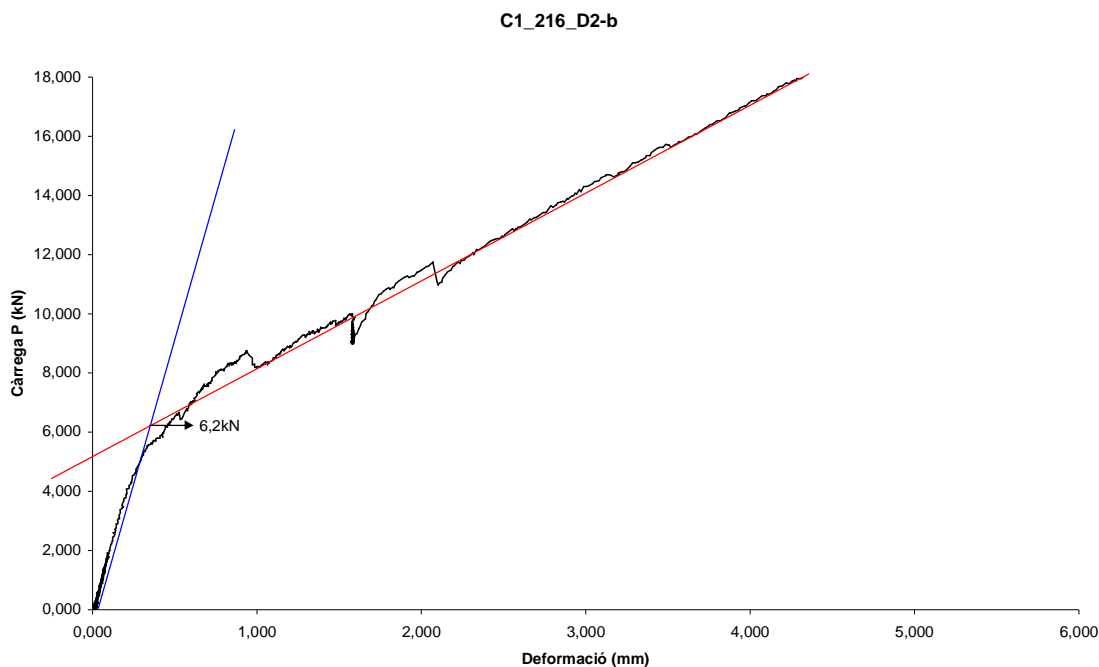


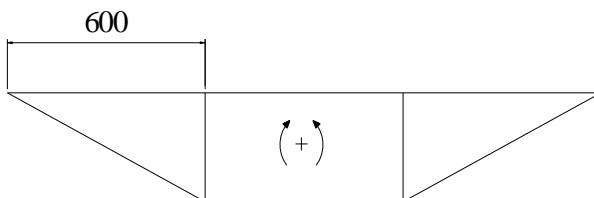
Figura 24: Càrrega-Deformació

La recta blava ens mostra la tendència de la biga abans de ser fissurada, mentre que la vermella ens mostra la tendència de la biga un cop ja ha estat fissurada.

Per tant, entre aquests dos moments és on hi ha la càrrega de fissuració ( $P_{cr}$ ). La intersecció de les dues rectes ens dona el punt que busquem.

Per trobar la fletxa a partir dels transductors ens hem ajudat de unes rutines creades amb el programa informàtic Matlab que en veuen reflectides en l'apartat .... de càrrega deformació.

Un cop tenim la càrrega de fissuració hem de buscar el moment, com que sabem que el moment màxim es troba just al centre de la biga, Figura 25 hem de dividir la càrrega per dos i multiplicar-la per la distància (600mm).



$$M_{\text{màx}} = P/2 \cdot 0,6$$

Figura 25: Diagrama de moments

D'aquesta manera podem trobar els moments de fissuració de cada biga, veure els gràfics en l'annex ... Moments de fissuració.

En la

Biga tipus	Pcr (kN)	Mcr (kNm)
C1-212-D1	6,75	2,025
C1-216-D1	7,35	2,205
C1-316-D1	9,10	2,73
C1-212-D2	7,30	2,19
C1-216-D2	6,20	1,86
C1-316-D2	7,35	2,205
C2-212-D1	9,80	2,94
C2-216-D1	9,25	2,775
C2-316-D1	10,75	3,225
C2-212-D2	9,60	2,88
C2-216-D2	10,60	3,18
C2-316-D2	11,50	3,45

**Taula 10** es pot observar el resum de càrregues de fissuració (Pcr) per cada biga i el moment de fissuració.

Biga tipus	Pcr (kN)	Mcr (kNm)
C1-212-D1	6,75	2,025
C1-216-D1	7,35	2,205

C1-316-D1	9,10	2,73
C1-212-D2	7,30	2,19
C1-216-D2	6,20	1,86
C1-316-D2	7,35	2,205
C2-212-D1	9,80	2,94
C2-216-D1	9,25	2,775
C2-316-D1	10,75	3,225
C2-212-D2	9,60	2,88
C2-216-D2	10,60	3,18
C2-316-D2	11,50	3,45

Taula 10: Resum de moments de fissuració

Un cop ja tenim totes les dades necessàries per les bigues podem fer una taula resum on hi ha totes les dades necessàries per fer els càlculs experimentals i teòrics (Taula 11):

Biga tipus	b	recobriment	Ec	Ef	Ib	fr
C1-212-D1	140	20	25845	63252,33	80021666,7	2,40
C1-216-D1	140	20		64152	80021666,7	2,60
C1-316-D1	140	20		63252,33	80021666,7	3,20
C1-212-D2	160	40		64152	91453333,3	2,30
C1-216-D2	160	40		63252,33	91453333,3	1,90
C1-316-D2	160	40		64152	91453333,3	2,30
C2-212-D1	140	20	2764,5	63252,33	80021666,7	3,50
C2-216-D1	140	20		64152	80021666,7	3,30
C2-316-D1	140	20		63252,33	80021666,7	3,80
C2-212-D2	160	40		64152	91453333,3	3,00
C2-216-D2	160	40		63252,33	91453333,3	3,30
C2-316-D2	160	40		64152	91453333,3	3,60

Taula 11: Resum de dades

## 5.4 RESPOSTA CÀRREGA-DEFORMACIÓ

La relació càrrega – deformació és molt útil per observar el comportament deformatiò del material i la seva evolució al augmentar la càrrega. Per trobar la relació càrrega-deformació de cada biga, s'han utilitzat les mesures del l'extensòmetre mecànic, dels transductors i dels inclinòmetres i s'han tractat mitjançant rutines del Matlab.

### 5.4.1 TRANSDUCTOR VERTICAL



El transductor HLS/100/01 situat just al centre de la biga ens permet obtenir mesures de desplaçament vertical del punt central de la biga, mentre que amb l'ajuda de transductors en els recolzaments o els rellotges comparadors tenim els desplaçaments dels recolzaments. Amb tota aquesta instrumentació, es pot realitzar una mesura relativa de la fletxa en el centre de la biga tenint en compte els possibles assentaments dels recolzaments.

Mesura de la deformació per al cas de bigues tipus C1:

- En aquest assaig només es col·loca un transductor per recolzament, de tal manera que el desplaçament dels suports és:

$Disp\_sup\_a$  (desplaçament mig de suports) =  $(Disp\_sup1\_a + Disp\_sup2\_a) / 2$ ;

- Per tal d'obtenir el càlcul general del desplaçament central se sumen les mesures dels transductors laterals a les mesures del transductor central, ja que els transductors dels recolzaments es van col·locar de forma invertida a la del transductor central.

$Disp\_mid1\_a = Disp\_midspan\_a + Disp\_sup\_a$ ;

Mesura de la deformació en el cas de bigues tipus C2:

- En aquest cas es situen dos transductors al suport fix i dos rellotges comparadors en el suport mòbil. Per tal d'obtenir el resultat dels desplaçaments dels suports es fa la mitja dels quatre aparells de mesura i es resta/suma el valor del transductor central.

Veure extensament en l'apartat A.5.1 Rutines de Matlab.

#### 5.4.2 INCLINÒMETRES

La mesura de la fletxa mitjançant els inclinòmetres es realitza a través de la integració de curvatures. Gràcies als 2 inclinòmetres, s'obté una "curvatura mitja" ( $C_m$ ) en la zona de flexió pura. Per a la zona de flexió simple, es fa la hipòtesi que la biga té una curvatura proporcional al moment  $C = M/EI$ , fins que arriba a una curvatura "de fissuració" ( $C_{cr}$ ), que es dona quan el moment arriba al moment de fissuració ( $M_{cr}$ ). A partir d'aquest punt es suposa una relació lineal entre la curvatura de fissuració i la curvatura mitja.

A l'hora de fer el tractament de dades dels inclinòmetres hem de tenir en compte que es basen a partir de la "curvatura de fissuració", que es pot obtenir de diferents maneres:

1. Del moment de fissuració teòric
2. Del moment de fissuració experimental de cada biga

Tal i com s'ha vist en l'apartat 5.3 MOMENT DE FISSURACIÓ la càrrega de fissuració és un paràmetre molt aleatori, que resulta difícil de determinar amb exactitud. Per al present treball, el moment de fissuració considerat és el determinat en l'apartat 5.3.

Veure extensament en l'apartat A.5.1 Rutines de Matlab.

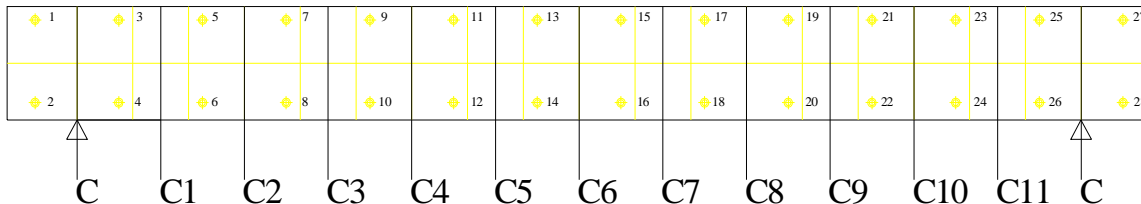
### 5.4.3 EXTENSÒMETRE MECÀNIC

L'extensòmetre mecànic dona una mesura de deformació unitària per a cada parada de càrrega. Al disposa de dues lectures, una en la fibra superior i una altra en la inferior, es pot extreure la lectura de la curvatura mitja per cada 150mm.

Per tal de poder analitzar les dades de l'extensòmetre mecànic cal recordar que en el primer i el segon assaig les bigues es van instrumentar de diferent forma, per tant el tractament de les dades serà diferent.

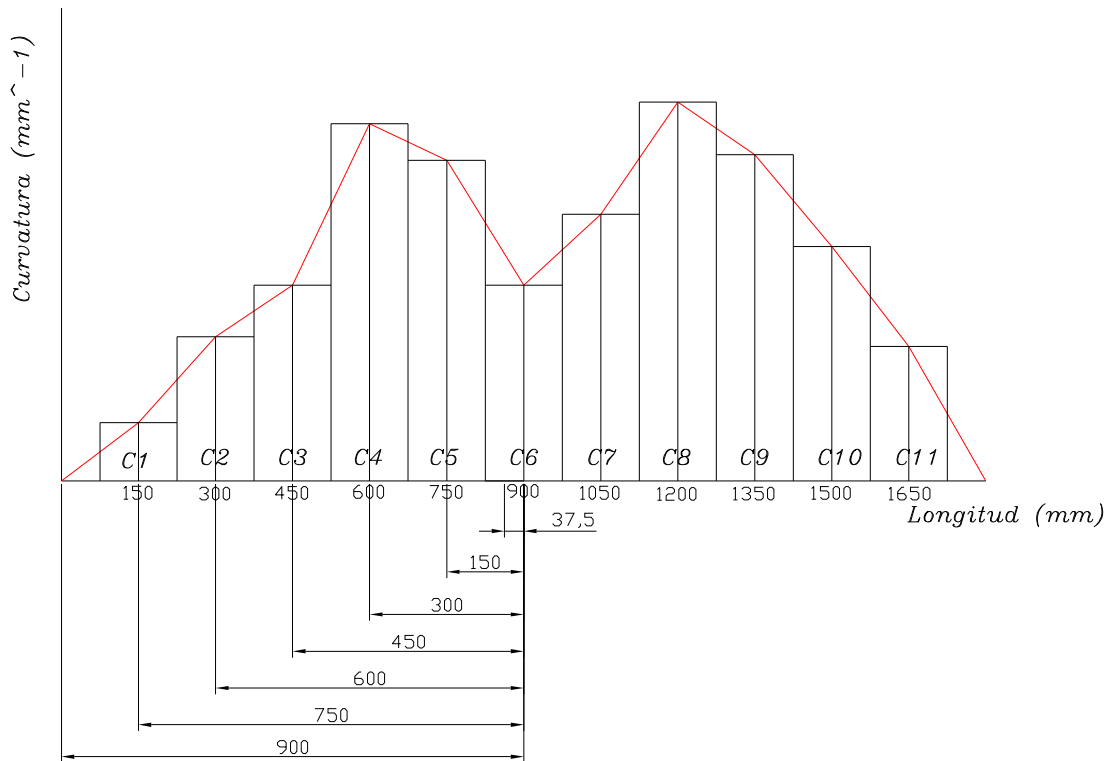
Extensòmetre manual per bigues C1

En aquesta sèrie s'han col·locat pivots o discs metàl·lics per tal de poder trobar resultats de curvatura al llarg de tota la biga.



#### Procediment

- Es crea un vector-columna que llegeixi la càrrega on s'ha fet cada parada en l'assaig i la passi a moment flector:



$$M\_ext\_a(i,1)=Load\_step\_a(i,1)*L/6*1000;$$

- Es calcula un vector-columna de la reacció de la “biga conjugada” amb les curvatures com a càrregues per a cada recolzament (una reacció per a cada recolzament):

$$Reac1\_ext\_a(i,1)=1/1800*150*(C1\_ext\_a(i,1)*1650+C2\_ext\_a(i,1)*1500+C3\_ext\_a(i,1)*1350+C4\_ext\_a(i,1)*1200+C5\_ext\_a(i,1)*1050+C6\_ext\_a(i,1)*900+C7\_ext\_a(i,1)*750+C8\_ext\_a(i,1)*600+C9\_ext\_a(i,1)*450+C10\_ext\_a(i,1)*300+C11\_ext\_a(i,1)*150);$$

$$Reac2\_ext\_a(i,1)=150*(C1\_ext\_a(i,1)+C2\_ext\_a(i,1)+C3\_ext\_a(i,1)+C4\_ext\_a(i,1)+C5\_ext\_a(i,1)+C6\_ext\_a(i,1)+C7\_ext\_a(i,1)+C8\_ext\_a(i,1)+C9\_ext\_a(i,1)+C10\_ext\_a(i,1)+C11\_ext\_a(i,1))-Reac1\_ext\_a(i,1);$$

- Es calcula un vector-columna corresponent al moment de la “biga conjugada” en el centre de la biga, tenint en compte la reacció del recolzament de la dreta i un altre vector-columna corresponent al moment de la “biga conjugada” en el centre de la biga, tenint en compte la reacció del recolzament de l'esquerra.

$$Disp1\_ext\_a(i,1)=Reac1\_ext\_a(i,1)*L/2-(C1\_ext\_a(i,1)*150*750+C2\_ext\_a(i,1)*150*600+C3\_ext\_a(i,1)*150*450+C4\_ext\_a(i,1)*150*300+C5\_ext\_a(i,1)*150*150+C6\_ext\_a(i,1)*75^2/2);$$

$$\text{Disp2\_ext\_a}(i,1)=\text{Reac2\_ext\_a}(i,1)*L/2- \\ (\text{C11\_ext\_a}(i,1)*150*750+\text{C10\_ext\_a}(i,1)*150*600+\text{C9\_ext\_a}(i,1)*150*450+\text{C8\_ext\_a}(i,1)*150* \\ 300+\text{C7\_ext\_a}(i,1)*150*150+\text{C6\_ext\_a}(i,1)*75^2/2);$$

La fletxa llegida per l'extensòmetre manual es considera la mitja de les dues anteriors:

$$\text{Disp\_ext\_a}(i,1)=(\text{Disp1\_ext\_a}(i,1)+\text{Disp2\_ext\_a}(i,1))/2;$$

#### Extensòmetre manual per bigues C2

En els assaigs de la segona sèrie els discs metàl·lics (Figura 26) només s'han col·locat en la zona central, on la curvatura es suposa constant. Per tal de determinar la resta d'evolució de curvatures, es segueixen els mateixos supòsits que s'han seguit en l'apartat 5.4.2 per al càlcul de la fletxa segons les mesures dels inclinòmetres.

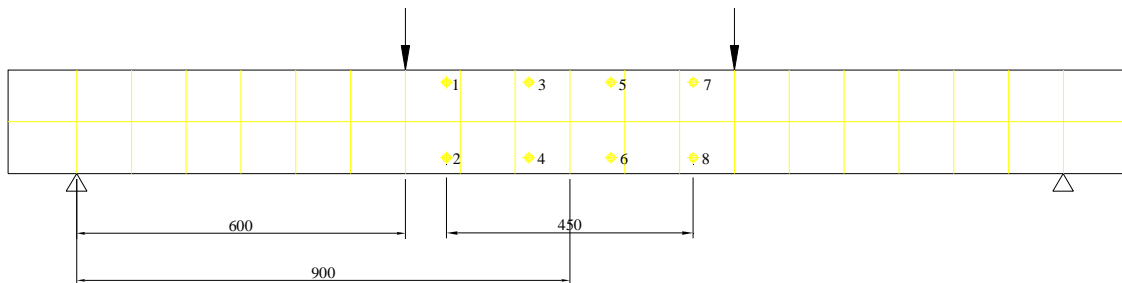


Figura 26: Col·locació dels discs metàl·lics per el C2

Veure extensament en l'apartat A.5.1 Rutines de Matlab.

D'aquesta manera hem pogut obtenir diferents gràfics que relacionen càrrega-deformació, i donats per les tres mesures explicades: transductor vertical, inclinòmetres i extensòmetre mecànic. En la **Figura 27** es mostra un exemple de la relació càrrega-deformació.

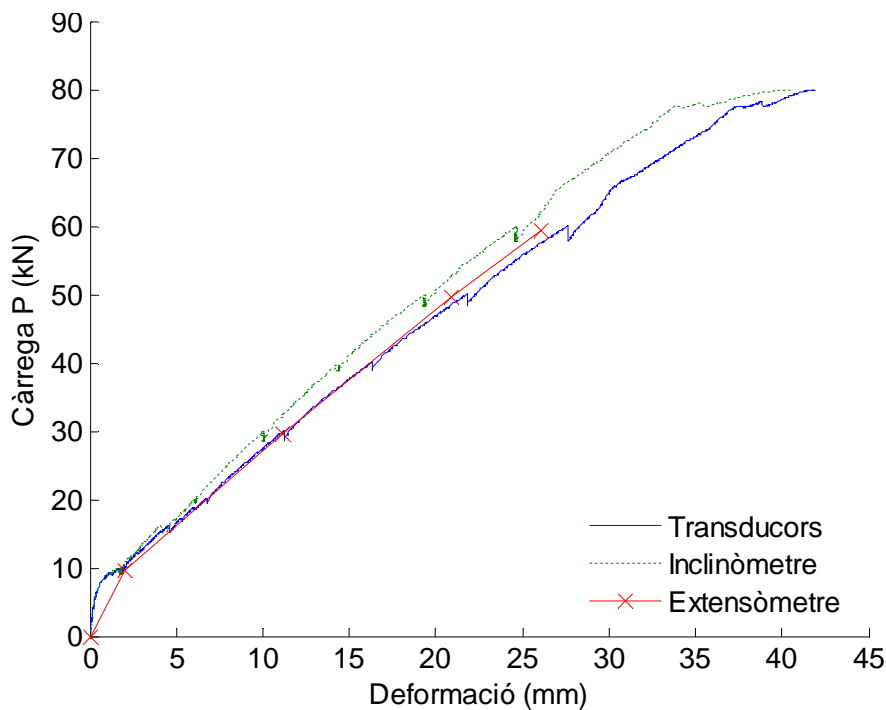


Figura 27: Exemples de càrrega deformació

En aquests gràfics, s'observa una primera branca de comportament més rígid, donada quan la biga es troba sense fissurar i per tant la rigidesa de la secció és  $E \cdot I_g$  (on  $I_g$  és la inèrcia bruta). A partir de la càrrega de fissuració, la relació càrrega-deformació canvia de pendent, tornant-se menys rígid, degut a l'efecte de la fissuració del formigó. S'observa que la tendència un cop la secció està totalment fissurada és lineal fins que s'arriba a la càrrega de ruptura, ja que, la ruptura del material és fràgil.

En les bigues tipus C1, es van col·locar dos transductors en la zona de flexió simple, a 450mm dels recolzaments. D'aquests transductors també se'n pot extreure la lectura de fletxa, i es pot comparar amb la que s'obté de la lectura de l'extensòmetre mecànic fins a aquestes posicions. La Figura 28 mostra un exemple d'aquesta relació, essent el la posició "1" la propera al recolzament fixa i la posició "2" la propera al recolzament mòbil.

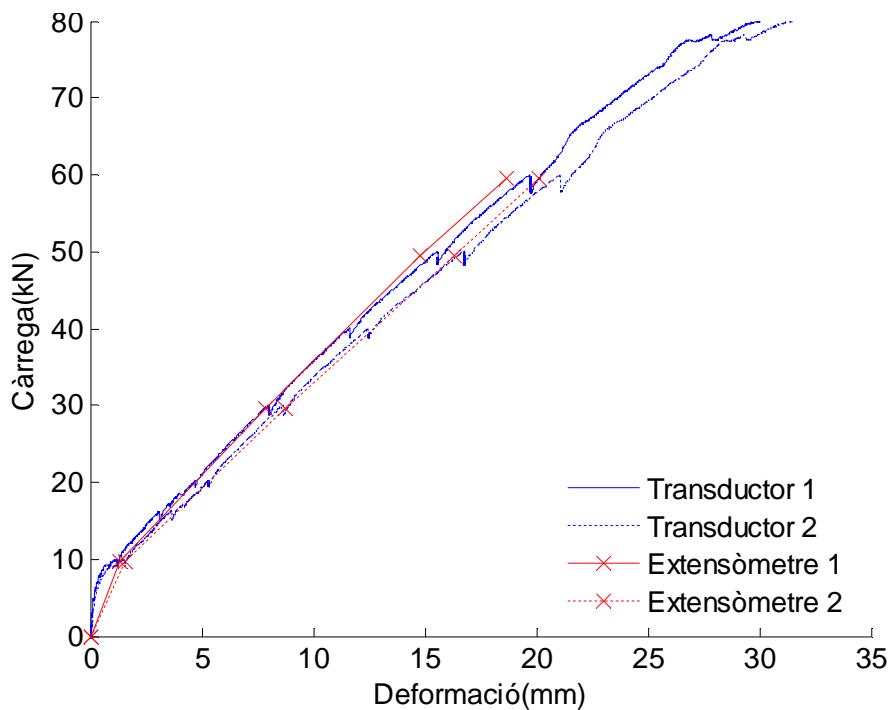


Figura 28: Transductors i extensòmetre

## 5.5 AMPLADA DE FISSURA

Per obtenir els resultats de l'amplada de fissura s'han utilitzat dos aparells de mesura. Per una banda tenim el transductor horitzontal HLS/10/03 situat a l'alçada del reforç. Aquest només es va col·locar a les bigues tipus "b", en els que es fa realitzar una pre-fissura en el centre de la biga per tal d'intentar que una de les esquerda es propagués en aquesta direcció coneguda i poder controlar l'amplada de fissura amb el transductor.

Per l'altre banda es va disposar d'una lupa d'augment, amb la qual es van prendre les mesures de diferents amplades d'esquerda per a cada parada durant l'assaig.

Gràcies a la lupa d'augment es disposen els següents resultats:

Taula 12: C1\_212

Taula 13: C1\_216

Taula 154: C1\_316

Taula 175: C2\_212

Taula 176: C2\_216

Taula 17: C2\_316

C1\_212

parada	mesura		C1-212-D1-A	C1-212-D1-B	C1-212-D2-A	C1-212-D2-B	
1	Sup.	mitjana	0,00	0,00			
	Inf.		0,05	0,00	0,10	0,10	
2	Sup.		0,13	0,09			
	Inf.		0,21	0,00	0,29	0,30	
3	Sup.		0,28	0,14			
	Inf.		0,41	0,25	0,40	0,72	
4	Sup.		0,40	0,28			
	Inf.		0,59	0,41	0,58	0,87	
5	Sup.		0,59	0,50			
	Inf.		0,89	0,59	0,79	1,04	
6	Sup.		0,68	0,71			
	Inf.		1,04	0,63			
			màxim	2,00	1,20	1,70	2,20

Taula 12:Amplada de fissura C1\_212

On:

Sup. mesura a l'alçada dels discs metàl·lics.

Inf. mesura al final de la cara de la biga.

C1\_216

parada	mesura		C1-216-D1-A	C1-216-D1-B	C1-216-D2-A	C1-216-D2-B
1	Sup.	mitjana	0,05	0,02		
	Inf.		0,05	0,02	0,10	0,08
2	Sup.		0,09	0,05		
	Inf.		0,17	0,10	0,29	0,24
3	Sup.		0,14	0,09		
	Inf.		0,23	0,21	0,46	0,39
4	Sup.		0,18	0,14		
	Inf.		0,31	0,25	0,66	0,60
5	Sup.		0,25	0,17		
	Inf.		0,43	0,33	0,82	0,97
6	Sup.		0,33	0,26		
	Inf.		0,49	0,45	0,94	1,13
7	Sup.		0,36	0,36		
	Inf.		0,55	0,54		
		màxim	0,70	0,60	1,30	1,50

Taula 13:Amplada de fissura C1\_216

On:

Sup. mesura a l'alçada dels discs metàl·lics.

Inf. mesura al final de la cara de la biga.



C1\_316

parada	mesura		C1-316-D1-A	C1-316-D1-B	C1-316-D2-A	C1-316-D2-B
1	Sup.	mitjana	0,07	0,05		
	Inf.		0,09	0,05	0,10	0,00
2	Sup.		0,11	0,05		
	Inf.		0,16	0,07	0,13	0,12
3	Sup.		0,15	0,08		
	Inf.		0,21	0,10	0,19	0,22
4	Sup.		0,16	0,10		
	Inf.		0,23	0,12	0,27	0,31
5	Sup.		0,18	0,11		
	Inf.		0,29	0,15	0,39	0,40
6	Sup.		0,22	0,17		
	Inf.		0,35	0,20	0,48	0,49
7	Sup.		0,28	0,16		
	Inf.		0,43	0,25	0,64	0,58
8	Sup.			0,18		
	Inf.			0,29		
		màxim	0,60	0,50	1,00	0,80

Taula 14: Amplada de fissura C1\_316

On:

Sup. mesura a l'alçada dels discs metàl·lics.

Inf. mesura al final de la cara de la biga.

## C2\_212

parada	mesura		C2-212-D1-A	C2-212-D1-B	C2-212-D2-A	C2-212-D2-B
1	Inf.	mitjana	0,10	0,00	0,02	0,03
2	Inf.		0,46	0,10	0,14	0,18
3	Inf.		0,78	0,18	0,32	0,23
4	Inf.		0,84	0,41	0,74	0,72
5	Inf.		1,16	0,60	1,24	0,78
6	Inf.		1,24	0,82	1,56	1,13
7	Inf.		1,62	0,94		1,26
8	Inf.		1,88			
	màxim		2,50	1,20	2,20	1,70

Taula 15:Amplada de fissura C2\_212

On:

Inf. mesura al final de la cara de la biga.

## C2\_216

parada	mesura		C2-216-D1-A	C2-216-D1-B	C2-216-D2-A	C2-216-D2-B
1	Inf.	mitjana	0,00	0,00	0,02	0,03
2	Inf.		0,10	0,08	0,07	0,16
3	Inf.		0,11	0,15	0,22	0,26
4	Inf.		0,26	0,50	0,53	0,46
5	Inf.		0,38	0,68	0,87	0,68
6	Inf.		0,54	0,86	1,07	0,86
7	Inf.		0,79	0,82	1,30	0,98
	màxim		0,90	0,90	1,60	1,20

Taula 16: Amplada de fissura C2\_216

On:

Sup. mesura a l'alçada dels discs metàl·lics.

Inf. mesura al final de la cara de la biga.

## C2\_316

parada	mesura		C2-316-D1-A	C2-316-D1-B	C2-316-D2-A	C2-316-D2-B
1	Inf.	mitjana	0,00	0,00	0,02	0,03
2	Inf.		0,04	0,07	0,11	0,10
3	Inf.		0,09	0,10	0,20	0,15
4	Inf.		0,15	0,16	0,43	0,32
5	Inf.		0,22	0,28	0,57	0,50
6	Inf.		0,38	0,32	0,76	0,77
7	Inf.		0,48	0,38	0,94	0,90
8	Inf.		0,60	0,46		
	Màxim		0,80	0,60	1,10	1,00

Taula 17:Amplada de fissura C2\_316

On:

Sup. mesura a l'alçada dels discs metàl·lics.

Inf. mesura al final de la cara de la biga.

Hem de recordar que el primer assaig que s'ha fet és el del formigó 50(C2) i el segona el del formigó 25 (C1). Durant els segon assaig per tal d'assegurar-nos de que l'esquerda creixia es va decidir fer dos mesures, una a la part inferior i l'altre a l'alçada dels discs metàl·lics que s'utilitzaven per mirar les deformacions amb l'extensòmetre mecànic.

Tal com es pot veure en les taules anteriors, hi ha una certa uniformitat entre les bigues del mateix tipus, encara que en unes hi hagi una pre-fissura i els altres no.

Amb les dades adquirides durant l'assaig amb la lupa, es representa l'amplada de fissura en funció de la càrrega. Aquesta amplada de fissura s'ha calculat per a cada fissura que hi havia en la biga assajada en la zona central (zona de flexió pura) i l'amplada mitja de fissura (mitja de totes les fissures trobades en la zona de flexió pura, Fissura 1, Fissura 2.... (d'esquerra a dreta) .Figura 29.

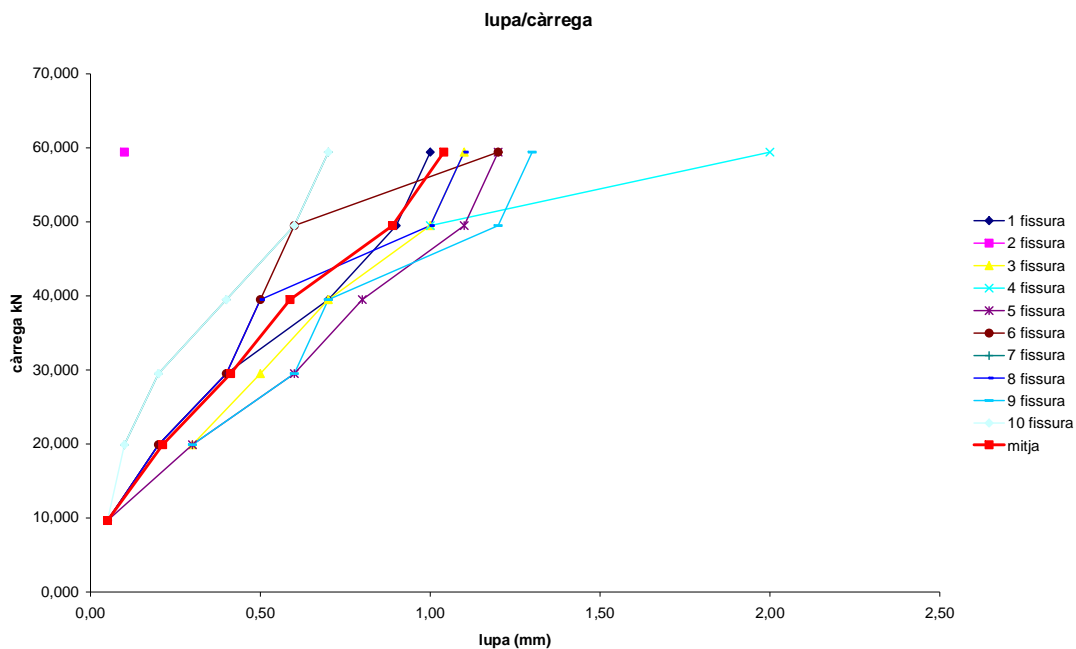


Figura 29: Amplada de fissura valors extrems de la lupa

En les bigues tipus "b", es pot obtenir una altra relació, utilitzant les dades del transductor horitzontal a l'alçada del reforç. Figura 30.

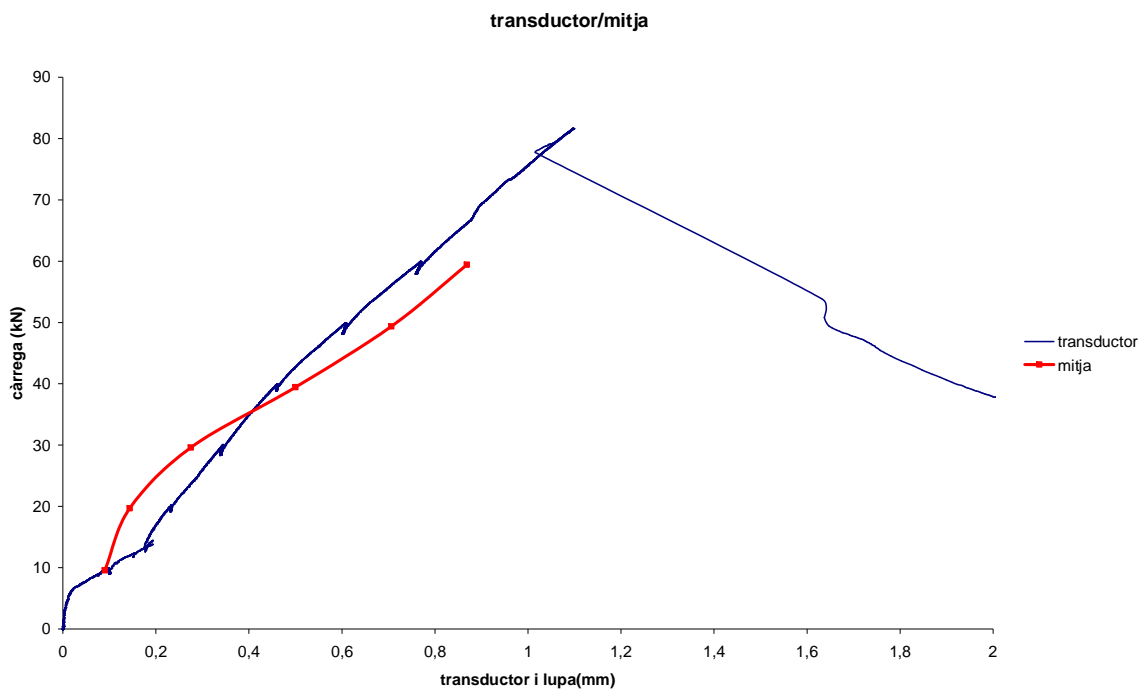


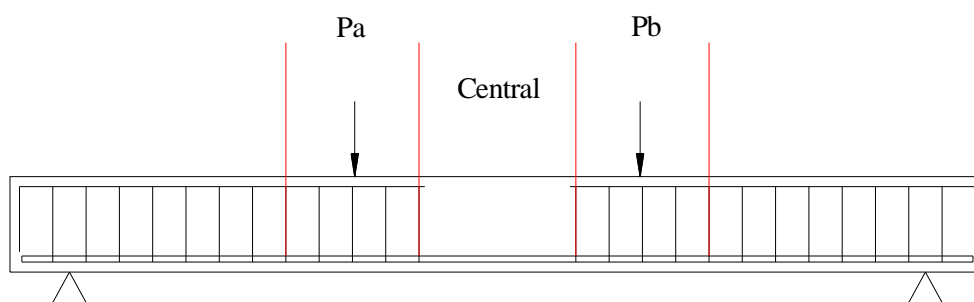
Figura 30: Amplada de fissura amb el transductor

S'observen tendències similars entre lectures malgrat que hi hagi alguna diferència entre mesures.

### 5.6 SEPARACIÓ ENTRE FISSURES

A l'hora d'estudiar la separació obtinguda entre fissures, es va observar que, especialment per a les bigues tipus C1 (formigó HA-25), calia distingir les zones on s'havien col·locat estreps de les zones en les que no hi eren, degut a que les fissures tenien tendència a aparèixer just en les zones d'estreps. És per aquest motiu que es va procedir en la distinció de tres trams:

- Pa: zona dels estreps de d'interior de la biga del recolzament de la càrrega esquerra.
- Pb: zona dels estreps del recolzament de la dreta de la biga.
- Central: zona central on no hi ha els estreps.



Exemple de les taules que es poden trobar en l'annex A.7 Separació entre fissures.

- En la primera taula de la biga Pa es mostra la separació de fissures en funció de la parada, la suma i la mitja. Taula 18.
- La segona taula hi ha les fissures de la zona del Pb, Taula 19.
- En la tercera si poden trobar les fissures de la zona central, Taula 20.

#### C1

parades	Pa					suma	mitjana
1	263					263,00	263,00
2	115	107				222,00	111,00
3	74	115	107			296,00	98,67
4	74	115	107			296,00	98,67
5	74	115	39	68		296,00	74,00
6	74	68	47	39	68	296,00	59,20

Taula 18: Zona Pa de separació de fissura

Pb			suma	mitjana
110			110,00	110,00
110	110	70	290,00	96,67

Taula 19: Zona Pb de separació de fissura

centre			suma	mitjana
145	150		295,00	147,50
145	82	70	297,00	99,00

Taula 20: Zona central de separació de fissura

En aquesta biga, s’observa que a la zona Pb i la central, a partir de la segona parada no surten més fissures, i les que hi ha es van engrandint. Les petites fissures secundàries que sorgeixen s’uneixen a les ja existents, pel que no es poden computar com a noves.

Es pot observar que en la majoria de bigues, en la primera parada encara no s’havia arribat a la càrrega de fissuració i per tant no havien aparegut fissures. És en la segona parada (al voltant dels 20 kN) quan comencen a aparèixer fissures i la majoria d’elles apareixen als 30 kN. A partir d’aquest valor és superada la càrrega de fissuració, ja que la majoria de càrregues de fissuració està al voltant de 10kN.

També es pot observar, amb l’ajuda dels mapes de fissures (

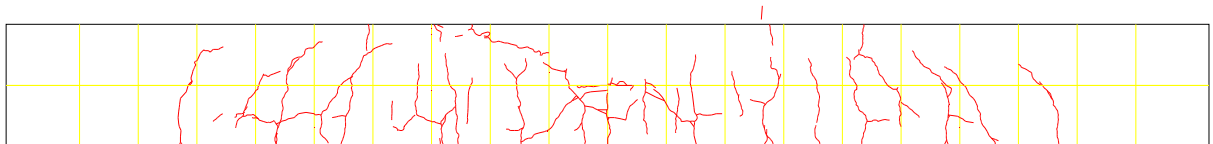


Figura 31) que quan es miren les fissures a partir de la parada 5, aproximadament 50 kN, les esquerdes augmenten però es van unint.

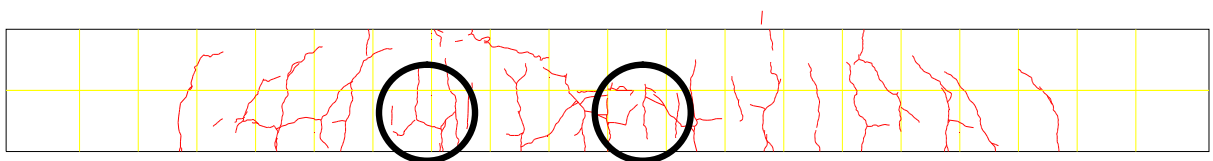


Figura 31: Mapa de fissures

## 6 COMPARACIÓ DELS RESULTATS EXPERIMENTALS AMB ELS TEÒRICS

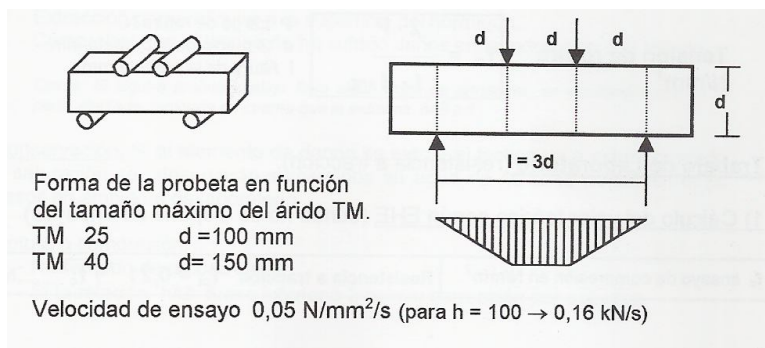
En aquest apartat es comparen i comenten els resultats experimentals obtinguts amb els resultats que s'obtidrien segons models teòrics.

### 6.1 CARACTERITZACIÓ DEL FORMIGÓ

#### 6.1.1 RESISTÈNCIA A FLEXO-TRACCIÓ ( $f_{ct}, f_l$ )

La resistència a flexo-tracció es pot obtenir per dues vies:

- A partir de la resistència a compressió i de la resistència a tracció indirecta, a través dels valors obtinguts en els assaigs anteriors.
- Realitzant directament l'assaig a flexo-tracció, que consisteix en:



En el nostre estudi s'ha calculat la resistència a flexo-tracció de la primera manera, a partir de les fórmules dels dos assaigs anteriors. S'estudien les quatre normes citades el l'abast d'aquest treball:

On:

- hb: 190, alçada de la biga
- f<sub>cm</sub>: resistència a compressió de l'assaig
- f<sub>ctm</sub>: tracció indirecta resultat teòric
- f<sub>ct,sp</sub>: resistència tracció indirecta
- f<sub>ct,fl</sub>: resistència a flexo tracció
- f<sub>c</sub>: resistència a compressió

#### 1. Model Code 90:

- A partir de la resistència a compressió

$$f_{cm} \rightarrow f_{ck} = f_{cm} - 8 \rightarrow f_{ctm} = 1,40 \left( \frac{f_{ck}}{10} \right)^{2/3} \rightarrow f_{ct,fl} = \frac{f_{ctm}}{\left( \frac{1,5 \cdot (h_b/100)^{0,7}}{1 + 1,5 \cdot (h_b/100)^{0,7}} \right)}$$

- A partir de la resistència a tracció indirecta

$$f_{ct,sp} \rightarrow f_{ctm} = 0,9 f_{ct,sp} \rightarrow f_{ct,fl} = \frac{f_{ctm}}{\left( \frac{1,5 \cdot (h_b / 100)^{0,7}}{1 + 1,5 \cdot (h_b / 100)^{0,7}} \right)}$$

2. Eurocodi 2:

a. A partir de la resistència a compressió

$$f_{cm} \rightarrow f_{ck} = f_{cm} - 8 \rightarrow f_{ctm} = 0,30(f_{ck})^{2/3} \rightarrow f_{ct,fl} = 2 \cdot f_{ctm}$$

b. A partir de la resistència a tracció indirecta

$$f_{ct,sp} \rightarrow f_{ctm} = 0,9 f_{ct,sp} \rightarrow f_{ct,fl} = 2 \cdot f_{ctm}$$

3. EHE

a. A partir de la resistència a compressió

$$f_{cm} \rightarrow f_{ck} = f_{cm} - 8 \rightarrow f_{ctm} = 0,30(f_{ck})^{2/3} \rightarrow f_{ct,fl} = \frac{f_{ctm}}{\left( \frac{1,5 \cdot (h_b / 100)^{0,7}}{1 + 1,5 \cdot (h_b / 100)^{0,7}} \right)}$$

b. A partir de la resistència a tracció indirecta

$$f_{ct,sp}(f_{ci}) \rightarrow f_{ctm} = 0,9 f_{ct,sp} \rightarrow f_{ct,fl} = \frac{f_{ctm}}{\left( \frac{1,5 \cdot (h_b / 100)^{0,7}}{1 + 1,5 \cdot (h_b / 100)^{0,7}} \right)}$$

4. ACI:

$$f_r = 0.62 \sqrt{f_c}$$

- Resultats obtinguts per al formigó de les bigues tipus C1 (HA-25)

a. A partir d'assaig de compressió Taula 21:

Provetes	MC-90		EC-2		EHE		ACI
$f_{cm}$	$f_{ctm}$	$f_{ct,fl}$	$f_{ctm}$	$f_{ct,fl}$	$f_{ctm}$	$f_{ct,fl}$	$f_{ct,fl}$
30.51	2.95	4.20	2.93	5.86	2.93	4.18	2.94

Taula 21: Resultats a compressió C1

Resultats amb MPa i a 28 dies



b. A partir de tracció indirecta Taula 22:

Provetes	MC-90		EC-2		EHE	
$f_{ct,sp}$	$f_{ctm}$	$f_{ct,fl}$	$f_{ctm}$	$f_{ct,fl}$	$f_{ctm}$	$f_{ct,fl}$
3.04	2.74	3.90	2.74	5.47	2.74	3.90

Taula 22: Resultats a tracció indirecta C1

Resultats amb MPa i a 28 dies

- Resultats obtinguts per al formigó de les bigues tipus C2 (HA-50)

a. A partir d'assaig a compressió Taula 23:

Provetes		MC-90			EC-2		EHE		ACI
Nom	$f_{cm}$	$f_{ctm}$	$f_{ct,fl}$	$f_{ctm}$	$f_{ct,fl}$	$f_{ctm}$	$f_{ct,fl}$	$f_{ct,fl}$	
C2_212_D1	45.03	3.82	5.44	3.80	7.59	3.80	5.41	3.77	
C2_216_D1	45.03	3.82	5.44	3.80	7.59	3.80	5.41	3.77	
C2_316_D1	45.03	3.82	5.44	3.80	7.59	3.80	5.41	3.77	
C2_212_D2	35.28	3.24	4.63	3.23	6.45	3.23	4.60	3.24	
C2_216_D2	48.23	4.00	5.70	3.98	7.95	3.98	5.67	3.93	
C2_316_D2	48.23	4.00	5.70	3.98	7.95	3.98	5.67	3.93	

Taula 23: Resultats a compressió C2

b. A partir de tracció indirecta Taula 24:

Provetes		MC-90		EC-2		EHE	
Nom	$f_{ct,sp}$	$f_{ctm}$	$f_{ct,fl}$	$f_{ctm}$	$f_{ct,fl}$	$f_{ctm}$	$f_{ct,fl}$
C2_212_D1	2.82	2.54	3.62	2.54	5.08	2.54	3.62
C2_216_D1	2.82	2.54	3.62	2.54	5.08	2.54	3.62
C2_316_D1	2.82	2.54	3.62	2.54	5.08	2.54	3.62
C2_212_D2	3.74	3.37	4.80	3.37	6.73	3.37	4.80
C2_216_D2	3.74	3.37	4.80	3.37	6.73	3.37	4.80
C2_316_D2	3.74	3.37	4.80	3.37	6.73	3.37	4.80

Taula 24: Resultats a tracció indirecta C2

### 6.1.2 MÒDUL ELÀSTIC ( $E_c$ )

S'ha estudiat el mòdul elàstic per les mateixes quatre normes citades en l'apartat anterior.

On:

$E_{ci}$ :

$E_{co}$ :

1) Model Codi-90:

- E tangent:  $E_{ci} = E_{co} \sqrt[3]{f_{cm}/10}$ , on:  $E_{co} = 2,15 \cdot 10^4 \text{ MPa}$
- E secant:  $E_c = 0.85 \cdot E_{ci}$

2) Eurocodi-2: E secant:  $E_c = 9500 \sqrt[3]{f_{cm}}$

3) EHE: E secant:  $E_c = 8500 \sqrt[3]{f_{cm}}$

4) ACI: (s'ha d'acabar de mirar)  $E_c = 4750 \sqrt{f_{cd}}$

Per estimar el mòdul d'elasticitat del formigó a una edat  $t$  s'ha aplicat la següent formulació:

$$E_c(t) = \beta_E(t) E_c(28); \text{ on } \beta_E(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)}$$

On:

$\beta_E$ :

$\beta_{cc}$ :

$t$ : temps entre assaig i temps que busquem

Per als càlculs s'ha considerat un mòdul d'elasticitat secant.

- Resultats obtinguts per al formigó de les bigues tipus C1 (HA-25)

Es comproven els valors experimentals amb els teòrics que s'obtidrien tenint en compte la resistència a compressió del formigó (dades a 28 dies i en MPa Taula 25):

Experimental	Provetes	MC-90		EC-2	EHE	ACI
$E_c$	$f_{cm}$	$E_{ci}$	$E_c$	$E_c$	$E_c$	$E_c$
25506.2	30.51	31183.1	26505.6	29685.0	25958.0	26237.0

Taula 25: Comparació normes amb valors experimentals C1

- Resultats obtinguts per al formigó de les bigues tipus C2 (HA-50)

Provetes			MC-90		EC-2	EHE	ACI
Nom	$E_c \text{ exp}$	$f_{cm}$	$E_{ci}$	$E_c$	$E_c$	$E_c$	$E_c$
C2_212_D1	26969	45.03	35503.6	30178.1	33798.0	31934.5	31874.6
C2_216_D1	26969	45.03	35503.6	30178.1	33798.0	31934.5	31874.6
C2_316_D1	26969	45.03	35503.6	30178.1	33798.0	31934.5	31874.6
C2_212_D2	26969	35.28	32730.1	27820.6	31157.8	29843.4	28213.6
C2_216_D2	26969	48.23	36338.0	30887.3	34592.3	31934.5	33004.8
C2_316_D2	26969	48.23	36338.0	30887.3	34592.3	31934.5	33004.8

Taula 26: Comparació normes amb valors experimentals C2

S'ha considerat per als càlculs de comportament de formigó en fletxes, curvatures, deformacions unitàries, etc, els valors de resistència a flexo-tracció i mòdul d'elasticitat de les taules 25 i 26, quedant resumits en la taula Taula 27.

Biga tipus	$E_c$ (MPa)	Pcr (kNm)	Fr (MPa)	fr (MC)	fr (ACI)
C1-212-D1	25845	6.75	<b>2.40</b>	3,90	2,94
C1-216-D1		7.35	<b>2.60</b>	3,90	2,94
C1-316-D1		9.10	<b>3.20</b>	3,90	2,94
C1-212-D2		7.30	<b>2.30</b>	3,90	2,94
C1-216-D2		6.20	<b>1.90</b>	3,90	2,94
C1-316-D2		7.35	<b>2.30</b>	3,90	2,94
C2-212-D1	27564.5	9.80	<b>3.50</b>	3,62	3,77
C2-216-D1		9.25	<b>3.30</b>	3,62	3,77
C2-316-D1		10.75	<b>3.80</b>	3,62	3,77
C2-212-D2*	25845*	9.60	<b>3.00</b>	4,80	3,24
C2-216-D2	27564.5	10.60	<b>3.30</b>	4,80	3,93
C2-316-D2		11.50	<b>3.60</b>	4,80	3,93

Taula 27: Resum per cada biga de Fr en funció de les normes

\* C2-212-D2: És la biga que ens ha donat els valors de la resistència més baixos, per tant, te coherència que la resistència sigui més baixa. Es pot considerar  $E_c$  de les bigues C1.

## 6.2 COMPROVACIÓ DEL MOMENT DE FISSURACIÓ

Amb l'ajuda del programa Matlab, es creen unes rutines que permeten estudiar els resultats de fletxes, curvatures, deformacions unitàries, etc, segons les normes ACI 440.1R-06 (norma americana per a formigó armat amb FRP) i la ACI 318-02 (norma americana per a formigó armat amb acer). Per tal d'avaluar aquestes tendències, en primer lloc cal determinar el moment de fissuració de cada biga. Aquest es pot obtenir a partir de la representació càrrega-deformació (apartat 5.3 Moment de fissuració) o bé a través de la resistència a flexo-tracció de l'apartat anterior.

Un cop tenim les rutines de Matlab executades podem extreure gràfics tipus Figura 32: **Comprovació del moment de fissuració.**

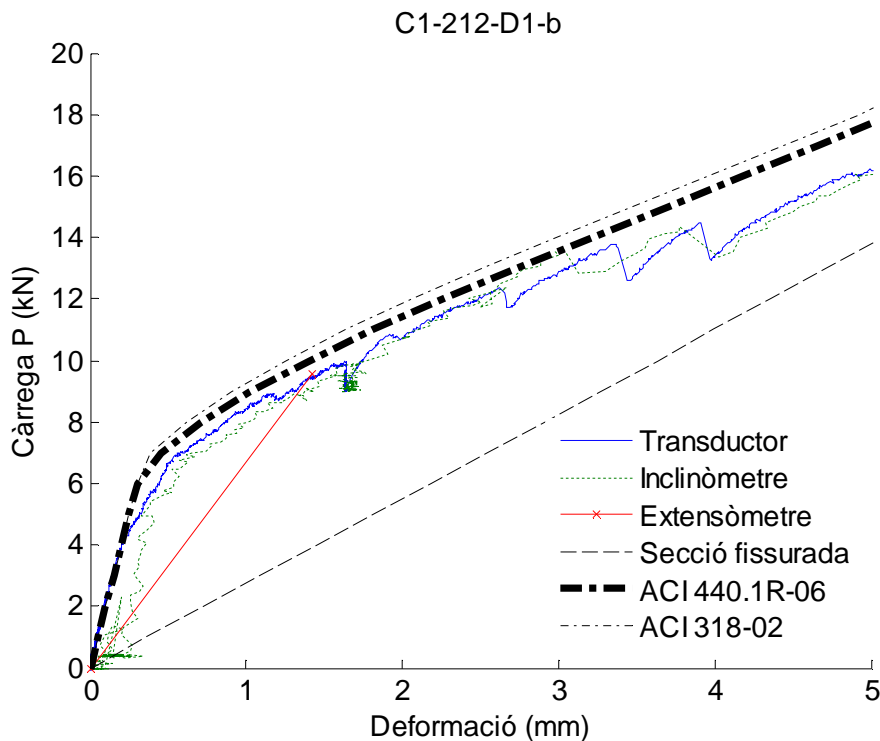


Figura 32: Comprovació del moment de fissuració

Tal com es pot observar en el gràfic podem veure que la norma ACI 318 és la que ens dóna un valor més elevat, la norma ACI 440 dóna uns valors més baixos, encara que molt semblants. L'inclinòmetre i els transductors donen uns valors molt semblants a les normes. I per últim ens hem de fixar que en l'extensòmetre mecànic, de la parada 0 a la primera, ja ha passat la càrrega de fissuració, per tant és un valor que no ens interessa.

La norma en la que ens hem de fixar més és la ACI 440 (FRP), tal com podem observar podem intuir que el moment de fissuració és d'aproximadament entre 6 i 7, experimentalment aquesta biga té una càrrega de fissuració de 6,75kN, per tant, es pot prendre per vàlida la comparació.

En l'annex A.4 Moment de fissuració es pot veure per cada biga l'anàlisi en comparació a les normes.

### 6.3 RESPOSTA CÀRREGA-DEFORMACIÓ

#### 6.3.1 ACI 440 (2006)

El codi americà ACI 440 per formigó armat amb FRP, en la seva última versió (2006), proposa un càlcul de la fletxa mitjançant una inèrcia equivalent  $I_e$  de la fórmula de Branson, modificant la inèrcia bruta  $I_g$  amb un factor reductor  $\beta_d$ , que és una relació entre la quantia i la quantia balancejada:

$$ro\_bal=0.85*\beta_1*fcd/ffu*E_f*\epsilon_{cu}/(E_f*\epsilon_{cu}+ffu);$$

$$\beta_d=\min(0.2*ro/ro\_bal,1);$$

La inèrcia equivalent resultant és:

$$I_{e\_aci440\_06}(i,1)=(M_{cr}/M_{aci}(i,1))^3*\beta_d*I_g+(1-(M_{cr}/M_{aci}(i,1))^3)*I_{cr};$$

, sempre que sigui menor o igual a  $I_g$ .

La fletxa en el punt central es calcula aplicant les fórmules de Resistència de Materials:

$$Disp\_aci440\_06(i,1)=(1000*.5*Load\_aci(i,1)*L^3*(3*L^2-4*L^1^2))/(24*E_c*I_{e\_aci440\_06}(i,1));$$

Notes:

. En el càlcul, s'ha depreciat la fletxa deguda al pes propi de la biga.

### 6.3.2 ACI 318 (2002)

El codi americà ACI 318 per bigues armades amb acer, versió 2002, proposa un càlcul de la fletxa mitjançant la inèrcia equivalent  $I_e$  de la fórmula de Branson. La inèrcia equivalent resultant és:

$$I_{e\_aci318}(i,1)=(M_{cr}/M_{aci}(i,1))^3*I_g+(1-(M_{cr}/M_{aci}(i,1))^3)*I_{cr};$$

, sempre que sigui menor o igual a  $I_g$ .

La fletxa en el punt central es calcula aplicant les fórmules de Resistència de Materials:

$$Disp\_aci318(i,1)=(1000*.5*Load\_aci(i,1)*L^3*(3*L^2-4*L^1^2))/(24*E_c*I_{e\_aci318}(i,1));$$

Notes:

. En el càlcul, s'ha depreciat la fletxa deguda al pes propi de la biga.

. Addicionalment es dibuixa la tendència teòrica considerant una secció totalment fissurada per a qualsevol càrrega.

Com en el cas anterior estudiem les normes ACI 318 i 440. En aquest cas no ens fixarem en les dades inicials, sinó en la zona un cop la biga ja està fissurada.

Tal com s'ha explicat en l'apartat anterior moment de fissuració, el codi americà ACI 440.1R-06 proposa un càlcul de la fletxa mitjançant una inèrcia equivalent  $I_e$  de la fórmula de Branson, modificant la inèrcia bruta  $I_g$  amb un factor reductor  $\beta_d$ , que és una relació entre la quantia i la quantia balancejada. Respecte la norma ACI 318 Figura 33.

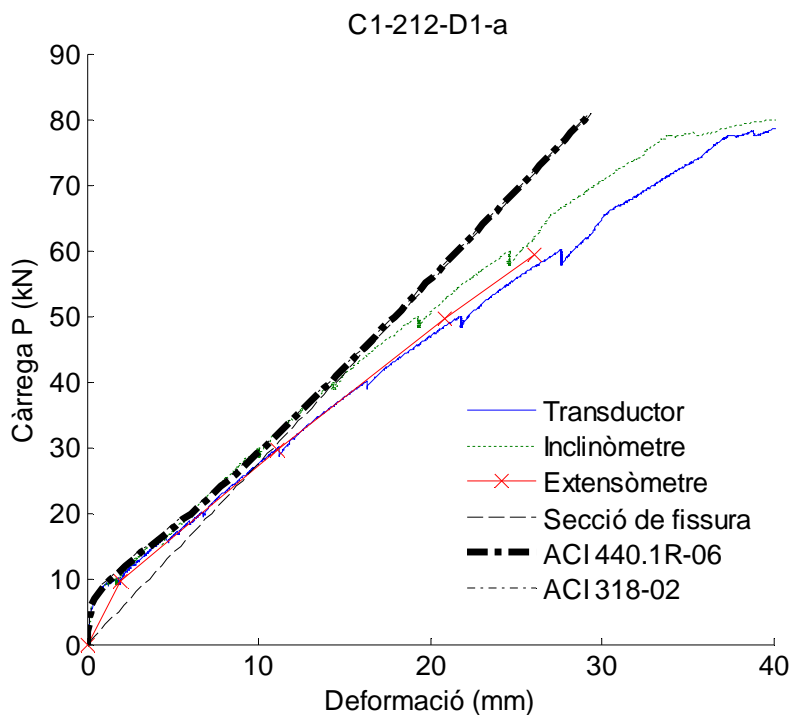


Figura 33: Càrrega deformació experimental/teòrica

Tal com es pot observar en el gràfic, la norma ACI 318 i la norma ACI 440 donen valor molt semblants entre elles.

Per altra banda l'inclinòmetre i els transductors donen uns valors molt semblants a les normes. I per últim ens hem de fixar que en l'extensòmetre mecànic, de la parada 0 a la primera, ja ha passat la càrrega de fissuració, per tant és un valor que no ens interessa.

La norma en la que ens hem de fixar més és la ACI 440 (FRP), tal com podem observar podem intuir que el moment de fissuració és d'aproximadament entre 6 i 7, experimentalment aquesta biga té una càrrega de fissuració de 6,75kN, per tant, es pot prendre per vàlida la comparació.

En l'annex A.5 es pot veure els resultats teòrics per cada biga

#### 6.4 AMPLADA DE FISSURA

Aquest apartat és molt important quan l'armadura és acer, ja que en qualsevol càlcul d'amplada de fissura es vol aconseguir que aquesta sigui el més petita possible, per tal evitar al màxim l'accés de l'aigua i de l'aire en contacte amb l'acer.

Amb l'ajuda de la norma ACI 440 podem observar si l'amplada de fissura màxima (w) que segueix la norma.

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2}$$

On:

Kb: 1

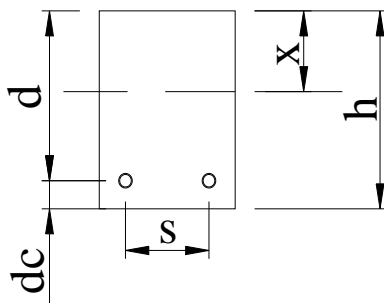
Ef: mòdul d'elasticitat de les barres d'FRP

Ff: Força que aguanten les barres kN

dc: recobriment del centre de la barra fins a la cara.

s:separació entre barres longitudinals

$$\beta: \beta = \frac{h-x}{d-x} \text{ on } x \text{ és:}$$



Biga tipus	r	b	d	Ec	Ef	nf	x	β
C1-212-D1	20	140	121	25845	63252,33	2,45	296,13	0,61
C1-216-D1	20	140	121		63252,33	2,48	300,34	0,62
C1-316-D1	20	140	121		64152	2,48	300,34	0,62
C1-212-D2	40	160	121		63252,33	2,45	296,13	0,61
C1-216-D2	40	160	121		63252,33	2,48	300,34	0,62
C1-316-D2	40	160	121		64152	2,48	300,34	0,62
C2-212-D1	20	140	121	2764,5	63252,33	22,88	2768,50	0,97
C2-216-D1	20	140	121		63252,33	23,21	2807,88	0,97
C2-316-D1	20	140	121		64152	23,21	2807,88	0,97
C2-212-D2*	40	160	121	25845	63252,33	22,88	2768,50	0,97
C2-216-D2	40	160	121	2764,5	64152	23,21	2807,88	0,97

Taula 28: Dades per l'estudi de l'amplada de fissura

On;

r: recobriment

b: amplada

Ec: mòdul elàstic del formigó

Ef: mòdul elàstic de l'FRP

nf: Ef/Ec

En la Taula 29 es pot veure, per cada tipus de biga, les distàncies de dc i les s.

Biga tipus	Ø	r	dc	s
C1-212-D1	12	20	26	84
C1-216-D1	16	20	28	80
C1-316-D1	16	20	28	39
C1-212-D2	12	40	46	104
C1-216-D2	16	40	48	100
C1-316-D2	16	40	48	49
C2-212-D1	12	20	26	84
C2-216-D1	16	20	28	80
C2-316-D1	16	20	28	39
C2-212-D2*	12	40	46	104
C2-216-D2	16	40	48	100
C2-316-D2	16	40	48	49

Taula 29: Distàncies dc i s segons cada biga

Per tal de simplificar el càlcul els valors de la força seran a servei, ja que fins aquesta càrrega podem considerar la tensió deformació lineal. Hem escollit la càrrega més propera a 30kN de totes les bigues per fer el càlcul de l'amplada de fissura.

Per trobar la força tenim que  $F_f = \frac{M}{d \cdot A_f \cdot (1 - (k/3))}$

On;

d: cantell útil, vist anteriorment

Af: àrea de les barres longitudinals

$$K: \sqrt{(d \cdot n_f)^2 + 2 \cdot d \cdot n_f} - d \cdot n_f$$

M: moment produït per la càrrega de servei multiplicat per la distància (600mm)

En la següent **Taula 30** podem veure l'amplada per cada biga estudiada en funció de la parada de 30kN i la força exercida en les barres de reforç.



Biga tipus	parada	kN	M	Ff	Amplada
C1-212-D1-a	3	29,50	17,70	715,27	0,99
C1-212-D1-b	3	29,60	17,76	717,69	1,00
C1-216-D1-a	3	29,48	17,69	406,97	0,55
C1-216-D1-b	3	29,68	17,81	409,74	0,55
C1-316-D1-a	3	29,65	17,79	272,92	0,26
C1-316-D1-b	3	29,48	17,69	271,32	0,25
C1-212-D2-a	3	29,63	17,78	818,02	1,40
C1-212-D2-b	3	28,40	17,04	784,17	1,34
C1-216-D2-a	3	28,60	17,16	450,46	0,75
C1-216-D2-b	3	29,53	17,72	465,07	0,78
C1-316-D2-a	3	28,85	17,31	302,93	0,39
C1-316-D2-b	3	29,00	17,40	304,50	0,39
C2-212-D1-a	3	19,80	11,88	480,06	0,66
C2-212-D1-b	3	20,70	12,42	501,88	0,69
C2-216-D1-a	3	24,15	14,49	333,42	0,44
C2-216-D1-b	3	19,50	11,70	269,22	0,36
C2-316-D1-a	3	29,65	17,79	272,91	0,25
C2-316-D1-b	3	30,05	18,03	276,59	0,26
C2-212-D2-a	3	19,80	11,88	546,68	0,90
C2-212-D2-b	3	20,97	12,58	578,99	0,96
C2-216-D2-a	3	22,00	13,20	346,49	0,56
C2-216-D2-b	3	23,70	14,22	373,26	0,60
C2-316-D2-a	3	26,80	16,08	281,39	0,35
C2-316-D2-b	3	28,00	16,80	293,99	0,37

Taula 30: Resum d'amplada de fissura teòric

## 6.5 SEPARACIÓ ENTRE FISSURES

En aquest s'estudia la separació de fissura a partir de la norma europea EC-2. Aquesta norma actua com si la armadura fos d'acer.

$$S_{rm} = 50 + 0.25K_1K_2\phi / \rho r$$

On:

k1: coeficient que té en compte la proporció d'adherència: 0,8 per adherència alta i 1,6 per adherència baixa.

k2: coeficient que té en compte la distribució de la deformació unitària al llarg de la secció: 0,5 (Moment flector) i 1 (Tensió).

Ø: diàmetre

ρr: quantia

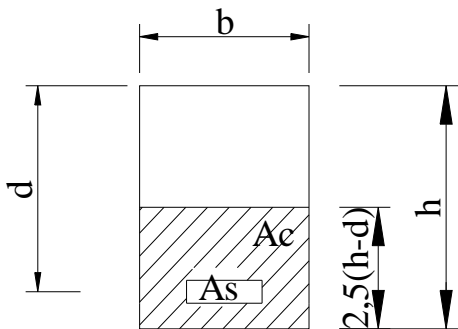
Com que  $\rho_r = \frac{A_s}{A_{c,eff}}$

On:

$A_s$ : secció total de les barres.

$A_{c,eff}$ : secció de tracció eficaç del formigó.

L'àrea efectiva és la ratllada, ja que el formigó no treballa a tracció.



base	K1	K2	diàmetre de les barres	nº de barres	recobriment	pr	separació de fissures(mm)
140	0,8	0,5	12	2	20	0,032	87,13
160	0,8	0,5	12	2	40	0,014	134,88
140	0,8	0,5	16	2	20	0,057	77,85
160	0,8	0,5	16	2	40	0,025	113,66
140	0,8	0,5	16	3	20	0,086	68,56
160	0,8	0,5	16	3	40	0,037	92,44

Taula 31: Resum de separació de fissures teòriques

Si comparem la separació de fissures calculada a la Taula 31 amb la mitja de les fissures de les bigues podem observar que en la majoria de casos, quan més alta és la parada més s'incompleix la norma, a més tal i com es pot veure en l'annex A.7 Separació entre fissures, en la majoria de bigues es sobrepassa la separació.

## 7 RESUM DEL PRESSUPOST

La valoració econòmica de l'elaboració total d'aquest treball es pot desglossar en 5 partides:

Amortització hardware	166,67€
Amortització software	200,00€
Definició i anàlisi de la instrumentació	1.500,00€
Anàlisi de dades	6.000,00€
Redacció de l'estudi	562,50€

El total de l'execució d'aquest treball és de **NOU MIL SET-CENTS SETANTA-SET EUROS amb VUITANTA-QUATRE CÈNTIMS IVA** inclús.

## 8 CONCLUSIONS

El treball realitzat ha consistit en tres parts ben diferenciades:

- Anàlisi de la instrumentació necessària per poder obtenir valors experimentals en els assaigs.
- Analitzar les dades obtingudes a través dels aparells emprats amb l'ajuda de programes informàtics (MS Excel i Matlab).
- Comparar els valors trobats i analitzats experimentalment amb les normes actualment vigents.

Les bigues assajades estaven constituïdes amb materials diferents dels convencionals i s'esperava un comportament diferent de l'habitual. També s'ha variat la resistència del formigó, el cantell útil i la quantia geomètrica per tal d'obtenir diferents tipus de bigues i estudiar les seves variacions.

### *Instrumentació dels elements i realització dels assaigs*

- S'ha pogut constatar la participació en el grup de preparació dels assaigs i entendre la selecció de la instrumentació a instal·lar.
- Ha calgut ampliar els coneixements adquirits al llarg dels estudis cursats. S'han hagut d'estudiar les característiques dels aparells disponibles i consultar altra documentació i també el tècnic de laboratori del grup AMADE.
- El projecte ha permès participar en la instal·lació de la instrumentació, veure les dificultats que apareixen i les possibles solucions en cada cas.
- Sempre que sigui possible cal tenir elements d'instrumentació complementaris que permetin contrastar els resultats per vies diferents.
- Gràcies al projecte s'ha pogut veure la complexitat de la realització d'aquests assajos, la quantitat d'elements involucrats i també la complexitat de la interpretació dels resultats

### *Anàlisi de dades i comparació dels resultats experimentals amb la teoria*

- Per tal de fer l'estudi de les dades experimentals ha calgut ampliar els coneixements informàtics dels programes MS Excel i Matlab.
- El projecte ha permès aprofundir en els coneixements del formigó i de la resistència de materials, a l'igual que l'estudi d'altres materials, com l'FRP.
- Ha permès observar la manca d'instrumentació en anàlisis que no hi havia previstos abans de l'elecció d'aquesta.

- El projecte ha permès el coneixement d'altres normes diferents a les espanyoles i estudiar-les per tal d'obtenir-ne resultats.
- La comparació dels resultats teòrics amb els experimentals ha permès entendre els valors, els esperats i els no esperats.

Per altra banda, l'anàlisi de dades ha consistit en l'obtenció dels següents resultats estudiats:

- La caracterització de materials
- La curvatura
- El moment de fissuració
- La càrrega deformació
- L'amplada de fissura
- La separació de fissura

Després de fer l'estudi de caracterització de materials s'ha observat que moltes vegades els valors donats pel fabricant, no són els que exactament té el material, en el cas del formigó C1 es buscava un formigó de 50MPa i després de la realització dels assaigs s'ha observat que la resistència és inferior, al contrari que amb el formigó del C2.

L'estudi de la curvatura ha demostrat que en la zona de flexió pura la curvatura no és constant, suposició inicial, tal com es veu en els gràfics estudiats en l'apartat. S'esperava que el comportament fos com els valors extrets pels inclinòmetres, però gràcies a l'extensòmetre mecànic i als assaigs del formigó C1, al qual s'estudiava la curvatura al llarg de tota la biga, hem pogut veure que la suposició no era correcte.

En l'apartat de moment de fissuració experimental hem pogut veure que es tracta d'una dada molt important, ja que es fa servir en molts dels altres apartats i que és molt difícil de determinar experimentalment. Gràcies a l'obtenció d'aquesta dada podem comparar els valors de càrrega deformació teòrics i experimentals.

En la càrrega deformació hem pogut observar la deformació al llarg de la biga amb l'ajuda de tres aparells, l'extensòmetre mecànic, els transductors i els inclinòmetres. Hem vist que els tres ens han donat valors molt semblants.

En l'apartat teòric comparem les normes ACI 440 i ACI 318 amb els valors experimentals, es pot observar que en la zona de la càrrega a servei les normes i els resultats experimentals són molt semblants, en canvi, en arribar a càrrega última veiem que les normes i les dades experimentals són diferents, degut a que el disseny de les bigues és a servei.

La part de fissuració consta de dues parts molt diferenciades, l'amplada i la separació de fissuració.

L'amplada de la fissuració està estudiada experimentalment a partir de la lupa i del transductor horitzontal (només col·locada en les bigues de pre-fissura), comparada amb la norma ACI i per una càrrega a servei de 30 kN veiem que com més reforç té la biga menys amplada han de tenir les seves fissures, fent que coincideix amb els valors experimentals.

La separació de fissura de l'Eurocodi (EC-2) ens dóna resultats molt més grans que els trobats experimentalment a partir de la tercera parada (càrrega de 30kN). L'EC-2 és una norma que estudia el formigó armat amb acer, en el nostre cas es tracta d'un formigó armat amb un component diferent, per tant, és normal que ens doni resultats diferents als esperats teòricament.

La continuació d'aquest projecte podria consistir en buscar una relació de paràmetres variats ens els assaigs (resistència, cantell útil i quantia geomètrica) en funció dels resultats obtinguts, tant experimentalment com teòricament, també es podria fer l'estudi de resultats obtinguts a partir dels aparells utilitzats en l'assaig però no estudiats en aquest projecte, com l'evolució de la fibra neutra en funció de la càrrega.

Signat

Irene Vilanova Marco

9 de Gener de 2008

## 9 RELACIÓ DE DOCUMENTS

Document nº 1: Memòria i Annexes

- Annex A. Annexes de la memòria
- Annex B. Fitxes tècniques dels aparells
- Annex C. Documentació fotogràfica
- Annex D. Esquemes de les bigues

Document nº 2: Annex de pressupost

## 10 BIBLIOGRAFIA

### Normes

Instrucción Hormigón Estructural (EHE-98).

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *"Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-06). Reported by ACI Committee 440"* (200).

Eurocodi 2 *"Design of concrete structures"* (EC- 21992)

Model Code 90 (MC 90)

### Llibres

Sensores y acondicionadores de señal Ramon Pallés Areny  
Sistemas de medición e instrumentación.



## **11 AGRAÏMENTS**

Vull agrair aquest treball a totes les persones que l'han fet possible, principalment a la Cristina Barris i amb en Lluís Torres de la Universitat de Girona, per haver-me donat la oportunitat de treballar en un projecte tan gran i poder ampliar els meus estudis del formigó i de nous materials com l'FRP.

Per altre banda també agrair aquest treball a tota la meva família per haver-me fet costat tan en el projecte com en tota la carrera, a la meva mare per estar-me a sobre, al meu pare per les hores d'estudi quan un problema no sortia i al meu germà per haver-me deixat somniar en els moments de histèria.

Tampoc puc oblidar als meus companys de classe que sense ells moltes assignatures haurien estat més feixugues i més llargues i els meus companys i amics de sempre que m'han animat sempre que ho he necessitat.

Només em queda dir: MERCI.