

CAPÍTOL 3

CAMPANYA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUCCIÓ

L'objectiu de la campanya experimental és el d'avaluar les propietats físiques del formigó projectat reforçat amb unes noves fibres polimèriques (mescla de polipropilè i polietilè) tot comparant-les amb les d'un formigó projectat reforçat amb fibres metàl·liques, habitualment utilitzades en la majoria d'aplicacions en l'àmbit de l'enginyeria civil.

La introducció de fibres en la matriu de formigó proporciona millores qualitatives en la resposta d'aquest davant d'aquelles accions que provoquen qualsevol tipus d'esforç de tracció, i proporciona la capacitat de resistir càrregues després de produïda la primera fissura. Aquesta propietat, que s'ha denominat tenacitat, és el principal paràmetre utilitzat per avaluar les millores que l'addició de fibres introdueix en la matriu de formigó.

Dins de la literatura tècnica existeixen nombrosos assaigs per avaluar les millores en quan a tenacitat, però d'entre aquests es van escollir aquells que dins de les possibilitats d'aquesta tesina, es podien realitzar i al nostre parer eren els més representatius. Així doncs, els assaigs escollits van ser:

1. Assaig EFNARC Plate Bending Test.
2. Assaig Australian Round Determinate Plate Test.
3. Assaig de biga.

Tanmateix, per la determinació de les característiques de formigó projectat es van realitzar els següents assaigs:

4. Assaig de compressió simple.
5. Assaig de determinació del mòdul elàstic.
6. Assaig de determinació de la porositat.
7. Assaig de consistència mitjançant el Con d'Abrams.
8. Assaig de mesura de la retracció per assecat.
9. Assaig de recompte del número de fibres.

Els objectius d'aquest capítol són:

- 1) Realitzar una descripció dels assaigs escollits per la campanya experimental d'aquesta tesina.
- 2) I analitzar les característiques dels elements que conformen els diferents tipus de formigons fabricats.

Per cada assaig es realitzarà:

- (a) Un anàlisi del fonament.
- (b) Una descripció de les característiques de les provetes que s'assagen.
- (c) Una descripció de la maquinària d'assaig i de les seves característiques.
- (d) Una descripció del procediment d'execució de l'assaig.

La campanya experimental s'ha dividit en quatre parts:

- Planificació de la campanya experimental.
- Disseny de la mescla.
- Execució i conservació de les mostres.
- Fase d'assaigs.

El procés de curat va ser el mateix per a tots els formigons fabricats per tal de proporcionar les millors condicions possibles per realitzar un estudi comparatiu coherent.

3.2. PLANIFICACIÓ DE LA CAMPANYA EXPERIMENTAL

En aquesta primera fase l'objectiu principal va ser determinar el número de plafons a projectar necessaris per realitzar una caracterització el més precisa possible dels tres tipus de formigons a estudiar, en funció dels medis disponibles en el Laboratori de Tecnologia d'Estructures.

La taula 3.1 recull els assaigs realitzats per cada tipus de formigó, indicant les dimensions de les provetes o plafons utilitzats a cada un d'ells, així com el número de provetes per assaig i l'edat d'aquestes.

Formigó		Variable	Assaig	Nº	Edat	Element
CTRL	Fresc	Consistència	UNE 83313	1	Fabricació	For. fresc 50 lit.
		Densitat	UNE 83317	1	Fabricació	For. fresc 10 lit.
	Endurit	Densitat	UNE 83602-5	3	28 dies	Proveta ø93x150mm
		Porositat	UNE 83602-5	3	28 dies	Proveta ø93x150mm
		f_{cm}	UNE 83605	3	7,28,60,120	Proveta ø93x150mm
		E	UNE 83602-5	3	28,120 dies	Proveta ø93x150mm
		Retracció	UNE 83602-5	3	6 mesos	Proveta ø93x150mm
		Tenacitat	EFNARC Plate Test	3	28 dies	Placa 600x600x100mm
			ROUND Panel Test	3	28 dies	Placa ø800x75mm
		FPFS	Fresc	Consistència	UNE 83313	1
Densitat	UNE 83317			1	Fabricació	For. fresc 10 lit.
Endurit	Densitat		UNE 83602-5	3	28 dies	Proveta ø93x150mm
	Porositat		UNE 83602-5	3	28 dies	Proveta ø93x150mm
	f_{cm}		UNE 83605	3	7,28,60,120	Proveta ø93x150mm
	E		UNE 83602-5	3	28,120 dies	Proveta ø93x150mm
	Retracció		UNE 83602-5	3	6 mesos	Proveta ø93x150mm
	Tenacitat		EFNARC Plate Test	3	28 dies	Placa 600x600x100mm
			ROUND Panel Test	3	28 dies	Placa ø800x75mm
			Assaig de Biga	3	28 dies	Biga 550x150x150mm
FPFM	Fresc	Consistència	UNE 83313	1	Fabricació	For. fresc 50 lit.
		Densitat	UNE 83317	1	Fabricació	For. fresc 10 lit.
	Endurit	Densitat	UNE 83602-5	3	28 dies	Proveta ø93x150mm
		Porositat	UNE 83602-5	3	28 dies	Proveta ø93x150mm
		f_{cm}	UNE 83605	3	7,28,60,120	Proveta ø93x150mm
		E	UNE 83602-5	3	28,120 dies	Proveta ø93x150mm
		Retracció	UNE 83602-5	3	6 mesos	Proveta ø93x150mm
		Tenacitat	EFNARC Plate Test	3	28 dies	Placa 600x600x100mm
			ROUND Panel Test	3	28 dies	Placa ø800x75mm
			Assaig de Biga	3	28 dies	Biga 550x150x150mm

Taula 3.1. Planificació dels assaigs previstos a la campanya experimental.

En funció de la planificació proposada, va iniciar-se un procés d'establiment de dates per cada un dels assaigs, així com una previsió dels materials a utilitzar, juntament a un procés de disseny dels aparells per els assaigs de tenacitat (EFNARC Plate Bending Test, Australian Round Determinate Plate Test, i els assaigs de Biga).

A causa de circumstàncies alienes a aquesta tesina no van poder realitzar-se els assaigs de rebot que en un principi estaven programats.

3.3. DISSENY DE LA MESCLA

Pel disseny del formigó projectat que s'ha utilitzat en aquesta tesina es va procedir en tres fases:

1. Caracterització dels materials a utilitzar.
2. Dosificació de la mescla.
3. Assaigs complementaris.

3.3.1. Caracterització dels materials utilitzats

1. Ciment

El ciment usat és del tipus Portland de classe I 42.5R, d'enduriment ràpid. El formigó el va subministrar l'empresa PROMSA (Promotora Mediterrania 2 S.A.), i aquesta empresa és subministrada de ciment per l'empresa Ciment Molins S.A. (Molins de Rei, Barcelona).

2. Fum de sílice

La microsíllice utilitzada en la mescla és la MEYCO MS 610, que actua com un micro filler en el formigó, omplint els buits microscòpics entre les partícules cementícies reduint-ne la permeabilitat i augmentant-ne la seva densitat. Els porus capil·lars es taponen i el diàmetre equivalent dels microporus es redueix notablement. També té lloc una reacció puzolànica que confereix resistència mecànica i compacitat addicional al formigó.

En el cas dels formigons projectats, la microsíllice redueix la necessitat de l'ús d'accelerant de fraguat, el què significa en moltes ocasions la possibilitat d'aplicar majors espessors.

La microsíllice prevé en el formigó fresc de la exsudació i sedimentació, però a causa de la seva capacitat cohesiva, pot provocar efectes negatius en la treballabilitat del formigó projectat. Per aquesta raó, en dosificacions on hi és present la microsíllice és de prescripció obligatòria l'ús de superfluidificants.

Aquesta microsíllice s'afegeix en substitució del ciment, amb una dosificació entre un 5 i un 10 % en pes de ciment, tal i com recomanen les diferents normatives.

El fabricant, MEYCO, recomana un període prolongat de mescla mai inferior als 90 segons, per assegurar una correcta dispersió.

Les principals dades tècniques es presenten a la taula 3.2.

Dades Tècniques.	
Aspecte:	Pols
Color:	Gris
Densitat a 20 °C (real):	> 2.30 gr/cm ³
Densitat Aparent:	Aprox. 0.2 gr/cm ³
Contingut en SiO ₂ :	> 90%
Contingut en Clorurs:	< 0.1%

Taula 3.2. Dades tècniques MEYCO MS 610

3. Àrids

Per l'elaboració dels diferents formigons s'han usat dos tipus diferents d'àrids, en funció del seu tamany:

- Una arena de 0 – 5 mm, d'origen calcari de matxueig.
- Una arena de 5 – 12 mm, d'origen calcari de matxueig.

Aquests àrids van ser estudiats al laboratori per determinar les seves característiques i amb els resultats efectuar el càlcul de la dosificació corresponent. Els assaigs realitzats van ser:

1. Determinació de la corba granulomètrica realitzada segons la norma UNE EN 933-2:96. Els resultats obtinguts pels dos tipus d'àrids es presenten a la taula 3.3.

Nº ASTM	Tamís (mm)	Arena 0 - 5	Grava 5 - 12
1	12.70	100	100
2	9.52	100	91.94
4	4.76	99.81	5.88
8	2.38	80.16	0.13
16	1.19	47.49	0.00
30	0.595	28.39	0.00
50	0.297	12.54	0.00
100	0.149	4.66	0.00
200	0.074	0.89	0.00

Taula 3.3. Granulometries dels àrids.

2. Assaigs per la determinació del pes específic realitzats d'acord a la norma UNE 7-083. Els resultats es mostren a la taula 3.4.

Element	Pes específic sec
Arena 0 – 5 mm	2.67 kg/dm ³
Graveta 5 – 12 mm	2.72 kg/dm ³

Taula 3.4. Pesos específics dels àrids

4. Additius

La utilització de microsilice i el baix contingut d'aigua va obligar a la introducció d'additius superfluidificants, per tal de mantenir la treballabilitat als nivells adequats que l'equip de projecció requeria per un bombeig òptim.

Per dotar al formigó de la fluïdesa suficient per a la projecció es va utilitzar l'agent reductor d'aigua d'alta activitat o superplastificant *Glenium TC 1350*, de la casa Bettor – MBT.

Aquest superplastificant pot addicionar-se tant en planta, incorporat amb l'última part de l'aigua d'amassat, o en el camió formigonera, però sempre garantint un temps mínim de mesclat per garantir la correcta homogeneïtzació.

La dosificació recomanada pel fabricant es mou entre el 0.6 i el 2.5 % en pes de ciment, tot i que pot augmentar-se fins al 4% sense problemes de retràs de fraguat significatius.

Les dades tècniques de l'additiu es presenten a la taula 3.5.

Dades tècniques <i>Glenium TC 1350</i>	
Aspecte físic:	Color marró fosc
Densitat a 20 °C:	1.03 ± 0.02 gr/cm ³
pH a 20 °C:	6 ± 1
Clorurs:	0.1%
Viscositat, 20 °C Brookfield:	< 50 cps
Solubilitat en aigua:	Total
Funció principal:	Superplastificant/reductor aigua d'alta activitat
Funció secundària:	Accelerador de l'enduriment
Efectes secundaris per sobre-dosificació:	Risc de disgregació

Taula 3.5. Dades tècniques de l'additiu superfluidificant.

5. Fibres

En la present tesina es van utilitzar dos tipus diferents de fibres:

- Fibres metàl·liques: Dramix 65/35
- Fibres sintètiques: Grace Structural Fiber. GRACE.

A la taula 3.6 es resumeixen les principals característiques d'aquests dos tipus de fibres, com són la longitud, el diàmetre, límit elàstic, resistència a tracció, etc. A la figura 3.1. es mostren els tipus de fibres utilitzats.

Característica	Fibres Metàl·liques	Fibres Sintètiques
Matèria Primera	Acer estirat en fred	Mescla de polímers
Absorció	Nul·la	Nul·la
Longitud	35	50
Diàmetre	0.55	0.5
Gravetat específica	7.82	0.92
Mòdul d'elasticitat	210 GPa	4.30 GPa
Resistència a tracció	1150 MPa	550 MPa
Punt de fusió	acer	160 °C
Punt d'ignició	acer	590 °C
Resistència als àlcalis	-	Alta
Resistència a àcids i sals	-	Alta

Taula 3.6. Característiques de les fibres

A la taula podem observar una de les noves propietats que presenten les noves fibres sintètiques, com és el seu superior mòdul elàstic, tot i que és varis ordres de magnitud inferior al de les fibres metàl·liques.



(a)



(b)

Figura 3.1. Fotografies dels dos tipus de fibres utilitzades.

- (a) *Vista comparativa de les dues fibres, metàl·lica i sintètica respectivament.*
 (b) *Aspecte de les noves fibres sintètiques d'alt mòdul elàstic.*

3.3.2. Dosificació de la mescla

La dosificació de la mescla es va realitzar seguint la metodologia proposada per J. Rodríguez (1997) en l'àmbit del Laboratori de Tecnologia d'Estructures de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Aquesta metodologia de dosificació es fonamenta en les modificacions produïdes en la composició entre el formigó de partida i el formigó col·locat que el propi sistema de posada en obra introdueix en el material, com a conseqüència del rebot i de la incorporació d'aire com a sistema de transport i projecció.

$$Formigó_{col\cdot locat} = Formigó_{partida} + Variacions_{col\cdot locació} \quad (\text{eq. 3.1})$$

A partir de les característiques que nosaltres demanem al nostre formigó col·locat (porositat, densitat i f_{cm}), del nostre formigó de partida (porositat i densitat) i estimant els coeficients parcials de rebot de cada material (r_c , r_a , r_s i r_g) i el rebot mig del formigó projectat (r_m), s'arriba a la relació en pes següent:

$$H_c = H_p - r_m \cdot H_p = (1 - r_m) \cdot H_p \quad (\text{eq. 3.2})$$

$$\begin{aligned} Sorra_c &= (1 - r_s) \cdot Sorra_p & Aigua_c &= (1 - r_a) \cdot Aigua_p \\ Ciment_c &= (1 - r_c) \cdot Ciment_p & Graveta_c &= (1 - r_g) \cdot Graveta_p \end{aligned} \quad (\text{eq. 3.3})$$

Definint les proporcions del formigó col·locat s'obté la dosificació de partida.

La dosificació teòrica final (de partida) resultant de l'aplicació d'aquesta metodologia es presenta a la taula 3.7.

Component	Dosificació Teòrica⁽¹⁾
Ciment (kg/m ³)	370
Microsílice (kg/m ³)	30
Arena 0 – 5 mm (kg/m ³)	1215
Graveta 5 – 12 mm (kg/m ³)	550
Superplastificant *	1.8%
Aigua (litres)	170
Fibres (kg/m ³)	--
Relació a/c	0.43

(1) Dosificació teòrica de partida obtinguda de l'aplicació de la metodologia de J. Rodríguez (1997).

Taula 3.7. Dosificació teòrica de partida dels formigons a fabricar.

Les dosificacions de fibres, tant sintètiques com metàl·liques, van ser proposades pels mateixos fabricants, amb l'objectiu d'aconseguir dosificacions equivalents en termes de tenacitat.

Aquestes dosificacions proposades són:

- Fibres metàl·liques: 25 kg / m³.
- Fibres sintètiques: 4,5 kg / m³.

3.3.3. Assaigs complementaris

Durant les setmanes prèvies a les dates de projecció establertes en la planificació de la tesina es van dur a terme una sèrie d'assaigs en el Laboratori de Tecnologia d'Estructures. Aquests assaigs tenien com a objectiu determinar la dosificació d'additiu superplastificant, per tal de garantir unes òptimes condicions de bombejabilitat de la mescla durant el procés de projecció, però amb la limitació de que no es produís segregació.

Es van realitzar diverses amassades de prova de 25 litres, en una amassadora d'eix vertical de 40 litres de capacitat, modificant-ne la dosificació d'additiu superplastificant fins a aconseguir la dosi òptima.

La premissa inicial era aconseguir un nivell de fluïdesa adequat durant el procés de projecció. El temps considerat entre la fabricació del formigó en planta i el seu transport amb un camió formigonera fins al laboratori, on seria projectat, era d'entre 20 i 30 minuts.

Per reproduir aquesta situació, es realitzava la mescla i es mantenia durant 25 minuts a la amassadora, i posteriorment s'avaluava la seva fluïdesa mitjançant el Con d'Abrams. Aquest assaig es va realitzar amb diferents dosificacions d'additiu, i es va decidir que un percentatge de 1,8% sobre pes de ciment era la dosificació òptima per aconseguir un Con d'entre 15 i 18 centímetres, valor adequat per l'equip de projecció que s'utilitzaria en la projecció. També es va comprovar que tant l'aspecte com la textura del formigó fossin els adequats, amb una inspecció visual.

3.4. EXECUCIÓ I CONSERVACIÓ DE LES MOSTRES

Fabricació i transport

La fabricació dels tres tipus de formigons va realitzar-se a la planta de l'empresa PROMSA situada a Molins de Rei (Barcelona). Les limitacions en la producció de grans volums de formigó en el Laboratori de Tecnologia d'Estructures de la Universitat Politècnica de Catalunya ens va obligar a recórrer a la fabricació en una planta de formigó.

Es van fabricar 2 m³ de cada un dels diferents tipus de formigó, que van ser transportats fins al Laboratori mitjançant un camió formigonera de 6 m³ de capacitat. El temps dedicat a aquest transport va ser d'uns 25 minuts aproximadament. Les dosificacions dels tres formigons fabricats es presenten a la taula 3.8, dades facilitades per la pròpia planta de fabricació PROMSA.

La mescla d'àrids, ciment, i aigua es va realitzar automàticament en planta, controlant les quantitats introduïdes a la mescla a partir dels propis sistemes que l'amassadora disposava. En canvi, l'addició de la microsilíce, l'additiu superplastificant i les fibres, va ser manual. Nosaltres mateixos vam ser els encarregats d'abocar els diferents elements directament a l'amassadora.

Component	Dosificació Teòrica ⁽¹⁾	Dosificacions Reals ⁽²⁾		
		CTRL	FPFM	FPFS
Ciment (kg/m ³)	370	360	367.5	372.5
Microsilíce (kg/m ³)	30	30	30	30
Arena 0 – 5 mm (kg/m ³)	1215	1200	1220	1200
Graveta 5 – 12 mm (kg/m ³)	550	542.5	552.5	555
Superplastificant *	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%
Aigua (litres)	170	195.5	195.5	195.5
Fibres (kg/m ³)	--	--	25	4.50
Relació a/c	0.43	0.48	0.47	0.47

(1) Dosificació teòrica de partida obtinguda de l'aplicació de la metodologia de J. Rodríguez (1997).

(2) Dosificacions reals proporcionades per la planta de fabricació.

* percentatge en pes de ciment.

Taula 3.8. Dosificacions reals dels formigons fabricats.

Projecció i preparació de mostres

La projecció del formigó va ser realitzada per una empresa especialitzada en projeccions pel procés per via humida.

Un cop el camió formigonera arribava al LTE, es procedia a mesurar la consistència de la mescla mitjançant el Con d'Abrams per comprovar que aquesta era superior a 15, valor mínim indispensable per poder realitzar la projecció (figura 3.2).



Figura 3.2. Mesura de la consistència del formigó fresc.



Figura 3.3. Equip de projecció utilitzat

Comprovada la consistència, es va procedir a abocar el formigó a la tolva de recepció de l'equip de projecció. La bomba corresponia al model BSA 1002 de Putzmeister, amb una capacitat de bombeig de 20 m³/h, i un compressor d'aire de 8000 litres (figura 3.3).

Previ a l'arribada del camió formigonera s'havien col·locat els motlles de fusta on s'havia de projectar el formigó (figura 3.4-b). La diversitat d'assajos que aquesta tesina presenta va obligar a la utilització de tres tipus de motlles diferents:

- Motlles en artesa; per a l'extracció de les provetes cilíndriques per a la realització de la caracterització estàndard del formigó, així com les bigues per realitzar l'assaig de tenacitat. Les dimensions, recomanades per la UNE són de 600x600x150 (mides interiors). (figura 3.4-a)
- Motlles quadrats: aquests motlles es van utilitzar per fabricar les plaques que posteriorment servien per fer l'assaig de tenacitat EFNARC Plate Bending Test. Les dimensions, proposades per l' EFNARC, són de 600x600x100 mm (mides interiors).
- Motlles circulars: aquests motlles es van utilitzar per fabricar les plaques circulars per dur a terme l'assaig Australian Round Determinate Plate Test. Les dimensions de 800 mm de diàmetre per 75 mm d'espessor, són les recomanades per S. Bernard, investigador australià que va proposar aquest assaig com a alternativa a l'anterior. (figura 3.4 – b).



(a)



(b)

Figura 3.4. Tipus de motlles utilitzats durant la projecció.

La projecció es va realitzar sobre els plafons situats horitzontalment projectant de manera vertical a una distància entre 0,75 – 1,25 metres (figura 3.5-a)

Per tal d'aconseguir una homogeneïtat en les dimensions de les mostres, es va procedir a homogeneïtzar la superfície dels plafons suaument, per evitar una compactació extra del formigó projectat (figura 3.5-b).



(a)



(b)

Figura 3.5. Imatges de la projecció.

(a) Projecció dels plafons.

(b) Procés d'arranjament superficial.

Un cop projectats, els plafons es van tapar amb uns plàstics per mantenir unes bones condicions de curat.

24 hores després, quan el formigó presentava una certa resistència, els plafons es van traslladar a una zona exterior al laboratori, on van ser col·locats horitzontalment. Durant els dies següents a la projecció, els plafons van ser regats periòdicament per garantir el correcte curat. Cal destacar que la projecció va realitzar-se el 30 i 31 d'Octubre, èpoques no càlides que van ajudar al curat del formigó.

Preparació de les mostres

Referent a la preparació de les mostres per a la realització dels assaigs, cal diferenciar entre els assaigs de placa i biga, i els assaigs estàndard de caracterització, pels quals es van usar testimonis extrets del tipus provetes cilíndriques de 93 x 150 mm.

➤ *Assaigs de Placa.*

La preparació de les plaques pels assaigs de tenacitat no presentava cap particularitat. Tant les plaques quadrades per l'assaig EFNARC Plate Bending Test, com les circulars del Australian Round Determinate Plate Test van mantenir-se sota un rec d'aigua periòdic durant els dies en què aquestes van estar a l'exterior del laboratori, cobertes amb plàstics per evitar al màxim l'evaporació d'aigua.

El procés de desmotllat de les plaques va allargar-se durant varis dies, doncs tot i que els motlles de fusta es van pintar amb una mescla d'oli i gasolina, l'adherència que presentaven va obligar a separar una per una les peces que conformaven el motlle.

➤ *Assaigs de Biga*

Les bigues per realitzar els assaigs van obtenir-se dels plafons en forma d'artesa. Aquestes plaques, un cop desmotllades, van tallar-se amb una serra de disc en les dimensions predeterminades.

➤ *Assaigs de Caracterització*

Els assaigs de caracterització es van realitzar sobre provetes cilíndriques de dimensions $\varnothing 93 \times 150$ mm. Aquestes provetes es van obtenir a partir dels plafons en forma d'artesa.

Per obtenir aquestes provetes es va utilitzar una màquina perforadora de la marca HILTI, amb una sonda tubular d'acer de 93 mm de diàmetre i una broca de concreció de diamant. El procés d'extracció es pot veure a la figura 3.6-a.



(a)



(b)

Figura 3.6. Procés d'extracció de provetes.

(a) Màquina perforadora.

(b) Esquema final d'extracció de provetes.

Els plafons es van col·locar horitzontalment, degudament anivellats, i es va situar la màquina perforant en la direcció de projecció del formigó. De cada un dels plafons es van obtenir 9 provetes, separades entre elles uns 5 cm, com pot apreciar-se a la figura 3.6-b.

Les primeres provetes es van extreure als 7 dies, i posteriorment s'anaven extraient a mesura que eren necessàries per realitzar els assaigs pertinents. Un cop extretes, les provetes es portaven a la cambra humida (20 °C i 100% d'humitat) per mantenir el procés de curat del formigó.

Aquelles provetes destinades als assaigs per a l'avaluació de les característiques mecàniques (resistència a compressió i mòdul d'elasticitat) van ser tallades i polides per les dues cares per tal d'aconseguir que un paral·lelisme adequat entre elles.

Aquelles provetes destinades a avaluar les característiques físiques i la retracció plàstica només van ser tallades.

3.5. DESCRIPCIÓ DELS ASSAIGS

3.5.1. Assaigs sobre el formigó fresc.

3.5.1.1. Determinació de la Consistència. Assaig del Con d'Abrams.

a) Bibliografia consultada.

- UNE
 - 83-313-90. Mesura de la Consistència del formigó fresc. Mètode del Con d'Abrams.

b) Fonament.

El fonament d'aquest assaig és el d'obtenir una primera orientació de la treballabilitat de la mescla obtinguda a partir de l'assentament que aquesta pateix. L'assaig consisteix en omplir un motlle de forma tronco-cònica, i un cop està ple, es retira i es col·loca al costat de la massa de formigó que hi havia dins d'ell. La massa de formigó, al quedar sense el motlle que la contenia pateix un assentament respecte l'altura original. Aquesta diferència mesurada en centímetres és l'assentament del Con d'Abrams.

c) Maquinària d'assaig.

Per a la realització de l'assaig són necessaris:

- Motlle cònic de 30 cm d'altura, amb una obertura inferior de 20 cm, i una obertura superior de 10 cm.
- Barra compactadora amb la que es realitza el vibrat manual de cada una de les tres capes amb les que s'omple el motlle cònic.
- Plataforma rígida, no absorbent i de forma rectangular.
- Element de mesura de l'assentament de la mescla.

d) Procediment.

El procediment d'assaig es divideix en dues fases:

- I. S'omple el motlle cònic en tres capes, cadascuna d'elles vibrada amb la barra compactadora donant 25 cops. S'ha d'intentar que l'espessor de les tres capes sigui el mateix.

- II. Un cop el motlle està ple, es retira i es col·loca al costat de la massa de formigó. Es procedeix a mesurar l'assentament de la mescla respecte la seva altura original, i s'expressa en centímetres.

3.5.1.2. Determinació de la densitat en el formigó fresc

a) Bibliografia consultada.

- UNE
 - 83-317-91. Determinación de la densidad.

b) Fonament.

Assaig per determinar la densitat del formigó fresc, a partir de mesures realitzades en una balança.

c) Maquinària d'assaig.

Per la realització d'aquest assaig és necessari:

- Balança amb una resolució del 0.1% de la màxima capacitat de la mateixa.
- Recipient rígid i estanc, amb una capacitat V (5 litres en el nostre cas), i d'una massa determinada (m1).
- Barra compactadora.

d) Procediment

El procediment d'assaig pot dividir-se en quatre fases:

- I. Omplir el recipient amb el formigó, seguint un procés similar al que s'ha explicat per a l'assaig del Con d'Abrams (UNE 83-301), únicament diferenciat en el número de capes que es compacten (2).
- II. Enrasar el formigó i netejar la part exterior del recipient.
- III. Determinar la massa del conjunt (m2).
- IV. Càlcul del valor de la densitat segons l'expressió (eq. 3.4).

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{eq. 3.4})$$

3.5.1.3. Número de fibres.

a) Bibliografia consultada.

- UNE
 - 83-610. Determinación del contenido de fibras de acero. Ensayo por lavado.

b) Fonament.

Aquest assaig té com a objectiu determinar el número de fibres presents en la matriu de formigó després de la projecció. Aquest valor pot variar sensiblement a causa del fenomen del rebot.

c) Maquinària d'assaig.

Per la realització d'aquest assaig és necessari:

- Recipient metàl·lic estanc, amb volum i massa determinats.
- Balança amb precisió de 0.5 g per pesar les fibres amb exactitud de 1 g.

d) Procediment.

El formigó projectat en els motlles en forma d'artesa servirà per omplir el motlle metàl·lic. Posteriorment aquest formigó s'abocarà en una bandeja on es procedirà a netejar amb aigua la mostra, per disgregar-lo i poder separar les fibres. A continuació les fibres es reuneixen i s'acaben de rentar, i posteriorment s'introdueixen a l'estufa a 105 °C fins a pes constant.

El contingut de fibres es calcula a partir de l'expressió (eq. 3.5).

$$V_f = \frac{W_f}{M} \times 100 \quad (\text{eq. 3.5})$$

3.5.2. Assaigs sobre el formigó endurit.

3.5.2.1.- Assaig de compressió simple.

a) Bibliografia consultada.

- UNE
 - 83-304-84. Rotura por compresión.

b) Fonament.

Aquest assaig serveix per determinar la resistència a compressió del formigó projectat. En aquest assaig de compressió la direcció de l'eix longitudinal de la proveta coincideix amb la direcció d'aplicació de la càrrega. De l'assaig obtenim la càrrega màxima de ruptura a compressió, però si volem saber la

tensió de ruptura a compressió cal dividir aquesta càrrega pel valor de la secció de la proveta. Quan l'esveltesa de la proveta és inferior a 2, cal afectar els resultats d'un coeficient corrector.

c) Característiques de les provetes.

Les provetes són de forma cilíndrica de dimensions aproximades: diàmetre de 93 mm i altura de 150 mm. Les provetes es van obtenir a partir de la perforació dels plafons en artesa. Prèviament a l'assaig es va realitzar una preparació de les superfícies de les dues cares de la proveta, buscant que aquestes siguin llises i paral·leles entre si. Això es va aconseguir polint les dues cares de la proveta.

d) Maquinària d'assaig.

Per la realització de l'assaig de compressió es va utilitzar una premsa hidràulica. Es van realitzar assaigs a diferents edats, i es van utilitzar tres premses diferents.

- INSTRON 8505 amb una cèl·lula de càrrega de 10 tones.
- MTS - SUZPECAR amb una cèl·lula de càrrega de 500 tones.
- IBERTEST amb una cèl·lula de càrrega de 150 tones.

e) Procediment.

El procés d'assaig consisteix en col·locar la proveta entre les dues plataformes amb les que compta la premsa, i començar el procés de càrrega fins que es produeixi la ruptura de la proveta, obtenint així la càrrega de ruptura màxima.

3.5.2.2.- Determinació del mòdul d'elasticitat.

a) Bibliografia consultada.

- UNE
 - 83-316. Determinación del módulo de elasticidad en compresión.

b) Fonament.

Aquest assaig té com a objectiu el càlcul del Mòdul d'Elasticitat, mitjançant la mesura de les deformacions provocades en una proveta sotmesa a una càrrega de compressió simple, durant varis cicles de càrrega i descàrrega.

c) Característiques de les provetes.

Les provetes assajades per la determinació del mòdul d'elasticitat són les mateixes que les descrites en l'assaig per compressió simple (3.5.2.1).

d) Maquinària d'assaig.

Per realitzar aquest assaig es va utilitzar:

- Premsa hidràulica INSTROM 8505 amb una cèl·lula de càrrega de 10 tones, i una premsa IBERTEST, amb una cèl·lula de càrrega de 150 tones.
- Anells amb dispositius de medició de deformacions LVDT. El sistema utilitzat es presenta a la figura 3.7.



(a)

(b)

Figura 3.7. Sistema d'anells per la determinació del mòdul d'elasticitat.

(a) Detall de la col·locació dels lvdt.

(b) Posició dels anells durant l'assaig.

e) Procediment.

- I. Col·locació de la proveta dins dels anells, tant centrada com sigui possible, i fixació dels cargols. Aquests cargols es troben situats solidaris als anells, i fixen la proveta en tres generatrius separades 120° . La distància entre els dos anells és de 75 mm.
- II. Calibració dels 3 dispositius LVDT, encarregats de mesurar la deformació relativa entre els dos eixos dels anells. Al produir-se un moviment relatiu entre ambdós anells es genera un impuls elèctric que dóna lloc a un voltatge que es registra en un ordinador de forma contínua. La calibració es va realitzar de manera que una variació de 1 volt corresponia a un moviment de 0.15 mm.
- III. Carregar cíclicament la proveta a compressió uniaxial fins a un terç de la càrrega màxima de ruptura a un increment de tensió de 0.5 MPa/seg. La càrrega màxima de ruptura s'haurà prèviament determinat en assaigs de compressió simple realitzats sobre provetes similars a les usades en aquest assaig. Durant tot el procés es registren els moviments relatius

proporcionats pels tres LVDT en un ordinador, cada 5 segons en el nostre cas, doncs coneixent la distància entre els dos anells i el moviment relatiu entre els anells tenim perfectament descrit l'evolució de la deformació durant l'assaig. Aquest cicle de càrrega - descàrrega es repeteix tres vegades.

IV. Tractament numèric dels resultats registrats a l'ordinador.

f) Obtenció del mòdul d'elasticitat.

A partir dels resultats enregistrats a l'ordinador podem avaluar el mòdul d'elasticitat amb un tractament estadístic. Recordem que la relació entre la tensió aplicada i la deformació és lineal i segueix l'expressió $\sigma = E \cdot \varepsilon$.

La tensió s'obté a partir de la càrrega que el pistó ha aplicat sobre la proveta, registrada contínuament a l'ordinador, i les dimensions d'aquesta (secció).

La deformació s'obté com a mitja de les tres deformacions mesurades pels Lvdt. Dels tres cicles de càrrega - descàrrega aplicats sobre la proveta se n'elimina el primer doncs es produeixen fenòmens d'acomodament dels àrids. A partir de les dades obtingudes es realitza un ajust lineal per mínims quadrats de cada una de les rampes de càrrega dels dos cicles posteriors, que proporciona el pendent de la recta, i per tant el mòdul d'elasticitat.

3.5.2.3. Determinació del Pes específic i la Porositat aparent

a) Bibliografia consultada.

- UNE
 - 83-602-5. Determinación de la densidad.

b) Fonament

Assaig per avaluar tant la densitat com la porositat aparent en mostres de formigó projectat endurit, a partir de mesures de pes i volum.

c) Característiques de les provetes.

Les provetes seran cilíndriques de 93 mm de diàmetre i 150 mm d'altura, i es van assajar a l'edat de 28 dies des de la seva projecció.

d) Maquinària d'assaig.

Per la realització d'aquest assaig és necessari:

- Balança de precisió 0.5 gr.
- Balança hidrostàtica de precisió 1.0 grams.
- Tanc d'aigua estanc per submergir les provetes.

- Estufa amb ventilació d'aire forçat i regulable a 105 ± 5 °C.

e) Procediment.

- I. Es submergeixen les provetes en un tanc d'aigua a una temperatura de 20 ± 2 °C, durant el temps suficient perquè la variació entre dues pesades successives sigui igual o inferior a 1 gram. En el nostre cas, aquest període va ser de 72 hores. Obtenim el pes saturat P_s .
- II. Pesada de les mostres saturades en una balança hidrostàtica amb precisió de 1 gram. Obtenció de P_w .
- III. Assecat de les mostres en una estufa d'aire forçat a una temperatura de 60 - 70 °C. Es mantindran les mostres a l'estufa fins que la variació entre dues pesades consecutives a intervals d'una hora sigui inferior a 1 gram. Obtenció de P_{sec} .

f) Obtenció de la densitat i porositat.

Els resultats s'obtindran a partir de les expressions (eq. 3.6-a, eq. 3.6-b i eq. 3.6-c).

$$Densitat_saturada = \left(\frac{P_s}{P_s - P_w} \right) \text{ grams / cm}^3 \quad (\text{eq. 3.6-a})$$

$$Densitat_seca = \left(\frac{P_{sec}}{P_s - P_w} \right) \text{ grams / cm}^3 \quad (\text{eq. 3.6-b})$$

$$Porositat = \frac{Vol.buits}{Vol.total} = \left(\frac{P_s - P_{sec}}{2P_s - P_{sec} - P_w} \right) \times 100 \text{ \% en volum} \quad (\text{eq. 3.6-c})$$

Els valors definitius s'obtindran de la mitja aritmètica dels resultats obtinguts per cada una de les provetes assajades. Per mostrar la variabilitat dels resultats s'acompanyarà al resultat del seu corresponent Coeficient de Variació Cv.

3.5.2.4. Retracció per assecat

a) Bibliografia consultada.

- UNE
 - 83-602-5 / 83-318-94. Determinación de los cambios de longitud.

b) Fonament.

Assaig per mesurar la retracció en proveta del formigó projectat amb l'objectiu de caracteritzar la influència de l'addició de fibres en la retracció per assecat.

c) Característiques de les provetes.

Les provetes seran cilíndriques de diàmetre 93 mm i 150 mm d'altura. L'inici de l'assaig serà a l'edat de 28 dies des de la projecció fins als 8 mesos.

d) Maquinària d'assaig.

Per la realització de l'assaig de retracció i les medicions associades va ser necessari:

- Rellotge comparador (figura 3.8).
- Punts extensiomètrics.
- Estufa de parafina.
- Cambra de control ambiental (20 ± 1 °C; 50 ± 2 % H.R.) del Laboratori de Tecnologia d'Estructures (UPC).

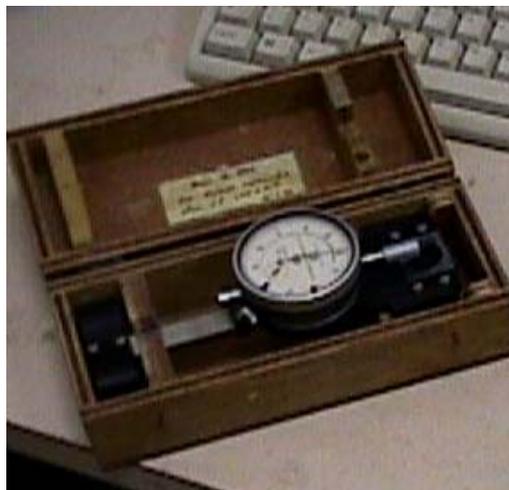


Figura 3.8. Rellotge comparador per mesurar la retracció en proveta.

e) Procediment.

- I. Col·locació dels punts extensiomètrics disposats per parelles en tres generatrius separades 120° , i unides a la proveta mitjançant una cola sintètica d'altres prestacions. Les parelles de punts es separen 10 cm entre ells.

- II. Recobriment de les superfícies planes de la proveta amb parafina per evitar la pèrdua d'aigua pels extrems.
- III. Introducció a la cambra de control ambiental de les provetes a 20 °C i 50 % d'humitat relativa.
- IV. Mesura periòdica de les distàncies entre els punts extensiomètrics utilitzant el rellotge comparador. Es realitzaven 2 mesures per cada parell de punts, i el valor de la retracció s'obtenia com a mitja de les 2 mesures a cada una de les generatrius. A partir d'aquestes mesures s'obtenia la deformació experimentada pels centres geomètrics dels plans definits pels extrems de cada segment de lectura.

3.5.2.5. Recompte del número de fibres metàl·liques

a) Bibliografia consultada

- LTE
 - Recompte de fibres metàl·liques.

b) Fonament.

Determinar el contingut de fibres metàl·liques en el formigó projectat amb l'objectiu de realitzar un control de qualitat de material resultant. En casos on el rebot no s'hagi pogut avaluar, aquest assaig pot donar una idea de la magnitud d'aquest fenomen intrínsec al procés de projecció.

c) Característiques de les provetes.

Per a la realització d'aquests assaig s'utilitzaran les provetes cilíndriques de diàmetre 93 mm i de 140 mm d'altura que s'han assajat prèviament per avaluar la resistència a compressió.

d) Maquinària d'assaig.

Per dur a terme l'assaig de recompte de fibres es va utilitzar:

- Premsa MTS – SUZPECAR amb una cèl·lula de càrrega de 150 tones.
- Recipient metàl·lic.
- Imant de mitjana capacitat.
- Balança amb precisió de 0,1 grams.

e) Procediment.

- I. Caracterització geomètrica de les provetes i es calcula el seu volum. Posteriorment es porten a la destrucció total mitjançant la premsa, intentant que no romanguin sencers porcions grans.

- II. Es realitzen passades amb l'imant a una distància suficient per tal que les fibres metàl·liques s'hi adhereixin.
- III. Recompte de fibres i pesada de les mateixes. Càlcul del número de fibres per unitat de volum segons la fórmula (eq. 3.7).

$$n^{\circ} \text{ fibres} = \frac{\text{pes}_{\text{fibres}}}{\text{volum}_{\text{proveta}}} \quad \text{en kg / m}^3 \quad (\text{eq. 3.7})$$

3.5.2.6. Assaigs de Tenacitat

A la literatura tècnica existeixen nombrosos assaigs desenvolupats per investigar la capacitat del formigó projectat reforçat amb fibres d'absorbir energia un cop s'ha produït la primera fissura, o el que és el mateix, l'avaluació de la seva tenacitat. D'entre ells, s'han escollit el EFNARC Bending Plate Test i el Australian Round Determinate Plate Test, així com un assaig de biga. En aquests assaigs s'ha mantingut el fonament, però s'han introduït petites modificacions, principalment en els aparells d'assaig dissenyats. L'objectiu dels assaigs, que busca comparar el comportament relatiu de les noves fibres sintètiques amb el de les metàl·liques, no es veu modificat amb les variacions introduïdes.

3.5.2.6.1. EFNARC Plate Bending Test.

a) Bibliografia consultada.

- EFNARC
 - European Specification for Sprayed Concrete: Guidelines for Specifiers and Contractors.

b) Fonament.

Un element o mostra de formigó projectat és sotmès a una càrrega, sota control de fletxes, mitjançant un plat situat al centre de l'element. La corba de càrrega - fletxa es registra contínuament fins a valors de fletxes propers als 30 mil·límetres en el punt central de l'element, amb l'objectiu de calcular la capacitat d'absorbir energia a una certa deformació.

c) Característiques de la placa.

La placa assajada és quadrada de dimensions: 600 x 600 x 100 mm, i s'ha mantingut en condicions òptimes de curat des de la seva projecció.

d) Maquinària d'assaig.

Per la realització de l'assaig de tenacitat es va utilitzar:

- Premsa INSTRON 8505 amb una cèl·lula de càrrega de 10 tones, amb un plat de càrrega específicament dissenyat per aquest assaig, de dimensions: 100 x 100mm.
- Un marc metàl·lic rígid format per 4 UPN 100 soldat en taller. El disseny d'aquest element va ser realitzat consultant la bibliografia sobre el tema, però sempre tenint en compte les limitacions en què es situa aquesta tesina. L'esquema del marc metàl·lic es presenta a la figura 3.9. La llum interior del marc és de 500 x 500 mil·límetres.

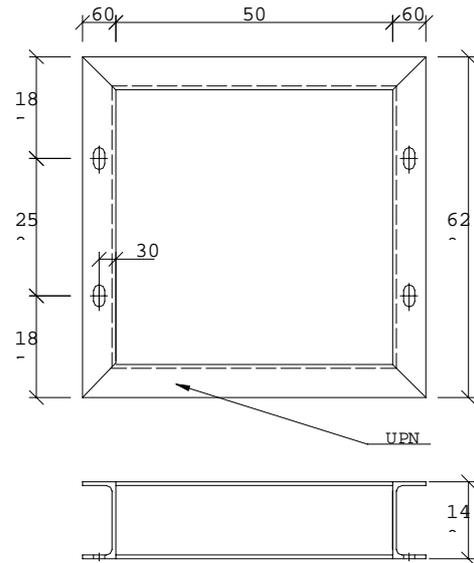
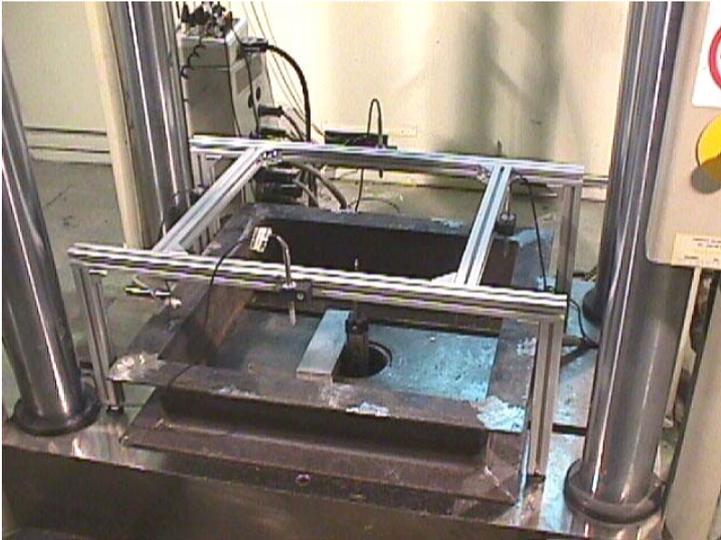


Figura 3.9. Fotografia i esquema de la maquinària d'assaig del EFNARC Plate Bending Test.

- Un sensor de desplaçament, element de mesura de la fletxa a la part central inferior de la placa amb un rang de 0-10 cm.
- 4 Lvdt, situats en el punt mig de cada un dels costats com es mostra a la figura 3.9. Aquests elements estaven solidàriament units a una construcció d'alumini dissenyada per a aquest assaig.

e) Procediment.

- I. Es col·loca la placa a assajar sobre el marc metàl·lic, que es troba anclat a la base de la premsa mitjançant uns cargols de diàmetre 20 mm per evitar qualsevol desplaçament durant l'assaig. La placa es va col·locar amb la superfície rugosa a la part superior, modificació respecte les recomanacions de l' EFNARC, per tal de reduir la complexitat de l'assaig. Les irregularitats que presentava la part rugosa feien inevitable una preparació prèvia de la placa amb morter per garantir un complet anivellament durant l'assaig. Es va considerar que per analitzar els comportaments relatius dels dos tipus de fibres, aquesta modificació no seria significativa.

- II. Col·locació dels aparells de mesura prèviament calibrats. El funcionament del sensor de desplaçament és el mateix que el dels lvdts, és a dir, a partir de canvis de voltatge es mesuren els desplaçaments en l'element assajat. Es va col·locar a la part inferior de la placa un sensor de desplaçament amb capacitat per mesurar desplaçaments de 0 - 10 centímetres, juntament amb una plaqueta metàl·lica per evitar que el cap d'agulla del sensor de desplaçament s'introduís dins de les fissures obertes durant l'assaig, fet que provocaria la lectura de dades errònies.
- III. Es va procedir a col·locar l'estructura d'alumini que aguantava els llapis Lvdt, amb l'objectiu de mesurar els desplaçaments en els punts mitjos de la placa. La seva distribució es pot veure a la figura 3.9.
- IV. Finalment es va procedir a col·locar unes tires de tefló a la zona de contacte entre la placa i el marc metàl·lic per tal d'evitar qualsevol coacció al moviment durant el procés d'assaig. Tanmateix es va col·locar una làmina de tefló en el contacte entre el plat de càrrega i la placa, per aconseguir un contacte tant regular com fos possible. Les làmines de tefló tenien un espessor de 1,5 mil·límetres.
- V. Un cop preparat, es va procedir a realitzar l'assaig, enregistrant en un ordinador de forma contínua la càrrega i les deformacions que es mesuraven. Quan la fletxa al punt central és de 40 mm, es dona per finalitzat l'assaig.

3.5.2.6.2. Australian Round Determinate Plate Test.

a) Bibliografia consultada.

- Bernard S. (2000 b)
 - Influence of Geometry on Performance of Round Determinate Panels made with Fibre Reinforced Concrete.

b) Fonament.

Un element o mostra de formigó projectat és sotmès a una càrrega, sota control de fletxes, mitjançant un plat situat al centre de l'element. La corba de càrrega - fletxa es registra contínuament fins a valors de fletxes propers als 30 mil·límetres en el punt central de l'element, amb l'objectiu de calcular la capacitat d'absorbir energia a una certa deformació. La variació respecte a l'assaig de l'EFNARC és el seu caràcter isostàtic, doncs la placa es recolza només en tres punts.

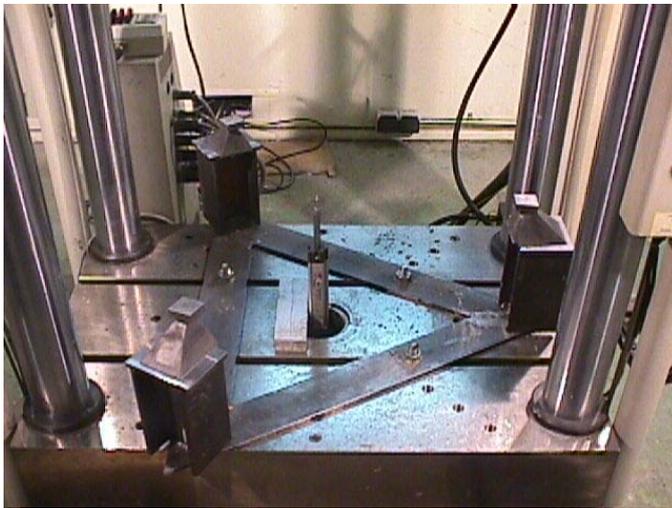
c) Característiques de la placa.

La placa a assajar és rodona, de diàmetre 800 mm i un espessor de 75 mm, i s'ha mantingut en condicions òptimes de curat des del moment en què va ser projectada.

d) Maquinària d'assaig.

Per la realització de l'assaig de tenacitat es va utilitzar:

- Premsa INSTRON 8505 amb una cèl·lula de càrrega de 10 tones, amb un plat de càrrega específicament dissenyat per aquest assaig, de dimensions: circular de diàmetre 100 mm.
- Un bastidor format per una base triangular, amb uns perfils laminats HEB 100 soldats a cada un dels vèrtexs de 30 cm d'altura. (figura 3.10-a).
- Un sensor de desplaçament, element de mesura de les fletxes col·locat a la part inferior de la placa, centrat a ella (figura 3.10-b).
- Bases piramidals d'acer tractat, roscades sobre els perfils amb uns petits elements que fan la funció de ròtules per permetre el gir lliure de la placa durant l'assaig. (figura 3.10-c).



(a)



(b)



(c)



(d)

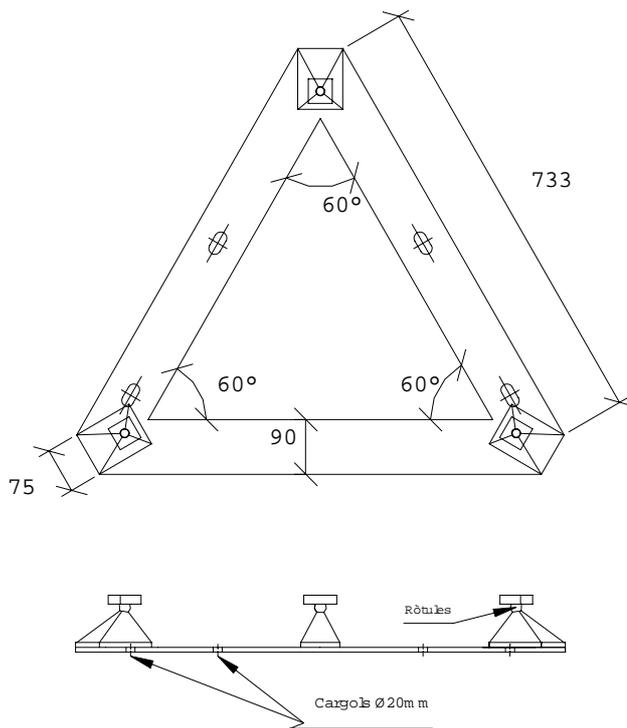


Figura 3.10. Fotografia i esquema maquinària RDP Test.

- (a) Vista general del bastidor*
- (b) Sensor de desplaçaments*
- (c) Vista del plat de càrrega*
- (d) Detall de les bases piramidals*
- (e) Esquema del bastidor*

e) Procediment

- I. Es col·loca la placa a assajar sobre el bastidor metàl·lic dissenyat, i posteriorment s'eleva la placa manualment per col·locar-hi les ròtules. En aquest assaig es col·loca la placa amb la superfície rugosa a la part superior, tal com diuen les recomanacions. Amb l'ajuda d'una cinta mètrica es centra la placa amb el plat de la premsa.
- II. Col·locació del sensor de desplaçament a la part inferior de la placa, juntament amb la petita placa metàl·lica per evitar que el cap d'agulla del sensor de desplaçament s'introdueixi en una de les fissures, fet que donaria lloc a errors en les lectures. Prèviament s'ha procedit a calibrar l'element de mesura.
- III. Col·locació d'una làmina de tefló en el contacte entre la placa i el plat de càrrega per tal d'aconseguir un contacte adequat.
- IV. Un cop preparat (figura 3.11), es va procedir a realitzar l'assaig, enregistrant en un ordinador de forma contínua la càrrega i els desplaçaments que es mesuraven. Quan la fletxa al punt central és de 50 mm, es dona per finalitzat l'assaig.



Figura 3.11. Placa de FPFS preparada per a ser assajada.

3.5.2.6.3. Assaig de biga.

a) Bibliografia consultada.

- EFNARC (1999)
 - European Specification for Sprayed Concrete. Guidelines for Specifiers and Contractors.

b) Fonament.

Un element o mostra de formigó projectat és sotmès a una càrrega aplicada al punt mig de l'element, sota control de fletxes. L'element es situa amb la cara irregular en la part superior. La corba de càrrega - fletxa es registra contínuament fins a valors de fletxes propers als 6 mil·límetres en el punt mig de l'element, amb l'objectiu de calcular la capacitat d'absorbir energia a una certa deformació, així com la seva resistència a flexotracció. Respecte la normativa de l'assaig es va modificar el plat de càrrega a causa de l'excessiva irregularitat superficial que presentava la biga. Es va canviar el plat de càrrega amb dos punts de contacte per un plat amb un únic punt de contacte amb la biga.

c) Característiques de la biga.

La biga és de dimensions 150 x 150 x 550 mm, i s'obté del procés de tallat dels plafons projectats en forma d'artesa.

d) Maquinària d'assaig.

Per la realització de l'assaig de biga es va utilitzar:

- Premsa INSTRON 8505 amb una cèl·lula de càrrega de 10 tones, amb un plat de càrrega específicament dissenyat per assaigs de biga.
- Bastidor format per dos punts de recolzament separats 450mm (figura 3.12).
- Un lvdt de 10mm, element de mesura del desplaçament col·locat a la part inferior de la biga, i suportat per un sistema de barres enganxat a la generatriu de l'element. (figura 3.13).

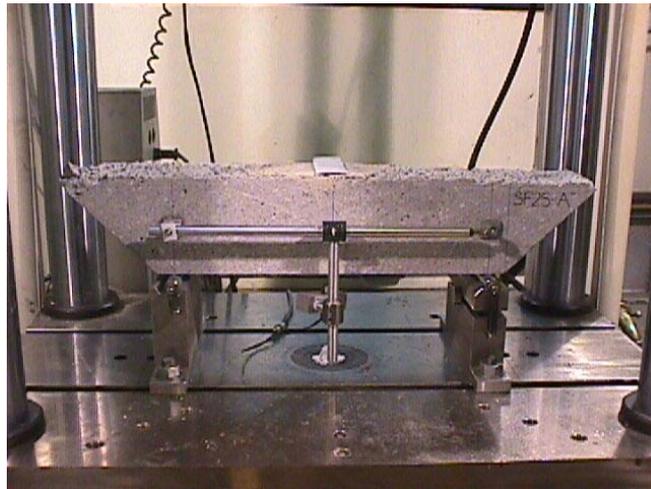


Figura 3.12. Fotografia d'una biga preparada per ser assajada.



Figura 3.13. Detall de la col·locació de l'element de mesura de fletxes.

e) Procediment.

- I. Es col·loca la biga centrada en els dos recolzaments, de manera que la llum lliure és de 450 mm.
- II. Es col·loca el sistema de sosteniment del lvdt, col·locat al punt mig de la llum lliure, i centrat respecte el gruix de la biga.
- III. Cal·libració del sistema de mesura de fletxes del punt central (lvdt), i col·locació d'una petita plaqueta d'acer per evitar que l'agulla del lvdt penetri les fissures.
- IV. Col·locació d'una làmina de tefló a la zona de contacte entre el plat de càrrega i la biga, per reduir al màxim la influència de la irregularitat superficial de la biga en els resultats.
- V. Realització de l'assaig. Adquisició de dades contínues de càrrega i deformacions mesurades mitjançant un ordinador. L'assaig es dona per finalitzat quan el valor de la fletxa del punt central és superior als 6 mil·límetres.