



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

**Determinació del coeficient parcial de seguretat a aplicar al
formigó reforçat amb fibres d'acer sotmès a tracció
(706-TES-CA-4262)**

Autor/a

Carles Camós Andreu

Tutor/a

**Climent Molins Borrell
Joan Ramon Casas Rius**

Departament

Enginyeria de la Construcció

Intensificació

Estructures

Data

23-10-09

Resum

Títol: Determinació del coeficient parcial de seguretat a aplicar al formigó reforçat amb fibres d'acer sotmès a tracció.

Autor: Carles Camós i Andreu

Tutors: Climent Molins i Borrell, Joan Ramon Casas i Rius

Durant els últims anys s'ha intensificat la recerca de tècniques que permetin reduir, o fins i tot, eliminar completament, les armadures del formigó. L'addició de fibres d'acer a la matriu de formigó està resultant ser una tècnica efectiva per cobrir les mancances que aquest material mostra davant els esforços de tracció.

Les fibres contribueixen notòriament a la resistència de l'element on estiguin aplicades. Nombrosos estudis corroboren aquesta contribució estructural. L'efecte de les fibres també es sol aprofitar durant certes etapes transitòries a les que es pot veure sotmès un determinat element (transport, emmagatzematge, etc), ja que sovint en aquests estats entremitjos es generen sol·licitacions més desfavorables que en l'estat final, un cop col·locat i en servei.

No obstant, existeix incertesa en algunes bases de càlcul preses durant el dimensionament d'elements estructurals fabricats a partir de formigó amb fibres. Un exemple concret en són els coeficients parcials de seguretat que s'adopten.

El principal objectiu d'aquesta tesina és calibrar el coeficient parcial de seguretat de la resistència residual a flexió del formigó amb fibres, entenent que és una variable que es pot veure alterada per la presència de les fibres. Aquesta calibració es realitzarà a través de l'estudi d'exemples concrets d'aplicació, com són els anells d'un tram experimental de túnel de la L9 del metro de Barcelona, construït únicament amb dovelles prefabricades de FRF (sense armat).

Una campanya experimental realitzada a la UPC va permetre obtenir un bon coneixement del comportament resistent del material. Amb les dades de resistència conegudes, i tenint en compte les sol·licitacions actants en les dovelles durant les seves etapes crítiques (fabricació, manipulació, transport i col·locació), es realitzarà una calibració dels coeficients parcials de seguretat mitjançant tècniques conegudes de fiabilitat estructural, com les simulacions de Montecarlo o el mètode de fiabilitat estructural FOSM, garantint una probabilitat de fallada òptima i en acord amb la naturalesa transitòria de les situacions que s'analitzen.

Abstract

Title: Determination of the partial safety coefficient to be applied on steel fibre reinforced concrete under traction strength

Author: Carles Camós Andreu

Tutors: Climent Molins Borrell, Joan Ramon Casas Rius

In the last few years research on techniques that permit the reduction or even the complete elimination of concrete reinforcements has been intensified. The addition of steel fibres to the concrete matrix is proven to be an effective way of covering the deficiencies in this material when under tensile stress.

Fibres contribute notoriously to the strength of the element there where they are applied. A large number of studies corroborate this structural contribution. The effect of fibres is often used during the phases of transition that a determinate element can experience (transport, storage, etc.), since it is usually during those intermediate states that unfavourable stresses will be generated. These unfavourable stresses are even worse than in the final state, when the element has been placed and it is being used.

However, there is uncertainty surrounding some of the basis calculations taken during the dimensioning of structural components constructed of fibre reinforced concrete. A particular example is the partial safety coefficients that are employed.

The aim of this dissertation is to calibrate the partial safety coefficients from the residual flexural strength of the fibre reinforced concrete, taking into account that it is a variable that can be altered by the presence of fibres. This calibration will be carried out through the study of particular application examples, such as the rings used in an experimental stretch of the L9 Metro tunnel in Barcelona. A stretch solely constructed of prefabricated voussoirs made of fibre reinforced concrete (without reinforcement).

An experimental campaign carried out by the UPC permitted the acquisition of good knowledge about the resistant behaviour of this material. The calibration of the partial safety coefficients will be based on the data obtained about the strength, and taking into account the stresses that affect the voussoirs during their critical phases (construction, manipulation, transport and setting). Well-known techniques of structural reliability, such as the Montecarlo Simulations or the structural reliability FOSM method, will be used to carry out the study. These techniques guarantee an optimal probability of failure in accordance with the transitional nature of the analysed situations.

Agraïments

Bérénice Bonamy
Climent Molins
David Abad
Emilio Franco
Joan Ramon Casas
Marta Pérez
Miguel González
Roser Valls
Sílvia Suárez

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS..... | 9 |
| 2. GENERALITATS PRÈVIES | 12 |
| 2.1 EL FORMIGÓ AMB FIBRES | 12 |
| 2.2 ANÀLISI DE RESISTÈNCIA | 14 |
| 2.2.1 Resistència de pic..... | 14 |
| 2.2.2 Determinació de la resistència pic (tracció indirecta): l'assaig Barcelona ... | 15 |
| 2.2.3 Transformació de la càrrega aplicada a resistència a tracció: el mètode de bieles i tirants..... | 18 |
| 2.2.4 Resistències residuals | 21 |
| 2.2.4.1 Introducció | 21 |
| 2.2.4.2 Comparació de les resistències residuals: assaig de flexotracció i assaig Barcelona..... | 21 |
| 2.2.4.3 Diagrames de resistència residual proposats per la EHE 2008..... | 22 |
| 3. TRACTAMENT DE LES DADES PROCEDENTS DE LA L9 DE BARCELONA | 25 |
| 3.1 INTRODUCCIÓ I ORIGEN DE LES DADES..... | 25 |
| 3.2 ANÀLISI ESTADÍSTIC | 27 |
| 3.2.1 Determinació de la resistència a tracció indirecta..... | 27 |
| 3.2.2 Comparació amb els valors proposats per la EHE 2008 | 30 |
| 3.2.3 Determinació de la resistència residual a flexotracció..... | 32 |
| 4. ANÀLISI DE LES ACCIONS ACTUANTS EN LES DOVELLES..... | 38 |
| 4.1 INTRODUCCIÓ | 38 |
| 4.1.1 Hissat de les dovelles amb eslingues..... | 39 |
| 4.1.2 Apilament de les dovelles | 39 |
| 4.2 PLANTEJAMENT SEGONS LES DIRECTRIUS DE LA EHE 2008 | 40 |
| 4.2.1 Aixecament amb eslingues..... | 41 |
| 4.2.1.1 Estat Límit de Servei de fissuració..... | 42 |
| 4.2.1.2 Estat Límit Últim de sol·licitacions normals..... | 43 |
| 4.2.1.3 Resum de resultats | 45 |
| 4.2.1 Apilament de les dovelles | 45 |
| 4.2.1.1 Estat Límit de Servei de fissuració..... | 47 |
| 4.2.1.2 Estat Límit Últim de sol·licitacions normals..... | 47 |
| 4.3 PLANTEJAMENT PROBABILÍSTIC DELS PROBLEMES..... | 48 |
| 4.3.1 Introducció | 48 |
| 4.3.2 Aleatorietat de les variables i mètodes d'estimació de la probabilitat de fallada | 49 |
| 4.3.2.1 Mètode de fiabilitat estructural FOSM (first order second moment) | 49 |
| 4.3.2.2 Simulacions de Montecarlo..... | 51 |
| 4.3.3 Anàlisi del problema de l'hissat amb eslingues | 52 |
| 4.3.3.1 Estat Límit de Servei de fissuració..... | 53 |
| 4.3.3.2 Estat Límit Últim de sol·licitacions normals..... | 55 |
| 4.3.4 Apilament de les dovelles | 56 |
| 4.3.4.1 Estat Límit de Servei de Fissuració | 57 |
| 4.3.4.2 Estat Límit Últim de sol·licitacions normals..... | 58 |
| 4.4 RESUM I CONCLUSIONS..... | 58 |
| 5. CALIBRATGE DELS COEFICIENTS PARCIALS DE SEGURETAT..... | 61 |
| 5.1 INTRODUCCIÓ | 61 |
| 5.2 ÍNDEX DE FIABILITAT I PARÀMETRES DE SIGNIFICÀNCIA EXISTENTS | 61 |
| 5.3 CALIBRATGE DELS COEFICIENTS PARCIALS DE SEGURETAT..... | 62 |
| 5.4 ELECCIÓ DELS COEFICIENTS PARCIALS DE SEGURETAT | 64 |
| 5.5 COMPROVACIÓ DE LA SEGURETAT EN L'APLICACIÓ DE LA NORMATIVA EHE 08..... | 65 |

| | |
|---|-----------|
| 5.6 COMPROVACIÓ DE LA SEGURETAT DELS NOUS COEFICIENTS..... | 66 |
| 5.7 PROPOSTA DEFINITIVA DE COEFICIENTS PARCIALS DE SEGURETAT..... | 68 |
| 5.8 COST ECONÒMIC ASSOCIAT A L'ÍNDEX DE FIABILITAT CALCULAT | 69 |
| 6. RESUM I CONCLUSIONS | 72 |
| 7. ANNEXOS..... | 75 |
| 7.1 SIMULACIONS DE MONTECARLO (AMB PROGRAMA SCILAB ®) | 75 |
| 7.1.1 ELU Hissat amb eslingues..... | 75 |
| 7.1.2 ELU Apilament de dovelles..... | 76 |
| 7.2 PROGRAMACIÓ DE L'ALGORITME DEL MÈTODE FOSM (AMB PROGRAMA MATLAB ®) 77 | |
| 7.2.1 ELS Hissat amb eslingues..... | 77 |
| 7.2.2 ELU Hissat amb eslingues..... | 78 |
| 7.2.3 ELS Apilament de dovelles..... | 80 |
| 8. REFERENCIES | 85 |

CAPÍTOL 1

INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

La indústria de la construcció ha sofert una evolució molt important en els darrers anys. L'aparició de noves tècniques de disseny i càlcul, juntament amb el desenvolupament de la tecnologia del formigó i del propi material en sí, han provocat avenços molt importants en la metodologia constructiva.

Com és sabut, un dels principals desavantatges en l'ús del formigó convencional és el mal comportament que presenta vers els esforços de tracció. Aquesta mancança es resol normalment amb la disposició d'armadures d'acer, ja siguin actives (tan pretesades o posttesades) o passives. Actualment, s'està intensificant la recerca de tècniques que permetin reduir, o fins i tot eliminar completament, les armadures del formigó. Una d'aquestes tècniques consisteix en l'addició de fibres d'acer en la matriu de formigó.

Les fibres contribueixen notòriament a la resistència de l'element on estiguin aplicades. Nombrosos estudis corroboren aquesta contribució estructural. L'efecte de les fibres també es sol aprofitar durant certes etapes transitòries a les que es pot veure sotmès un determinat element (transport, emmagatzematge, etc), ja que sovint en aquests estats entremitjos es generen sol·licitacions més desfavorables que en l'estat final, un cop col·locat i en servei.

Avui en dia són nombroses les aplicacions d'aquesta tècnica de reforç, ja sigui en paviments, soleres industrials, canonades, obres hidràuliques, estabilització de talussos, etc. Un exemple d'ús també el trobem en les dovelles que formen els anells dels túnels construïts amb tuneladores. Aquestes dovelles es construeixen a base de formigó armat, i s'hi realitza l'addició de fibres per augmentar-ne les prestacions resistents.

Malgrat els clars avantatges que presenta aquesta tècnica, són pocs els països que tenen incorporades a les seves respectives normatives, recomanacions i directrius a seguir per tal de reforçar el formigó amb fibres. Espanya ha estat un dels països que recentment ha inclòs en la seva normativa (EHE 2008) un annex (número 14) dedicat a aquesta nova tècnica. Aquí s'hi inclouen les bases per al projecte, tècniques d'anàlisi estructural adaptades al nou material, propietats bàsiques a tenir en compte, eines de càlcul, consells per a l'execució i, finalment, directrius per al control de qualitat del producte final.

Pel que fa a les bases de càlcul del formigó reforçat amb fibres (a partir d'ara FRF), l'estat del coneixement encara no és molt ampli. En concret, no hi ha una opinió clara i generalitzada dels coeficients parcials de seguretat que s'han d'usar en les estructures construïdes amb FRF. La Instrucció espanyola actual (EHE 2008) considera que els coeficients parcials a usar en el FRF han de ser els mateixos que per al formigó sense addició. Efectivament, a l'article 15.3 de l'annex 14 s'exposa que la incorporació de fibres en condicions usuals no modifica la incertesa que condueix a l'estimació d'aquests coeficients.

El principal objectiu d'aquesta tesina és calibrar el coeficient parcial de seguretat de la resistència residual a flexotracció del formigó amb fibres, entenent que és una variable que es pot veure alterada per la presència de les fibres. Aquest calibratge es realitzarà a través de l'estudi d'exemples concrets d'aplicació, com són els anells d'un tram experimental de la L9 del metro de Barcelona, construït únicament amb dovelles prefabricades de FRF (sense armat).

En el marc d'una tesi doctoral de la UPC (*Mora i Molins, 2008*), es van realitzar una sèrie d'assajos mitjançant l'assaig de doble punxonament *Barcelona* a tot un seguit de provetes de FRF extretes de les dovelles, amb l'objectiu d'obtenir dades de resistència a tracció, tant indirecta com residual. Les característiques i resultats d'aquests assajos s'exposaran en apartats posteriors.

Aquesta campanya experimental va permetre obtenir un bon coneixement del comportament resistent del material. Es van extreure gràfiques de càrrega aplicada i fissuració provocada que permetien valorar, mitjançant equivalències establertes, les resistències a tracció indirecta i residual a flexotracció.

Amb les dades de resistència conegudes, i tenint en compte les sol·licitacions actuant en les dovelles durant les seves etapes crítiques (fabricació, manipulació, transport i col·locació), es vol arribar a determinar el coeficient parcial de seguretat desitjat, mitjançant tècniques de fiabilitat estructural. Aquestes permetran tenir en compte el caràcter aleatori de certes variables que intervindran en la comprovació dels estats límits que es plantejaran.

Finalment, a mode d'anàlisi, es valoraran els coeficients obtinguts, i es determinaran les probabilitats de fallada associades, comprovant que siguin les adequades per a la naturalesa de les situacions que s'estudien.

CAPÍTOL 2

GENERALITATS PRÈVIES

2. GENERALITATS PRÈVIES

A continuació es resumiran diversos conceptes, propietats i altres punts importants a tenir compte del FRF. També es farà un repàs de les característiques de l'assaig tingut en compte en aquesta tesina per a la caracterització resistent del material: l'assaig Barcelona.

2.1 El formigó amb fibres

El formigó és un material compost, format per una matriu de ciment que lliga un esquelet mineral inert constituït per àrids de diferents mides. Aquesta naturalesa del material fa que el formigó presenti una sèrie de defectes i fissures internes ja des de l'inici de la seva elaboració. El seu comportament davant diverses condicions de càrrega vindrà regit per la propagació d'aquests defectes i fissures.

Amb l'addició de fibres, el formigó guanya ductilitat i tenacitat. A priori la resistència a la tracció de la matriu de formigó no millora, però a mesura que es produeix l'obertura de les fissures, les fibres que les uneixen transmeten una certa capacitat resistent residual. No obstant, quantificar aquesta millora de prestacions és, sovint, difícil.

Actualment existeix una gran quantitat de tipus de fibres atenent al material, forma i prestacions. A més, les fibres es poden afegir en quanties molt diferents, depenent de les propietats finals del material que es vulguin aconseguir.

Una de les maneres típiques de caracteritzar el comportament del formigó sotmès a càrrega flexora és a través de la corba que representa la càrrega aplicada contra el desplaçament produït. En la figura 1 observem aquesta gràfica per a una biga de formigó convencional, de mides 100x100x400mm, sotmesa a esforços de flexió, amb una càrrega aplicada al centre de llum de l'assaig.

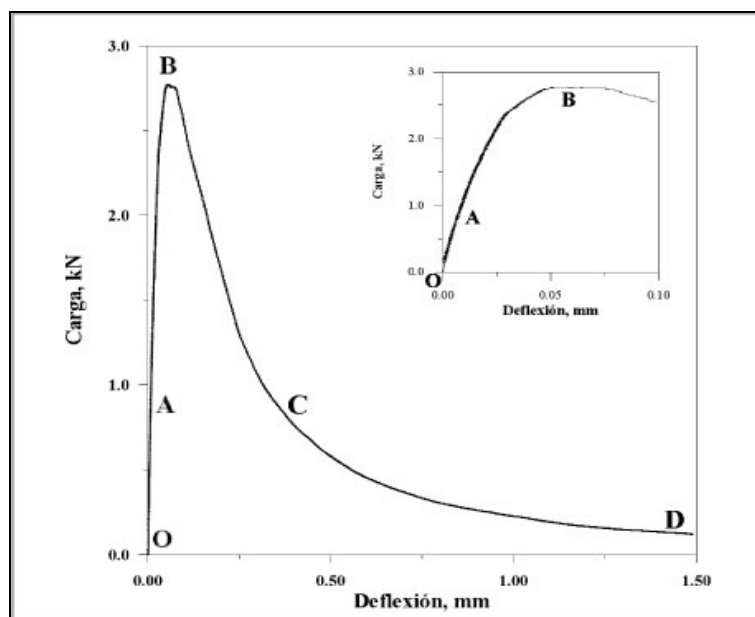


Figura 2.1 Corba de càrrega – fletxa d'una biga de formigó sotmesa a flexió (Font: Ingeniería y construcción)

A la figura es poden identificar quatre zones típiques:

- OA: branca elàstica lineal.
- AB: una zona de no linealitat abans d'assolir la càrrega màxima (punt B) on s'originen i es propaguen microfissures internes disminuint la rigidesa del material.
- BC: zona on es produeix una disminució de la càrrega resistida pel material a mesura que augmenta el desplaçament produït.
- CD: trobem una cua de resistència residual, deguda al fregament entre els grans d'àrid i d'altres efectes de fricció.

La propagació de fissures a través de la massa de ciment s'iniciarà a les zones on la biga estigui traccionada. El que es pretén amb l'addició de fibres és reforçar el formigó i millorar-ne les prestacions, especialment durant la branca post-fissuració. Tal i com es pot veure en la figura 2, el formigó convencional i el formigó amb fibres tenen un comportament gairebé idèntic en la branca de prefissuració. Les diferències apareixen quan l'element comença a fissurar, augmentant la ductilitat del formigó sotmès a flexió.

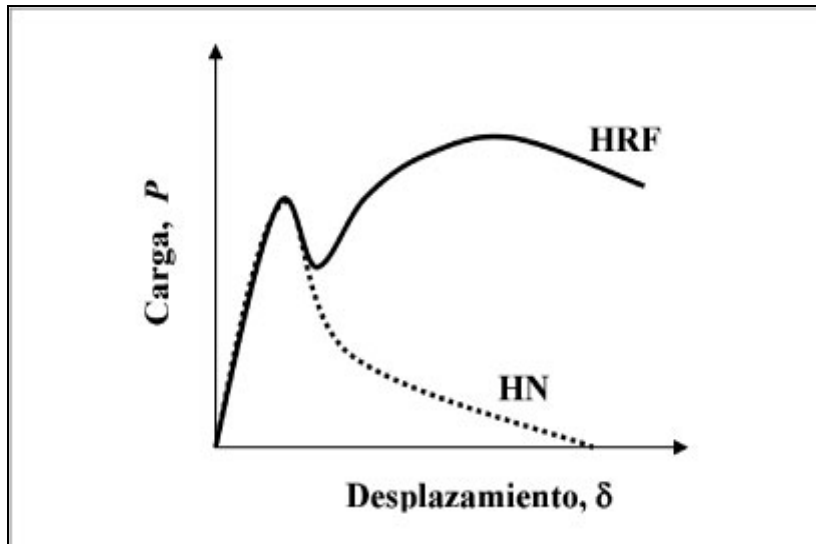


Figura 2.2 Corba de càrrega – desplaçament típiques per formigó en massa i formigons reforçats amb fibres

(Font: Ingeniería y construcción)

Les fibres d'acer presenten influència en gairebé tots els modes de fallada del formigó, en especial, aquells derivats de la fatiga, la tensió directa, l'impacte i l'esforç tallant. Quan s'aplica un esforç, les tensions produïdes es reparteixen per la matriu de ciment, de manera compartida amb les fibres. A mesura que es produeix la fissuració de la matriu de formigó, les tensions es transmeten progressivament cap a les fibres, fent que la ruptura de la peça es produeixi de manera més dúctil.

Les variables relatives a les fibres que intervenen més directament en les propietats finals del formigó són l'eficiència i el contingut de les mateixes. L'eficiència mesura la resistència de les fibres a no ser arrencades de la mescla, i depèn de la força d'unió de la interfase entre la matriu de formigó i la fibra. Per

fibres amb secció uniforme, aquesta resistència augmenta la longitud de fibra. És a dir, fibres més llargues, en general, proporcionen major eficiència.

Llavors, per una determinada longitud de fibra, les relacions elevades entre la longitud i el diàmetre són associades a una alta eficiència de les fibres. Aquesta relació s'anomena "aspecte de la fibra". No obstant, si aquesta relació és molt elevada, es produeix una disminució de la treballabilitat i la distribució no uniforme de les fibres dins la matriu de formigó.

La ductilitat és un altre aspecte important a considerar de les fibres. A més ductilitat, més gradual serà la ruptura de l'element de formigó en cas de fallada, permetent adoptar les mesures de seguretat respectives, si fos necessari. És important destacar que és preferible una fallada per arrencament de les fibres, que no perquè aquestes hagin arribat al seu límit tensional. La raó la trobem en el tipus de fallada. Si les fibres no poden suportar més tensió, la ruptura serà de tipus fràgil, comportant unes pitjors conseqüències.

Així doncs, la interfase entre la fibra i la matriu de formigó, i per tant, l'adherència entre la pasta cimentosa i la fibra, és un dels elements determinants en la dissipació d'energia, quan el formigó està sotmès a esforços de flexió o tracció. Altres factors bàsics que determinen la resistència del FRF són la disposició, la concentració i orientació relativa de les fibres dins la matriu.

2.2 Anàlisi de resistència

El formigó pot resistir diverses tipologies de càrrega i esforços. L'interès d'aquest a tesina el trobem en la resistència que ofereix quan està sotmès a esforços de tracció. És sabut que les prestacions que ofereix davant els esforços de compressió són molt millors que les que ofereix davant la tracció.

A continuació es comenten dues resistències que s'usen per a caracteritzar el comportament a tracció del FRF.

2.2.1 Resistència de pic

En afegir fibres a la matriu de formigó, la capacitat de resistència a l'aparició de la primera fissura és manté invariant, ja que la resistència màxima a tracció és la mateixa que la del formigó en massa.

A falta d'assajos que proporcionin aquesta resistència, l'actual Instrucció del formigó proposa les següents expressions per determinar la resistència mitjana a tracció ($f_{ct,m}$), a partir de la resistència característica a compressió (f_{ck}):

$$\begin{aligned} f_{ct,m} &= 0,30f_{ck}^{2/3} & \text{si } f_{ck} \leq 50 \text{ N / mm}^2 \\ f_{ct,m} &= 0,58f_{ck}^{1/2} & \text{si } f_{ck} > 50 \text{ N / mm}^2 \end{aligned} \quad (2.1)$$

S'admetrà que la resistència característica inferior a tracció $f_{ct,k}$ (corresponent al percentil 5%) es pot trobar com:

$$f_{ct,k} = 0,70f_{ct,m} \quad (2.2)$$

La resistència mitjana a flexotracció, $f_{ct,m,fl}$, ve donada per la següent expressió, en funció del cantell total de l'element h en mm:

$$f_{ct,m,fl} = \max \left\{ (1,6 - h/1000) f_{ct,m}; f_{ct,m} \right\} \quad (2.3)$$

Actualment, existeixen diversos assajos que mesuren la tracció, ho facin de manera directa, o indirecta, essent aquests últims els més comuns per la sèrie d'avantatges que ofereixen respecte la resta. Els assajos de tracció directa presenten diverses dificultats de realització, en especial per la incapacitat d'obtenir de manera raonable distribucions uniformes de tensions a través de la fissura. A més, apareixen altres inconvenients tals com la dificultat de subjecció de la proveta i la d'assegurar l'estabilitat de l'assaig.

Dins els assajos de tracció indirecta trobem, com a més importants, l'assaig Brasiler, l'assaig Wedge-Splitting o l'assaig de doble punxonament, anomenat *Barcelona* quan el material assajat és FRF. Aquest últim ha estat l'assaig de referència per assajar diverses provetes procedents d'un tram experimental del túnel de la L9 de Barcelona, construït amb dovelles de formigó reforçat únicament amb fibres. En apartats posteriors, amb les dades obtingudes, es realitzarà un anàlisi de fiabilitat per tal de calibrar el coeficient parcial desitjat. Per aquest motiu, a continuació se'n detallen les característiques més importants del seu funcionament.

2.2.2 Determinació de la resistència pic (tracció indirecta): l'assaig Barcelona

L'assaig Barcelona és un assaig de doble punxonament, dissenyat per a determinar la resistència a la tracció indirecta del FRF.

L'esquema de l'assaig es pot apreciar en la figura 2.3. Es disposa una proveta cilíndrica de formigó de diàmetre i alçada de 150mm, de manera vertical, entre les plaques de càrrega que comprimeixen la proveta de manera uniaxial, utilitzant dos punxons circulars d'acer col·locats concèntricament a sobre i a sota de la mostra a assajar.

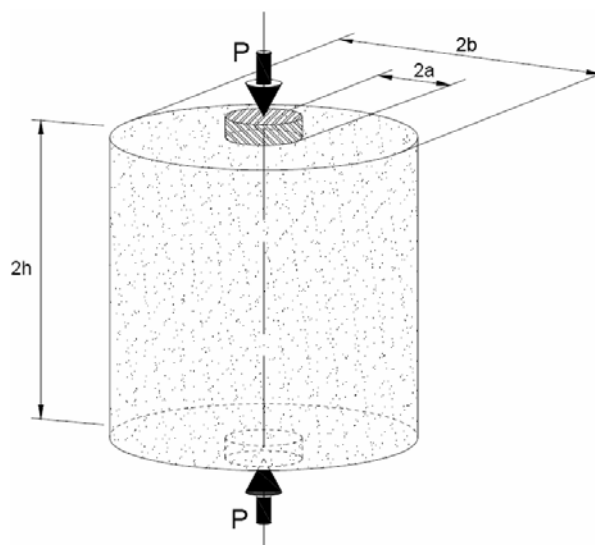


Figura 2.3 Esquema bàsic de l'assaig de doble punxonament

La compressió dels dos punxons provoca el trencament progressiu de la peça. A mesura que s'aplica la càrrega de compressió, es van formant diverses superfícies de ruptura. En concret, es produeixen dos tipus de ruptura diferenciats:

- a) Una ruptura per lliscament entre les superfícies dels fragments cònics i els segments de formigó exteriors.
- b) Una ruptura de separació a les superfícies radials fissurades entre els
- c) segments de formigó exteriors.

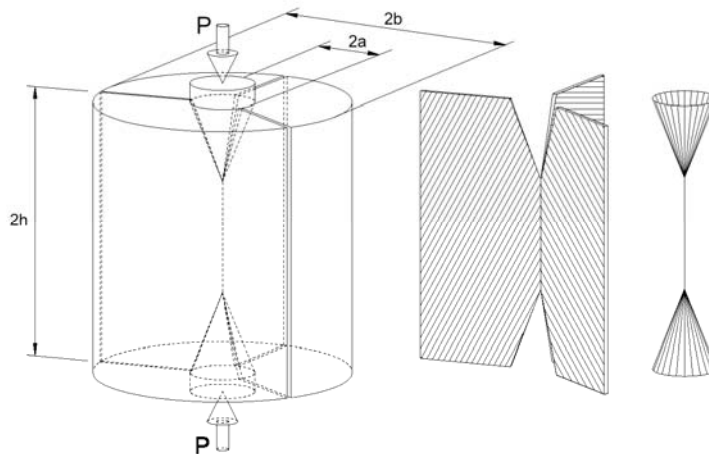


Figura 2.4 Esquema idealitzat del mode de ruptura d'una proveta cilíndrica de formigó

El procés de fragmentació s'inicia amb la ruptura de separació de les superfícies radials, permetent que el con format sota els plats de càrrega pugui desplaçar-se (ruptura de desplaçament).

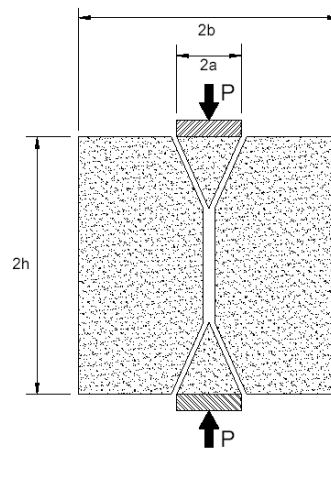


Figura 2.5 Esquema idealitzat del mode de ruptura d'una proveta cilíndrica de formigó

A la figura següent es pot veure una fotografia d'una proveta assajada amb l'assaig Barcelona, just abans de produir-se el trencament complet de la peça.

Podem observar clarament els plans de separació exteriors, i el con penetrant cap a l'interior, a mesura que els plans augmenten la distància entre ells.

El número de plans de separació formats sol variar. Normalment es formaran 3 plans de separació, però aquest nombre pot ser inferior o superior.



Figura 2.6 Proveta de formigó un cop realitzat l'assaig Barcelona

Durant l'assaig, la proveta té un extensòmetre rodejant-la, que enregistra en tot moment l'elongació circumferencial total que es produeix, degut a l'obertura de fissures, i que és equivalent a la suma de les separacions entre els diferents plans de separació formats.

L'assaig es pot considerar finalitzat quan l'elongació assoleix valors al voltant de 6mm. Coneixent la magnitud de l'elongació, i la càrrega que s'aplica en cada moment, es poden dibuixar les gràfiques corresponents de càrrega contra obertura, com les de la figura 2.7:

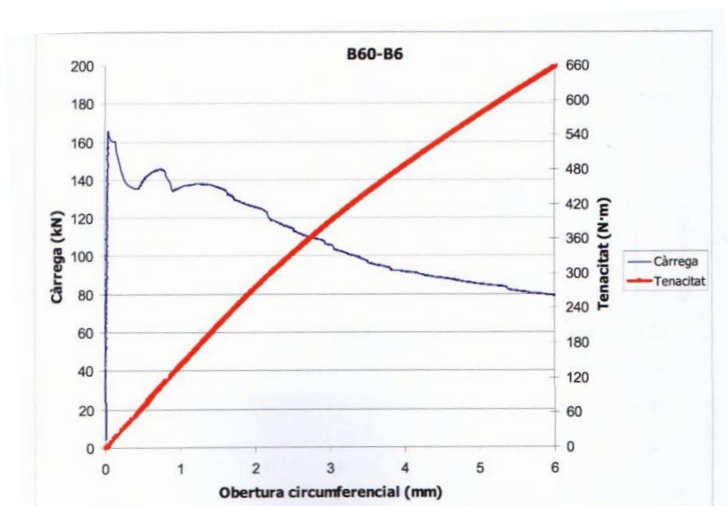


Figura 2.7 Corba càrrega aplicada – obertura circumferencial, durant l'assaig BCN (Guàrdia, 2008)

L'assaig de doble punxonament presenta diversos avantatges respecte la resta d'assajos utilitzats per determinar la resistència a tracció. Primerament, la realització de l'assaig és més senzilla, ja que s'utilitza una premsa convencional (la que s'usa en la ruptura de provetes a compressió). A més, la càrrega necessària per a arribar a la ruptura és reduïda, i per tant, poden usar-se màquines de menor capacitat.

L'assaig Barcelona usa provetes cilíndriques de cantell i diàmetre 150mm, cosa que significa un estalvi de material molt important si el comparem amb assajos que utilitzen bigues o panells, tal com el de flexió en 3 punts. També cal tenir en compte que les provetes usades són cilíndriques, i aquest fet en facilita la seva extracció dels elements estructurals, augmentant la fiabilitat de l'assaig. Les provetes extretes poden ser assajades directament, sense necessitat de tractament previ, fet que augmenta la rapidesa i versatilitat de l'assaig.

No obstant, l'assaig Barcelona no proporciona un valor directe de la resistència a tracció indirecta (f_{ct}). El que s'obté és un seguit de valors de càrrega aplicada contra una elongació circumferencial produïda. Per això són necessàries expressions que permetin la transformació, en aquest cas de la càrrega pic, a la resistència de tracció indirecta.

Són diversos els models que s'han proposat amb el temps, a partir d'estudiar la mecànica de fractura de la proveta. Un dels que ha demostrat ser més apropiat per a l'assaig Barcelona, és el mètode de bieles i tirants.

2.2.3 Transformació de la càrrega aplicada a resistència a tracció: el mètode de bieles i tirants

A continuació s'exposa la metodologia per obtenir la resistència a tracció indirecta (f_{ct}) a partir d'una càrrega pic P , mitjançant el mètode de bieles i tirants.

Durant l'assaig, en aplicar-se la càrrega, la proveta entra en tensió. Un dels esquemes possibles amb que podríem representar l'estat tensional simplificat de la proveta, podria ser el que s'observa a la figura 2.8:

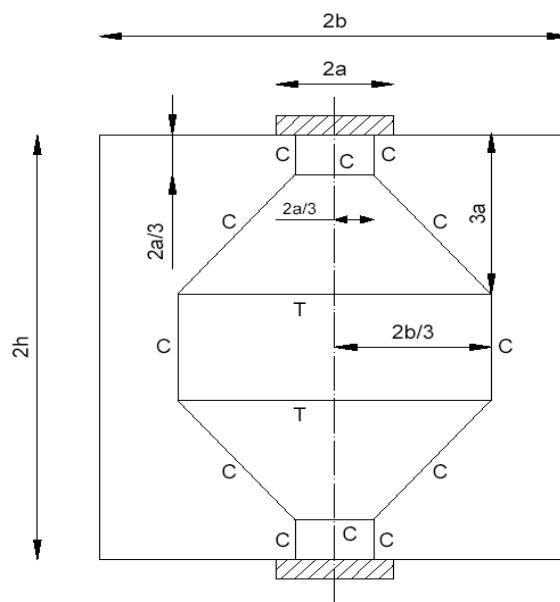


Figura 2.8. Esquema de bieles i tirants (per a una proveta amb $h=b$)

Els elements denominats "C" representen les bieles, és a dir, els fluxos de tensions de compressió, mentre que els elements "T", anomenats tirants, representen els fluxos de tensions de tracció. Aquest model representa de manera prou fidel el comportament real de la proveta.

No obstant, aquest model pot simplificar-se tenint en compte que l'efecte de l'estat triaxial sota els plats de càrrega és menyspreable, obtenint-se el següent model:

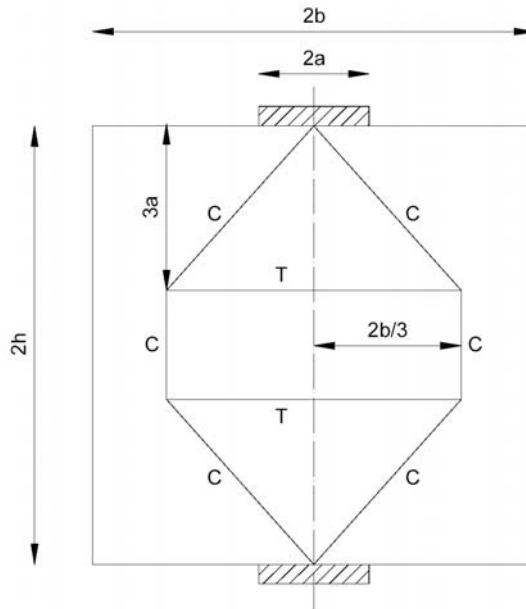


Figura 2.9 Esquema de bieles i tirants ($h=b$) simplificat

El mètode fixa la resultant de les traccions (posició del tirant T) a una profunditat de $3a$, respecte la cara superior de la proveta. Definirem l'alçada efectiva (h_{ef}) com l'alçada de formigó de la proveta que contribueix a la resistència a la tracció. En el cas que ens ocupa, $h_{ef} = h$ (semi-alçada de la proveta).

Per altra banda, es pot observar que el baricentre d'un sector cilíndric de radi R es troba situat a $2R/3$ del centre. Si la relació $a/b = 1/4$, el baricentre de les traccions radials horitzontals estarà situat a $2b/3$. D'aquesta manera s'obté que el valor de la força per radià és $P/2\pi$ aplicat a $2b/3$ de l'eix de la proveta cilíndrica.

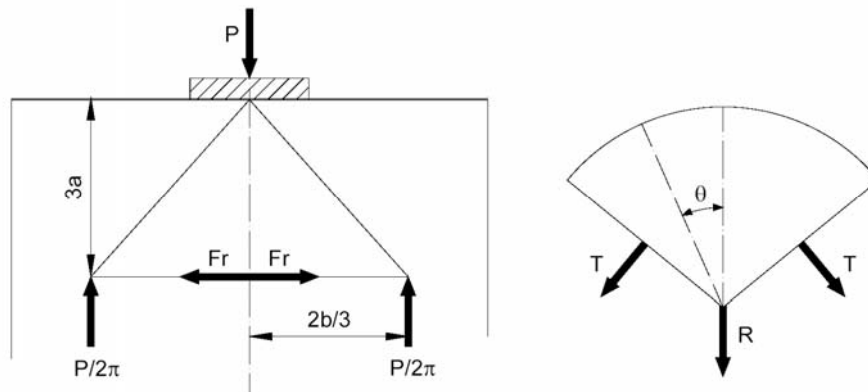


Figura 2.10 Forces existents en el mètode de bieles i tirants proposat

Fent l'equilibri de moments al punt d'aplicació de la càrrega externa P sobre la proveta, per un $d\theta$, s'obté la següent equació, on F_r representa la força a tracció radial que s'obté:

$$F_r = \frac{P \cdot 2b}{2\pi \cdot 3} \cdot \frac{1}{3a} \quad (2.4)$$

Avaluant les traccions a dos plans de ruptura formant un angle de 20° ($-\pi/3, \pi/3$), s'obté la resultant de les traccions (T):

$$R_{tracció} = \int_{-\pi/3}^{\pi/3} F_r \cdot \cos \theta \cdot d\theta = \sqrt{3} \cdot F_r \quad (2.5)$$

A partir de la geometria de la figura 2.9, podem obtenir:

$$R = 2T \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) = 2 \frac{\sqrt{3}}{2} T = \sqrt{3} \cdot T \quad (2.6)$$

A mitja alçada de la proveta (=h) a tracció, el valor del tirant (T) és el següent:

$$T = f_{ct} \cdot h \cdot b \quad (2.7)$$

Igualant expressions anteriors:

$$F_r = T \quad (2.8)$$

I el valor de la càrrega (P):

$$P = f_{ct} \cdot h \cdot b \cdot 9\pi \cdot \left(\frac{a}{b}\right) \quad (2.9)$$

I finalment, l'expressió desitjada queda com:

$$f_{ct} = \frac{P}{9\pi \cdot h \cdot a} \quad (2.10)$$

On:

- P és la càrrega pic aplicada a la proveta
- h és la semi-alçada de la proveta
- a el radi del plat de càrrega

Aquesta expressió serà la que ens permetrà determinar la resistència a tracció indirecta del FRF, a partir dels valors de càrrega aplicats en l'assaig Barcelona. Cal destacar que aquesta expressió és independent del número de plans de separació que es formen en trencar la peça. També és important destacar que en cap moment s'ha considerat que la distribució de tensions fos elàstica. Aquest fet és important, ja que podrem usar aquesta mateixa expressió per a

calcular les resistències residuals, com es veurà posteriorment, a partir de les càrregues aplicades durant la branca de post-fissuració.

2.2.4 Resistències residuals

2.2.4.1 Introducció

Com ja s'ha comentat, una de les principals aportacions de l'addició de fibres al formigó és l'augment de resistència residual a tracció. Aquesta serà una de les característiques més interessants per a modelar el comportament estructural del FRF.

Les fibres embegudes dins la matriu de formigó comencen a treballar quan la tensió existent iguala la resistència a tracció del formigó, fet que en provoca la fissuració. La funció de les fibres és mantenir un ample de fissura mínim, però si la tensió continua, aquestes van perdent adherència i resistència residual, i com a conseqüència, les fibres es van obrint.

Existeixen diversos assajos de laboratori per a modelar el comportament del FRF durant la fase de post-fissuració. L'assaig de referència en la Instrucció espanyola correspon a l'assaig de flexotracció. Les variables més característiques que mesura solen ser la càrrega pic aplicada, la deflexió de la biga que s'assaja, i el CMOD¹.

L'assaig Barcelona també és capaç de proporcionar molta informació respecte el comportament del formigó en fibres després d'assolir la resistència pic a tracció. A partir de la càrrega aplicada durant l'assaig, en concret a la branca de post-fissuració, és possible obtenir valors de l'evolució de la resistència residual. De manera anàloga que en el cas de la càrrega de pic, aquesta transformació de càrrega aplicada a resistència es pot realitzar amb el mètode de les bieles i tirants (apartat 2.2.3). Aquesta expressió és totalment vàlida, ja que a diferència d'altres models, aquest no es basa en models elastoplàstics que deixen de tenir sentit quan apareixen fissures.

2.2.4.2 Comparació de les resistències residuals: assaig de flexotracció i assaig Barcelona

No obstant, si comparem els valors de la resistència residual obtinguts amb els assajos a flexotracció, i els obtinguts mitjançant l'assaig Barcelona, són lleugerament diferents, ja que també ho són la naturalesa dels esforços que s'apliquen (flexotracció, o tracció indirecta).

Guàrdia i Molins (2008), van demostrar que es podien establir relacions entre les resistències residuals obtingues amb els diferents assajos. En el seu estudi, van establir aquesta relació per a diferents tipus de formigons que contenien quanties i tipologies varies de fibres.

Si examinem les característiques de l'addició de fibres en les dovelles del tram experimental que analitzarem posteriorment, tenim:

| | |
|-------------------------|----------------------|
| Quantia de fibres: | 60 kg/m ³ |
| Longitud de les fibres: | 50 mm |
| ϕ de les fibres: | 1 mm |

¹ Crack Mouth Opening Displacement : desplaçament de l'obertura de la fissura

L'estudi demostra que per aquest tipus i quantia de fibres, la relació entre les tensions residuals de l'assaig a flexotracció i les de l'assaig Barcelona és d'**1,35**, quan l'**obertura circumferencial** de l'assaig de doble punxonament val **2,5mm**.

Així doncs, serà possible obtenir la resistència residual a flexotracció, a partir de l'assaig Barcelona. Només en caldrà consultar la càrrega aplicada quan l'obertura circumferencial sigui de 2,5mm, i mitjançant l'expressió del mètode de bieles i tirants, es convertirà a resistència residual. A aquest valor se li aplicarà el coeficient 1,35 per obtenir la resistència residual a flexió.

2.2.4.3 Diagrames de resistència residual proposats per la EHE 2008

La Instrucció espanyola actual del formigó (EHE 2008) proposa un parell de diagrames per modelar el comportament post-pic del FRF. Aquests diagrames parteixen de dades obtingudes a partir de la gràfica Càrrega – CMOD de l'assaig de flexotracció EN 14651:2005.

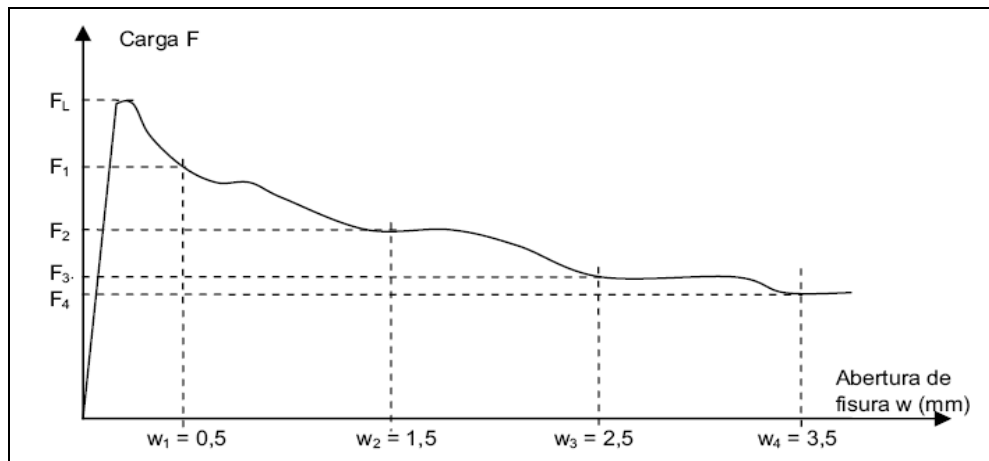


Figura 2.11 Gràfica CMOD – Càrrega de l'assaig de flexotracció EN 14651:2005

Les variables que intervenen en els diagrames de la instrucció són les següents:

$$\begin{aligned}
 f_{ct,d} &= 0,6f_{ct,fl,d} \\
 f_{ctR1,d} &= 0,45 \cdot f_{R1,d} \\
 f_{ctR3,d} &= k_1(0,5f_{R3,d} - 0,2f_{R1,d}) \\
 \varepsilon_1 &= 0,1 + 1000 \cdot f_{ct,d} / E_{c,o} \\
 \varepsilon_2 &= 2,5 / l_{cs} \\
 \varepsilon_{lim} &= 2,0\% \\
 l_{cs} &= \min(s_m, h - x)
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

on $f_{R1} \equiv F_1$ i $f_{R3} \equiv F_3$ de la figura 2.10, corresponen a l'assaig de flexotracció; $f_{ct,fl}$ és el LOP² definit per l'assaig de flexotracció EN14651; $E_{c,o}$, és el

² Límit elàstic a flexió

mòdul elàstic del formigó; s_m és la distància mitja entre fissures definit a la taula 39.5.1 de la EHE 2008; h és la profunditat total de la peça; i x és la profunditat de la fibra neutra.

Moltes de les variables que integren les expressions anteriors vénen acompanyades del subíndex d , indicant que al valor que representa se li ha aplicat un coeficient parcial de seguretat. Com ja s'ha esmentat, la Instrucció estableix que aquest pot ser el mateix coeficient que s'aplica per minorar la resistència a tracció del formigó convencional (és a dir, 1,5).

El diagrama multilinear queda representat tal i com es veu a la figura 2.12:

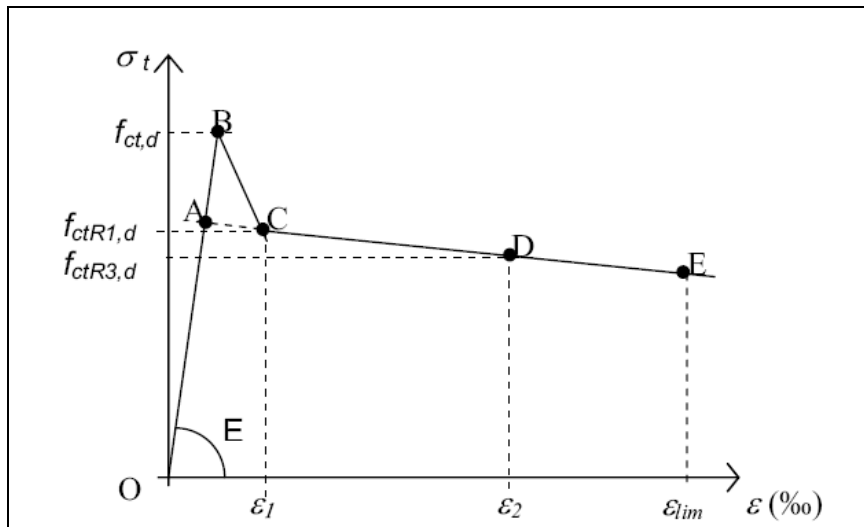


Figura 2.12 Diagrama de càlcul multilinear per a FRF (EHE 08)

Una possible simplificació del diagrama anterior la trobem en el diagrama rectangular:

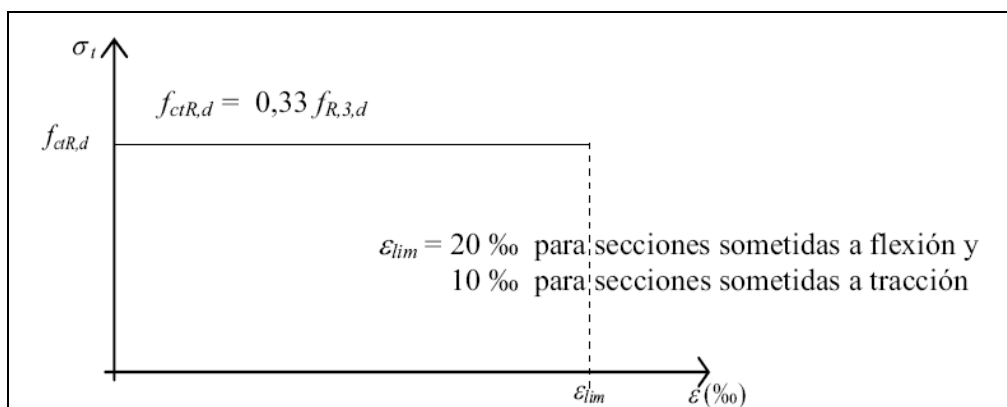


Figura 2.13 Diagrama de càlcul rectangular per a FRF (EHE 08)

CAPÍTOL 3

TRACTAMENT DE LES DADES PROCEDENTS DE LA L9 DE BARCELONA

3. TRACTAMENT DE LES DADES PROCEDENTS DE LA L9 DE BARCELONA

3.1 Introducció i origen de les dades

Per augmentar el realisme i la fiabilitat per al calibratge del coeficient parcial de seguretat a aplicar al FRF sotmès a tracció, treballarem amb dades reals de resistència provinents de la L9 del metro de Barcelona. Aquesta línia unirà Santa Coloma de Gramanet amb la Zona Franca i l'Aeroport del Prat, passant per la ciutat de Barcelona. La línia constarà de 44 km de longitud, dels quals 36 transcorren per túnels de diferents tipologies.

L'empresa pública promotora de les obres, Gestió d'Infraestructures S.A. (GISA), de la Generalitat de Catalunya, va fer construir un tram experimental de túnel, amb dovelles elaborades únicament a partir de FRF, sense armadura passiva addicional, a la zona del que s'anomena "tram 4A", dins el terme municipal de Santa Coloma de Gramanet.

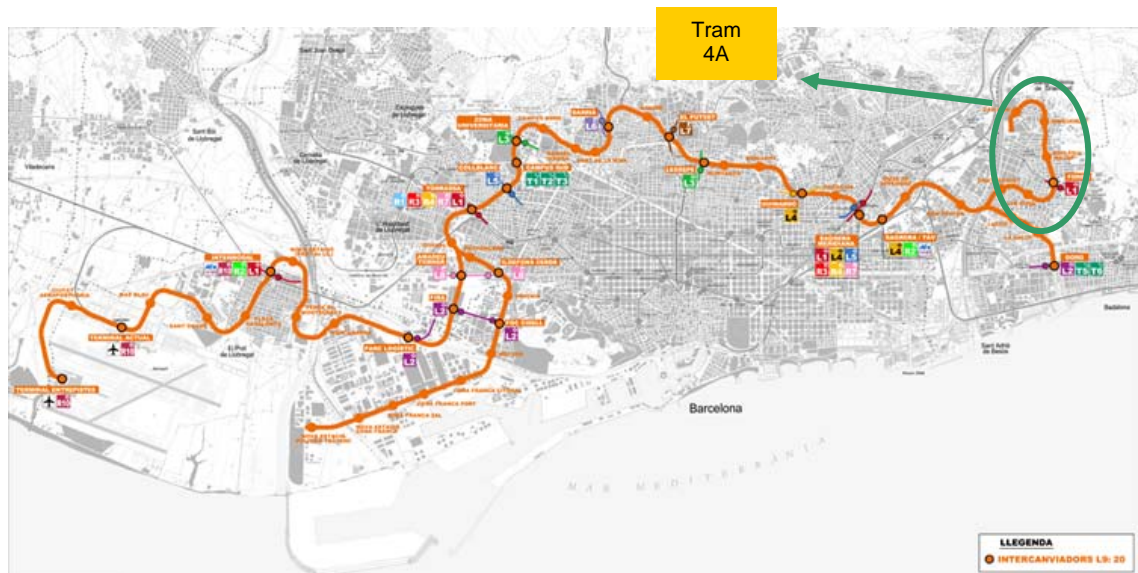


Figura 3.1 Planta de la L9 del metro de Barcelona

Per als trams de túnel es va optar per construir-ne una part a cel obert, i la resta (la gran majoria) amb tuneladora. Els trams construïts amb aquesta última opció consisteixen en un únic túnel, de 12 metres de diàmetre exterior, construïts amb tuneladora, i condicionats per la gran profunditat per on transcorre la línia. A mesura que la tuneladora avança, el túnel va quedant recobert per una sèrie d'anells troncocònics, formats a la vegada per dovelles de formigó armat. La separació dels dos sentits de la marxa dels trens que hi circularan s'efectua amb una llosa intermitja, tal i com mostra la figura 3.2. Amb això, el túnel permet la circulació de fins a 4 trens a la vegada. El disseny de les estacions de tipus estàndard és en pou.

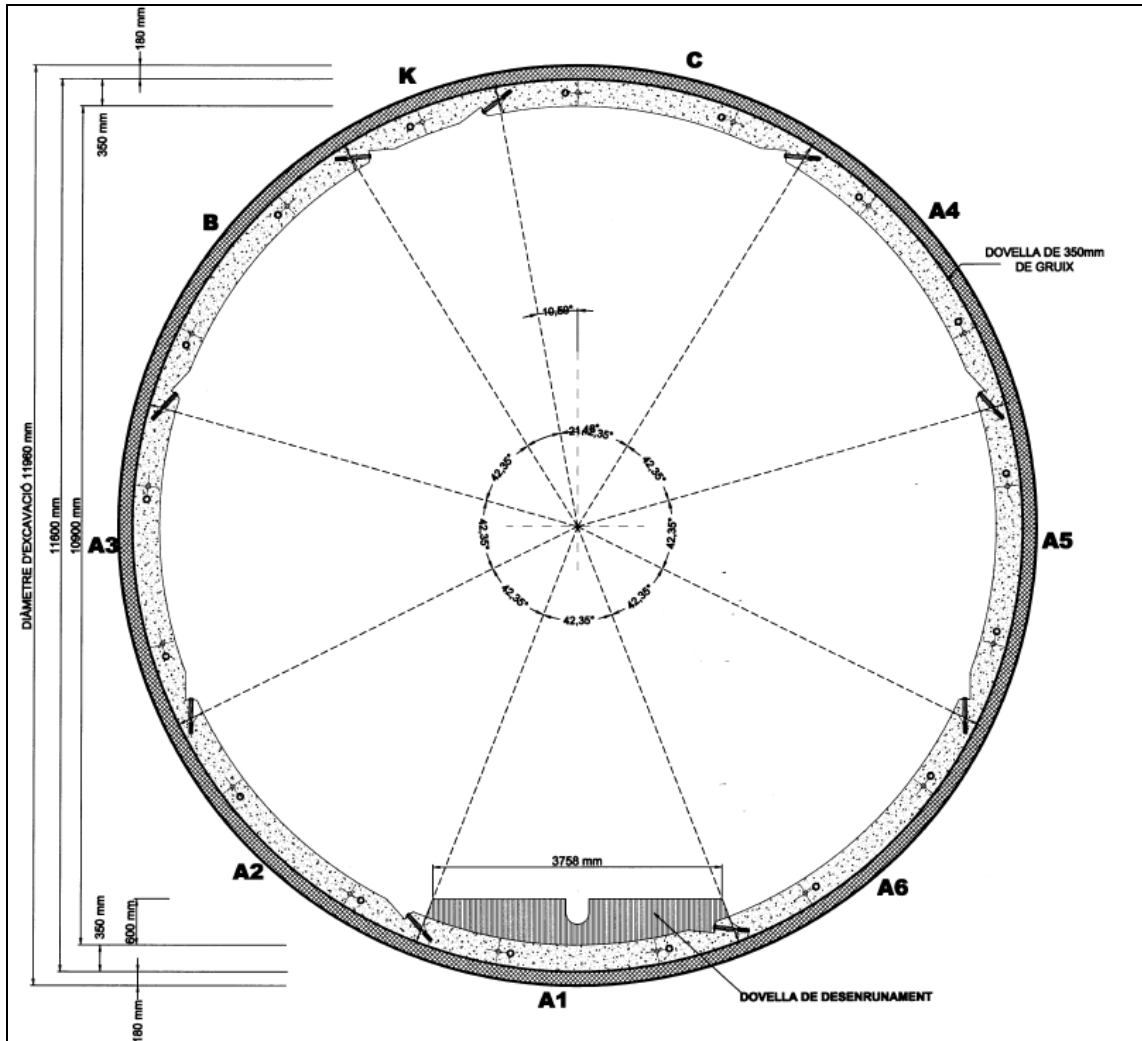


Figura 3.2 Secció transversal del túnel de la L9 (Font: Gestió d'Infraestructures S.A.U.)

Les característiques de les dovelles usades en la construcció del tram experimental de túnel són gairebé idèntiques a la resta de trams estàndard, variant únicament la quantia de fibres afegides, i tenint en compte que l'armadura passiva és inexistent.

A mode de resum, les característiques de les dovelles del tram experimental són:

| | |
|-------------------------|------------------------|
| Gruix de la dovel·la: | 35cm |
| Número de dovelles: | 7+1 |
| Formigó emprat: | HA-50 |
| Armadura: | sense armadura passiva |
| Quantia de fibres: | 60 kg/m ³ |
| Longitud de les fibres: | 50 mm |
| φ de les fibres: | 1 mm |

Com es pot apreciar a la figura 3.3, el número total de dovelles que conformen un arc és 8, de les quals 7 són estàndard, i cobreixen un sector de 48° , i 1 és la dovella de clau, que cobreix un sector de 24° .

La secció tipus de les dovelles estàndard es mostra a continuació :

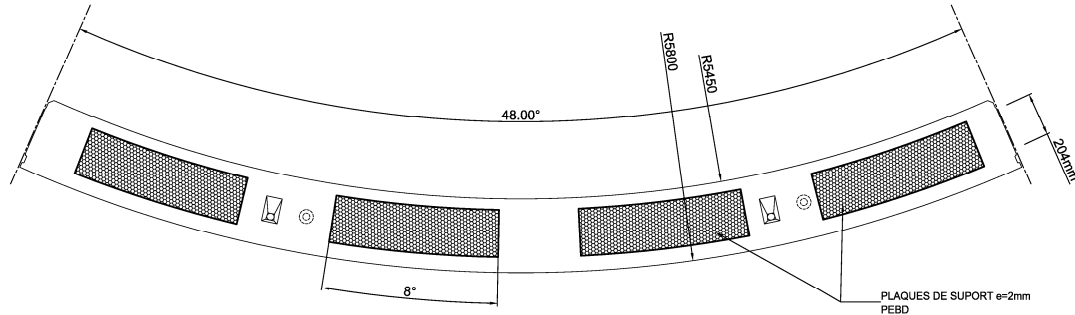


Figura 3.3 Secció transversal d'una dovella estàndard

Aprofitant la construcció d'aquest tram de túnel experimental, GISA va fer extreure testimonis de diverses dovelles, per tal de que fossin assajats al Laboratori de Tecnologia d'Estructures de la UPC. Es van realitzar una sèrie d'assajos *Barcelona* a les provetes de FRF per tal d'obtenir dades de la resistència a tracció indirecta i de resistència residual.

A continuació, es realitzarà un anàlisi estadístic d'aquestes dades per tal d'obtenir els paràmetres més importants per a la realització de l'estudi de fiabilitat estructural que es realitzarà posteriorment.

3.2 Anàlisi estadístic

Durant la campanya experimental es van assajar provetes de diferents mides que van ser extretes de les dovelles amb orientacions diverses. Els diàmetres dels testimonis eren de 150mm, 100mm i 75mm, i les direccions d'extracció van ser tant radialment a la dovella, longitudinalment, i transversalment.

Per a determinar les resistències a tracció indirecta, i residual a flexió, tindrem en compte únicament les provetes de 150mm, independentment de l'orientació d'extracció. Aquest fet és justificat, ja que la mida de proveta estandaritzada per a l'assaig Barcelona és la de 150mm. L'objectiu d'assajar provetes de 100mm i 75mm era comprovar la validesa de l'assaig Barcelona en provetes de diàmetre menor a 150mm, cosa que queda fora de l'abast d'aquest estudi.

3.2.1 Determinació de la resistència a tracció indirecta

Per a la determinació de la resistència a tracció indirecta, s'han tingut en compte 51 provetes de 150mm, assajades totes amb l'assaig de doble punxonament Barcelona.

Amb les gràfiques obtingudes de càrrega contra obertura circumferencial de fissura, s'ha extret la càrrega pic de cada assaig, i a partir d'aquesta, mitjançant el

mètode de bieles i tirants exposat en l'apartat 2.2.3, s'ha determinat la resistència a tracció indirecta. Els resultats dels assajos es resumeixen en la següent taula:

| Resistència a tracció indirecta | |
|--|---------------------------------------|
| Número d'assajos vàlids | 51 |
| Càrrega màx. (mitja) | 177,05 kN |
| Resist. Tracc. Ind. (mitja) | 4,453 N/mm ² |
| Desviació típica | 0,357 N/mm ² |
| Variança | 0,128 N ² /mm ⁴ |
| Resistència mínima | 3,909 N/mm ² |
| Resistència màxima | 5,094 N/mm ² |
| Coeficient de variació | 8,026% |
| Coeficient d'asimetria | -0,319 |
| Coeficient de Curtosis | -0,237 |

Taula 3.1 Resultats assaig Barcelona. Determinació de la resistència indirecta a tracció.

De cares a realitzar l'estudi de fiabilitat, interessa conèixer si la mostra de resultats de la resistència a tracció indirecta de les provetes de FRF segueixen alguna distribució estadística coneguda, amb la qual ens sigui més fàcil treballar. Per això ens ajudarem de dues eines estadístiques conegudes com la fulla de càlcul Excel i el programa SPSS.

Melchers (1987) va exposar que les dades de resistència a tracció de formigó tenien tendència a assimilar-se a una distribució normal o, a vegades, log-normal. Per tant, seria esperable, que els resultats de la resistència a tracció indirecta de la mostra tinguessin una certa tendència a la normalitat.

Per tal de comprovar-ho en la nostra mostra, s'efectuarà el test de *Kolmogorov-Smirnov* per a comprovar la normalitat de la mostra, juntament amb una representació gràfica de les dades de la mostra en contrast amb una distribució normal.

Els resultats obtinguts amb el paquet estadístic SPSS es mostren a continuació :

| One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test | | |
|---|----------------|----------|
| | | VAR00001 |
| N | | 51 |
| Normal Parameters a,b | Mean | 4,4530 |
| | Std. Deviation | ,35735 |
| Most Extreme Differences | Absolute | ,091 |
| | Positive | ,059 |
| | Negative | -,091 |
| Kolmogorov-Smirnov Z | | ,650 |
| Asymp. Sig. (2-tailed) | | ,792 |

a. Test distribution is Normal.
b. Calculated from data.

Taula 3.2 Comprovació de la normalitat de la resistència a tracció (tractament SPSS)

Veiem que la mostra és contrastada amb una distribució normal. El paràmetre que més interessant és l'últim que apareix a la taula. Aquest indica la probabilitat (en una escala de 0 a 1) de que la mostra provingui d'una distribució de probabilitat determinada, en aquest cas, normal. Si aquest indicador és alt, expressa que la significància és baixa, i que per tant, es pot donar com a vàlida la hipòtesi de normalitat de la mostra.

A la figura 3.4 s'observa la representació gràfica de la mostra, en forma d'histograma, amb la corba normal superposada. A la figura 3.5 veiem el contrast de la funció de probabilitat acumulada de la mostra amb la distribució normal teòrica. Podem observar que l'ajustament a la recta és bastant correcte.

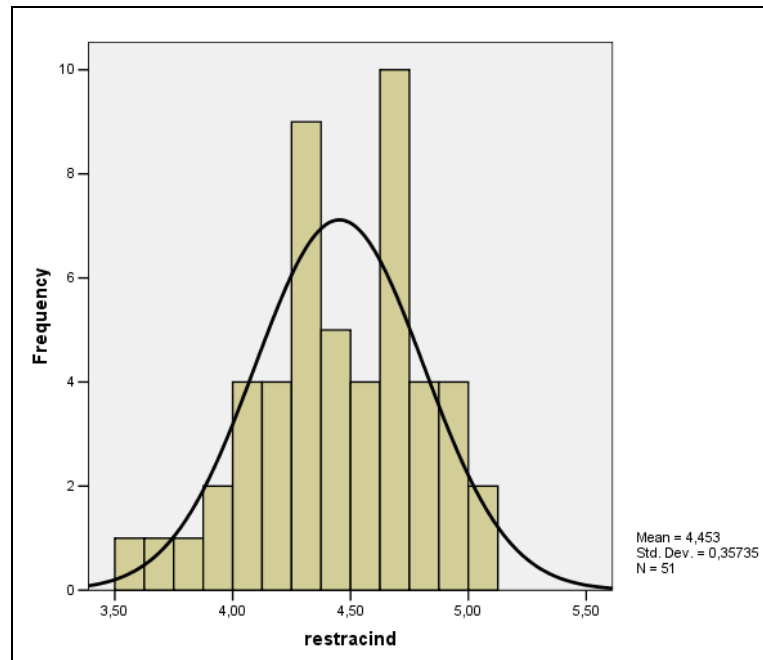


Figura 3.4 Representació gràfica de la resistència a tracció indirecta de la mostra en forma d'histograma (tractament SPSS)

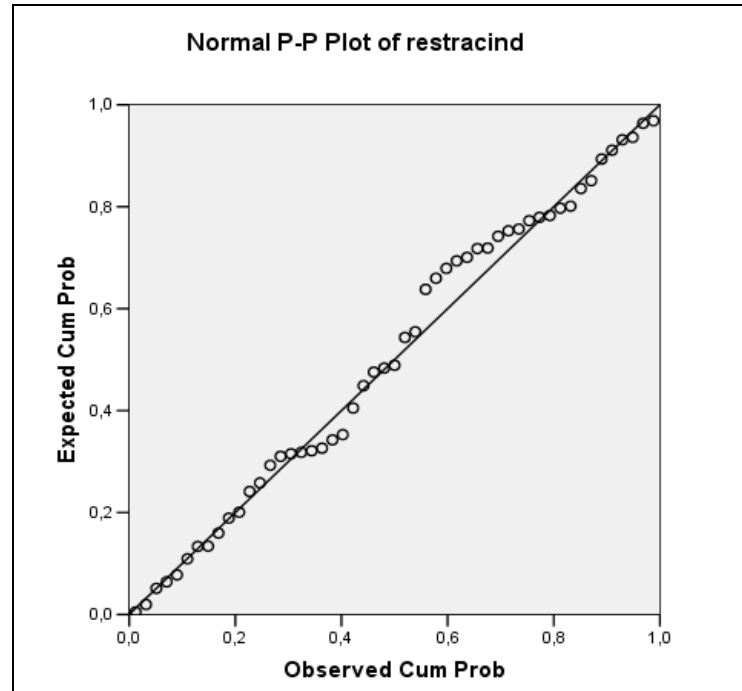


Figura 3.5 Comparació de les distribucions de probabilitat acumulada real i teòrica (tractament SPSS)

Amb tot, es pot concloure que les dades de **resistència a tracció indirecta** de la mostra es poden representar de manera ajustada amb una **distribució normal**, amb els mateixos paràmetres representatius extrets de la mostra:

$$\begin{cases} \mu = 4,453 \text{ MPa} \\ \sigma = 0,357 \text{ MPa} \end{cases}$$

3.2.2 Comparació amb els valors proposats per la EHE 2008

A continuació es calcularan els valors de la resistència a tracció amb els mètodes que proposa la Instrucció, i es compararan amb els obtinguts mitjançant l'anàlisi estadístic anterior.

L'expressió per trobar la resistència a tracció mitjana del formigó, a partir de la resistència característica a compressió, per al formigó emprat en les dovelles és:

$$f_{ct,m} = 0,30f_{ck}^{2/3} = 0,30 \cdot 50^{2/3} = 4,072 \text{ MPa} \quad (3.1)$$

| Resistència a tracció indirecta (valors mitjos) | | |
|--|--------------------|---------------------|
| Valor mig experimental | Valor mig EHE 2008 | Diferència relativa |
| 4,453 MPa | 4,072 MPa | 8,6% |

Taula 3.3 Resum de resultats dels valors de resistència a tracció indirecta

Veiem que els valors obtinguts amb les expressions de la Instrucció s'ajusten bastant bé als valors reals.

Una altra comprovació interessant és determinar si en la mostra el valor característic de la resistència a tracció (percentil 5%) correspon al 70% del valor mig, tal i com proposa la Instrucció. És a dir,

$$f_{ct,k} = 0,70f_{ct,m} = 0,70 \cdot 4,072 = 2,850 \text{ MPa} \quad (3.2)$$

La monografia de la *ACHE, Control Estadístico del Hormigón Estructural* (2003), proposa una expressió per estimar la resistència característica real, a partir de la mitja i la desviació típica de la distribució que segueix la resistència a tracció de les provetes de FRF. Aquesta resistència, $f_{ctk,real}$ representa el quantil de la distribució de resistència d'un lot de formigó que deixa a la seva esquerra, és a dir per sota, una fracció de la població igual al 5%. Com que per l'apartat 3.2.1 s'ha demostrat que:

$$f_{ct} \sim N(\mu = 4,453; \sigma = 0,357)$$

Llavors la resistència característica real es pot estimar com:

$$f_{ctk,real} = \mu - z_{LQ} \sigma \quad (3.3)$$

On z_{LQ} és un paràmetre depenent de la distribució i el percentil considerat. Per a una distribució normal, i considerant el percentil 5%:

$$\begin{aligned} f_{ctk,real} &= \mu - z_{LQ} \sigma = 4,453 - 1,645 \cdot 0,357 \\ \Rightarrow f_{ctk,real} &= 3,866 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Si únicament volem considerar els resultats d'una determinada mostra d'assajos, cal considerar la resistència característica a tracció estimada, $f_{ctk,est}$. La *ACHE* proposa la següent expressió per trobar-la:

$$f_{ctk,est} = \bar{x} - 1,48\sigma = 4,453 - 1,48 \cdot 0,357 = 3,925 \text{ MPa} \quad (3.4)$$

Una idea intuïtiva i aproximada per estimar la resistència característica a tracció real, amb les dades d'una mostra experimental, seria extreure el valor que correspongués al percentil 5% de la mostra. És a dir, ordenant (en el nostre cas) de menor a major els 51 resultats obtinguts, i seleccionant-ne el tercer valor. Llavors s'obtindria $f_{ctk} = 3,715 \text{ MPa}$. Observem que el valor és semblant a l'obtingut per l'expressió de l'*ACHE*.

A la següent taula es comparen els valors obtinguts:

| Resistència a tracció indirecta (valors característics) | | |
|--|-----------------------|----------------------|
| $f_{ct,k}$ (EHE 2008) | $f_{ctk,real}$ (ACHE) | $f_{ctk,est}$ (ACHE) |
| 2,850 MPa | 3,866 MPa | 3,925 MPa |

Taula 3.4 Resum de resultats dels valors de resistència a tracció indirecta

Observem que la diferència entre el valor experimental i el proposat per la EHE és notòria, quedant lluny dels valors experimentals.

3.2.3 Determinació de la resistència residual a flexotracció

S'aplicaran les consideracions fetes en l'apartat 2.2.4. De cada proveta assajada que s'ha considerat, s'ha pres la càrrega aplicada quan l'obertura circumferencial era de 2,5 mm. Aquesta càrrega s'ha transformat en valor de resistència residual mitjançant l'expressió del mètode de bieles i tirants. Finalment, aplicant el coeficient d'1,35 s'obté el la resistència residual a flexotracció. Els resultats obtinguts es mostren a continuació:

| Resistència residual a flexotracció | |
|--|-------------------------|
| Número d'assajos vàlids | 51 |
| Càrrega mitja a $w=2,5\text{mm}$ | 57,86 kN |
| Resist. resid. BCN (mitja) | 1,455 N/mm ² |
| Resist. resid. Flexotr. (mitja) | 1,965 N/mm ² |
| Desviació típica | 0,741 N/mm ² |
| Variança | 0,549 |
| Mínim | 0,749 |
| Màxim | 3,630 |
| Coeficient de variació | 37,70 % |
| Coeficient d'asimetria | 0,514 |
| Coeficient de Curtosis | -0,608 |

Taula 3.5 Resultats assajos Barcelona. Resistència residual a flexió

De manera anàloga a la resistència a tracció indirecta, analitzarem les dades obtingudes amb el paquet estadístic SPSS, per intentar trobar una distribució de probabilitat que s'ajusti bé a la mostra.

En primer lloc comprovarem si la mostra s'ajusta a una distribució normal, mitjançant el test de Kolmogorov – Smirnov. Els resultats es mostren a continuació:

| | | resresiflex |
|----------------------------------|----------------|-------------|
| N | | 51 |
| Normal Parameters ^{a,b} | Mean | 1,9645 |
| | Std. Deviation | ,74069 |
| Most Extreme Differences | Absolute | ,113 |
| | Positive | ,113 |
| | Negative | -,086 |
| Kolmogorov-Smirnov Z | | ,810 |
| Asymp. Sig. (2-tailed) | | ,528 |

a. Test distribution is Normal.
b. Calculated from data.

Taula 3.6 Comprovació de la normalitat de la resistència residual (tractament SPSS)

Observem que la significància és baixa, ja que el paràmetre característic del test K-S és alt, però no ho és tant com succeïa en la mostra de la resistència a tracció indirecta.

Ens preguntem si la mostra s'adaptaria millor a una distribució log-normal. Per a comprovar-ho, és suficient comprovar que el logaritme neperià de la resistència residual, $Y = \ln(f_{R,fl})$, segueix una distribució normal. Els resultats obtinguts són els següents:

| | | Inresresfl |
|----------------------------------|----------------|------------|
| N | | 51 |
| Normal Parameters ^{a,b} | Mean | ,6041 |
| | Std. Deviation | ,38592 |
| Most Extreme Differences | Absolute | ,092 |
| | Positive | ,071 |
| | Negative | -,092 |
| Kolmogorov-Smirnov Z | | ,657 |
| Asymp. Sig. (2-tailed) | | ,781 |

a. Test distribution is Normal.
b. Calculated from data.

Taula 3.7 Comprovació de la log-normalitat de la resistència residual (tractament SPSS)

Observem que el paràmetre característic del test ha augmentat, indicant una major probabilitat de que la distribució de la variable $Y = \ln(f_{R,fl})$ sigui normal, i en

conseqüència, que la mostra de la resistència residual a flexió ($f_{R,fl}$) estigui ben representada per una **distribució lognormal** amb paràmetres:

$$\begin{cases} \mu = 1,9465 \\ \sigma = 0,7407 \end{cases}$$

A la figura 3.6 es mostra la representació de les dades transformades, $Y = \ln(f_{R,fl})$ en forma d'histograma, amb la corba normal superposada:

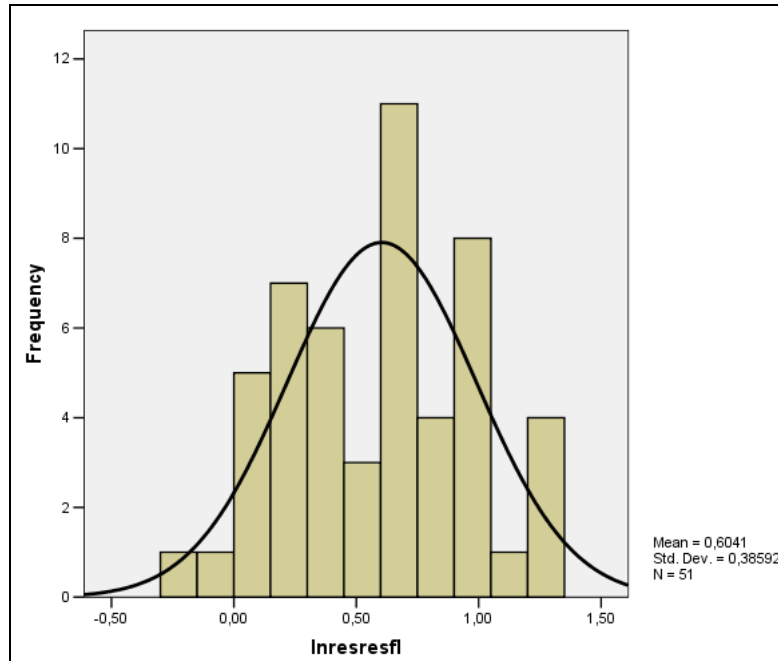


Fig. 3.6 Representació en forma d'histograma de $\ln(f_{R,fl})$

Si en el mateix gràfic superposem la funció de probabilitat acumulada de la mostra, amb la funció de probabilitat acumulada lognormal, obtenim la figura 3.7. Es pot observar que l'ajust és prou fidel, amb un repartiment equitatiu de punts que queden amb valors superiors o inferiors als que estableix la distribució normal.

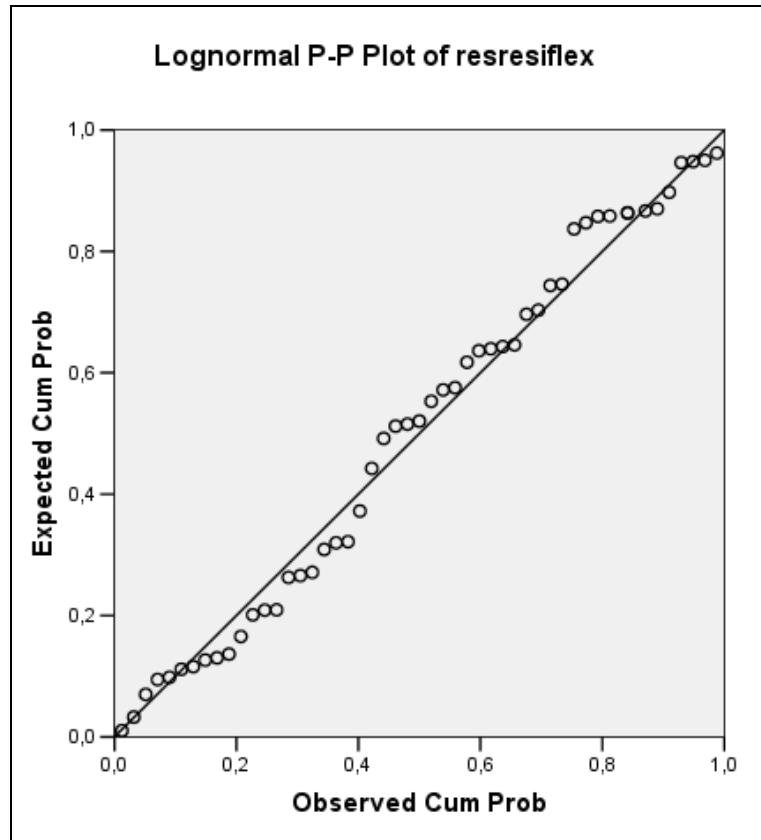


Figura 3.7. Comparació de les distribucions de probabilitat acumulada real i teòrica

Anàlogament al cas de la resistència a tracció indirecta, és d'interès trobar la resistència residual característica a flexió. A partir de la mitja i la desviació típica de la distribució que segueix, podem determinar $f_{R,k,real}$. No obstant, donat que la distribució és lognormal, cal treballar amb el logaritme de la variable, ja que les expressions de la ACHE són per a distribucions normals.

Per tant, calculant la mitja i la variació estàndard de la mostra de resistència residual, aplicant-hi el logaritme, tenim que:

$$f_{R,fl} \sim \log normal(\mu = 1,965; \sigma = 0,741) \Rightarrow \ln f_{R,fl} \sim N(\mu = 0,604; \sigma = 0,386)$$

Amb això, la resistència residual característica real, serà:

$$\begin{aligned} \ln f_{R,fl,k,real} &= \mu - z_{Lo} \sigma = 0,604 - 1,645 \cdot 0,386 \\ \Rightarrow \ln f_{R,fl,k,real} &= 0,031 \text{ MPa} \\ \Rightarrow f_{R,fl,k,real} &= 1,031 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Si únicament es consideren els resultats de la mostra assajada, llavors tenim:

$$\begin{aligned} \Rightarrow \ln f_{R,fl,k,est} &= \bar{x} - 1,48\sigma = 0,604 - 1,48 \cdot 0,386 = -0,033 \\ \Rightarrow f_{R,fl,k,est} &= 1,033 \text{ MPa} \end{aligned}$$

De manera aproximada, prenent el tercer valor de la llista de 51 resultats dels assajos, la resistència residual obtinguda és 1,035Mpa. Per tant, les expressions de l'ACHE, en aquest cas, són totalment vàlides.

| Resistència residual a flexió (valors característics) | |
|--|----------------------|
| $f_{R,k,real} (ACHE)$ | $f_{R,k,est} (ACHE)$ |
| 1,031 MPa | 1,033 MPa |

Taula 3.8 Resum de valors característics de la resistència residual a flexotracció

CAPÍTOL 4

ANÀLISI DE LES ACCIONS ACTUANTS EN LES DOVELLES

4. ANÀLISI DE LES ACCIONS ACTUANTS EN LES DOVELLES

4.1 Introducció

En els apartats anteriors bàsicament s'ha aportat informació de les propietats més importants del formigó en fibres, i s'han exposat dades reals de resistència d'un origen concret, com són les dovelles del tram experimental de la L9 de Barcelona.

El que es pretén a partir d'ara, és fer un estudi del processos a que es sotmeten aquestes dovelles de FRF, des de la seva fabricació fins a la posada en servei per formar els anells del túnel, i comprovar que la seva capacitat resistent és l'òptima per a superar totes aquestes etapes abans de la seva col·locació definitiva. La determinació del marge de seguretat que ofereixen les dovelles serà un pas previ a la calibració del coeficient parcial de seguretat de la resistència a tracció del formigó.

Les operacions que es consideren **crítiques** per a les dovelles es caracteritzen pels forts esforços actuants de flexotracció. Aquestes operacions inclouen el **transport, l'emmagatzematge i la col·locació final de les dovelles**. Per a suportar-los sense patir problemes de fissuració ni trencament de les peces, les dovelles es reforcen amb acer. Aquest reforç no és tan necessari un cop la peça ha entrat en servei, on els esforços actuants són bàsicament compressius.

En aquesta tesina s'acotarà el problema, i el que es farà és estudiar amb detall dues situacions concretes, considerades crítiques per les dovelles, i representatives del procés de posada en servei:

- Fase de transport: S'analitzarà el procés d'hissat de les dovelles mitjançant eslingues.
- Fase d'emmagatzematge: S'estudiarà apilament en les zones d'abassegament

Aquestes dues fases s'estudiaran des de dos punts de vista diferents, i es comprovarà si la capacitat resistent que ofereixen les dovelles en cada cas, és suficient. En primer lloc s'abordaran els problemes amb el plantejament de la EHE 2008, aplicant les expressions i coeficients que proposa. En segon lloc, els mateixos problemes es resoldran amb un plantejament probabilista, tenint en compte el caràcter aleatori de certes variables intervinents en els problemes.

Més endavant, en el capítol 5 s'aprofitarà aquest plantejament probabilista per fer un estudi de fiabilitat estructural, per poder així calibrar el coeficient parcial de seguretat a aplicar a la resistència a tracció del FRF.

4.1.1 Hissat de les dovelles amb eslingues

El trasllat des de la zona d'elaboració de les dovelles fins l'abassegament, es realitza mitjançant una grua equipada amb dues eslingues elàstiques, col·locades als extrems de la dovella inferior. Per normativa pròpia de l'obra, i per recomanacions tècniques que s'han fet, l'hissat es realitza de tres en tres dovelles, tal i com s'aprecia en l'esquema de la figura 4.1:

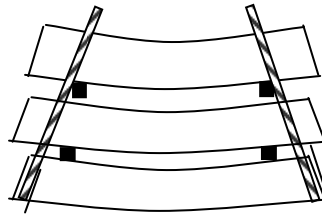


Figura 4.1 Esquema de l'hissat mitjançant eslingues

Atenent a l'esquema de càrrega, la dovella sol·licitada en condicions més desfavorables és la inferior, que serà la que prendrem de referència. La secció crítica que es considerarà serà la del centre de llum.

Es prendrà com a simplificació que la dovella és recta, i que aquesta està recolzada en els seus extrems, amb el seu pes propi i dues càrregues puntuals actuant-hi, corresponents al pes propi de les dovelles superiors.

4.1.2 Apilament de les dovelles

Una altra de les operacions crítiques per les que passen les dovelles és el seu apilament i emmagatzematge. Les dovelles, un cop fabricades, es traslladen a la zona d'abassegament, on s'hi apilen unes sobre les altres.

Els anells dels túnels de la L9 estan formats per 8 dovelles, de les quals 7 abarquen un angle de 48° , i una de longitud menor, la dovella de la clau de l'anell, que abarca 24° .

Segons l'informe NT 06 :04 (Marí, 2004), a la pràctica habitual, es recomana que durant els primers dies des de la fabricació només s'apilin 3 dovelles (d'obertura 48°), i que sigui a partir dels 7 dies d'edat quan es completi l'apilat de l'anell complet. Per tant, cada anell queda apilat per separat.

En la fase d'apilament, cada dovella es disposarà sobre l'anterior mitjançant dos recolzaments puntuals, tal i com es pot apreciar en la figura 4.2. Es continua fent la simplificació de dovelles rectes.

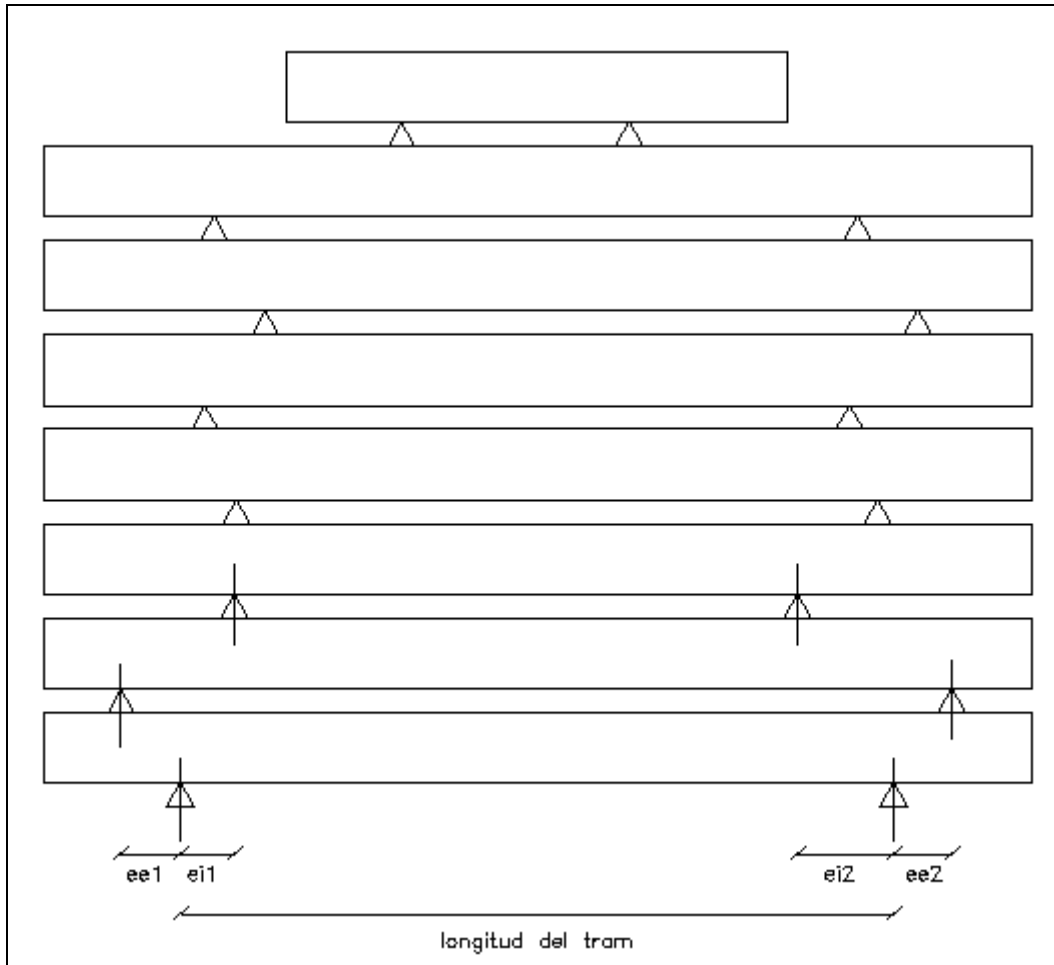


Figura 4.2 Esquema d'apilament de les dovelles

Observem que les disposicions dels aparells de recolzament poden fer variar l'esquema estàtic de càrrega de les dovelles. Els recolzaments inferiors es poden considerar fixes, ja que l'anell es recolza sobre una base de fusta prefabricada. En canvi, la resta de recolzaments es basen en llistons de fusta, col·locats manualment. Per aquest motiu, s'observa que la dovella en situació més desfavorable és la segona, malgrat no ser la que suporti major càrrega. Aquesta situació crítica s'exagera quan els recolzaments entre la 2^a i la 3^a dovella estan situats més al centre, i els recolzaments entre la 1^a i la 2^a es situen més propers als extrems.

4.2 Plantejament segons les directrius de la EHE 2008

Tot seguit es plantejaran els problemes anteriors adoptant el criteri actual de la EHE, amb els coeficients, recomanacions i expressions de càlcul que estableix. Es faran dos tipus de comprovacions d'Estat Límit, per als dos problemes plantejats:

- a) Estat Límit Últim de resistència davant sol·licitacions normals
- b) Estat Límit de Servei de fissuració

4.2.1 Aixecament amb eslingues

L'esquema de càrrega de la dovella inferior es podria assimilar al de la següent figura:

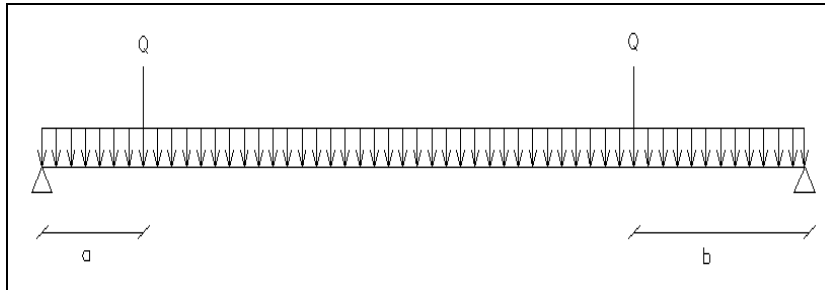


Fig. 4.3 Esquema de càrrega de la dovella inferior (hissat amb eslingues)

On a i b són les distàncies dels punts de recolzament de les dovelles superiors als extrems de la dovella inferior, i les càrregues puntuals Q representen les càrregues degudes al pes propi de les dovelles superiors.

L'expressió del moment flexor sol·licitant al centre de llum és:

$$\Rightarrow M_{S,cll} = \left[\frac{\gamma_Q \cdot Q(a+b)}{2} \right] + \left[\frac{\gamma_g \cdot pp \cdot L^2}{8} \right] \quad (4.1)$$

On:

- pp és la càrrega repartida que suposa el pes propi del FRF
- L és la longitud de la dovella.

En aquest cas, i com a simplificació, es prendrà $a=b$. És a dir que suposarem que els dos recolzaments que suporten les dues dovelles superiors estan situats a la mateixa distància de l'extrem de la dovella inferior.

Per a determinar el pes propi, s'assimilarà la dovella a una biga recta de secció rectangular. Prendrem:

$$pp_{dovella} = b \cdot e \cdot \gamma = 1,8m \cdot 0,35m \cdot 25 \frac{kN}{m^3} = 15,75 \frac{kN}{m} \quad (4.2)$$

On:

- b : amplada mitjana de la dovella (cal recordar que les dovelles tenen certa conicitat, que fa que no totes siguin exactament de les mateixes dimensions). Es pren el valor mig de referència.
- e : gruix o cantell de la dovella
- γ : pes específic del formigó amb fibres. Es pren igual al del formigó normal, suposant que l'addició de fibres no modifica substancialment el pes específic.

La longitud de la dovella es prendrà de 4,88m.

Els coeficients parcials de seguretat amb que es majoraran les accions seran els corresponents per a cada Estat Límit que es consideri:

- $\gamma_g = 1,35$ (ELU) o $\gamma_g = 1$ (ELS) per al pes propi
- $\gamma_Q = 1,5$ (ELU) o $\gamma_Q = 1$ (ELS) per a la càrrega puntual. No obstant, com que aquesta càrrega depèn del pes propi de les dovelles superiors:

$$Q = \frac{[2(L \cdot pp)]}{2} \quad (4.3)$$

D'aquesta manera no s'aplicarà la majoració dues vegades.

Per tant, es tindrà, en funció d' a :

$$\Rightarrow M_{S,cll} = \frac{[2(L \cdot \gamma_g \cdot pp)]}{2} \cdot a + \left[\frac{\gamma_g \cdot pp \cdot L^2}{8} \right] \quad (4.4)$$

Com ja hem esmentat, hem deixat el moment sol·licitant en funció del **paràmetre a** . Aquest és controlat a l'obra, i s'evita que aquesta distància excedeixi els 0,75m per evitar la fissuració i el posterior trencament de la peça. Escollim un valor determinista aparentment raonable que es pugui donar amb freqüència a l'obra, **0,4m**, i comprovem els Estats Límits de Servei de fissuració i Últim de sol·licitacions normals.

4.2.1.1 Estat Límit de Servei de fissuració

En primer lloc cal determinar el moment aplicat mínim amb que s'inicia la fissuració de la peça, $M_{fissuració}$. Aquest es produirà quan a la fibra inferior de la dovella s'assoleixi la resistència a flexotracció de la dovella, donats els esforços a que es sotmet la peça.

Amb les expressions de la EHE tenim que la resistència a tracció inferior mitja és:

$$f_{ct,m} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \Rightarrow f_{ct,m} = 0,30 \cdot 50^{2/3} = 4,072MPa \quad (4.5)$$

La resistència a flexotracció mitja es pot determinar a partir de:

$$f_{ct,m,fl} = \max\{(1,6 - h/1000)f_{ct,m}; f_{ct,m}\}$$

$$\Rightarrow f_{ct,m,fl} = \max\{(1,6 - 350/1000) \cdot 4,072 = 5,085MPa; 4,072MPa\} \quad (4.6)$$

$$\Rightarrow f_{ct,m,fl} = 5,085MPa$$

El valor característic es pot trobar com:

$$f_{ct,k,fl} = 0,7 \cdot f_{ct,m,fl} = 0,7 \cdot 5,0875MPa = 3,56MPa \quad (4.7)$$

El moment de fissuració equivaldrà al moment existent que provoca que la fibra inferior de la peça assoleixi la resistència característica a flexotracció, que serà la que prendrem de càlcul (ja que el coeficient parcial de seguretat de la resistència, en ELS és $\gamma = 1$)

$$M_{fissuració} = \frac{f_{ct,k,fl} \cdot h^2 \cdot b}{6} = \frac{3,56 \cdot 350^2 \cdot 1800}{6} = 130,83 \text{ kN}\cdot\text{m} \quad (4.8)$$

L'expressió del moment sol·licitant al centre de llum, en ELS, serà:

$$\begin{aligned} \Rightarrow M_{s,cl} &= \frac{[2(L \cdot \gamma_g \cdot pp)]}{2} \cdot a + \left[\frac{\gamma_g \cdot pp \cdot L^2}{8} \right] = \\ &= (4,88 \cdot 1 \cdot 15,75 \cdot a) + \frac{(1 \cdot 15,75 \cdot 4,88^2)}{8} = \\ &= 76,86 \cdot a + 46,89 \end{aligned} \quad (4.9)$$

I prenent $a = 0,4 \text{ m}$:

$$\begin{aligned} \Rightarrow M_{s,cl} &= \frac{[2(L \cdot \gamma_g \cdot pp)]}{2} \cdot a + \left[\frac{\gamma_g \cdot pp \cdot L^2}{8} \right] = \\ &= (4,88 \cdot 1 \cdot 15,75 \cdot a) + \frac{(1 \cdot 15,75 \cdot 4,88^2)}{8} = \\ &= 76,86 \cdot 0,4 + 46,89 = 77,63 \text{ kN}\cdot\text{m} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Observem que el moment sol·licitant és inferior al moment de fissuració ($M_{s,cl} < M_{fissuració}$), i que per tant, la peça no hauria de fissurar durant el seu transport mitjançant grua amb eslingues.

4.2.1.2 Estat Límit Últim de sol·licitacions normals

Com s'ha dit anteriorment, les dovelles que estem considerant no disposen d'armadura passiva. No obstant, en cas que la peça fissuri, les fibres actuaran com a element cohesionador dins les fissures del formigó, proporcionant una certa resistència, fins a arribar al moment últim. Aquest serà el cas més desfavorable, el que ens proporcionarà un moment últim de càlcul menor. Òbviament, si la peça no fissurés, les sol·licitacions actuant serien resistides únicament per la massa de formigó, i el moment últim de càlcul seria major.

Per tant, es calcula a continuació el moment resistent de la secció, considerant que la secció està internament fissurada. La RILEM proposa el següent esquema per a modelar la secció fissurada:

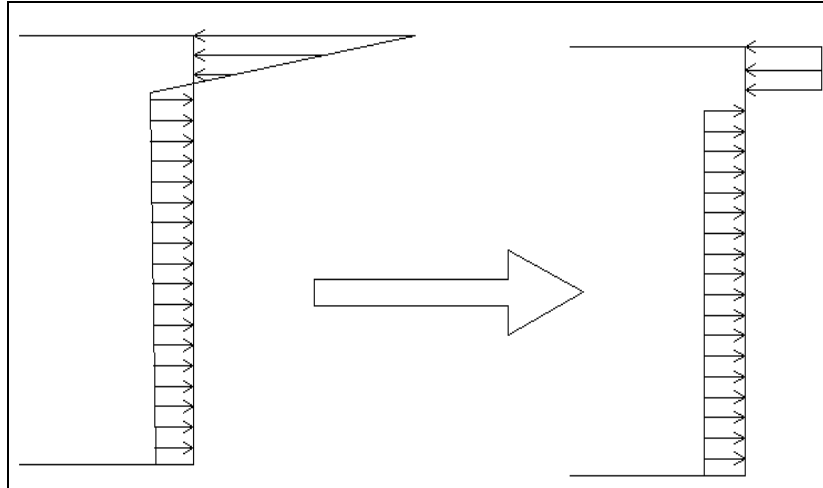


Figura 4.4 Idealització de la distribució de tensions d'una secció fissurada de FRF sense armat

Suposant que la distribució de tensions en la secció fissurada es pot assimilar a dos blocs rectangulars de profunditat $0,8x$ i $(h-x)$ respectivament per a compressions i traccions, l'expressió per a determinar el moment últim (o resistent), i els valors de resistència procedents de les dades de la L9 serà:

$$M_R = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_{f_{ck}}} \cdot 0,8 \cdot x \cdot b \cdot \left(h - \frac{0,8 \cdot x}{2} \right) - \frac{f_{cR,k}}{\gamma_{\sigma_{cR}}} \cdot b \cdot \frac{(h-x)^2}{2} \quad (4.11)$$

On:

b = amplada de la dovella, que prendrem 1,8m.

$$f_{ct,R,d} = \frac{f_{ct,R,k}}{\gamma_{f_{ct,R,k}}} = \frac{1,033}{1,5} = 0,687 \text{ MPa} \quad (4.12)$$

x és la profunditat de la fibra neutra, trobada a partir de:

$$0,8 \cdot x \cdot 0,85 \cdot f_{cd} = f_{cR,d} \cdot (h - x)$$

$$\Rightarrow x = \frac{f_{cR,d} \cdot h}{f_{cR,d} + 0,68 \cdot f_{cd}} = \frac{0,687 \cdot 350}{0,687 + 0,68 \cdot 33,33} = 10,30 \text{ mm} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow M_{R,fis} &= 0,85 \cdot 33,33 \cdot 0,8 \cdot 10,30 \cdot 1800 \cdot \left(350 - \frac{0,8 \cdot 10,30}{2} \right) - \\ &- 0,687 \cdot 1800 \cdot \frac{(350 - 10,30)^2}{2} = \\ &= 73,98 \text{ kN}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

El moment sol·licitant de càlcul al centre de llum de la dovella inferior, en ELU, serà:

$$\begin{aligned} \Rightarrow M_{s,cll} &= \frac{2(L \cdot \gamma_g \cdot pp)}{2} \cdot a + \left[\frac{\gamma_g \cdot pp \cdot L^2}{8} \right] = \\ &= (4,88 \cdot 1,35 \cdot 15,75 \cdot a) + \frac{(1,35 \cdot 15,75 \cdot 4,88^2)}{8} = \\ &= 103,76 \cdot 0,4 + 63,29 = 104,79 \text{ kN}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

4.2.1.3 Resum de resultats

A la taula 4.1 es resumeixen els resultats obtinguts. Observem que l'ELS es compleix sense problemes. En el cas de l'ELU, si la secció central està fissurada, no es garanteix la resistència de la peça.

| $M_{s,cll}$ (ELS) | $M_{fissuració}$ (ELS) | $M_{s,cll}$ (ELU) | $M_{u,fiss}$ (ELU) |
|-------------------|------------------------|-------------------|--------------------|
| 77,63 kN·m | 130,83 kN·m | 104,79 kN·m | 73,98 kN·m |

Taula 4.1 Resum de resultats (problema d'hissat amb eslingues)

4.2.1 Apilament de les dovelles

S'analitza a continuació el problema de l'apilament de dovelles. Com ja s'ha comentat, primerament es procedeix a l'apilament de tres dovelles, i no és fins a partir dels 7 dies que s'apila l'anell complet. La situació que analitzarem nosaltres és a temps infinit, quan la resistència del formigó ja ha assolit les seves màximes prestacions.



Fig. 4.5 Esquema d'apilament de les dovelles, L9 Barcelona

En la figura 4.6 s'observa una ampliació de l'esquema de càrrega de la segona dovella:



Fig. 4.6 Esquema de càrrega de la segona dovella

L'expressió del moment flexor sol·licitant al centre de llum de la segona dovella ve donada per:

$$M_{S,cl} = \gamma_g \cdot pp \left[\frac{(l_{tram} + ee_1 + ee_2)^2}{8} - \frac{(l_{vol} - ee_1)^2 + (l_{vol} - ee_2)^2}{4} \right] + \left[\frac{\gamma_Q \cdot Q(ei_1 + ei_2)}{2} \right]$$

on

$$Q = \frac{p_{totaldovella} \cdot 7 \text{ dovelles} + p_{totalclau} \cdot 1 \text{ dovella clau}}{2} = \frac{7 \cdot \gamma_g \cdot pp_{dovella} \cdot 4,88m + 1 \cdot \gamma_g \cdot pp_{dovella} \cdot 2.9m}{2} \quad (4.15)$$

Observem que, en principi, s'han pres excentricitats diferents a cada extrem de la dovella, ja que establim la hipòtesi que els recolzaments col·locats pels operaris mai estaran simètrics respecte el centre de llum.

No obstant, i com a simplificació, prendrem les excentricitats iguals en tots dos extrems, tant les interiors com les exteriors. És a dir:

$$ee_1 = ee_2 = ee \quad i \quad ei_1 = ei_2 = ei$$

D'aquesta manera l'expressió del moment flexor sol·licitant al centre de llum es simplifica en:

$$M_{S,cl} = \gamma_g \cdot pp \left[\frac{(l_{tram} + 2 \cdot ee)^2}{8} - \frac{(l_{vol} - ee)^2}{2} \right] + [\gamma_Q \cdot Q \cdot ei] \quad (4.16)$$

Els valors de les variables que intervenen seran:

- $pp_{dovella} = 15,75 \frac{kN}{m}$. Es pren el mateix que en el cas de l'hissat, fent les mateixes consideracions.

- La longitud de la dovella és de 4,88m. La longitud del tram ve fixada per la distància dels aparells de recolzament inferiors, en 2,8m, i per tant, la longitud de voladís a cada extrem serà de 2,08m.

- Els coeficients parcials de seguretat amb que es majoraran les accions seran els corresponents a l'estat límit que es consideri:

$\gamma_g = 1,35$ (ELU) o $\gamma_g = 1$ (ELS) per a la càrrega repartida permanent que suposa el pes propi.

A l'obra, s'aconsella que les excentricitats, tant exterior com interior, no superin els 50cm, per tal d'evitar problemes de fissuració i col·lapse de les dovelles. Escollirem un valor de **30 cm**, que considerem prou realista, per a modelar aquestes excentricitats. És a dir:

$$ee_1 = ee_2 = ei_1 = ei_2 = 30cm$$

4.2.1.1 Estat Límit de Servei de fissuració

Es comprova a continuació l'ELS de fissuració. El moment flexor al centre de llum de la segona dovella, en cas d'apilament complet de l'anell, valdrà:

$$Q = \frac{7 \cdot \gamma_g \cdot pp_{dovella} \cdot 4,88m + 1 \cdot \gamma_g \cdot pp_{dovella} \cdot 2,9m}{2} =$$

$$= \frac{7 \cdot 1 \cdot 15,75 \cdot 4,88m + 1 \cdot 1 \cdot 15,75 \cdot 2,9m}{2} = 291,85kN$$

$$\Rightarrow M_{s,cll} = 1 \cdot 15,75 \left[\frac{(2,8 + 2 \cdot 0,3)^2}{8} - \frac{(2,08 - 0,3)^2}{2} \right] + [291,85 \cdot 0,3] =$$

$$= 85,36kN \cdot m$$

El moment amb que s'iniciarà la fissuració serà el mateix que en el problema de l'aixecament en eslingues:

$$M_{fissuració} = 130,83kN \cdot m$$

Veiem que en ELS de fissuració, $M_{s,cll} < M_{fissuració}$, i per tant, la peça no hauria de presentar problemes de fissuració.

4.2.1.2 Estat Límit Últim de sol·licitacions normals

Tenint en compte les mateixes consideracions que el problema de l'hissat amb eslingues, el moment últim, considerant la secció fissurada serà:

$$\Rightarrow M_{R,fis} = 73,98kN \cdot m$$

Per al càlcul del moment sol·licitant, determinem primer la càrrega Q:

$$Q = \frac{7 \cdot \gamma_g \cdot pp_{dovella} \cdot 4,88m + 1 \cdot \gamma_g \cdot pp_{dovella} \cdot 2,9m}{2} =$$

$$= \frac{7 \cdot 1,35 \cdot 15,75 \cdot 4,88m + 1 \cdot 1,35 \cdot 15,75 \cdot 2,9m}{2} = 394,00kN$$

Observem que la càrrega Q, no es majora, ja que aquesta depèn del pes propi de la dovella, i aquest sí que es majora. Llavors, el moment sol·licitant queda com:

$$\Rightarrow M_{s,cl} = 1,35 \cdot 15,75 \left[\frac{(2,8 + 2 \cdot 0,3)^2}{8} - \frac{(2,08 - 0,3)^2}{2} \right] + [394,00 \cdot 0,3] =$$

$$= 115,24kN \cdot m$$

4.2.2.3 Resum de resultats

A la taula 4.2 es resumeixen els resultats obtinguts. A l'igual que en el problema de l'hissat, l'ELS es compleix sense problemes, però no passa el mateix en l'estat límit últim.

| $M_{s,cl}$ (ELS) | $M_{fissuració}$ (ELS) | $M_{s,cl}$ (ELU) | M_u (ELU) |
|------------------|------------------------|------------------|-------------|
| 85,36 kN·m | 130,83 kN·m | 115,24 kN·m | 73,98 kN·m |

Taula 4.2 Resum de resultats (problema de l'apilament de les dovelles)

4.3 Plantejament probabilístic dels problemes

4.3.1 Introducció

En les comprovacions de l'apartat anterior, les variables dels problemes s'han pres determinísticament, és a dir, considerant que cada variable pren un determinat valor, i amb aquests valors s'han comprovat els estats límits corresponents.

No obstant, aquesta metodologia no deixa de ser un intent de modelització del comportament real. A la realitat, moltes variables tenen un caràcter aleatori, degut a la variabilitat i incertesa en la seva determinació, i que no queden representades en la metodologia anterior. A més, l'ús de coeficients parcials de seguretat, tant en la majoració d'accions com en la minoració de les resistències, amaga en certa manera les probabilitats reals de fallada que existeixen en les dovelles.

És per això que el que es vol ara és treballar amb els dos problemes exposats en l'apartat anterior, però considerant aquesta aleatorietat en les variables. Per això s'abordan els problemes mitjançant un plantejament probabilístic.

4.3.2 Aleatorietat de les variables i mètodes d'estimació de la probabilitat de fallada

Una de les eines més utilitzades per representar l'aleatorietat de les variables és la seva representació en forma d'histogrames. Aquests mostren la freqüència amb que apareixen uns determinats intervals de valors d'una variable concreta. A mesura que aquests es disminueixen, s'arriba al cas límit de les funcions de distribució de probabilitat, que serà l'eina que més usarem a partir d'ara en l'anàlisi probabilístic.

Tant la resistència (que serà considerada en forma de moment últim de la secció, M_u , equivalent al moment resistent, M_R) com les sol·licitacions (considerarem el moment sol·licitant a la secció M_S) solen estar representades per aquest tipus de funcions. La incertesa en la seva predicció condiona la forma gràfica de les funcions de densitat de probabilitat f_{M_R} i f_{M_S} .

En el nostre problema bàsic de fiabilitat estructural intervindran aquestes dues funcions de probabilitat. Es considerarà que l'element estructural fallarà quan la resistència el moment resistent M_R (o en general, la resistència R), sigui menor que el moment sol·licitant M_S (o en general, la sol·licitació S). El mètode de mesura de que això succeeixi el trobem definint-ne la probabilitat d'ocurrència:

$$p_f = P(R \leq S) = P(R - S \leq 0) = P[G(R, S) \leq 0] \quad (4.17)$$

On G representa la funció d'estat límit.

Si representem les funcions de probabilitat tant de R com de S , observarem un cert grau de solapament entre les dues corbes. L'àrea solapada representarà la probabilitat de que no es compleixi l'estat límit considerat.

El procés d'obtenció d'aquestes probabilitats de fallada no és trivial. Si les corbes que representen tant R com S fossin d'expressió coneguda (per exemple, distribucions normals), l'àrea de solapament podria estimar-se a partir d'alguna tècnica d'integració numèrica. No obstant, moltes vegades no tindrem a l'abast aquestes expressions, ja que tant la resistència com la sol·licitació dependran de variables també aleatòries. La combinació de totes elles rarament portarà a modelar-se mitjançant una expressió coneguda.

Com a solució a aquest problema s'exposen dos metodologies diferents:
 L'ús del mètode simplificat de fiabilitat estructural *FOSM*.
 L'ús de simulacions de Montecarlo.

4.3.2.1 Mètode de fiabilitat estructural *FOSM* (first order second moment)

Abans d'exposar les directrius principals de funcionament del mètode *FOSM*, cal definir el que es coneix com a **índex de fiabilitat**, una de les mesures més utilitzades per expressar la probabilitat de fallada davant un determinat estat límit, La seva expressió és:

$$p_f = P(R - S \leq 0) = P(G \leq 0) = \Phi\left(\frac{0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta)$$

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (4.18)$$

On Φ representa la funció de distribució normal estàndard.

L'índex de fiabilitat expressa les probabilitats de que la funció d'estat límit assoleixi valors $G \leq 0$, fent que aquest no es compleixi, i que conseqüentment, es produeixi la fallada davant d'aquell estat límit.

Com el seu nom indica, el mètode *FOSM* (inicials en anglès de *First Order Second Moment*), treballa únicament amb els dos primers moments de les variables aleatòries: la mitjana i la desviació típica, i permet obtenir l'índex de fiabilitat β a partir d'un procediment iteratiu, i partir d'aquest índex, trobar la probabilitat de fallada associada.

Per entendre millor el funcionament del mètode, podríem establir un paral·lelisme geomètric, dient que l'índex de fiabilitat correspon a la mínima distància entre l'origen i el pla paral·lel a la funció d'estat límit quan pren el valor 0 ($G=0$), sempre que fos possible representar la funció d'estat límit. No obstant, no sempre és possible fer aquesta representació. Per exemple, trobem el cas de l'espai n -dimensional (amb un n superior a 3). Llavors, l'índex β es determina mitjançant la minimització de:

$$\beta = \min\left(\sum_{i=1}^n \bar{y}_i^2\right)^{1/2} = \min\left(\bar{\mathbf{y}}^T \cdot \bar{\mathbf{y}}\right)^{1/2} \quad (4.19)$$

On y_i representa les coordenades de qualsevol punt del frontera de la superfície límit. Geomètricament, l'índex de fiabilitat es podria assimilar a la projecció del punt origen sobre la superfície límit.

El mètode *FOSM* permet la determinació d'aquest índex β mitjançant la realització d'iteracions successives del següent algoritme:

Es construeix un vector $\bar{\mathbf{X}}$ de variables aleatòries normals i es converteix en un vector de variables normals estàndard $\bar{\mathbf{Y}}$ mitjançant el següent canvi de variable:

$$Y_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (4.20)$$

Amb això, transformem la funció d'estat límit $G(\bar{\mathbf{X}}) = 0$ a $g(\bar{\mathbf{y}}) = 0$.

S'escull un valor inicial de $\bar{\mathbf{x}}^{(1)}, \bar{\mathbf{y}}^{(1)}$ per començar les iteracions. Aquest valor és fonamental per a la bona convergència de β . Per tant, cal escollir-lo amb cautela i certa intuïció. En el cas que ens ocupa, es començarà prenent el valor característic de les variables.

Es calcula $\beta^{(1)} = \left(\bar{y}^{(1)T} \cdot \bar{y}^{(1)} \right)^{1/2}$ prenent $m = 1$

Es calculen els cosinus directors o, altrament dits, factors de sensibilitat de les variables amb:

$$\bar{\alpha}^{(m)} \Rightarrow \alpha_i^m = \frac{\frac{\partial g}{\partial Y_i}}{I} \quad \text{on } I = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial Y_i} \right)^2} \quad (4.21)$$

Aquests factors indiquen el grau de significància que té la variable aleatòria considerada, dins la funció d'estat límit. El criteri de signes que se li associa correspon amb la variabilitat que transmet a la funció d'estat límit. Si la variable aleatòria tendeix a fer augmentar la funció d'estat límit, el signe serà positiu, i viceversa.

A continuació es determina el valor de $g(\bar{y}^{(m)})$

Es calcula el valor de $\bar{y}^{(m+1)}$ mitjançant

$$\bar{y}^{(m+1)} = -\bar{\alpha}^{(m)} \left[\beta^{(m)} + \frac{g(\bar{y}^{(m)})}{I} \right] \quad (4.22)$$

Caldrà repetir aquest esquema, incrementant el superíndex m d'unitat en unitat, fins que el valor de $\bar{y}^{(m+1)}$ i/o el valor de $\beta^{(m+1)}$ s'hagin estabilitzat, fent que $g(\bar{y}^{(m+1)}) = 0$.

El valor final de convergència de β correspondrà a l'índex de fiabilitat del problema plantejat. La probabilitat de fallida es podrà extreure de manera immediata.

4.3.2.2 Simulacions de Montecarlo

Aquestes consisteixen en la generació de nombres aleatoris del 0 a l'1, que es fan correspondre a les probabilitats acumulades de les diferents variables aleatòries que intervenen en l'expressió de les funcions d'estat límit que ens interessin. Així, per cada simulació, s'obtenen diferents valors de les variables, amb les magnituds i freqüència que se'n deriven de la seva funció de probabilitat.

A mode d'exemple, s'analitzaran funcions d'estat límit últim, del tipus $G = M_R - M_S$. Les simulacions de Montecarlo permetran generar diferents parells de valors de M_R i M_S . Aquest procés es repetirà per un nombre determinat de simulacions, i per a cada simulació realitzada, s'avaluarà el valor de la funció d'estat límit G . El número de vegades en que $M_S > M_R$, entre el nombre de simulacions que s'efectuïn, representarà la probabilitat de fallada de la secció.

Un dels problemes associats a aquesta tècnica és el temps de computació necessari per als càlculs. És per això que moltes vegades aquestes simulacions són efectuades per supercomputadors, i no per ordinador personals comuns.

El que es farà a continuació és analitzar els mateixos dos problemes que en l'apartat 4.2, però modificant la modelització de certes variables, que passaran de ser deterministes, a aleatòries, i se'n determinarà la probabilitat de violació de l'estat límit que es consideri amb el mètode FOSM, i posteriorment es comprovaran mitjançant les simulacions de Montecarlo.

En aquest anàlisi no s'usaran coeficients de majoració ni minoració d'accions o resistències respectivament. D'aquesta manera, s'obindrà una probabilitat de fallada real, la que de veritat existeix en les dovelles.

D'ara en endavant, tant la resistència com les sol·licitacions actuants tindran caràcter aleatori, ja que les expressions per a determinar-los contindran, a la vegada, variables aleatòries que suposarem aleatòries, tals com el pes propi, la resistència característica a compressió, la resistència residual a flexió, l'àrea de la secció, etc.

4.3.3 Anàlisi del problema de l'hissat amb eslingues

Recordem l'expressió (4.4) que ens dona el moment flexor sol·licitant al centre de llum de la dovella inferior:

$$\Rightarrow M_{S,cll} = \left[\frac{\gamma_Q \cdot Q(a+b)}{2} \right] + \left[\frac{\gamma_g \cdot pp \cdot L^2}{8} \right]$$

Amb el plantejament probabilístic, existiran certes diferències amb el tractament de les variables respecte el plantejament de la EHE 2008.

Les distàncies des dels punts de recolzament de les dovelles superiors als extrems de la dovella inferior, a i b , es suposaran que poden ser diferents, i a més, seran aleatòries.

La modelització d'aquestes distàncies es pot contemplar des de diversos punts de vista:

- a) Fixar unes distàncies a i b fixes que se suposa que no varien i que es controlen estrictament pels operaris.
- b) Suposar una distribució equiprobable d' a i b , entre uns valors prefixats. Les probabilitats de que les distàncies siguin majors o inferiors a les d'aquest interval seran nul·les.
- c) Establir un valor mig de referència (μ), al qual rondaran totes les distàncies i una desviació típica (σ) que indiqui una elevada variabilitat de la posició dels recolzaments. Amb aquests dos valors, μ i σ , podem establir una distribució normal que modela les distàncies a i b .

De les tres opcions plantejades, ens quedarem amb la tercera, ja que la considerem la més realista i probable d'ocurrència. En realitzar el càlcul probabilístic usarem una distribució normal, amb una mitja, $\mu = 0,3m$, valor usat també en el càlcul de l'aixecament amb eslingues. Però ara hi introduïrem una desviació de $\sigma = 0,05m$ per donar aquest caire aleatori a la posició dels recolzaments. Si calculem els valors característics inferior i superior, obtenim que el 90% de les distàncies possibles que es puguin donar es situaran entre els 22 i 38cm dels extrems, fet que modela i representa bé el comportament real d'aquestes distàncies a l'obra.

Per tant es prendrà:

$$a, b \sim \begin{cases} \text{distribució normal} \\ \mu = 0,3m \\ \sigma = 0,05m \\ \text{COV} = 16,7\% \end{cases}$$

Per a determinar la càrrega repartida que suposa el pes propi considerarem ara el pes específic com una variable aleatòria, amb una mitja entorn els 25 kN/m^3 . Segons *Melchers (1987)* es pot establir un coeficient de variació conjunt de l'àrea i el pes específic del 4,15%. Així doncs, podem establir la mitja del pes propi de la dovella com:

$$pp_{dovella} = b \cdot e \cdot \gamma = 1,8m \cdot 0,35m \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 15,75 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

I aplicant el coeficient de variació del 4,15%:

$$C.V. = \frac{\sigma}{\mu} \Rightarrow \sigma = 0,0415 \cdot 15,75 = 0,654 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Es conclou que el pes propi de la dovella es modelitzarà amb una distribució normal, amb:

$$pp_{dovella} \sim \begin{cases} \text{distribució normal} \\ \mu = 15,75 \text{ kN} / \text{m} \\ \sigma = 0,654 \text{ kN} / \text{m} \\ \text{COV} = 4,15\% \end{cases}$$

La longitud de la dovella es prendrà de 4,88m, de manera determinista. Es suposa que les dimensions de la dovella presenten molt poca variació ja que són elements prefabricats, amb un control de qualitat estricte.

Com hem dit, aquí no es tindran en compte els coeficients parcials de seguretat, ja que es vol obtenir dades reals de la probabilitat de fallada, a partir de valors de sol·licitació i resistència reals.

L'expressió del moment flexor sol·licitant quedarà com:

$$\Rightarrow M_{S,cll} = \left[\frac{Q(a+b)}{2} \right] + \left[\frac{pp \cdot L^2}{8} \right] \quad (4.23)$$

4.3.3.1 Estat Límit de Servei de fissuració

En primer lloc comprovarem l'ELS de fissuració de la peça. L'expressió del moment aplicat que inicia la fissuració és:

$$M_{fissuració} = \frac{f_{ct,fl} \cdot h^2 \cdot b}{6} \quad (4.24)$$

La resistència a flexotracció la suposarem aleatòria. Per a modelar-la usarem els resultats dels assajos exposats al capítol 3, procedents de les dovelles de la L9 del metro de Barcelona. La resistència a tracció indirecta mitjana dels assajos ha resultat ser de:

$$\Rightarrow f_{ct,m} = 4,453 MPa$$

El codi model CEB-FIB per a formigó estructural proposa una expressió per a determinar la resistència a flexotracció, a partir la resistència a tracció obtinguda dels assajos:

$$f_{ct,m,fl} = f_{ct,m} \frac{1 + 1,5 \cdot (h/100)^{0,7}}{1,5 \cdot (h/100)^{0,7}} \quad (4.25)$$

On:

h= cantell de la peça en metres

$f_{ct,m}$ = resistència a tracció indirecta mitjana

Substituint els valors pertinents:

$$f_{ct,m,fl} = 4,453 \frac{1 + 1,5 \cdot (350/100)^{0,7}}{1,5 \cdot (350/100)^{0,7}} = 5,686 MPa$$

Per tant, donat que la resistència a flexotracció es pot trobar com una combinació lineal de la resistència a tracció indirecta, la modelarem també amb una distribució normal, de paràmetres:

$$f_{ct,m,fl} \left\{ \begin{array}{l} \text{distribució normal} \\ \mu_{f_{ct,fl}} = 5,686 MPa \\ \sigma_{f_{ct,fl}} = 0,456 MPa \\ COV = 8\% \end{array} \right.$$

Les probabilitats d'aparició de fissures, obtingudes amb els dos mètodes, són les que es mostren a la taula 4.3:

| | Mètode <i>FOSM</i> | Simulacions Montecarlo |
|-----------------------------------|----------------------|------------------------|
| Probabilitat de fissuració | $2,7 \cdot 10^{-16}$ | 0 ^(*) |

Taula 4.3 Hissat amb eslingues. Probabilitat d'aparició de fissures.

Observem que la probabilitat obtinguda amb el mètode *FOSM* és molt petita, fet que indica que molt poques vegades es donarà el cas que la dovella fissuri. La convergència del mètode s'ha aconseguit ràpidament, amb tan sols 3 iteracions.

Els resultats obtinguts amb les simulacions no són satisfactoris, ja que una probabilitat nul·la no té sentit en aquest cas. Aquest fet es deu a que el número de simulacions necessari per comprovar aquest estat límit és molt elevat (tal i com

s'aprecia al *FOSM*, al voltant de 10^{-16} , i això és inabordable amb un ordinador personal convencional, per l'elevat temps de computació que requeriria.

4.3.3.2 Estat Límit Últim de sol·licitacions normals

El moment últim el determinarem mitjançant l'expressió:

$$M_R = 0,85 \cdot f_c \cdot 0,8 \cdot x \cdot b \cdot \left(h - \frac{0,8 \cdot x}{2} \right) - f_{cR} \cdot b \cdot \frac{(h-x)^2}{2} \quad (4.26)$$

No obstant, ara no considerarem valors característics, ni coeficients parcials de seguretat, si no que prendrem certes variables com a aleatòries, tals com la f_c i la f_{cR} :

- f_c : resistència a compressió de càlcul del formigó. En ser un material prefabricat, es prendrà un coeficient de variació baix, del 10%:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Distribució normal} \\ \mu_{f_{ck}} = 60 \text{MPa} \\ \sigma_{f_{ck}} = 6 \text{MPa} \\ \text{COV} = 10\% \end{array} \right.$$

- f_{cR} : Per a modelar-la usarem les dades obtingudes amb els assajos de les dovelles de la L9.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Distribució normal} \\ \mu_{f_{ct,fl}} = 1,965 \text{MPa} \\ \sigma_{f_{ct,fl}} = 0,741 \text{MPa} \\ \text{COV} = 37,70\% \end{array} \right.$$

Per a la determinació de la profunditat de la fibra neutra x , usarem la mateixa expressió que anteriorment:

$$\begin{aligned} 0,8 \cdot x \cdot 0,85 \cdot f_c &= f_{cR} \cdot (h - x) \\ \Rightarrow x &= \frac{f_{cR} \cdot h}{f_{cR} + 0,68 \cdot f_c} \end{aligned} \quad (4.27)$$

La resta de magnituds considerades es llisten a continuació:

- b = amplada de la dovella, de 1,8m. Es prendrà un valor determinista, ja que es considera que el COV de les dimensions de la dovella és pràcticament negligible.

- h = gruix de la dovella, de 0,35m. Valor determinista.

- Suposem un factor de cansament del formigó $\alpha_c = 0,85$

Establirem la funció d'estat límit últim, G , per a comprovar que la secció resisteix les sol·licitacions:

$$G = M_R - M_S$$

Les probabilitats de fallada obtingudes amb els dos mètodes s'expressen en la taula 4.4:

| | Mètode <i>FOSM</i> | Simulacions Montecarlo |
|--------------------------------|---------------------|------------------------|
| Probabilitat de fallada | $3,7 \cdot 10^{-2}$ | $3,9 \cdot 10^{-2}$ |

Taula 4.4 Hissat amb eslingues. Probabilitats de fallada

Observem que la probabilitat de fallada és elevada, fet que era d'esperar, ja que en el càlcul determinístic, suposant la secció fissurada, el moment sol·licitant M_S era superior al moment resistent M_R .

Les probabilitats obtingudes amb els dos mètodes són pràcticament idèntiques. Cal esmentar que el valor de la probabilitat obtinguda amb simulacions resulta ser un valor mig entre totes les vegades que s'han executat les simulacions, degut a l'aleatorietat de cada procés. El número de simulacions efectuat ha estat de 10000, amb un temps de computació d'uns 30 segons.

4.3.4 Apilament de les dovelles

Es torna a analitzar el problema de l'apilament de les dovelles, sense l'ús de coeficients de seguretat, i modelant certes variables com a aleatòries.

L'expressió del moment flexor al centre de llum de la segona dovella venia donada per l'expressió (4.15):

$$M_{S,cll} = pp \left[\frac{(I_{tram} + ee_1 + ee_2)^2}{8} - \frac{(I_{vol} - ee_1)^2 + (I_{vol} - ee_2)^2}{4} \right] + \left[\frac{Q(ei_1 + ei_2)}{2} \right]$$

$$\text{on } Q = \frac{p_{totaldovella} \cdot 7 \text{ dovelles} + p_{totalclau} \cdot 1 \text{ dovella clau}}{2}$$

En aquest cas, considerarem que les 4 excentricitats preses poden ser diferents entre elles, és a dir, establim la hipòtesi que els recolzaments col·locats pels operaris no estaran simètrics respecte el centre de llum.

Els valors de les variables que intervenen seran:

- $pp_{dovella}$. Es pren el mateix que en el cas de l'hissat, fent les mateixes consideracions.

$$pp_{dovella} \sim \begin{cases} \text{distribució normal} \\ \mu = 15,75 \text{ kN/m} \\ \sigma = 0,654 \text{ kN/m} \\ \text{COV} = 4,15\% \end{cases}$$

- La càrrega Q serà, considerant ara també el pes de la dovella de la clau (suposarem una longitud de 2.9m):

$$Q = \frac{7 \cdot pp_{dovella} \cdot 4,88m + 1 \cdot pp_{dovella} \cdot 2.9m}{2} \quad (4.36)$$

La càrrega Q tindrà caràcter aleatori ja que la seva expressió serà combinació lineal d'una variable aleatòria ($pp_{dovella}$).

Com hem dit, prendrem el valor de les excentricitats amb caràcter aleatori. A obra s'estableix una limitació d'aproximadament 50 cm. Modelarem les excentricitats amb distribucions normals amb paràmetres:

$$ee_1, ei_1, ee_2, ei_2 \sim \begin{cases} \text{distribució normal} \\ \mu_e = 0,3m \\ \sigma_e = 0,05m \\ COV = 16,7\% \end{cases}$$

La resta de magnituds que es tindran en compte són:

- Longitud de la dovella: es fixa de manera determinista en 4,88m.
- Longitud del tram ve fixada per la distància dels aparells de recolzament inferiors, en 2,8m , i per tant, la longitud de voladís a cada extrem serà de 2,08m.

4.3.4.1 Estat Límit de Servei de Fissuració

En primer lloc comprovarem l'Estat Límit de Servei de fissuració. El moment que provoca l'inici de la fissuració és anàleg al problema de l'hissat amb eslingues:

$$M_{fissuració} = \frac{f_{ct,fl} \cdot h^2 \cdot b}{6}$$

I recordem que anteriorment hem determinat que la resistència a flexotracció es podia modelar amb una distribució normal de paràmetres:

$$\begin{cases} \mu_{f_{ct,fl}} = 5,686MPa \\ \sigma_{f_{ct,fl}} = 0,456MPa \\ COV = 8\% \end{cases}$$

| | Mètode FOSM | Simulacions Montecarlo |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Probabilitat de fissuració | $5,22 \cdot 10^{-10}$ | 0 ^(*) |

Taula 4.5 Apilament de dovelles. Probabilitat de fissuració

Observem que la probabilitat obtinguda amb el mètode *FOSM* és més gran que en el problema de l'hissat amb eslingues, essent aquest un cas més desfavorable davant l'aparició de fissuració.

Pel que fa als resultats de les simulacions de Montecarlo, ens trobem amb un problema idèntic que en l'hissat. El número de simulacions que es poden efectuar amb un ordinador personal no són suficients per a determinar amb precisió la probabilitat de fissuració.

4.3.4.2 Estat Límit Últim de sol·licitacions normals

Les probabilitats de fallada determinades són les que es mostren a continuació:

| | Mètode <i>FOSM</i> | Simulacions Montecarlo |
|--------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Probabilitat de fallada | $5,7 \cdot 10^{-2}$ | $6,1 \cdot 10^{-2}$ |

Taula 4.6 Apilament de dovelles. Probabilitat de fallada

Observem que la diferència entre les dues metodologies torna a ser molt petita, i en tot cas es coincideix en l'ordre de magnitud de les probabilitats determinades.

4.4 Resum i conclusions

Els resultats obtinguts en els apartats anteriors es resumeixen en la següent taula:

| PLANTEJAMENT EHE 2008 | | | | |
|-----------------------------------|--|--------------|---|-------------------|
| Problema analitzat | Estat Límit Últim (sol·licitacions normals) | | Estat Límit de Servei (aparició de fissuració) | |
| | M_S (kN·m) | M_R (kN·m) | M_S (kN·m) | M_{fiss} (kN·m) |
| Hissat | 104,79 | 73,98 | 77,63 | 130,83 |
| Apilament | 115,24 | 73,98 | 85,36 | 130,83 |
| PLANTEJAMENT PROBABILÍSTIC | | | | |
| | Estat Límit Últim (sol·licitacions normals) | | Estat Límit de Servei (aparició de fissuració) | |
| Hissat | $p_f = 5,7 \cdot 10^{-2}$ | | prob. fissuració = $2,7 \cdot 10^{-16}$ | |
| Apilament | $p_f = 6,1 \cdot 10^{-2}$ | | prob. fissuració = $5,2 \cdot 10^{-10}$ | |

Taula 4.8 Resum de resultats. Plantejament determinista i probabilístic

Observem que l'Estat Límit de Servei es compleix en tot moment i sense problemes. El càlcul determinista indica un marge de seguretat fins a 53 kN·m en el cas de l'hissat, i de 45 kN·m en el cas de l'apilament, que es veu reflectit en el càlcul de les probabilitats d'aparició de la primera fissura, que són pràcticament nul·les.

Pel que fa a l'Estat Límit Últim, observem que en el plantejament determinista, la peça trenca per a tots dos problemes plantejats. Això resulta certament lògic, ja que la funció d'estat límit té una forta dependència del valor de la resistència residual f_R . El plantejament probabilístic també ho reflexa, amb una probabilitat de fallada relativament elevada.

CAPÍTOL 5

CALIBRATGE DELS COEFICIENTS PARCIALS DE SEGURETAT

5. CALIBRATGE DELS COEFICIENTS PARCIALS DE SEGURETAT

5.1 Introducció

En el capítol 4 s'han analitzat amb detall dues etapes crítiques a les quals es sotmeten les dovelles de FRF: el transport mitjançant l'hissat amb eslingues, i l'apilament en les zones d'emmagatzematge. S'ha comprovat l'ELU a sol·licitacions normals, i l'ELS de fissuració, amb dos plantejaments diferents (EHE 08 i probabilístic).

Ara reprendrem l'ús dels coeficients parcials de seguretat. En concret, el que es pretén és calibrar el coeficient que s'aplica per minorar la resistència a tracció del formigó amb fibres en Estat Límit Últim. Actualment, la Instrucció espanyola fixa aquest coeficient, per a la resistència característica, en 1,5, el mateix que per al formigó convencional.

Per a realitzar aquesta calibració s'usaran procediments i mètodes de fiabilitat estructural, que s'exposaran en el punt 5.2

5.2 Índex de fiabilitat i paràmetres de significància existents

En l'anàlisi probabilístic fet al capítol 4 s'ha determinat el problema de l'apilament de dovelles com el més desfavorable davant els dos Estats Límit plantejats.

A partir d'ara ens centrarem en l'Estat Límit Últim, i aprofitant l'aplicació del mètode *FOSM* que s'ha fet, s'extrauran dades importants per a la calibració dels coeficients parcials de seguretat. En concret, interessa obtenir l'índex de fiabilitat existent i els paràmetres de significància (α) de les diverses variables. Aquests últimes determinen el pes que correspon a cada variable aleatòria dins la funció d'Estat Límit, i depenen del coeficient de variació de la pròpia variable. A majors COV, majors significàncies.

Els resultats obtinguts per a l'apilament són els que es mostren a la taula 5.1:

| | |
|-----------------------------|---------------------|
| Índex de fiabilitat β | 1,58 |
| Probabilitat de fallada | $5,7 \cdot 10^{-2}$ |
| α_{f_c} | 0,0017 |
| α_{f_R} | 0,9903 |
| α_{ee} | -0,0171 |
| α_{ei} | -0,0913 |
| α_{pp} | -0,0453 |

Taula 5.1. Resultats de l'aplicació del mètode FOSM al problema de l'apilament

Centrem l'atenció en l'índex de fiabilitat obtingut, d'1,58. L'EHE 2008 estableix un índex de fiabilitat igual a 3,8 en el disseny d'estructures regides

segons la norma, amb una probabilitat de fallada associada de $7,23 \cdot 10^{-5}$. Comparant els dos índexos, es pot afirmar que l'índex de fiabilitat obtingut en l'anàlisi de l'apilament de dovelles és relativament baix.

5.3 Calibració dels coeficients parcials de seguretat

El que interessa ara és determinar aquells coeficients que proporcionin una probabilitat de fallada i índex de fiabilitat desitjats. A aquests valors els anomenarem valors objectius, amb notació p_f i β_f . El criteri d'elecció es podria basar en igualar aquests valors objectius amb els que es consideren a la Instrucció.

No obstant, donat que les situacions crítiques que estem considerant són de caire constructiu, transitòries i de curta durada, es podrien elegir uns valors objectius menys restrictius. Per aquest motiu es considerarà un valor de l'índex de fiabilitat $\beta = 3$, amb una probabilitat de fallada associada de $1,35 \cdot 10^{-3}$.

Per assolir aquest valor desitjat, es modificarà la modelització de les variables més controlables, com són les excentricitats exterior i interior (ee i ei) que s'han considerat. En concret s'anirà realitzant iteracions de prova i error, disminuint la mitjana i la desviació típica, per tal de fer augmentar l'índex de fiabilitat fins al valor objectiu de $\beta = 3$.

A la taula següent es mostren les proves efectuades:

| | Valors inicials | Iteració 1 | Iteració 2 | Iteració 3 | Iteració 4 |
|-----------------------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|
| Mitja distàncies "ee" (m) | 0,3 | 0,1 | 0,05 | 0,03 | 0,03 |
| Desv. Distàncies "ee" (m) | 0,05 | 0,01 | 0,005 | 0,003 | 0 |
| COV distàncies "ee" | 16,67% | 10,00% | 10,00% | 10,00% | 0,00% |
| Distància "ei" (m) | 0,3 | 0,1 | 0,05 | 0,03 | 0,03 |
| Desv. Distàncies "ei" (m) | 0,05 | 0,01 | 0,005 | 0,003 | 0 |
| COV distàncies "ei" | 16,67% | 10,00% | 10,00% | 10,00% | 0,00% |
| Índex de fiabilitat (beta) | 1,58 | 2,45 | 2,67 | 2,71 | 2,75 |
| Probabilitat de fallada associada | 5,7E-02 | 7,10E-03 | 3,79E-03 | 3,36E-03 | 2,98E-03 |
| alfa fc | 0,0017 | 1,0E-04 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| alfa fR | 0,9903 | 0,9996 | 0,9999 | 1,0000 | 1,0000 |
| alfa ee's | -0,0171 | -0,0034 | -0,0017 | -0,0010 | 0,0000 |
| alfa ei's | -0,0913 | -0,0179 | -0,0089 | -0,0053 | 0,0000 |
| alfa pes propi | -0,0453 | -0,0082 | 0,0006 | 0,0042 | 0,0042 |

Taula 5.2 Iteracions efectuades amb $\beta_f = 3$

Observant la tendència dels valors de β , a mesura que es disminueix la variabilitat de les excentricitats, veiem que és difícil arribar al valor objectiu que havíem proposat. La raó es troba en l'alt pes que té la variable de resistència residual, amb un coeficient de variació molt alt.

Per aquest motiu realitzarem una primer calibratge amb els valors obtinguts inicialment amb el mètode *FOSM*, considerant que en tractar-se de situacions transitòries, la probabilitat de fallada considerada pot ser menor. L'obtenció dels

coeficients parcials a aplicar als valors mitjos de les variables és immediat, a partir de la següents expressions:

$$\phi_{x_i} = 1 - \alpha_{x_i} \cdot \beta \cdot COV_{x_i} \quad (5.1)$$

Que ens el cas del coeficient de les variables resistents prendrem:

$$\frac{1}{\gamma_{x_i}} = \phi_{x_i} \quad (5.2)$$

I de les variables sol·licitants:

$$\gamma_{x_i} = \phi_{x_i} \quad (5.3)$$

Els coeficients parcials de seguretat obtinguts són els següents:

| Paràmetre | Valor | COV | γ_m resultant |
|-------------------|---------|-------------|----------------------|
| α_{f_c} | 0,0017 | 0,10 | $\approx 1,00$ |
| $\alpha_{f_{cR}}$ | 0,9903 | 0,37 | 2,37 |
| α_{ee} | -0,0171 | 0,17 | $\approx 1,00$ |
| α_{ei} | -0,0913 | 0,17 | 1,02 |
| α_{pp} | -0,0453 | 0,04 | $\approx 1,00$ |

Taula 5.3. Calibratge de coeficients de seguretat parcial per $\beta = 1,58$ i $COV_{f_{cR}}=37\%$

Observem que totes les variables, a excepció de la resistència residual, es podrien prendre com a magnituds deterministes, en tenir associats uns coeficients iguals pràcticament a 1. El coeficient associat a la resistència residual és de 2,37, que es considera alt, però que ve motivat per l'alt coeficient de variació que s'ha detectat en els assajos. Si el que es vol és trobar el coeficient a aplicar als valors característics de la resistència, es pot aplicar la següent expressió:

$$\gamma_{f_{cR}} = \frac{1 - k_{f_{cR}} \cdot COV_{f_{cR}}}{1 - \alpha_{f_{cR}} \cdot \beta \cdot COV_{f_{cR}}} \quad (5.4)$$

On $k_{f_{cR}}$ és un coeficient que depèn de la distribució i del percentil considerats.

$$\text{S'obté un coeficient de } \gamma_k = \frac{1 - 0,3421 \cdot 0,37}{1 - 0,9903 \cdot 1,58 \cdot 0,37} = \mathbf{2,07}$$

Si el comparem amb el que proposa la EHE 08, 1,50, observem una diferència notòria, deguda bàsicament a l'alt coeficient de variació que ofereix el formigó reforçat amb fibres.

Com s'exposava al principi d'aquest estudi, per a la determinació de la distribució estadística de la resistència residual a flexió, es van tenir en compte 51 provetes procedents de dovelles de la L9 de Barcelona. En cap cas es va considerar l'orientació o la zona d'extracció en la dovella.

Amb la finalitat de reduir el coeficient de variació de la mostra, es consideraran ara només les provetes extrems de la part central de les dovelles. Els resultats que s'obtenen són:

| | |
|-------------------------|-------|
| Nº assajos | 18 |
| $f_{cR,m}$ (MPa) | 1,627 |
| $\sigma_{f_{cR}}$ (MPa) | 0,510 |
| COV (%) | 31,36 |

Taula 5.4 Valors estadístics de la mostra, considerant únicament les provetes centrals

A continuació es tornarà a aplicar l'algoritme del *FOSM*, considerant aquests nous valors de la variable aleatòria. Els valors obtinguts es resumeixen en la taula següent:

| Paràmetre | Valor | COV | γ_m resultant |
|-------------------|---------|-------------|----------------------|
| β obtingut | 1,62 | --- | --- |
| α_{f_c} | 0,0025 | 0,10 | $\approx 1,00$ |
| $\alpha_{f_{cR}}$ | 0,9797 | 0,31 | 1,97 |
| α_{ee} | -0,0247 | 0,17 | $\approx 1,00$ |
| α_{ei} | -0,1314 | 0,17 | $\approx 1,00$ |
| α_{pp} | -0,0660 | 0,04 | $\approx 1,00$ |

Taula 5.5 Calibratge de coeficients de seguretat parcial, considerant un COV de $f_{cR}=31\%$

En considerar només les provetes centrals de les dovelles, el coeficient de variació disminueix, però ara també disminueix la mitjana considerada de la resistència residual. Aquests dos efectes, provoquen en global una disminució del coeficient parcial de seguretat a aplicar. El coeficient parcial a aplicar a la resistència residual característica es trobarà com:

$$\gamma_k = \frac{1 - 0,5065 \cdot 0,31}{1 - 0,9797 \cdot 1,62 \cdot 0,31} = \mathbf{1,66}$$

Que esdevé un valor molt més raonable i semblant al que s'usa actualment.

5.4 Elecció dels coeficients parcials de seguretat

Com s'ha vist, malgrat que de bon principi haguem plantejat el problema crític de l'apilament de dovelles amb l'ús de variables aleatòries, ha quedat demostrat la importància de la resistència residual, respecte la resta de variables. És per aquest motiu que per a modelar les excentricitats (i en general, les distàncies de referència d'aplicació de càrrega), la resistència a compressió i el pes propi, serà suficient considerar el valor característic de les mateixes (amb un $\gamma_k = 1,00$).

Pel que fa al coeficient parcial de seguretat a aplicar a la resistència residual, hem constatat que l'elevat coeficient de variació genera l'ús d'alts coeficients parcials. Prenent com a referència la campanya experimental efectuada a la L9 de Barcelona, si es tenen en compte tots els resultats analitzats, es calibra el coeficient característic amb $\gamma = 2,07$.

Si per contra només es tenen en compte les dades de les provetes assajades procedents de les zones centrals de les dovelles, on s'espera que la distribució i contribució de les fibres sigui més homogènia, el calibratge del coeficient parcial característic es situa amb $\gamma = 1,66$.

Com es pot apreciar, els coeficients parcials de seguretat no són únics, ja que depenen d'una situació de disseny concreta. No obstant, es pretén donar un cert caire generalista als coeficients obtinguts. Atenent al que s'ha exposat, i per quedar del marge de la seguretat, es proposen els següents coeficients parcials de seguretat a aplicar al FRF, i en concret, a uns determinats elements estructurals com són les dovelles de túnel construït amb tuneladora:

| Paràmetre | γ_k proposat |
|------------------|---------------------|
| f_c | 1,00 |
| f_{cR} | 2,00 |
| ee i ei | 1,00 |
| Pes propi | 1,00 |

Taula 5.6 Primera proposta de coeficients parcials de seguretat característics a aplicar al FRF

5.5 Comprovació de la seguretat en l'aplicació de la normativa EHE 08

El que es vol determinar ara és la probabilitat de fallada que comportaria l'aplicació estricta de la normativa. Es tornarà a aplicar el plantejament determinista de l'apartat 4.2, i es determinaran les excentricitats per a les que $M_u = M_s$, o el que és el mateix, les que facin complir que la funció d'Estat Límit sigui $G = 0$.

El moment últim ja ha estat calculat anteriorment, suposant la secció fissurada, mitjançant l'expressió, tenint en compte els coeficients de la instrucció.

$$M_R = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_{f_{ck}}} \cdot 0,8 \cdot x \cdot b \cdot \left(h - \frac{0,8 \cdot x}{2} \right) - \frac{f_{cR,k}}{\gamma_{\sigma_{cR}}} \cdot b \cdot \frac{(h-x)^2}{2} = 73,98 kN \cdot m \quad (5.5)$$

Amb:

- $f_{ct,R,d} = \frac{f_{ct,R,k}}{\gamma_{f_{ct,R,k}}} = \frac{1,033}{1,5} = 0,687 MPa$
- $x = 10,30 mm$
- $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_{f_{ck}}} = \frac{50}{1,5} = 33,33 MPa$

El moment sol·licitant, en funció de les excentricitats (que es consideren iguals, interior i exterior) queda com:

$$M_{S,cll} = \gamma_g \cdot pp \left[\frac{(l_{tram} + 2 \cdot ee)^2}{8} - \frac{(l_{vol} - ee)^2}{2} \right] + [\gamma_Q \cdot Q \cdot ee] =$$

$$= 1,35 \cdot 15,75 \left[\frac{(2,8 + 2 \cdot ee)^2}{8} - \frac{(2,08 - ee)^2}{2} \right] + [394,00 \cdot ee] \quad (5.6)$$

Igualant els dos moments, obtenim que les excentricitats que fan igualar $M_u = M_S$, són:

$$ee = ei = 21cm$$

Amb això, es tornarà aplicar el mètode FOSM per a determinar la probabilitat de fallada existent, amb el mateix tractament de les variables aleatòries de l'apartat 4.3.2, però ara variant la modelització de les excentricitats ee i ei, prenent un valor mig de 21cm, amb una desviació típica de 0,036, i un COV de 16,7%.

El resultats obtinguts són :

| Paràmetre | Valor | COV |
|-------------------------|---------------------|------|
| β obtingut | 1,97 | --- |
| Probabilitat de fallada | $2,4 \cdot 10^{-2}$ | --- |
| α_{f_c} | 0,0007 | 0,10 |
| $\alpha_{f_{cR}}$ | 0,9952 | 0,37 |
| α_{ee} | -0,0122 | 0,17 |
| α_{ei} | -0,0122 | 0,17 |
| α_{pp} | -0,0652 | 0,04 |

Taula 5.7 Comprovació de la probabilitat de fallada, considerant els coeficients parcials de l'EHE 08.

5.6 Comprovació de la seguretat dels nous coeficients

A continuació es recalcula el moment resistent de la secció fissurada, tenint els nous coeficients parcials

$$M_R = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_{f_{ck}}} \cdot 0,8 \cdot x \cdot b \cdot \left(h - \frac{0,8 \cdot x}{2} \right) - \frac{f_{cR,k}}{\gamma_{\sigma_{cR}}} \cdot b \cdot \frac{(h-x)^2}{2} \quad (5.7)$$

Amb:

$$- f_{ct,R,d} = \frac{f_{ct,R,k}}{\gamma_{f_{ct,R,k}}} = \frac{1,033}{2,0} = 0,517MPa$$

$$- f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_{f_{ck}}} = \frac{50}{1,0} = 50,0MPa$$

- x la determinem com:

$$0,8 \cdot x \cdot 0,85 \cdot f_{cd} = f_{cR,d} \cdot (h - x)$$

$$\Rightarrow x = \frac{f_{cR,d} \cdot h}{f_{cR,d} + 0,68 \cdot f_{cd}} = \frac{0,517 \cdot 350}{0,517 + 0,68 \cdot 50} = 5,24 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow M_{R,fis} &= 0,85 \cdot 50 \cdot 0,8 \cdot 5,24 \cdot 1800 \cdot \left(350 - \frac{0,8 \cdot 5,24}{2} \right) - \\ &- 0,517 \cdot 1800 \cdot \frac{(350 - 5,24)^2}{2} = \\ &= 56,26 \text{ kN}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

Per altra banda, l'expressió del moment sol·licitant en funció de les excentricitats, atenent als nous coeficients que es proposen, quedarà com:

$$\begin{aligned} M_{S,cll} &= \gamma_g \cdot pp \left[\frac{(l_{tram} + 2 \cdot ee)^2}{8} - \frac{(l_{vol} - ee)^2}{2} \right] + [\gamma_Q \cdot Q \cdot ee] = \\ &= 1 \cdot 15,75 \left[\frac{(2,8 + 2 \cdot ee)^2}{8} - \frac{(2,08 - ee)^2}{2} \right] + [291,85 \cdot ee] \end{aligned} \quad (5.8)$$

Igualant les dues expressions, obtenim que les excentricitats que fan que la funció d'Estat Límit sigui $G = 0$ són:

$$ee = ei = 22 \text{ cm}$$

Observem la gran semblança entre els valors de l'excentricitat que s'obtenen, tant en el cas d'aplicació dels coeficients de la normativa, com en el cas dels nous coeficients proposats.

Recalculant la probabilitat de fallada amb aquests valors de les excentricitats, obtenim:

| Paràmetre | Valor | COV |
|-------------------------|---------------------|------|
| β obtingut | 1,93 | --- |
| Probabilitat de fallada | $2,6 \cdot 10^{-2}$ | --- |
| α_{f_c} | 0,0008 | 0,10 |
| $\alpha_{f_{cR}}$ | 0,9949 | 0,37 |
| α_{ee} | -0,0126 | 0,17 |
| α_{ei} | -0,0671 | 0,17 |
| α_{pp} | -0,0304 | 0,04 |

Taula 5.8 Comprovació de la probabilitat de fallada, a partir dels nous coeficients proposats

Comparant els valors de l'índex de fiabilitat obtinguts amb una metodologia o l'altra, observem que la diferència és mínima. Això es deu en gran mesura als coeficients parcials que la normativa aplica en les accions, que actuen contrarestant el coeficient parcial de seguretat de la resistència residual, més baix en la normativa que el nou coeficient proposat.

No obstant, cap dels dos plantejaments es pot considerar satisfactori, ja que l'índex de fiabilitat que inicialment es volia assolir, considerant la transitorietat de les accions, era aproximadament $\beta_T = 3$. És per això que s'intenta realitzar una nova comprovació, per tal d'obtenir una probabilitat de fallada menor.

5.7 Proposta definitiva de coeficients parcials de seguretat

Donats els resultats anteriors, es proposa els següents coeficients parcials característics:

| Paràmetre | γ_k proposat |
|--------------|---------------------|
| f_{ck} | 1,50 |
| $f_{ct,R,k}$ | 2,50 |
| ee i ei | 1,00 |
| Pes propi | 1,35 |

Taula 5.9 Proposta definitiva de coeficients parcials de seguretat a considerar al FRF

Ràpidament s'observa que la taula conté una combinació de coeficients parcials. En primer lloc, es mantenen els coeficients proposats per la Instrucció pel que fa a la resistència característica a compressió, f_{ck} , i a l'acció permanent desfavorable que representa el pes propi. No obstant, el coeficient associat a la resistència residual a flexió s'incrementa fins a 2,50, donada l'alta variabilitat que ofereix aquesta magnitud.

Recalculant les expressions dels moments resistent i sol·licitant obtenim:

$$M_R = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_{f_{ck}}} \cdot 0,8 \cdot x \cdot b \cdot \left(h - \frac{0,8 \cdot x}{2} \right) - \frac{f_{ct,R,k}}{\gamma_{\sigma_{ctR}}} \cdot b \cdot \frac{(h-x)^2}{2} = 73,98 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Amb:

$$- f_{ct,R,d} = \frac{f_{ct,R,k}}{\gamma_{f_{ct,R,k}}} = \frac{1,033}{2,5} = 0,413 \text{ MPa}$$

$$- f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_{f_{ck}}} = \frac{50}{1,5} = 33,33 \text{ MPa}$$

$$- x = 6,26 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow M_{R, \text{fis}} = 44,82 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

I el moment sol·licitant,

$$M_{S,cl} = \gamma_g \cdot pp \left[\frac{(l_{\text{tram}} + 2 \cdot ee)^2}{8} - \frac{(l_{\text{vol}} - ee)^2}{2} \right] + [\gamma_Q \cdot Q \cdot ee] =$$

$$= 1,35 \cdot 15,75 \left[\frac{(2,8 + 2 \cdot ee)^2}{8} - \frac{(2,08 - ee)^2}{2} \right] + [394,00 \cdot ee]$$

Amb aquests valors, les excentricitats que anul·len la funció d'Estat Límit són:

$$ee = ei = 14\text{cm}$$

I la probabilitat de fallada associada:

| Paràmetre | Valor | COV |
|-------------------------|--|------------|
| β obtingut | 2,28 | --- |
| Probabilitat de fallada | $1,13 \cdot 10^{-2}$ | --- |
| α_{f_c} | 0,0002 | 0,10 |
| $\alpha_{f_{cR}}$ | 0,9979 | 0,37 |
| α_{ee} | -0,0081 | 0,17 |
| α_{ei} | -0,0432 | 0,17 |
| α_{pp} | -0,0156 | 0,04 |

Taula 5.10 Comprovació de la probabilitat de fallada, a partir dels propostes definitives de coeficients parcials

La probabilitat resultant no és la desitjada a priori, però la donarem per vàlida, donat que s'està considerant unes accions de caire constructiu, de curta durada, i que no són crítiques per a la seguretat humana.

En tot cas, queda palès la necessitat d'un augment del coeficient parcial de seguretat de la resistència residual del formigó amb fibres, ja que s'ha comprovat l'elevada variabilitat de resultats que ofereix, augmenta la probabilitat de fallada.

La proposta definitiva de coeficients parcials de seguretat es dona per vàlida, donat que augmenta la seguretat del problema plantejat, i a més, conserva els valors tradicionals dels coeficients parcials de les accions, variant només el coeficient associat a la resistència residual del material.

5.8 Cost econòmic associat a l'índex de fiabilitat calculat

Amb aquests coeficients, l'índex de fiabilitat assoleix un valor de $\beta = 2,28$. Això representa la fallada d'1 dovella cada 90 dovelles que es considerin. No obstant, tots aquests càlculs s'han fet tenint en compte la dovella més crítica de l'anell (la 2a), i per tant, la probabilitat de fallada es tradueix en una ruptura de dovella de cada 90 anells considerats, fet que disminueix i relativitza el cost econòmic associat al trencament de dovelles.

Fent un càlcul ràpid, en una línia com la L9, amb uns 30 km de túnel construït mitjançant tuneladora, serien necessaris uns 17000 anells. D'aquests, les segones dovelles d'uns 190 podrien patir problemes de ruptura.

A la realitat, es veu clar que el número de dovelles afectades no és tan gran. La raó principal es troba en que en l'estudi s'ha suposat un cas molt desfavorable de secció completament fissurada, considerant la contribució d'una resistència residual. A la pràctica, les dovelles no presenten aquest alt grau de fissuració, i la

secció treballa elàsticament, amb la contribució d'una resistència a flexotracció força més elevada.

CAPÍTOL 6

RESUM I CONCLUSIONS

6. RESUM I CONCLUSIONS

En aquesta tesina s'ha realitzat un calibratge dels coeficients parcials de seguretat a aplicar al FRF a partir de l'estudi d'un exemple d'aplicació concret, com són les dovelles d'un tram experimental de la L9 de Barcelona, construïdes a partir d'aquest material. A continuació, i per finalitzar aquest estudi, s'exposen els resultats i les conclusions més rellevants que s'han obtingut.

1. De l'anàlisi de les dades de resistència de les provetes extretes mitjançant una sèrie d'assajos *Barcelona* de doble punxonament, s'ha determinat que la resistència a tracció indirecta de les provetes segueix una distribució normal, de paràmetres $\mu = 4,453\text{MPa}$ i $\text{COV} = 8\%$. La resistència residual a flexotracció segueix una distribució lognormal, de paràmetres $\mu = 1,965\text{MPa}$ i $\text{COV} = 37\%$. Es destaca l'elevada **variabilitat** d'aquest últim resultat, ja que esdevindrà un factor molt important en el calibratge dels coeficients.
2. Les **sol·licitacions més desfavorables** a que es sotmeten les dovelles, pel que fa als esforços, es produeixen en **etapes del procés constructiu**. En concret, s'ha fixat el transport i l'elevació de les dovelles mitjançant grues equipades amb eslingues i el seu posterior apilament en les zones d'emmagatzematge, com les situacions més crítiques del cicle constructiu d'aquests elements estructurals.
3. Els Estats Límits considerats més representatius del grau d'afectació de les dovelles són l'Estat Límit de Servei de fissuració, i l'Estat Límit Últim davant sol·licitacions normals. La comprovació de cadascun s'aborda mitjançant dos plantejaments diferents, un de **determinista**, seguint les recomanacions de la EHE 08; i l'altre **probabilista**, modelant certes magnituds com a variables aleatòries.
4. La **seguretat** davant l'aparició de fissuració (en **ELS**) està **plenament garantida**. Els resultats del plantejament determinista proporcionen uns moments sol·licitants molt menors al moment que produeix la fissuració de la secció. Aquest fet queda corroborat en el plantejament estocàstic, on s'obtenen probabilitats de fallada molt petites (de l'ordre de 10^{-10})
5. La **seguretat** davant de l'**ELU**, suposant que la secció es trobi fissurada, **no està garantida**. Mitjançant el plantejament determinista s'obtenen moments sol·licitants superiors als resistents, fet que també queda reflexat en les probabilitats considerables de fallada que s'obtenen (de l'ordre de 10^{-2}). Dels dos problemes estudiats, el més desfavorable resulta ser l'apilament de dovelles.
Cal considerar que a la realitat les dovelles no presenten aquest alt grau de fissuració de la secció, i per tant, la resistència davant la fallada és molt superior, ja que la secció treballa elàsticament, amb la contribució d'una resistència a flexotracció força més elevada que la residual.
6. Per al calibratge dels coeficients parcials de seguretat s'ha fixat un valor objectiu de l'índex de fiabilitat al voltant de $\beta_f = 3$, donada la naturalesa transitòria de les situacions que s'analitzen. No obstant, els valors

proporcionats pel mètode de fiabilitat *FOSM* mostren **la impossibilitat d'assolir aquest valor objectiu**, a causa de l'elevada variabilitat de la resistència residual a flexotracció del formigó reforçat amb fibres.

7. Els coeficients parcials de seguretat que estableix la Instrucció EHE 08 volen assegurar un índex de fiabilitat de $\beta = 3,8$. Malgrat això, l'aplicació d'aquests coeficients en la comprovació dels diferents Estats Límits plantejats durant les diferents etapes constructives de les dovelles, s'obté un índex de fiabilitat molt menor de $\beta = 1,97$.
8. S'ha determinat un **coeficient parcial de seguretat** de valor **2,5**, a aplicar a la **resistència residual a flexotracció** del formigó reforçat amb fibres. Aquest coeficient suposa un augment considerable respecte al que proposa la EHE 08, de valor 1,5.
9. Pel que fa als coeficients parcials de seguretat de **la resta de variables**, principalment de les accions i de la resistència a compressió, es proposa usar els **mateixos coeficients de la Instrucció**.
10. Usant aquest seguit de coeficients proposats, s'assoleix un índex de fiabilitat de $\beta = 2,28$, i una probabilitat de fallada de $1,13 \cdot 10^{-2}$ que, malgrat no satisfer l'índex objectiu establert, es considera que són valors acceptables donada la naturalesa transitòria de les situacions que s'analitzen.
11. Aquests coeficients parcials proposats han estat calibrats mitjançant l'estudi d'un **exemple concret d'aplicació**, com són les dovelles usades en la construcció de túnels de línies ferroviàries. Per tant, **no és garanteix el mateix nivell de seguretat** en l'aplicació d'aquests coeficients en **altres àmbits** de l'ús del formigó reforçat amb fibres. Per a la determinació d'un coeficient general caldria estudiar un nombre elevat d'exemples on es fa ús d'aquest material i, posteriorment, realitzar-ne una ponderació dels resultats obtinguts.
12. En qualsevol cas, es destaca **la necessitat d'augmentar el coeficient parcial de seguretat** a aplicar a la **resistència residual** a flexotracció del formigó amb fibres que proposa la Instrucció, donada l'elevada variabilitat dels resultats obtinguts en els assajos efectuats.

CAPÍTOL 7

ANNEXOS

7. ANNEXOS

7.1 Simulacions de Montecarlo (amb programa Scilab ®)

7.1.1 ELU Hissat amb eslingues

```
//programa test HISSAT AMB ESLINGUES (determinació de probabilitats reals de fallida)
```

```
b=1.8;//metres
```

```
h=0.35;//metres
```

```
l=4.88;//metres
```

```
//variables aleatòries
```

```
i=1;
```

```
Ns=10000;
```

```
while i<=Ns,
```

```
sigma_t(i)=grand(1,1,'nor',1965,741);
```

```
f_ck(i)=grand(1,1,'nor',60000,600)
```

```
pp(i)=grand(1,1,'nor',15.75,0.654);
```

```
x(i)=(0.35*sigma_t(i))/(sigma_t(i)+0.68*f_ck(i));
```

```
//resistencia
```

```
M_r(i)=0.85*(f_ck(i)*0.8*x(i)*b*(h-0.8*x(i)/2))-sigma_t(i)*b*((h-x(i))^2)/2;
```

```
a(i)=grand(1,1,'nor',0.3,0.05);
```

```
c(i)=grand(1,1,'nor',0.3,0.05);
```

```
//sol-licitacio
```

```
M_s(i)=(l^2*pp(i)/8)+((a(i)+c(i))/2)^2*pp(i)*l/2;
```

```
//estat limit
```

```
G(i)=M_r(i)-M_s(i);
```

```
if G(i)<=0 then
```

```
    F(i)=1;
```

```
else
```

```
    F(i)=0;
```

```
end,
```

```
i=i+1;
```

```
end
```

```
//probabilitat de fallada
```

```
Pf=sum(F)/Ns
```

7.1.2 ELU Apilament de dovelles

```
//programa test APILAT DE LES DOVELLES ELU SOL·LICITACIONS NORMALS

b=1.8;//metres
h=0.35;//metres
l=4.88;//metres
//variables aleatories

i=1;
Ns=10000;

while i<=Ns,

sigma_t(i)=grand(1,1,'nor',1965,741);

f_ck(i)=grand(1,1,'nor',60000,600);

pp(i)=grand(1,1,'nor', 15.75,0.654);

x(i)=(0.35*sigma_t(i))/(sigma_t(i)+0.68*f_ck(i));

M_r(i)=0.85*(f_ck(i)*0.8*x(i)*b*(h-0.8*x(i)/2))-sigma_t(i)*b*((h-x(i))^2)/2;

ee1(i)=grand(1,1,'nor',0.3,0.05);
ei1(i)=grand(1,1,'nor',0.3,0.05);
ee2(i)=grand(1,1,'nor',0.3,0.05);
ei2(i)=grand(1,1,'nor',0.3,0.05);

//solicitacio
M_s(i)=(pp(i)*(((2.8+ee1(i)+ee2(i))^2)/8)-(((1.04-ee1(i))^2+(1.04-ee2(i))^2)/4))+((pp(i)*(4.88*7/2+2.9*1/2))*(ei1(i)+ei2(i)));

//estat limit
G(i)=M_r(i)-M_s(i);

if G(i)<=0 then
  F(i)=1;
else
  F(i)=0;
end,
i=i+1;
end

//probabilitat de fallada
Pf=sum(F)/Ns
```

7.2 Programació de l'algoritme del Mètode FOSM (amb programa Matlab ®)

7.2.1 ELS Hissat amb eslingues

```

% MÈTODE FOSM Determinació de l'índex de fiabilitat HISSAT AMB ESLINGUES
% ELS

% Punt inicial de comprovació:
fflt=5686;
a=0.3;
b=0.3;
pp=15.75;

%vector x(1)=[fc,ft,ee1,ee2,ei1,ei2]

%Estandarització de les variables
m(1)=(fflt-5686)/456;
o(1)=(a-0.3)/0.05;
p(1)=(b-0.3)/0.05;
s(1)=(pp-15.75)/0.654;

%vector y(1)=[m(1),o(1),p(1),s(1)]

%canvi de variable
%fflt(i)=(456*m(i)+5686)
%a(i)=(0.05*o(i)+0.3)
%b(i)=(0.05*p(i)+0.3)
%pp(i)=(0.654*s(i)+15.75)

maxiter=input('numero maxim d'iteracions= ');

for i=1:maxiter

    beta(i)=sqrt((m(i))^2+(o(i))^2+(p(i))^2+(s(i))^2)

    g(i)=-
[2.44*(0.654*s(i)+15.75)*((0.05*o(i)+0.3)+(0.05*p(i)+0.3))+2.9768*(0.654*s(i)+15.75)]+[(456*m(i)+5686)*0.35^2*1.8/6]
    %g=-[2.44*(0.654*s+15.75)*((0.05*o+0.3)+(0.05*p+0.3))+2.9768*(0.654*s+15.75)]+[(456*m+5686)*0.35^2*1.8/6]

    gammafflt(i)=16.758;
    gammaa(i)=-19947/250000*s(i)-3843/2000;
    gammab(i)=-19947/250000*s(i)-3843/2000;
    gammapp(i)=-19947/250000*o(i)-1815177/625000-19947/250000*p(i);

    l(i)=sqrt(gammafflt(i)^2+gammaa(i)^2+gammab(i)^2+gammapp(i)^2);

    afflt(i)=gammafflt(i)/l(i)
    alfaa(i)=gammaa(i)/l(i)
    
```

```
alfab(i)=gammab(i)/l(i)
alfapp(i)=gammapp(i)/l(i)

m(i+1)=-alfafflt(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
o(i+1)=-alfaa(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
p(i+1)=-alfab(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
s(i+1)=-alfapp(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));

%actualitzacio
i=i+1;

end
```

7.2.2 ELU Hissat amb eslingues

```
% MÈTODE FOSM Determinació de l'índex de fiabilitat HISSAT AMB ESLINGUES
% ELU

%Punt inicial de comprovacio
fc=60000;
fR=1965;
a=0.3;
b=0.3;
pp=15.75;

%vector x(1)=[fc,fR,a,b,pp]

%Estandarització de les variables
m(1)=(fc-60000)/6000;
n(1)=(fR-1965)/741;
o(1)=(a-0.3)/0.05;
p(1)=(b-0.3)/0.05;
s(1)=(pp-15.75)/0.654;

%vector y(1)=[m(1),n(1),o(1),p(1),s(1)]

%canvi de variable
%fc(i)=(6000*m(i)+60000)
%fR(i)=(741*n(i)+1965)
%a(i)=(0.05*o(i)+0.3)
%b(i)=(0.05*p(i)+0.3)
%pp(i)=(0.654*s(i)+15.75)

maxiter=input('numero maxim d'iteracions= ');

for i=1:maxiter

    beta(i)=sqrt(m(i)^2+n(i)^2+o(i)^2+p(i)^2+s(i)^2)
```

```

g(i)=-
[2.44*(0.654*s(i)+15.75)*((0.05*o(i)+0.3)+(0.05*p(i)+0.3))+2.9768*(0.654*s(i)+15.75)]+[0.15*(6000*m(i)+60000)*(741*n(i)
)+1965]/((741*n(i)+1965)+0.68*(6000*m(i)+60000))-
[0.06*(6000*m(i)+60000)*(741*n(i)+1965)^2/((741*n(i)+1965)+0.68*(6000*m(i)+60000))^2]-
[(0.11*(741*n(i)+1965))+((0.11*(741*n(i)+1965)^3)/((741*n(i)+1965)+0.68*(6000*m(i)+60000))^2)]-
0.2205*(((741*n(i)+1965)^2)/((741*n(i)+1965)+0.68*(6000*m(i)+60000)))]

gammaafc(i)=900*(741*n(i)+1965)/(741*n(i)+42765+4080*m(i))-
4080*(900*m(i)+9000)*(741*n(i)+1965)/(741*n(i)+42765+4080*m(i))^2-
31491/25*(741*n(i)+1965)^2/(741*n(i)+42765+4080*m(i))^2+8160*(360*m(i)+3600)*(741*n(i)+1965)^2/(741*n(i)+42765
+4080*m(i))^3+4488/5*(741*n(i)+1965)^3/(741*n(i)+42765+4080*m(i))^3;
gammafR(i)=741*(900*m(i)+9000)/(741*n(i)+42765+4080*m(i))-
741*(900*m(i)+9000)*(741*n(i)+1965)/(741*n(i)+42765+4080*m(i))^2-
1482*(360*m(i)+3600)*(741*n(i)+1965)/(741*n(i)+42765+4080*m(i))^2+1482*(360*m(i)+3600)*(741*n(i)+1965)^2/(741*n
(i)+42765+4080*m(i))^3-8151/100-
815841/2000*(741*n(i)+1965)^2/(741*n(i)+42765+4080*m(i))^2+8151/50*(741*n(i)+1965)^3/(741*n(i)+42765+4080*m(i)
)^3+326781/1000*(741*n(i)+1965)/(741*n(i)+42765+4080*m(i));

gammaa(i)=-19947/250000*s(i)-3843/2000;
gammab(i)=-19947/250000*s(i)-3843/2000;
gammapp(i)=-19947/250000*o(i)-1815177/625000-19947/250000*p(i);

l(i)=sqrt(gammaafc(i)^2+gammafR(i)^2+gammaa(i)^2+gammab(i)^2+gammapp(i)^2);

alfafc(i)=gammaafc(i)/l(i)
alfafR(i)=gammafR(i)/l(i)
alfaa(i)=gammaa(i)/l(i)
alfab(i)=gammab(i)/l(i)
alfapp(i)=gammapp(i)/l(i)

m(i+1)=-alfafc(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
n(i+1)=-alfafR(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
o(i+1)=-alfaa(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
p(i+1)=-alfab(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
s(i+1)=-alfapp(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));

%actualitzacio
i=i+i;

end

```

7.2.3 ELS Apilament de dovelles

```
% MÈTODE FOSM Determinació de l'índex de fiabilitat APILAMENT ELS

%Introduir valor inicial de les variables (sense estandaritzar)

%0.3 0.05

fflt=5686;
ee1=0.3;
ee2=0.3;
ei1=0.3;
ei2=0.3;
pp=15.75;

%vector x(1)=[fflt,ee1,ee2,ei1,ei2]

%Estandarització de les variables
m(1)=(fflt-5686)/456;
o(1)=(ee1-0.3)/0.05;
p(1)=(ee2-0.3)/0.05;
q(1)=(ei1-0.3)/0.05;
r(1)=(ei2-0.3)/0.05;
s(1)=(pp-15.75)/0.654;
%vector y(1)=[m(1),n(1),o(1),p(1),q(1),r(1),s(1)]

%canvi de variable

%fflt(i)=(456*m(i)+5686)
%ee1(i)=(0.05*o(i)+0.3)
%ee2(i)=(0.05*p(i)+0.3)
%ei1(i)=(0.05*q(i)+0.3)
%ei2(i)=(0.05*r(i)+0.3)
%pp(i)=(0.654*s(i)+15.75)
maxiter=input('numero maxim d'iteracions= ');

for i=1:maxiter

    beta(i)=sqrt((m(i))^2+(o(i))^2+(p(i))^2+(q(i))^2+(r(i))^2+(s(i))^2)

    g(i)=-[(0.654*s(i)+15.75)*(((2.8+(0.05*o(i)+0.3)+(0.05*p(i)+0.3))^2/8)-(2.08-(0.05*o(i)+0.3))^2/4-(2.08-
(0.05*p(i)+0.3))^2/4)]-9.265*(0.654*s(i)+15.75)*((0.05*q(i)+0.3)+(0.05*r(i)+0.3))]+(456*m(i)+5686)*0.35^2*1.8/6

    %funcio limit amb canvi de variable
    %g=-[(0.654*s+15.75)*(((2.8+(0.05*o+0.3)+(0.05*p+0.3))^2/8)-(2.08-(0.05*o+0.3))^2/4-(2.08-(0.05*p+0.3))^2/4)]-
[9.265*(0.654*s+15.75)*((0.05*q+0.3)+(0.05*r+0.3))]+(456*m+5686)*0.35^2*1.8/6

    gammafflt(i)=8379/500;
```



```
gammaee1(i)=-((327/500*s(i)+63/4)*(87/1000-1/1600*o(i)+1/1600*p(i)));
gammaee2(i)=-((327/500*s(i)+63/4)*(87/1000+1/1600*o(i)-1/1600*p(i)));
gammaei1(i)=-605931/2000000*s(i)-116739/16000;
gammaei2(i)=-605931/2000000*s(i)-116739/16000;
gammapp(i)=-327/4000*(17/5+1/20*o(i)+1/20*p(i))^2+327/2000*(89/50-1/20*o(i))^2+327/2000*(89/50-1/20*p(i))^2-
605931/2000000*q(i)-1817793/500000-605931/2000000*r(i);
l(i)=sqrt(+gammafflt(i)^2+gammaee1(i)^2+gammaee2(i)^2+gammaei1(i)^2+gammaei2(i)^2+gammapp(i)^2);

alfafflt(i)=gammafflt(i)/l(i)
alfaee1(i)=gammaee1(i)/l(i)
alfaee2(i)=gammaee2(i)/l(i)
alfaei1(i)=gammaei1(i)/l(i)
alfaei2(i)=gammaei2(i)/l(i)
alfapp(i)=gammapp(i)/l(i)

m(i+1)=-alfafflt(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
o(i+1)=-alfaee1(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
p(i+1)=-alfaee2(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
q(i+1)=-alfaei1(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
r(i+1)=-alfaei2(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
s(i+1)=-alfapp(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));

%actualitzacio
i=i+1;

end
```

7.2.4 ELU Apilament de dovelles

% MÈTODE FOSM Determinació de l'índex de fiabilitat APILAMENT ELU

%Introduir valor inicial de les variables (sense estandaritzar)

fc=60000;

ft=1965;

ee1=0.3;

ee2=0.3;

ei1=0.3;

ei2=0.3;

pp=15.75;

%vector x(1)=[fc,ft,ee1,ee2,ei1,ei2]

%Estandarització de les variables

m(1)=(fc-60000)/60000;

n(1)=(ft-1965)/741;

o(1)=(ee1-0.3)/0.05;

p(1)=(ee2-0.3)/0.05;

q(1)=(ei1-0.3)/0.05;

r(1)=(ei2-0.3)/0.05;

s(1)=(pp-15.75)/0.654;

%vector y(1)=[m(1),n(1),o(1),p(1),q(1),r(1),s(1)]

%tol=input('tolerancia de convergencia');

%canvi de variable

%fc(i)=(6000*m(i)+60000)

%ft(i)=(741*n(i)+1965)

%ee1(i)=(0.05*o(i)+0.3)

%ee2(i)=(0.05*p(i)+0.3)

%ei1(i)=(0.05*q(i)+0.3)

%ei2(i)=(0.05*r(i)+0.3)

%pp(i)=(0.654*s(i)+15.75)

maxiter=input('numero maxim d'iteracions= ');

for i=1:maxiter

beta(i)=sqrt((m(i))^2+(n(i))^2+(o(i))^2+(p(i))^2+(q(i))^2+(r(i))^2+(s(i))^2)

g(i)=-[(0.654*s(i)+15.75)*((2.8+(0.05*o(i)+0.3)+(0.05*p(i)+0.3))^2/8)-(2.08-(0.05*o(i)+0.3))^2/4-(2.08-(0.05*p(i)+0.3))^2/4]-

[9.265*(0.654*s(i)+15.75)*((0.05*q(i)+0.3)+(0.05*r(i)+0.3))]+[0.15*(6000*m(i)+60000)*(741*n(i)+1965)/((741*n(i)+1965)+0.68*(6000*m(i)+60000))]-[0.06*(6000*m(i)+60000)*(741*n(i)+1965)^2/((741*n(i)+1965)+0.68*(6000*m(i)+60000))^2]-

[(0.11*(741*n(i)+1965))+((0.11*(741*n(i)+1965)^3)/((741*n(i)+1965)+0.68*(6000*m(i)+60000))^2)]-

0.2205*(((741*n(i)+1965)^2)/((741*n(i)+1965)+0.68*(6000*m(i)+60000)))]

%funcio limit sense canvi de variable

```

%g=-[pp*((2.8+ee1+ee2)^2/8)-(2.08-ee1)^2/4-(2.08-ee2)^2/4]-[9.265*pp*(ei1+ei2)]+[0.15*fc*ft/(ft+0.68*fc)]-
[0.06*fc*ft^2/(ft+0.68*fc)^2]-[(0.11*ft)+((0.11*ft^3)/((ft+0.68*fc)^2))-0.2205*((ft^2)/(ft+0.68*fc))]

%funcio limit amb canvi de variable
%g=-[(0.654*s+15.75)*((2.8+(0.05*o+0.3)+(0.05*p+0.3))^2/8)-(2.08-(0.05*o+0.3))^2/4-(2.08-(0.05*p+0.3))^2/4]-
[9.265*(0.654*s+15.75)*((0.05*q+0.3)+(0.05*r+0.3))] + [0.15*(6000*m+60000)*(741*n+1965)/((741*n+1965)+0.68*(6000*
m+60000))]-[0.06*(6000*m+60000)*(741*n+1965)^2/((741*n+1965)+0.68*(6000*m+60000))^2]-
[(0.11*(741*n+1965))+((0.11*(741*n+1965)^3)/((741*n+1965)+0.68*(6000*m+60000))^2))-
0.2205*(((741*n+1965)^2)/((741*n+1965)+0.68*(6000*m+60000)))]

gammafc(i)=900*(741*n(i)+1965)/(741*n(i)+42765+4080*m(i))-
4080*(900*m(i)+9000)*(741*n(i)+1965)/(741*n(i)+42765+4080*m(i))^2-
31491/25*(741*n(i)+1965)^2/(741*n(i)+42765+4080*m(i))^2+8160*(360*m(i)+3600)*(741*n(i)+1965)^2/(741*n(i)+42765
+4080*m(i))^3+4488/5*(741*n(i)+1965)^3/(741*n(i)+42765+4080*m(i))^3;
gammafR(i)=741*(900*m(i)+9000)/(741*n(i)+42765+4080*m(i))-
741*(900*m(i)+9000)*(741*n(i)+1965)/(741*n(i)+42765+4080*m(i))^2-
1482*(360*m(i)+3600)*(741*n(i)+1965)/(741*n(i)+42765+4080*m(i))^2+1482*(360*m(i)+3600)*(741*n(i)+1965)^2/(741*n
(i)+42765+4080*m(i))^3-8151/100-
815841/2000*(741*n(i)+1965)^2/(741*n(i)+42765+4080*m(i))^2+8151/50*(741*n(i)+1965)^3/(741*n(i)+42765+4080*m(i)
)^3+326781/1000*(741*n(i)+1965)/(741*n(i)+42765+4080*m(i));
gammaee1(i)=-327/500*s(i)+63/4*(87/1000-1/1600*o(i)+1/1600*p(i));
gammaee2(i)=-327/500*s(i)+63/4*(87/1000+1/1600*o(i)-1/1600*p(i));
gammaei1(i)=-605931/2000000*s(i)-116739/16000;
gammaei2(i)=-605931/2000000*s(i)-116739/16000;
gammapp(i)=-327/4000*(17/5+1/20*o(i)+1/20*p(i))^2+327/2000*(89/50-1/20*o(i))^2+327/2000*(89/50-1/20*p(i))^2-
605931/2000000*q(i)-1817793/500000-605931/2000000*r(i);

l(i)=sqrt(gammafc(i)^2+gammafR(i)^2+gammaee1(i)^2+gammaee2(i)^2+gammaei1(i)^2+gammaei2(i)^2+gammapp(i)^2
);
alfafc(i)=gammafc(i)/l(i)
alfafR(i)=gammafR(i)/l(i)
alfaee1(i)=gammaee1(i)/l(i)
alfaee2(i)=gammaee2(i)/l(i)
alfaei1(i)=gammaei1(i)/l(i)
alfaei2(i)=gammaei2(i)/l(i)
alfapp(i)=gammapp(i)/l(i)

m(i+1)=-alfafc(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
n(i+1)=-alfafR(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
o(i+1)=-alfaee1(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
p(i+1)=-alfaee2(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
q(i+1)=-alfaei1(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
r(i+1)=-alfaei2(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));
s(i+1)=-alfapp(i)*(beta(i)+g(i)/l(i));

%actualitzacio
i=i+1;

end

```

CAPÍTOL 8

REFERÈNCIES

8. REFERÈNCIES

- Agulló L., Gettu R., Aguado A., Saldivar H. *La tenacidad de hormigones reforzados con fibras de acero*. Monografía CIMNE nº54. Maig 2000
- Anònim (2009) *Comportamiento al corte de hormigones reforzados con fibras de acero*. Article publicat al blog de *Ingeniería y construcción* el 18-07-09.
- Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural (ACHE) (2003). Monografía. *Control estadístico del hormigón estructural*
- Casas Rius, J.R (1997). Article publicat al *Journal of Structural Engineering*, vol. 123, nº3, març 1997. *Reliability-based partial safety factors in cantilever construction of concrete bridges*.
- Guàrdia Tomàs, J.; Molins Borrell, Climent (2008). *Caracterització del comportament a tracció de formigó d'alta treballabilitat reforçat amb fibres d'acer mitjançant l'assaig Barcelona*.
- Marí Bernat, Antonio R. (2004). *Comprobación de la seguridad de las dovelas durante el hizado con grúa utilizando eslingas colocadas cerca de los extremos* (informe NT-TEC:09.04, L9 Barcelona).
- Marí Bernat, Antonio R. (2004). *Límites de pérdida de plomada en el apilado de las dovelas para evitar la rotura de las mismas* (informe NT 06:04, L9 Barcelona).
- Melchers, R. E. (1987) *Structural Reliability. Analysis and prediction*. Editorial *Ellis Horwood*.
- Ministerio de Fomento. Instrucción del hormigón estructural, EHE 08. (2008)
- Mora Apablaza, Felipe. (2008). *Distribución y orientación de fibras en dovelas, aplicando el ensayo Barcelona*. Tesi Doctoral UPC.