

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Anàlisi comparativa de la formulació proposada per al nou Eurocodi 2 per al càlcul de fletxes en estructures de formigó armat, la normativa vigent i altres metodologies simplificades.

Document: Memòria i annexos

Alumne: Àlex Sarrado i Molina

Tutor: Dr. Lluís Torres i Llinàs

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial.

Àrea: Enginyeria de la construcció.

Convocatòria (mes/any) Setembre 2019

A en Pau i en Joel

Agraïments

Mostrar tot l'agraïment al tutor del treball, el Dr. Lluís Torres i Llinàs, per la bona disposició des del primer moment de la proposta de diferents temes, anàlisi d'opcions, tria del tema i suport durant tot el projecte. Agrair també la seva tasca com a professor per la passió, manera d'ensenyar i capacitat de transmetre coneixement.

Als meus pares, M. Carmen i Antoni, per tota la seva transmissió de valors i educació que a dia d'avui em fan ser qui sóc i com sóc. Sense la seva estima, ajuda, perseverança i tot el seu recolzament en qualsevol decisió que he pres, no hagués estat possible el meu desenvolupament personal, la meva formació i el meu desenvolupament laboral.

Al meu germà, Carlos, pel recolzament en tot moment en tot el que he fet, la seva ajuda, el seu saber estar i, sobretot, per la seva estima, comprensió i bons moments que hem passat plegats i que de ben segur que passarem durant tota la vida, al costat de la meva cunyada, la meva neboda, que, al costat de la resta de descendència que tinguin, creixeran i viuran en la millor família que han pogut tenir.

Per acabar, a tots els meus amics. Per fer-me feliç el meu dia a dia, compartint els millors moments i traient-me un somriure en els pitjors.

Taula de contingut

1. Introducció	7
1.1. Antecedents	7
1.2. Objecte	8
1.3. Especificacions i abast	9
2. Característiques i propietats dels materials	9
2.1. Formigó	9
2.2. Acer	14
3. Fletxes en bigues de formigó armat	17
3.1. Tipus de fletxes.....	17
3.2. Càlcul de fletxes	17
4. Normes.....	22
4.1. EHE-08	23
4.2. Eurocodi-2	28
4.3. Nova proposta Eurocodi-2	34
4.4. Proposta AMADE.....	40
5. Casos proposats objectes de l'anàlisi.....	44
6. Anàlisi comparatiu dels resultats.....	47
6.1. Introducció a l'anàlisi. Dades i càrregues aplicades.....	47
6.2. Taules de resultats.	48
6.3. Comparativa entre la taula 1 i la taula 2	50
6.4. Anàlisi taula de resultats 1	53
7. Conclusions	55
8. Relació de documents.....	57
9. Bibliografia	58
ANNEX A – Definicions bàsiques	60
ANNEX B – Definició de paràmetres	65
ANNEX C – Document de càlcul	68

ANNEX AL PRESSUPOST.....	79
D.1. Quadre de preus.....	80
D.2. Pressupost parcial	81
D.3. Revisió de resultats i redactat.....	81
D.4. Pressupost global	82

1. Introducció

1.1. Antecedents

El formigó armat, utilitzat a la construcció des del final del segle XIX i principis del XX, és actualment el material més utilitzat en la construcció.

La seguretat, que ve associada a la resistència i l'estabilitat estructural, ha estat durant molts anys l'únic requisit de disseny estructural. Actualment, la funcionalitat, la durabilitat i l'aspecte estètics són elements condicionants a l'hora de construir estructures. Aquest fet fa que s'optimitzin els materials, augmentin les llums, s'utilitzin elements més esvelts, entre altres, i obliga a l'actualització de normes i càlculs.

A l'hora de dissenyar estructures de formigó armat és molt important controlar les deformacions, instantànies o diferides, que poden condicionar l'estat de qualsevol estructura, a més de controlar les patologies que poden patir les estructures; degut a la retracció, fissures d'origen tèrmic, per corrosió d'armadures, per accions de càrregues...

Actualment l'Eurocodi 2, norma europea que regula el càlcul i dimensionament d'estructures de formigó, està en fase de revisió. Els esborranys, que estan en fase molt avançada, proposen la introducció d'una metodologia simplificada per al càlcul de fletxes dels elements a flexió, amb l'objectiu de facilitar a comprovació pràctica del compliment dels límits de deformació. Usualment la simplificació del càlcul sol comportar una certa pèrdua de precisió.

L'actuació de càrregues, ja sigui de llarga o curta durada, i les demás accions, tal com assentaments, retracció, fluència, variacions tèrmiques i variacions d'humitat, provoquen deformacions en elements estructurals. A efectes d'aquesta els punts de cada estructura poden patir moviments, que en cas d'una estructura plana poden ser tres:

- Desplaçament longitudinal, anomenat allargament, si augmenta, o escurçament, si disminueix.
- Desplaçament transversal, anomenat fletxa.
- Gir.

D'aquests tres tipus de deformació, la més important és la fletxa, per aquest motiu, l'estat límit de deformacions es limita al càlcul de fletxes.

Una fletxa excessiva pot provocar efectes indesitjables a nivell estructural, estètic i de seguretat:

- Una fletxa excessiva, tot i no ser perillosa a nivell de seguretat, pot provocar incomoditat visual a l'usuari i sensació de falta de seguretat.
- Una fletxa excessiva pot provocar danys en estructures annexes o a elements no estructurals recolzats sobre l'estructura flectada. Aquest tipus de danys són molt usuals en envans, apareixent en forma d'esquerda.
- En estructures on hi ha d'haver desplaçaments de vehicles a altes velocitats, com poden ser automòbils o trens, entre d'altres, una fletxa excessiva pot generar vibracions que generen incomoditat als usuaris.

Així doncs, el càlcul de la fletxa és determinant a una estructura.

1.2. Objecte

Degut a la composició del formigó (quantitat de ciment, àrids i aigua), la manera de preparar-lo, els additius, el temps i les condicions d'enduriment... Fan variar les propietats mecàniques del formigó i, per tant, és impossible realitzar càlculs exactes càrregues límit. Les normes recullen diferents maneres de realitzar el càlcul de fletxes, pel cas que ens ocupa.

No només hi ha un mètode per a calcular la fletxa d'una biga, existeixen diverses opcions vàlides. En aquest informe es realitzarà l'anàlisi comparatiu entre diferents mètodes de càlcul de fletxa en bigues de formigó armat; l'EHE-08 (normativa espanyola), l'EUROCODI-2 (normativa europea), proposta d'actualització de l'EUROCODI-2, que està en fase de revisió i en fase molt avançada oferint una proposta de simplificació de càlcul i la proposta de càlcul de fletxes realitzada pel grup de recerca AMADE de l'Escola politècnica Superior de la Universitat de Girona (Miàs, C. "Analysis of time-dependent flexural behaviour of concret members reinforced with fibre reinforced polymer bars").

L'objectiu del projecte és veure i conèixer la variabilitat de la norma i cap a quina tendència de càlcul es tendeix, sabent en quins casos es serà més o menys conservador i veure similituds i diferències entre les diferents propostes.

1.3. Especificacions i abast

Per a la realització de l'anàlisi comparatiu s'obtenen un total de 36 casos variant les característiques dimensionals de la biga, les característiques fisicoquímiques del formigó, la quantitat de càrrega i la relació entre la càrrega permanent i la sobrecàrrega i la relació d'armat de la secció, considerant un armat constant tant a tracció com a compressió.

S'ha programat un full de càlcul amb la resolució de cada cas mitjançant les quatre normes objectes de l'anàlisi comparatiu i s'han extret resultats per a cada cas.

2. Característiques i propietats dels materials

2.1. Formigó

El formigó és un material compost no homogeni format per ciment, aigua, àrids, additius i addicions.

2.1.1. Ciment

S'anomenen conglomerants hidràulics a aquells productes que homogeneïtzats amb aigua, endureixen tant exposats a l'aire com submergits en aigua. El conglomerant hidràulic més important, és el ciment.

A l'estat espanyol els ciments estan regulats per la "Instrucció per la recepció de ciments, RC-08"

El ciment és un compost de diferents components que dosificats en diferents proporcions i molts conjuntament donen lloc a diferents tipus de ciments.

Clínquer pòrtland: Productes obtinguts al calcinar fins a fusió parcial abans de triturar calcàries i argila.

Clínquer aluminosos: Productes obtinguts per fusió de barreges calcàries i bauxites.

Escòries siderúrgiques: Granulats d'alt forn obtinguts per trempats o refredaments sobtats amb aigua o aire.

Putzolanes naturals: Roques volcàniques molt poroses de naturalesa traquítica alcalina. No aporten cap propietat mecànica, però contenen sílice i alumina capaces de fixar calç a temperatura ambient en presència d'aigua.

Cendres volants: Residus sòlids que es recapten per atracció electrostàtica o captació mecànica dels gasos de combustió de centrals termoelèctriques alimentades amb carbó.

Fum de sílice: Subproducte obtingut del silici. Es redueix en forn elèctric de quars pur i carbó i es recull, mitjançant filtres electrostàtics, partícules de diàmetre petit de sílice molt reactives.

Exquisit calcinat: Es produeix en un forn especial a temperatures de 800°C i conté silicats i aluminats que molts presenten propietats hidràuliques.

Carbonats càlcics: Són compostos en forma de calcita que molts conjuntament amb el ciment pòrtland afavoreixen les propietats i comportament dels morters i formigons, tant frescos com endurits.

Reguladors d'enduriment: Materials neutres o productes artificials que molts conjuntament amb el ciment pòrtland, proporcionen ciments amb l'enduriment adequat.

Addicions: Son productes que poden utilitzar-se a la fabricació del ciment, per a facilitar el procés de moldre o bé per aportar al ciment alguna propietat específica. La dosificació al ciment no ha de ser superior a l'1% en massa i no s'ha de confondre, en cap cas, amb els additius al formigó.

Segons els components del ciment, segons la norma UNE-EN 197-1:2000, obtenim els tipus de ciments mostrats a la Figura 1.

Tipus de ciment	Denominació	Designació
I	Ciment pòrtland	CEM I
II	Ciment pòrtland amb addicions	CEM II
III	Ciment pòrtland amb escòria d'alts forns	CEM III
IV	Ciment putzolànic	CEM IV
V	Ciment compost	CEM V

Figura 1. Tipus de ciment segons la composició.

2.1.2. Aigua

L'aigua d'amassat és aquella aigua utilitzada per la barreja inicial del ciment. Té una doble funció; per una banda, participa a les reaccions de la hidratació del ciment. Per l'altra banda, dona al formigó la consistència per a un correcte posat en obra.

La quantitat d'aigua utilitzada s'ha d'ajustar al mínim estrictament necessari, altrament, s'evapora i genera capil·lars, petits espais a l'interior del formigó que redueix la resistència. Tot i això, cal afegir suficient aigua per poder treballar adequadament la mescla i poder col·locar-la adequadament a l'obra.

Generalment, per cada litre d'aigua d'amassat de més per cada metre cúbic de formigó equival a treure dos quilograms de ciment del metre cúbic de mescla.

L'aigua de curat és aquella que s'afegeix al formigó en el procés d'enduriment, amb l'objectiu d'evitar la dessecació, millorar la hidratació del ciment i impedir una retracció prematura.

Ambdues aigües han de tenir certes condicions per ser eficaces. Generalment, s'ha de ser més curós amb l'aigua de curat que a la d'amassat, ja que la de curat no actua sobre una massa plàstica i poden desencadenar reaccions sobre la massa sòlida. A més, l'aigua d'amassat únicament té una aplicació puntual, l'aigua de curat és més amplia i d'actuació més duradora.

Generalment, un índex útil sobre l'aptitud de l'aigua és la potabilitat, excloent-hi aigües d'alta muntanya, que la gran puresa fa que adquireixin un caràcter agressiu. Malgrat això, aigües insalubres també poden ser utilitzades. En són exemple, aigües de mines (que no siguin de carbó), aigües de residus industrials, aigües pantanoses... Les aigües depurades amb clor també poden ser utilitzades sense inconvenients.

És inadequat l'ús d'aigües excessivament àcides, amb $\text{pH} < 5$, aigües amb greixos, olis o hidrats de carboni. Si l'aigua conté matèries sòlides en suspensió no es pot utilitzar ja que perjudica notablement l'adherència entre la pasta i l'àrid.

2.1.3. Àrids

Com a àrids per a la fabricació de formigó, poden utilitzar-se sorres i graves naturals que reunixin en igual o superior grau les característiques de resistència i durabilitat exigides al formigó.

S'anomena grava gruixuda a les fraccions superiors a 5mm, i sorra o grava fina a les fraccions inferiors a 5mm.

Els àrids es subministren en fraccions i es designen segons la instrucció espanyola i d'acord amb la norma UNE 146901:2002, mitjançant els paràmetres d/D – F – N:

d/D: Fracció granulomètrica, entre la mida mínima d i màxima D

F: forma de presentació (rodat R, triturat T o mescla M)

N: naturalesa de l'àrid.

En fase de projecte, per especificar l'àrid únicament cal donar la seva mida màxima en mm i, en el cas que així sigui, especificar que l'àrid és reciclat i el seu percentatge d'utilització.

2.1.4. Additius

S'anomena additiu a aquell component incorporat al formigó fresc per a millorar alguna de les seves característiques.

La seva dosificació ha de ser, generalment, inferior al 5% en pes del ciment. Un ús desmesurat d'additius pot provocar efectes inversos als esperats.

Els additius han d'estar etiquetats pels seus fabricants seguint la norma UNE 83275:1989EX.

Els additius ajuden a millorar alguna de les propietats del formigó adequadament preparat, però no es poden utilitzar per rectificar una inadequada dosificació dels components del formigó.

Alguns dels additius més importants són:

Accelerants: Avancen l'enduriment del formigó.

Retardants: Retarden l'enduriment del formigó.

Plastificants: Completa la granulometria del ciment i faciliten el moviment dels grans al morter, fent les mescles més fàcils de treballar. Exigeixen augmentar l'aigua d'amassat, cosa que provoca que no puguin millorar la resistència i durabilitat del formigó. Milloren també la permeabilitat del formigó i al ser materials químics inerts no alteren les altres propietats del formigó.

Fluïdificant: Provoquen un efecte lubricant al formigó, aconseguint reduir la quantitat d'aigua d'amassat necessària. Milloren propietats tant en fresc com en sec; augmenta la plasticitat de les masses, redueixen la relació aigua ciment, millora la docilitat, milloren l'adherència del formigó a les armadures, milloren la resistència a compressió (de un 10 a un 20% passats 28 dies) degut a la disminució d'aigua necessària i augmenten la durabilitat i la resistència a l'abradió.

Airejants: El seu ús afavoreix a l'oclusió de bombolles d'aigua de la massa de formigó, des de 20 a 200 micres de diàmetre. Aquest fet ens dona lloc a formigó més fàcil de treballar, més homogenis, milloren l'aspecte després del desencoframent, més impermeable i menys absorbents per capil·laritat i, per tant, més resistència a aigües agressives. Dona també una gran resistència a temperatures de congelació a l'actuar les bombolles com a càmeres d'expansió quan l'aigua interna congela.

Impermeabilitzants: L'aigua pot penetrar al formigó per pressió o per capil·laritat. Quan el formigó ha estat degudament dosificat, resulta impermeable per si mateix. Quan més compacte,

per tant, menys capil·lar, és el formigó, més impermeable és. Els impermeabilitzants, redueixen la capil·laritat augmentant-ne la impermeabilitat i afavorint a la durabilitat del formigó.

2.1.5. Addicions

Les addicions són elements aplicats sobre el ciment per a facilitar el procés de moldre o bé per aportar al ciment alguna propietat específica. La dosificació al ciment no ha de ser superior a l'1% en massa.

2.2. Acer

Els reforços d'acer en bigues de formigó, per aconseguir formigó armat, és necessari ja que si bé el formigó té un bon comportament a compressió, els esforços a tracció són molt menors; aproximadament i per norma general, un 10% de la resistència a tracció.

L'acer presenta unes bones característiques per formar part de l'armat del formigó; presenta una bona adherència i té un coeficient de dilatació similar, cosa que afavoreix el repartiment de les tensions entre ambdós materials. A més, la resistència a tracció del formigó és molt elevada, de manera que quan el formigó armat treballa a tracció simple, que és força inusual, o a flexió, on hi ha una part que treballa a compressió i l'altra part a tracció, la major part de l'esforç el suporta l'acer que forma part de l'armadura.

A la Figura 2 es veu representat en forma de diagrama la tensió en relació a la deformació de l'acer. Inicialment, fins al punt A, la deformació de l'acer es elàstica i creix linealment la relació tensió-deformació. Des del punt B fins al C, la zona de fluència, l'acer pateix una deformació que creix per la mateixa tensió aplicada. Aquesta deformació, és plàstica; no es recupera quan es deixa d'aplicar tensió. Del punt C al punt D, es produeix un enduriment provocat per la deformació, augmentant la tensió necessària per la deformació de les barres. El punt D s'anomena punt de tensió màxima, on comença l'estricció de les barres, és a dir, una reducció de la secció que baixa la tensió que suporta fins arribar al punt E, on finalment fractura.

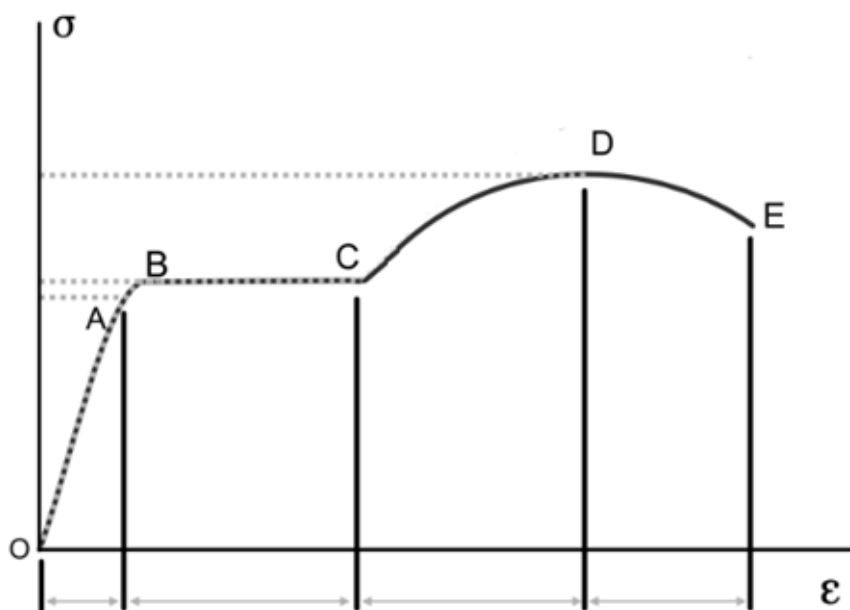


Figura 2. Diagrama tensió-deformació acer.

Treballant a tracció, el diagrama tensió-deformació s'assimila de manera gairebé total a la de l'acer, ja que la baixa resistència a tracció del formigó provoca que fracturi i que deixi de treballar en tensions molt baixes.

2.3.1. Barres d'acer corrugat

Les barres d'acer corrugat són barres de secció rodona amb estries o corrugues obtingudes a partir d'un procés de laminació, dissenyades especialment per a construir elements estructurals de formigó armat. L'acer, ha de ser soldable entre si i ha de tenir bones propietats; bona ductilitat i una bona adherència a les armadures, per això es generen les estries.

Geomètricament, s'han d'adaptar a una sèrie de diàmetres nominals, que, de manera estàndard i expressades en mm són: 6, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 25, 32, 40. Els diàmetres normalitzats es distingeixen entre si fàcilment. Usualment, en obra, s'utilitzen barres de 14mm de diàmetre, per la seva facilitat de manipulació i bon rendiment de tensió suportada en relació al pes de la barra. A taller, en canvi, la facilitat de manipulació de les barres fa que s'utilitzin barres de 20mm de manera més usual.

Mecànicament, les característiques més importants a l'hora d'escollir el tipus d'acer de les barres són: la resistència, el límit elàstic, la relació entre el dos valors mencionats, l'allargament i la facilitat de plegat i desplegat. La resistència i el límit elàstic, qualifiquen l'acer des del punt de vista resistent, les restants, defineix l'acer per les seves qualitats plàstiques.

2.3.2. Armadura

La unió, ja sigui soldada o mitjançant fil d'acer, de barres corrugades de manera coherent, dona lloc a l'armadura. En el cas que ens ocupa, a les bigues de formigó armat, diferenciem entre les armadures de compressió i les armadures de tracció.

Les armadures de compressió són aquelles que suporten esforços de compressió. Usualment aquestes armadures estan situades a la part superior de la biga (en estructures convencionals). Tot i que l'armadura de compressió també aguanta esforç, és el formigó que suporta la majoria d'esforços a compressió. Tot i això, a l'hora de construir una armadura completa, de manera geomètrica és necessària l'existència de l'armat a compressió, ja que va unit a l'armat a tracció i dóna uniformitat i consistència a la totalitat de l'armadura.

Les armadures a tracció són aquelles que suporten esforços a tracció. Usualment aquestes armadures estan situades a la part inferior de la biga (en estructures convencionals). En els esforços a tracció en una biga de formigó armat, l'armadura a tracció és la part més important. Quan el formigó deixa de treballar, a tensions molt baixes, l'estructura geomètrica de la biga i tot els esforços són suportats per l'armadura a tracció. El dimensionament d'aquest armat és fonamental pel correcte funcionament de la biga i, en definitiva, de l'estructura.

A l'hora de dimensionar armadures, cal tenir en compte la distància entre les barres, que ve limitada per paràmetres geomètrics; no pot de inferior al diàmetre de la barra més gruixuda o a 1,25 vegades la mida màxima de l'àrid. Aquest fet, facilita la fluïdesa i l'adequat repartiment de la mescla de formigó al llarg de l'armat.

L'ancoratge de les armadures han de garantir la transmissió de tensions entre l'acer i el formigó. Un ancoratge adequat és fonamental pel bon comportament sobre el trencament en elements armats, ja que d'ell depèn que les barres puguin treballar a la tensió necessària.

3. Fletxes en bigues de formigó armat

Es defineix fletxa, geomètricament, com a distància màxima dels punts d'una corba a la recta que uneix els seus extrems. En el cas que ens ocupa, en bigues de formigó armat, la definim com la distància vertical que es desplaça la línia neutre de la biga des de que es situa en posició de treball la biga i passa un cert temps, sota l'estat de càrregues que pot ser variable en el temps.

3.1. Tipus de fletxes

Segons la durada de la càrrega i el que es vol avaluar, cal diferenciar diferents tipus de fletxes.

- Fletxa instantània: És la ocasionada per l'actuació d'una càrrega a l'instant de la seva aplicació. És a dir, en un curt termini de temps sense considerar els efectes diferits.
- Fletxa diferida: Degut a la reologia del formigó, és a dir, la deformació i el flux del formigó vinculats a la relació entre l'esforç, la deformació i el temps, la fletxa instantània produïda per una càrrega permanent augmentarà amb el pas del temps una certa magnitud. Aquest augment es denomina com a fletxa diferida de la càrrega permanent. La magnitud d'aquesta tipologia de fletxes depèn de la magnitud d'aplicació de la càrrega permanent, de l'instant d'aplicació de la càrrega i del temps que actua sobre l'estructura.
- Fletxa total: És la fletxa formada per la fletxa instantània més la fletxa diferida ocasionada per les càrregues aplicades des del moment de la seva aplicació.
- Fletxa activa: Es defineix respecte a un element que pot patir danys (com poden ser envans, finestrals). Es la fletxa produïda a partir que es construeix l'element que es sosté sobre la peça estructural. És a dir, es la part de fletxa de l'element estructural que efecte a l'element que pot ser danyat. El seu valor es calcula restant la fletxa existent en el moment de la construcció de l'element de la fletxa total.

3.2. Càlcul de fletxes

Abans d'analitzar les normatives que regulen el càlcul de les fletxes en bigues de formigó armat, s'analitzarà de forma general les consideracions que es tenen en compte i expressions generals utilitzades pel càlcul.

A l'hora de calcular els esforços en bigues de formigó armat s'han de complir tres condicions a nivell de secció: compatibilitat de deformacions, equacions constitutives i l'equilibri de forces i moments.

La primera condició, compatibilitat de deformacions o hipòtesi de Bernoulli, estableix que les seccions planes es mantenen planes després de la deformació.

Així doncs, en una biga amb armat a tracció i compressió hem de complir les condicions de l'equació (1):

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_{s1}}{d - x} = \frac{\varepsilon_{s2}}{x - d'} \quad (1)$$

Essent:

ε_c deformació del formigó

x posició de la línia neutre respecte l'aresta superior

ε_{s1} deformació de l'armadura a tracció

d distància entre l'aresta superior de la secció i el centre de les barres a tracció

ε_{s2} deformació de l'armadura a compressió

d' distància entre l'aresta superior de la secció i el centre de les barres a compressió

La segona condició fa referència al compliment de les equacions constitutives que són aquelles equacions que defineixen el comportament macroscòpic resultant de la constitució interna d'un material. Caracteritzen la resposta d'un determinat material respecte les càrregues exteriors, és a dir, la relació entre tensió i deformació.

Per últim, s'ha de complir amb l'equilibri de forces i de moments; el sumatori de forces i el sumatori de moments han de ser igual a zero. Aquesta condició defineix l'element com a estructural, si no fos així hi hauria moviment i no analitzaríem una estructura.

Fora de les normatives que marquen mètodes de càlcul de fletxes en bigues de formigó armat, hi ha altres mètodes que s'han utilitzat al llarg dels anys. El mètode de Branson ha estat utilitzat i adaptacions de les hipòtesis que va realitzar Branson a l'any 1973 s'utilitzen a algunes de les normes per realitzar càlculs simplificats de fletxes. La obtenció d'aproximacions de fletxes situa en un ordre de magnitud al calculista, tenint referència si està a prop del límit de la fletxa admesa d'una estructura o no.

El mètode de Branson es basa en el càlcul d'un moment equivalent repartit uniformement al llarg de tota la biga. A partir d'aquest moment repartit, utilitza les equacions de càlcul de fletxes en elements elàstics. Per fer-ho, determina una inèrcia equivalent que pretén obtenir un estat intermedi entre la secció sense fissurar i la secció totalment fissurada en funció d'un moment M_a aplicat a la biga, tant i com es reflecteix a l'equació (2):

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] \cdot I_{cr} \leq I_g \quad (2)$$

Essent:

I_e inèrcia equivalent de Branson

M_{cr} moment de fissuració

M_a moment aplicat a la biga

I_{cr} inèrcia de la secció fissurada

I_g inèrcia de la secció sense fissurar

Els paràmetres s'obtenen mitjançant formulació específica que es desenvolupa per cada norma.

La norma espanyola EHE-08 utilitza aquesta inèrcia equivalent pel càlcul de la fletxa. Tal i com s'ha citat anteriorment en aquest mateix apartat, la resolució mitjançant aquest mètode dona bons resultats en situacions simples però generant confusió en situacions extremes o estat de càrregues complexes. L'expressió d'aquesta inèrcia equivalent s'obté de manera empírica, amb elements a flexió amb reforços i una quantia superior al 1%.

En usar l'expressió (2) i seguint el mètode de Branson, la fletxa es calcula amb les expressions resultants de la resistència de materials. En el cas que planteja i ocupa l'anàlisi comparatiu d'aquest informe, en una biga recolzada en ambdós extrems s'obté l'equació (3) pel càlcul de la fletxa total final:

$$\delta = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E_{c,ef} \cdot I_e} \quad (3)$$

Essent:

q càrrega aplicada

L longitud de la biga

$E_{c,ef}$ mòdul elàstic del formigó

I_e inèrcia equivalent de Branson

A part del mètode de Branson, que utilitza la inèrcia equivalent per interpol·lar els moments d'inèrcia de la secció fissurada i la no fissurada, hi ha altres metodologies també utilitzades.

L'Eurocodi 2 actual es basa en el mètode de les curvatures pel càlcul de la fletxa, que enlloc d'interpol·lar els moments d'inèrcia, interpola curvatures.

El mètode de les curvatures, expressades com a $1/r$ respecte la deformació deguda a la retroacció del formigó ε_{cs} s'aplica mitjançant la formulació:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{\varepsilon_{cs}} = \frac{E_s \cdot \varepsilon_{cs} \cdot S_s}{E_{c,eff} \cdot I} \quad (4)$$

On el valor de S_s es calcula segons la formulació (5) i (6) en cada cas, fent referència a la part de la secció que suporta l'esforç:

$$S_{s,I \text{ tensió}} = A_s \cdot (h - d' - y_{cdg}) \quad (5)$$

$$S_{s,I \text{ compressió}} = A'_s \cdot (y_{cdg} - d') \quad (6)$$

D'aquesta manera, s'obtenen valors de curvatura que aplicats respecte la longitud de la biga dóna la fletxa màxima.

L'Eurocodi 2 aplica una ponderació en el càlcul de les fletxes segons l'origen, desenvolupat a l'apartat 4.2.

4. Normes

L'apartat de normatives pretén definir les tant les característiques bàsiques, els orígens, l'àmbit d'aplicació com la formulació utilitzada per la norma pel càlcul de les fletxes.

A l'hora de definir la diferent formulació, es farà amb les característiques geomètriques, càrregues i paràmetres definits a continuació:

Longitud de la biga L

Base de la secció b

Alçada de la secció h

Distància de la part superior a l'armat a tracció d

Distància de la part superior a l'armat de compressió d'

Àrea de l'armat inferior A_i

Àrea de l'armat superior A_s

Coefficient de càrrega quasi permanent Ψ

Càrrega permanent q_p

Sobrecàrrega q_{sc}

Coefficient de fluència φ

Deformació deguda a la retracció ε_{cs}

4.1. EHE-08

La *Instrucción Española del Hormigón Estructural* de l'any 2008, o EHE-08, es el nom que rep la normativa espanyola que regula el càlcul dimensional de les estructures de formigó.

El càlcul d'estructures de formigó a l'estat espanyol està regulat, de manera simultània, per l'EHE-08 i l'Eurocodi-2, normativa Europea, essent d'obligat compliment un dels dos mètodes pel dimensionat d'estructures de formigó.

La importància de l'entrada en vigor de la normativa EHE-08 ve donat per la unificació de criteris de càlcul d'estructures de formigó, ja sigui formigó simple, formigó armat, formigó pretensat o qualsevol altre tipus de formigó estructural. A més, regula la resistència mínima obligatòria d'ús de formigó, fixant-la en 25MPa, unificant càlculs i incrementant la seguretat i vida de les estructures de formigó.

La normativa utilitza el mètode anomenat dels estats límits. Aquest mètode estableix uns esforços últims o límits M_u que en cap cas han de ser superats pels valors de disseny M_d . Així doncs, el disseny geomètric de l'estructura i la resistència i característiques del formigó utilitzat ha de complir l'equació (7), com s'ha anomenat:

$$M_d \leq M_u \quad (7)$$

A més, en funció dels valors de les càrregues i dels materials utilitzats, l'EHE-08 fixa uns valors basats en factors probabilístics per garantir el compliment de l'equació (7).

La normativa regula el dimensionament de les estructures i planteja equacions simplificades per elements de secció constant (capítol XI de la instrucció). Aquestes equacions simplificades es basen en el mètode de inèrcies equivalents o mètode de Branson, desenvolupat a l'apartat 3.2 seguint l'equació (2).

Pel que fa al càlcul de la fletxa diferida, produïda a llarg termini per càrregues de llarga duració, el mètode simplificat de la norma estableix un coeficient λ , que, multiplicat per la fletxa instantània ens aproxima, de manera precisa, el valor de la fletxa diferida. El càlcul de λ es realitza seguint l'equació (8):

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50 \cdot \rho'} \quad (8)$$

Essent:

ξ Coeficient en funció del temps d'aplicació de la càrrega, assignant els valors per càrregues aplicades a temps complet:

2 setmanes	0.5
3 mesos	1
6 mesos	1.2
1 any	1.4
5 anys o més	2

En el cas d'aplicar càrregues de manera temporal, augmentar o disminuir càrregues, es calcula amb l'aplicació de la fórmula (9), amb càrregues de 1 a n:

$$\xi = \frac{\xi_1 P_1 + \xi_2 P_2 + \dots + \xi_n P_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n} \quad (9)$$

ρ' Quantia geomètrica de l'armadura de compressió A'_s respecte l'àrea de la secció:

$$\rho' = \frac{A'_s}{b_0 \cdot d} \quad (10)$$

4.1.1. Formulació per a càlcul de fletxa en biga de secció constant i armat constant segons dades apartat 0 aplicant la normativa EHE-08.

Es considera la càrrega màxima la suma de la càrrega permanent i de la sobrecàrrega:

$$q_{max} = q_p + q_{sc} \quad (11)$$

A partir de l'equació (11) i la longitud L de la biga es calcula el moment màxim:

$$M_{max} = M_a = \frac{q_{max} \cdot L^2}{8} \quad (12)$$

Una vegada obtingut el moment màxim cal calcular altres paràmetres. Primer, es calcula la resistència a tracció del formigó f_{ctm} a través de la resistència característica f_{ck} , per poder calcular la resistència a flexió $f_{ctm,fl}$, que és la situació de càlcul que contempla la norma:

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (13)$$

$$f_{ctm,fl} = \max \left[\left(1,6 - \frac{h}{1000} \right) \cdot f_{ctm}; f_{ctm} \right] \quad (14)$$

Amb el valor de la resistència a tracció obtingut de l'equació (14) podem calcular el moment de fissuració M_{cr} (també anomenat M_f en castellà):

$$M_{cr} = f_{ctm,fl} \cdot \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (15)$$

Obtinguts M_a amb l'equació (12) i el moment de fissuració M_{cr} amb l'equació (15) cal comparar-les. En el cas que el moment màxim sigui superior al moment de fissuració, la secció fissura i, per tant, s'ha de calcular la inèrcia equivalent o de Branson, equació (2).

Prèviament, és necessari altres càlculs per poder substituir a l'equació (2). Es calcula la inèrcia de la secció de formigó I_b :

$$I_b = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (16)$$

Es segueix amb els càlculs previs per poder trobar les armadures equivalents i la posició de la línia neutre. Es calcula el mòdul elàstic del formigó segons l'equació (17), per poder obtenir el coeficient n d'homogeneïtzació amb la relació de mòduls elàstics segons l'equació (19):

$$E_c = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (17)$$

On:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (18)$$

I es troba el coeficient d'homogeneïtzació amb la divisió del mòdul elàstic de l'acer E_s el del formigó E_c :

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (19)$$

A partir de l'àrea de l'armadura inferior A_s i l'armadura superior A_s' , es calculen les armadures equivalents $A_{s,eq}$ i $A_{s,eq}'$ per poder calcular la posició de la línia neutre:

$$A_{s,eq} = A_s \cdot n \quad (20)$$

$$A_{s,eq}' = A_s' \cdot n \quad (21)$$

El càlcul de la posició de la línia neutre ve donat per la solució de l'equació:

$$\frac{b \cdot x_{fis}^2}{2} + A_{s,eq}' \cdot (x_{fis} - d') - A_{s,eq} \cdot (d - x_{fis}) = 0 \quad (22)$$

Una vegada obtinguda la posició de la línia de fissuració de la secció a partir de l'equació (22) es troba la inèrcia de la secció fissurada I_{fis} :

$$I_{fis} = \frac{b \cdot x_{fis}^3}{3} + A_{s,eq} \cdot (d - x_{fis})^2 + A_{s,eq}' \cdot (x_{fis} - d')^2 \quad (23)$$

Amb tots els valors necessaris, es troba la inèrcia equivalent I_e segons equació (2).

Obtinguda la inèrcia equivalent, es pot procedir al càlcul de la fletxa.

Primerament, es calcula el valor de la fletxa instantània $\delta_{i,qmax}$ degut a q_{max} , obtinguda mitjanant l'equació (11):

$$\delta_{i,qmax} = \frac{5 \cdot q_{max} \cdot L^4}{384 \cdot E_c \cdot I_e} \quad (24)$$

Pel càlcul de la fletxa instantània provocada per les càrregues quasi permanents, s'utilitza la mateixa formulació que pel càlcul de la fletxa màxima aplicant un coeficient reductor a les sobrecàrregues:

$$q_{qp} = q_p + 0.3 \cdot q_{sc} \quad (25)$$

$$\delta_{i,qqp} = \frac{5 \cdot q_{qp} \cdot L^4}{284 \cdot E_c \cdot I_e} \quad (26)$$

Pel càlcul de la fletxa diferida (produïda a mitjà-llarg termini), la norma contempla el càlcul de λ segons equació (8) en producte amb la fletxa degut a les càrregues quasi permanents.

$$\delta_{dif} = \lambda \cdot \delta_{i,qqp} \quad (27)$$

Per últim, el càlcul de la fletxa total ve donat per la suma de la fletxa instantània degut a les càrregues quasi permanents i la fletxa diferida:

$$\delta_{tot} = \delta_{dif} + \delta_{i,qqp} \quad (28)$$

4.2. Eurocodi-2

L'Eurocodi contempla un seguit de normes europees aplicades a l'enginyeria redactades pel Comitè Europeu de Normalització. Té com objectiu la unificació de criteris i normatives en caràcter de disseny, càlcul i dimensionat d'estructures.

L'Eurocodi pot substituir les normatives nacionals en països integrants a la unió europea. Per poder utilitzar l'Eurocodi, però, s'ha de complir el Document Nacional d'Aplicació, redactat per un comitè tècnic a cada país membre (en el cas espanyol, l'encarregat de redactar el Document Nacional d'Aplicació és AENOR). Aquest document, indica les particularitats per poder aplicar l'Eurocodi en cada país.

Hi ha un total de 10 Eurocodis redactats:

- Eurocodi 0: Bases del disseny estructural.
- Eurocodi 1: Accions sobre estructures.
- Eurocodi 2: Disseny d'estructures de formigó.
- Eurocodi 3: Disseny d'estructures d'acer.
- Eurocodi 4: Disseny d'estructures mixtes d'acer i formigó.
- Eurocodi 5: Disseny d'estructures de fusta.
- Eurocodi 6: Disseny d'estructures d'edificació.
- Eurocodi 7: Disseny geotèrmic.
- Eurocodi 8: Disseny sísmic d'estructures.
- Eurocodi 9: Disseny d'estructures d'alumini.

El cas que ocupa l'anàlisi realitzat en aquest informe, es basa en l'Eurocodi 2 – Disseny d'estructures de formigó, que contempla, basant-se en el mètode dels Estats Límits, el càlcul i dimensionament d'estructures de formigó i formigó armat.

4.2.1. Formulació per a càlcul de fletxa en biga de secció constant i armat constant segons dades apartat 0 aplicant la normativa Eurocodi-2.

Pel càlcul de la fletxa en bigues de formigó armat, cal realitzar càlcul previs. Inicialment, es calcula el mòdul elàstic del formigó E_c , que depèn de la resistència característica f_{cm} segons equació (30):

$$E_c = 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad (29)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (30)$$

Els càlculs de la càrrega màxima q_{max} i la càrrega quasi permanent q_{qp} venen donats per la formulació:

$$q_{max} = q_p + q_{sc} \quad (31)$$

$$q_{qp} = q_p + 0.3 \cdot q_{sc} \quad (32)$$

Els càlculs geomètrics per obtenir l'àrea de la secció i la inèrcia bruta, venen donats per la formulació:

$$A_c = b \cdot h \quad (33)$$

$$I_b = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (34)$$

L'Eurocodi proposa el càlcul del mòdul efectiu del formigó, que depèn del coeficient de fluència φ i, per tant, depèn del temps que es calcula. Es calcula el mòdul efectiu $E_{c,eff}$ amb l'equació (35):

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \varphi} \quad (35)$$

Entre la divisió del mòdul elàstic de l'acer E_s i del mòdul elàstic efectiu del formigó $E_{c,eff}$ s'obté el coeficient d'homogeneïtzació n :

$$n = \frac{E_s}{E_{c,eff}} \quad (36)$$

El coeficient d'homogeneïtzació s'utilitza pel càlcul de les armadures inferiors $A_{s,eq}$ i superiors $A_{s,eq}'$ equivalents, segons la formulació:

$$A_{s,eq} = A_s \cdot n \quad (37)$$

$$A_{s,eq}' = A_s' \cdot n \quad (38)$$

Es procedeix amb el càlcul de la distància vertical al centre de gravetat de la secció y_{cdg} :

$$y_{cdg} = \frac{\frac{b \cdot h^2}{2} + A_{s,eq} \cdot d + A_{s,eq}' \cdot d'}{b \cdot h + A_{s,eq}' + A_{s,eq}} \quad (39)$$

I a través del valor obtingut a l'equació (39), s'obté el valor de la inèrcia I_1 de la secció sense fissurar:

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - y_{cdg}\right)^2 + A_{s,eq} \cdot (h - y_{cdg})^2 + A_{s,eq}' \cdot (d' - y_{cdg})^2 \quad (40)$$

Pel càlcul de la posició de la línia neutre de la secció fissurada i la inèrcia de la secció fissurada, s'utilitza la formulació:

$$\frac{b \cdot x_{fis}^2}{2} + A_{s,eq}' \cdot (x_{fis} - d') - A_{s,eq} \cdot (d - x_{fis}) = 0 \quad (41)$$

I, una vegada s'obté x_{fis} es calcula la inèrcia de la secció fissurada amb la formulació:

$$I_2 = I_{fis} = \frac{b \cdot x_{fis}^3}{3} + A_{s,eq} \cdot (d - x_{fis})^2 + A_{s,eq}' \cdot (x_{fis} - d')^2 \quad (42)$$

Una vegada obtingudes les dues inèrcies, es calcula les rigideses, multiplicant el mòdul elàstic efectiu $E_{c,eff}$ per la inèrcia, segons la formulació:

$$EI_I = I_1 \cdot E_{c,eff} \quad (43)$$

$$EI_{II} = I_2 \cdot E_{c,eff} \quad (44)$$

Pel càlcul del moment de fissuració, s'utilitza la resistència característica a flexió del formigó $f_{ctm,fl}$:

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (45)$$

$$f_{ctm,fl} = \max \left[\left(1,6 - \frac{h}{1000} \right) \cdot f_{ctm}; f_{ctm} \right] \quad (46)$$

Que s'aplica a l'equació (47) per trobar el moment de fissuració:

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm,fl} \cdot I_1}{h - y_{cdg}} \quad (47)$$

A través de la relació entre el moment de fissuració i el moment màxim aplicat M_a , es troba el coeficient de distribució ζ :

$$\zeta = 1 - 0,5 \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \quad (48)$$

On $M_a = M_{max}$ calculat seguint l'equació:

$$M_{max} = M_a = \frac{q_{max} \cdot L^2}{8} \quad (49)$$

On q_{max} s'obté de la suma de la càrrega permanent i sobrecàrrega:

$$q_{max} = q_p + q_{sc} \quad (50)$$

Amb tots els elements calculats, es pot procedir al càlcul de la fletxa de la secció sense fissurar que, tal i com marca la norma es calcula segons les equacions:

$$f_I = \frac{5 \cdot q_{qp} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_I} \quad (51)$$

$$f_{II} = \frac{5 \cdot q_{qp} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{II}} \quad (52)$$

I utilitzant el coeficient de distribució calculat a l'equació (47), s'obté la fletxa de la secció sense fissurar:

$$\delta = \zeta \cdot f_{II} + (1 - \zeta) \cdot f_I \quad (53)$$

Utilitzant el càlcul de les curvatures, es calcula la fletxa degut a la retracció. Per això cal aplicar l'equació:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{\varepsilon_{cs}} = \frac{E_s \cdot \varepsilon_{cs} \cdot S_s}{E_{c,eff} \cdot I} \quad (54)$$

On S_s i I agafaran els valors $S_{s,I}$, $S_{s,II}$ i I_I , I_{II} segons si es calcula la fletxa per la secció fissurada o sense fissurar, segons les equacions:

$$S_{s,I \text{ tensió}} = A_s \cdot (h - d' - y_{cdg}) \quad (55)$$

$$S_{s,I \text{ compressió}} = A'_s \cdot (y_{cdg} - d') \quad (56)$$

Cada secció dóna una fletxa característica que la norma calcula aplicant una ponderació segons l'origen. El càlcul de la fletxa degut a la retracció es calcula aplicant la formulació:

$$f_{I,\varepsilon_{cs}} = \left(\frac{1}{r}\right)_{\varepsilon_{cs},I} \cdot \frac{L^2}{8} \quad (57)$$

$$f_{II,\varepsilon_{cs}} = \left(\frac{1}{r}\right)_{\varepsilon_{cs},II} \cdot \frac{L^2}{8} \quad (58)$$

I una vegada obtinguts els dos valors de fletxa, s'aplica la ponderació pel càlcul final degut a la retracció:

$$f_{\varepsilon_{cs}} = \zeta \cdot f_{II,\varepsilon_{cs}} + (1 - \zeta) \cdot f_{I,\varepsilon_{cs}} \quad (59)$$

Per últim, la fletxa total s'obté de la suma de la fletxa de la secció sense fissurar, segons equació (53), i de la retracció, segons equació (59):

$$\delta_{tot} = f_{\varepsilon_{cs}} + \delta \quad (60)$$

4.3. Nova proposta Eurocodi-2

L'Eurocodi 2 es troba en revisió des de fa uns anys i, a dia d'avui, s'han presentat noves propostes per la metodologia de càlcul de fletxes en bigues de formigó armat. En aquest apartat, es dóna la formulació i mètode de càlcul que es planteja utilitzar en l'actualització de la norma.

L'estat es troba en una etapa avançada i s'ha d'acabar de comprovar la fiabilitat de càlcul amb aquest mètode, comparant-lo amb els resultats obtinguts amb la resta de mètodes per conèixer si es més restrictiu o més permissiu.

4.3.1. Formulació per a càlcul de fletxa en biga de secció constant i armat constant segons dades apartat 0 aplicant la nova proposta d'Eurocodi-2.

La metodologia de càlcul es basa molt en l'Eurocodi-2 actual. Pel càlcul, cal calcular paràmetres previs. Primerament, el mòdul elàstic del formigó segons la fórmula:

$$E_c = 1,05 \cdot 10000 \cdot f_{cm}^{1/3} \quad (61)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (62)$$

La distribució de càrregues, ve donada per la formulació:

$$q_{max} = q_p + q_{sc} \quad (63)$$

$$q_{qp} = q_p + 0,3 \cdot q_{sc} \quad (64)$$

Els càlculs geomètrics per obtenir l'àrea de la secció i la inèrcia bruta, venen donats per la formulació:

$$A_c = b \cdot h \quad (65)$$

$$I_b = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (66)$$

Igual que l'Eurocodi vigent, proposa el càlcul del mòdul efectiu del formigó, que depèn del coeficient de fluència φ i, per tant, depèn del temps que es calcula. Es calcula el mòdul efectiu $E_{c,eff}$ amb l'equació (67):

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \varphi} \quad (67)$$

Entre la divisió del mòdul elàstic de l'acer E_s i del mòdul elàstic efectiu del formigó $E_{c,eff}$ s'obté el coeficient d'homogeneïtzació n :

$$n = \frac{E_s}{E_{c,eff}} \quad (68)$$

El mètode de càlcul que caracteritza el nou mètode ve donat pel càlcul de les càrregues per la combinació característica dels estats límits últims ELU:

$$q_{ELU} = 1.35 \cdot q_p + 1.5 \cdot q_{sc} \quad (69)$$

Calculant el moment ELU:

$$M_{ELU}^+ = q_{ELU} \cdot \frac{L^2}{8} \quad (70)$$

El càlcul considera nul·la l'armadura de compressió A_s' . Per aconseguir un valor mínim d'armadura de tracció A_s , la norma es basa en un mètode simplificat establert, també, a l'EHE-08. Aquest mètode es basa en diagrames rectangulars i estableix el valor d'un coeficient de moment adimensional μ segons l'expressió:

$$\mu = \frac{M}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} \quad (71)$$

On f_{cd} és la resistència característica a compressió del formigó. Segons la resistència característica, s'obté segons la Figura 3

Tipo de hormigón	HA-25	HA-30	HA-35	HA-40	HA-45	HA-50
Resistencia característica (fck)	25	30	35	40	45	50
Resistencia de cálculo (fcd)	16.7	20.0	23.3	26.7	30.0	33.3

Figura 3. fcd segons fck

A través d'aquest coeficient, obté el valor de quantia ω_1 per trobar la relació x/d per trobar el valor d' A_s de compliment. El valor ω_1 es calcula en funció de μ . En el cas que $\mu > 0.3717$ es calcula un coeficient ω_2 per obtenir ω_1 segons la fórmula:

$$\omega_2 = \frac{\mu - 0.3717}{1 - \frac{d'}{d}} \quad (72)$$

$$\omega_1 = 0.49347 \cdot \omega_2 \quad (73)$$

Altrament, en el cas que $\mu < 0.3717$, el valor de la quantia mecànica ω_1 es calcula segons la fórmula:

$$\omega_1 = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu} \quad (74)$$

La proposta, aplica una restricció i calcula l'àrea de compliment:

$$\frac{x}{d} = \frac{\omega}{0.8} \quad (75)$$

$$A_s \geq \rho_r \cdot b \cdot d = \omega \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot d \quad (76)$$

La restricció és d'obligat compliment segons la proposta de la norma.

La norma continua calculant el moment de l'armadura requerida respecte el centre de gravetat de la secció:

$$S_{s,tensió} = A_s \cdot \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (77)$$

Com que es discrimina l'armat a compressió, s'obté que $S_{s,tensió} = S_s$.

Es fa la proposta de càlcul de la quantia mecànica de fissuració ω_{cr} , per sota de la qual la secció no fissura:

$$\omega_{cr} = 1 - \sqrt{1 - \frac{1.05 \cdot f_{ctm}}{3 \cdot f_{cd}} \cdot \left(\gamma_G + (\gamma_Q - \gamma_G) \cdot \frac{q_{sc}}{q_{max}} \right) \cdot \left(\frac{h}{d} \right)^2} \quad (78)$$

On γ_G i γ_Q són coeficients característics donats.

La proposta contempla operar amb la resistència a flexió $f_{ctm,fi}$ tot i que també ho fa amb el valor a tracció f_{ctm} .

Una vegada trobat el valor de la quantia mecànica de fissuració i comprovar que el valor obtingut i fetes les comprovacions que han de complir:

$$\omega_{cr} \leq \omega_r \leq 0.5 \quad (79)$$

Es pot aplicar la formulació de càlcul de k_s .

$$k_s = 455 \cdot \rho_l^2 - 35 \cdot \rho_l + 1.6 \quad (80)$$

On:

$$\rho_l = \frac{\rho_r \cdot b \cdot d}{b \cdot d} \quad (81)$$

Altrament, en els casos on $w_r < w_{cr}$ el valor de $k_s=1$.

El numerador de l'equació (81) s'obté del càlcul de l'equació (76).

Es continua amb el càlcul de k_w que quantifica l'armadura en excés de la secció:

$$k_w = \frac{\omega_r}{\omega_{prov}} \quad (82)$$

On:

$$\omega_{prov} = \rho_{prov} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \quad (83)$$

$$\rho_{prov} = \frac{A_s}{b \cdot d} \quad (84)$$

Obtinguts els valors de k_s i k_w , s'obté el valor de la fletxa mitjançant l'equació:

$$\delta = \frac{1}{k_I} \cdot \left(\frac{h}{d}\right)^3 \cdot [k_w \cdot \delta_{LOADS} + k_s \cdot \delta_{\varepsilon_{cs}}] \quad (85)$$

on δ és el valor de la fletxa, δ_{LOADS} és la fletxa lineal estàtica per la combinació de càrregues i $\delta_{\varepsilon_{cs}}$ és la fletxa deguda a la retroacció. Es calculen mitjançant les expressions:

$$\delta_{LOADS} = \frac{5 \cdot q_{qp} \cdot L^4}{284 \cdot E_c \cdot I_b} \quad (86)$$

Mitjançant el mètode de les curvatures, es calcula la fletxa deguda a la retracció:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{\varepsilon_{cs}} = \frac{E_s \cdot \varepsilon_{cs} \cdot S_s}{E_{c,ef} \cdot I} \quad (87)$$

$$\delta_{\varepsilon_{cs}} = \left(\frac{1}{r}\right)_{\varepsilon_{cs}, I} \cdot \frac{L^2}{8} \quad (88)$$

Una vegada obtingudes les fletxes per càrregues i per retroacció, es calcula la fletxa final mitjançant l'equació (85).

4.4. Proposta AMADE

El grup de recerca AMADE (Analysis and Advanved Materials for Structural Design), que forma part de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona, es dedica a la mecànica de materials i estructures, centrant-se en el càlcul, dimensionament i ús de material compòsit.

En els últims anys, el grup ha treballat sobre una metodologia simplificada pel càlcul de fletxes degudes als efectes de retracció i fluència del formigó. Tot i que la metodologia es basa en l'ús de FRP, materials compòsits de fibra, es pot aplicar també en casos de càlcul i dimensionament de bigues de formigó armat amb acer.

La metodologia de càlcul es proposa a la tesi de la Dr. Cristina Miàs i Oller, Miàs (2012), i s'extreu informació d'articles Torres *et al* (2012), Miàs *et al* (2010) per completar-la. La tesi, desenvolupa mètode sota la necessitat de càlcul de bigues de formigó armat amb materials compòsits a llarg termini i proposa un sistema simplificat de càlcul.

4.4.1. Formulació per a càlcul de fletxa en biga de secció constant i armat constant segons dades apartat 0 aplicant la proposta d'AMADE.

La formulació presentada pel mètode de càlcul, realitza càlculs previs per a la obtenció de la fletxa.

Primerament, es calcula el coeficient d'homogeneïtzació n acer-formigó:

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (89)$$

Per a calcular el centre de gravetat x de la secció, es calcula la quantia d'armat ρ_f :

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} \quad (90)$$

$$x = d \cdot n \cdot \rho_f \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{n \cdot \rho_f}} \right) \quad (91)$$

S'obté els valors geomètrics d'inèrcia bruta I_g i inèrcia fissurada I_{cr} mitjançant la formulació:

$$I_g = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \quad (92)$$

$$I_{cr} = n \cdot A_f \cdot (d - x) \cdot \left(d - \frac{x}{3}\right) \quad (93)$$

Per a la obtenció dels esforços aplicats segons la càrrega instantània aplicada:

$$M_a = \frac{q_{sc} \cdot L^2}{8} \quad (94)$$

I pel càlcul segons la càrrega sostinguda en el temps:

$$M_{sus} = \frac{q_p \cdot L^2}{8} \quad (95)$$

El moment de fissuració, a partir del qual la secció comença a fissurar:

$$M_{cr} = \frac{f_{ct} \cdot I_g}{\frac{h}{2}} \quad (96)$$

Pel càlcul de la fletxa degut a la càrrega permanent q_p cal realitzar prèviament el càlcul de la inèrcia deguda al màxim moment aplicat I_e :

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right)} \quad (97)$$

On β es un coeficient reductor aplicat sobre la relació M_{cr}/M_a . Pren el valor de 1 en casos de càrregues instantànies i de 0,50 en càrregues aplicades a llarg termini.

Una vegada obtinguda la inèrcia I_e es calcula la fletxa deguda a la càrrega sostinguda o permanent:

$$\delta_{sus} = \frac{5 \cdot M_{sus} \cdot L^2}{48 \cdot E_c \cdot I_e} \quad (98)$$

La proposta de Miàs, C. a la tesi, proposa el càlcul de la fletxa total a llarg termini segons l'equació:

$$\delta_t = \delta_{sus} \cdot (1 + k_{creep}) + \frac{\varepsilon_{cs} \cdot L^2}{8 \cdot d} \cdot k_{sh} \quad (99)$$

On k_{creep} i k_{sh} són coeficients correctors calculats segons els valors del coeficient de fluència φ donat segons el formigó utilitzat, el coeficient d'homogeneïtzació n , calculat segons l'equació (89) i la quantia longitudinal ρ_f , calculada segons l'equació (90):

$$k_{creep} = 0.73 \cdot \varphi \sqrt{n \cdot \rho_f} \quad (100)$$

$$k_{sh} = 1 + \sqrt{n \cdot \rho_f} \quad (101)$$

Obtinguts els valors de k_{creep} i k_{sh} , s'apliquen sobre l'equació (99) per a l'obtenció de la fletxa total.

El mètode, tal i com es reflecteix a la introducció de l'apartat 4.4, està pensat pel càlcul de fletxes en bigues armades amb FRP, on l'armadura de compressió es negligeix i, per tant, no es té en compte a efectes de càlcul. Per poder aplicar-se en una comparació general amb armadures de qualsevol material, es proposa un coeficient corrector que té en compte l'efecte de l'armadura de compressió segons l'equació (102) que, multiplicat per la fletxa total calculada segons l'equació (99) dona el valor de la fletxa total:

$$\psi = \frac{1}{1 + 20 \cdot n \cdot \rho'} \quad (102)$$

$$\delta_t = \left[\delta_{sus} \cdot (1 + \psi \cdot k_{creep}) + \psi \cdot \frac{\varepsilon_{sh} \cdot L^2}{8 \cdot d} \cdot k_{sh} \right] \quad (103)$$

5. Casos proposats objectes de l'anàlisi

Es planteja un cas de biga recolzada pels dos extrems, com mostra la Figura 4:

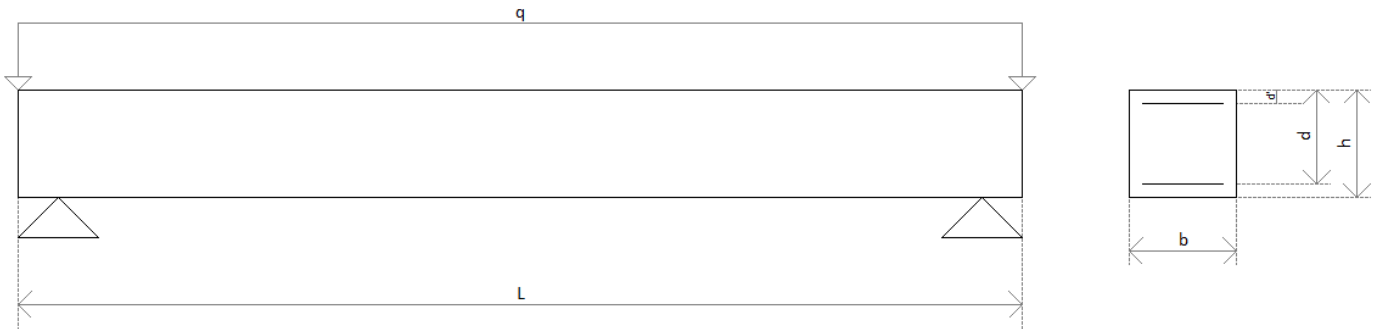


Figura 4. Dimensions de la biga proposada.

A partir de la proposta de la biga d'anàlisi, que està plantejada i pensada per reproduir casos que es donen en situacions reals, es proposen unes combinacions de dimensions, càrregues, combinacions de càrregues, característiques del formigó i armat de la secció. D'aquestes combinacions, s'obtenen un total de 36 casos per mètode que, amb els quatre mètodes s'obtenen un total de 144 resultats de fletxes.

Les combinacions utilitzades són:

Cas 1

Característiques geomètriques fixes pels 18 primers casos:

$L= 8000\text{mm}$ $b= 1000\text{mm}$ $h= 620\text{mm}$ $d=570\text{mm}$ $d'=50\text{mm}$

Característiques fixes:

Material de reforç, acer. $E_s=200.000\text{MPa}$

Quantia armadura a compressió i a tracció: $\rho=0,015$ $\rho'=0,003$

Combinacions:

Formigó 1: $f_{ck}=30\text{MPa}$ $\varphi=2$ $\epsilon_{cs}=450 \cdot 10^{-6}$

Formigó 2: $f_{ck}=50\text{MPa}$ $\varphi=1,5$ $\epsilon_{cs}=400\cdot 10^{-6}$

Relació de càrregues:

$$\frac{q}{g+q} = 0.3 - 0.45 - 0.6$$

$$\frac{M}{M_{cr}} = 1.5 - 2.5 - 4.5$$

Cas 2

Característiques geomètriques fixes pels 18 darrers casos:

$L= 8000\text{mm}$ $b= 1000\text{mm}$ $h= 450\text{mm}$ $d=400\text{mm}$ $d'=50\text{mm}$

Característiques fixes:

Material de reforç, acer. $E_s=200.000\text{MPa}$

Quantia armadura a compressió i a tracció: $\rho=0,005$ $\rho'=0,00015$

Combinacions:

Formigó 1: $f_{ck}=30\text{MPa}$ $\varphi=2$ $\epsilon_{cs}=450\cdot 10^{-6}$

Formigó 2: $f_{ck}=50\text{MPa}$ $\varphi=1,5$ $\epsilon_{cs}=400\cdot 10^{-6}$

Relació de càrregues:

$$\frac{q}{g+q} = 0.3 - 0.45 - 0.6$$

$$\frac{M_a}{M_{cr}} = 1.5 - 2.5 - 4.5$$

En ambdós casos proposats, es consideren armadures constants al llarg de tota la biga.

Per establir les càrregues, cada mètode planteja la manera de calcular el moment de fissuració M_{cr} . A través del moment de fissuració i la seva relació amb M_a , es troba el valor del moment màxim.

De la relació de càrrega $g+q$ establertes, es pot calcular g . Obtingut g , es calcula q .

A l'hora d'aplicar l'anàlisi comparatiu cada mètode utilitza una manera de calcular paràmetres, de tal manera que s'obtenen distribucions de càrregues diferents. Per poder analitzar i comparar els resultats es realitzen dues taules. La primera taula, es realitza amb les càrregues calculades segons l'Eurocodi 2 actual. Els valors del mòdul elàstic del formigó E_c i, per tant, el moment de fissuració M_{cr} es calculen mitjançant la formulació proposada per cada norma. La segona taula, es realitza amb les càrregues, els valors del mòdul elàstic del formigó E_c i, per tant, el moment de fissuració M_{cr} , calculats tots segons l'Eurocodi 2 actual.

Aplicant aquesta condició totes les bigues obtingudes tindran accions iguals i el resultat d'anàlisi serà més fiable.

6. Anàlisi comparatiu dels resultats

6.1. Introducció a l'anàlisi. Dades i càrregues aplicades.

Per a l'anàlisi comparatiu, s'han realitzat dues taules. Com s'exposa a l'apartat 5 i aplicat a ambdues taules, per l'anàlisi s'ha marcat com a referència el càlcul de les càrregues segons l'Eurocodi 2 actual. S'ha forçat aquest valor per poder calcular bigues amb les mateixes accions.

La primera taula s'obté forçant únicament les càrregues segons l'Eurocodi 2. Els valors del mòdul elàstic del formigó E_c i, per tant, el moment de fissuració M_{cr} es calculen mitjançant la formulació proposada per cada norma.

La segona taula, a més d'aplicar les càrregues segons l'Eurocodi 2, es forcen els valors del mòdul elàstic del formigó E_c i, per tant, el moment de fissuració M_{cr} per veure quina influència tenen els diferents mètodes de càlcul proposats per cada norma d'aquests paràmetres.

A l'hora de comparar, es realitzarà una comparació entre la taula de resultats 1 i taula de resultats 2 per veure com afecta el fet de forçar el mètode de càlcul de E_c i M_{cr} , però no s'analitzarà detalladament la taula de resultats 2, ja que no segueix la norma.

6.2. Taules de resultats.

A continuació, es mostren les dues taules de resultats:

Seccions	Formigó	g / (g + q)	M/Mcr	Fletxa (mm) segons normativa				
				EHE-08	EC-2	EC-2 prop.	AMADE	
Cas 1 b = 1000 h = 620 d=570 d'=50 ρ=0,015 ρ'=0,003	Formigó 1: fck=30MPa/φ=2,0/ecs=450-10-6	0,3	1,5	9,29	8,93	7,57	9,51	
			2,5	16,83	12,00	12,47	12,31	
			4,5	30,91	17,24	21,16	17,67	
		0,45	1,5	11,20	9,62	8,16	10,23	
			2,5	20,29	13,23	13,75	13,61	
			4,5	37,27	19,51	23,95	20,07	
		0,6	1,5	13,11	10,30	8,75	10,95	
			2,5	23,76	14,46	15,01	14,90	
			4,5	43,63	21,79	26,72	22,47	
	Formigó 2: fck=50MPa/φ=1,5/ecs=400-10-6	0,3	1,5	11,87	9,32	8,34	9,76	
			2,5	22,11	13,32	13,93	13,27	
			4,5	40,89	20,25	24,07	19,96	
		0,45	1,5	14,32	10,21	9,16	10,64	
			2,5	26,66	14,94	15,65	14,87	
			4,5	49,31	23,27	27,71	22,95	
		0,6	1,5	16,76	11,10	9,97	11,53	
			2,5	31,21	16,56	17,35	16,48	
			4,5	57,72	26,28	31,33	25,94	
	Cas 2 b = 1000 h = 450 d=400 d'=50 ρ=0,005 ρ'=0,0015	Formigó 1: fck=30MPa/φ=2,0/ecs=450-10-6	0,3	1,5	14,36	17,04	14,24	19,03
				2,5	43,55	26,69	25,54	28,14
				4,5	96,43	43,15	47,86	45,16
			0,45	1,5	17,31	19,00	15,89	21,11
				2,5	52,51	30,42	29,05	32,09
				4,5	116,29	50,18	55,53	52,62
0,6			1,5	20,27	20,96	17,52	23,18	
			2,5	61,48	34,14	32,51	36,04	
			4,5	136,14	57,21	63,14	60,07	
Formigó 2: fck=50MPa/φ=1,5/ecs=400-10-6		0,3	1,5	17,64	19,61	17,16	21,16	
			2,5	56,93	32,37	31,12	33,10	
			4,5	130,32	54,71	58,71	55,39	
		0,45	1,5	21,27	22,27	19,48	23,86	
			2,5	68,65	37,45	35,92	38,26	
			4,5	157,14	64,31	68,92	65,15	
		0,6	1,5	24,90	24,93	21,76	26,57	
			2,5	80,37	42,54	40,66	43,43	
			4,5	183,97	73,91	79,06	74,90	

Taula de resultats 1 – Resultat de fletxa (mm) amb els paràmetres calculats per cada norma

Seccions	Formigó	g / (g + q)	M/Mcr	Fletxa (mm) segons normativa			
				EHE-08	EC-2	EC-2 prop.	AMADE
Cas 1 b = 1000 h = 620 d=570 d'=50 ρ=0,015 ρ'=0,003	Formigó 1: fck=30MPa/φ=2,0/ecs=450-10-6	0,3	1,5	7,75	8,93	8,13	9,51
			2,5	15,69	12,00	13,40	12,31
			4,5	29,70	17,24	22,75	17,67
		0,45	1,5	9,34	9,62	8,78	10,23
			2,5	18,92	13,23	14,78	13,61
			4,5	35,82	19,51	25,75	20,07
	0,6	1,5	10,94	10,30	9,41	10,95	
		2,5	22,15	14,46	16,14	14,90	
		4,5	41,94	21,79	28,73	22,47	
		0,3	1,5	9,85	9,32	9,09	9,76
			2,5	20,64	13,32	15,19	13,27
			4,5	39,46	20,25	26,25	19,96
	Formigó 2: fck=50MPa/φ=1,5/ecs=400-10-6	0,45	1,5	11,88	10,21	9,99	10,64
			2,5	24,89	14,94	17,06	14,87
			4,5	47,58	23,27	30,21	22,95
		0,6	1,5	13,91	11,10	10,87	11,53
			2,5	29,13	16,56	18,91	16,48
			4,5	55,71	26,28	34,15	25,94
Cas 2 b = 1000, h =450/ d=400 d'=50/ ρ=0,005, ρ'=0,0015	Formigó 1: fck=30MPa/φ=2,0/ecs=450-10-6	0,3	1,5	14,42	17,04	15,30	19,03
			2,5	43,06	26,69	27,45	28,14
			4,5	94,60	43,15	51,45	45,16
		0,45	1,5	17,39	19,00	17,09	21,11
			2,5	51,93	30,42	31,23	32,09
			4,5	114,07	50,18	59,70	52,62
	0,6	1,5	20,36	20,96	18,84	23,18	
		2,5	60,79	34,14	34,95	36,04	
		4,5	133,55	57,21	67,88	60,07	
	Formigó 2: fck=50MPa/φ=1,5/ecs=400-10-6	0,3	1,5	18,28	19,61	18,71	21,16
			2,5	57,16	32,37	33,93	33,10
			4,5	128,59	54,71	64,01	55,39
		0,45	1,5	22,05	22,27	21,24	23,86
			2,5	68,92	37,45	39,16	38,26
			4,5	155,06	64,31	75,14	65,15
	0,6	1,5	25,81	24,93	23,73	26,57	
		2,5	80,69	42,54	44,33	43,43	
		4,5	181,53	73,91	86,20	74,90	

Taula de resultats 2 – Resultat de fletxes (mm) amb els paràmetres calculats segons EC2

A ambdues taules es marquen en vermell els resultats obtinguts superiors a la longitud de la biga dividida entre 200. Es considera que les fletxes superiors a aquest paràmetre, que en el cas d'anàlisi és constant a 40 degut a que s'ha utilitzat sempre la mateixa longitud de biga, no s'han de contemplar per excés de fletxa.

Els dos casos varien les càrregues:

·Quan més gran és el coeficient de $\frac{M}{M_{cr}}$ més, gran és el moment M aplicat.

·Quan més gran és el valor de $\frac{g}{g+q}$, on g és la càrrega permanent aplicada i q la sobrecàrrega, major és el valor de la càrrega permanent.

6.3. Comparativa entre la taula 1 i la taula 2

La diferència entre les dues taules és la manera de calcular el mòdul elàstic del formigó E_c i, per tant, el càlcul del moment de fissuració M_{cr} .

La norma espanyola EHE-08 proposa com a mètode de càlcul del mòdul elàstic la formulació:

$$E_c = 8500 \cdot f_{cm}^{1/3} \quad (104)$$

L'Eurocodi 2 i el mètode proposat per AMADE proposen:

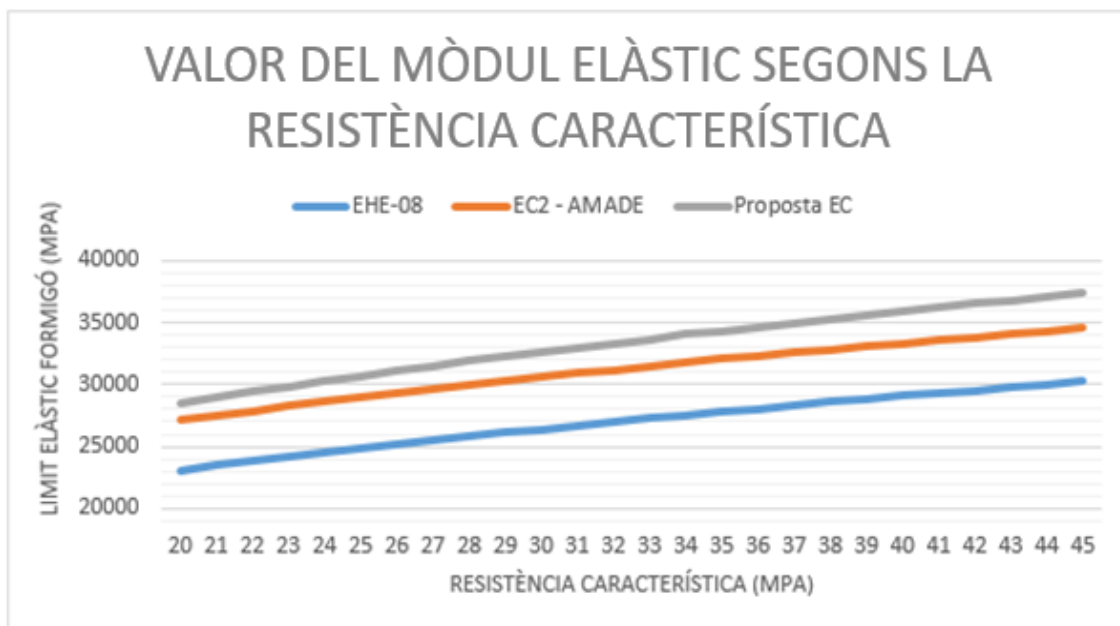
$$E_c = 22.000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad (105)$$

La proposta d'Eurocodi proposa:

$$E_c = 1,05 \cdot 10.000 \cdot f_{cm}^{1/3} \quad (106)$$

Així doncs, aquests tres mètodes de càlcul fan variar el moment de fissuració i, per tant, el resultat final dels càlculs.

Elaborant una gràfica es pot veure la tendència de càlcul dels diferents mètodes:



Gràfica 1 – Valor d' E_c segons f_{ck}

Així doncs, el càlcul de l'EHE-08 dona valors notablement més baixos i, tot i que el mètode aplicat per l'EC2 i el proposat per la proposta de EC2 s'assimilen més, la proposta d'EC, representada en gris a la gràfica superior, pren valors més elevats que l'EC2 actual i, representat en taronja. A més, tendeix a discrepar més amb valors de resistència característica alts. Per un valor de $f_{cm}=20\text{MPa}$, el valor de E_c calculat segons l'EC2 actual és, aproximadament, un 5% inferior al EC2 proposat, mentre que per un valor de $f_{cm}=45\text{MPa}$ la diferència és d'un 7,5%. Així doncs, la nova proposta d'EC2 considera més rígida l'estructura.

Per obtenir conclusions sobre les discrepàncies entre ambdues taules, s'extreu una taula on es resta els valors de fletxa de la taula 1 dels valors de fletxa de la taula 2 del cas 1, per veure la tendència:

Fletxa taula 2 - Fletxa taula 1			Diferència entre fletxes				
			EHE-08	EC-2	EC-2 prop.	AMADE	
Cas 1 b = 1000 h = 620 d = 570 d' = 50 ρ = 0,015 ρ' = 0,003	Formigó 1: f _{ck} = 30MPa/φ = 2,0/ε _c s = 450·10 ⁻⁶	0,3	1,5	-1,54	0,00	0,57	0,00
			2,5	-1,14	0,00	0,94	0,00
			4,5	-1,20	0,00	1,59	0,00
		0,45	1,5	-1,86	0,00	0,61	0,00
			2,5	-1,37	0,00	1,03	0,00
			4,5	-1,45	0,00	1,80	0,00
	0,6	1,5	-2,17	0,00	0,66	0,00	
		2,5	-1,60	0,00	1,13	0,00	
		4,5	-1,70	0,00	2,01	0,00	
	Formigó 2: f _{ck} = 50MPa/φ = 1,5/ε _c s = 400·10 ⁻⁶	0,3	1,5	-2,02	0,00	0,75	0,00
			2,5	-1,47	0,00	1,26	0,00
			4,5	-1,43	0,00	2,17	0,00
		0,45	1,5	-2,43	0,00	0,83	0,00
			2,5	-1,77	0,00	1,41	0,00
			4,5	-1,72	0,00	2,50	0,00
	0,6	1,5	-2,85	0,00	0,90	0,00	
		2,5	-2,08	0,00	1,57	0,00	
		4,5	-2,02	0,00	2,83	0,00	

Taula 3 – Diferències entre taula 2 i taula 1

Com és lògic, la diferència entre l'EC2 sobre l'EC2 i el mètode proposat per AMADE, és 0, ja que es calculen amb els mateixos valors.

Degut a la diferència de càlcul de la norma EHE-08 amb l'EC2, no es donarà rellevància a la diferència entre els mètodes; l'E_c es calcula de manera diferent i dona valors notablement discrepants.

Si és interessant veure i analitzar la diferència de l'EC2 proposat. Com s'ha comentat a la interpretació de la gràfica 1, la nova proposta d'EC2 dona més rigidesa. Per les mateixes condicions de càlcul, dona fletxes més petites. És per aquest motiu que quan es força el mòdul elàstic calculat segons l'EC2 actual, surten fletxes més grans. A més, quan més alt és el valor de f_{ck} del formigó, més discrepant és la diferència de la fletxa, tal i com s'ha comentat al gràfic 1. Així doncs, quan més alt és el valor de f_{ck}, per les mateixes condicions, més discrepen les fletxes calculades amb l'EC2 actual amb la nova proposta. Realitzant el quocient, per saber la relació entre els casos de f_{ck} = 30MPa i f_{ck} = 50MPa, hi ha un increment d'un 1,35% la relació entre ambdues fletxes, seguint l'increment a mesura que augmenta la resistència característica a la gràfica 1.

6.4. Anàlisi taula de resultats 1

A aquesta taula, es força els valors de les càrregues segons l'EC2. Els valors de E_c i M_{cr} es calculen segons cada norma.

Es comença analitzant, respecte els resultats obtinguts de càlcul de l'EC2, els resultats obtinguts per l'EHE-08. Es realitza el quocient entre els resultats obtinguts utilitzant els dos mètodes. L'EHE-08 és una norma conservadora per estructures on la càrrega permanent és petita i obté resultats similars a l'EC2 quan les càrregues són baixes i amb poca càrrega permanent. En aquests casos obté discrepàncies entre un 4% i un 15%. En canvi, quan s'augmenta la càrrega, la norma és molt conservadora; obté resultats de fletxes molt més alts que els de referència a l'EC2, amb un ordre de magnitud d'entre el 35% i 60% superior, essent superior quan més alta es la càrrega i més gran és la càrrega permanent.

Aquesta gran discrepància és esperada en valors de càrrega alta. Mentre les altres normatives calcula coeficients intermedis d'ajust del càlcul, l'EHE-08 determina un coeficient ξ que quantifica depenent del temps d'aplicació de la càrrega (en el cas que ens ocupa, a llarg termini >5 anys) segons:

2 setmanes $\xi=0.5$

3 mesos $\xi=1$

6 mesos $\xi=1.2$

1 any $\xi=1.4$

5 anys o més $\xi=2$

A partir d'aquí calcula un coeficient λ on el valor segons el temps d'aplicació de càrrega és directament proporcional. Aquest valor λ s'utilitza com a multiplicatiu a la fletxa diferida pel càlcul de la fletxa final.

El fet que el valor d' E_c sigui significativament més baix, segons la gràfica 1, fa que el valor de la fletxa augmenti també.

Es realitza el càlcul de quocient entre l'EC2 i el mètode proposat per AMADE per obtenir una relació de càrregues. L'ajust entre la norma EC2 i la proposta d'AMADE és molt ajustat. Pren valors de discrepància entre el 2% i 3% fora de casos puntuals amb quantia d'armadura a compressió baixa i relació de càrregues baixa.

Els resultats eren esperats; la proposta d'AMADE és una simplificació del mètode de càlcul proposat a l'EC2, on aplica coeficients per càlcul de la fluència, k_{creep} , i per la retracció, k_{sh} . Els casos de discrepància més gran, amb valors de quantia a compressió baixos, ve donat per la proposta, pendent d'afinar, del valor corrector $\psi = \frac{1}{1+20 \cdot n \cdot \rho'}$, que depèn de la quantia a compressió.

Tot i aquests casos de discrepància puntual, el mètode s'ajusta correctament al càlcul de la fletxa proposat per l'EC2.

Per últim, s'analitzen les discrepàncies entre l'EC2 actual i el mètode de càlcul proposat per l'EC2. Realitzant el quocient entre les dues fletxes, s'obté una tendència clara: per càrregues petites, la nova proposta és molt poc conservadora, obtenint en tots els casos valors de l'ordre del 12%-17% més petits de fletxa a la nova proposta que a l'Eurocodi actual. Es prenen valors més alts de discrepància en el cas de la biga de cantell més baix.

En canvi, per càrregues intermèdies els resultats obtinguts s'ajusten molt més, amb una relació del 3,5%. En el cas de biga de cantell més gran, el cas 1, la fletxa en valors intermedis és més gran a la nova proposta, en canvi, en bigues de cantell més petit, el cas 2, s'obtenen resultat de fletxa més petit a la nova proposta. Si es calcula per un valor de cantell situat entre els dos casos, el resultat surt encara més ajustat.

En els casos de càrrega alta, s'inverteixen els resultats que a la càrrega baixa. La nova proposta d'Eurocodi obté resultats més grans de fletxa, de l'ordre d'un 15% en els cas 1 i del 10% en el cas 2. Aquest fet és significatiu, la norma és més conservadora en els casos de càrregues altes. Observant els valors referent a la relació de càrregues, s'arriba a la conclusió que la fluència afecta més a la nova proposta de càlcul que a la normativa vigent.

7. Conclusions

Els resultats obtinguts de l'anàlisi comparatiu han estat satisfactoris.

En primera instància, la diferència entre la normativa espanyola i la normativa europea era esperada; el mètode de càlcul proposat per l'EHE-08 és molt més conservador en càrregues d'aplicació a llarg termini ja que, com s'exposa a l'apartat 6.4, aplica un coeficient multiplicatiu de 2 per càrregues a llarg termini. Així doncs, les bigues de formigó armat calculades amb l'EHE-08 estaran sobredimensionades respecte les calculades per l'Eurocodi 2. Cal remarcar que a l'estat espanyol es pot justificar el càlcul de l'estructura d'un projecte mitjançant qualsevol dels dos mètodes.

Actualment, es parla de modificar la normativa espanyola i adaptar-la a l'Eurocodi 2 actual, sense perdre la denominació de norma espanyola i adaptant alguns paràmetres. Aquest fet, però, tot i que proposat no està en estat avançat.

En segona instància, la poca discrepància entre l'Eurocodi 2 i el mètode proposat per AMADE era d'esperar. La proposta de Miàs, C (2012) a la tesi doctoral, simplifica el mètode de càlcul basant-se amb l'Eurocodi 2. Tot i que el mètode està pensat i ajustat per aplicar en bigues de formigó armat amb FRP, també s'ajusta molt el càlcul quan l'armat és acer.

Tot i que els resultats entre els dos mètodes és molt ajustat, cal comentar que l'ajust aplicat per tenir en compte la quantia d'armat a compressió i , per tant, l'armat a compressió és una proposta. L'ajust s'ha d'acabar d'analitzar i , en tot cas, afinar. En quanties d'armat a compressió més alt, el càlcul s'ajusta més.

Per últim, els resultats de la nova proposta de l'Eurocodi 2 també són bons. No es tenia referència dels resultats que s'havien d'obtenir respecte l'actual, però s'han obtingut uns resultats força ajustats. Els valors extrems, amb càrregues altes i baixes, discrepen més que no pas els valors intermedis. La fluència afecta més a la nova proposta que a l'actual. El fet de calcular el límit elàstic E_c de manera diferent, té una repercussió també a l'hora d'obtenir resultats.

En càlculs d'enginyeria, obtenir valors discrepants d'un 8%-9% no és preocupant si el mètode de càlcul dóna més amplitud i versatilitat de càlcul, trobant un equilibri entre seguretat i dimensionament adequat.

8. Relació de documents

Document 1: memòria i annexos

- Memòria
- Annex A: Definicions bàsiques
- Annex B: Definició de paràmetres
- Annex C: Document de càlcul
- Annex al pressupost

9. Bibliografia

Arroyo, J.C., Garcia, Á., Morán, F. (2011) *Jiménez Montoya Hormigón Armado* (15a edició) Barcelona: Editorial Gustavo Gil.

CEN-TC250 (2004), EN 1992-1-1. *Eurocode 2. Design of concrete structures. General rules for buildings*. Comité Europeen De Normalisation, Brussels, (2004)

CEN/TC250/SC2 Project Team T1 (2018). *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures*. Background documents to the final PT1 draft pr EN 1992-1-1:2018.

Comisión permanente del Hormigón, *Instrucción de Hormigón Estructural, EHE*; Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento, Madrid 2008.

Miàs C., *Analysis of time-dependent flexural behaviour of concrete members reinforced with fibre reinforced polymer bars*. PhD thesis, University of Girona, Girona; 2012.

Miàs C, Torres LI, Turon A, Baena M, Barris C. *A simplified method to obtain time-dependent curvatures and deflections of concrete members reinforced with FRP bars*. *Compos Struct* 2010;92(8):1833–8.

Torres L, Miàs C., Turon A., Baena M. *A rational method to predict long-term deflections of FRP reinforced concrete membres*. *Engineering Structures* 2012; 40: 230-9.

ANNEXOS

ANNEX A

Definicions bàsiques

Al present annex hi consten definicions bàsiques per a la comprensió de tots els conceptes i apartats del document.

Armadura

Es refereix al conjunt de barres d'acer, generalment, que formen l'esquelet, resistent a l'extensió, d'una peça de formigó armat i que resta submergides dins de la massa de formigó.

Armadura a compressió

Conjunt de barres d'acer que en la situació d'una biga de formigó armat carregada a flexió aguanta els esforços a compressió. A efectes de càlcul, el formigó aporta molta resistència a compressió. Tot i això, a més d'aguantar els esforços, és necessària per efectes constructius d'estructura de l'armat.

La part que treballa a compressió (quan la biga treballa a flexió) és la part superior de la biga.

Armadura a tracció

Conjunt de barres d'acer que en la situació d'una biga de formigó armat carregada a flexió aguanta els esforços a tracció. A efectes de càlcul, es considera que el formigó té una resistència nul·la a tracció, per tant, les barres d'acer donen tota la resistència de la biga a tracció.

La part que treballa a tracció (quan la biga treballa a flexió) és la part inferior de la biga.

Barres d'acer corrugat

Les barres d'acer corrugat són les barres utilitzades per armar el formigó. Presenten relleu a la seva superfície per una major adherència amb el formigó.

S'utilitzen taules estandarditzades de diàmetres de barres d'acer a l'hora de realitzar els càlculs. D'aquesta manera es produeix un estalvi de costos notable a l'hora de fabricar bigues de formigó armat.

Càrrega viva

La càrrega viva es defineix com a càrrega externa movable sobre una estructura que inclou el pes d'aquesta junt amb totes les càrregues (persones, mobiliari...) que hi actuen verticalment. No inclou la càrrega eòlica. També s'anomena carrega variable.

Coefficient d'homogeneïtzació

Relació entre el mòdul elàstic del formigó i de l'acer.

Coefficient de fluència

El coeficient de fluència expressa la deformació diferida en relació amb la deformació elàstica (els valors típics d'aquest coeficient oscil·len entre 2 i 6).

A l'hora de determinar el valor del coeficient de fluència s'han de tenir en compte factors com la humitat ambiental (quan més humitat menys fluència), l'espessor de la peça (més espessor menys fluència), la composició del formigó, l'edat del formigó quan és carregat i el temps transcorregut fins a la avaluació de la fluència.

Densitat d'armadura

Quantitat de barres d'acer corrugat per unitat de superfície de la secció del formigó.

Fletxa

En referència al càlcul d'estructures, es defineix la fletxa com la distància entre la línia neutra de l'estructura es estat de repòs i sol·licitada, es a dir, sota càrrega.

Formigó

Material de construcció format per una barreja de grava, sorra, aigua i ciment pòrtland.

Formigó armat

Formigó a l'interior del qual es disposen barres d'acer cilíndriques, normalment corrugades, destinades a resistir esforços de tracció o flexió, que el formigó ordinari no suportaria bé.

Línia neutra

Superfície imaginària al llarg d'una biga que separa la zona comprimida de la zona traccionada.

Mòdul elàstic

El mòdul elàstic és una constant que relaciona la mesura de la deformació unitària amb la tensió que suporta el material.

Moment de fissuració

Esforç aplicat a una biga de formigó armat a partir del qual comença a fissurar la secció on es situa l'esforç.

Paràmetre reològic

Per definir el paràmetre reològic cal definir primer la reologia, que és la part de la física que estudia la relació entre l'esforç i la deformació. Així doncs, es defineix paràmetre reològic com paràmetre que relaciona, en forma d'equació, l'esforç i la deformació.

Resistència a compressió

La resistència a la compressió és la càrrega màxima que pot suportar un material sota càrrega d'aixafament abans de trencar-se.

Resistència a tracció

La resistència a la tracció és la càrrega màxima que pot suportar un material sota càrrega d'estirament abans de trencar-se.

Resistència característica

La resistència característica del formigó a compressió és la tensió que dona un 95% de confiança, seguint una distribució normal. És a dir, és la tensió que estadísticament ens dona una fiabilitat del 95%.

Retracció

La retracció del formigó és la deformació que pateix el formigó al llarg del temps, per pèrdua o adquisició d'humitats o altres factors.

Sobrecàrrega gairebé permanent

Es considera sobrecàrrega gairebé permanent a aquella sobrecàrrega que supera el 50% del temps de càrrega de la biga.

Tensió de fluència

La tensió de fluència és la tensió màxima que pot suportar un material abans de deformar-se plàsticament i, per tant, fluir.

ANNEX B

Definició de paràmetres

Al present annex es descriuen i defineixen els diferents paràmetres tant variables com fixes utilitzat durant tot l'anàlisi comparatiu, per una bona comprensió de tots els apartats del documents.

Es mostren agrupades i descrites segons paràmetres geomètrics, propietat del material

Paràmetres geomètrics:

A'_s = àrea de l'armadura de compressió.

A_s = àrea de l'armadura de tracció.

b =amplada de la secció

d = la distància compresa entre la part superior de la secció i el centre de l'armadura de tracció.

d' = distància compresa entre la part superior de la secció i el centre de l'armadura de compressió.

h = alçada de la secció.

I = inèrcia de la secció.

L =longitud total de la biga.

x = posició de la línia neutra.

Paràmetres de propietats del material:

E_c = mòdul elàstic del formigó.

E_s = mòdul elàstic de l'acer.

f_{cd} = resistència de càlcul del formigó.

f_{ck} = resistència característica del formigó.

f_{cm} = resistència a compressió del formigó.

f_{yd} = tensió de fluència de l'acer.

Coeficients:

n = coeficient d'homogeneïtzació acer-formigó.

β = evolució de la retracció que es produeix entre l'edat teòrica en què es carrega la biga i un temps infinit.

ϵ_{sh} = deformació a causa de la retracció del formigó. És un paràmetre reològic.

ρ = densitat d'armadura o quantia.

φ = relació entre l'esforç i la deformació; coeficient de fluència. És un paràmetre reològic.

ψ = sobrecàrrega gairebé permanent.

Resultats de càlculs; esforços, càrregues, fletxes:

M_a = moment aplicat a la secció de càlcul.

M_{cr} = moment de fissuració.

δ = fletxa.

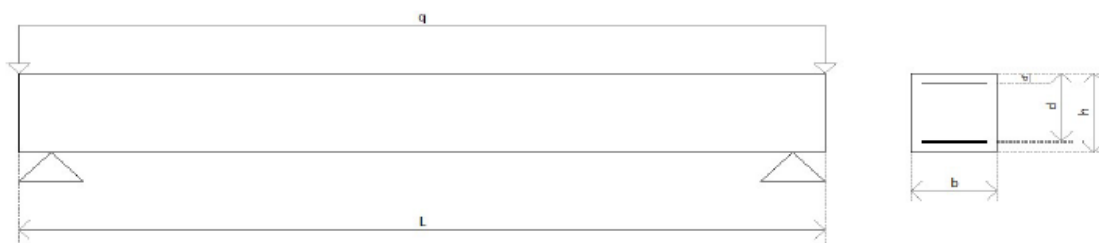
ANNEX C

Document de càlcul

Per a la realització de l'anàlisi comparatiu, s'han emparat dos documents de càlcul amb el programari Excel. Cada document ha estat preparat i programat per a l'adquisició de dades amb els coeficients que es volien analitzar i la diferent resposta en el càlcul.

Aquests documents, consten de sis pestanyes. A continuació es mostra l'exemple de càlcul segons el primer cas de la taula 1.

La primera pestanya, conte les dades geomètriques, propietats del formigó i de l'armat, quantia d'armadura, repartiment de càrregues.



DADES COMUNS		
Característiques geomètriques		
Longitud biga	L	8000 mm
Base de la secció	b	1000 mm
Alçada de la secció	h	620 mm
Distància des de la part superior a l'armat a tracció	d	570 mm
Distància des de la part superior de l'armat de compressió	d'	50 mm
Característiques fixes		
Mòdul elàstic material de reforç	E_s	200000 MPa
Quantia armadura de compressió	ρ	0,015
Quantia armadura de tracció	ρ'	0,003
Combinacions		
Resistència característica del formigó	f_{ck}	30 MPa
Coefficient de fluència	φ	2
Deformació deguda a la retracció	ϵ_{cs}	0,00045
Relació de càrregues		
$q/(g+q)$		0,3
M/M_{cr}		1,5

Figura 5 – Dades comuns

La segona pestanya, conté l'aplicació de la normativa EHE-08. Es divideix en dues parts:

La primera, mostra les dades comuns, les dades geomètriques calculades i les dades característiques segons el cas, que inclou els coeficients específics de cada norma:

DADES COMUNS		
Característiques geomètriques		
Longitud biga	L	8000 mm
Amplada de la secció	b	1000 mm
Alçada de la secció	h	620 mm
Distància des de la part superior a l'armat a tracció	d	570 mm
Distància des de la part superior de l'armat de compressió	d'	50 mm
Característiques fixes		
Mòdul elàstic armadures	E_s	200000 MPa
Quantia armadura de compressió	ρ	0,015
Quantia armadura de tracció	ρ'	0,003
Combinacions		
Resistència característica del formigó	f_{ck}	30 MPa
Coefficient de fluència	φ	2
Deformació deguda a la retracció	ϵ_{cs}	0,00045
Relació de càrregues		
$q/(g+q)$		0,3
M/M_{cr}		1,5
DADES GEOMÈTRIQUES CALCULADES		
Àrea armadura de tracció	A_s	8550 mm ²
Àrea armadura de compressió	$A_{s'}$	1710 mm ²
Àrea de la secció	A_c	620000 mm ²
Inèrcia bruta	I_b	19860666667 mm ⁴
DADES CARACTERÍSTIQUES EHE-08 (segons EC2)		
Moment de fissuració	M_{cr}	185567059,7 Nmm
Moment màxim	$M_{màx}$	278350589,6 Nmm
Carrega característica	$g+q$	44,154 N/mm
Càrrega permanents (g)	q_p	13,246 N/mm
Sobrecàrrega (q)	q_{sc}	30,908 N/mm
Temps aplicació càrrega > 5 anys	ξ	2
Coefficient de simultaneïtat	ψ	0,3

Figura 6 – Dades comuns i calculades EHE-08

La segona part, segueix el càlcul de tots els valors intermedis de la norma:

CÀLCULS SEGONS EHE-08		
Càrrega característica	q_{max}	44,154 N/mm
Moment màxim	M_{max}	353231381,525 Nmm
Resistència a tracció formigó	f_{ctm}	2,896 MPa
Resistència a flexotracció del formigó	$f_{ctm,fl}$	2,896 MPa
Moment fissuració	M_{cr}	185567059,721 Nmm
Inèrcia de la secció	I_b	19860666666,667 mm ⁴
Resistència característica formigó	f_{cm}	38,000 MPa
Mòdul elàstic formigó	E_c	28576,791 MPa
Coefficient homogeneïtzació	n	6,999
Armadura equivalent inferior	$A_{s,eq}$	59838,769 mm ²
Armadura equivalent superior	$A_{s,eq'}$	11967,754 mm ²
Posicio línia fissuració	x_{fis}	201,267 mm
Inèrcia fissurada	I_{fis}	11127430954,429 mm ⁴
Inèrcia equivalent	I_e	12393624227,163 mm ⁴
Fletxa instantània	$\delta_{i,q_{max}}$	6,649 mm
Carrega quasi permanent	q_{qp}	22,519 N/mm
Fletxa càrrega quasi permanent	$\delta_{i,q_{qp}}$	3,391 mm
Coefficient depenent temps aplicació càrrega	λ	1,739
Fletxa diferida	δ_{dif}	5,897 mm
FLETXA TOTAL	δ_{tot}	9,29 mm

Figura 7 – Càlcul valors intermedis segons EHE-08

La tercera pestanya, conté l'aplicació de la normativa Eurocodi 2. Es divideix en dues parts:

La primera, mostra les dades comuns, les dades geomètriques calculades i les dades característiques segons el cas, que inclou els coeficients específics de cada norma:

DADES COMUNS		
Característiques geomètriques		
Longitud biga	L	8000 mm
Amplada de la secció	b	1000 mm
Alçada de la secció	h	620 mm
Distància des de la part superior a l'armat a tracció	d	570 mm
Distància des de la part superior de l'armat de compressió	d'	50 mm
Característiques fixes		
Mòdul elàstic armadures	E _s	200000 MPa
Quantia armadura de compressió	ρ	0,015
Quantia armadura de tracció	ρ'	0,003
Combinacions		
Resistència característica del formigó	f _{ck}	30 MPa
Coefficient de fluència	φ	2
Deformació deguda a la retracció	ε _{cs}	0,00045
Relació de càrregues		
q/(g+q)		0,3
M/M _{cr}		1,5

DADES GEOMÈTRIQUES CALCULADES		
Àrea armadura de tracció	A _s	8550 mm ²
Àrea armadura de compressió	A _{s'}	1710 mm ²
Àrea de la secció	A _c	620000 mm ²
Inèrcia bruta	I _b	19860666667 mm ⁴

DADES CARACTERÍSTIQUES Eurocodi 2 (segons les combinacions de càrrega i quantia)		
Moment de fissuració	M _{cr}	235487587,683 Nmm
Moment màxim	M _{màx}	353231381,525 Nmm
Carrega característica	g+q	44,154 Nmm
Càrrega permanents (g)	q _p	13,246 N/mm
Sobrecàrrega (q)	q _{sc}	30,908 N/mm
Coefficient reductor	β	0,50
Coefficient de simultaneïtat	ψ	0,30

Figura 8 – Dades comuns i calculades Eurocodi 2

La segona part, segueix el càlcul de tots els valors intermedis de la norma:

CÀLCULS SEGONS Eurocodi 2		
Resistència característica formigó	f_{cm}	38,000 MPa
Mòdul elàstic formigó	E_c	32836,568 MPa
Càrrega característica	Q_{max}	44,154 N/mm
Càrrega quasi permanent	Q_{qp}	22,519 N/mm
Moment quasipermanent	M_{qp}	180148004,578 Nmm
Inèrcia bruta	I_b	19860666666,667 mm ⁴
Mòdul elàstic efectiu formigó	$E_{c,eff}$	10945,523 MPa
Coefficient d'homogeneïtzació	n	6,091
Àrea inferior equivalent	$A_{s,eq}$	52076,088 mm ²
Àrea superior equivalent	$A_{s,eq'}$	10415,218 mm ²
Coefficient d'homogeneïtzació efectiu	n_{eff}	18,272
Àrea inferior equivalent efectiva	$A_{s,eq,eff}$	156228,263 mm ²
Àrea superior equivalent efectiva	$A_{s,eq,eff'}$	31245,653 mm ²
Distància centre de gravetat secció	y_{cdg}	325,871 mm
Inèrcia instantània	I	23913166887,524 mm ⁴
Inèrcia efectiva secció sense fissurar	I_1	31705825024,779 mm ⁴
Centre de gravetat de la secció	x	197,080 mm
Inèrcia secció fissurada	I_{cr}	9817790118,499 mm ⁴
Inèrcia equivalent	I_e	11060683106,001 mm ⁴
Línia neutra efectiva secció fissurada	x_{fis}	277,683 mm
Inèrcia efectiva secció fissurada	I_2	22106524668,135 mm ⁴
Rigidesa efectiva secció sense fissurar	EI_1	347036826805205,000 Nmm ²
Rigidesa efectiva secció fissurada	EI_2	241967467067169,000 Nmm ²
Resistència tracció formigó	f_{ctm}	2,896 MPa
Resistència a flexotracció del formigó	$f_{ctm,fl}$	2,896 MPa
Moment de fissuració	M_{cr}	235487587,683 Nmm
Coefficient de distribució	ζ	0,778
Moment màxim	M_{max}	353231381,525 Nmm
Fletxa instantània + fluència	f_i	3,461 mm
Fletxa retracció + fluència	f_{ii}	4,963 mm
Fletxa instantània + fluència mitjana	δ	3,307 mm
Curvatura de la retracció		
Secció sense fissurar		
	$S_{s,i,tensio}$	2087302,865 mm ³
	$S_{s,i,compressió}$	471739,4269 mm ³
	$S_{s,i}$	1615563,438 mm ³
	Curvatura (1/r)	4,18978E-07 mm ⁻¹
Secció fissurada		
	$S_{s,i,tensio}$	2499307,61 mm ³
	$S_{s,i,compressió}$	389338,4781 mm ³
	$S_{s,i}$	2109969,131 mm ³
	Curvatura (1/r)	7,84805E-07 mm ⁻¹
Fletxa característica secció sense fissurar	$\hat{f}_{l,scs}$	3,352 mm
Fletxa característica secció fisurada	$\hat{f}_{ll,scs}$	6,278 mm
Fletxa retracció mitjana	\hat{f}_{rcs}	5,628 mm
FLETXA TOTAL	δ_{tot}	8,93 mm

Figura 9 – Càlcul valors intermedis segons Eurocodi 2

La quarta pestanya, conté l'aplicació de la proposta de nou redactat d'Eurocodi 2. Es divideix en dues parts:

La primera, mostra les dades comuns, les dades geomètriques calculades i les dades característiques segons el cas, que inclou els coeficients específics de cada norma:

DADES COMUNS		
Característiques geomètriques		
Longitud biga	L	8000 mm
Amplada de la secció	b	1000 mm
Alçada de la secció	h	620 mm
Distància des de la part superior a l'armat a tracció	d	570 mm
Distància des de la part superior de l'armat de compressió	d'	50 mm
Característiques fixes		
Mòdul elàstic armadures	E _s	200000 MPa
Quantia armadura de compressió	ρ	0,015
Quantia armadura de tracció	ρ'	0,003
Combinacions		
Resistència característica del formigó	f _{ck}	30 MPa
Coeficient de fluència	φ	2
Deformació deguda a la retracció	E _{cs}	0,00045
Relació de càrregues		
q/(g+q)		0,3
M/M _{cr}		1,5

DADES GEOMÈTRIQUES CALCULADES		
Àrea armadura de tracció	A _s	8550 mm ²
Àrea armadura de compressió	A _s '	1710 mm ²
Àrea de la secció	A _c	620000 mm ²
Inèrcia bruta	I _b	19860666667 mm ⁴

DADES CARACTERÍSTIQUES Proposta Eurocodi 2		
Moment de fissuració	M _{cr}	156843750,5
Moment màxim	M _{màx}	235265625,8
Carrega característica	g+q	44,15392269
Càrrega permanents (g)	q _p	13,24617681
Sobrecàrrega (q)	q _{sc}	30,90774588
Coef. magnificació càrrega permanent	Υ _G	1,35
Coef. magnificació sobrecàrrega	Υ _Q	1,5
Resistència a compressió formigó	f _{cd}	20 MPa
Tensió de fluència de l'acer	f _{yd}	400 MPa

Figura 10. Dades comuns i calculades proposta Eurocodi 2

La segona part, segueix el càlcul de tots els valors intermedis de la norma:

CÀLCULS SEGONS proposta Eurocodi 2		
Resistència característica formigó	f_{cm}	38,000 MPa
Mòdul elàstic formigó	E_c	35300,742 MPa
Càrrega característica	q_{max}	44,154 N/mm
Càrrega quasi permanent	q_{qp}	22,519 N/mm
Àrea secció bruta	A_c	620000,000 mm ²
Inèrcia bruta	I_b	19860666666,667 mm ⁴
Mòdul elàstic efectiu formigó	$E_{c,eff}$	11766,914 MPa
Coefficient homogeneïtzació	n	16,997
Càrrega distribuïda ELU	q_{ELU}	64,244 N/mm
Moment degut a la càrrega ELU	M_{ELU}	513951660,119 Nmm
Moment adimensional	μ	0,0790938
	ω_2	0,0000000
Quantia mecànica	ω_1	0,0824967
Àrea de compliment	A_s	8550,000 mm ²
Armadura requerida	$\rho \cdot b \cdot d$	2351,155 mm ²
Resistència tracció formigó	f_{ctm}	2,896
Resistència a flexotracció del formigó	$f_{ctm,fl}$	2,896
Quantia mecànica de fissuració	ω_{cr}	0,045 4,46%
Coefficient efectes fissuració en fluència	k_i	0,823
Càlcul de quantia requerida	ρ_l	0,004
Coefficient efectes fissuració en retracció	k_s	1,463
Càlcul de quantia real	ρ_{prov}	0,015
Càlcul de quantia mecànica real	ω_{prov}	0,300
Coefficient d'excès d'armadura	k_w	0,405
Fletxa lineal elàstica de les càrregues	δ_{LOADS}	5,139 mm
Curvatura de la retracció		
Respecte el centre de gravetat de la secció		
	$S_{S,i,tensió}$	611300,349 mm ³
	$S_{S,i,compressió}$	0 mm ³
	$S_{S,i}$	611300,349 mm ³
	Curvatura ($1/r$)	2,35419E-07 mm ⁻¹
Fletxa retroacció	δ_{ECS}	1,883 mm
FLETXA TOTAL	δ_{tot}	7,57 mm

Figura 11 – Càlcul valors intermedis segons proposta Eurocodi 2

La cinquena pestanya, conté l'aplicació de la proposta feta pel grup de recerca AMADE. Es divideix en dues parts:

La primera, mostra les dades comuns, les dades geomètriques calculades i les dades característiques segons el cas, que inclou els coeficients específics de cada norma:

DADES COMUNS		
Característiques geomètriques		
Longitud biga	L	8000 mm
Amplada de la secció	b	1000 mm
Alçada de la secció	h	620 mm
Distància des de la part superior a l'armat a tracció	d	570 mm
Distància des de la part superior de l'armat de compressió	d'	50 mm
Característiques fixes		
Mòdul elàstic armadures	E _s	200000 MPa
Quantia armadura de compressió	ρ	0,015
Quantia armadura de tracció	ρ'	0,003
Combinacions		
Resistència característica del formigó	f _{ck}	30 MPa
Coefficient de fluència	φ	2
Deformació deguda a la retracció	ε _{cs}	0,00045
Relació de càrregues		
q/(g+q)		0,3
M/M _{cr}		1,5

DADES GEOMÈTRIQUES CALCULADES		
Àrea armadura de tracció	A _s	8550 mm ²
Àrea armadura de compressió	A _s '	1710 mm ²
Àrea de la secció	A _c	620000 mm ²
Inèrcia bruta	I _b	19860666667 mm ⁴

DADES CARACTERÍSTIQUES AMADE (segons les combinacions de càrrega i quantia)		
Moment de fissuració	M _{cr}	235487587,7
Moment màxim	M _{màx}	353231381,5
Carrega característica	g+q	44,154
Càrrega permanents (g)	q _p	13,246
Sobrecàrrega (q)	q _{sc}	30,908
Coefficient reductor	β	0,50
Coefficient de simultaneïtat	ψ	0,30

Figura 12. Dades comuns i calculades proposta AMADE

La segona part, segueix el càlcul de tots els valors intermedis de la norma:

CÀLCULS SEGONS mètode AMADE		
Resistència característica formigó	f_{cm}	38,000 MPa
Mòdul elàstic formigó	E_c	32836,568 MPa
Càrrega característica	q_{max}	44,154 N/mm
Coefficient d'homogeneïtzació	n	6,091
Quantia d'armat	ρ_f	0,015
Centre de gravetat de la secció	x	197,080 mm
Inèrcia bruta	I_b	19860666666,667 mm ⁴
Inèrcia secció fissurada	I_{cr}	9817790118,499 mm ⁴
Càrrega quasi permanent	q_{qp}	22,519 N/mm
Moment degut a la càrrega instantània	M_{ia}	353231381,525 Nmm
Moment degut a la càrrega sostinguda	M_{sus}	180148004,578 Nmm
Àrea inferior equivalent	$A_{s,eq}$	52076,088 mm ²
Àrea superior equivalent	$A_{s,eq'}$	10415,218 mm ²
Distància al centre de gravetat	y_{cdg}	325,871 mm
Inèrcia secció sense fissurar	I_l	23913166887,524 mm ⁴
Resistència tracció formigó	f_{ctm}	2,896 MPa
Moment de fissuració	M_{cr}	235487587,683 Nmm
Inèrcia equivalent	I_e	11060683106,001 mm ⁴
Fletxa deguda a la càrrega permanent	δ_{sus}	3,307 mm
Coefficient multiplicatiu fluència	k_{creep}	0,441
Coefficient multiplicatiu retracció	k_{sh}	1,302
Fletxa	δ	12,991 mm
Coef. corrector per ús d'acer (en lloc de FRP) i tenir en compte A_s'	ψ	0,732
Coefficient multiplicatiu fluència corregit	$\psi \cdot k_{creep}$	0,323
Coefficient multiplicatiu retracció corregit	$\psi \cdot k_{sh}$	0,954
FLETXA TOTAL	δ_{tot}	9,51 mm

Figura 13 – Càlcul valors intermedis segons mètode AMADE

La sisena pestanya, conte un quadre resum de tots els valors de fletxa amb les dades geomètriques, propietats i valors de la fletxa obtinguda, per poder comparar-los:

Seccions	Formigó	g / (g + q)	M/Mcr	Fletxa (mm) segons normativa			
				EHE-08	EC-2	EC-2 prop.	AMADE
Cas 1 b = 1000 h = 620 d=570 d'=50 ρ=0,015 ρ'=0,003	Formigó 1: fck=30MPa/φ=2,0/εcs=450-10-6	0,3	1,5	9,29	8,93	7,57	9,51
			2,5	16,83	12,00	12,47	12,31
			4,5	30,91	17,24	21,16	17,67
		0,45	1,5	11,20	9,62	8,16	10,23
			2,5	20,29	13,23	13,75	13,61
			4,5	37,27	19,51	23,95	20,07
	0,6	1,5	13,11	10,30	8,75	10,95	
		2,5	23,76	14,46	15,01	14,90	
		4,5	43,63	21,79	26,72	22,47	
	Formigó 2: fck=50MPa/φ=1,5/εcs=400-10-6	0,3	1,5	11,87	9,32	8,34	9,76
			2,5	22,11	13,32	13,93	13,27
			4,5	40,89	20,25	24,07	19,96
		0,45	1,5	14,32	10,21	9,16	10,64
			2,5	26,66	14,94	15,65	14,87
			4,5	49,31	23,27	27,71	22,95
	0,6	1,5	16,76	11,10	9,97	11,53	
		2,5	31,21	16,56	17,35	16,48	
		4,5	57,72	26,28	31,33	25,94	
Cas 2 b = 1000 h = 450 d=400 d'=50 ρ=0,005 ρ'=0,0015	Formigó 1: fck=30MPa/φ=2,0/εcs=450-10-6	0,3	1,5	14,36	17,04	14,24	19,03
			2,5	43,55	26,69	25,54	28,14
			4,5	96,43	43,15	47,86	45,16
		0,45	1,5	17,31	19,00	15,89	21,11
			2,5	52,51	30,42	29,05	32,09
			4,5	116,29	50,18	55,53	52,62
	0,6	1,5	20,27	20,96	17,52	23,18	
		2,5	61,48	34,14	32,51	36,04	
		4,5	136,14	57,21	63,14	60,07	
	Formigó 2: fck=50MPa/φ=1,5/εcs=400-10-6	0,3	1,5	17,64	19,61	17,16	21,16
			2,5	56,93	32,37	31,12	33,10
			4,5	130,32	54,71	58,71	55,39
		0,45	1,5	21,27	22,27	19,48	23,86
			2,5	68,65	37,45	35,92	38,26
			4,5	157,14	64,31	68,92	65,15
	0,6	1,5	24,90	24,93	21,76	26,57	
		2,5	80,37	42,54	40,66	43,43	
		4,5	183,97	73,91	79,06	74,90	

Figura 14 – Resultat de fletxes per cada mètode

ANNEX AL PRESSUPOST

Pressupost

D.1. Quadre de preus

	CONCEPTE	DESCRIPCIÓ	UNITATS	PREU (€/u)
1	Estudi previ	Recerca d'informació, documentació, adquisició i estudi d'articles i propostes.	h	16
2	Amortització programari	Programes utilitzats (de redacció, càlcul) i internet.	u	15
3	Amortització eines processament d'informació	Ús d'ordinador, calculadora i demés equips necessaris per realitzar l'estudi.	u	30
4	Elaboració documents de càlcul per l'anàlisi	Generar el document excels, corregir-los i comprovar el correcte desenvolupament.	h	16
5	Redacció anàlisi i base teòrica	Elaboració del document de text objecte de l'anàlisi.	h	16

D.2. Pressupost parcial

D.2.1 Estudi previ

	CONCEPTE	AMIDAMENT	PREU UNITARI	UNITATS	PREU TOTAL
1	Estudi previ	15	16	€/h	240
2	Programari	2	15	€/u	30
3	Elements processament	2	30	€/u	60

D.2.2. Elaboració document de càlcul

	CONCEPTE	AMIDAMENT	PREU UNITARI	UNITATS	PREU TOTAL
4	Elaboració documents de càlcul	45	16	€/h	720

D.3. Revisió de resultats i redactat

	CONCEPTE	AMIDAMENT	PREU UNITARI	UNITATS	PREU TOTAL
5	Interpretació dels resultats	25	16	€/h	400
6	Revisió document de càlcul	15	16	€/h	240
7	Correcció document de càlcul	5	16	€/h	80
8	Redacció anàlisi i base teòrica	40	16	€/h	640

D.4. Pressupost global

Pressupost elaboració anàlisi	
Capítol	Import
1 Estudi previ	240 €
2 Programari	30 €
3 Elements processament	60 €
4 Elaboració documents de càlcul	720 €
5 Interpretació dels resultats	400 €
6 Revisió document de càlcul	240 €
7 Correcció document de càlcul	80 €
8 Redacció anàlisi i base teòrica	640 €
Total (sense iva)	2.410 €
IVA	506 €
Total (iva inclòs)	2.916 €