



EPS

Escola Politècnica
Superior

Treball final de grau

Estudi: Enginyeria mecànica

Títol: Estudi comparatiu entre cobertes de dipòsits d'aigua industrials de formigó armat amb acer o armat amb fibra de vidre

Document: MEMÒRIA

Alumne: Aina Martínez Soler

Director/Tutor: Miquel Llorens Sulivera i Lluís Torres Llinas
Departament: Enginyeria mecànica i de la construcció industrial
Àrea: Mecànica de medis continus i teoria d'estructures

Convocatòria (mes/any): juny 2014

INDEX

1.	Introducció.....	2
1.1.	Antecedents	2
1.2.	Objecte del projecte	2
1.3.	Abast.....	2
2.	Metodologia.....	4
3.	Comparativa de fórmules del càlcul de fibra amb les del càlcul d'acer	5
3.1.	Exemple biga birecolzada armada amb acer	6
3.2.	Comparativa fórmules (acer i fibra de vidre)	15
3.3.	Comparativa resultats obtinguts en els dos casos	17
4.	Anàlisi de la normativa americana pel càlcul d'una coberta.....	19
4.1.	Predimensionament	19
4.2.	Càlcul de les càrregues.....	20
4.3.	Resistència FRP.....	20
4.4.	Flexió.....	21
4.5.	Fissuració.....	23
4.6.	Fletxa	24
4.7.	ELU.....	25
4.8.	Tallant	26
4.9.	Ancoratge.....	27
4.10.	Càlculs de la resta del dipòsit.....	28
5.	Confecció del programa de càlcul	29
5.1.	Programa 1: Geometria.	29
5.2.	Programa 2: Coberta.....	30
5.3.	Programa 3: Càlculs.	33
6.	Resultats i Conclusions	34
7.	Relació de documents	36
8.	Bibliografia.....	36
9.	Agraïments.....	37

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

Els components estructurals dels dipòsits d'aigua industrials (de grans dimensions) que solen estar construïts amb formigó armat i per això estan condicionats pels següents aspectes: la corrosió de les armadures (durabilitat), la necessitat de limitar l'amplada de fissuració (durabilitat i estanqueïtat) i la quantitat necessària per controlar la fissuració (cost econòmic). S'observa que la coberta del dipòsit resulta especialment susceptible de ser atacada pel clor en estat gasós.

La majoria d'aquestes limitacions es podrien millorar si canviéssim l'acer de l'armadura per un material que no es corroeixi tan fàcilment quan està en contacte amb l'aigua o àmbits humits. La fibra de vidre podria ser un material adient per millorar aquestes condicions.



Figura 1: Dipòsit d'aigua de formigó

El treball parteix del projecte d'un dipòsit d'aigua de vint metres de diàmetre construït amb formigó armat amb acer. A partir d'aquest projecte i de les fórmules de la normativa americana (ja que la normativa espanyola no contempla aquesta possibilitat) realitzarem el dimensionament per la coberta de formigó armada amb fibra de vidre.

1.2. Objecte del projecte

- Automatització del dimensionat d'un dipòsit d'aigua industrial de formigó armat amb acer.
- Anàlisi de la normativa americana per fibra de vidre envers la normativa espanyola per acer.
- Aplicar el càlcul de la normativa americana a una coberta de formigó armada amb fibra de vidre.
- Automatització del dimensionament de la coberta de formigó armada amb fibra de vidre.
- Comparació dels resultats de la coberta armada amb acer i la coberta armada amb fibra de vidre.

1.3. Abast

El projecte parteix de l'estudi dels fonaments teòrics en els que es basen els procediments de càlcul i dimensionament, tan amb la normativa espanyola com amb la americana, ja que la normativa espanyola encara no contempla la possibilitat d'armar el formigó amb fibra de vidre.

Seguidament la realització, seguint dos procediments diferents, d'un exercici d'exemple d'una biga birecolzada per comparar els dos mètodes de càlcul: per armar amb acer hem utilitzat la normativa Espanyola (EHE-08) i per armar amb fibra de vidre la normativa americana (ACI 440.1R-06).

Després de partit de l'estudi previ d'un dipòsit de formigó armat amb acer (*annex B i Figura 2*), he realitzat una coberta pel mateix dipòsit, però armada amb fibra de vidre.

A continuació he desenvolupat i implementat una aplicació amb MatLab, orientada a la comprovació assistida de les dues solucions.

Finalment analitzarem les dades obtingudes en cada cas, farem una comparativa dels resultats obtinguts redactarem unes conclusions.

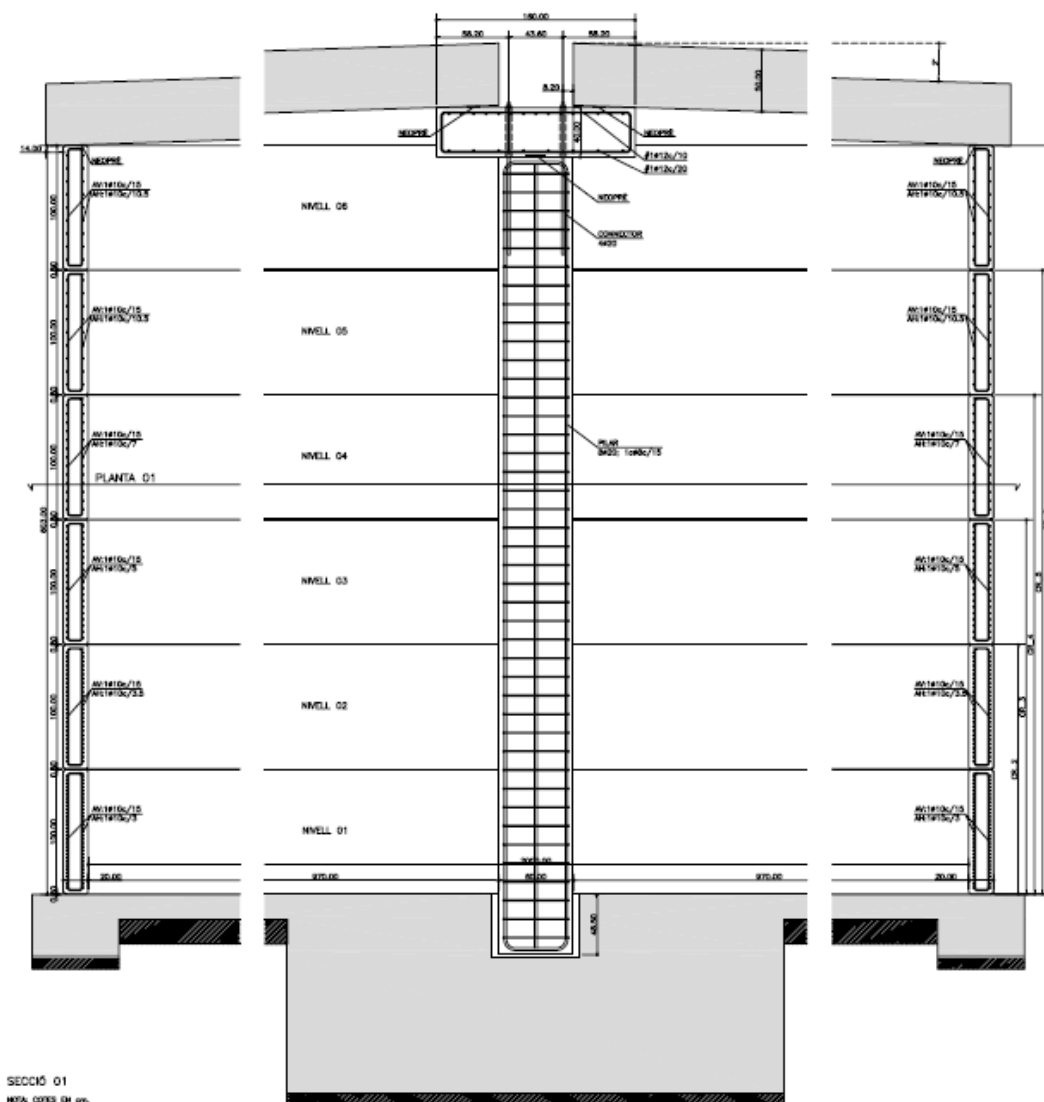


Figura 2: Imatge del plànol de l'annex B.2 del dipòsit d'aigua armat amb acer.

2. METODOLOGIA

Per poder entendre el desenvolupament del treball aquest apartat explicarà el procediment que hem seguit per obtenir els resultats finals.

Primer, el client ens va demanar que busquéssim una solució per la corrosió de les cobertes dels dipòsits d'aigua industrial, ja que s'han de canviar contínuament i això comporta un augment important dels costos. Vam estudiar les diverses possibilitats que ofereix el mercat i és quan vam trobar la possibilitat d'armar el formigó amb fibra de vidre. Aquest material ens ofereix més resistència a la corrosió en contacte amb l'aigua i això ens ha dut a voler fer un pre-dimensionament.

Per realitzar aquest pre-dimensionament vam veure que la normativa espanyola no contempla la possibilitat d'armar el formigó amb fibra de vidre. Això ens va portar a fer una investigació de les diverses normatives que podríem aplicar. Al final ens vam decantar per l'americana i és la que hem aplicat al nostre treball.

Per poder estudiar la normativa americana i poder fer una comparativa amb l'espanyola vam realitzar un exercici d'una biga simple birecolzada on calculàvem totes les possibles estats límits (tallant, fissuració, flexió,...). Aquest exercici ja estava resolt en un exemple dins la normativa americana, el qual està adjuntat a l'*annex C* i el que vam fer va ser estudiar el mateix cas armant-lo amb acer i utilitzant la normativa espanyola. A partir dels resultats obtinguts en els dos casos vam treure unes primeres conclusions per encaminar-nos en els possibles resultats que ens donaria fer un exercici més complex com és el de la coberta del dipòsit.

Seguidament, per realitzar els càlculs de resistència del dipòsit (tan per fibra com per acer) vaig confeccionar un programa amb el MatLab en el què, entrant les dades necessàries (geometria, dades dels materials, diàmetre i separació de l'armat) obtenim els resultats de cada comprovació i el programa ens diu si compleix la normativa o no. Així doncs hem estat capaços de resoldre dos exercicis complexos que es basen en prova i error. D'aquesta manera, si amb el programa es veu que no compleix és fàcil canviar les dades del inici (com l'armat o el cantell) i poder-ho tornar a recalculat tot en segons.

Un cop realitzat el programa només hem hagut de posar les dades i anar executant/recalculant fins que hem trobat un dimensionament que compleix la normativa corresponent.

3. COMPARATIVA DE FORMULES DEL CàLCUL DE FIBRA AMB LES DEL CàLCUL D'ACER

Per poder resoldre el mateix exercici, però armant-lo amb els diferents materials, hem hagut de recórrer a dues normatives diferents. Això és degut a que la normativa espanyola (*EHE-08*) encara no ha desenvolupat un apartat on parli de formigó armat amb fibra de vidre, tot i que recentment ha tret un annexa on parla de la fibra de vidre (*Annex 14*), però per utilitzar-la per recobrir el formigó, sobretot en pilars de ponts o estructures amb possible contacte amb l'aigua.



Figura 3: Apartats de la EHE-08 on parla-la de les fibres

Aquest buit d'informació de la normativa espanyola l'hem omplert agafant les fórmules de la normativa americana que recull la utilització de la fibra de vidre per armar el formigó, no només per recobrir-lo.

ACI 440.1R-06

Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars

Reported by ACI Committee 440

Figura 4: Apartats de la ACI 440 on parla-la de les fibres per armar el formigó

Per poder veure les principals diferència dels dos procediments utilitzats hem realitzat el mateix exercici però utilitzant les dues normatives diferents, per tant, armant-lo amb els dos materials. Hem agafat un exemple resolt a l'ACI 440. 1R-06 que trobarem a l'*annex C* i amb les mateixes dimensions i hem resolt l'exercici armant-lo amb acer, a continuació observem el procediment i els resultats:

3.1. Exemple biga birecolzada armada amb acer

Dimensionament d'una biga birecolzada (com la de la *Figura 5*) de secció rectangular de longitud 3,35m segons l'*EHE-08*. Aquesta biga està sotmesa a una càrrega morta de 3kN/m (sense contar el pes propi de la biga) i una sobrecàrrega d'ús de 5,8kN/m.

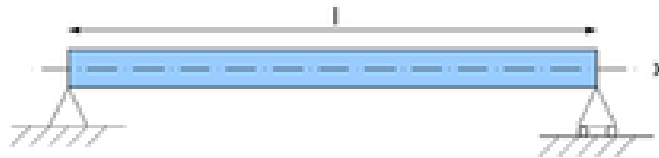


Figura 5. Biga birecolzada

La resistència de càlcul del formigó utilitzada per l'exemple de l'ACI és de 27,6 MPa i el límit de la fletxa és de $L/240$. Però en aquest exemple hem utilitzat les dades proporcionades per la normativa espanyola de 35MPa de resistència característica, un coeficient de minoració del 1,5 i una fletxa màxima de $L/300$. En la següent taula podem veure les dades dels materials utilitzats per resoldre l'exercici:

	FORMIGÓ PREFABRICAT	ACER
Resistència característica (N/mm ²)	35.00	500.00
Coeficient de minoració	1.50	1.15
Resistència de càlcul (N/mm ²)	23.33	434.78
Designació	HA-35	B500S

Taula 1: Característiques dels materials

Dimensionament.

Hem agafat les dimensions del exemple realitzat a l'ACI 440-1R que trobarem a l'*annex C* i són els següents:

Alçada de la biga: $h = 305mm$

Amplada de la biga: $b = 178mm$

Cantell útil: $d = 250mm$

Càlcul de les càrregues

Per calcular les càrregues les multipliquem per els coeficients que marca la *Taula 12.1.a* de l'EHE-08 (*Taula 2*) i podem observar que per les càrregues permanents tenim un coeficient de 1,35 i per les càrregues d'us un coeficient de 1,5.

Tabla 12.1.a

Coeficientes parciales de seguridad para las acciones, aplicables para la evaluación de los Estados Límite Últimos

Tipo de acción	Situación persistente o transitoria		Situación accidental	
	Efecto favorable	Efecto desfavorable	Efecto favorable	Efecto desfavorable
Permanente	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,35$	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
Pretensado	$\gamma_P = 1,00$	$\gamma_P = 1,00$	$\gamma_P = 1,00$	$\gamma_P = 1,00$
Permanente de valor no constante	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,50$	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
Variable	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,50$	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,00$
Accidental	—	—	$\gamma_A = 1,00$	$\gamma_A = 1,00$

Taula 2: Coeficients de seguretat per les accions en Estats Límits Últims

Finalment seguint la fórmula dels Estats Límits Últims obtenim que la càrrega lineal majorada que suporta la biga és de $q = 12,75 \text{ kN/m}$.

Seguidament calculem el tallant i el moment màxim:

$$V_d = 12,75 \cdot \frac{L}{2} = 2 \cdot \frac{3,35}{2} = 21,356 \text{ kN} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$M_d = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{12,75 \cdot 3,35^2}{8} = 17,89 \text{ kNm} \quad (\text{Eq. 2})$$

Dimensionament a flexió

En primer lloc, pel dimensionament a flexió plantejarem, per a cadascuna de les seccions d'estudi, les dues equacions d'equilibri:

$$\sum F_{H,int} = F_{H,ext} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\sum M_{int} = M_{ext} \quad (\text{Eq. 4})$$

Les dues equacions anteriors configuren un sistema que presenta dues incògnites: la profunditat del cap comprimit i l'àrea teòrica d'acer que cal disposar.

L'armadura teòrica per resistir els esforços a flexió es determina mitjançant les següents fórmules:

$$y = d \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_d}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2}} \right] \quad (\text{Eq. 5})$$

$$A_s = \frac{f_{cd} \cdot b \cdot y}{f_{yd}} \quad (\text{Eq. 6})$$

On:

- y Profunditat del cap comprimit.
- d Cantell útil.
- M_d Moment de càlcul.
- f_{cd} Resistència de càlcul del formigó.
- f_{yd} Resistència de càlcul de l'acer.
- b Amplada de la secció de formigó armat.
- A_s Àrea de l'armat de cara traccionada.

La profunditat del cap comprimit ha donat $y = 17,868mm$ i l'armadura de la cara traccionada $A_s = 170,6877 mm^2$. Amb aquesta àrea podem agafar 2 rodons de $\emptyset 12$, això ens donarà una àrea de $226,195 mm^2$.

Quanties mínimes a flexió:

A més de calcular l'armadura teòrica per resistir els esforços pèssims és necessari determinar les quanties mínimes.

- Quantia mecànica mínima a flexió (per evitar la ruptura fràgil en elements sotmesos a flexió simple, on l'armadura a tracció ha de ser capaç d'absorbir un esforç menor al de tracció desenvolupat pel formigó, únicament en el moment en què es produeix la fissuració):

$$A_{s1} \cdot f_{yd} \geq \frac{W_1}{z} \cdot f_{ctm,fl} \quad (\text{Eq. 17})$$

- Quantia geomètrica mínima a flexió (per minimitzar els efectes de la retracció):

$$A_{s2} \cdot f_{yd} > \frac{2,8}{1000} \cdot A_c \quad (\text{Eq. 18})$$

On:

A_{s1} Àrea d'armat a cara traccionada.

A_{s2} Àrea d'armat a cara comprimida.

A_c Àrea de la secció de formigó.

$f_{ctm,fl}$ Resistència mitjana a flexotracció del formigó. Valor extret de l'equació 30.

W_1 Moment resistent de càlcul.

z És un 80% de l'alçada.

f_{yd} Resistència de càlcul de l'acer.

El resultat de les quanties que hem obtingut són de $A_{s1} = 106,774 \text{ mm}^2$ i de $A_{s2} = 149,52 \text{ mm}^2$, com que els dos valors són inferior a l'àrea d'acer podem dir que l'armat a flexió de la biga compleix tots els requeriments necessàries.

Per la nostre secció no farà falta armadura a compressió, però posarem l'armadura mínima per suportar els estreps, la calcularem com un 30% de l'armadura a tracció i posarem un armat de 2Ø8 que és el diàmetre mínim que podríem posar.

Dimensionament a tallant

Seguint les formules de l'EHE-08 calcularem l'esforç tallant d'esgotament per tracció de l'ànima, que es dedueix amb l'expressió següent:

$$V_{cu} = \left(\frac{0,18}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cv})^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma'_{cd} \right) \cdot b_0 \cdot d \quad (\text{Eq.7})$$

Com a valor mínim:

$$V_{cu_{minim}} = \left(\frac{0,075}{\gamma_c} \cdot \xi^{3/2} \cdot f_{cv}^{1/2} \cdot 0,15 \cdot \sigma'_{cd} \right) \cdot b_0 \cdot d \quad (\text{Eq. 8})$$

On:

V_d Esforç tallant de càlcul.

V_{u2} Esforç tallant d'esgotament per tracció de l'ànima.

f_{cv} Resistència efectiva del formigó a tallant. Valor extret de l'equació 9.

b_0 Amplada neta mínima de l'element.

d Cantell útil.

ρ_l Quantia geomètrica d'armadura longitudinal principal a tracció, valor extret de l'eq. 13.

ξ Valor extret de l'eq.10.

γ_c Coeficient de minoració del formigó.

σ'_{cd} Tensió axial mitja a l'ànima de la secció (compressió positiva).

$$f_{cv} = f_{ck} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$\xi = \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \leq 0,02 \quad (\text{Eq. 10})$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{b \cdot d} \quad (\text{Eq. 11})$$

On:

- f_{ck} Resistència característica del formigó.
 A_s Àrea d'armat d'acer passiu.
 A_p Àrea d'armat d'acer actiu.

Amb aquestes fórmules obtenim que el tallant és de 26,360 kN, com que és un valor inferior als $V_d = 21,356$ kN no ens farà falta armadura a tallant.

Farem els càlculs per saber la separació dels estreps, primer calcularem l'esforç tallant per compressió obliqua de la biga, que es dedueix amb la següent formula:

$$V_d \leq V_{u1} \quad (\text{Eq. 12})$$

$$V_{u1} = K \cdot f_{1cd} \cdot b_0 \cdot d \cdot \frac{\cotg \theta + \cotg \alpha}{1 + \cotg^2 \theta} \quad (\text{Eq. 13})$$

On:

- V_d Esforç tallant de càlcul.
 V_{u1} Esforç tallant d'esgotament per compressió obliqua de l'ànima.
 K Coeficient que depèn de l'esforç axial.
 b_0 Amplada neta mínima de l'element.
 d Cantell útil.
 θ Angle de les armadures amb l'eix de la peça.
 α Angle entre les bieles de compressió de formigó i l'eix de la peça.
 f_{1cd} Resistència a compressió del formigó. Valor extret de l'equació 14

$$f_{1cd} = 0,60 \cdot f_{cd} \rightarrow f_{ck} \leq 60 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Eq. 14})$$

On:

- f_{cd} Resistència de càlcul del formigó.
 f_{ck} Resistència característica del formigó.

En els casos que $\theta = 45^\circ$ i $\alpha = 90^\circ$ l'equació anterior es simplifica en:

$$V_{u1} = 0,30 \cdot f_{cd} \cdot b_0 \cdot d \quad (\text{Eq. 15})$$

Quantia a tallant:

Aplicant la següent formula hem obtingut que el tallant és de 311,5 kN, com que aquest valor compleix que $V_d \leq 0,2 \cdot V_{u1}$ utilitzarem la forma de l'equació 16 per calcular la separació dels estreps, quantia a tallant:

$$s_t \leq 0,75 \cdot d(1 + \text{tg}(90)) \neq 600 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 16})$$

Amb aquest equació obtenim que la separació és de 373,50 mm, aquest valor l'arrodonirem a 300mm . Finalment tindrem Ø8c/300 d'armadura a compressió.

ELS: Fissuració

Per determinar si es compleix l'Estat Límit de Fissuració, calcularem verificant que aquesta no supera el valor màxim d'obertura de fissura estipulat en 0,30mm. Per a la realització dels càlculs s'ha tingut en compte l'armadura citada als apartats anteriors. L'obertura de fissura es calcula mitjançant la següent expressió:

$$w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} \quad (\text{Eq. 19})$$

On:

w_k Amplada de fissura.

β Coeficient que relaciona la fissura mitja amb la fissura característica (en aquest cas, agafa el valor de 1,7 segons l'article 49.2.4 de l'EHE-08).

s_m Separació mitja de fissura. Valor extret de l'equació 20.

ε_{sm} Allargament mig de l'armadura. Valor extret de l'equació 21.

$$s_m = 2 \cdot c + 0,2 \cdot s + 0,4k_1 \cdot \frac{\emptyset \cdot A_{c,eficac\grave{a}}}{A_s} \quad (\text{Eq. 20})$$

On:

c Recobriment de les armadures traccionades.

s Distància entre barres longitudinals.

k_1 Coeficient que representa la influència del diagrama de traccions. En flexió simple pren el valor de 0,125 segons l'article 23.5 del Jimenez Montoya.

\emptyset Diàmetre de la barra traccionada més grossa.

$A_{c,eficac\grave{a}}$ Allargament mig de l'armadura.

A_s Allargament mig de l'armadura. Valor extret de l'equació 18

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - k_2 \cdot \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \geq 0,4 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (\text{Eq. 21})$$

On:

σ_s Tensió de servei de l'armadura passiva en la hipòtesis de secció fissurada. Valor extret de l'equació 22.

σ_{sr} Tensió de servei de l'armadura passiva en secció fissurada en l'instant en el qual fissura el formigó. Valor extret de l'equació 23.

E_s Mòdul de deformació longitudinal de l'acer.

k_2 Coeficient que pren el valor 0,50 segons l'article 49.2.4 de l'EHE-08.

Tots aquests paràmetres són coneguts a excepció de σ_s i σ_{sr} , els valors dels quals s'obtenen a partir dels esforços sol·licitants mitjançant les expressions de l'article 23.5 del Jimenez Montoya:

$$\sigma_s = n \cdot \frac{d - X}{I_f} \cdot M_k \quad (\text{Eq. 22})$$

$$\sigma_{sr} = n \cdot \frac{d - X}{I_f} \cdot M_f \quad (\text{Eq. 23})$$

On:

- n Coeficient d'homogeneïtzació entre l'acer i el formigó. Valor extret de l'equació 24.
 d Cantell útil de la peça.
 X Profunditat de la fibra neutra. Valor extret de l'equació 25.
 I_f Inèrcia de la secció fissurada. Valor extret de l'equació 28.
 M_k Moment amb què es comprova l'Estat límit de Fissuració (ELS).
 M_f Moment de fissuració. Valor extret de l'equació 29.

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (\text{Eq. 24})$$

$$\frac{X}{d} = n \cdot \rho_1 \cdot \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{d'}{d}\right)}{n \cdot \rho_1 \cdot \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2}}\right) \quad (\text{Eq. 25})$$

On:

- E_c Mòdul d'elasticitat del formigó.
 ρ_1 Quantia geomètrica armat a flexió. Valor extret de l'equació 26.
 ρ_2 Quantia geomètrica armat a compressió. Valor extret de l'equació 27.
 A_{s1} Àrea d'armat a cara traccionada.
 A_{s2} Àrea d'armat a cara comprimida.
 d' Recobriment.

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \quad (\text{Eq. 26})$$

$$\rho_2 = \frac{A_{s2}}{b \cdot d} \quad (\text{Eq. 27})$$

$$I_f = n \cdot A_{s1} \cdot (d - X) \cdot \left(d - \frac{X}{3}\right) + n \cdot A_{s2} \cdot (X - d') \cdot \left(\frac{X}{3} - d'\right) \quad (\text{Eq. 28})$$

$$M_f = f_{ctm,fl} \cdot W_b \quad (\text{Eq. 29})$$

On:

- b Amplada de la secció.
 $f_{ctm,fl}$ Resistència mitja a flexotracció del formigó. Valor extret de l'equació 30.
 W_b Mòdul resistent de la secció bruta.

$$f_{ctm,fl} = \left\{ \text{màs} \left[\left(1,6 - \frac{h}{1000}\right) \cdot f_{ctm}; f_{ctm} \right] \right\} \quad (\text{Eq. 30})$$

On:

- h Cantell de la secció.
 f_{ctm} Resistència mitja a tracció del formigó. Valor extret de l'equació 31.

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (\text{Eq. 31})$$

On:

f_{ck} Resistència característica del formigó.

$$M_k = M_d/1,5 \quad (\text{Eq. 32})$$

Finalment hem obtingut una fissuració de $0,203 \text{ mm}$ i l'EHE-08 per formigó a ambients de classe IIa (que seria per un ambient que pateix corrosió però d'origen diferent a clorurs, és a dir, que no sol estar en contacte amb aigua) limita a $0,3 \text{ mm}$ l'amplada màxima de fissuració, com que l'amplada és inferior a la màxima complim les condicions requerides per la normativa.

ELS: Fletxa

Per calcular la fletxa màxima del exemple la normativa americana ho compara amb el valor de $L/240$, en canvi nosaltres utilitzarem els valors donats per *article 50 de l'EHE-08, Estats límits de deformació*, que serà el de $L/300$.

Primer començarem calculant la deformació instantània:

$$E_{cm} = 8500 \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (\text{Eq. 34})$$

On:

E_{cm} Mòdul de deformació longitudinal del formigó.

f_{cm} Resistència mitja a compressió del formigó a 28 dies.

$$I_e = \left(\frac{M_f}{M_u}\right)^3 \cdot I_b + \left[1 - \left(\frac{M_f}{M_u}\right)^3\right] \cdot I_f \leq I_b \quad (\text{Eq. 35})$$

I_e Inèrcia equivalent.

M_f Moment de fissuració de la peça. Valor extret de *l'equació 29*.

M_u Moment flector màxim aplicat, per la combinació característica, a la secció fins l'instant en que s'avalua la fletxa.

I_b Inèrcia de la secció bruta.

I_f Inèrcia de la secció fissurada a flexió simple. Valor extret de *l'equació 28*.

Per un element biarticulat la fletxa ve donada per l'expressió següent:

$$f_{m\grave{a}x} = \frac{5ql^4}{384E_cI_e} \quad (\text{Eq. 36})$$

On:

- $f_{m\grave{a}x}$ Fletxa instantània màxima.
 q Total de càrrega superficial permanent i variable.
 l Llum de càlcul.

La fletxa instantània ens ha donat un valor de $2,258\text{ mm}$, ara procedirem a calcular la fletxa diferida amb el coeficient següent:

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50 \cdot \rho'} \quad (\text{Eq. 37})$$

On:

- λ Factor corrector fletxa diferida.
 ξ Coeficient funció de la duració de la càrrega, que per càrrega permanent pren el valor el 2.0.
 ρ' Quantia geomètrica de l'armadura a compressió. Valor extret de l'equació 39.

$$\rho' = \frac{A_s'}{b_0 \cdot d} \quad (\text{Eq. 38})$$

On:

- A_s' Àrea d'armat a compressió.
 b_0 Amplada de la secció de formigó.
 d Cantell de la secció de formigó.

$$f_d = f_i \cdot \lambda \quad (\text{Eq. 39})$$

La fletxa diferida ens dona un valor de $1,488\text{ mm}$, procedim a sumar les dues fletxes i fer la comprovació.

$$f_T = f_d + f_i \quad (\text{Eq. 40})$$

$$\frac{f_T}{L} \leq \frac{1}{300} \quad (\text{Eq. 41})$$

El valor de la fletxa total és $11,16\text{ mm}$ i compleix de sobres les condicions requerides per la normativa, analitzarem el resultat a l'apartat 3.3. *Comparativa de resultats obtinguts en els dos casos.*

3.2. Comparativa fórmules (acer i fibra de vidre)

En aquest apartat compararem les dues normatives que hem utilitzat en el treball, aquí no veurem totes les formules necessàries per dur a terme el procediment de càlcul, només les més representatives de cada procediment, les secundàries (que ens serveixen per trobar valors essencials de les fórmules principals) les veurem representades en el procediment de càlcul de cada cas a l'apartat 3.1. pel cas de l'acer, i a l'apartat 4 en el cas de la fibra de vidre. Com que és impossible comparar fórmula a fórmula les hem agrupat per temes (tallant, fissuració, fletxa, quanties, ...)

Descripció	EHE-08	ACI 440.1R-06
Consideracions de càlcul:	$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,5}$ $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15}$	f_c' $f_{fu} = C_E \cdot f_{fu} *$ <p style="text-align: right;">(Eq. 43)</p>
Quanties mínimes: - Mínima - Geomètrica	$A_s \cdot f_{yd} \geq \frac{W_1}{z} \cdot f_{ctm,fl}$ <p style="text-align: right;">(Eq. 17)</p> $A_s \cdot f_{yd} > \frac{2,8}{1000} \cdot A_c$ <p style="text-align: right;">(Eq. 18)</p>	$A_{f,min} = \frac{4,9\sqrt{f'_c}}{f_{fu}} b_w d \geq \frac{330}{f_{fu}} b_w d$
Flexió:	$y = d \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_d}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2}} \right]$ <p style="text-align: right;">(Eq. 5)</p> $A_s = \frac{f_{cd} \cdot b \cdot y}{f_{yd}}$ <p style="text-align: right;">(Eq. 6)</p>	$\phi M_n \geq M_u$ <p style="text-align: right;">(Eq.51)</p> $\rho_{fb} = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_{fu}} \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{fu}}$ <p style="text-align: right;">(Eq. 44)</p> $\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d}$ <p style="text-align: right;">(Eq. 45)</p> <p>si $\rho_f < \rho_{fb}$</p> $M_n = A_f \cdot f_{fu} \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c_b}{2} \right)$ <p style="text-align: right;">(Eq. 49)</p> <p>si $\rho_f > \rho_{fb}$</p> $M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2$ <p style="text-align: right;">(Eq. 47)</p>

<p>Tallant</p>	<p>Tracció:</p> $V_{u2} = V_{cu} + V_{su}$ $V_{su} = A_{90^\circ} \cdot f_{y_{90d}} \cdot 0,90d$ $V_{cu} = \left(\frac{0,18}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cv})^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma'_{cd} \right) \cdot b_0 \cdot d$ <p>(Eq. 7)</p> <p>Compressió obliqua:</p> $V_d \leq V_{u1}$ <p>(Eq. 12)</p> $V_{u1} = K \cdot f_{1cd} \cdot b_0 \cdot d \cdot \frac{\cotg \theta + \cotg \alpha}{1 + \cotg^2 \theta}$ <p>(Eq. 13)</p> <p>Si $\theta = 45^\circ$ i $\alpha = 90^\circ$ es simplifica:</p> $V_{u1} = 0,30 \cdot f_{cd} \cdot b_0 \cdot d$ <p>(Eq. 15)</p> $s_t \leq 0,75 \cdot d(1 + tg(90)) \geq 600 \text{ mm}$ <p>(Eq. 16)</p>	$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w c$ <p>(Eq. 75)</p> $f_{fb} = (0,05 \frac{r_b}{d_b} + 0,3) f_{fu}$ <p>(Eq. 76)</p> $f_{fv} = 0,004 E_f \leq f_{fb}$ <p>(Eq. 77)</p> $s = \frac{\phi A_{fv} f_{fv} d}{(V_u - \phi V_c)}$ <p>(Eq. 78)</p>
<p>Fissuració</p>	$w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm}$ <p>(Eq. 19)</p> $s_m = 2 \cdot c + 0,2 \cdot s + 0,4k_1 \cdot \frac{\phi \cdot A_{c,eficax}}{A_s}$ <p>(Eq. 20)</p> $\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - k_2 \cdot \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \geq 0,4 \frac{\sigma_s}{E_s}$ <p>(Eq. 21)</p>	$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2} \right)^2}$ <p>(Eq. 59)</p> $f_f = \frac{M_{DL+LL}}{A_f d (1 - k/3)}$ <p>(Eq. 55)</p> $\beta = \frac{h - kd}{d(1 - k)}$ <p>(Eq. 56)</p>
<p>Deformació</p>	<p>Deformació instantània:</p> $f_{m\grave{a}x} = \frac{5ql^4}{384E_c I_e}$ <p>(Eq. 36)</p> <p>Deformació diferida:</p> $f_d = f_i \cdot \lambda$ <p>(Eq. 39)</p>	$(\Delta_i)_{DL} = \frac{w_{DL}}{w_{DL+LL}} (\Delta_i)_{DL+LL}$ <p>(Eq. 67)</p> $(\Delta_i)_{LL} = \frac{w_{LL}}{w_{DL+LL}} (\Delta_i)_{DL+LL}$ <p>(Eq. 68)</p>

	$f_T = f_d + f_i$ <p style="text-align: right;">(Eq. 40)</p>	$\lambda = 0.60\xi$ <p style="text-align: right;">(Eq. 69)</p>
	$\frac{f_T}{L} \leq \frac{1}{300}$ <p style="text-align: right;">(Eq. 41)</p>	$\Delta_{LT} = (\Delta_i)_{LL} + \lambda[(\Delta_i)_{DL} + 0.20(\Delta_i)_{LL}]$ <p style="text-align: right;">(Eq. 70)</p> $\Delta_{LT} \leq \frac{l}{240}$ <p style="text-align: right;">(Eq. 71)</p>

Taula 3: Comparativa de formules

3.3. Comparativa resultats obtinguts en els dos casos

En aquest apartat compararem els resultats obtinguts amb formigó i els resultats que ja teníem de l'exemple de l'ACI 440.1R-35. A continuació veiem una taula comparativa del resultats finals de cada apartat (*Taula 4*).

Descripció	ACI 440.1R-43	EHE-08
Càrrega per metre lineal	14,4 kN/m	12,75 kN/m
Armadura a flexió	2Ø19	2Ø12
Tallant	Ø10/120	Ø8/300
Fissuració	0,57 mm	0,203 mm
Fletxa	12,2 mm	11,16 mm

Taula 4: Taula comparativa dels resultats de l'exercici per una biga birecolzada

En aquest exercici hem aplicat els coeficients de majoració de les respectives normatives de cada país. En el cas d'Espanya els coeficients són més baixos que no a la normativa americana, que són més restrictius. Per això, veiem que el càlcul de les càrregues per metre lineal és diferent.

Per a l'armadura a flexió podem observar que amb l'acer necessitem menys àrea que no amb la fibra, això és degut a que la normativa americana fa servir coeficients més restrictius que la normativa espanyola. Ja que les resistència de la fibra de vidre utilitzada en aquest exercici és superior a la resistència de l'acer.

Per l'armadura de l'estrebat la diferència és significativa, sobretot amb la separació dels estreps. Amb l'acer no fa falta armadura a tallant, i posem el diàmetre mínim que ens marca la normativa. En canvi, amb la fibra col·locarem els estreps a 120 mm , que és menys de la meitat que la separació necessària amb l'acer.



Figura 6: Barres d'acer corrugades

Finalment podem veure que la fissuració i la fletxa compleixen sobradament amb l'acer en comparació amb la fibr. Això és degut a que la

secció de fibra de vidre està calculada per ser portada al límit i en canvi hem utilitzat les mateixes dimensions per calcular la secció d'acer, això comporta que la secció d'acer estigui sobre dimensionada, com podem veure amb els resultats obtinguts.

També cal destacar que la normativa americana alhora de comparar la fissuració posa un límit de $0,7\text{ mm}$ per estructures exteriors i una fletxa màxima de $L/240$, en canvi la normativa espanyola és més restrictiva amb la fissuració màxima que és de $0,3\text{ mm}$ però més permissiu amb la fletxa màxima que és de $L/300$.

Les conclusions finals que podem extreure d'aquest apartat són que amb l'acer necessitarem menys armadura que amb la fibra i també les dimensions de la secció seran inferiors, però les diferències entre els dos exercicis no són importants, tot està en el mateix ordre de magnitud. Els valors que es desvien més podríem dir que són el tallant i la fissuració, atès que la diferència està en més del doble.

Tenint en compte aquests resultats procedirem a fer els càlculs de la coberta de fibra de vidre amb la normativa americana l'ACI 440.1R-350.

4. ANALISIS DE LA NORMATIVA AMERICANA PEL CÀLCUL D'UNA COBERTA

A partir del projecte de l'annex B d'un dipòsit d'aigua industrial (on hem pogut veure el procediment per resoldre l'exercici amb formigó armat amb acer) hem realitzat l'exercici principal del treball on es pot veure la resolució del mateix dipòsit estudiat però armant-lo amb fibra de vidre amb l'ajuda de la comparativa de formules que hem realitzat al apartat 3.2.

Destacar que la secció de la biga no és una secció rectangular com l'exemple anterior sinó que ens trobem amb una secció en doble T, per tant, per resoldre l'exercici suposarem que la secció és una T i resoldrem l'exercici dividint els moments i tallants per la meitat.

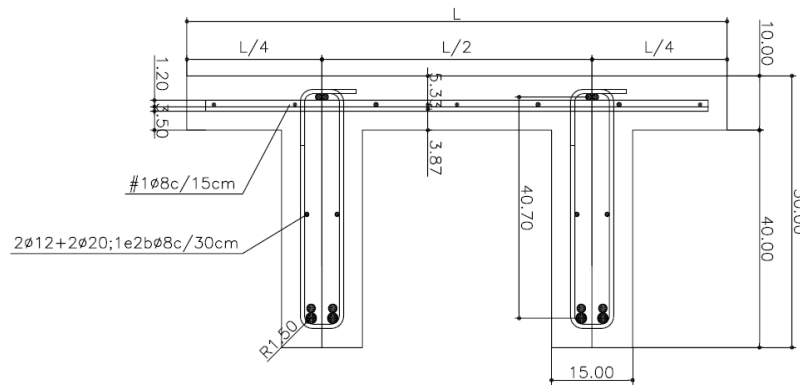


Figura 7: Secció de la coberta amb les característiques del dipòsit armat amb acer

4.1. Predimensionament

La normativa americana fa les comprovacions diferents que la normativa espanyola, primer selecciona un armat que creu que pot ser adient per la secció estudiada i després comprova si és correcte, enlloc de primer fer un predimensionat més exhaustiu com trobem a l'EHE-08 o mitjançant les taules del Jiménez Montoya.

Primer selecciona una possible alçada amb els valors trobats a la Taula 8.2 de l'ACI 440.1R, que podem veure a la Taula 5.

Table 8.2—Recommended minimum thickness of nonprestressed beams or one-way slabs

	Minimum thickness <i>h</i>			
	Simply supported	One end continuous	Both ends continuous	Cantilever
Solid one-way slabs	$l/13$	$l/17$	$l/22$	$l/5.5$
Beams	$l/10$	$l/12$	$l/16$	$l/4$

Taula 5: Predimensionat de l'alçada de la biga

Seguidament amb aquesta dada suposen una possible armadura i a partir d'aquesta calculem el cantell útil:

$$d = h - cover - d_{b,shear} - \frac{d_b}{2} \quad (\text{Eq. 42})$$

On:

d Cantell útil.

$cover$ Recobriment nominal.

$d_{b,shear}$ Diàmetre de l'estrebat.

d_b Diàmetre de l'armadura a flexió.

4.2. Càlcul de les càrregues

El càlcul de les càrregues el farem amb el procediment de la *EHE-08* ja que els coeficients varien segons la normativa de cada país i com estem pensat en un dipòsit que s'hauria de construir teòricament a Espanya ho calcularem tot amb els coeficients que marca la normativa espanyola.

La principal diferència entre la normativa americana i l'espanyola és que l'americana aplica els coeficients de majoració al final de l'exercici, a diferència de l'espanyola, que els aplica al inici dels càlculs. Però la diferència dels valors és mínima.

4.3. Resistència FRP

Per calcular la resistència de càlcul de la fibra aplicarem la formula l'equació 43:

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* \quad (\text{Eq. 43})$$

On:

f_{fu} Resistència de càlcul de la FRP.

C_E Coeficient extret de la *Taula 7.1 de l'ACI 440.1R-350* que podem veure a la *Taula 6*.

f_{fu}^* Resistència de característica de la FRP. *Taula 1 Annex A*.

Table 7.1—Environmental reduction factor for various fibers and exposure conditions

Exposure condition	Fiber type	Environmental reduction factor C_E
Concrete not exposed to earth and weather	Carbon	1.0
	Glass	0.8
	Aramid	0.9
Concrete exposed to earth and weather	Carbon	0.9
	Glass	0.7
	Aramid	0.8

Taula 6: Coeficients reductor per la FRP

4.4. Flexió

Per resoldre l'apartat de flexió hem utilitzat les fórmules del *Capítol 8 de l'ACI 440.1R-350* i l'armat que hem suposat al inici de l'exercici. Primer hem calculat el rati de reforçament del formigó i la fibra, depenent quin dels dos sigui superior voldrà dir que falla la fibra o el formigó i el procediment per calcular el moment flector serà diferent depenent del cas (podem veure els casos a l'*annex A.7*)

Resistència de la fibra de vidre:

$$\rho_{fb} = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_{fu}} \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (\text{Eq. 44})$$

On:

- ρ_{fb} Resistència de la fibra de vidre.
- β_1 Factor reductor de 0,85 per formigó de 28MPa o inferior, per resistències superiors aquest factor és reduirà 0,05 per cada 7MPa fins un mínim de 0,65.
- f'_c Resistència de càlcul del formigó.
- f_{fu} Resistència característica de la FRP.
- E_f Mòdul d'elasticitat del formigó.
- ε_{cu} Deformació del formigó.

Resistència del formigó:

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} \quad (\text{Eq. 45})$$

On:

- ρ_f Resistència del formigó.
- A_f Àrea d'armat a cara traccionada.
- b Amplada de la secció, serà variable.
- d Cantell útil.

Procediment de càlcul si falla la fibra, quan $\rho_f > \rho_{fb}$:

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu}} \right) \leq f_{fu} \quad (\text{Eq. 46})$$

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 \quad (\text{Eq. 47})$$

On:

- M_n Moment flector.
- f_f Tensió en el reforç de FRP.

Procediment de càlcul si falla el formigó, quan $\rho_f < \rho_{fb}$:

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d \quad (\text{Eq. 48})$$

On:

- c_b Distància de la fibra de compressió a eix neutre, en condicions d'equilibri, en [mm].
- ε_{fu} Deformació de FRP.
- ε_{cu} Deformació del formigó.

$$M_n = A_f \cdot f_{fu} \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c_b}{2} \right) \quad (\text{Eq. 49})$$

Càlcul del coeficient de minoració del moment de càlcul:

$$\phi = \begin{cases} 0,55 \text{ for } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \text{ for } \rho_f < \rho_{fb} < 1,4\rho_{fb} \\ 0,65 \text{ for } \rho_f \geq 1,4 \rho_{fb} \end{cases} \quad (\text{Eq. 50})$$

Comprovació del moment flector:

$$\phi M_n \geq M_u \quad (\text{Eq.51})$$

On:

- M_n Moment flector.
- M_u Moment de càlcul.

En el cas que el moment flector no complís s'haurien de refer els càlculs amb un armat diferent fins que trobéssim l'armat adient.

Càlcul de l'alçada de la línia neutre:

$$a = \frac{A_f f_f}{0.85 f'_c b} \quad (\text{Eq. 52})$$

On:

- a Distància des de l'extrem de la biga a la línia neutre.
- A_f Àrea d'armat a cara traccionada.
- f_f Tensió en el reforç de FRP, *equació 54*.
- f'_c Resistència de càlcul del formigó.
- b Amplada de la secció, que serà variable.

Aquest valor ens indicarà si la línia neutre cau dins de les ales de la secció en T o a l'ànima. En el cas que ens caigués a l'ànima el procediment hauria de ser diferent al explicat.

4.5. Fissuració

Per calcular la fissuració el procediment és molt semblant a la normativa espanyola i es resol amb l'Equació 59:

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{E_f}{4750\sqrt{f'_c}} \quad (\text{Eq. 53})$$

On:

- n_f Coeficient d'homogeneïtzació entre l'acer i el formigó.
- E_c Mòdul elàstic de la FRP.
- E_f Mòdul d'elasticitat del formigó.
- f'_c Resistència de càlcul del formigó.

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (\text{Eq. 54})$$

$$f_f = \frac{M_{DL+LL}}{A_f d (1 - k/3)} \quad (\text{Eq. 55})$$

On:

- k Relació entre la profunditat de l'eix neutre a la profunditat del reforç.
- ρ_f Resistència del formigó, *equació 45*.
- n_f Coeficient d'homogeneïtzació entre l'acer i el formigó, *equació 53*.
- f_f Tensió de l'armadura de la cara traccionada.
- M_{DL+LL} Suma de moment (permanents i variables) sense majorar.
- A_f Àrea d'armat a cara traccionada.
- d Cantell útil.

$$\beta = \frac{h - kd}{d(1 - k)} \quad (\text{Eq. 56})$$

$$d_c = h - d \quad (\text{Eq. 57})$$

$$s = b - 2d_c \quad (\text{Eq. 58})$$

On:

- β Gradient de deformació utilitzat per calcular la fissuració.
- h Alçada de la secció
- b Amplada de la secció, serà variable.
- d_c Recobriment.
- s Separació de les barres, *equació 58*.

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (\text{Eq. 59})$$

On:

- f_f Tensió de l'armadura de la cara traccionada, *equació 55*.
- β Gradient de deformació utilitzat per calcular la fissuració, *equació 56*.
- k_b Coeficient que representa el grau de vinclament entre la FRP i el formigó.
- d_c Recobriment, *equació 57*.

4.6. Fletxa

Per calcular la fletxa primer calculem la inèrcia de la secció, al ser una secció en doble T no podem utilitzar la fórmula de l'equació 60, haurem d'anar buscant cada inèrcia en funció de l'amplada de la secció, que serà variable.

$$I_b = I_g = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{Eq. 60})$$

Seguidament calcularem les propietats de la secció, com ara la resistència a tracció i el moment crític.

$$f_r = 0.62\sqrt{f'_c} \quad (\text{Eq. 61})$$

$$M_{cr} = \frac{2f_r I_g}{h} \quad (\text{Eq. 62})$$

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1 - k)^2 \quad (\text{Eq. 63})$$

On:

- f_r Resistència mitja del formigó.
- M_{cr} Moment de fissuració de la peça.
- I_g Inèrcia de la secció bruta.
- I_{cr} Inèrcia de la secció fissurada a flexió simple.
- k Relació entre la profunditat de l'eix neutre a la profunditat del reforç, equació 54.
- I_b Inèrcia de la secció bruta.

Calculem els paràmetres necessaris per trobar la inèrcia i després la fletxa deguda a les carregues permanents i d'ús.

$$\beta_d = \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right) \leq 1,0 \quad (\text{Eq. 64})$$

$$(I_e)_{DL+LL} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \cdot \beta_d \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] \cdot I_{cr} \leq I_g \quad (\text{Eq. 65})$$

On:

- β_d Coeficient de reducció utilitzat en el càlcul de la deformació.
- ρ_{fb} Resistència del FRP, equació 44.
- ρ_f Resistència del formigó, equació 45.
- I_g Inèrcia de la secció bruta.
- I_{cr} Inèrcia de la secció fissurada a flexió simple, equació 63.
- M_{cr} Moment de fissuració de la peça, equació 62.
- M_a Moment flector màxim aplicat, per la combinació característica, a la secció fins l'instant en que s'avalua la fletxa.
- $(I_e)_{DL+LL}$ Inèrcia equivalent.

Calculem les fletxes de les carregues per separat, fem el càlcul de les dues en funció del temps i finalment comprovem.

$$(\Delta_i)_{DL+LL} = \frac{5M_{DL+LL}l^2}{48E_c(I_e)_{DL+LL}} \quad (\text{Eq. 66})$$

$$(\Delta_i)_{DL} = \frac{w_{DL}}{w_{DL+LL}} (\Delta_i)_{DL+LL} \quad (\text{Eq. 67})$$

$$(\Delta_i)_{LL} = \frac{w_{LL}}{w_{DL+LL}} (\Delta_i)_{DL+LL} \quad (\text{Eq. 68})$$

$$\lambda = 0.60\xi \quad (\text{Eq. 69})$$

$$\Delta_{LT} = (\Delta_i)_{LL} + \lambda[(\Delta_i)_{DL} + 0.20(\Delta_i)_{LL}] \quad (\text{Eq. 70})$$

$$\Delta_{LT} \leq \frac{L}{240} \quad (\text{Eq. 71})$$

On:

w_{DL} Càrrega morta per metre lineal (*Dead load*).

w_{LL} Càrrega (viva) d'ús per metre lineal (*Life load*).

M_{DL+LL} Sumatori dels moments de les carregues.

E_c Mòdul elàstic de la FRP.

$(\Delta_i)_{DL+LL}$ Fletxa equivalent.

ξ Factor que depenen del temps per a la càrrega sostinguda, farem servir $\xi = 2,00$ (recomanat pel *ACI 318* per a una durada de més de 5 anys).

λ Multiplicador de la fletxa addicional a llarg termini.

$(\Delta_i)_{DL}$ Fletxa causada a les carregues permanents.

$(\Delta_i)_{LL}$ Fletxa deguda a les carregues d'ús.

L Longitud de la biga.

Δ_{LT} Fletxa total en funció del temps.

4.7. ELU

Per calcular els Estats Límits Últims, calculem el moment causat per totes les carregues (la càrrega morta i un 20% de les carregues d'ús), seguidament calculem el nivell de tensions de les barres de FRP i finalment les comprovem amb la tensió límit indicada a la *Taula 5*.

$$M_s = \frac{w_{DL} + 0.20 \cdot w_{LL}}{w_{DL} + w_{LL}} M_{DL+LL} \quad (\text{Eq. 72})$$

$$f_{f,s} = \frac{M_s}{A_f d (1 - \frac{k}{3})} \quad (\text{Eq. 73})$$

$$f_{f,s} \leq 0.20 f_{fu} \quad (\text{Eq. 74})$$

On:

- M_s Moment de ruptura.
- w_{DL} Càrrega morta per metre lineal (*Dead load*).
- w_{LL} Càrrega (viva) d'us per metre lineal (*Life load*).
- M_{DL+LL} Sumatori dels moments de les càrregues.
- $f_{f,s}$ resistència de ruptura.
- k Relació entre la profunditat de l'eix neutre a la profunditat del reforç, *equació 54*.

4.8. Tallant

La normativa americana per comparar el tallant comprova si la separació dels estrebats compleix, a diferència de l'espanyola que comprova forces tallants. Per adaptar-ho a les nostres necessitats el programa el que fa és aïllar la part de sota de l'*equació 76* i així obtenim la força per fer la comprovació.

En aquest apartat s'han de fer dues comprovacions: la de l'*equació 75* i després la separació no pot ser $0 < s < 600 \text{ mm}$ o $s < d/2$.

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w c \quad (\text{Eq. 75})$$

$$f_{fb} = \left(0.05 \frac{r_b}{d_b} + 0.3\right) f_{fu} \quad (\text{Eq. 76})$$

$$f_{fv} = 0.004 E_f \leq f_{fb} \quad (\text{Eq. 77})$$

$$s = \frac{\phi A_{fv} f_{fv} d}{(V_u - \phi V_c)} \quad (\text{Eq. 78})$$

On:

- V_c Esforç tallant d'esgotament per compressió obliqua de l'ànima.
- b_w Amplada de l'ànima.
- c És igual a $= k \cdot d$.
- r_b Radi de curvatura, normalment és 3 vegades el diàmetre de l'estrebat.
- d_b Diàmetre de l'estrebat.
- f_{fb} Tensió de la barra a la part doblegada.
- f_{fv} Tensió de la barra a la part recta.
- s Separació de l'estrebat.
- ϕ Coeficient extret de l'*article 9.1* de l'*ACI-440.1R-350*.
- A_{fv} Àrea de l'estrebat.
- V_u Esforç tallant de càlcul.

4.9. Ancoratge

Per calcular l'ancoratge es comprova per dues vies, primer es comprova la tensió de les barres per la longitud d'encastament i després la longitud d'ancoratge.

$$C = \min\left(\text{cover to the center of the bar}, \frac{1}{2}c - o - c \text{ spacing}\right) \quad (\text{Eq. 79})$$

$$f_{fe} = \frac{0.083\sqrt{f'_c}}{\alpha} \left(13.6 \frac{l_e}{d_b} + \frac{C}{d_b} \frac{l_e}{d_b} + 340\right) \leq f_{fu} \quad (\text{Eq. 80})$$

$$l_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0.0083\sqrt{f'_c}} - 340}{13.6 + \frac{C}{d_b}} d_b \quad (\text{Eq. 81})$$

$$l_d \leq 1.3 \frac{\phi M_n}{V_u} = l_a \quad (\text{Eq. 82})$$

On:

C	Recobriments exterior [mm].
f_{fe}	Tensió que suporten les barres al centre de la biga.
α	Factor de modificació de l'armat superior.
l_e	La meitat de la longitud de la biga, = $L/2$.
d_b	Diàmetre de l'estrebat.
f_{fu}	Resistència de càlcul de la FRP, <i>equació 43</i> .
l_d	Longitud d'ancoratge necessària.
l_a	Longitud d'ancoratge mínima.
V_c	Esforç tallant d'esgotament per compressió obliqua de l'ànima, <i>equació 73</i> .
ϕ	Coefficient de minoració del moment de càlcul, <i>equació 50</i> .
M_n	Moment flector, <i>equació 47 o 49</i> .

Una limitació de les barres de fibra de vidre és que no es poden doblegar a l'obra, tal i com es fa amb les barres d'acer. Una creença generalitzada és que no es poden doblegar en absolut, però no és així, podem demanar al fabricant que ens les subministra que ens les porti ja doblegades amb la longitud desitjada per poder-les ancorar.

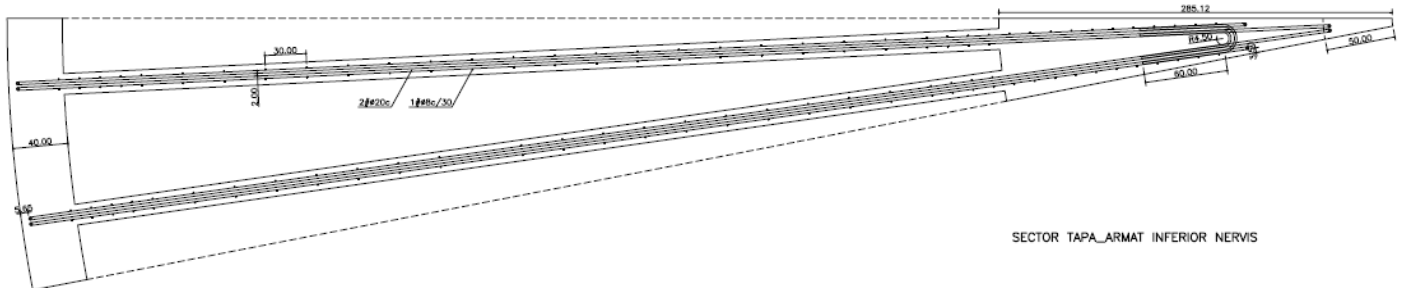


Figura 8: Imatge del plànol de l'annex B.6 on podem veure l'armadura del nervi inferior

4.10. Càlculs de la resta del dipòsit.

Per calcular la resta del dipòsit utilitzarem les mateixes formules que trobem detallades a l'annex B. Com que només canviem l'armat de la coberta la resta de parts del dipòsit seguiran el mateix procediment pels dos casos. Allà podrem trobar tots els càlculs necessaris per comprovar els anells, pilar, capitell, fonamentació i solera.

5. CONFECCIÓ DEL PROGRAMA DE CàLCUL

Per poder resoldre l'exercici de l'apartat 4 amb agilitat he confeccionat un programa amb el MatLab que ens ajuda a modificar les dades del inici i obtenir una resposta immediata de quina part del dipòsit pot fallar i què fallarà (tallant, fletxa, ...). Aquest programa ens permet, amb el mínim esforç, poder analitzar diversos casos i obtenir resultats més exactes que no si ho féssim manualment.

Aquest programa té dues vessants, la versió per la coberta armada amb acer i la versió per la coberta armada amb fibra de vidre. Aquí explicarem el programa per poder solucionar l'exercici amb la coberta armada amb fibra de vidre que és el que hem estat treballant, però a l'annex D podreu trobar el manual per executar el programa per la coberta armada amb acer, on es pot veure que és molt semblant al de FRP, a l'annex D podreu veure que l'explicació és més detallada per executar el programa però més esquemàtica.

En aquest apartat explicarem a grans trets de quins apartats consta el programa i les parts que analitza. Si es volgués executar sense coneixements de MatLab s'hauria de mirar l'annex D per més detalls. El programa consta de 3 subprogrames: Geometria, Coberta i Càlculs.

5.1. Programa 1: Geometria.

El primer programa serveix per entrar la majoria de les dades de geometria i dels materials que utilitzarem. Calcula les àrees i inèrcies, entre altres coses, que necessitarem per calcular els moments i tallants.

La pantalla que trobarem al obrir-lo és la que podem veure a la Figura 9, a la part superior entrem les dades de geometria i a la part inferior les dades del material. Les caselles pintades de color blau són les dades dels materials que necessitem pel programa de la coberta, com ara la resistència del formigó i la resistència de la fibra.

Material	Resistència característica (N/mm ²)	Coeficient de minoració
Formigó prefabricat	35.00	1.50
Formigó "in situ"	25.00	1.50
Formigó ACI	27.6	1
Acer	500.00	1.15
Fibra de vidre	620.6	0.8

Material	Densitat (kN/m ³)	Tensió fibra	Mòdul elàstic acer	Mòdul elàstic fibra	Angle de fregament
Formigó	25.00	100	210000	44800	30
Aigua	10.00				
Terra	18.00				
Temperatura	20				

Figura 9: Finestra 1 programa MatLab sense dades

Un cop omplertes totes les dades, amb el botó *Calcular*, el programa realitza les comprovacions necessàries; i si seguidament activem el botó *Fitxer* ens realitzarà un fitxer Excel amb totes les dades necessàries per fer els càlculs, els moments i tallants.

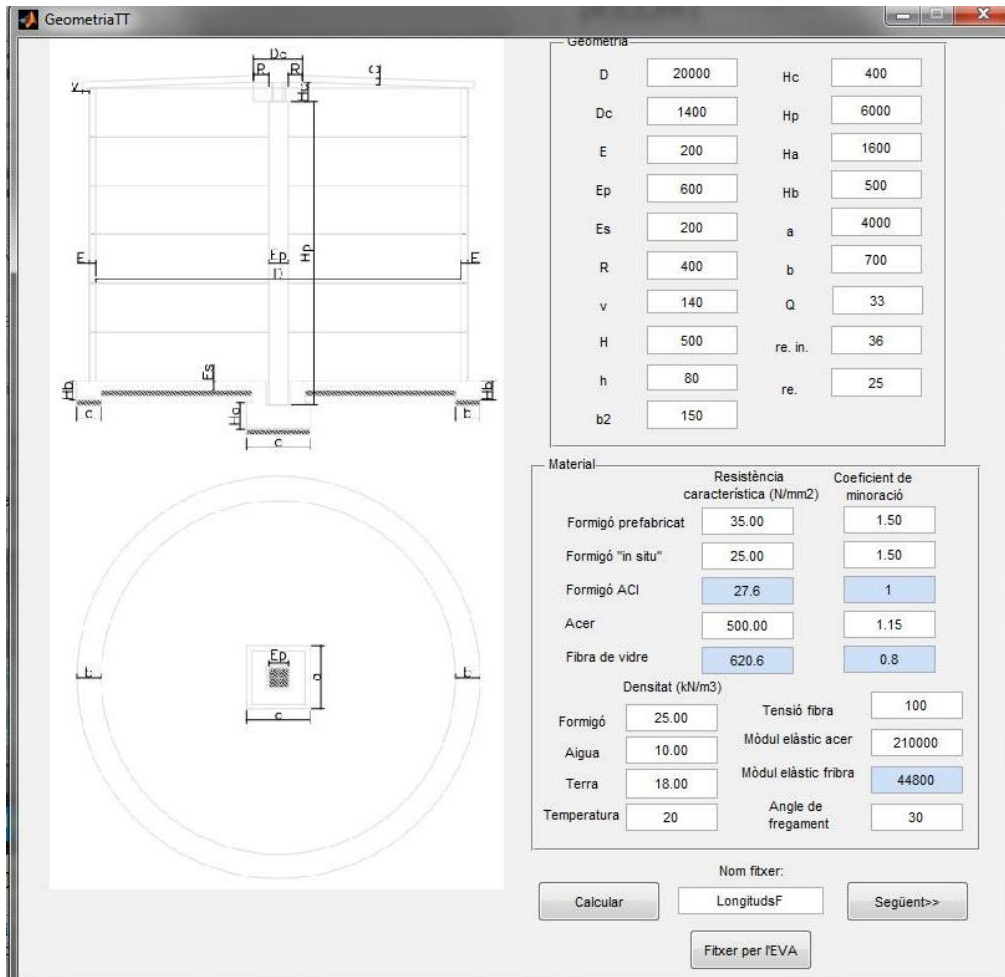


Figura 10: Finestra 1 programa MatLab amb dades

Els moments i els tallants els calcularem amb un altra programa, el WinEva, que es un programa desenvolupat per la Universitat Politècnica de Barcelona. Amb aquest programa obtenim els resultats amb format .txt i les dades obtingudes les podrem llegir amb el següent pantalla del MatLab.

5.2. Programa 2: Coberta.

El segon programa agafa les dades obtingudes amb el programa WinEva amb el botó de la part inferior, requadrat amb vermell a la *Figura 11*:

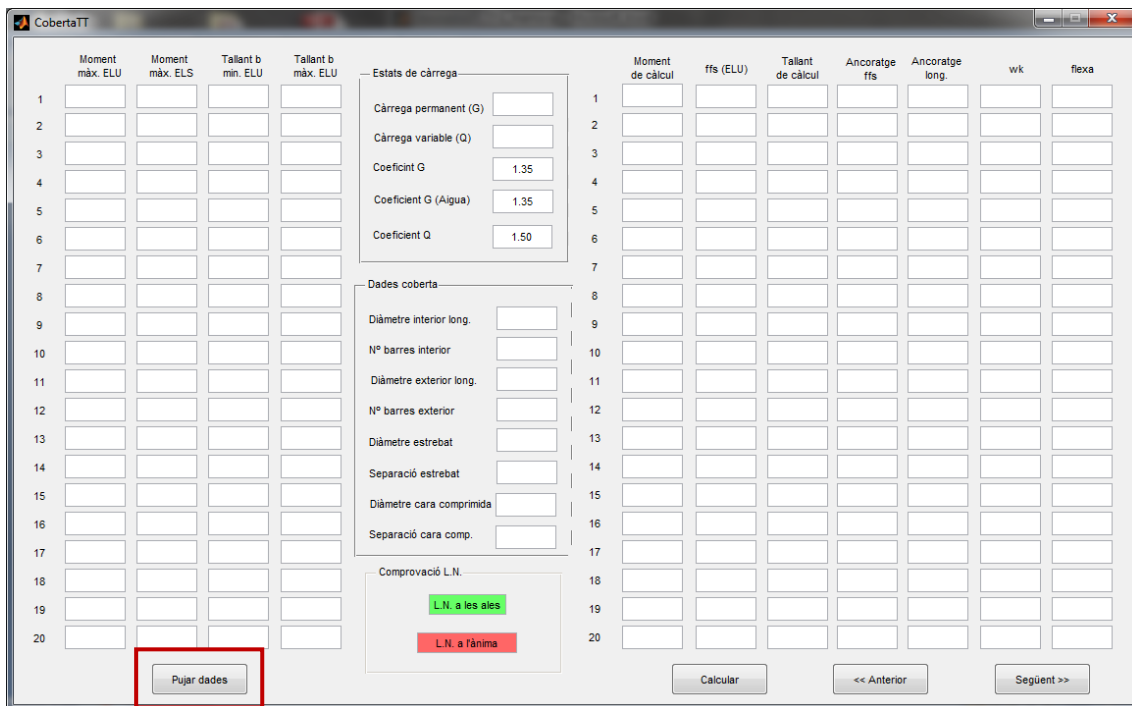


Figura 11: Finestra 2 programa MatLab sense dades

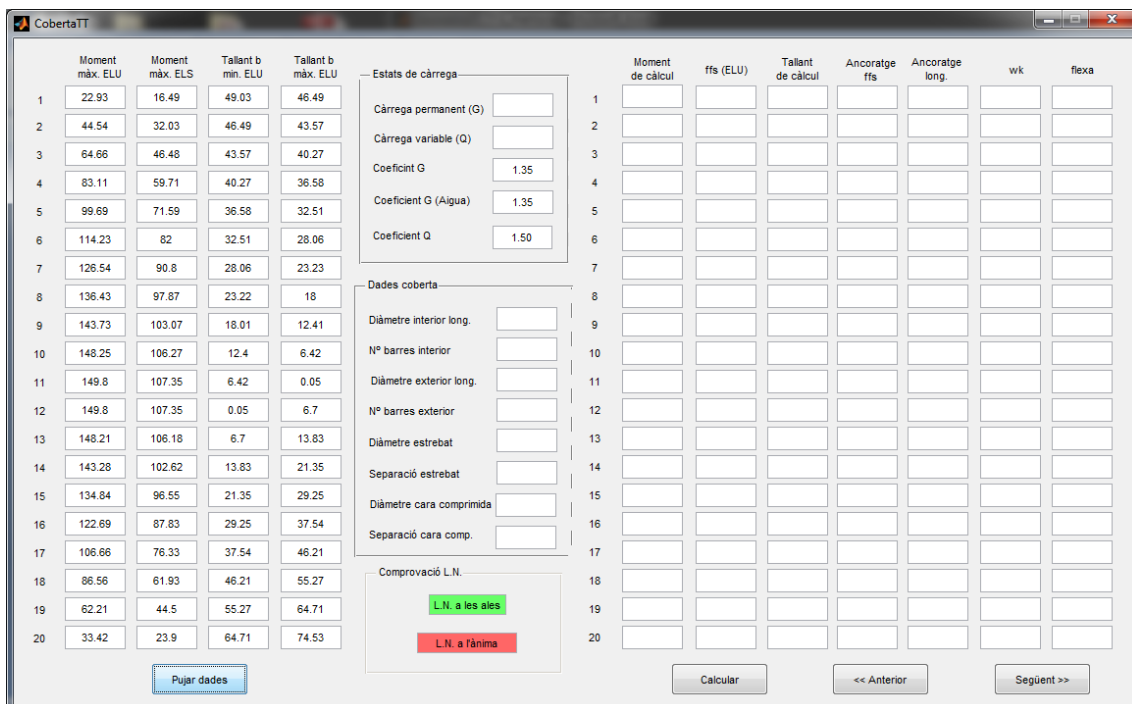


Figura 12: Finestra 1 programa MatLab amb les dades del WinEva

Seguidament entrem les dades (columna central) de les càrregues que suportarà el dipòsit i del armat que li posarem a la coberta i amb el botó *Calcular* (Figura 12) podrem visualitzar els resultats obtinguts, a la part dreta de la pantalla, Figura 13.

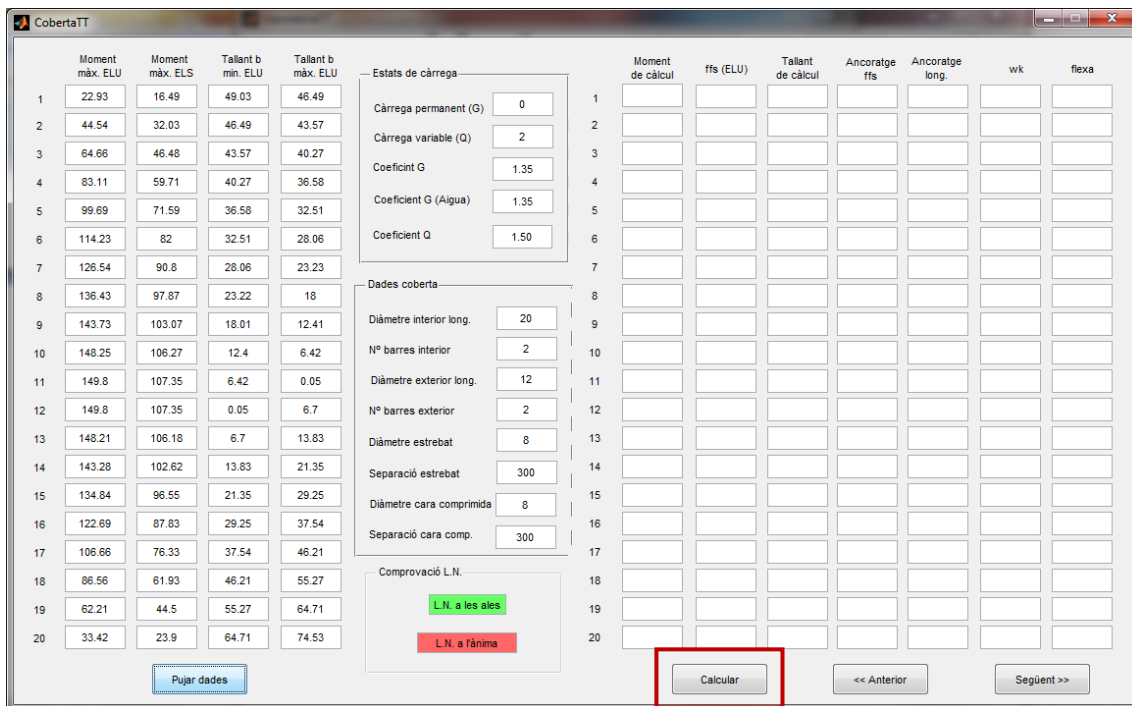


Figura 13: Finestra 2 programa MatLab amb les dades de l'armat

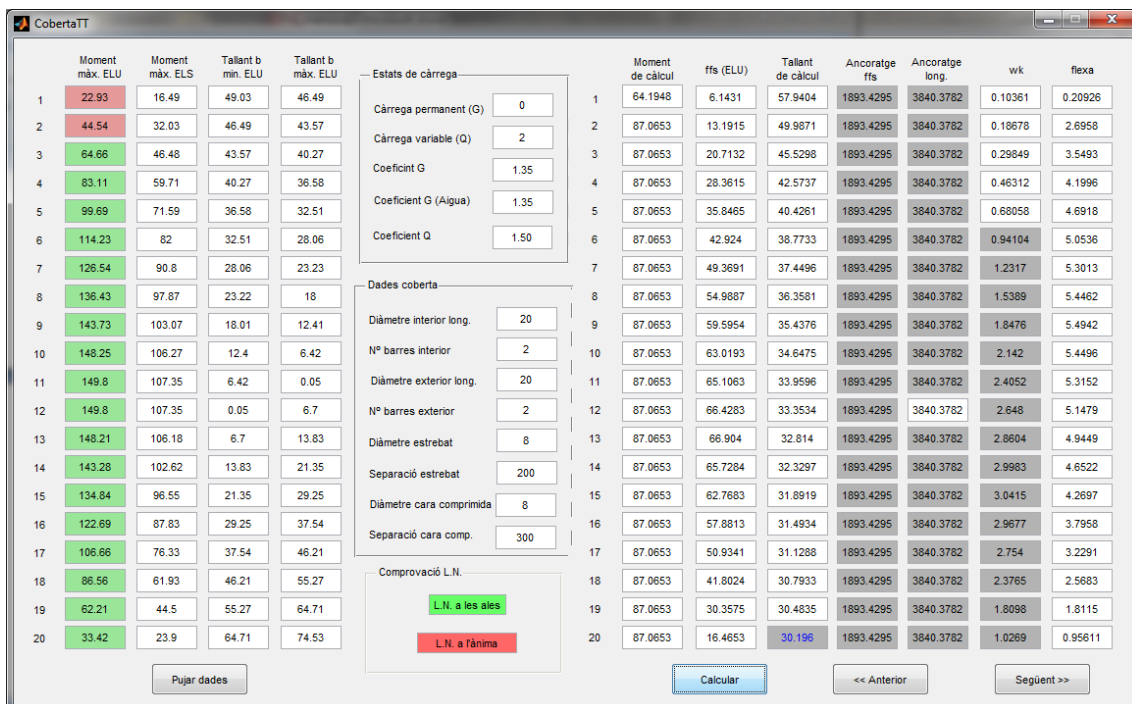


Figura 14: Finestra 2 programa MatLab amb resultats

En aquesta imatge podem veure les diverses caselles que ens pot donar al calcular: primer trobarem caselles blanques, aquestes són els valors que compleixen les condicions requerides per la normativa; seguidament veurem les caselles amb el fons gris, aquestes són les dades que no compleixen i haurem de modificar les dades entrades fins que ens donin un resultat correcte (fons blanc); finalment tenim les caselles que apareixen grises però amb la lletra blava,

això només ho trobarem quan calculem el tallant i són seccions que ens queden recolzades, ja sigui als anells exteriors o al capitell del pilar central, aquestes caselles si apareixen en gris no ens importarà ja que no fallaran perquè estan recolzades.

En la part esquerra també s'han posat de colors la part dels moments dels Estats Límits Últims, aquests colors ens indiquen on cau la línia neutre de la secció, si ens cau a l'ànima el procediment de càlcul que segueix el programa no és el correcte i les dades obtingudes d'aquestes seccions no seran correctes.

5.3. Programa 3: Càlculs.

La última pantalla és on haurem d'entrar les dades dels armats de la resta del dipòsit, que no siguin la coberta, com ara; els anells perimetrals, el pilar, el capitell, la fonamentació, ... i amb el mateix funcionament que les finestres anteriors trobarem el resultat i sabrem si compleix o no.

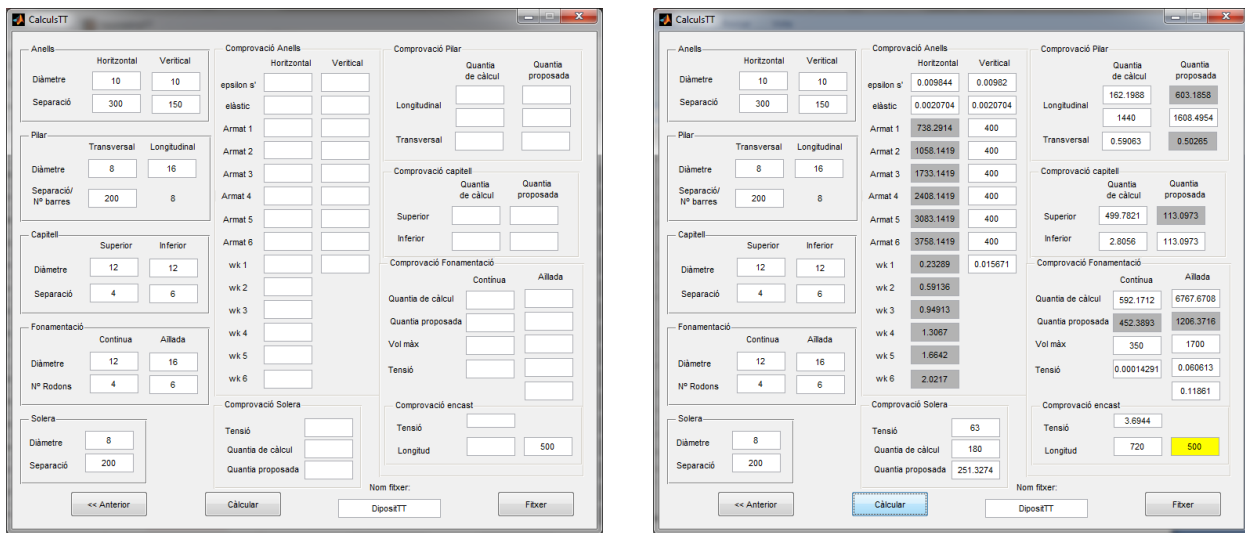


Figura 15: Finestra 3 programa MatLab

Podem veure com una casella apareix de color groc, aquesta casella ens dona un *fitback* d'una longitud que s'ha d'arrodonir de 50 en 50, per més informació consultar l'annex D.

6. RESULTATS I CONCLUSIONS

En aquest apartat comentaré els resultats obtinguts del programa, que es poden trobar a l'annex E.1. pel dipòsit armat amb acer i al l'annex E.2 pel dipòsit armat amb fibra de vidre.

A la imatge següent podem observar els resultats obtinguts amb el programa del MatLab del dipòsit armat amb fibra de vidre. Les dades que hi hem introduït són les que hem trobat amb el programa del dipòsit del formigó quan hem portat l'estructura al límit.

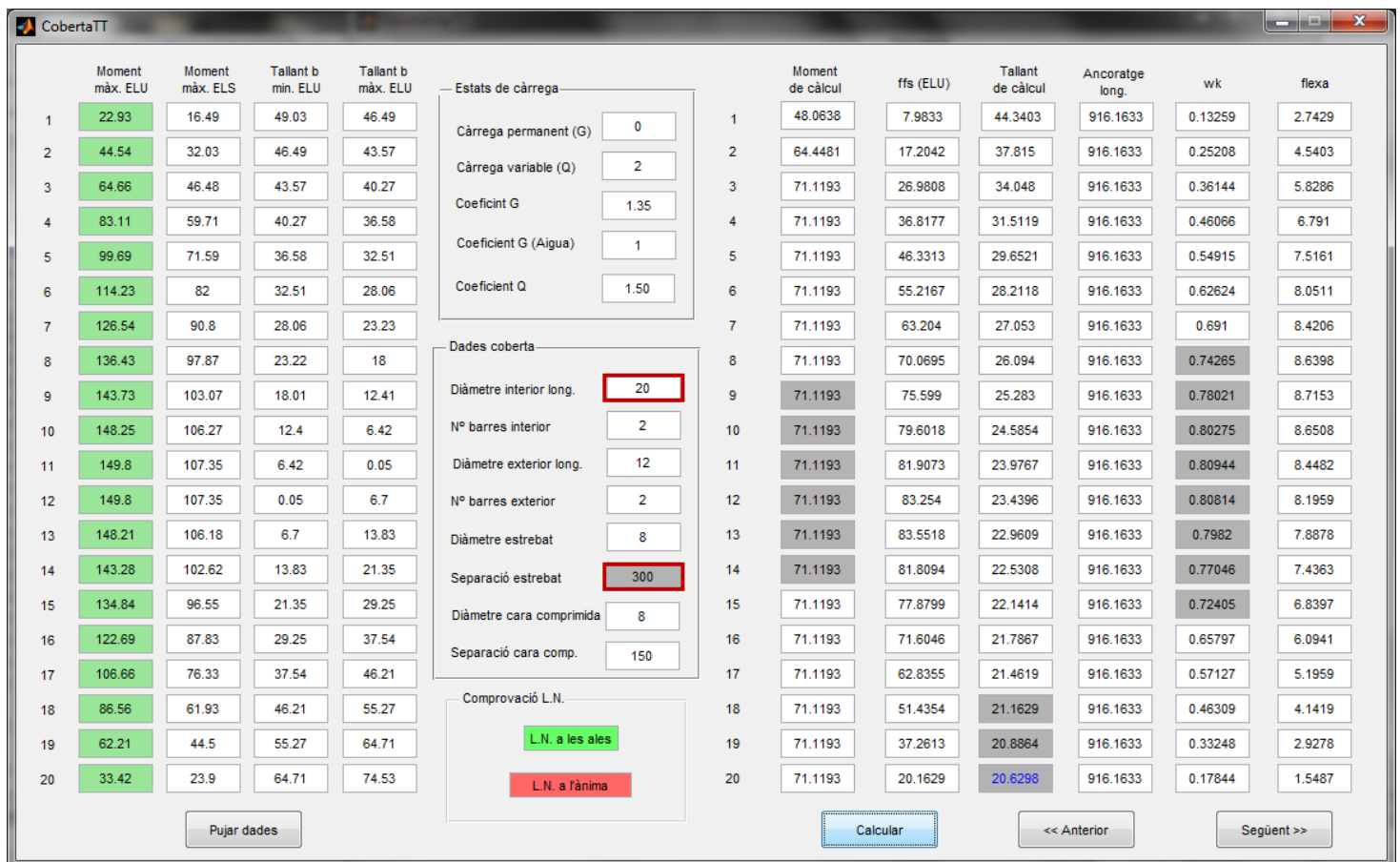


Figura 16: Resultats MatLab, no complex

La comparativa dels resultats ha estat semblant a la feta anteriorment amb l'exercici de la biga simple (apartat 3). Podem observar que amb les mateixes dimensions necessitem més armat perquè compleixi a flexió, passarem de posar-hi 2Ø20 a 2Ø25. També haurem de canviar la separació dels estreps de 300 mm a 200 mm perquè compleixi la restricció de la normativa americana atès que la separació no pot ser superior a dos cops el cantell útil de la secció.

Finalment modificant aquest dos valors obtenim les dades de la *Figura 17*:

	Moment màx. ELU	Moment màx. ELS	Tallant b min. ELU	Tallant b màx. ELU	Estats de càrrega					Moment de càlcul	ffs (ELU)	Tallant de càlcul	Ancoratge long.	wk	fletxa	
1	22.93	16.49	49.03	46.49	Càrrega permanent (G)	0	1	55.7482	5.1667	56.4376	1169.961	0.090472	2.7429			
2	44.54	32.03	46.49	43.57	Càrrega variable (Q)	2	2	75.6987	11.1343	48.7652	1169.961	0.17108	4.5403			
3	64.66	46.48	43.57	40.27	Coefficient G	1.35	3	92.3857	17.4616	44.287	1169.961	0.24455	5.8286			
4	83.11	59.71	40.27	36.58	Coefficient G (Aigua)	1	4	107.0285	23.8279	41.2524	1169.961	0.31104	6.791			
5	99.69	71.59	36.58	32.51	Coefficient Q	1.50	5	110.501	29.985	39.0174	1169.961	0.37025	7.5161			
6	114.23	82	32.51	28.06	Dades coberta Diàmetre interior long. <input type="text" value="25"/> Nº barres interior <input type="text" value="2"/> Diàmetre exterior long. <input type="text" value="12"/> Nº barres exterior <input type="text" value="2"/> Diàmetre estretat <input type="text" value="8"/> Separació estretat <input type="text" value="200"/> Diàmetre cara comprimida <input type="text" value="8"/> Separació cara comp. <input type="text" value="150"/> Comprovació L.N. <input type="text" value="L.N. a les ales"/> <input type="text" value="L.N. a l'ànima"/>					6	110.501	35.7355	37.2808	1169.961	0.42174	8.0511
7	126.54	90.8	28.06	23.23						7	110.501	40.9048	35.8801	1169.961	0.46493	8.4206
8	136.43	97.87	23.22	18						8	110.501	45.3481	34.7187	1169.961	0.4993	8.6398
9	143.73	103.07	18.01	12.41						9	110.501	48.9267	33.7349	1169.961	0.52422	8.7153
10	148.25	106.27	12.4	6.42						10	110.501	51.5173	32.8873	1169.961	0.53907	8.6508
11	149.8	107.35	6.42	0.05						11	110.501	53.0093	32.147	1169.961	0.5433	8.4482
12	149.8	107.35	0.05	6.7						12	110.501	53.8809	31.493	1169.961	0.54221	8.1959
13	148.21	106.18	6.7	13.83						13	110.501	54.0736	30.9096	1169.961	0.53534	7.8878
14	143.28	102.62	13.83	21.35						14	110.501	52.9459	30.3849	1169.961	0.51656	7.4363
15	134.84	96.55	21.35	29.25						15	110.501	50.4028	29.9096	1169.961	0.4853	6.8397
16	122.69	87.83	29.25	37.54						16	110.501	46.3415	29.4764	1169.961	0.44089	6.0941
17	106.66	76.33	37.54	46.21						17	110.501	40.6663	29.0794	1169.961	0.3827	5.1959
18	86.56	61.93	46.21	55.27						18	110.501	33.2883	28.7137	1169.961	0.31015	4.1419
19	62.21	44.5	55.27	64.71						19	110.501	24.115	28.3755	1169.961	0.22263	2.9278
20	33.42	23.9	64.71	74.53						20	110.501	13.0492	28.0614	1169.961	0.11946	1.5487

Figura 17: Resultats MatLab, complex

Podem veure com ara compleixen totes els paràmetres, excepte el tallant de la secció més ample i la línia neutre de la secció més petita. Però aquets valors no resulten crítics perquè corresponen als recolzaments, per més informació consultar l'annex E.2. on es pot trobar l'explicació més detallada.

Comparant aquets resultats amb els obtinguts amb l'acer (*annex E.1*) podem observar com els valors són del mateix ordre. Amb la fibra podríem augmentar el cantell i les dimensions de la secció en general si volguéssim posar un armat inferior. Notem un lleuger increment de la fletxa i l'armat en comparació amb el càlcul de l'acer. També observem que la longitud d'ancoratge màxim que necessitem amb la fibra és més del doble que amb l'acer. Finalment, hi ha un augment notable de la fissuració, haurem de valorar si aquest dèficit compensa amb el fet que les armadures resisteixin més a corrosió i augmenti la durabilitat.

7. RELACIÓ DE DOCUMENTS

Document 1: Memòria.

Document 2: Annexos:

- Annex A: Informació prèvia.
- Annex B: Projecte dipòsit de formigó armat amb acer.
- Annex C: Exemple biga simple resolt a l'ACI 440.1R-35.
- Annex D: Manual programa MatLab.
- Annex E: Resultats obtinguts al programa de MatLab.

8. BIBLIOGRAFIA

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars y Comentario (ACI 318SR-05). 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI318S-05). 2014.

ADVANCE COMPOSITE FIBERS. Productos barras refuerzo.

(<http://www.advancecompositefibers.com/productos-barras-refuerzo.html>, 24 febrer 2014)

BLANCO, F. Hormigones reforzados con barras corrugadas poliméricas adicionadas con fibras.

(<http://www.slideshare.net/FerminBlanco/hormigones-reforzados-con-barras-corrugadas-polimricas-adicionadas-con-fibras-19008252>, 18 de febrer del 2014)

BLANCO, N. Tipologia de materials compòstis.

(ftp://emci.udg.edu/mme/DACFE/Slides/DACFE_ch_00.pdf, 20 de febrer del 2014)

JIMENEZ MONTOYA, P. Y OTROS. Hormigon armado. Gustavo Gili. 15ª Edicion 2010

MINISTERIO DE FOMENTO. EHE-O8. Secretaría general Técnica. Madrid. 4ª Edicion 2010

SCHOECKER ComBAR® Inonovative Building Solutions. Fibre reinforced composite.

(<http://www.schoeck-combar.com/comb/combar-grfp-reinforcement/material-138>, 24 de febrer del 2014)

WIKIPEDIA. Composite material. (http://en.wikipedia.org/wiki/Composite_material, 19 de febrer del 2014)

WIKIPEDIA. Fiberglass. (<http://en.wikipedia.org/wiki/Fiberglass>, 20 de maig del 2014)

WIKIPEDIA. Material compuesto. (http://es.wikipedia.org/wiki/Material_compuesto, 19 de febrer del 2014)

9. AGRAIMENTS

Per finalitzar m'agradaria dedicar aquest treball a totes les persones que m'han ajudat en la seva realització. En especial la Roser Samaniego, per totes les hores que ens hem passat barallant-nos amb el MatLab. També agrair el meu germà Xavier i a la meva mare el seu suport constant. Finalment donar les gràcies a la gent del meu voltant que ha posat el seu gra de sorra perquè això fos possible: en David Xargayó, el meu pare, el meu germà Jofre, en David Martín, Jordina Juncosa i els tutors d'aquest treball.