

## **Treball final de grau**

**Estudi: Grau en Arquitectura Tècnica i Edificació**

**Títol: Arquitectura paramètrica aplicada en el càlcul estructural d'un dipòsit**

**Document:** Còpia completa TFG inclòs resum.

**Alumne:** Angie Sarahi Escobar Romero

**Tutor:** Miquel Llorens

**Departament:** Enginyeria Mecànica i de la construcció industrial

**Àrea:** Teoria de les Estructures

**Convocatòria (mes/any):** Setembre/2023

## -RESUM-

### 1. Introducció

El disseny i anàlisi estructural és una part fonamental en l'arquitectura com també en l'enginyeria civil (Holzer, D., Hough, R., & Burry, M., 2007). Aquestes disciplines han anat evolucionant al llarg del temps, desde realitzar la seva execució amb mètodes manuals com és el dibuix a mà, passant a l'ús de softwares de dibuix i càlcul en 2D fins arribar a l'actualitat, on s'està incrementant l'ús del modelatge en 3D per agilitzar el procés de creació d'un projecte.

Tot i així aquestes eines generen el modelatge desde elements ja fixats amb uns paràmetres establerts en quant al disseny (Schnabel, M. A., 2007) però referent al càlcul estructural, l'ús de forma generalitzada es troba en procés de desenvolupament.

L'arquitectura paramètrica pretén donar resposta a aquesta necessitat encara present en l'actualitat. És un procés de disseny que utilitza la programació i entrada de dades amb variables o paràmetres manipulables mitjançant algorismes, ja siguin geomètriques o en el cas plantejat estructurals, per determinar els resultats de disseny i càlcul.

D'aquesta manera es pot modificar i ajustar el model estructural de manera iterativa, ja que la seva definició parteix de variables i no de valors deterministes: és el que s'entén com a "computational design". Per entendre aquesta nova metodologia s'ha de conèixer transversalment el següent: dades i paràmetres, conceptes de programació com estructura de dades, funcions, condicionals, bucles; així com el software i programes que s'utilitzaran per a crear el bessó digital.

Per entendre de manera senzilla el concepte, si s'agafa com a exemple la forma simple d'un cub, les variables serien: les arestes, la longitud, amplada i alçada del cub; d'aquesta manera es podria determinar el seu tamany total controlant si és vol que sigui molt gran o petit. Canviant el valor de les variables s'obtenen múltiples dissenys.

Això afecta positivament a la forma tradicional de realitzar projectes en l'àmbit de l'arquitectura, ja que aquests deixen de ser objectes rígids on es produeix un disseny poc flexible i amb resultats sense certesa. Amb l'arquitectura paramètrica els projectes es transformen en un procés on es tenen en compte les seves variables i restriccions, produint un disseny flexible que pot ser modificable a l'instant i donant així resultats comprovats.

Per poder realitzar una aplicació senzilla i demostrativa del que és l'arquitectura paramètrica, s'ha triat com a cas d'estudi un dipòsit d'aigua circular. El qual per la seva geometria i les accions

a les que està sotmès, és un exemple ideal per combinar disseny i càlcul utilitzant arquitectura paramètrica.

Per tant aquest treball consisteix en incorporar en el disseny paramètric d'un dipòsit d'aigua (cilindre) els aspectes estructurals que li competen, per obtenir els resultats de manera automatitzada i òptima. D'aquesta manera es realitza el dimensionat del dipòsit seguint les comprovacions dels diferents esforços.

## **2. Objectius:**

### **2.1 Objectiu general**

Utilitzar les eines de l'arquitectura paramètrica i modelatge 3D paramètric aplicant-les a l'anàlisi estructural de un dipòsit.

### **2.2 Objectius específics**

1. Analitzar i comprendre els principis fonamentals de l'arquitectura paramètrica i la seva aplicació a l'anàlisi estructural de l'objecte del cas.
2. Desenvolupar habilitats avançades en el modelat 3D paramètric i la simulació estructural mitjançant el software especialitzat.
3. Realitzar un anàlisi estructural detallat del dipòsit determinant els seus principals factors de càrrega segons normativa.
4. Validar el disseny del dipòsit confirmant el compliment de la normativa de càlcul estructural segons el dimensionat.

## **3. Metodologia a implementar:**

### **3.1 Funcionament dels softwares utilitzats.**

Després d'haver realitzat una recerca exhaustiva sobre aquesta metodologia, també s'ha procedit a entendre i aprendre com funcionen els dos principals softwares utilitzats, Rhino i Grasshopper.

Rhino és un software de modelat 3D basat en la geometria de Nurbs amb la qual cosa permet modelar tot tipus de superfícies i no hi ha límit en la complexitat, grau i tamany dels dissenys. Grasshopper és un plug-in de programació visual integrat a Rhino que permet crear algoritmes en una interfície intuïtiva, la qual funciona arrossegant

components en l'àrea de treball, quan aquests es connecten generen unes seqüències d'instruccions que al executar-les s'obtenen accions amb un resultat en el model.

De manera transversal per poder insertar les comprovacions específiques referent al càlcul estructural i compliment de normativa s'ha hagut d'aprendre el llenguatge de programació Python per poder programar els components necessaris, com també fer la recerca de les llibreries d'aquestes necessàries per l'aplicació en el cas d'estudi, tals com Matplotlib, Numpy i ghcomp. Python és un llenguatge interpretat, és a dir que executa directament el codi línia per línia i degut a que utilitza paraules similars a les de l'anglès es considera "senzill" per el seu ús.

### **3.2 Anàlisi i caracterització del comportament estructural del dipòsit**

El formigó armat és el material més adequat per a la construcció de dipòsits per les seves característiques tècniques i econòmiques. El formigó és fàcil de modelar, cosa que permet crear dipòsits de qualsevol forma. A més, és un material econòmic i durador, amb un manteniment senzill.

S'analitzen les accions que es generen sobre l'estructura, en aquest cas particular, sobretot predomina l'empenta per la pressió hidrostàtica sense empentes de terres. Es tenen en consideració per el correcte dimensionat la definició del gruix de la paret com també els esforços que apareixen sobre paret (làmina cilíndrica revolucionada constantment)

### **3.3 Validació del disseny del dipòsit**

Per tal de garantir el correcte comportament del dipòsit i generar l'armat òptim es realitzen les comprovacions als esforços de flexió, tracció i tallant; com a principal problema s'ha analitzat la fissuració amb la comprovació de la qual s'obté un disseny i armat convenients, per garantir l'estanqueïtat del dipòsit, com també verificant la superfície mínima per armar el dipòsit, comprovant les armadures verticals com horitzontals.

## **4. Resultats Obtinguts:**

4.1 Mitjançant l'ús dels softwares i l'aplicació de la normativa s'ha obtingut un model paramètric del dipòsit que permet la simulació prèvia del disseny òptim del dipòsit. Amb l'aplicació del mètode d'elements finits (MEF) s'ha generat una solució numèrica

aproximada del dipòsit, en el qual estan definides certes equacions que caracteritzen el comportament físic del cas d'estudi.

4.2 Amb les eines de programació s'han insertat els requeriments normatius de càlcul estructural en el model paramètric, per poder verificar que pel disseny triat es compleixen els estats últim i de servei. Sobretot realitzant la verificació al problema de la fissura.

## **5.Conclusions:**

L'ús de l'arquitectura paramètrica està centralitzat més en l'àrea de disseny, generant formes complexes que amb els programes 3D de modelat no s'obtenen directament. Amb aquest cas d'estudi del dipòsit circular s'ha comprovat que l'ús d'aquesta metodologia pot ser més ampli, generant el disseny mitjançant les comprovacions estructurals. Amb això es vol mostrar l'ampli ventall de possibilitats en la qual es pot posar en pràctica.

**Arquitectura paramètrica  
aplicada en el càlcul estructural  
d'un dipòsit**

Treball final de grau

**Autor: Angie Escobar Romero**

**Tutor: Miquel Llorens**



September 5, 2023

# Contents

<b>1</b>	<b>Introducció</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Objectius</b>	<b>5</b>
2.1	Objectiu general . . . . .	5
2.2	Objectius específics . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>5</b>
3.1	Arquitectura paramètrica i simulació estructural . . . . .	5
3.2	Softwares y llenguatges de programació utilitzats . . . . .	6
3.3	Cas d'estudi: dipòsits d'aigua . . . . .	8
3.4	Disseny del dipòsit . . . . .	10
3.5	Anàlisi i caracterització del comportament estructural del dipòsit. . . . . .	12
3.5.1	Accions considerades sobre els dipòsits . . . . .	12
3.5.2	Dimensionat del dipòsit . . . . .	13
3.5.3	Validació del disseny del dipòsit . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Resultats i discussió</b>	<b>21</b>
4.1	Exemple d'aplicació . . . . .	23
4.1.1	Càlcul del gruix de la paret . . . . .	23
4.1.2	Comprovació a tallant . . . . .	23

4.1.3	Determinació quantia mecànica mínima . . . . .	25
4.1.4	Determinació quantia per esforços . . . . .	25
4.1.5	Quantia mínima per condicions de fissura . . . . .	26
4.1.6	Determinació Armadura Horitzontal . . . . .	28
4.1.7	Determinació armat de les parets del dipòsit . . . . .	28
4.1.8	Representació gràfica paret del dipòsit i armadures . .	29
4.2	Avantatges, limitacions i oportunitats . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Conclusions</b>	<b>33</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>Annex</b>	<b>35</b>



# 1 Introducció

El disseny i anàlisi estructural és una part fonamental en l'arquitectura com també en l'enginyeria civil (Holzer et al., 2007). Aquestes disciplines han anat evolucionant al llarg del temps, desde realitzar la seva execució amb mètodes manuals com és el dibuix a mà, passant a l'ús de softwares de dibuix i càlcul en 2D fins arribar a l'actualitat, on s'està incrementant l'ús del modelatge en 3D per agilitzar el procés de creació d'un projecte.

Tot i així aquestes eines generen el modelatge desde elements ja fixats amb uns paràmetres establerts en quant al disseny (Schnabel, 2007) però referent al càlcul estructural queda pendent encara l'ús de forma generalitzada.

L'arquitectura paramètrica pretén donar resposta a aquesta necessitat encara present en l'actualitat (Preisinger and Heimrath, 2014). És un procés de disseny que utilitza la programació i entrada de dades amb variables o paràmetres manipulables mitjançant algorismes, ja siguin geomètriques o en el cas plantejat estructurals, per determinar els resultats de disseny i càlcul.

Per entendre aquesta nova metodologia s'ha de conèixer transversalment el següent: dades i paràmetres, conceptes de programació com estructura de dades, funcions, condicionals, bucles; així com el software i programes que s'utilitzaran per a crear el bessó digital.

Per exemplificar de manera senzilla el concepte, si s'agafa la forma simple d'un cub, les variables serien: les arestes, la longitud, amplada i alçada del cub; d'aquesta manera es podria determinar el seu tamany total controlant si és vol que sigui molt gran o petit. Canviant el valor de les variables s'obtenen múltiples dissenys.

Això afecta positivament a la forma tradicional de realitzar projectes en l'àmbit de l'arquitectura, ja que aquests deixen de ser objectes rígids on es produeix un disseny poc flexible i amb resultats sense certesa. Amb l'arquitectura paramètrica els projectes es transformen en un procés on es tenen en compte les seves variables i restriccions, produint un disseny flexible que pot ser modificable a l'instant i donant així resultats comprovats.

L'ús d'aquesta eina és cada cop més comú i forma part de les estratègies amb que s'abordarà el càlcul en el futur (Caetano et al., 2020). S'ha promociat com un dels majors canvis que experimentarà l'àmbit de l'arquitectura i com canviarà la manera de treballar en el futur. Els sistemes de modelació paramètrica treballen principalment amb dades, amb les quals es calcula desde lo conegut per obtenir lo desconegut, tot això amb un model de fluxe de dades, i amb un sistema de restriccions que permet resoldre el conjunt de limitacions que es puguin trobar en el projecte. Una forma senzilla d'entendre aquest flux es mostra en la Figura 1

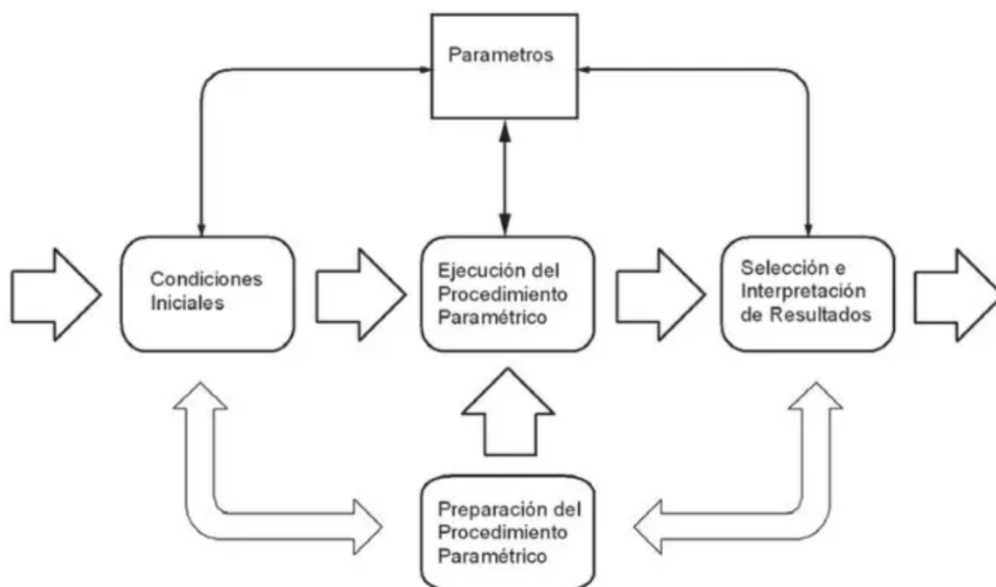


Figure 1: Diagrama de fluxe sobre el procés general de les activitats en el disseny paramètric, agafat de García Alvarado and Lyon Gottlieb (2013)

Per poder realitzar una aplicació senzilla i demostrativa del que és l'arquitectura paramètrica, s'ha triat com a cas d'estudi un dipòsit d'aigua circular. El qual per la seva geometria i les accions a les que està sotmès, és un exemple ideal per combinar disseny i càlcul utilitzant arquitectura paramètrica.

Per tant aquest treball consisteix en incorporar en el disseny paramètric d'un dipòsit d'aigua (cilindre) els aspectes estructurals que li competen, per obtenir els resultats de manera automatitzada i òptima. D'aquesta manera es realitza el dimensionat del dipòsit seguint les comprovacions dels diferents esforços.

## **2 Objectius**

### **2.1 Objectiu general**

Utilitzar les eines de l'arquitectura paramètrica i modelatge 3D paramètric aplicant-les a l'anàlisi estructural de un dipòsit.

### **2.2 Objectius específics**

- a) Analitzar i comprendre els principis fonamentals de l'arquitectura paramètrica i la seva aplicació a l'anàlisi estructural de l'objecte del cas.
- b) Desenvolupar habilitats avançades en el modelat 3D paramètric i la simulació estructural mitjançant el software especialitzat.
- c) Realitzar un anàlisi estructural detallat del dipòsit determinant els seus principals factors de càrrega segons normativa.
- d) Validar el disseny del dipòsit confirmant el compliment de la normativa de càlcul estructural segons el dimensionat.

## **3 Metodologia**

### **3.1 Arquitectura paramètrica i simulació estructural**

El parametricisme es un estil dintre arquitectura vanguardista contemporanea, aquest ha estat catalogat com el successor de l'arquitectura postmoderna i arquitectura moderna. El terme ha estat promogut al 2008 per Schumacher (2011), principal arquitecte del despatx d'arquitectura de Zaha Hadid.

Com a conseqüència de l'increment de les eines tecnològiques globalment, dins l'àmbit d'arquitectura també les metodologies per generar el disseny i anàlisi estructural han evolucionat al llarg de temps (Al-Azzawi and Al-Majidi, 2021).

Tal i com ho descriu Kalay (2004), en un principi els sistemes CAD (Computer-Aided Design) van permetre resoldre problemes que abans es feien manualment. Després van millorar en permetre generar la documentació gràfica, per exemple AutoCad. Finalment arriba el sistema BIM, el qual permet incloure molta més informació, no només generant models 3D sino obtinguent bases de dades en aquests, de manera que s'accelera en el procés de creació d'un projecte.

En l'actualitat s'utilitza el modelatge de la informació en l'edificació però més en l'àrea de disseny o projecció i amb elements programats prèviament (Schnabel, 2007). S'està desenvolupant la seva aplicació al càlcul estructural de forma generalitzada.

Així doncs el disseny paramètric és una tècnica avançada digital que permet introduir en un model, variables o paràmetres manipulables mitjançant algorismes. D'aquesta manera es pot modificar i ajustar el model estructural de manera iterativa, ja que la seva definició parteix de variables i no de valors deterministes: és el que s'entén com a "computational design" (Caetano et al., 2020).

L'ús d'aquesta metodologia proporciona múltiples avantatges, les dos més significatives son: la productivitat i l'exploració de dissenys. Permeten l'automatització de diversos processos que podrien ser repetitius i proporciona la capacitat d'analitzar diverses possibles solucions de disseny. (Burry, 2011)

## **3.2 Softwares y llenguatges de programació utilitzats**

Com ja s'ha mencionat anteriorment les eines que han anat adquirint protagonisme en l'actualitat son les de modelat 3D, aquestes son indispensables per exercir la professió tant d'arquitectes com enginyers. Aquests softwares tenen l'avantatge de visualitzar de manera més entenedora les dades i documentació referides a un projecte, a més ajuden a detectar possibles errades, garantint així el poder preveure aquests errors en la posada en obra.

Un dels softwares de modelat 3D és Rhino, aquest està basat en la geometria de

Nurbs (modelat lliure mitjançant punts de control) amb la qual cosa permet modelar tot tipus de superfícies i no hi ha límit en la complexitat, grau i tamany dels dissenys. Lo destacable d'aquest programa de modelat 3D és que ha integrat un llenguatge de parametrització, Grasshopper.

Grasshopper és un plug-in de programació visual integrat a Rhino, que permet crear algorismes generatius en una interfície intuïtiva, conté eines de programació visuals que fan que sigui més “lleuger” insertar les funcions. És utilitzat principalment com a eina de gestió de dades. De manera molt sintetitzada el seu funcionament consisteix en arrossegar components a l'àrea de treball, quan aquests es connecten generen unes seqüències d'instruccions que al executar-les s'obtenen accions amb un resultat en el model.

Tot i que Rhino-Grasshopper no ha tingut gaire presència en la construcció i no està implícitament creada per aquesta indústria, al ser una eina tan completa molts arquitectes i enginyers estan integrant-lo en els seus dissenys. Mitjançant la programació s'obtenen resultats molt satisfactoris en el camp del disseny, sobretot al voler crear formes òptimes per obtenir un disseny estructural el més eficient possible. Aquesta metodologia permet obtenir una forma que garanteix menys treball intern estructural i amb la mínima quantitat de material possible (Florindo Rabadán, 2022).

De manera transversal per poder realitzar aquesta programació específica referent al càlcul estructural del cas presentat en aquest projecte s'ha hagut d'aprendre el llenguatge de programació Python, com també fer la recerca de les llibreries necessàries per l'aplicació en el cas d'estudi, tals com Matplotlib, Numpy i ghcomp. Dintre el que es Grasshopper existeix aquest component, en el qual s'introdueixen les comprovacions relatives a esforços i compliment de armadura mínima per el dipòsit dissenyat.

Els mitjans digitals que s'han consultat per elaborar aquest apartat han sigut: (Hernandez, 2023) (Marchante, 2022) (Echeverri, 2021) (Florindo Rabadán, 2022)

### 3.3 Cas d'estudi: dipòsits d'aigua

Els dipòsits són estructures que es fan servir per emmagatzemar productes sòlids, líquids o gasosos. Els dissenys dels dipòsits varien segons el tipus de producte, el volum del producte, la ubicació del dipòsit, el terra i el material. Tots els dipòsits tenen un fons, un cos i la possibilitat de tenir sostre o no. Els dipòsits poden ser horitzontals o verticals, cilíndrics, esfèrics o quadrats. Els dipòsits més comuns en l'indústria local són els cilíndrics verticals o rectangulars, recolzats sobre el terreny.

A més de la seva funció d'emmagatzematge, els dipòsits han de complir requisits de seguretat estructural, seguretat davant de fuites o contaminació ambiental, com també manteniment de temperatura i pressió.

Els dipòsits d'aigua com és el cas d'estudi, són estructures molt comunes per la seva importància per a l'abastament d'aigua potable a les poblacions. Tot i això, el nombre de normes i publicacions dedicades als dipòsits és inferior al d'altres estructures, com ara ponts i edificis. La manca de normes i recomanacions específiques dificulta el disseny i càlcul dels dipòsits (Sanjuan-Delmás et al., 2015).

Les patologies als dipòsits de formigó per reserva d'aigua potable són danys que poden afectar l'estructura i el seu funcionament. Les causes més comunes són les fissures, que poden provocar la corrosió de les armadures i el despreniment del formigó (da Silva et al., 2020).

Les fissures poden ser degudes a diversos factors, entre els quals s'inclouen:

- Defectes originals d'execució: errors en el disseny, la construcció o el curat del formigó.
- Imperfeccions a l'amassada: bombolles d'aire, manca de compactació o mala col·locació de les armadures.
- Pèrdua d'estanquitat: esquerdes o forats al formigó que permeten l'entrada d'aigua o altres agents externs.

Les fissures poden ser de diversos tipus:

- Fissures per esforços de tall, tracció o compressió: es produeixen per l'acció de forces mecàniques, com ara la retracció del fragüat o la pressió de l'aigua.
- Fissures per atacs químics o electroquímics: es produeixen per l'acció d'agents químics, com els sulfats o els clorurs.

Els atacs químics o electroquímics són els més greus, ja que poden provocar la corrosió de les armadures. La corrosió és un procés químic en què el ferro s'oxida i es converteix en òxid de ferro. L'òxid de ferro és un material porós que no té la mateixa resistència que el ferro, per la qual cosa pot afeblir l'estructura del formigó.

Els atacs químics o electroquímics es poden produir per diverses causes, entre les quals s'inclouen:

- Condicions ambientals: la pluja àcida, l'aigua marina o els gasos de les fàbriques poden contenir agents químics que ataquen el formigó.
- Qualitat del formigó: un formigó de mala qualitat, amb una baixa resistència als sulfats o als clorurs, és més susceptible a aquests atacs.
- Les filtracions d'aigua també poden fer malbé el formigó. L'aigua pot provocar la carbonatació del formigó, un procés químic en què el diòxid de carboni de l'aire reacciona amb el ciment i debilita l'estructura del formigó.

Amb això no es vol dir que el formigó armat sigui un mal material sinó el contrari, el formigó armat és un material ideal per a la construcció de dipòsits per la seva facilitat d'ús, baix cost i durabilitat. Tot i això, el principal problema que cal abordar en el disseny de dipòsits és la seva estanquitat. Per això, cal utilitzar formigons impermeables i controlar la fissuració mitjançant un disseny i armat adequats.

Els mètodes clàssics de càlcul de dipòsits de formigó armat, basats en el comportament lineal fins al trencament dels materials, han estat abandonats per donar lloc a tensions de treball molt baixes per a l'acer, cosa que comporta un cost excessiu. Avui dia, els avenços en la qualitat dels formigons i dels acers, units als actuals mètodes de càlcul basats en el mètode dels estats límit, fan possible que s'obtinguin solucions més econòmiques i de més vida útil.

En resum els dipòsits són estructures complexes que han de complir els requisits de seguretat i funcionalitat, amb la qual cosa cal realitzar un estudi rigorós del disseny del dipòsit per reduir la possibilitat de falla, almenys en els factors que es poden preveure i controlar en aquest tipus d'estructures (Montoya et al., 1987).

### 3.4 Disseny del dipòsit

El disseny d'un dipòsit de formigó armat ha de tenir en compte diversos factors, (Montoya et al., 1987) menciona els següents:

a) **La naturalesa del líquid que s'emmagatzema:** El líquid que s'emmagatzema en un dipòsit pot ser de naturalesa molt diversa, generalment és aigua potable però hi ha altres possibilitats com és : aigua residual i productes químics. Els líquids agressius, que es mencionen a continuació poden fer malbé el formigó:

- Aigües àcides amb un pH inferior a 5.
- Aigües molt pures que poden provocar la corrosió de l'acer.
- Aigües sulfatades o selenitoses.
- Aigües residuals que continguin més de 30 g/l de sals dissoltes.
- Olis vegetals i altres compostos orgànics anàlegs.

Per garantir la durabilitat del formigó davant aquests líquid agressius cal disposar de revestiments adequats però sobretot confeccionar el formigó de manera molt compacta, aplicant dosificacions riques en ciment, baixa relació aigua/ciment i una molt bona compactació de la pasta.



- b) **El tipus de terreny de fonamentació:** El terreny de fonamentació té una gran influència en el disseny d'un dipòsit. Ha de presentar unes característiques uniformes per evitar els possibles assentaments diferencials. Per això s'ha de fer un estudi previ del sòl per realitzar el càlcul de la fonamentació adequat.

En el cas de dipòsits enterrats, si la capa freàtica està alta, s'ha de dimensionar de manera que s'eviti el flotament del mateix. Per això el pes del dipòsit buit ha de complir l'equació 1.

$$P \geq \gamma * a_1 * b_1 * (h_1 - h_0) * \delta \quad (1)$$

on  $a_1 * b_1$  és la superfície del fons del dipòsit,  $h_1$  és la profunditat de la cimentació,  $h_0$  és la profunditat de la capa freàtica,  $\delta$  és el pes específic de l'aigua ( $\delta = 1t/m^3 = 10kN/m^3$ ) i,  $\gamma$  és el coeficient de seguretat (el codi tècnic de l'edificació estableix els valors  $\delta = 1.2$  o  $\delta = 1.8$ , segons si la comprovació de flotabilitat tingui un caràcter persistent o extraordinari)

Si no es compleix aquesta condició s'ha d'augmentar el pes incrementant el gruix de la solera o col·locant tacons exteriors en aquesta per aprofitar el pes de les terres que es troben a sobre d'aquests.

- c) **Els materials emprats:** Aquests han de ser de bona qualitat i presentar les característiques adequades per garantir l'estanqueïtat i durabilitat necessàries per aquestes estructures.

Com ja s'ha mencionat els formigons han de ser de bona qualitat i compactes, amb una resistència mínima de  $30N/mm^2$ . Per les armadures es óptim utilitzar acer B500SD, controlant que la tensió no superi els  $400N/mm^2$  per evitar deformacions excessives.

- d) **La mida del dipòsit:** La mida del dipòsit també és un factor important en el disseny. Els dipòsits petits es poden dissenyar com a estructures monolítiques, mentre que els dipòsits de grans superfícies de fondària, s'independitzen la solera i parets mitjançant juntes per evitar l'esquerdament. En aquests últims caldrà determinar la separació entre les juntes segons el tipus de dipòsit, condicions d'exposició i sobretot de la armadura horitzontal que es disposi.

Aquestes condicions a les que estarà exposat el dipòsit son de gran importància ja que el major control es realitza per la fissura. L'obertura màxima de fissura segons l'exposicions son:

- Dipòsits sotmesos a alternances de humitat-sequedat/exposats a gelades o a agents agressius :  $w = 0.1mm$
- Dipòsits permanentment submergits :  $w = 0.2mm$

### **3.5 Anàlisi i caracterització del comportament estructural del dipòsit.**

Per poder realitzar l'aplicació de les eines de l'arquitectura paramètrica, com ja s'ha mencionat anteriorment , s'ha triat com a cas d'estudi el disseny estructural d'un dipòsit circular d'aigua. Per executar l'aplicació s'han seguit el procediment del capítul 27 de Montoya et al. (1987)

#### **3.5.1 Accions considerades sobre els dipòsits**

A continuació s'analitzen les accions que s'han de considerar en el càlcul del dipòsit, sobretot l'empenta de les terres i la pressió hidrostàtica. En els dipòsits enterrats les hipòtesis de càrrega son:

- Empenta de terres amb dipòsit buit
- Pressió hidrostàtica del líquid sense empenta de terres
- Altres sobrecàrregues amb dipòsit buit

En els dipòsits recolzats en el terreny no apliquen les empentes laterals del terreny. Per la qual cosa el càlcul es simplifica.

L'exemple d'aplicació que es realitza en aquest treball consisteix en realitzar les comprovacions en les parets del dipòsit, i aquest es troba recolzat en el

terreny. De manera que el càlcul es simplifica, ja que l'objecte d'aquest treball és l'ús de l'arquitectura paramètrica en un exemple pràctic.

Per tant l'acció que predomina és la de pressió hidrostàtica sense empenta de terres en les parets (Fig. 3)

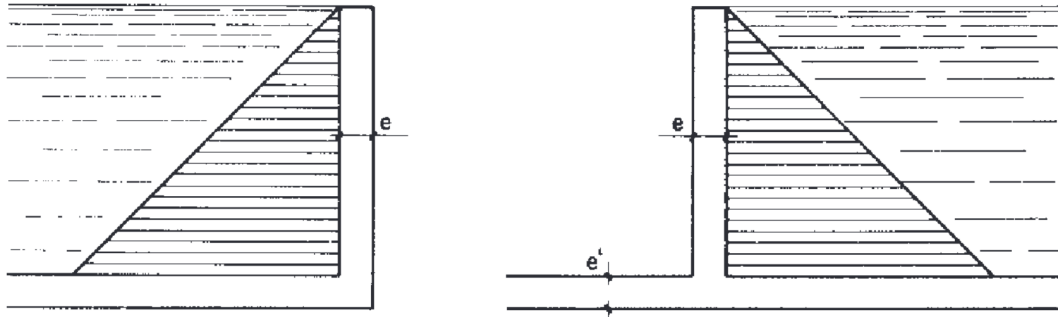


Figure 2: Pressió hidrostàtica sense empenta de terres, agafat de Montoya et al. (1987)

### 3.5.2 Dimensionat del dipòsit

Les parets dels dipòsits de formigó armat es dimensionen normalment amb un gruix constant per facilitar-ne l'execució i evitar la necessitat d'armadura transversal. En els casos més freqüents d'alçada d'aigua  $h \leq 6m$ , com a gruix de paret es pot considerar  $e = 0.1 * h$ , no inferior a 0.2 metres. La capacitat resistent dels dipòsits cilíndrics és més favorable per tant al resultar menors els esforços en les parets cilíndriques, els espessors son menors. S'agafa con valor  $e = 0.05 \cdot h + 0.01 * r < 0.2m$  L'espessor de la solera no ha de ser inferior al de la paret.

El càlcul rigorós dels esforços als dipòsits circulars és un problema complex i difícil de portar a terme. A la pràctica, per això s'utilitzen els mètodes simplificats de càlcul o models espacials d'elements finits.

Per abordar el càlcul amb certa facilitat es considera la paret del dipòsit com una làmina cilíndrica de revolució sotmesa a pressió hidrostàtica. Al presentar simetria respecte l'eix del cilindre, tant de la làmina com de la càrrega, el problema se simplifica notablement.

De manera visual, es poden observar els esforços que es generen en el cas d'estudi en la Figura 3

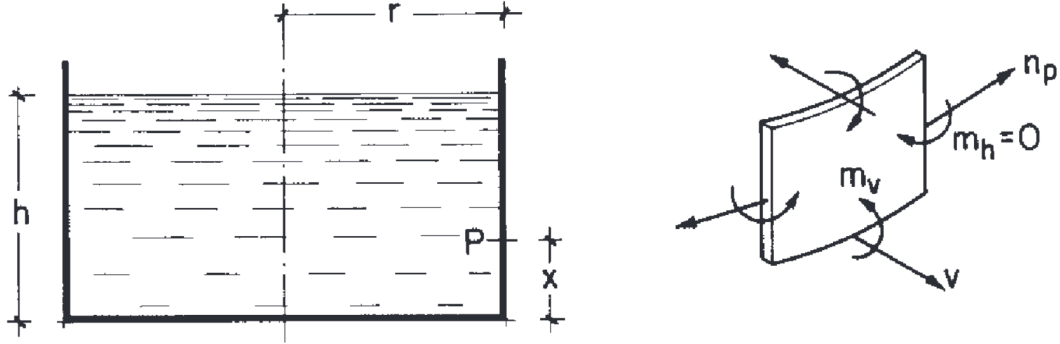


Figure 3: Esforços en la paret d'un dipòsit cilíndric, agafat de Montoya et al. (1987)

El càlcul del esforços s'obtenen de les Equacions 2 i 3.

$$n_p = \alpha_p * r * h * \delta \quad (2)$$

$$m_v = \alpha_v * r * h * e * \delta \quad (3)$$

on  $n_p$  és l'esforç de tracció unitària,  $m_v$  és el moment reflector unitari,  $r$  és el radi del dipòsit,  $h$  és l'alçada del líquid,  $e$  = gruix de la paret,  $\delta$  és el pes específic de l'aigua i,  $\alpha_p$  és el coeficient adimensional per l'esforç de tracció i  $\alpha_v$  és el coeficient adimensional per el moment reflector

Per al càlcul de  $\alpha_p$  i  $\alpha_v$  es pren el valor màxim o més restrictiu del coeficient  $K = \frac{1.3 * h}{r * e}$  a les Figures 4, 5 i 6 que són assajos experimentals per posar a prova tots dos els esforços.  $\alpha_p$  s'obté usant la Figura 4, i  $\alpha_v$  s'obté usant les Figures 5 i 6 per a diferents valors de  $K$ .

Finalment, amb aquests valors de  $\alpha$  i amb les Equacions 2 i 3 es troba el esforç de tracció i el moment màxim d'encastament.

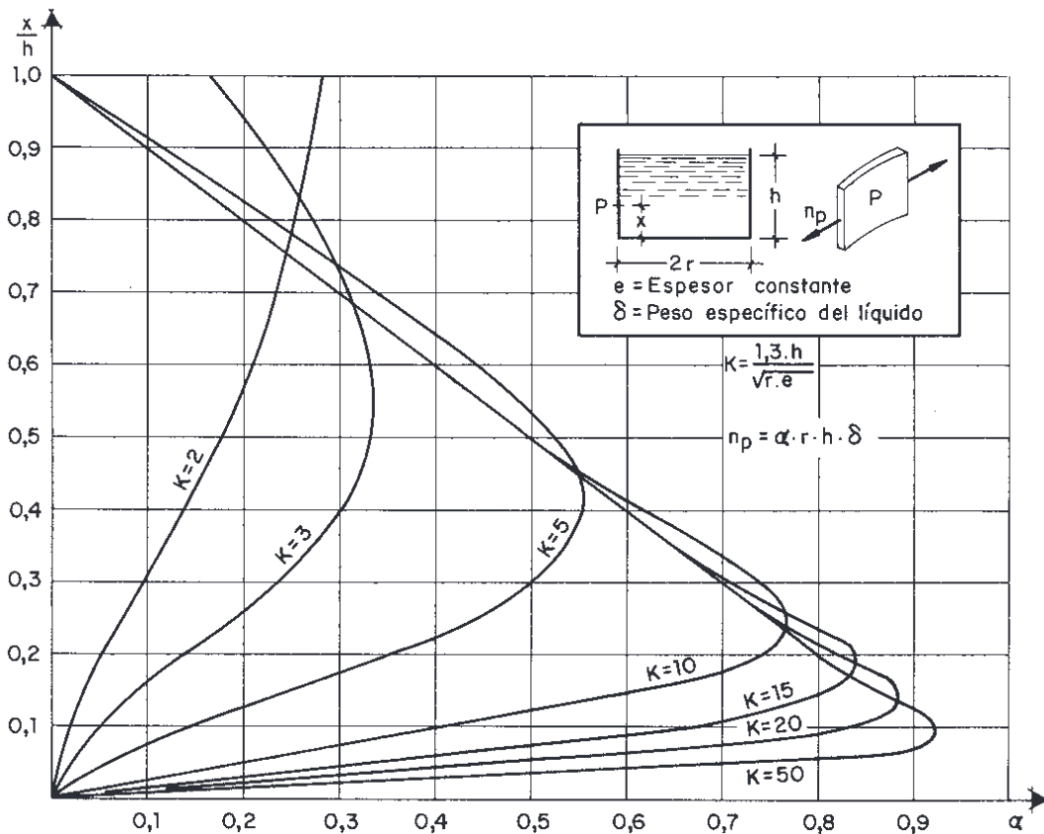


Figure 4: Esforç de tracció en dipòsits cilíndrics encastats al fons, agafat de Montoya et al. (1987)

### 3.5.3 Validació del disseny del dipòsit

Per poder realitzar la valoració de l'estructura es procedeix a realitzar les comprovacions pertinents utilitzant l'Equació 4.

- a) **Comprovació a tallant:** Aquesta comprovació es fa segons la Instrucció espanyola per plaques sense armadura transversal:

$$\gamma_f * V \leq V_u = 0.12 * \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) * \sqrt[3]{100 * \rho * f_{ck} * d} [N/mm] \quad (4)$$

siguent el canto útil  $d$  (en mm) i siguent  $\rho$  la quantia geomètrica de l'armadura longitudinal.

En la Taula 1 es mostren els valors del moment i del tallant màxim unitaris en l'arrac de la paret, en funció del paràmetre  $K$ .

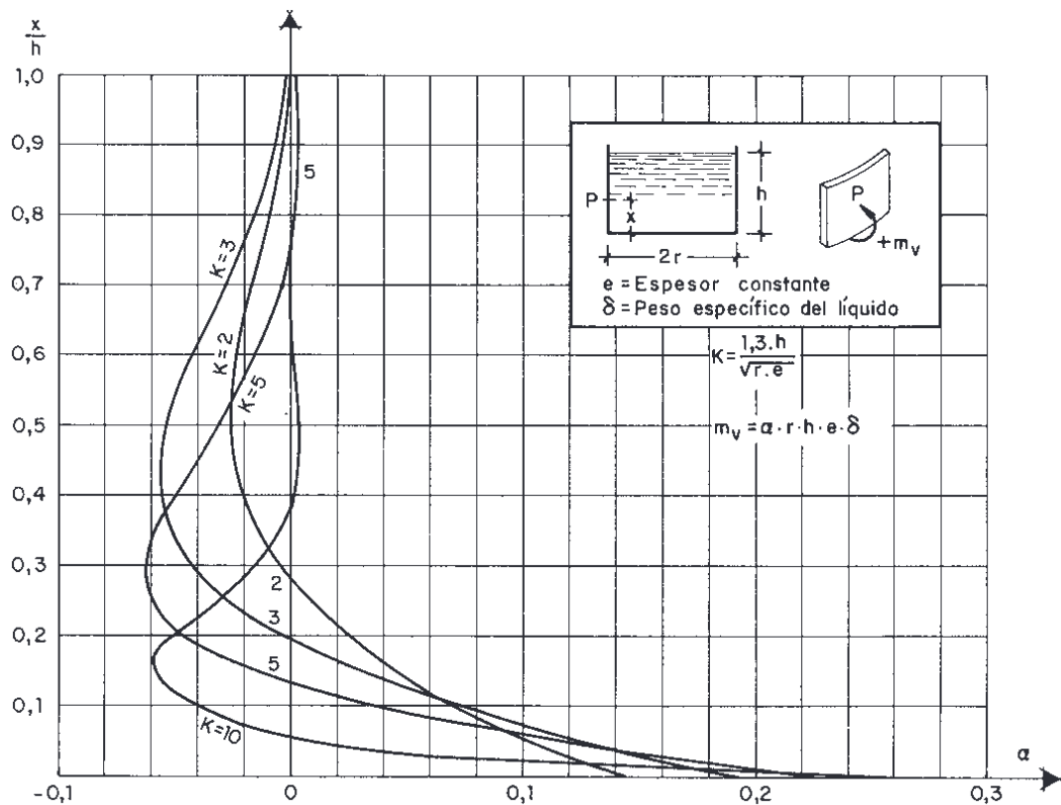


Figure 5: Moments en dipòsits cilíndrics encastats al fons, per  $K \leq 10$ , agafat de Montoya et al. (1987)

$K$	2	3	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\alpha_m$	0.147	0.196	0.235	0.265	0.275	0.279	0.282	0.284	0.286	0.287	0.288	0.28
$\alpha_v$	-0.882	-1.471	-2.647	-5.588	-8.529	-11.471	-14.412	-17.353	-20.294	-23.235	-26.176	-29.118

Table 1: Esforços a l'arrencada de la paret, agafat de Montoya et al. (1987)

Un cop determinats els esforços de les diferents plaques, es procedeix a obtenir les armadures. Per facilitar els càlculs, solen determinar-se, independentment, les armadures de flexió i les de tracció, sumant-se les seccions corresponents.

És important tenir en compte que l'armadura necessària per controlar la fissuració sol ser més gran que l'obtinguda per consideracions resistents.

- b) **Comprovació a fissura:** aquesta és el focus del problema de càlcul de les parets del dipòsit. Per això es segueixen les prescripcions del mètode del Estat límit de Fissura.

Amb els valors admissibles d'ample de fissura que es mostren en la Taula 2, alguns autors han proposat que es pot garantir el flux nul d'aigua

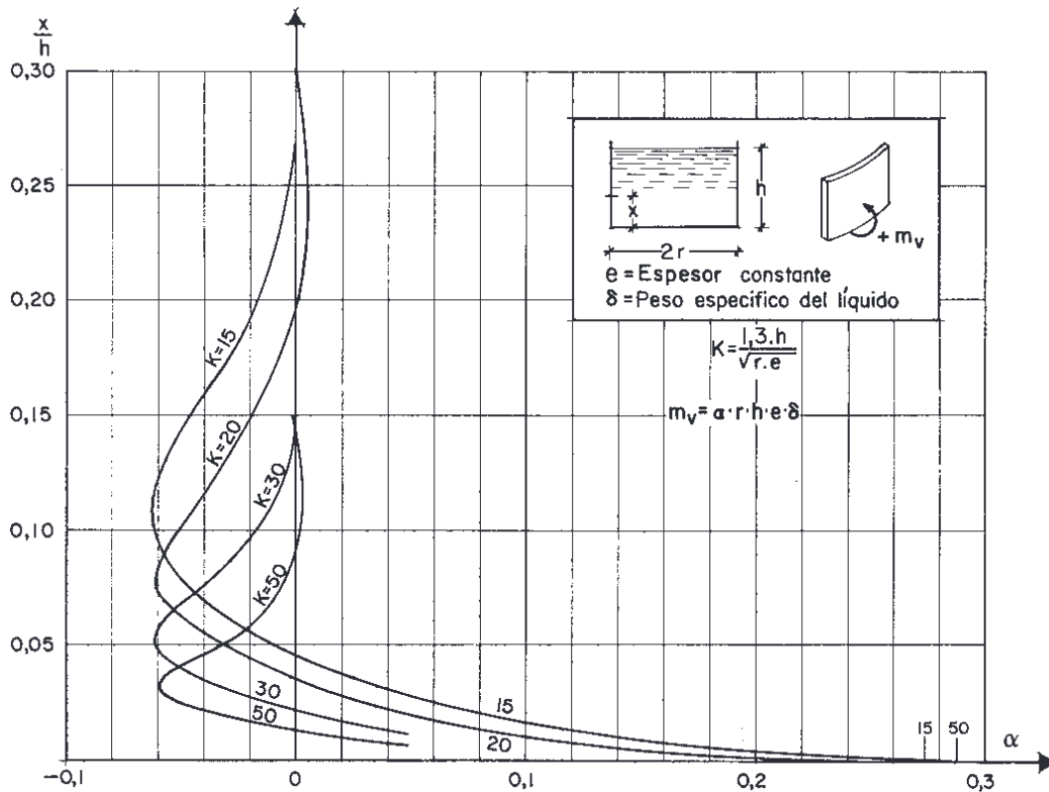


Figure 6: Moments en dipòsits cilíndrics encastats al fons, per  $K \geq 15$ , agafat de Montoya et al. (1987)

Jaccoud (1987).

Per casos ordinaris es poden agafar els valors mencionats en anterioritat:

- Dipòsits sotmesos a alternances de humitat-sequedat/exposats a gelades o a agents agressius :  $w = 0.1mm$
- Dipòsits permanentment submergits :  $w = 0.2mm$

La determinació de l'ample de fissura en elements sotmesos a flexió i tracció no està resolta, per això degut a que els esforços de tracció son

Relació entre alçada d'aigua i gruix de paret	Amplada límit
2.5	0.2
5	0.15
10	0.1
20	0.05

Table 2: Ample límit de fissura que proporciona estanquitat a l'aigua, agafat de Montoya et al. (1987)

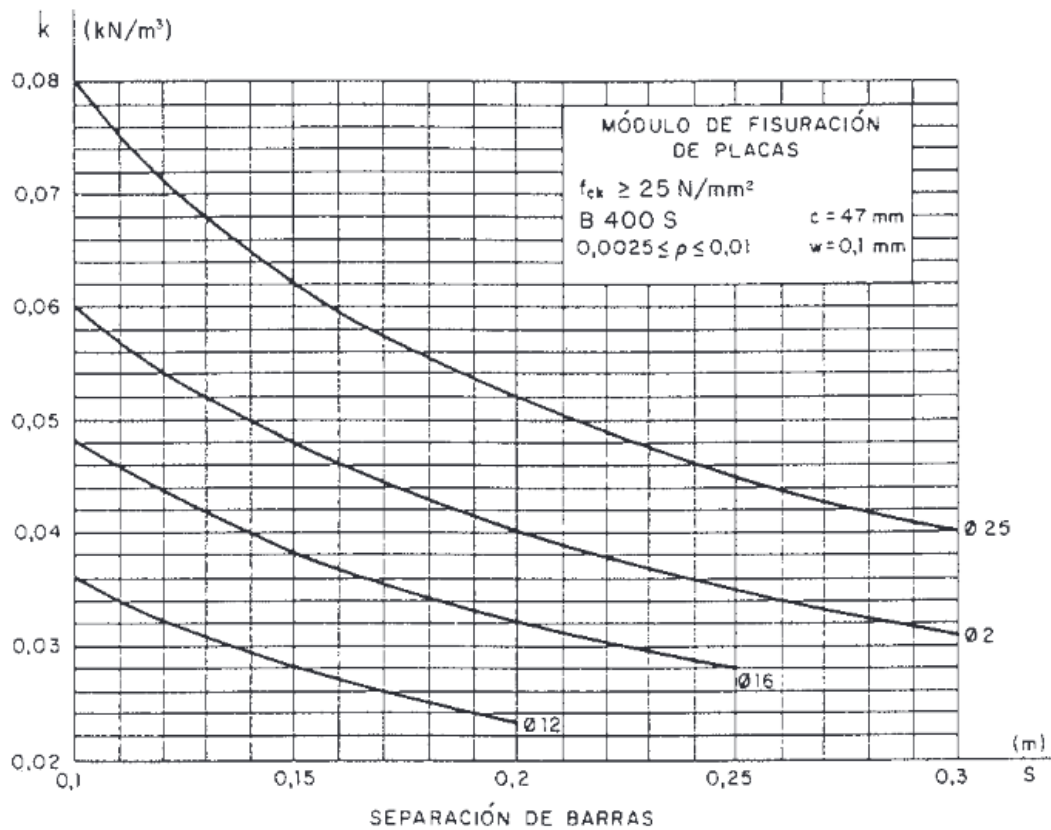


Figure 7: Valors de  $k$  per a una amplada de fissura de  $0.1\text{mm}$

relativament petits, l'ample de fissura es realitza en flexió simple. L'armadura de flexió es determina per condicions de fissura, i la de tracció simple adoptant un valor molt baix per la tensió admissible del acer.

Per determinar l'armadura de flexió necessària es comença determinant el mòdul de fisuració  $k$  mitjançant la Equació 5

$$k = \frac{0.75 * m}{(1.39 - e) * e^2 * 10^4} \quad (5)$$

on  $m$  és el moment unitari de servei en  $\text{kNm/m}$  i,  $e$  és el gruix de la paret en metres.

Amb aquest valor de  $k$  i el diàmetre triat es busca en la Figura 7 la separació de les barres corresponent.

- c) **L'armadura horitzontal** es calcula a partir del esforç de tracció màxim (Ec. 2), aquests esforços solen ser valors molt petits.



Buscant en la Figura 4 amb el valor de  $K$ , s'obté  $\alpha$ , que correpon al esforç.

- d) **Organització de les armadures i quanties mínimes:** Com armadures es poden utilitzar barres corrugades de diàmetres 12,15,20 i 25. Segons la mida del dipòsit i el gruix de les parets. També pot ser armat amb malles electrosoldades. La separació entre barres és recomanable que sigui inferior a 30cm, especialment es recomana  $s \leq$  a 25cm i menors que el gruix de la paret.

Les limitacions de quantia d'armadures són requisits que cal complir en el disseny d'estructures de formigó armat. S'apliquen tant a les armadures longitudinals com a les transversals:

- Quantia geomètrica i mecànica: La quantia geomètrica és el quocient entre les àrees d'acer i formigó, referit normalment al cantell útil. La quantia mecànica és el quocient entre les capacitats mecàniques de l'acer i el formigó.
- Límits inferiors: Els límits inferiors que imposa la normativa a les quanties de les armadures tenen una doble justificació: (i) evitar el trencament fràgil de les peces; i evitar l'aparició de fissures per retracció o efectes tèrmics.

La primera raó ha conduït tradicionalment a limitar inferiorment la quantia mecànica de les armadures, i la segona, a limitar inferior i superiorment la quantia geomètrica.

- Límits superiors: Algunes normes limiten també superiorment les quanties de les armadures, bé per raons econòmiques o bé per evitar dificultats durant el procés de formigonat de la peça.

En la Taula 3 es mostren els valors mínims de les quanties geomètriques mínimes en qualsevol cas, segons la instrucció espanyola.

- Quantia mínima en flexió simple o composta: Per evitar la rotura l'armadura de tracció ha de ser capaç d'absorbir un esforç no menor que el de tracció portat a terme per el formigó sol, en el moment en què es produeix la fisuració. El valor aproximat daquest esforç, en secció rectangular es  $Uc = 0.04 * f_{cd} * b * d$ ; i segueix l'Equació 6.

Tipus d'element estructural		Classe d'acer	
		Fyk=400	Fyk=500
Pilars		0.004	0.004
Lloses (1)		0.002	0.0018
Bigues (2)		0.0033	0.0028
Murs (3)	Armadura horitzontal	0.004	0.0032
	Armadura vertical	0.0012	0.0009

Table 3: Quanties geomètriques mínimes en tant per mil, referides a la secció total de formigó. (1) Quantia mínima de cadascuna de les armadures, longitudinal i transversal, repartida a les dues cares. A les lloses recolzades sobre el terreny, es disposarà a la cara inferior la meitat daquesta armadura.; (2) Quantia mínima corresponent a la cara de tracció. Es recomana disposar a la cara oposada una armadura mínima igual al 30% de la indicada a la taula; (3) La quantia mínima vertical és la corresponent a la cara de tracció. Es recomana disposar a la cara oposada una armadura mínima igual al 30% de la indicada a la taula. L'armadura mínima horitzontal s'ha de repartir a les dues cares.

$$U_s = A_s * f_{yd} \geq 0.04 * f_{cd} * b * d \quad (6)$$

on  $A_s$  és la secció de l'armadura de tracció,  $b$  l'amplada de la secció i  $d$  el seu cantell útil.

La generalització de la fórmula anterior per seccions de qualsevol forma es realitza establint l'equilibri de la secció un instant abans de fisurar i un instant després. Un instant abans de fissurar es  $M_{fis} = W_1 * f_{ct,mfl}$ , i un instant després si la tensió de l'armadura arriba al seu límit elàstic es  $M_{fis} = A_s * f_{yd} * z$ . Igualant les dues expressions sobté l'armadura per la qual no es produirà la plastificació de l'armadura que produeix la rotura (Eq. 7).

$$A_s * f_{yd} = 0.25 * \frac{W_1}{h} * f_{cd} \quad (7)$$

on  $A_s$  és l'àrea de l'armadura,  $f_{yd}$  és la resistència de càlcul de l'acer de l'armadura en tracció,  $W_1$  és el mòdul resistent de la secció total, relatiu a la fibra més traccionada,  $f_{cd}$  és la resistència de càlcul del formigó en compressió, i  $h$  és el cantell total de la secció.

## 4 Resultats i discussió

S'ha creat un model paramètric, de caràcter genèric amb l'ús de Rhino-Grasshopper. Aquest disseny general del model es pot observar en la Figura 8.

En aquesta figura es mostren els diferents mòduls utilitzats en el model, cadascún representa un aspecte dels que s'han desenvolupat en la metodologia. Els quals son:

- a) Càlcul gruix de la paret del dipòsit
- b) Comprovació a Tallant
- c) Càlcul recobriment mínim
- d) Càlcul quantia geomètrica mínima
- e) Càlcul quantia mecànica mínima
- f) Càlcul quantia per Esforç (flexió Pura)
- g) Càlcul Armadura Vertical per condicions de Fissura
- h) Càlcul Armadura horitzontal

D'altra banda també apareixen els mòduls que generen la representació gràfica del dipòsit com també de les armadures en el model.

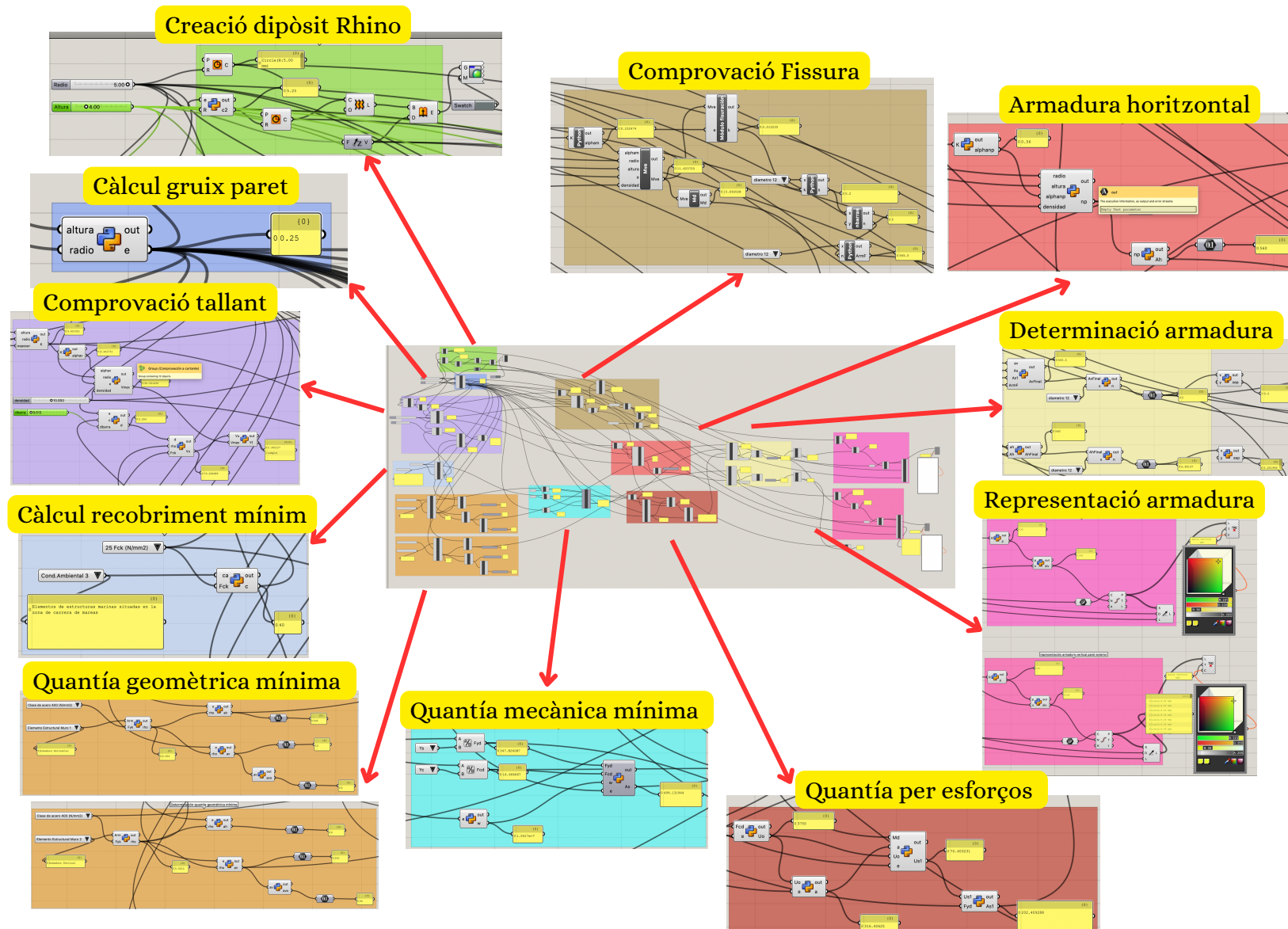


Figure 8: Diagrama general del model paramètric.

## 4.1 Exemple d'aplicació

Per mostrar l'aplicatiu del model es decideix plantejar els següents valors i dades d'entrada segons Montoya et al. (1987) a la subsecció 27.8: Dipòsit cilíndric de  $5m$  de radi i alçada de aigua de  $4m$ , recolzat sobre el terreny. Resistència de projecte del formigó  $F_{ck} = 25N/mm^2$ , i del acer  $F_{yk} = 400N/mm^2$ . Coeficients de seguretat  $\gamma_c = 1.5$ ,  $\gamma_s = 1.15$  i  $\gamma_f = 1.5$ . Tensió admissible per el acer a tracció simple,  $\rho_{s,adm} = 100N/mm^2$ . Gruix màxim fissura  $W_{max} = 0.1$ . El líquid que s'emmagatzema es aigua potable,  $\rho = 10kN/m^3$

### 4.1.1 Càlcul del gruix de la paret

Amb els paràmetres d'imput que decideix l'usuari, en el cas estudiat els mencionats anteriorment, en primer lloc es procedeix a calcular el gruix de la paret del dipòsit tal i com es mostra en la Figura 9.

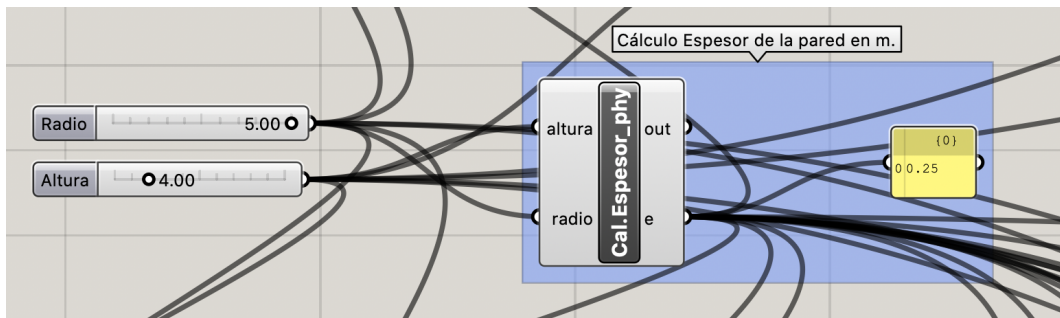


Figure 9: Gruix de la paret del dipòsit

### 4.1.2 Comprovació a tallant

A continuació es realitza la comprovació a tallant segons la Instrucció Espanyola per a plaques sense armadura transversal. La Figura 10 mostra el conjunt de components programats amb el càlculs corresponents.

Per poder realitzar l'aplicació de l'equació, primerament es realitza el càlcul del recobriment mínim que s'ha d'aplicar segons l'exposició i la resistència del Formigó. Veure Figura 11. Amb aquest es troba el canto útil. A continuació es

realitza el càlcul de la quantia geomètrica mínima com ho mostren les Figures 12 i 13. Amb l'obtenció d'aquest valors, es realitza la comprovació.

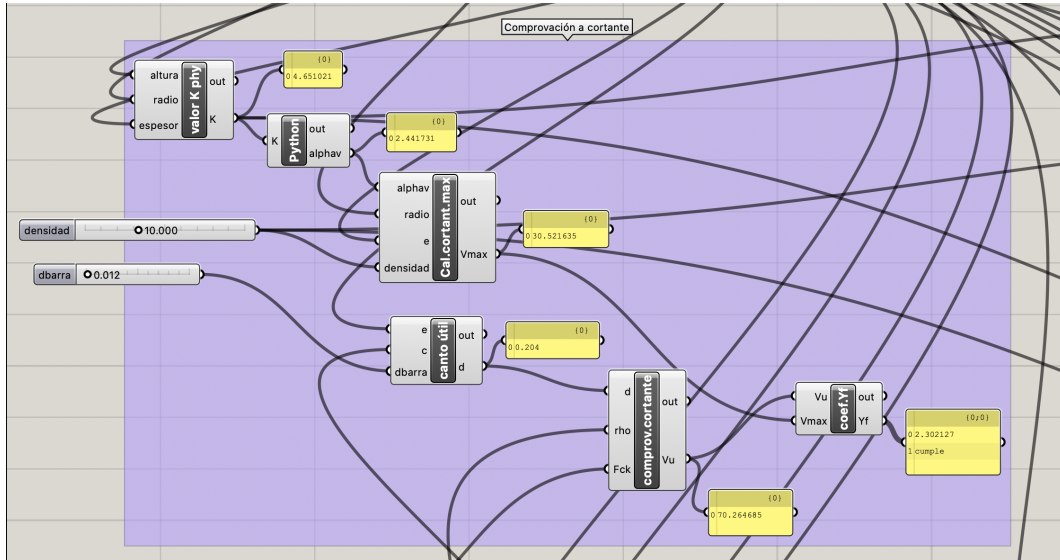


Figure 10: Comprovació a Tallant

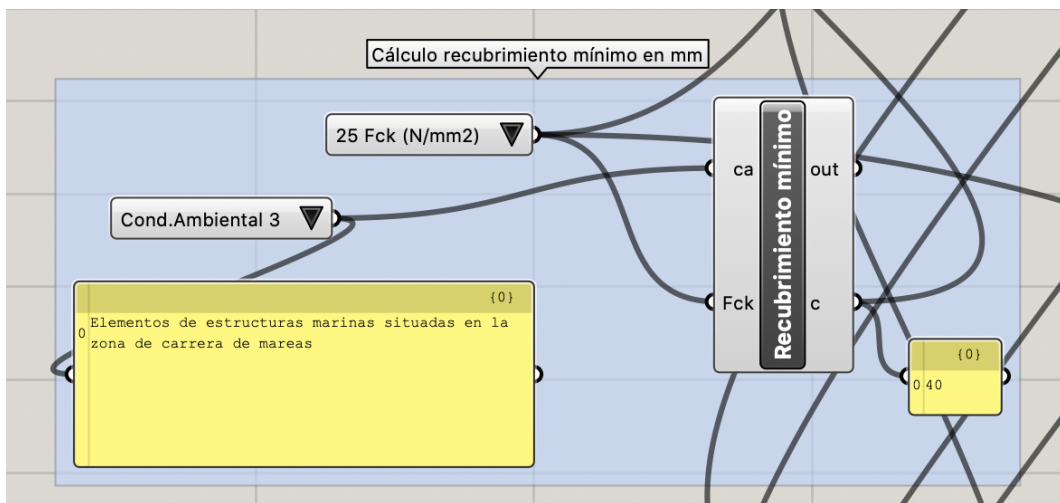


Figure 11: Càlcul recubriment mínim

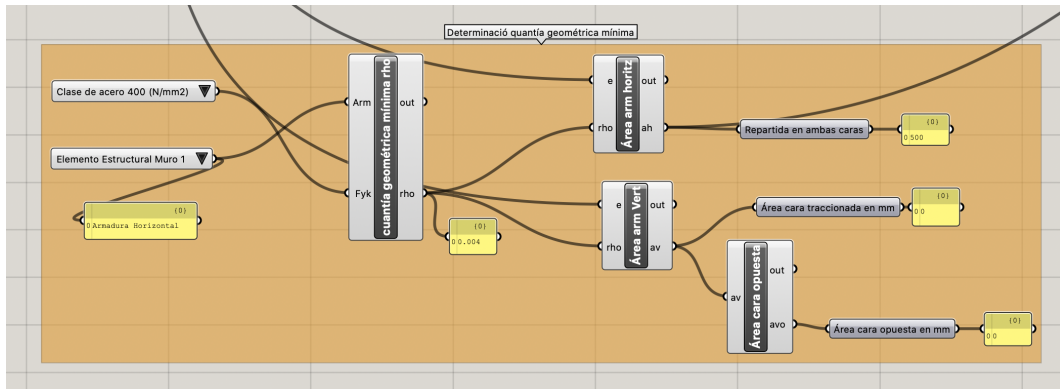


Figure 12: Quantia geomètrica mínima per armadura horitzontal

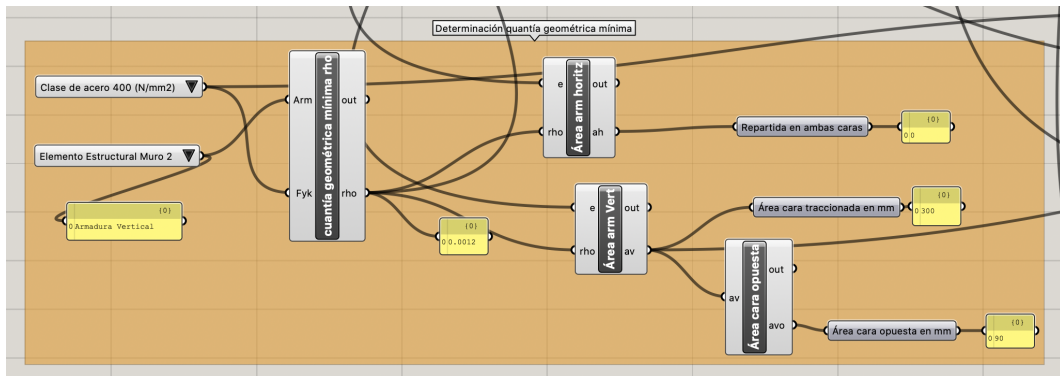


Figure 13: Quantia geomètrica mínima per armadura vertical

#### 4.1.3 Determinació quantia mecànica mínima

Seguidament es realitza el càlcul de la quantia mínima per evitar la rotura. En la Figura 14 es mostren els components que corresponen per el càlcul d'aquest mòdul.

#### 4.1.4 Determinació quantia per esforços

El càlcul d'aquesta quantia per esforç es realitza simplificant el cas d'estudi en només flexió simple degut a que els esforços de tracció són molt petits. La Figura 15 mostra el procediment.

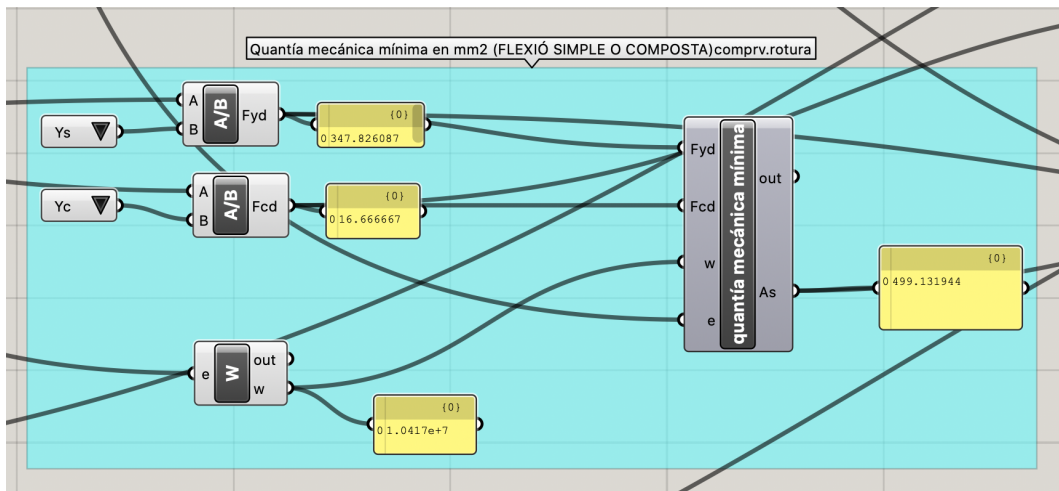


Figure 14: Quantia mecànica mínima per comprovació rotura en flexió simple o composta

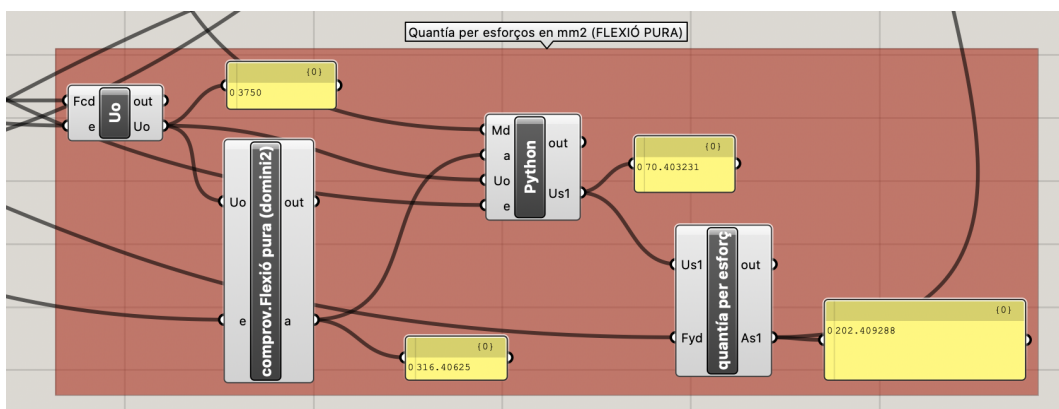


Figure 15: Quantia mínima per esforços en flexió pura

#### 4.1.5 Quantia mínima per condicions de fissura

Un cop s'han trobat les quanties geomètriques, mecànica i per esforç es procedeix a realitzar el càlcul de l'armadura vertical en condicions de fissura. Aquest es el mòdul fonamental per la validació d'aquest tipus d'estructures, ja que és la més restrictiva.

En la Figura 16 s'observen els components que la defineixen. Per tal de mostrar la progració interna dels components, en la Figura 17 es mostra el codi Python que s'ha realitzat en un d'ells per generar el resultat.



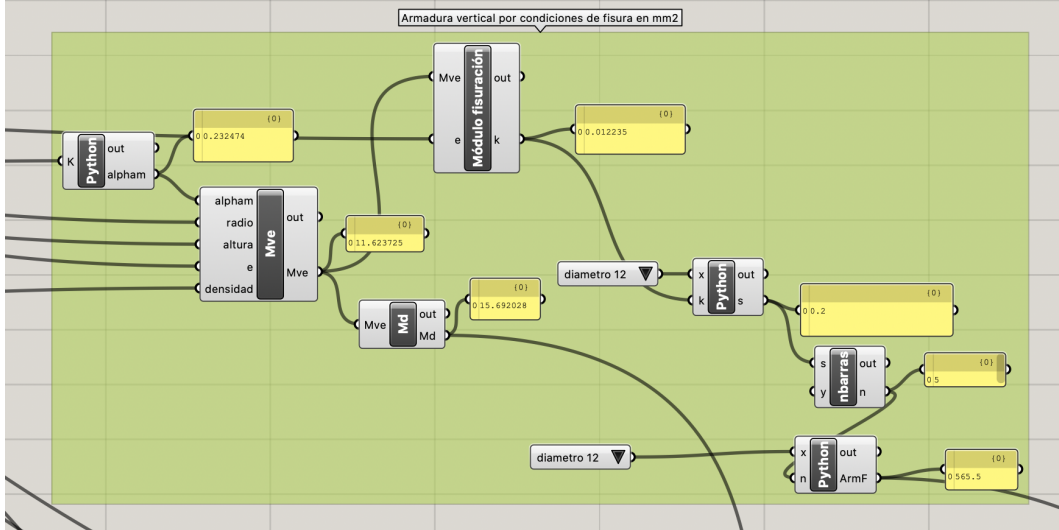


Figure 16: Quantia mínima armadura vertical per condicions de fissura

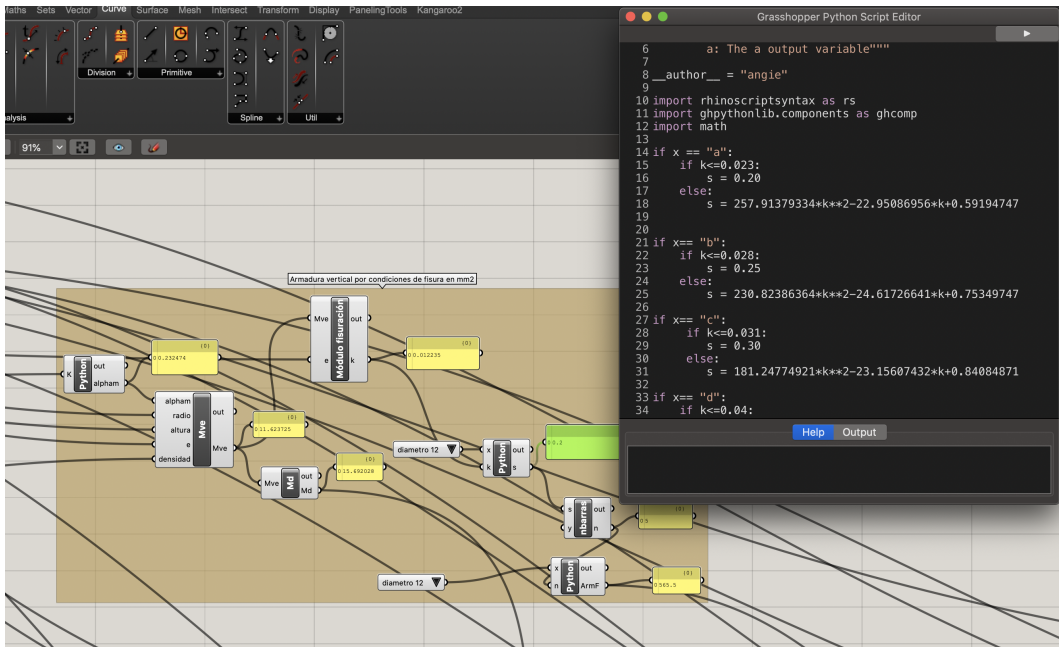


Figure 17: Exemple de programació de un component amb Python

#### 4.1.6 Determinació Armadura Horitzontal

A continuació es realitza el càlcul de l'armadura horitzontal a partir del esforç de tracció màxim. En la Figura 18 s'observa el procediment

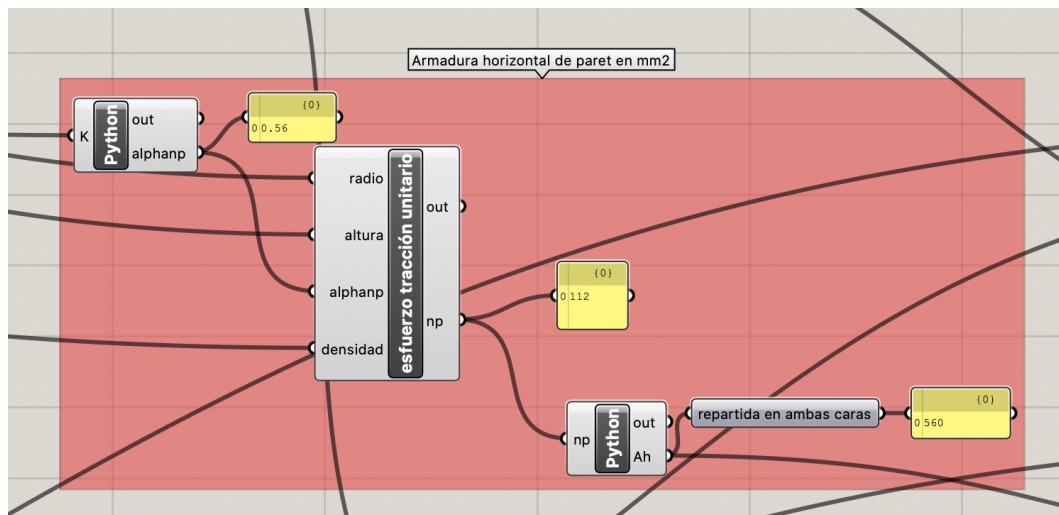


Figure 18: Determinació armadura horitzontal per esforç màxim de tracció

#### 4.1.7 Determinació armat de les parets del dipòsit

Finalment es procedeix a fer el comparatiu de les àrees d'acer per cada tipus de quantia. S'estipula la quantia que sigui de valor més gran i per lo tant la que dona compliment a la norma. Com s'observa en la Figura 19 la quantia per condicions de fissura és la que genera el valor més restrictiu

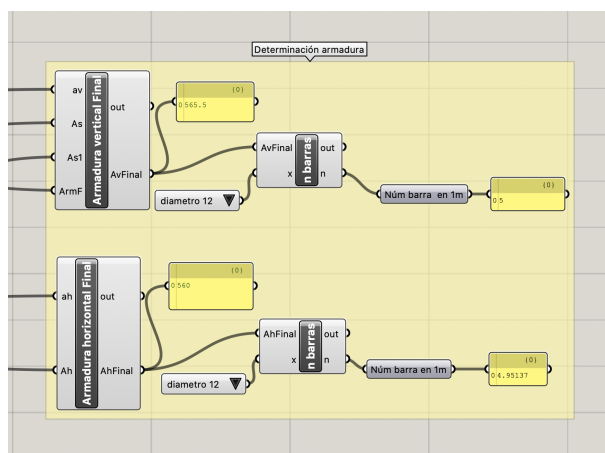


Figure 19: Resultat Armat després d'efectuar comprovacions

#### 4.1.8 Representació gràfica paret del dipòsit i armadures

Per tal de poder observar que el model és paramètric, es genera un mòdul destinat a la representació gràfica. En la Figura 20 s'observen els components de Grasshopper utilitzats per mostrar la paret del dipòsit com a resultat en la Figura 21

D'altra banda es genera un altre mòdul que representa la posició de les barres en la paret, segons la separació obtinguda, veure Figura 22 i 23.

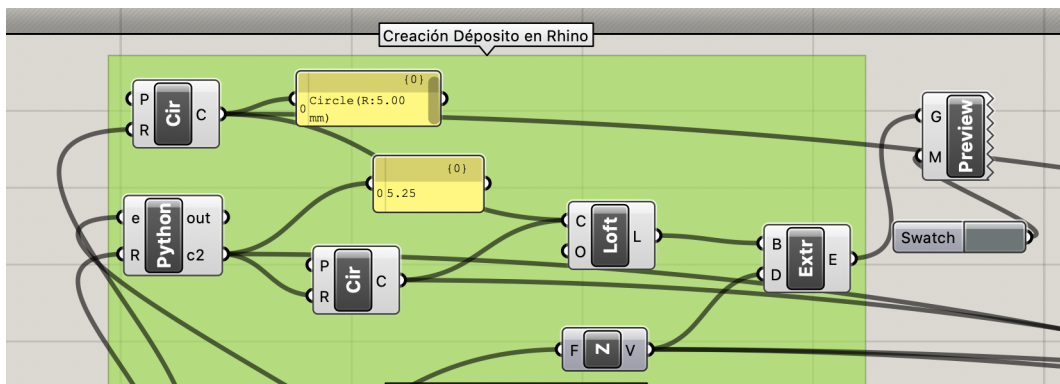


Figure 20: Creació mòdul representació dipòsit

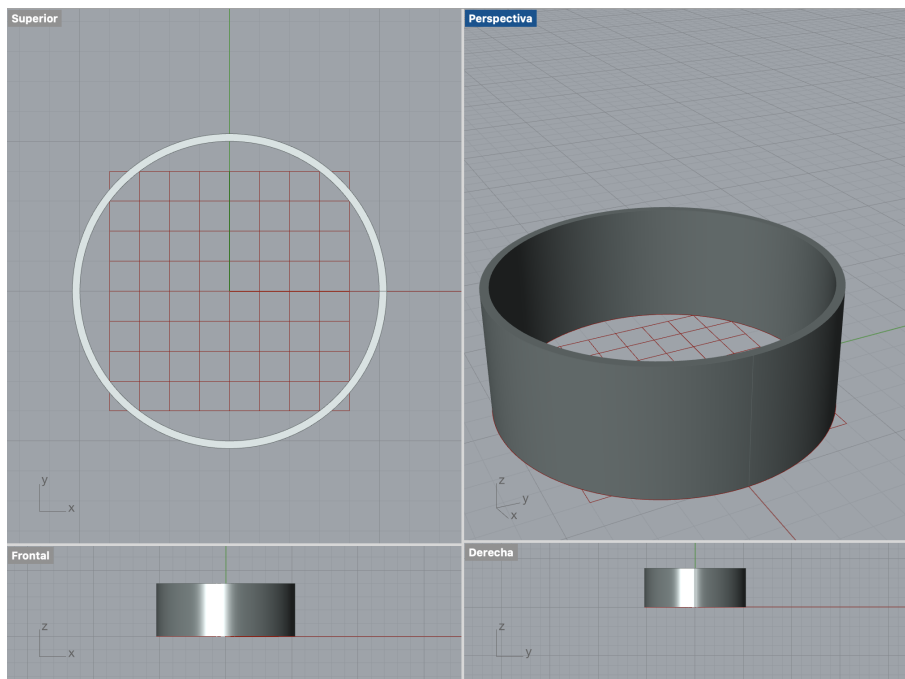


Figure 21: Representació paret del dipòsit

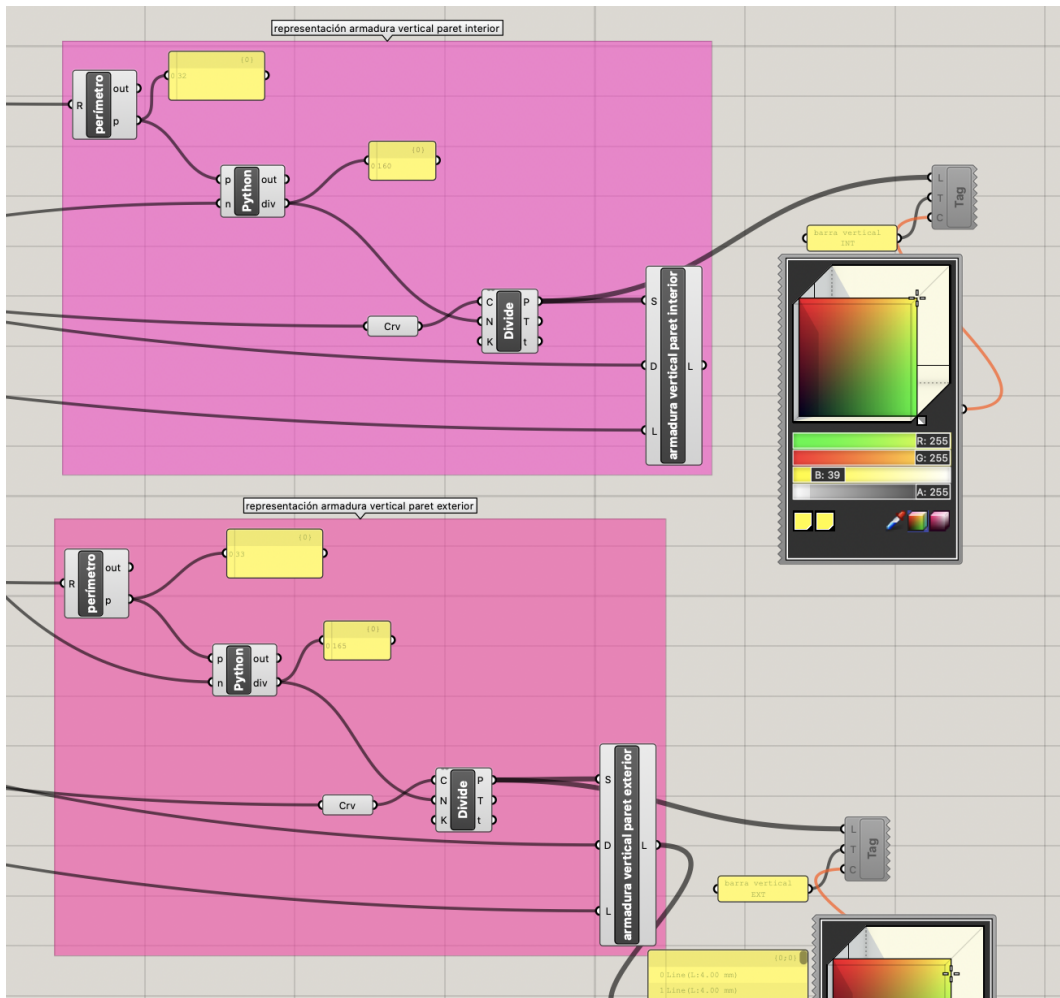


Figure 22: Creació mòdul representació barres segons separació obtinguda

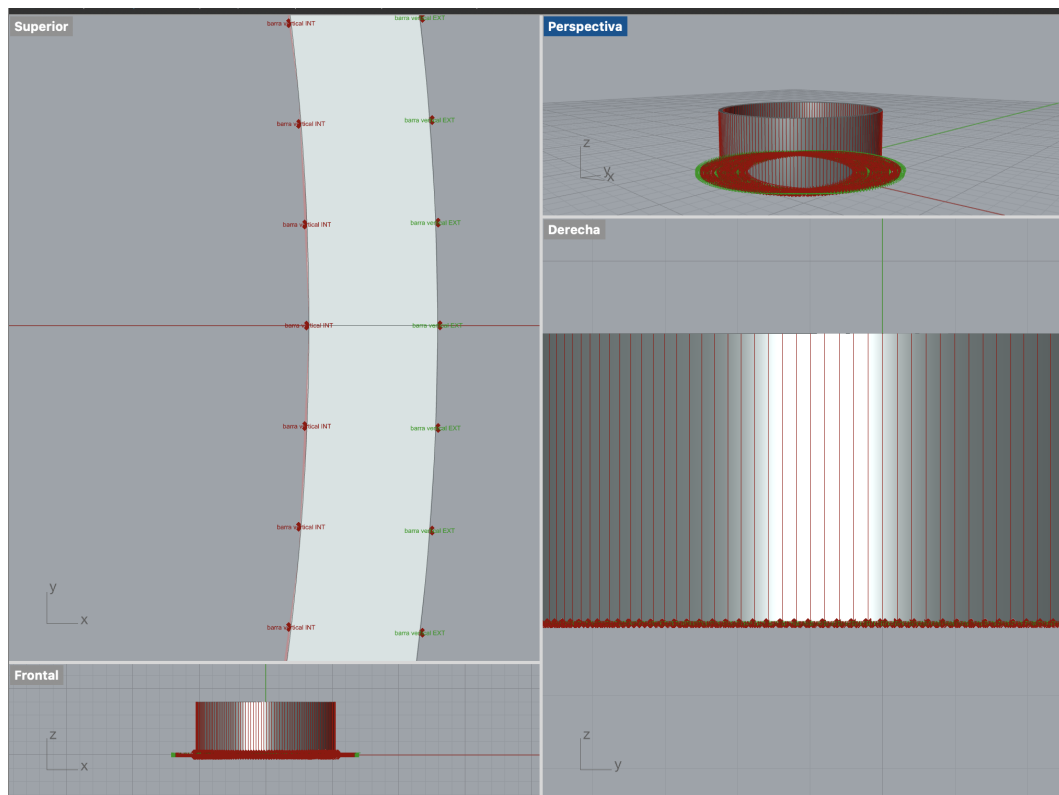


Figure 23: Representació barres segons separació obtinguda

## 4.2 Avantatges, limitacions i oportunitats

Com es pot observar el codi creat permet generar tots els càlculs i comprovacions pertinents al disseny estructural del dipòsit.

Els resultats obtinguts son sòlids i satisfactoris per diversos motius: en primer lloc s'obté un càlcul automatitzat, es a dir que funciona per totes les variacions en mides de dipòsits que es vulguin. A conseqüència d'això també es pot valorar que el procediment permet obtenir resultats instantanis per ús en altres casos. No cal repetir els càlculs ja que l'eina ja està programada. El treball es realitza un cop i es aplicable per múltiples variacions de disseny.

En segon lloc, permet tenir tant càlcul estructural com representació i disseny del dipòsit alhora. En un mateix codi s'obté una representació visual com la comprovacions de càlcul. Això permet tenir una visió i una aproximació genèrica del resultat del dipòsit.

D'altre banda aquesta eina permet realitzar un control accessible de cada pas a realitzar per realitzar les comprovacions, en altres paraules permet un rastreig de les dependències que s'estableixen en cada component (variables de càlcul), i així trobar amb més facilitat, si és el cas, la variable que s'hauria de modificar si alguna comprovació no compleix.

Lligat a aquest rastreig, el diagrama de fluxe que genera la codificació amb Grasshopper es un altre gran avantatge ja que permet veure cada aspecte (mòdul) del procediment de càlcul, la qual cosa aporta una comprensió visual de tots els aspectes del càlcul.

Una de les limitacions que es troba alhora d'aplicar aquesta metodologia es que es precisa d'uns coneixements base de programació, per tant en primera instància l'elaboració del model si no es tenen aquests coneixements, es un procés lent, de múltiples errors que s'han d'anar resolent. Si la persona que ho executa ja té aquests coneixements adquirits el procés es redueix a poques hores. Seguint a això un altre limitació és el fet que l'eina de Grasshopper presenta pocs components per defecte relacionats a la branca d'Arquitectura, lo que encara enfatitza més el fet d'utilitzar el component de programació amb Python.

Com a oportunitats a futures aplicacions, el model obtingut no genera els càlculs per dimensionat i disseny de la solera de fons, ni presenta la possibilitat de generar, si es vol, el dipòsit amb tapa. Aquestes altres comprovacions es podrien implementar en pròximes millores del codi.

Altres aspectes per optimitzar l'eina és la representació gràfica de les barres, en aquest codi s'ha aconseguit definir la separació de les barres indicant de manera simplificada la posició en la paret. Com a futura millora es podria representar el gruix de la barra en el model i definir la posició exacta dintre la paret, tenint en compte el recobriment. Finalment per tenir una eina més completa es podria implementar en el codi una extrapolació per generar l'armat horitzontal en cada alçada desitjada de la paret del dipòsit, ja que actualment en aquest es busca cobrir el esforç màxim.

## 5 Conclusions

Amb aquest cas d'estudi emprat s'ha arribat a:

- a) Aprendre les tècniques i recursos relacionats amb el disseny paramètric.
- b) Obtenir un model paramètric del dipòsit mitjançant l'ús dels softwares i l'aplicació de la normativa: permet la simulació prèvia del disseny òptim del dipòsit. Amb l'aplicació del mètode d'elements finits (MEF) s'ha generat una solució numèrica aproximada del dipòsit, en el qual estan definides certes equacions que caracteritzen el comportament físic del cas d'estudi.
- c) Verificació del requeriments normatius de càlcul estructural: amb les eines de programació s'han insertat els requeriments normatius de càlcul estructural en el model paramètric, per poder verificar que pel disseny triat es compleixen els estats últim i de servei. Sobretot realitzant la verificació al problema de la fissura.
- d) Exposar i detallar de forma entenedora el procés seguit, incloent tant les eines emprades com el resultats obtinguts.
- e) Anàlisi crítica dels resultats obtinguts i proposta per futures evolucions i desenvolupaments relacionats amb el tema del projecte.

## Bibliografía

- Al-Azzawi, T. and Al-Majidi, Z. (2021). Parametric architecture: the second international style. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 1067, page 012019. IOP Publishing.
- Burphy, M. (2011). *Scripting cultures: Architectural design and programming*. John Wiley & Sons.
- Caetano, I., Santos, L., and Leitão, A. (2020). Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2):287–300.
- da Silva, L. A., Pires, R. C. S., de Farias, B. M., and Bispo, E. R. (2020). Estudo sobre patologia estrutural em um reservatório de água de concreto armado. *Revista Augustus*, 25(50):66–80.
- Echeverri, P. (2021). Grasshopper para rhino. <https://especialista3d.com/bim/grasshopper-rhino/>.
- Florindo Rabadán, D. (2022). Implementación de herramientas de modelado paramétrico en el ámbito del diseño y ejecución de los edificios.
- García Alvarado, R. and Lyon Gottlieb, A. (2013). Diseño paramétrico en arquitectura; método, técnicas y aplicaciones.
- Hernandez, V. (2023). ¿qué es grasshopper para rhino? <https://especialista3d.com/bim/grasshopper-rhino/>.
- Holzer, D., Hough, R., and Burry, M. (2007). Parametric design and structural optimisation for early design exploration. *International Journal of Architectural Computing*, 5(4):625–643.
- Jaccoud, J.-P. (1987). Armature minimale pour le contrôle de la fissuration des structures en béton. Technical report, EPFL.
- Kalay, Y. E. (2004). *Architecture's new media: Principles, theories, and methods of computer-aided design*. MIT press.
- Marchante, A. (2022). Los beneficios de grasshopper. <https://www.3dnatives.com/es/grasshopper-fabricacion-aditiva-010620212/>.



Montoya, P. J., Meseguer, A. G., and Cabré, F. M. (1987). *Hormigón armado*. Gustavo Gili.

Preisinger, C. and Heimrath, M. (2014). Karamba—a toolkit for parametric structural design. *Structural Engineering International*, 24(2):217–221.

Sanjuan-Delmás, D., Hernando-Canovas, E., Pujadas, P., de la Fuente, A., Gabarrell, X., Rieradevall, J., and Josa, A. (2015). Environmental and geometric optimisation of cylindrical drinking water storage tanks. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20:1612–1624.

Schnabel, M. (2007). Parametric designing in architecture, in, computer-aided architectural design futures (caadfutures) 2007.

Schumacher, P. (2011). *The Autopoiesis of Architecture, Volume I: A New Framework for Architecture*, volume 1. John Wiley & Sons.

## 6 Annex

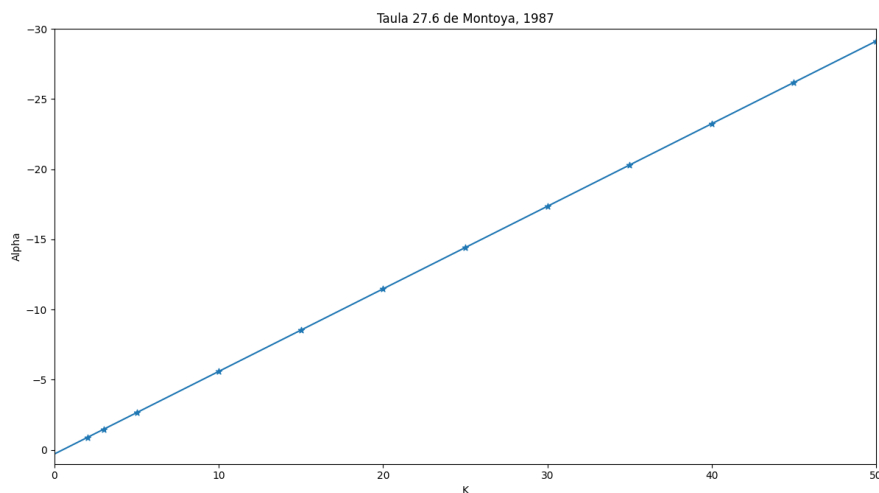


Figure 24: Interpolació Taula 27.6 (Montoya et al., 1987), ver codi abaix

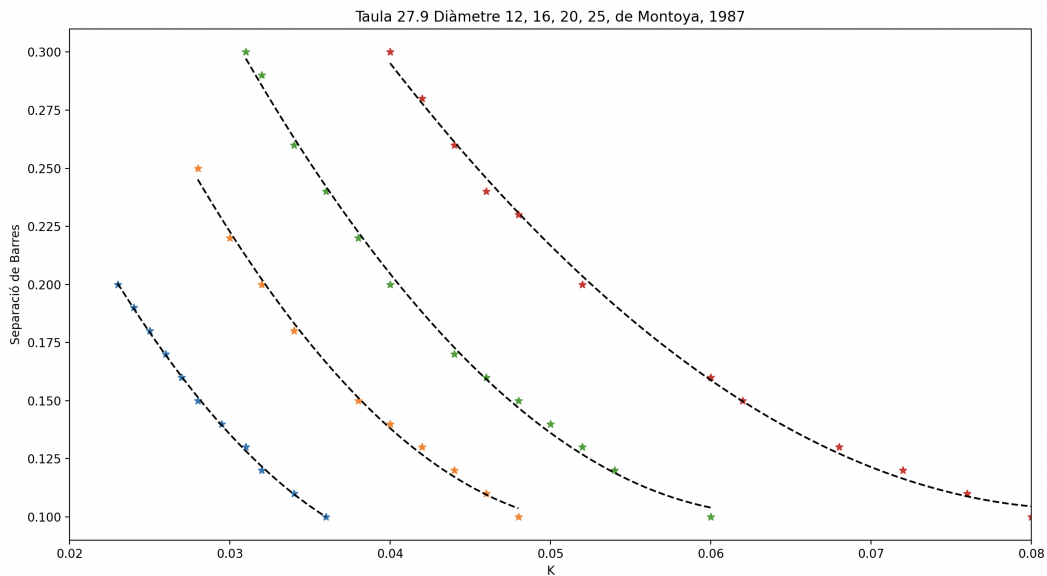


Figure 25: Interpolació Taula 27.9 (Montoya et al., 1987), ver codi abaix

```

1
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from sklearn.linear_model import LinearRegression
4
5 # Interpolació taula 27.6 per angle de tallant
6 #introducció de dades
7 Kinterpolate =
8     [[2], [3], [5], [10], [15], [20], [25], [30], [35], [40], [45], [50]]
9 alphainterpolate =
10     [-0.882, -1.471, -2.647, -5.588, -8.529, -11.471, -14.412,
11     -17.353, -20.294, -23.235, -26.176, -29.118]
12
13 #plot
14 plt.scatter(Kinterpolate, alphainterpolate, marker='*')
15 plt.show()
16
17 #es tria el model per els imputs
18 model = LinearRegression()
19
20 #carrregar les dades per l'ajust del model
21 model.fit(Kinterpolate, alphainterpolate)
22
23 #càlcul de la regressió
24 model = LinearRegression().fit(Kinterpolate, alphainterpolate)
25

```

```

24 #es valida el resultat amb r2
25 r_sq = model.score(Kinterpolate, alphainterpolate)
26
27 #obtenció dels valors de la funció
28 print(f"coefficient of determination: {r_sq}")
29
30 print(f"intercept: {model.intercept_}")
31
32 print(f"slope: {model.coef_}")
33
34 b = model.intercept_
35 m = model.coef_[0]
36
37 plt.scatter(Kinterpolate, alphainterpolate, marker='*')
38 plt.axis([0,50,1,-30])
39 plt.axline(xy1=(0, b), slope=m, label=f'$y = {m:.1f}x {b:+.1f}$')
40 plt.xlabel('K')
41 plt.ylabel('Alpha')
42 plt.title('Taula 27.6 de Montoya, 1987')
43 plt.show()

```

Algorithm 1: Codi per Taula 27.6 de Montoya (1987)

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 #Per diàmetre de 12
5 # Interpolació taula 27.9 per trobar separació entre barres
6 #Introducció de dades
7 k=
   [0.036,0.034,0.032,0.031,0.0295,0.028,0.027,0.026,0.025,0.024,0.023]
8 s = [0.1,0.11,0.12,0.13,0.14,0.15,0.16,0.17,0.18,0.19,0.20]
9
10 #plot
11 plt.scatter(k,s, marker='*')
12
13 p = np.polyfit(k, s, 2)
14 print("aquests son els valors dels pesos del polinomi: " + str(p))
15 # Construct the fitted curve
16 a = p[0]
17 b = p[1]
18 c = p[2]
19 #d = p[3]

```

```

20 #e = p[4]
21 #f = p[5]
22 #g = p[6]
23 #h = p[7]
24 #i = p[8]
25 x_fitted = np.linspace(np.min(k), np.max(k), 100)
26 y_fitted = a*x_fitted**2 + b*x_fitted + c
27 #y_fitted = a*x_fitted**8 + b*x_fitted**7 + c*x_fitted**6 + d*
    x_fitted**5 + e*x_fitted**4 + \
28 #         f*x_fitted**3 + g*x_fitted**2 + h*x_fitted + i
29
30 plt.plot(x_fitted, y_fitted, 'k--', label='Polinomial plot')
31 plt.xlim(0.02, 0.08)
32 #plt.show()
33
34 #Per diàmetre de 16
35 # Interpolació taula 27.9 per trobar separació entre barres
36 #Introducció de dades
37 k= [0.048,0.046,0.044,0.042,0.04,0.038,0.034,0.032,0.03,0.028]
38 s = [0.1,0.11,0.12,0.13,0.14,0.15,0.18,0.20,0.22,0.25]
39
40 #plot
41 plt.scatter(k,s, marker='*')
42
43 p = np.polyfit(k, s, 2)
44 print("aquests son els valors dels pesos del polinomi: " + str(p))
45 # Construct the fitted curve
46 a = p[0]
47 b = p[1]
48 c = p[2]
49 #d = p[3]
50 #e = p[4]
51 #f = p[5]
52 #g = p[6]
53 #h = p[7]
54 #i = p[8]
55 x_fitted = np.linspace(np.min(k), np.max(k), 100)
56 y_fitted = a*x_fitted**2 + b*x_fitted + c
57 #y_fitted = a*x_fitted**8 + b*x_fitted**7 + c*x_fitted**6 + d*
    x_fitted**5 + e*x_fitted**4 + \
58 #         f*x_fitted**3 + g*x_fitted**2 + h*x_fitted + i
59
60 plt.plot(x_fitted, y_fitted, 'k--', label='Polinomial plot')

```

```

61 plt.show()
62
63 #Per diàmetre de 20
64 # Interpolació taula 27.9 per trobar separació entre barres
65 #Introducció de dades
66 k=
        [0.06,0.054,0.052,0.05,0.048,0.046,0.044,0.04,0.038,0.036,0.034,0.032,0.031]
67 s =
        [0.1,0.12,0.13,0.14,0.15,0.16,0.17,0.20,0.22,0.24,0.26,0.29,0.30]
68
69 #plot
70 plt.scatter(k,s, marker='*')
71
72 p = np.polyfit(k, s, 2)
73 print("aquests son els valors dels pesos del polinomi: " + str(p))
74 # Construct the fitted curve
75 a = p[0]
76 b = p[1]
77 c = p[2]
78 #d = p[3]
79 #e = p[4]
80 #f = p[5]
81 #g = p[6]
82 #h = p[7]
83 #i = p[8]
84 x_fitted = np.linspace(np.min(k), np.max(k), 100)
85 y_fitted = a*x_fitted**2 + b*x_fitted + c
86 #y_fitted = a*x_fitted**8 + b*x_fitted**7 + c*x_fitted**6 + d*
        x_fitted**5 + e*x_fitted**4 + \
87 #         f*x_fitted**3 + g*x_fitted**2 + h*x_fitted + i
88
89 plt.plot(x_fitted, y_fitted, 'k--', label='Polinomial plot')
90 plt.show()
91
92 #Per diàmetre de 25
93 # Interpolació taula 27.9 per trobar separació entre barres
94 #Introducció de dades
95 k=
        [0.08,0.076,0.072,0.068,0.062,0.06,0.052,0.048,0.046,0.044,0.042,0.04]
96 s = [0.1,0.11,0.12,0.13,0.15,0.16,0.20,0.23,0.24,0.26,0.28,0.30]

```

```

97
98 #plot
99 plt.scatter(k,s, marker='*')
100
101 p = np.polyfit(k, s, 2)
102 print("aquests son els valors dels pesos del polinomi: " + str(p))
103 # Construct the fitted curve
104 a = p[0]
105 b = p[1]
106 c = p[2]
107 #d = p[3]
108 #e = p[4]
109 #f = p[5]
110 #g = p[6]
111 #h = p[7]
112 #i = p[8]
113 x_fitted = np.linspace(np.min(k), np.max(k), 100)
114 y_fitted = a*x_fitted**2 + b*x_fitted + c
115 #y_fitted = a*x_fitted**8 + b*x_fitted**7 + c*x_fitted**6 + d*
    x_fitted**5 + e*x_fitted**4 + \
116 #         f*x_fitted**3 + g*x_fitted**2 + h*x_fitted + i
117
118 plt.plot(x_fitted, y_fitted, 'k--', label='Polinomial plot')
119 plt.xlabel('K')
120 plt.ylabel('Separació de Barres')
121 plt.title('Taula 27.9 Diàmetre 12, 16, 20, 25, de Montoya, 1987')
122 plt.show()

```

Algorithm 2: Codi per Taula 27.9 de Montoya (1987)