



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Modelització de terraplens sobre sòls argilosos reforçats amb columnes de graves

Treball realitzat per:
Jordi Rofes Ruiz

Dirigit per:
Dani Tarragó
Prof. Gens, Antonio

Màster en:
Enginyeria de camins, canals i ports.

Barcelona, 10 de Juny de 2017

Departament d' enginyeria del terreny

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Índex

Índex

1. Introducció.
 - 1.1 Motivació del treball final de màster.
 - 1.2 Resum de la metodologia
 - 1.3 Teoria existent dins Zhang et al (2013)
 - 1.4 Programa Plaxis
 2. Calibrat del model 2d.
 - 2.1 Introducció.
 - 2.2 Definició del model 2d.
 - 2.3 Presentació i comparació de resultats.
 3. Calibrat del model 3d.
 - 3.1 Introducció.
 - 3.2 Definició del model 3d.
 - 3.3 Presentació i comparació de resultats.
 - 3.4. Conclusions calibrat model.
 - 3.5 Model amb variació del nivell freàtic.
 4. Simulació terraplè sobre sòls argilosos del Llobregat
 - 4.1 Model Mohr-Coulomb; argila amb cohesió variable en funció de la profunditat.
 - 4.2. Nova geometria més conservadora.
 - 4.3 Model Soft soil.
 - 4.5 Obtenció del model àrea equivalent
 5. Conclusions
 6. Futures línies d'investigació
 7. Bibliografia
- Llistat de símbols

1. Introducció.

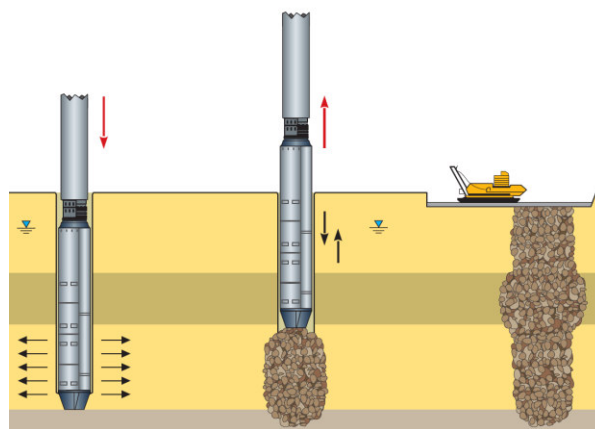
1.1 Motivació del treball final de màster.

El treball consisteix bàsicament en analitzar i aprofundir sobre els resultats obtinguts en l'article: *Numerical investigation on factors for deep-seated slope stability of Stone column-supported embankments over soft clay de Zhan et al. (2013)*. En aquest s'estudia la relació entre un model on les columnes de graves de reforç estan discretitzades i un model on un volum amb el reforç no discretitzat, té propietats equivalents de la regió sota el terraplè, es a dir, combina les propietats de les columnes de graves i l'estrat argilós. Aquest segon model es interessant per el menor cost computacional i la simplicitat d'elaboració.

Degut a experiències prèvies del professor Gens existien dubtes sobre la relació entre els models proposats anteriorment. Conseqüentment el propòsit d'aquest treball és crear un model que representi un terraplè executat sobre un sòl tou, argila, reforçat amb columnes de graves de manera simplificada, es a dir, que l'àrea sota el terraplè formada pel reforç i el sòl es modela amb una superfície plana on el model interpolerà les característiques de les columnes (modelitzades segons Mohr Coulomb) i l'argila (modelitzades segons Soft Soil similar a Cam-clay). Aquest model s'anomenarà àrea equivalent.

Les columnes de graves són una opció de reforç per a sòls tous. Aprofitant la poca resistència a la penetració d'aquets sòls mitjançant maquinaria similar a la d'execució de pilots s'introdueix en en el terreny un vibrador. Quan aquest ha arribat a la profunditat desitjada es torna a retirar cap a la superfície a la vegada que a través de una embocadura s'omple l'espai generat amb graves. La vibració ajuda a densificar tant l'estrat tou com les graves introduïdes. Aquest procediment té diferents variants que es poden trobar definides en Keller (2010). Aquests reforços aconseguixen a través de la col·locació d'un patró de columnes millorar les propietats mecàniques degut a:

- l'existència d'un material granular amb una bona capacitat portant i resistència al tall.
- Les columnes de graves actuen com a drens reduint el temps de consolidació.
- El procés de construcció produeix una densificació del terreny.



Imatge 1. Croquis procediment de construcció de les columnes de grava extret del catàleg de Keller.

1.2 Resum de la metodologia

Es poden diferenciar 3 parts ben diferents en aquest treball: (i) recerca d'informació i aprenentatge sobre el problema, (ii) calibrat del model i obtenció dels resultats per a la casuística proposada i per últim (iii) elaboració del model simplificat.

La primera part es duu a terme llegint articles sobre el tema, principalment el escrit per: *Zhen Zhang et al (2013)* amb títol: *Numerical investigation on factors for deep-seated slope stability of Stone column-supported embankments over soft clay* on es realitza un primer intent de produir un model simplificat interpolant les propietats del sòl i el reforç mitjançant un model de Mohr Coulomb. Com s'explicarà més endavant el model Mohr Coloumb és una bona aproximació a la realitat però té algunes simplificacions excessives. La relació entre el model original i el simplificat conclou en afegir un factor reductor al factor de seguretat del model simplificat. També es revisa la tesina escrita per Calabrese (2016) que serveix d'antecedent per aquest treball ja que també va ser elaborada sota la tutela d'Antonio Gens i Dani Tarragó.

Com a aprenentatge addicional s'han revisat articles com: *Christoulas (1997)* i *Kitazume (2006)*, on s'expliquen el comportament de terraplens sobre sòls tous reforçats en diferents situacions; *Tan (2008)*, on s'explica com passar d'un model axisimètric a un model 2D de deformació plana i en un segon apartat a un model d'àrea equivalent.

Per altra banda en el primer apartat de la metodologia s'ha d'incloure l'aprenentatge del software Plaxis. Aquest va començar a ser desenvolupat en el 1987 com un software de resolució de problemes basat en elements finits aplicats a discs i terraplens a la Universitat de TU Delft; en el 1993 esdevindria una empresa pròpia i a dia d'avui es pot considerar el software líder per a la modelització de problemes geotècnics mitjançant elements finits. L'explicació en detall del software i dels models de materials emprats es poden trobar més endavant.

La segona part, el calibrat, es duu a terme reproduint els models realitzats per Calabrese (2016), revaluant els seus factors de seguretat i mecanismes de trencament per assegurar que el model esta ben realitzat. Llavors es calculen diferents models per reproduir la realitat i analitzar diferents casuístiques, especialment en el cas de condicions no drenades amb nivell freàtic en superfície que és el cas més desfavorable. Les dades utilitzades són les aportades a *Zhang et al (2013)*.

Per últim en la elaboració del model simplificat, anomenat àrea equivalent, es tracta de trobar una relació entre la entre el model original, on les columnes de reforç de graves estan discretitzades i un model on la superfície sota els terraplè els substitueixi amb un volum de propietats equivalents. La dificultat en trobar la relació està en com es defineix la resistència al tall en 2 materials de comportament diferent com les graves i l'argila.

1.3 Teoria existent dins Zhang et al (2013)

L'article de referencia per aquest treball es Zhang (2013) i a continuació es presenta una síntesi del seu contingut. Els autors proposen diferents mètodes per convertir l'estructura tridimensional d'un terraplè sobre un estrat tou reforçat amb columnes de graves. Després valoren el seu funcionament comparant els resultats amb els obtinguts en models tridimensionals. Tots els materials son modelats mitjançant Mohr-Coulomb.

Els mètodes de conversió són 3: en el primer, anomenat mètode 1, la transformació es basa en mantenir la geometria de les estructures de reforç dins de l'estrat tou i ponderar les propietats mecàniques en funció del volum dels reforços.

$$E_w = E_c a_r + E_s (1 - a_r)$$

$$c_w = c_s (1 - a_r)$$

$$\phi_w = \arctan(a_r \tan\phi_c + (1 - a_r) \tan\phi_s)$$

On: E =mòdul elàstic

C = cohesió

Φ = angle de fregament intern

a_r = rati de volum del reforç i volum total en un pla perpendicular la llesca analitzada

subíndex w , c , s son les propietats ponderades, les de columnes i la de les sòls tous respectivament.

Expressió 1. Expressions utilitzades en Zhang (2013) per a ponderar les propietats mecàniques en el mètode 1.

El segon mètode es l'invers del mètode 1. Anomenat mètode 2 es basa en mantenir les propietats mecàniques dels materials i ponderar les dimensions del reforç.

Per últim es presenta un mètode àrea equivalent. En aquest no es discretitzen els reforços i a tot l'estrat sota el terraplè li assignen propietats mecàniques ponderades.

$$E_{eq} = E_c a_s + E_s (1 - a_s)$$

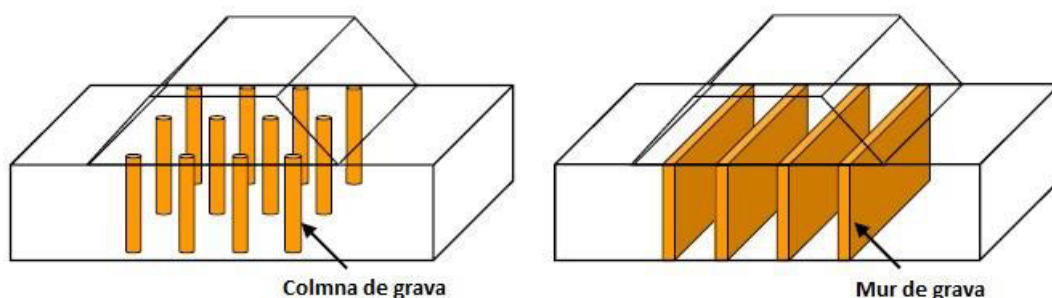
$$c_{eq} = c_s (1 - a_s)$$

$$\phi_{eq} = \arctan(a_s \tan\phi_c + (1 - a_s) \tan\phi_s)$$

On: a_s = rati de volum dels reforços i volum total

Expressió 2. Expressions utilitzades en Zhang (2013) per a ponderar les propietats mecàniques en el mètode àrea equivalent.

L'article conclou que el comportament dels mètodes 1 i 2 són pràcticament els mateixos que els models en 3 dimensions tant en simulacions a llarg com a curt termini. Per altra banda, per l'àrea equivalent conclou que necessita aplicar un factor reductor de 0.9 al FS en simulacions a curt termini.



Imatge 2. Representació de exemples de terraplens sobre estrats reforçats amb estructures de grava.

1.4 Programa Plaxis

Tal com s'indica en l'apartat anterior, Plaxis es un software de simulació numèrica a través del mètode d'elements finits. Tot i que no és l'objectiu del present treball explicar el funcionament del programa, si que s'ha hagut de fer una recerca i un aprenentatge previ. A continuació, s'exposen els tipus de càlculs utilitzats en les diferents fases del model i els models de materials emprats.

1.4.1 Tipus de càlcul per a les diferents fases.

En el model s'utilitzen les fases de càlcul: "plàstic", "safety" i "consolidation". A més per la fase inicial, on trobem el sol sense cap estructura ni forat, existeix el càlcul "initial phase" que defineix les tensions inicials del terreny.

- *Initial phase*: Plaxis es serveix de les característiques del terreny (ϕ angle de fregament intern i OCR ratio de sobreconsolidació). Per els materials basats en Mohr-Coulomb s'utilitza l'expressió de Jaky que serveix per determinar el coeficient d'empenta al repòs K_0 i respectivament les tensions horitzontals.

$$K_0 = 1 - \sin\phi$$
$$K_{0,x} = \sigma'_{xx} / \sigma'_{zz} \quad K_{0,y} = \sigma'_{yy} / \sigma'_{zz}$$

Expressió 3. Determinació de K_0 i tensions horitzontals obtingudes del Manual Plaxis 3D en l'apartat 7.2.1.

En canvi per al model Soft Soil s'utilitza la següent expressió per a determinar K_0 . Es tracta de la mateixa expressió de Jaky mostrada anteriorment, introduint els factors POP i OCR.

$$K_{0,x} = K_{0,y} = K_0^{nc} \text{OCR} - \frac{\nu_{ur}}{1 - \nu_{ur}} (\text{OCR} - 1) + \frac{K_0^{nc} \text{POP} - \frac{\nu_{ur}}{1 - \nu_{ur}} \text{POP}}{|\sigma_{zz}^0|}$$

Expressió 4. Determinació de K_0 per a models de materials avançats obtingudes al manual Plaxis 3D en l'apartat 7.2.1.

- *Plastic*: Calcula les deformacions i tensions en un ambient elastoplàstic on no intervenen les variacions de pressió intersticials en el temps. Si s'utilitza en condicions no drenades representa la col·locació instantània de carregues amb un comportament completament no drenat. Si es parla de condicions drenades representa les deformacions finals quan tot

l'excés de pressió intersticial s'ha dissipat. S'ha de tenir en compte que aquest tipus de càlcul no té en compte com varien les pressions durant el procés.

- *Safety*: Utilitza el mètode de reducció de l'angle de fregament i la cohesió. Per mitja d'un producte amb factors reductors es troba quan falla l'estructura. El factor de seguretat esdevindrà la inversa d'aquest factor de reducció. En Plaxis el número d'intents per determinar està predeterminat a 100, que en casos no es suficient per trobar un FS final. En aquest treball aquest valor està modificat a 400 ja que en la majoria de casos el FS convergia al voltant de 200 intents.
- *Consolidation*: Permet modelitzar la variació de les pressions intersticials en els sòls en funció del temps. També permet la aplicació de carregues progressivament en un interval de temps fixat. Aquesta característica es la raó de la seva utilització en aquest treball.

1.4.2 Models dels Materials.

En aquest treball s'han utilitzat 2 tipus de models de material. El primer és el conegut com lineal elàstic perfectament plàstic o Mohr Coulomb (MC) molt adient per una primera aproximació de resultats i un model com el "*Soft Soil Model*" el qual modela els sòls tous de manera més realista. En l'anàlisi s'ha consultat Kahlström (2013), una tesina que compara els comportaments dels dos models anunciats anteriorment.

Mohr-Coulomb

Aquest model diferencia una part elàstica que funciona de manera lineal i una regió plàstica perfecta. Tot i que el comportament d'alguns sòls dista molt del model MC, s'utilitza per la seva simplicitat i perquè aporta unes aproximacions inicials del comportament molt útils.

Les deformacions es poden dividir en elàstiques i plàstiques (expressió 3). Les elàstiques segueixen la llei de Hooke (expressió 3) i les plàstiques segueixen la teoria clàssica de plasticitat de Hill, 1950 on s'expressa que les deformacions plàstiques són proporcionals a la derivada de la funció de fluència "*f*" respecte la tensió. D'altra banda aplicant el esmentat prèviament, les funcions de fluència de MC sobreestimen les deformacions per això s'aplica un potencial plàstic "*g*", que es tracta de la llei de fluència *f* modificada.

$$\begin{aligned} \underline{\underline{\epsilon}} &= \underline{\underline{\epsilon}}^e + \underline{\underline{\epsilon}}^p & \underline{\underline{\dot{\epsilon}}} &= \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^e + \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^p \\ \underline{\underline{\dot{\sigma}'}} &= \underline{\underline{D}}^e \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^e = \underline{\underline{D}}^e (\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} - \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^p) & \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^p &= \lambda \frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma}'}} \end{aligned}$$

Expressió 5. En la primera línia trobem les expressions de les deformacions en MC.

Sota Esquerra: Llei de Hook. Sota Dreta: teoria plasticitat Hill, 1950.

$$\lambda = 0 \quad \text{for:} \quad f < 0 \quad \text{or:} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \underline{D^e \dot{\underline{\varepsilon}}} \leq 0 \quad (\text{Elasticity})$$

$$\lambda > 0 \quad \text{for:} \quad f = 0 \quad \text{and:} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \underline{D^e \dot{\underline{\varepsilon}}} > 0 \quad (\text{Plasticity})$$

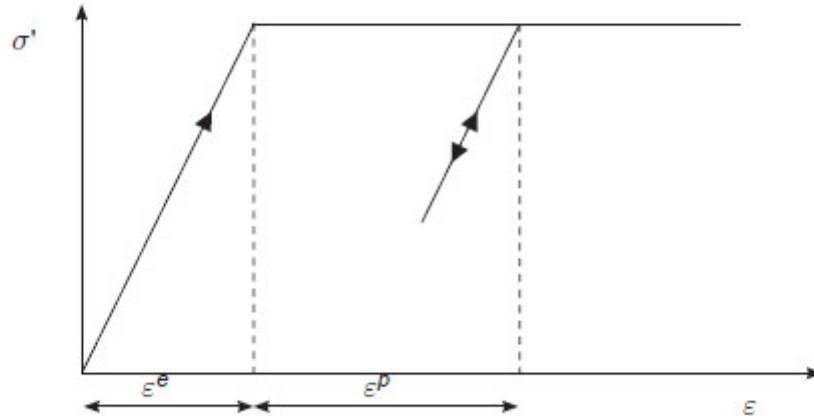


Figure 3.1 Basic idea of an elastic perfectly plastic model

Imatge 2. Il·lustració extreta del manual de plaxis 3D on es defineixen les dues regions: plàstica i elàstica. λ es el multiplicador plàstic. En la regió elàstica equival a 0 i en la plàstica es positiu.

Les variables necessàries per definir el model MC són les següents:

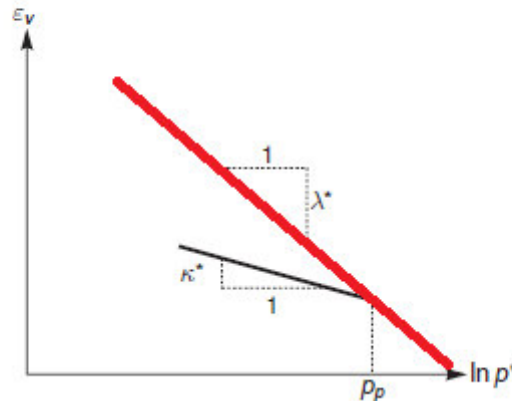
- E: mòdul de Young.
- ν : coeficient de Poisson
- C: cohesió
- θ : angle de fregament

Plaxis permet fer una modificació en el model MC. Permet fer variable la cohesió o la resistència al tallant en funció de la profunditat per poder obtenir una representació més fidel de la realitat. Aquesta opció s'utilitza en els models que contenen CU al seu nom. La variació de la cohesió o resistència al tall no drenada s'explica en detall més endavant.

Soft Soil model

Citant el manual de Plaxis (2017): *el model Soft Soil és adient per sòls a prop de la regió normalment consolidada amb un alt grau de compressibilitat com les argiles*. Es basa en tenir un branca de càrrega per la regió consolidada i una altra per la descarrega/recarrega. El model produeix sòls on: la rigidesa depèn de l'estat tensional, distingeix entre càrrega primària i branques de càrrega/ descarrega, té memòria de tensions de preconsolidació i el trencament del material es regeix segons Mohr-Coulomb.

$$\varepsilon_v - \varepsilon_v^0 = -\lambda^* \ln \left(\frac{p' + c \cot \varphi}{p^0 + c \cot \varphi} \right) \quad \varepsilon_v^e - \varepsilon_v^{e0} = -\kappa^* \ln \left(\frac{p' + c \cot \varphi}{p^0 + c \cot \varphi} \right)$$



Imatge 3. A l'esquerra veiem l'expressió de la branca de compressió verge; a la dreta l'expressió de la descarrega/rearrega. En el gràfic, en vermell, tenim la branca de compressió verge.

Com es pot veure en les expressions de la imatge anterior les deformacions estan regides bàsicament per les tensions isotròpiques, l'angle de fregament, la cohesió i els coeficients de compressió i dilatació, λ i κ respectivament.

La funció de fluència està formada per l'estat tensional, la cohesió, angle de fregament intern i el paràmetre M.

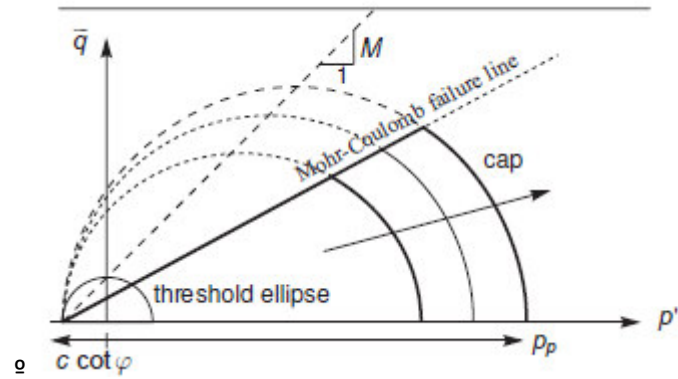
$$f = \bar{f} - p_p$$

$$\bar{f} = \frac{\bar{q}^2}{M^2(p' + c \cot \varphi)} + p'$$

$$M = 3 \sqrt{\frac{(1 - K_0^{nc})^2}{(1 + 2K_0^{nc})^2} + \frac{(1 - K_0^{nc})(1 - 2\nu_{ur})(\lambda^*/\kappa^* - 1)}{(1 + 2K_0^{nc})(1 - 2\nu_{ur})\lambda^*/\kappa^* - (1 - K_0^{nc})(1 + \nu_{ur})}}$$

Expressió 4. Definició de la funció de fluència i del paràmetre M extret del manual de Plaxis.

L'estat tensional en aquest model té la fluència igual a 0. Com a resultat la relació entre la tensió normal i la tangencial produeix el·lipses, en comptes de cercles com en MC. Totes les possibles el·lipses generades es poden unir a través del semieix curt gràcies a que la seva alineació té un pendent igual a la inversa del paràmetre M.



Imatge 4. Representació la funció de fluència i el criteri de trencament MC. Imatge extreta del manual de plaxis.

El criteri de trencament és el de MC, una vegada superada la línia la mostra col·lapsa. Es poden generar infinites el·lipses, amb el seu eix vertical tocant la línia M i el límit horitzontal a tensió de preconsolidació actual. En tracció el model reconeix una certa resistència equivalent a $c \cdot \cot(\theta)$. Si la cohesió es 0, $c=0$, el model reconeix una cohesió corresponent a la unitat i crea un el·lipse inicial límit (threshold).

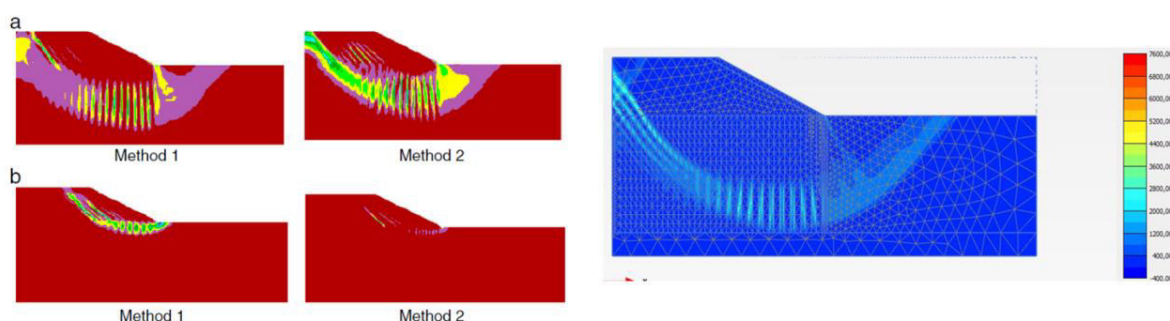
Les variables necessàries per definir el model Soft Soil són les següents:

- λ^* : Índex de compressió modificat
- κ^* : Índex de dilatació modificat
- c : cohesió
- θ : angle de fregament

2. Calibrat del model 2d.

2.1 Introducció.

Per tal de entendre el funcionament del model de terraplè sobre estrat tou reforçat amb columnes de graves primer s'ha desenvolupat un model en dues dimensions. Aquest model ha estat construït de zero seguint els paràmetres del *Zhang (2013)*, i la tesina: *Calabrese (2016)*. L'única diferència és un domini més gran, perquè en els models dels treballs anteriors s'ha pogut comprovar que el mecanisme de trencament està afectat per l'eix de simetria del model. En la imatge 1 s'observa aquest fenomen.



Imatge 5. A l'esquerra un exemple de resultats de l'article de Zhang (2013) i a la dreta Calabrese (2016).

Els models anteriors tenen un domini horitzontal de 40 metres. En el model desenvolupat en aquest treball de final de màster s'ha ampliat el terraplè, que anteriorment era de 20 metres, fins als 25 metres assegurant que els mecanismes de trencament mai arriben a l'eix de simetria com es podrà veure a continuació, en la comparació de resultats dels model propis amb els esmentats abans.

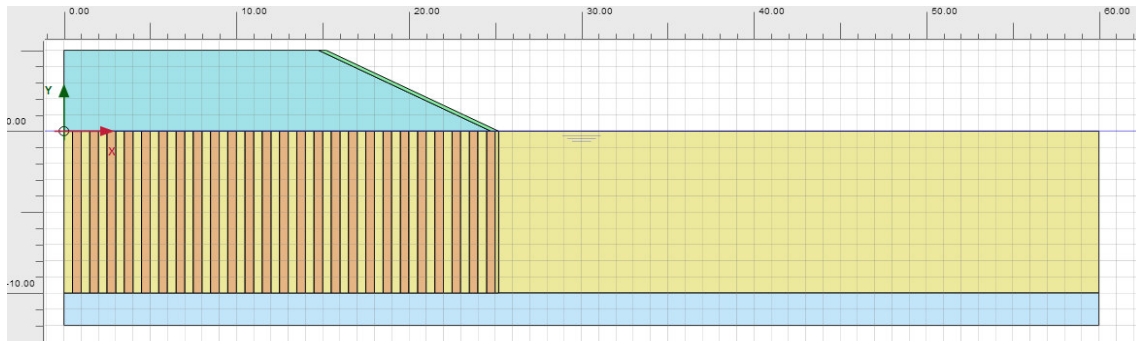
2.2 Definició del model 2d.

2.2.1 Dimensions del model.

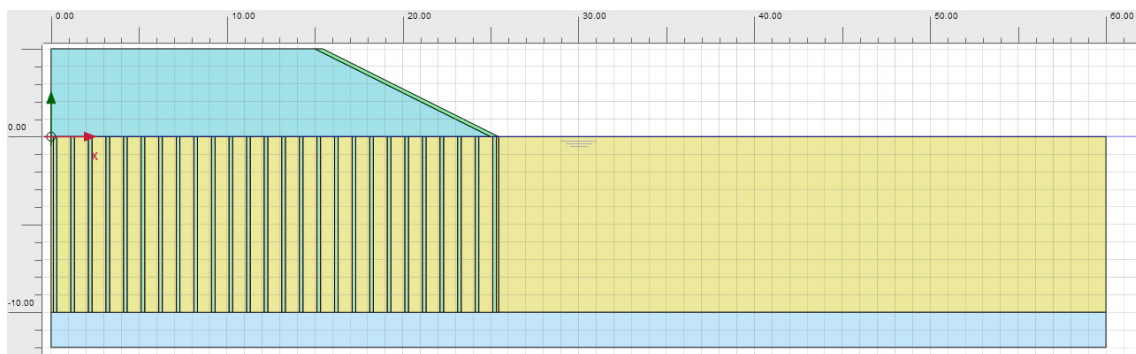
En la imatge 6, 7 i 8 es poden veure els diferents tipus de models. Estan format per dos estrats de sòl amb una potència de 10 i 2 metres respectivament. El terraplè té una alçada de 5 metres i un pendent de 2H:1V. Les dimensions totals del domini són de 60 metres en l'eix horitzontal i 17 en el vertical.

Es presenten 3 tipus de models per simplificar la realitat en dues dimensions: mètode 1, mètode 2 i àrea equivalent. En el mètode 1 es respecta la geometria de les columnes de graves i les propietats mecàniques són ponderades en funció del àrea que ocupen les columnes i el sòl entre elles; això resulta en 25 columnes de 0.5 metres de secció separades cada 0.5 metres. El mètode

2 és al revés, es mantenen els valors de les propietats mecàniques de les columnes de grava però es ponderen les dimensions i resulta en 26 columnes de 0.2 metres de secció separades 0.8 metres. En l'àrea equivalent s'eliminen els models de les columnes i la part sota del terraplè té les propietats ponderades de les columnes i del terreny.



Imatge 6. Dimensions corresponents al model mètode 1.



Imatge 7. Dimensions corresponents al model mètode 2.



Imatge 8. Dimensions corresponents al model àrea equivalent.

2.2.2 Propietats mecàniques.

En el principi d'aquesta tesi s'intenta reproduir els resultats del article 1, fins que s'indiqui el contrari les propietats mecàniques s'han extret de l'article mencionat. Es poden diferenciar les propietats en condicions drenades "DC" i en no drenades "UC".

Material	Dimensió equivalent del reforç [m]	Pes específic γ [kN/m ³]	Mòdul elàstic E [MPa]	Coef. Poisson	Cohesió cu [kPa]	Angle de fricció ϑ [°]
Terraplè	N/A	18	30	0.3	10	32
Superfície terraplè	N/A	18	30	0.3	15	32
Argila	N/A	16	4	0.45	20	0
Sorra	N/A	18	100	0.3	0	38
Mètode 1	0.5	16.4	18.3	0.39	12.1	17.2
Mètode 2	0.2	17	40	0.3	0	38
Àrea equivalent	N/A	16.2	11.2	0.42	16	8.9

Taula 1. Propietats mecàniques 2d UC. Cu equival a la resistència al tall en condicions no drenades.

Material	Dimensió equivalent del reforç [m]	Pes específic γ [kN/m ³]	Mòdul elàstic E [MPa]	Coef. Poisson	Cohesió c [kPa]	Angle de fricció ϑ [°]
Terraplè	N/A	18	30	0.3	10	32
Superfície terraplè	N/A	18	30	0.3	15	32
Argila	N/A	16	4	0.45	0	20
Sorra	N/A	18	100	0.3	0	38
Mètode 1	0.5	16.4	18.3	0.39	0	27.9
Mètode 2	0.2	17	40	0.3	0	38
Àrea equivalent	N/A	16.2	11.2	0.42	0	24.1

Taula 2. Propietats mecàniques 2d DC

2.2.3 Fases de càlcul del model.

Els diferents models es calcularan tant per condicions drenades, període llarg de temps on les pressions intersticials produïdes ja s'han dissipat, i per condicions no drenades, període curt, on les pressions intersticials encara existeixen reduint la tensió vertical efectiva i per tant la resistència al tall del terreny. Com a conseqüència s'obtindran 3 models amb 2 condicions diferents que proveiran 6 resultats.

En aquest model el nivell freàtic s'ha col·locat a la cota 0. El model està calculat en tres fases per poder analitzar com evolucionen les columnes i l'argila durant diferents fases.

- Fase 1: en el sòl s'introdueixen les columnes però el terraplè encara no està executat. Anàlisi tipus plàstic.
- Fase 2: es col·loca el terraplè. Anàlisi tipus plàstic.
- Fase 3: aplicant multiplicadors a la resistència al tall es fa fallar la estructura trobant un valor per el factor de seguretat. Anàlisi tipus safety.

2.3 Presentació i comparació de resultats.

2.3.1 Factors de seguretat.

En la taula 3 es pot veure d'una manera ràpida la comparació entre els factors de seguretat obtinguts en la tesina Calabrese (2016) i els obtinguts en aquest treball. S'espera que els resultats siguin molt similars per poder afirmar que el model funciona correctament però també es poden esperar petites diferències degudes a les malles de càlcul i per la no influència de l'eix de simetria en el trencament.

<i>Cas</i>	<i>FS Calabrese (2016)</i>	<i>FS obtingut</i>	<i>FS Zhang (2013)</i>
<i>Mètode 1 DC</i>	1.225	1.237	1.600
<i>Mètode 1 UC*</i>	1.586	1.524	1.600
<i>Mètode 2 DC</i>	Falla	Falla	1.600
<i>Mètode 2 UC</i>	Falla	1.543	1.600
<i>Àrea equivalent DC</i>	1.285	1.280	1.600
<i>Àrea equivalent UC*</i>	1.313	1.330	1.600

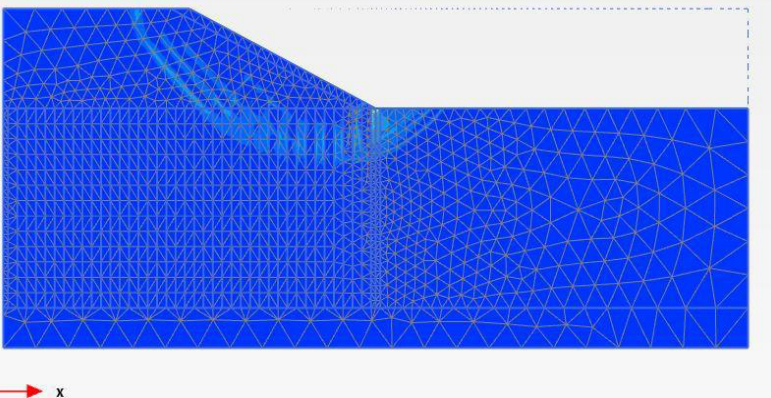
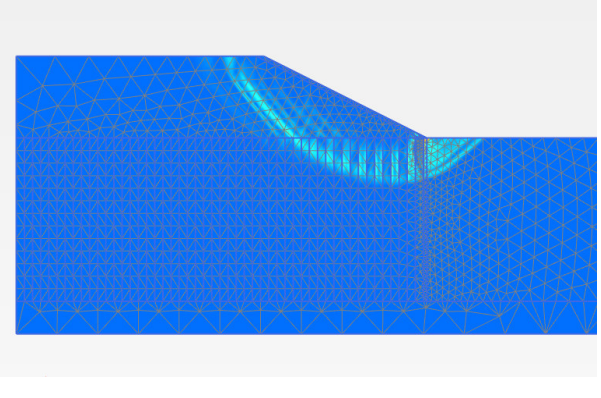
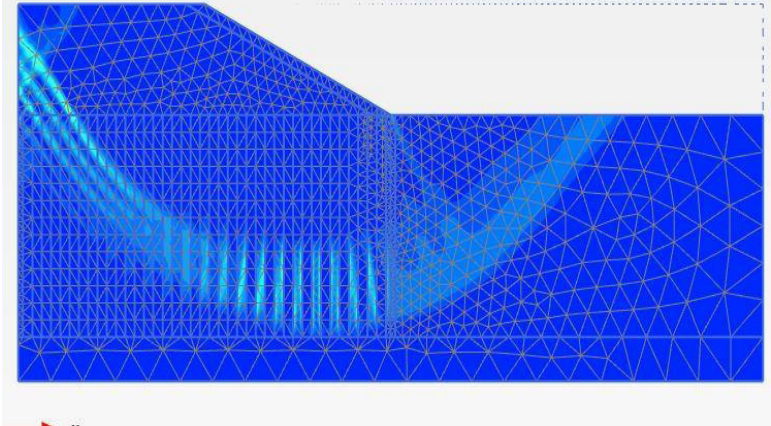
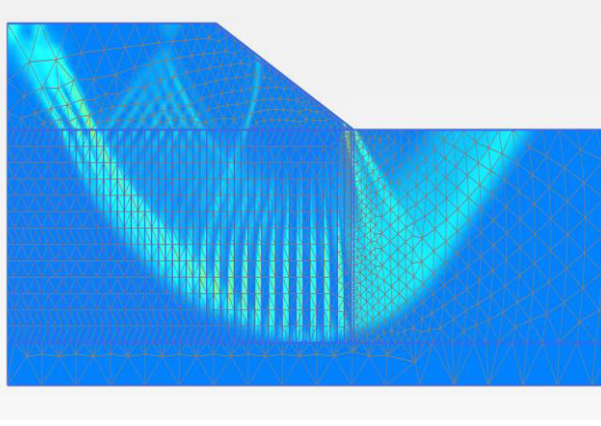
Taula 3. Factors de seguretat obtinguts en els models 2d. *trencament afectat per l'eix de simetria.

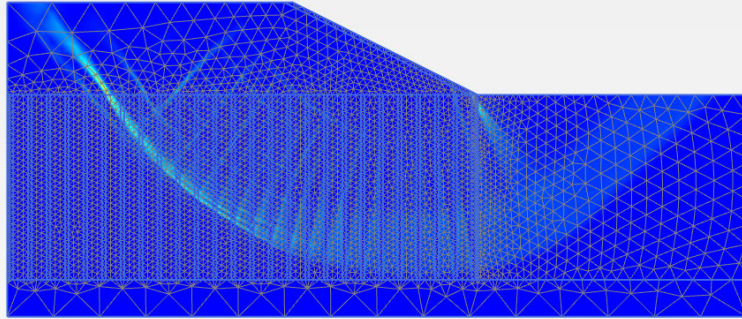
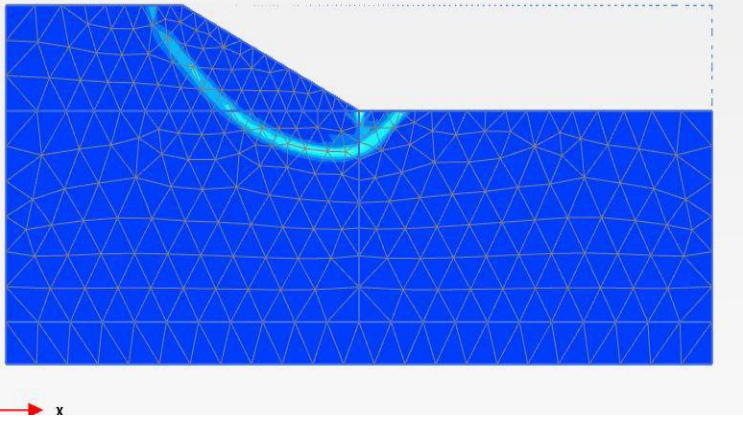
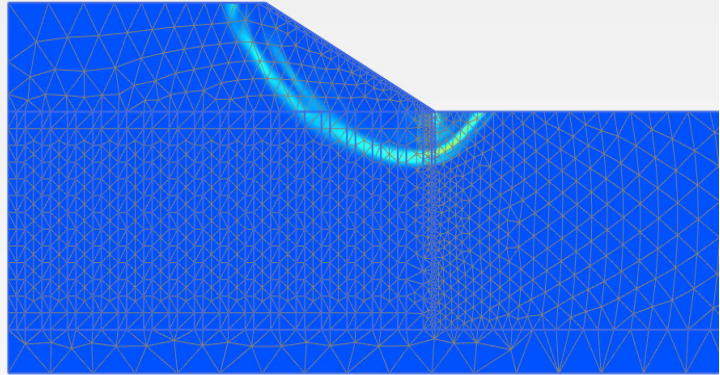
La semblança entre els resultats confirma que el model creat funciona correctament. Els factors de seguretat coincideixen fins a la dècima i la influència de de l'eix de simetria no és tan gran, tal com s'indica en els models marcats amb l'asterisc. A tenir em compte és que el model corresponent al mètode 2 UC que no funcionava massa bé degut a l'esveltesa de les columnes amb un mallat suficientment fi ha funcionat.

Destacar que els resultats obtinguts per Zhang (2013), iguals en totes les condicions i tipus de model, expressen FS superiors als obtinguts en aquest treball.

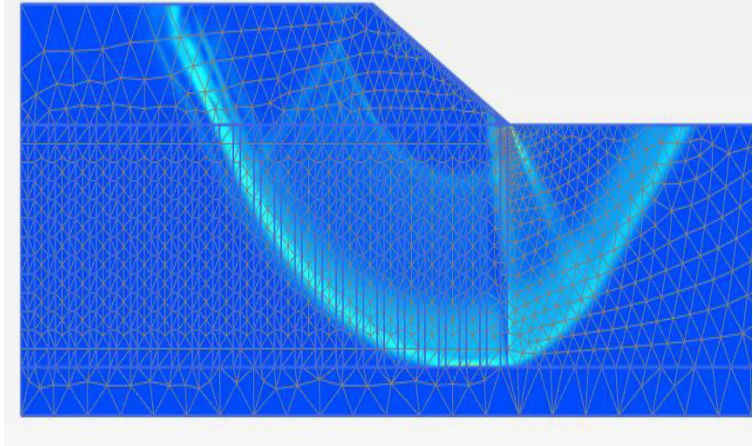
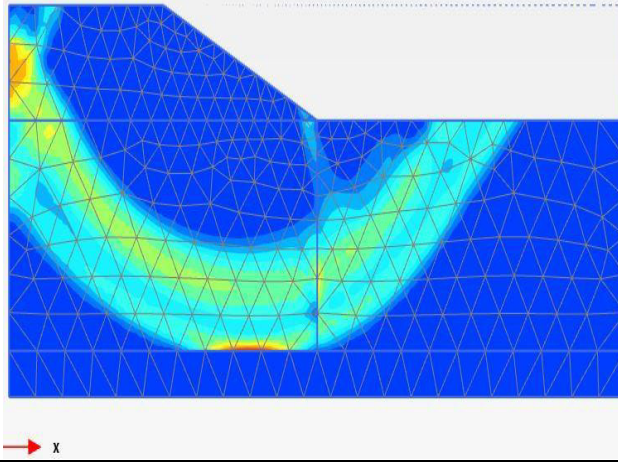
2.3.2 Comparació de mecanismes de trencament.

El mecanisme de trencament es pot obtenir del post processat del programa Plaxis. Tal com s'explica en el manual del programa la opció que presenta les deformacions tangencials de l'últim pas de càlcul, mostra la forma del mecanisme de trencament.

Cas	Mecanismes de trencament Calabrese (2016)	Mecanismes de trencament obtinguts
Mètode 1 DC		
Mètode 1 UC*		
Mètode 2 DC	Falla	Falla

Mètode 2 UC	Falla	
Àrea equivalent DC		

Àrea
equivalent UC*



Taula 4. Comparació mecanismes de trencament models 2d

La primera conclusió que es pot extreure dels resultats és la diferència entre les superfícies de trencament, depenent de si les condicions són drenades o no drenades. Les primeres produeixen mecanismes de trencament més superficials i en canvi en UC ho són més profunds.

Aquests resultats també serveixen per verificar el bon funcionament del model ja que tal com en Zhang (2013) s'explica, el tipus de trencaments és funció del tipus de condicions. A més també es pot comprovar que el domini del model és suficientment gran per evitar que el mecanisme de trencament estigui influenciat pels límits del model.

3. Calibrat del model 3d.

3.1 Introducció.

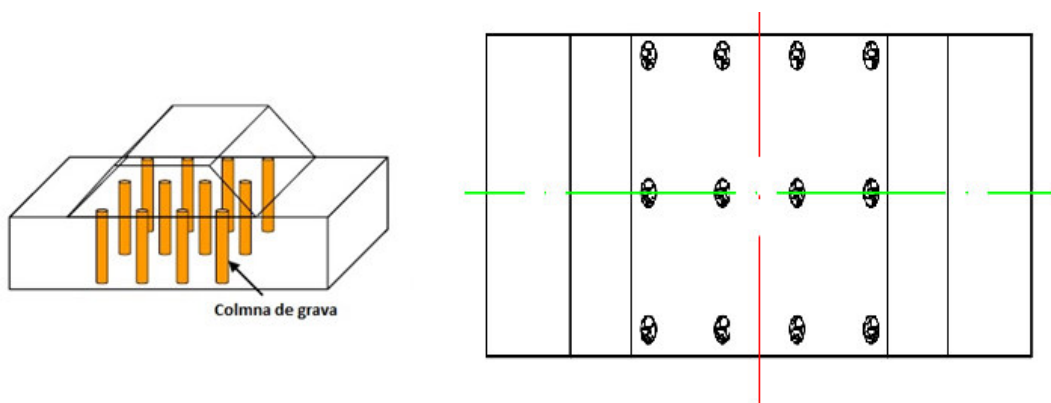
Tal com s'ha explicat, la finalitat del capítol anterior és comprendre el comportament de l'estructura per generar un model en 3 dimensions d'un terraplè sobre un estrat tou reforçat amb columnes de grava. Seguint els passos efectuats en el model 2D, el nou model tindrà un domini més gran per evitar interaccions del mecanisme de trencament amb els límits del model.

Una vegada generada la geometria del model, es comprova el seu correcte funcionament reproduint els resultats obtinguts en Zhang (2013) i en Calabrese (2016). A continuació s'exposaran la geometria del model, la calibratge i les conclusions obtingudes d'aquest procés.

3.2 Definició del model 3d.

3.2.1 Dimensions del model.

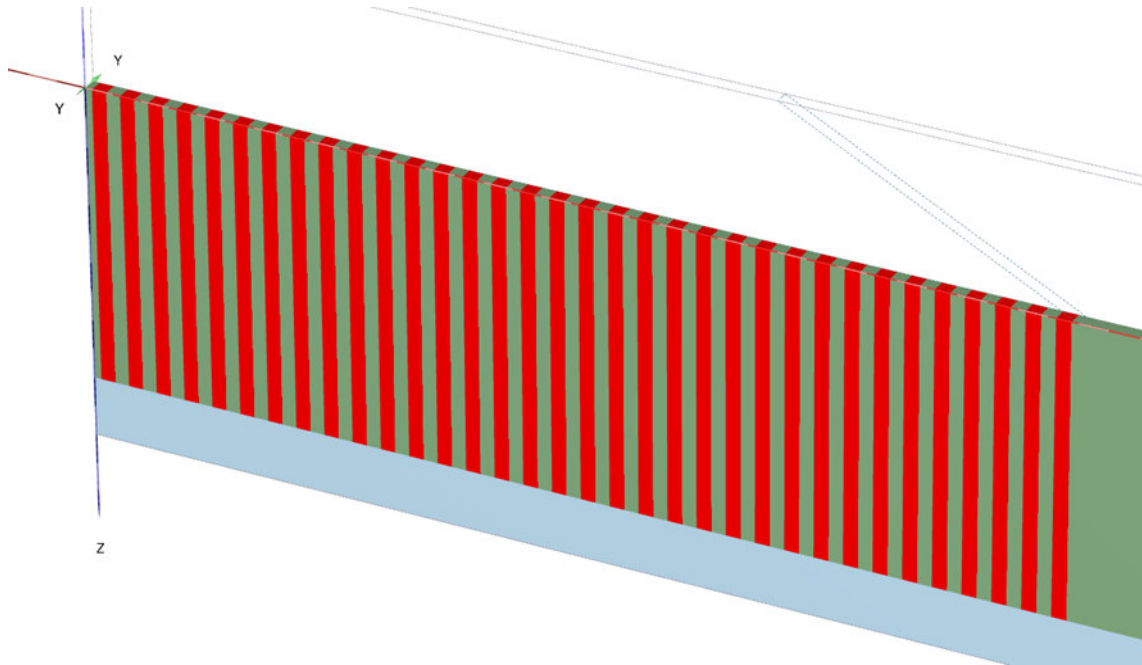
Exactament igual que el model en 2 dimensions, en la versió 3D el sòl està format per 2 estrats, el superior d'una potencia de 10 metres (sòl tou) i el inferior de 2 metres. Sobre del terreny, amb un eix de simetria en el límit esquerra, es situa un terraplè de 5 metres d'alçada amb un pendent de 2H:1V. La llesca que representa la secció de l'estructura té la profunditat de 0.5 metres per obtenir un altre eix de simetria a través de l'eix y. Les dimensions del domini són 80 metres en direcció X, 0.5 metres en direcció Y i 17 metres en direcció vertical Z.



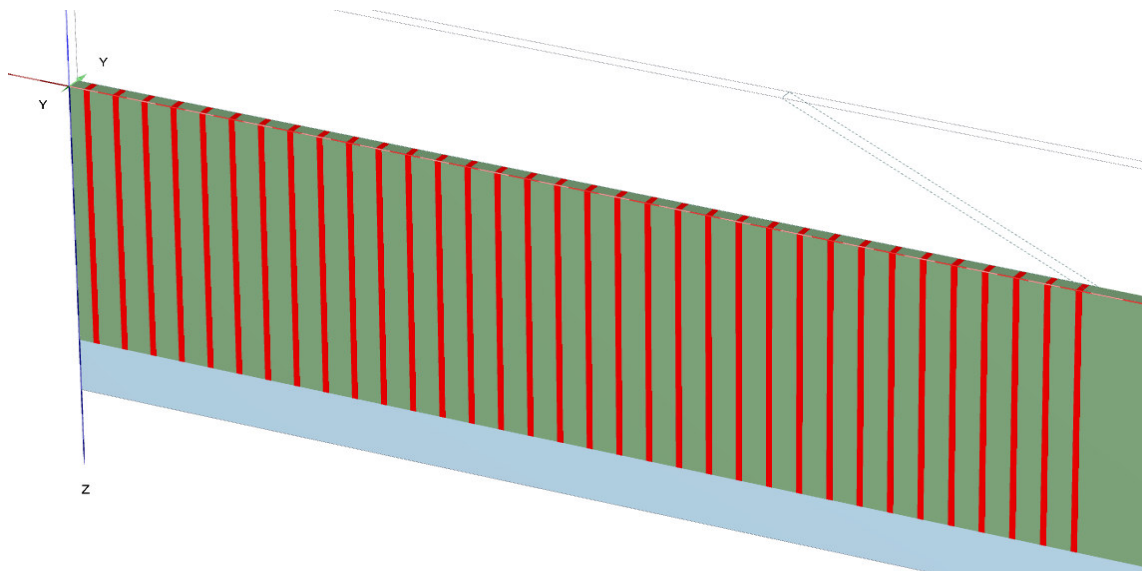
Imatge 9. Croquis de la representació dels eixos de simetria d'un terraplè reforçat amb columnes de grava.

La representació dels reforços de grava es veuen en les imatges 10, 11, 12 i 13. La 10 i 11 mostren models que representen murs de reforç, tal com passa en el model 2d. Com que no existeix un eix de simetria en el eix Y hi ha 2 mètodes de representació. El mètode 1, 34 columnes amb un

gruix de 0.5 metres espaiades 0.5 metres, on es manté la geometria dels murs i es ponderen les propietats mecàniques. El mètode 2, 34 columnes de 0.2 metres de gruix espaiades 0.8 metres, on es mantenen les propietats mecàniques però es pondera la geometria.

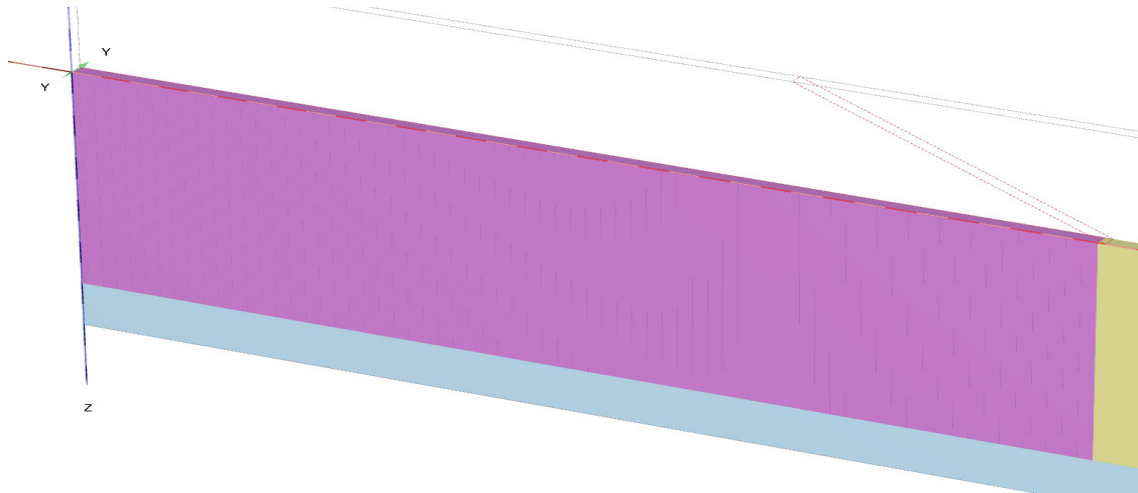


Imatge 10. Detall de la representació del reforç en el mètode 1.



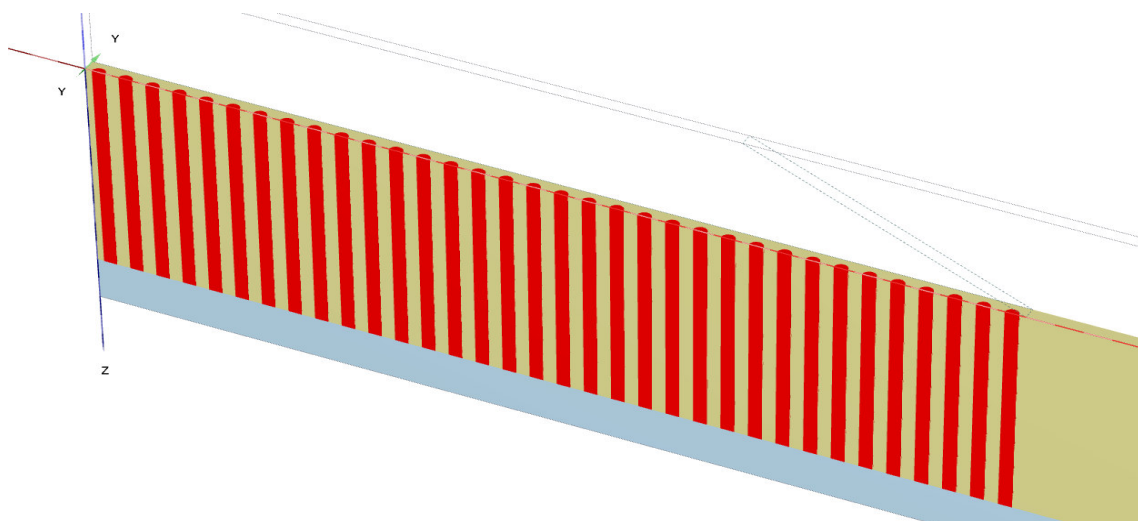
Imatge 11. Detall de la representació del reforç en el mètode 2.

El model àrea equivalent, "AE", on es substitueix la definició geomètrica de les columnes per una ponderació de les propietats mecàniques d'aquestes i del sòl de l'estrat tou sota el terraplè. Les ponderacions es duen a terme seguint el mètode explicat en l'article 1.



Imatge 12. Detall de la representació del reforç en el mètode AE.

Per últim la utilització d'un model 3D permet representar en vertadera magnitud la geometria i propietats mecàniques. La representació real del terraplè sobre estrat tou reforçat amb columnes de grava queda reduït degut a l'existència de 2 eixos de simetria. El model consta de 34 columnes amb un diàmetre de 0.5 metres espaiades 0.5 metres.



Imatge 13. Detall de la representació del reforç en el mètode columnes.

3.2.2 Propietats mecàniques.

Les propietats mecàniques son exactament les mateixes que les utilitzades en el model 2d. Obtingudes de l'article 1, en les taules a continuació es poden veure les utilitzades per els càlculs DC i UC.

Material	Dimensió equivalent del reforç [m]	Pes específic γ [kN/m ³]	Mòdul elàstic E [MPa]	Coef. Poisson	Cohesió cu [kPa]	Angle de fricció ϑ [°]
Terraplè	N/A	18	30	0.3	10	32
Argila	N/A	16	4	0.45	20	0
Sorra	N/A	18	100	0.3	0	38
Mètode 1	0.5	16.4	18.3	0.39	12.1	17.2
Mètode 2	0.2	17	40	0.3	0	38
Àrea equivalent	N/A	16.2	11.2	0.42	16	8.9
Mètode Columnes	0.5	17	40	0.3	0	38

Taula 5. Taula 1. Propietats mecàniques 3d UC. Cu equival a la resistència al tall en condicions no drenades

Material	Dimensió equivalent del reforç [m]	Pes específic γ [kN/m ³]	Mòdul elàstic E [MPa]	Coef. Poisson	Cohesió c [kPa]	Angle de fricció ϑ [°]
Terraplè	N/A	18	30	0.3	10	32
Argila	N/A	16	4	0.45	0	20
Sorra	N/A	18	100	0.3	0	38
Mètode 1	0.5	16.4	18.3	0.39	0	27.9
Mètode 2	0.2	17	40	0.3	0	38
Àrea equivalent	N/A	16.2	11.2	0.42	0	24.1
Mètode 1	0.5	16.4	18.3	0.39	0	27.9

Taula 6. Propietats mecàniques 3d DC.

3.2.3 Fases de càlcul del model.

Els models es calculen utilitzant les propietats mecàniques en condicions drenades i no drenades. Quan es calculen els models amb condicions seques, nivell freàtic a $Z=-12$, és per poder comparar amb els resultats de Zhang (2016) i de Calabrese (2016).

Totes les combinacions explicades en el paràgraf anterior produeixen 8 resultats diferents, 4 tipus de model per 2 condicions de materials . Com en l'apartat 2D en el programa Plaxis es defineixen 3 fases de càlcul.

- Fase 1: En el sòl s'introdueixen les columnes però el terraplè encara no està executat. Anàlisi tipus plàstic.
- Fase 2: Es col·loca el terraplè. Anàlisi tipus plàstic.
- Fase 3: aplicant multiplicadors a la resistència al tall es fa fallar la estructura trobant un valor per el factor de seguretat. Anàlisi tipus safety.

3.3 Presentació i comparació de resultats.

3.3.1 Factors de seguretat.

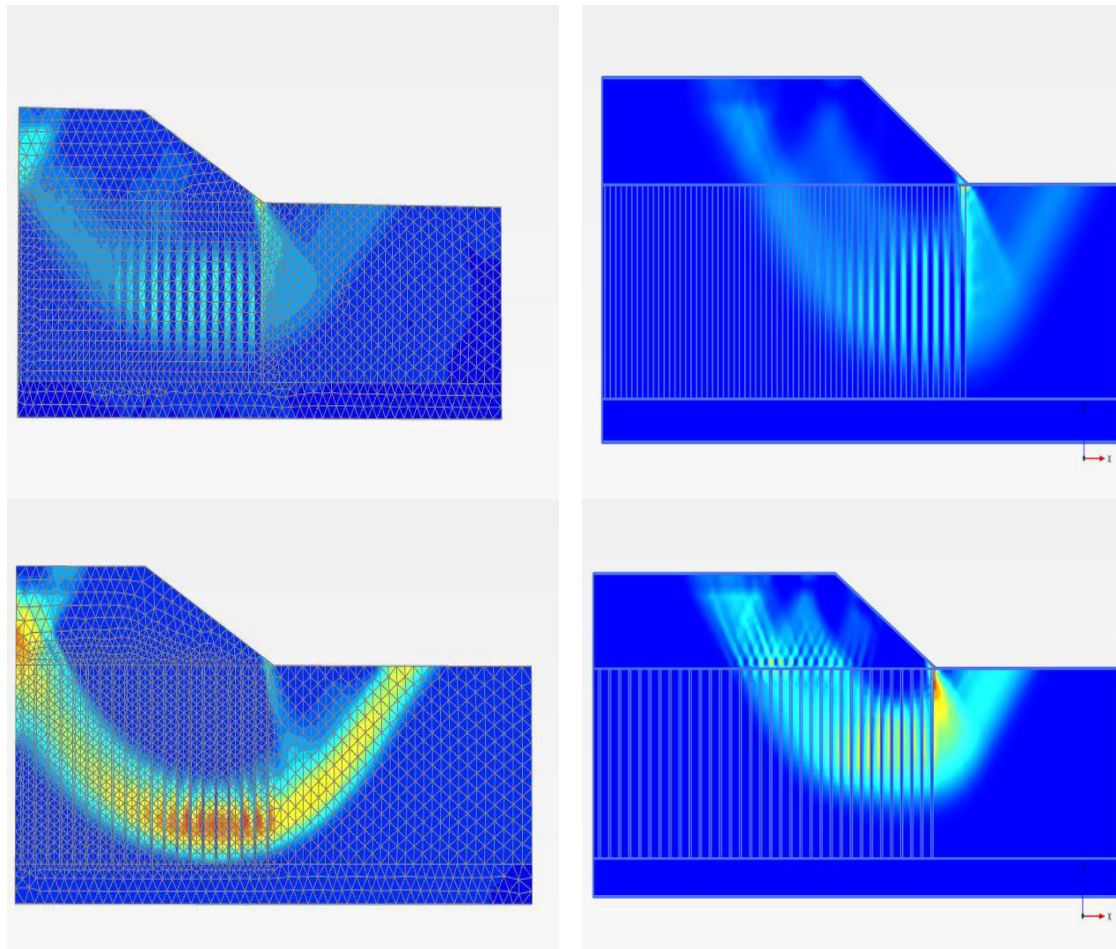
En les taules que hi ha a continuació es poden observar els resultats obtinguts en els models 3D. La taula 7 mostra la comparativa entre els factors de seguretat propis i els obtinguts per Calabrese (2016) amb el nivell freàtic a $z=-12$. Els resultats coincideixen fins a la dècima en tots els casos excepte en UC dels mètodes 1 i 2.

<i>Cas</i>	<i>FS Calabrese (2016)</i>	<i>FS obtingut</i>
<i>Mètode 1 DC</i>	1.680	1.679
<i>Mètode 1 UC</i>	1.666	1.475
<i>Mètode 2 DC</i>	1.578	1.579
<i>Mètode 2 UC</i>	1.336	1.687
<i>Àrea equivalent DC</i>	1.685	1.690
<i>Àrea equivalent UC</i>	1.546	1.569
<i>Mètode Columnes DC</i>	1.687	1.664
<i>Mètode Columnes UC</i>	1.733	1.744

Taula 7. Comparativa FS dels models amb el nivell freàtic en $z=-12$.

Els resultats obtinguts en aquesta simulació s'assemblen als obtinguts per Zhang (2013) en l'apartat 2.3.

La diferència en el casos: mètode 1 UC i mètode 2 UC pot ser deguda a la influència del contorn fixe amb el mecanisme de trencament que succeeix en el model de Calabrese (2016) tal com es mostra en la imatge 14.



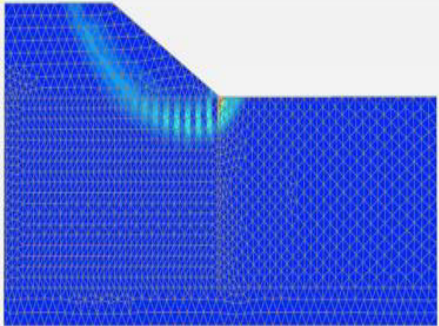
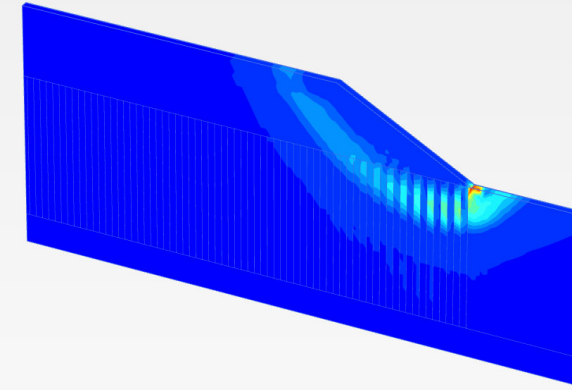
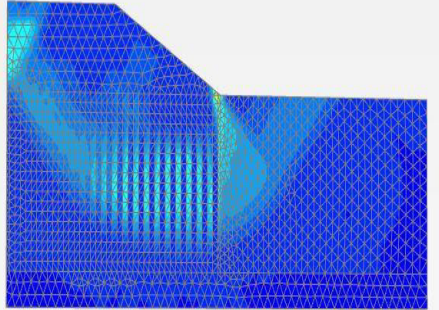
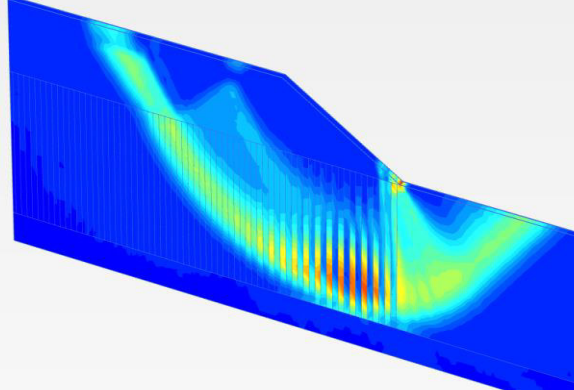
Imatge 14. Comparació mecanismes de trencament. Columna esquerra resultats Calabrese (2016) Fila 1 mètode 1UC. Fila 2 mètode 2 UC.

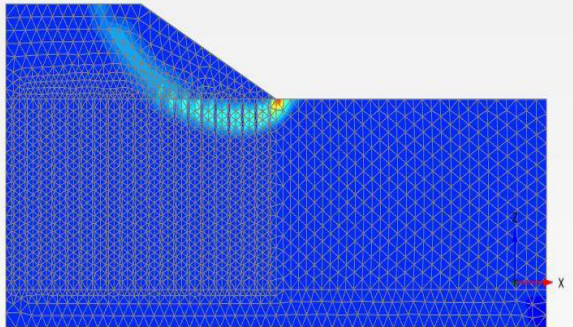
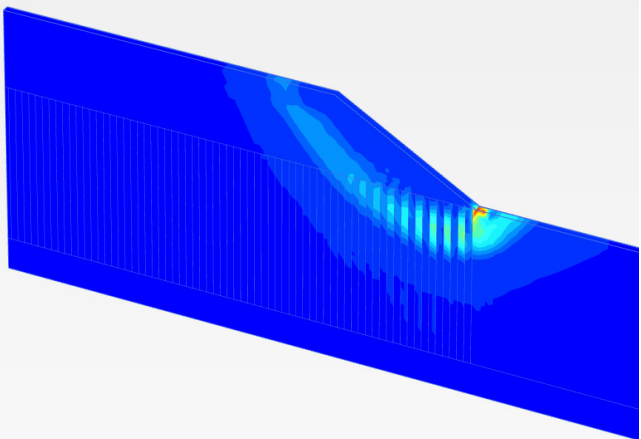
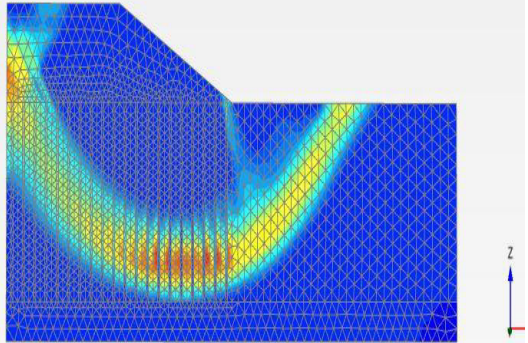
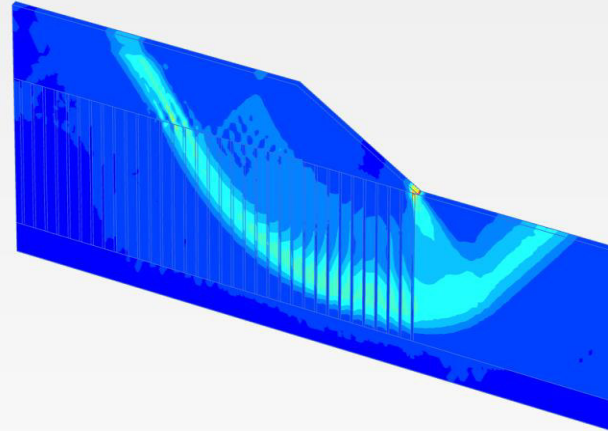
Cas	FS model 2D	FS 3D
Mètode 1 DC	1.237	1.679
Mètode 1 UC	1.524	1.475
Mètode 2 DC	Falla	1.579
Mètode 2 UC	1.543	1.687
Àrea equivalent DC	1.280	1.690
Àrea equivalent UC	1.330	1.569

Taula 7b. Comparativa FS dels models en dos i tres dimensions.

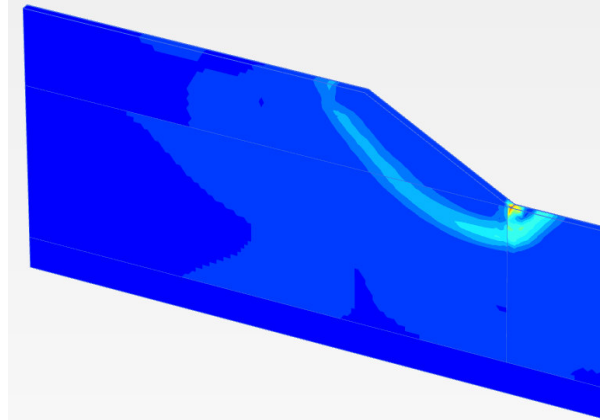
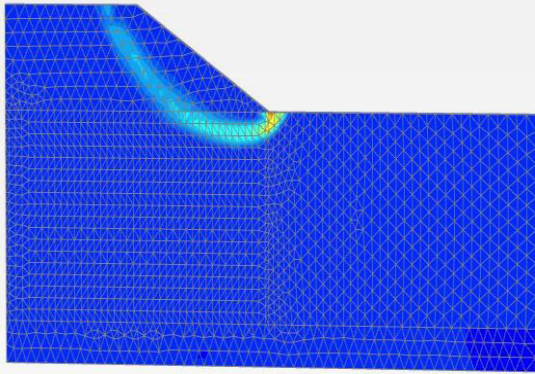
Per alguna raó desconeguda els resultats obtinguts en les simulacions en 3D proporcionen factors de seguretat més alts que en el models en 2D tal com es veu en la taula anterior.

3.3.2 Comparació de mecanismes de trencament.

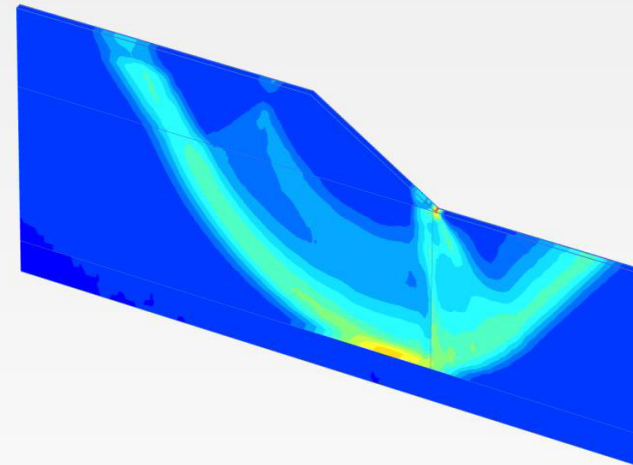
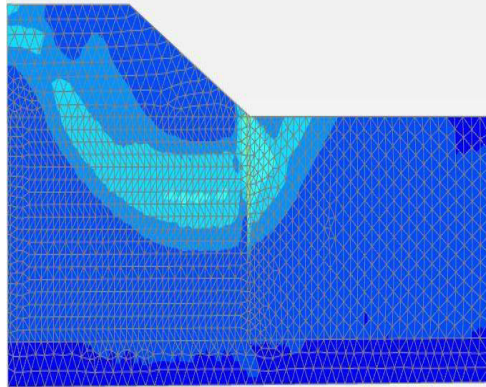
Cas	Mecanismes de trencament Calabrese (2016)	Mecanismes de trencament obtinguts
Mètode 1 DC		
Mètode 1 UC		

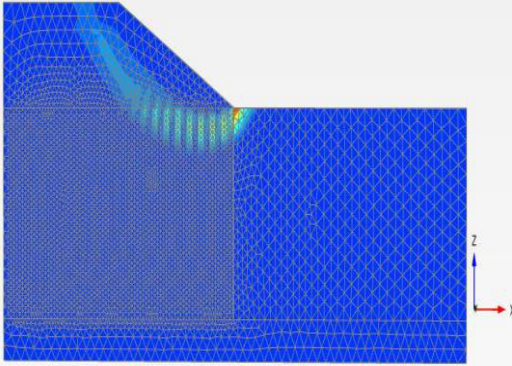
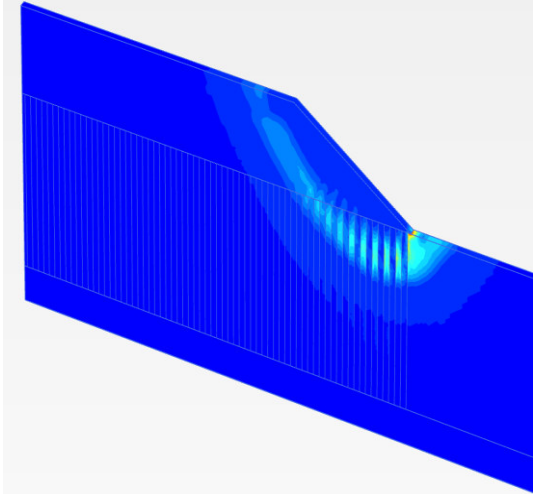
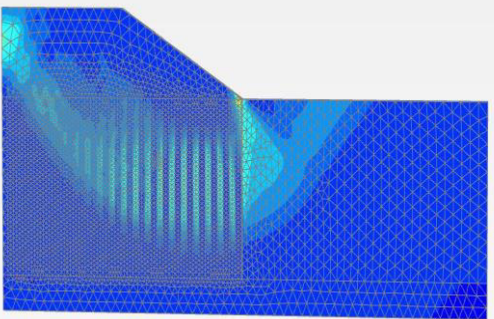
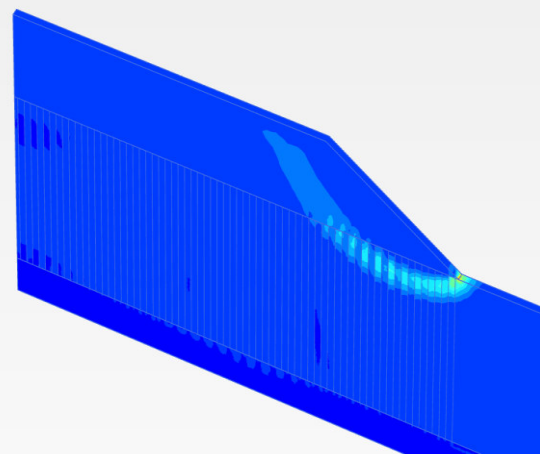
Mètode 2 DC		
Mètode 2 UC		

Àrea
equivalent DC



Àrea
equivalent UC



Columnes DC		
Columnes UC		

Taula 8. Comparativa de mecanismes de trencament entre els models de Calabresse (2016) (esquerra) i els obtinguts

Els mecanismes de trencament són molt similars en tots els casos excepte en l'última imatge cosa que indica el bon funcionament del model creat. L'últim model comparat, el columnes UC, presenta un trencament superficial. Aquest trencament no es correspon amb condicions drenades, després de calcular la simulació diferents vegades es repeteix aquest mecanisme de trencament. Es pensa que el model presenta algun problema de mallatge entre l'estrat argilós i el terraplè a més de problemes d'acumulació de tensions en la cantonada que forma el peu del talús.

3.4. Conclusions calibrat model.

Com es pot veure en els apartats anteriors el model creat reproduïx els resultats obtinguts en la tesi anterior, exceptuant els casos on en el model de Calabrese (2016) el mecanisme de trencament està influenciat per el contorn del model. Per tant es pot afirmar que el model funciona correctament i es pot utilitzar per a nous escenaris i per aprofundir en el coneixement del problema.

A partir d'aquí, es comprovaran els resultats del model de columnes per a diferents cotes de nivell freàtic i per a diferents propietats de materials que interpreten millor la realitat.

3.5 Model amb variació del nivell freàtic.

En aquest apartat es comparen tots els models en condicions no drenades i drenades amb variació del nivell freàtic. S'espera poder obtenir informació sobre el comportament de l'estructura e intentar veure les diferències entre les condicions més favorables i desfavorables.

3.5.1 Geometria, propietats mecàniques i fases de càlcul.

Tots els apartats esmentats en el títol són els mateixos que en el capítol anterior. La principal diferència és que hi ha models calculats amb el nivell freàtic a cota $z=0$, sòl saturat, i a $z=-12$ on el sòl està sec.

3.5.2 Factors de seguretat.

A la següent taula es poden observar els FS obtinguts per als models amb les mateixes malles amb l'única diferència de la cota del nivell freàtic (Cota nivell freàtic z).

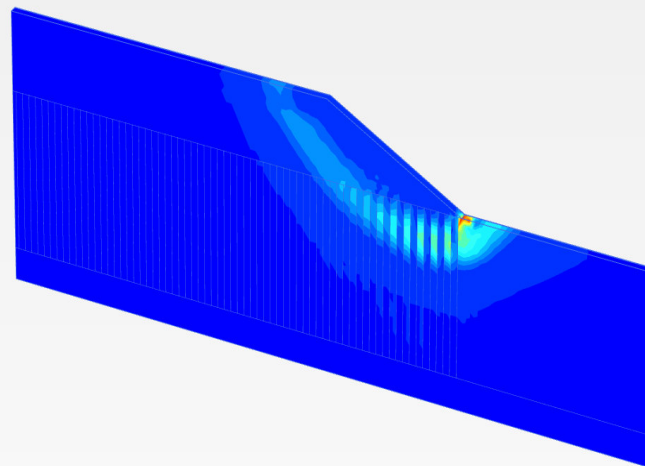
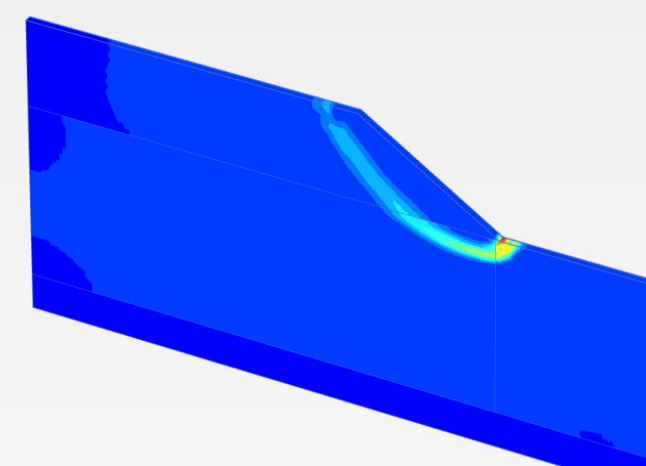
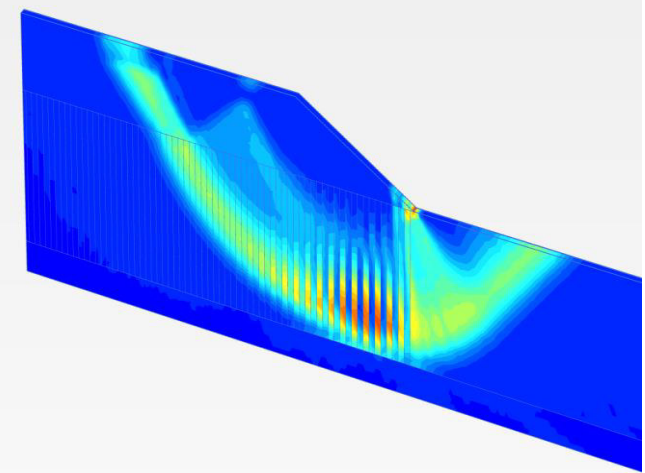
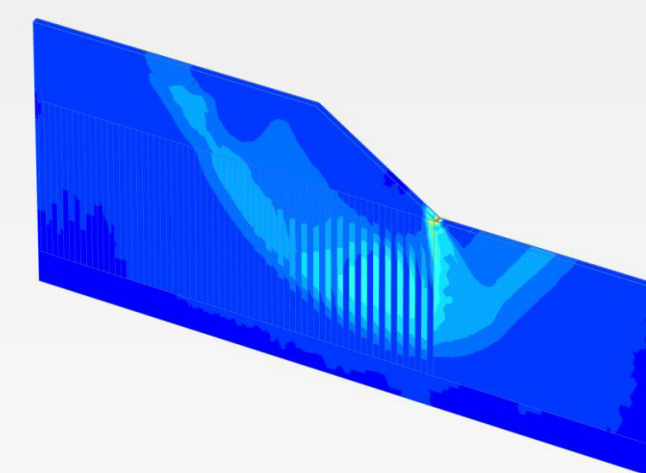
Cas	FS 3D z=0	FS 3D z=-12
Mètode 1 DC	1.284	1.679
Mètode 1 UC	1.328	1.475
Mètode 2 DC	1.223	1.579
Mètode 2 UC	1.558	1.687
Àrea equivalent DC	1.318	1.690
Àrea equivalent UC	1.345	1.569
Columnes DC	1.274	1.683
Columnes UC	2.008	1.774

Taula 9. Comparativa FS segons la posició del nivell freàtic.

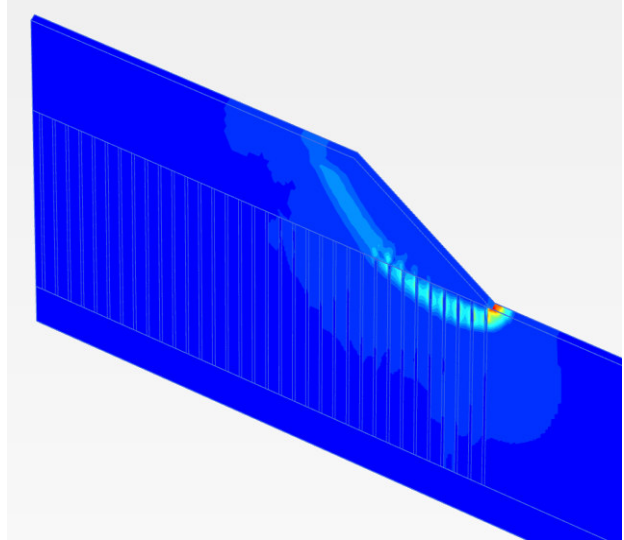
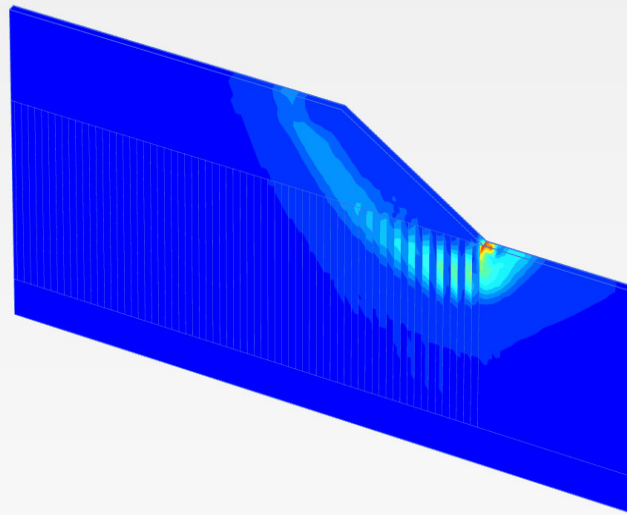
S'observa un millor factor de seguretat "FS" final d'unes dècimes en general en el cas amb nivell freàtic en cota Z=-12, aquesta diferència és més notable en condicions no drenades ja que l'efecte d'un entorn totalment saturat genera pressions intersticials que redueixen la tensió vertical efectiva i per tant, la resistència al tall en el sòl. En els casos drenats la diferència entre els FS és molt més petita degut a que només podem tenir en compte el pes de l'aigua com un petit increment de l'estat tensional.

Remarcar que el model columnes UC després de diferents simulacions i comprovacions proporciona valors que no són realistes, les condicions no drenades proporcionen factors de seguretat més baixos en comparació amb DC. Aquest resultat es consideren outlyers.

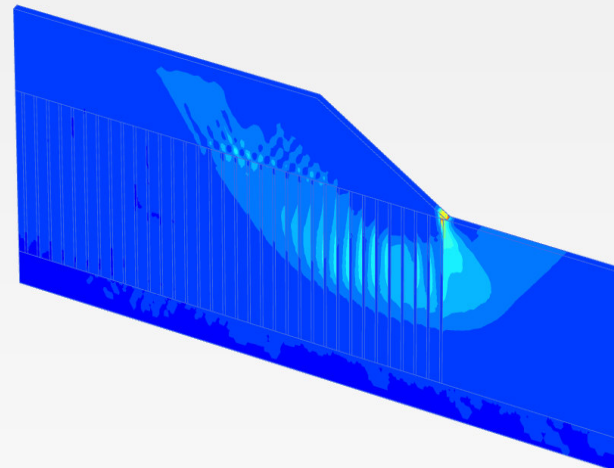
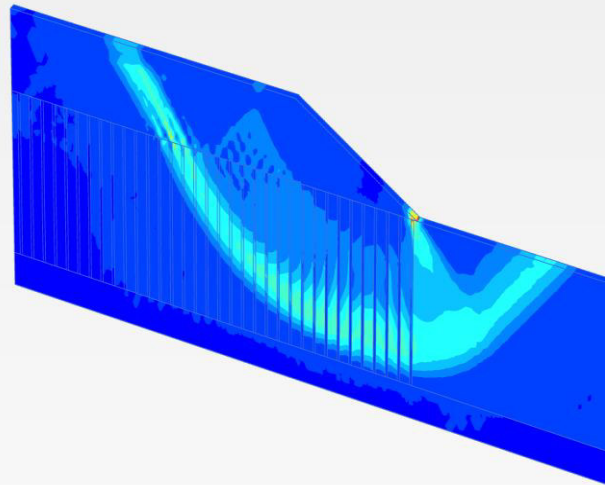
3.5.3 Mecanismes de trencament

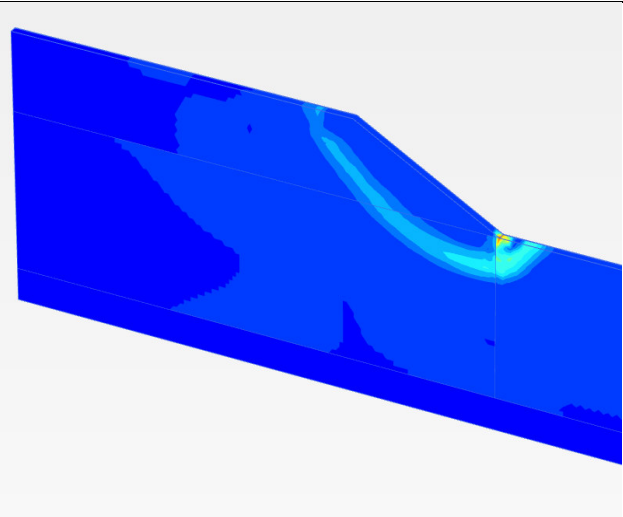
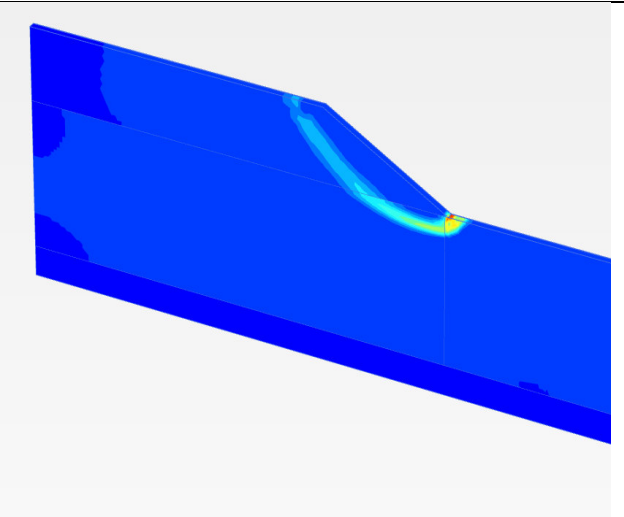
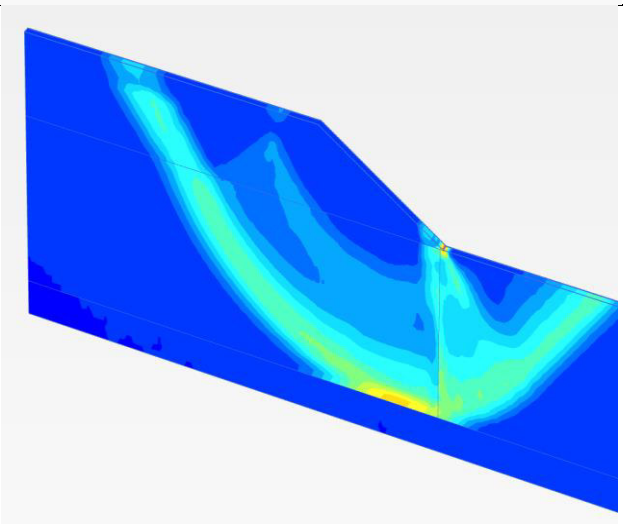
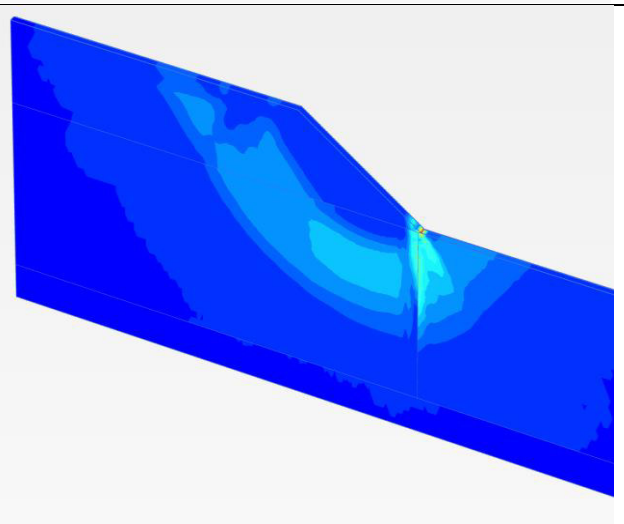
Cas	Mecanismes de trencament obtinguts $z=0$	Mecanismes de trencament obtinguts $z=-12$
Mètode 1 DC		
Mètode 1 UC		

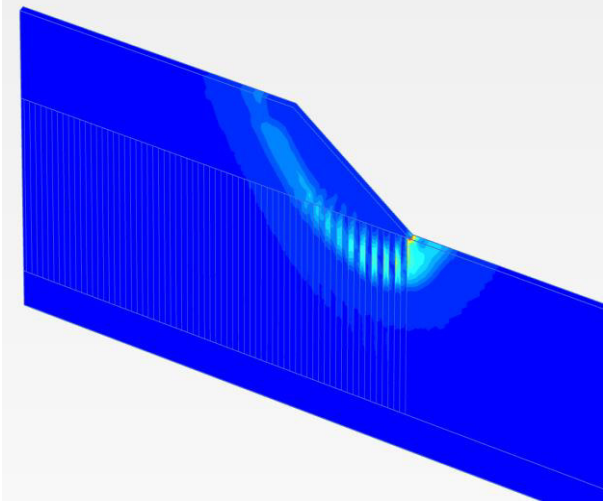
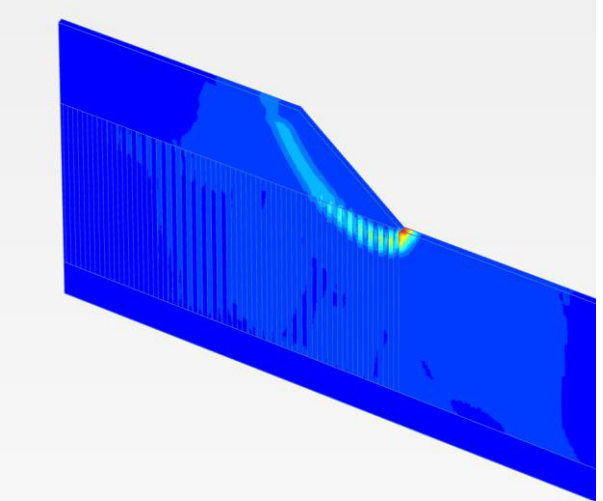
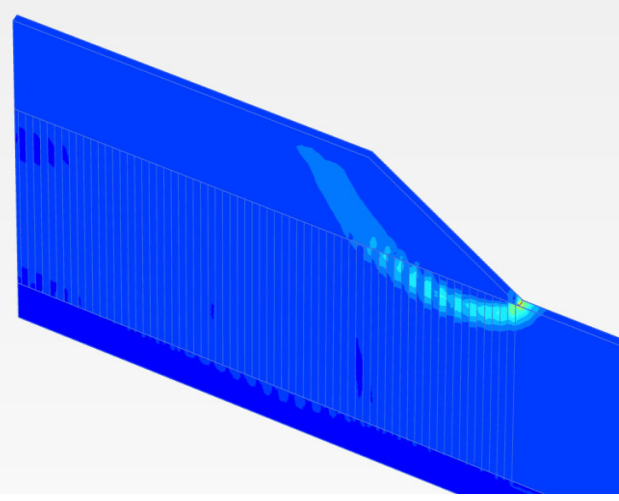
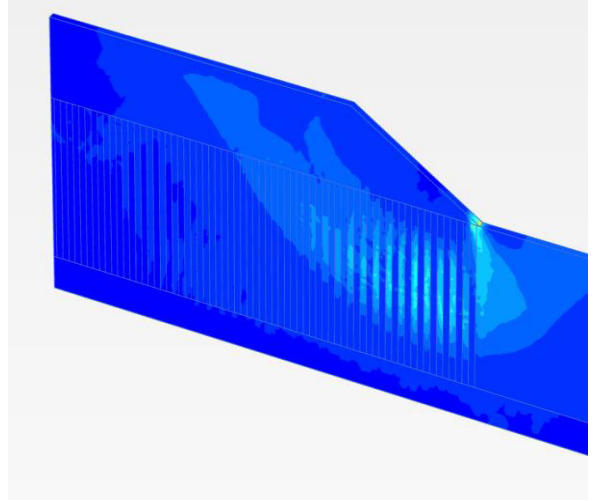
Mètode 2 DC



Mètode 2 UC



<p>Àrea equivalent DC</p>	 A 3D visualization of a cross-section of a structure, likely a dam or embankment. The surface is colored in shades of blue, with a bright yellow-green spot indicating a localized area of high stress or strain. The structure has a sloped top surface and a vertical face on the right.	 A 3D visualization of a cross-section of a structure, similar to the first image. It shows a localized area of high stress or strain, indicated by a bright yellow-green spot on the sloped surface.
<p>Àrea equivalent UC</p>	 A 3D visualization of a cross-section of a structure, similar to the DC equivalent area. The stress distribution is more extensive, with a larger area of high stress (yellow-green) extending along the sloped surface.	 A 3D visualization of a cross-section of a structure, similar to the DC equivalent area. It shows a localized area of high stress or strain, indicated by a bright yellow-green spot on the sloped surface.

Columnes DC		
Columnes UC		

Taula 10. Comparació dels mecanismes de trencament segons la posició del nivell freàtic.

S'observa com es mantenen les profunditats del mecanisme de trencament segons si el càlcul es en condicions drenades, on és superficial, o en no drenades, on el mecanisme és més profund. Es pot afirmar que quan el sòl és sec el mecanisme de trencament queda més superficial en la majoria de casos.

3.5.5 Conclusions

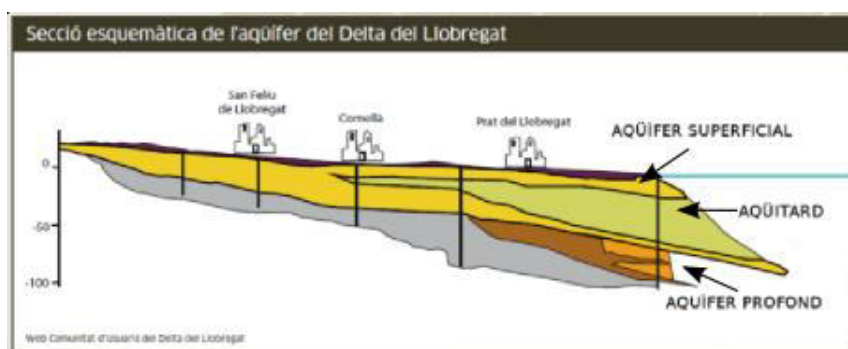
S'observa que el nivell freàtic té un efecte important en l'estabilitat del terraplè. Quan el nivell freàtic està per sota de l'estrat d'argila es consideren condicions drenades i per tant la resistència al tall depèn de la cohesió i de l'angle de fregament. En canvi quan el sòl està saturat, en condicions no drenades, la resistència al tall està regida per C_u només. A més es tornen a obtenir mecanismes de trencament profunds per a models del tipus UC i mecanismes somers per a models del tipus DC tal com s'indica en l'article 1.

Es considera que pels futurs anàlisis la situació més desfavorable serà la utilització del nivell freàtic en $z=0$.

4. Simulació terraplè sobre sòls argilosos del Llobregat

A partir d'aquest capítol es varien les propietats mecàniques de l'argila. Aquest canvi es degut a el millor coneixement de les seves propietats mecàniques a l'hora de definir models més realistes, com per exemple, cohesió variable en funció de la tensió vertical efectiva i el model Soft Soil.

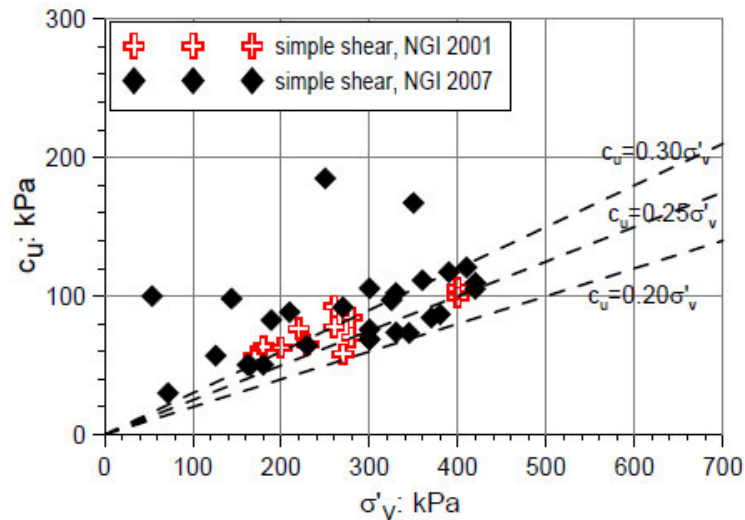
Les dades són extretes de la tesina Tarragó (2010). Remarcar que la nova argila té unes propietats mecàniques més desfavorables i per tant, els resultats no són comparables amb el procés de calibrat.



Imatge 15. Croquis d'un tall geològic tipus a la desembocadura del Llobregat.

L'argila utilitzada es la que representa l'estrat anomenat aquítard. Aquesta argila aflora en alguns punts de la desembocadura i és la responsable de la dificultat de les cimentacions de la zona.

La resistència al tall de l'argila de l'aqüítard es defineix en Tarragó (2010) i en la imatge següent es poden observar els resultats de un test de tall directe.



Imatge 16. Resultats d'un test de tall directe per l'argila de la desembocadura del Llobregat Tarragó (2010).

Com es pot veure la resistència al tall varia en funció de la tensió vertical efectiva. En el resultat es defineixen 3 possibles relacions que contenen la majoria de resultats obtinguts. Per aquest treball s'utilitzaran els resultats $c_u = 0.3 \sigma'_v$ i $c_u = 0.25 \sigma'_v$.

A partir d'aquest capítol es descarta l'ús de les simplificacions del tipus mètode 1 i 2.

A partir d'aquest capítol s'avaluaran 3 casos diferents. En el primer utilitzant el model MC la resistència al tall de l'argila es defineix com a variable en profunditat. Després s'utilitzarà el model Soft Soil que permet simular millor algunes característiques de l'argila i per últim es definirà un model àrea equivalent.

4.1 Model Mohr-Coulomb; argila amb cohesió variable en funció de la profunditat.

En aquest capítol s'analitza el model introduint un petit canvi per a que sigui més fidel a la realitat. La cohesió de l'argila varia amb una llei lineal que la fa augmentar amb profunditat respecte un punt fixat, en aquest treball a la superfície del estrat argilós. Aquest canvi implica que en superfície el material no tingui pràcticament resistència al tall però en profunditat, degut al confinament i a les tensions verticals efectives, la resistència al tall augmenta. En aquest apartat es compararan el comportament de les argiles en condicions no drenades.

4.1.1 Geometria, propietats mecàniques i fases de càlcul.

La geometria del problema és la mateixa que en els casos anteriors. Es pot dir el mateix pel que fa a les fases de càlcul.

La diferencia està en les propietats mecàniques de l'argila, on la seva resistència al tall, en condicions no drenades, es regeix per una llei lineal del tipus: $x \cdot \sigma'_{\text{verical}}$. X es un factor que dependrà de l'argila tal com s'ha vist en la imatge 16. El model MC no permet introduir Cu en funció de la tensió vertical efectiva però si ho permet fer en funció de una cota escollida prèviament. Per simular el comportament com que la tensió vertical efectiva es pot relacionar directament amb la profunditat ($\sigma'_{\text{verical}} = \gamma_{\text{sec}} \cdot \text{profunditat}$.) però no es del tot realista ja que la tensió vertical varia segons la potencia de terraplè que es tingui sobre l'estrat.

Pel que fa a les propietats de l'àrea equivalent es mantenen les densitats, mòduls elàstic i angle de fregament dels apartats anteriors però la cohesió segueix la llei explicada anteriorment.

Material	Pes específic γ [kN/m ³]	Mòdul elàstic E [MPa]	Coef. Poisson	Cohesió Cu [kPa]	Angle de fricció ϑ [°]
Argila1	16	4	0.45	4·(z)	0
Argila2	16	4	0.45	4.8· (z)	0
Àrea equivalent1	16.2	11.2	0.42	4.05·(z)	8.9
Àrea equivalent2	16.2	11.2	0.42	4.86·(z)	8.9

Taula 11. Propietats mecàniques models cohesió variable en funció de la profunditat

4.1.2 Factors de seguretat.

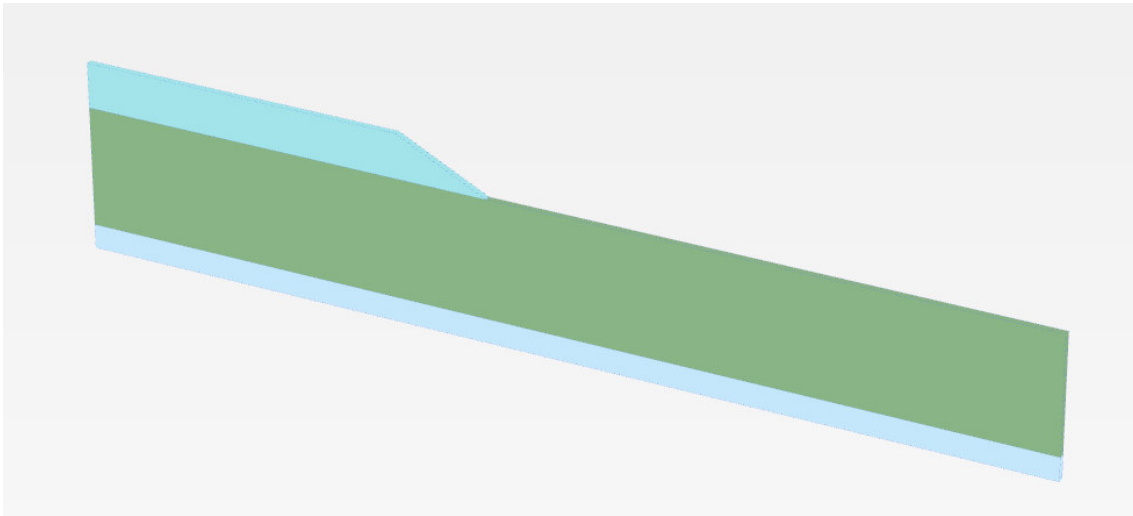
Ningun dels casos calculats supera la col·locació del terraplè. El trencament del terraplè es deu al comportament més realista de l'argila on la resistència al tall deguda a la cohesió varia linealment amb la profunditat. Però com s'ha esmentat abans la cota de referència es fixe i no varia segons la superfície del terreny. Per compensar aquest fet es proposen 2 actuacions diferents:

1. Reduir l'alçada del terraplè per reduir la càrrega però amb la mateixa pendent. D'aquesta manera es pretén avaluar el comportament en funció de la carrega sobre l'estrat argilós i alhora que la relació profunditat tensió vertical sigui més acurada.
2. Utilitzar el model Soft Soil per definir l'argila ja que defineix la llei expressada en la imatge 16 de manera automàtica.

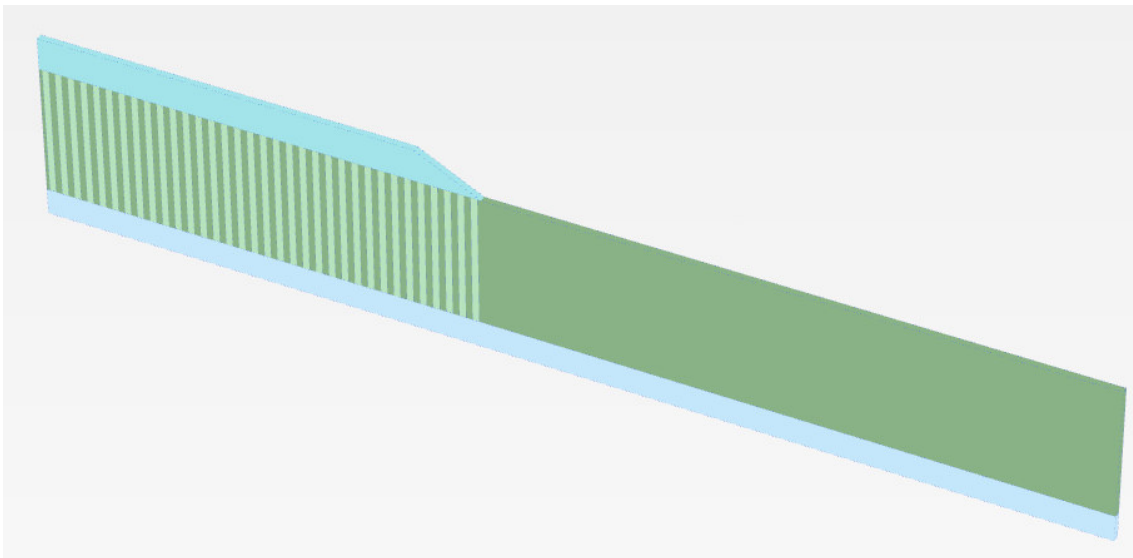
4.2. Nova geometria més conservadora.

Per tal de obtenir resultats amb aquesta situació més realista es modifica la geometria reduint l'alçada del terraplè per 3 opcions diferents de menys a més conservadora. Primer es prova amb alçada 0.75H, 0.5H i 0.25H on H es l'alçada del terraplè. Respectivament aquestes alçades

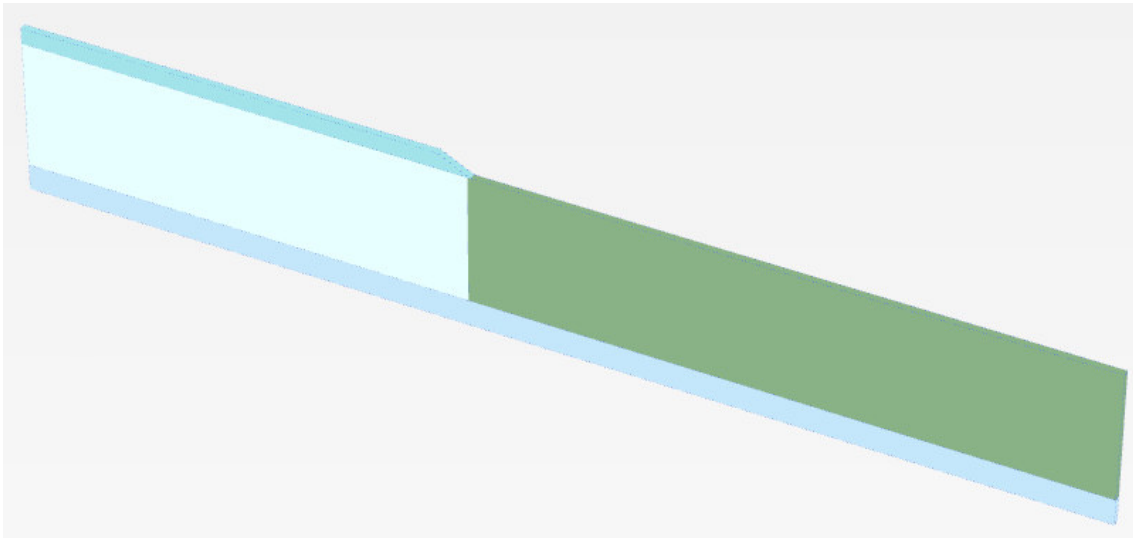
queden de la següent manera, després d'aplicar les reduccions: 3.75, 2.5 i 1.25. La longitud del terraplè i el pendent no es modifiquen.



Imatge 14. Croquis terraplè amb alçada 0.75H.



Imatge 15. Croquis terraplè amb alçada 0.5H.



Imatge 16. Croquis terraplè amb alçada 0.25H.

4.2.1 Factors de Seguretat

Cas	Alçada Terraplè	FS
Àrea equivalent UC	0.75H	Col·lapsa
	0.5H	1.137
	0.25H	1.813
Columnes UC	0.75H	Col·lapsa
	0.5H	1.076
	0.25H	1.241

Taula 12. Resultats factors de seguretat cas argila amb cohesió variable segons la llei 0.25·z.

Cas	Alçada Terraplè	FS
Àrea equivalent UC	0.75H	Col·lapsa
	0.5H	1.229
	0.25H	1.946
Columnes UC	0.75H	1.055
	0.5H	1.163
	0.25H	1.354

Taula 13. Resultats factors de seguretat cas argila amb cohesió variable segons la llei 0.30·z.

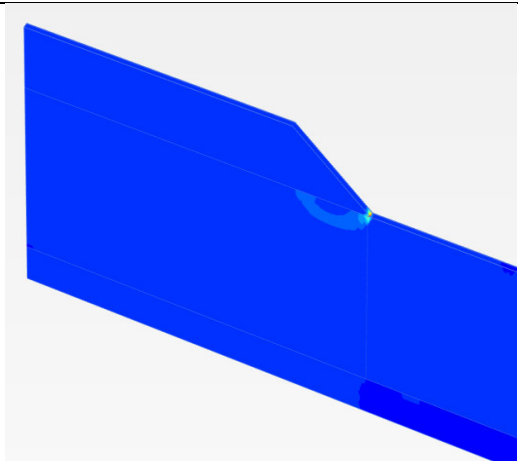
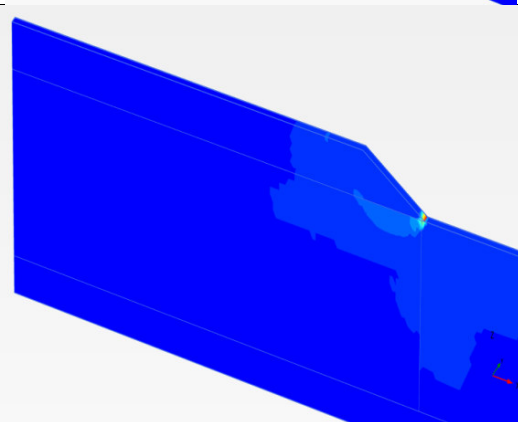
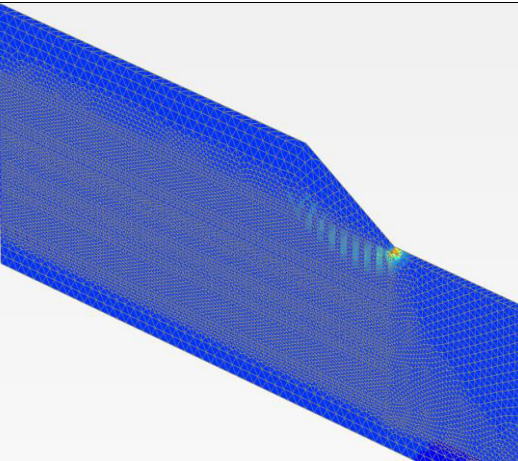
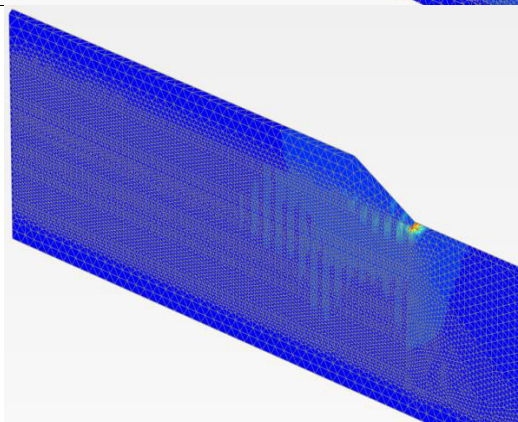
Dels resultats s'extreuen les següents conclusions. El cas d'àrea equivalent proporciona resultats més conservadors amb tendència d'augmentar el FS de seguretat més ràpidament en situacions més estables. En els casos límit els factors de seguretat casi s'igualen entre els 2 mètodes indicant que la possibilitat de desenvolupar un model amb geometria d'àrea equivalent i comportament 3d real sigui possible.

Comparant els resultats amb els models anteriors s'observa que en afegir un comportament més realista de l'argila el terraplè que prèviament resistia amb factors de seguretat de al voltant

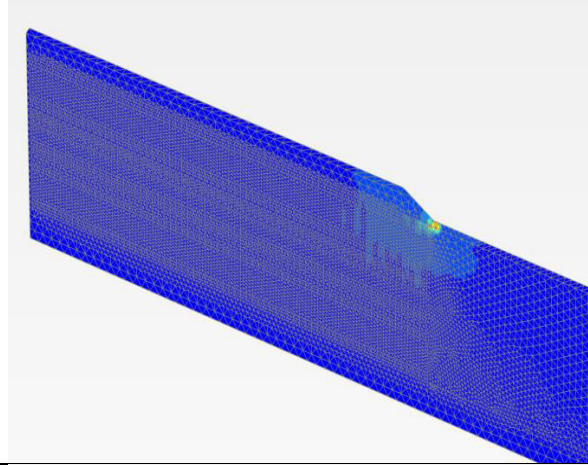
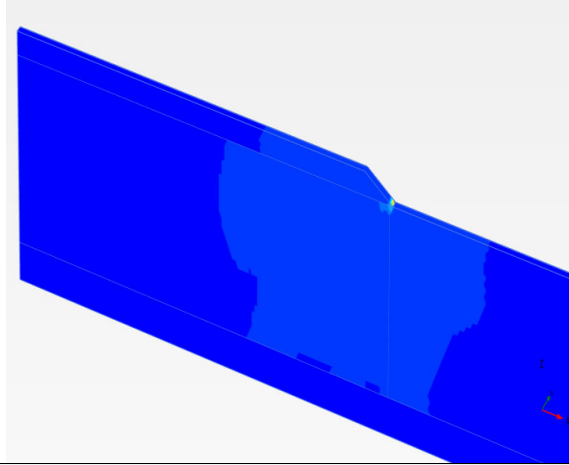
de 2 per ambdós casos ara col·lapsa i la situació estable es troba en una alçada de terraplè entre 0.75H i 0.5H.

Per últim dir que l'increment de la llei de variació de la cohesió de 0.25 a 0.3 produeix una variació similar en el FS de tots els casos del FS, al voltant de una dècima. El comportament de l'argila augmentant el angle de fregament no incrementa massa la resistència del terreny el que confirma l'angle de fregament de 25° com a propietats mecàniques vàlides per a una argila.

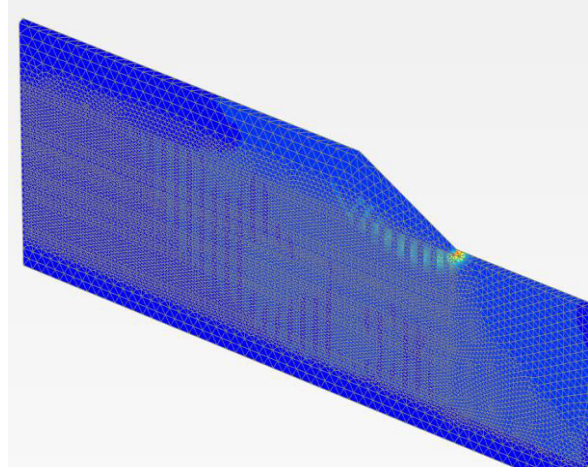
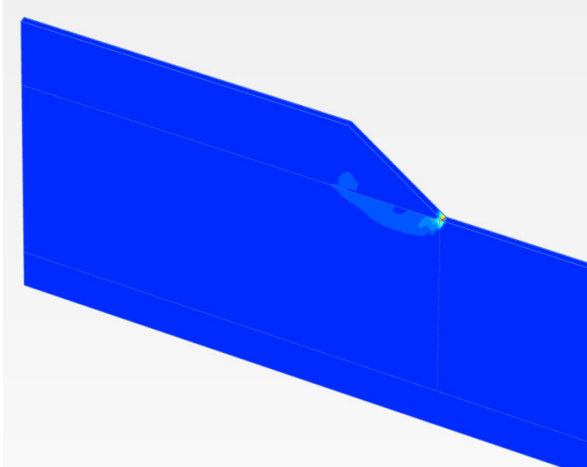
4.2.2 Mecanismes de trencament.

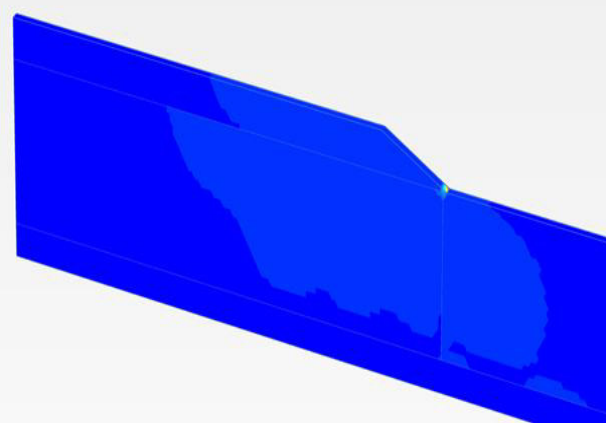
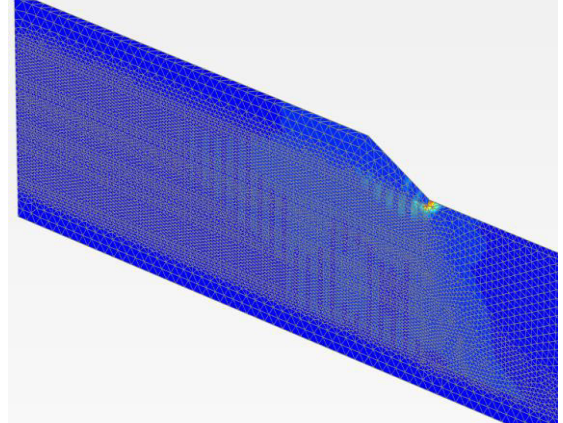
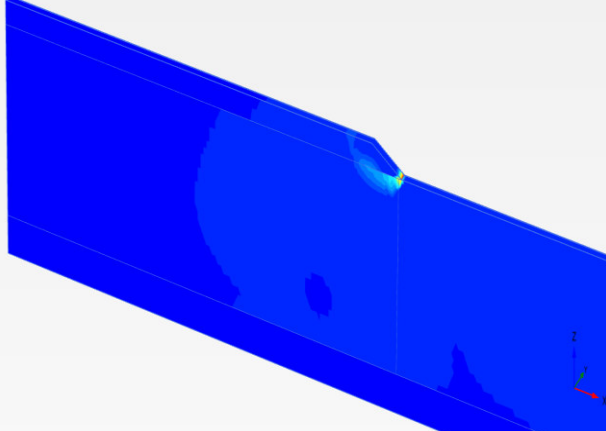
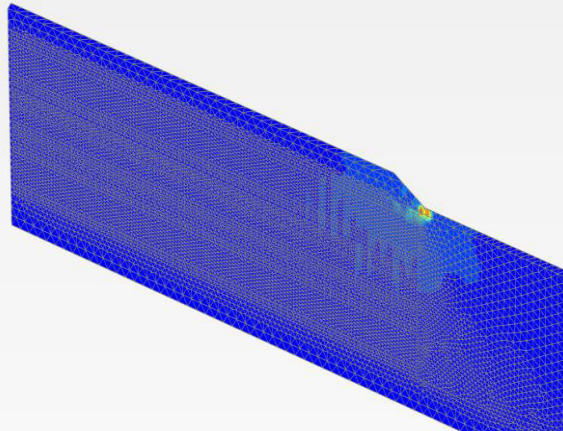
Cas	Àrea Equivalent	Columnes
Argila1 0.75H	 A 3D visualization of a soil slope cross-section. The surface is colored blue, representing the equivalent area. A small, localized region of higher stress or strain is highlighted in yellow and red at the toe of the slope.	
Argila1 0.5H	 A 3D visualization of a soil slope cross-section. The surface is colored blue. A larger, more extensive region of higher stress or strain is highlighted in yellow and red, extending further up the slope and towards the toe compared to the 0.75H case.	
		 A 3D visualization of the same soil slope cross-section as the equivalent area plot. The surface is covered with a dense grid of blue columns. A small, localized region of higher stress or strain is highlighted in yellow and red at the toe of the slope.
		 A 3D visualization of the same soil slope cross-section as the equivalent area plot. The surface is covered with a dense grid of blue columns. A larger, more extensive region of higher stress or strain is highlighted in yellow and red, extending further up the slope and towards the toe compared to the 0.75H case.

Argila1 0.25H



Argila2 0.75H



Argila2 0.5H		
Argila2 0.25H		

Taula 14. Comparació de mecanismes de trencament casos amb cohesió variable segons la profunditat.

S'observen que la forma de tots els mecanismes de trencament es similar. Tal com s'espera el talussos més grans provoquen mecanismes més llargs i profunds.

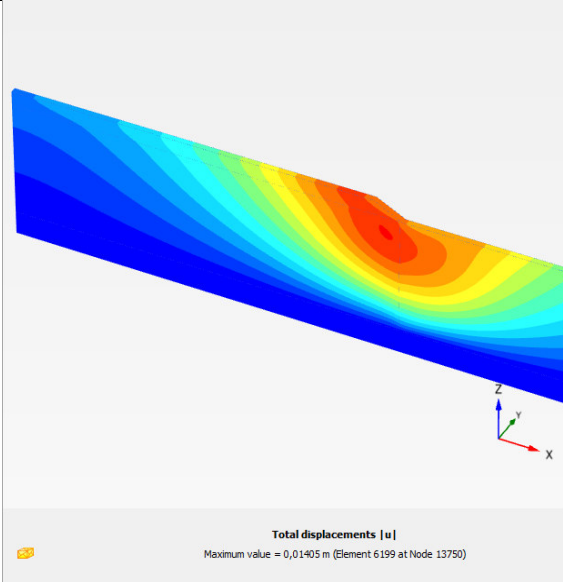
En comparació amb el models de materials anteriors es pot veure una diferencia ben clara: en els models anteriors degut a la homogeneïtat del valor de la cohesió els mecanismes arribaven a cotes més profundes i en aquets el mecanismes es mantenen relativament superficials, com a conseqüència, que el trencament busca el recorregut amb menys resistència que es troba en les cotes superiors.

4.2.3 Deformacions

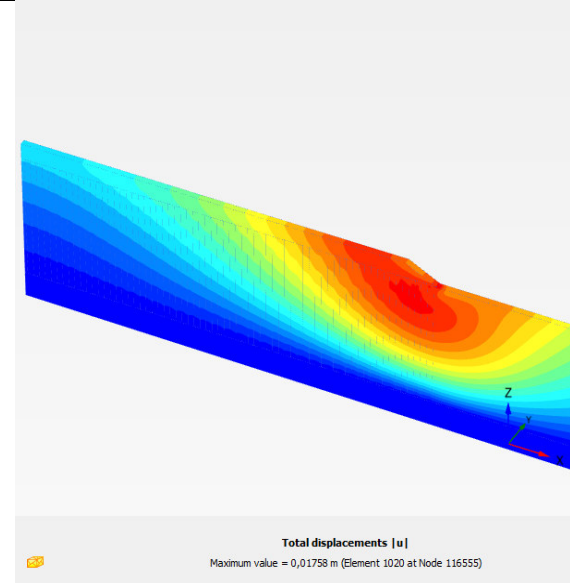
A la taula següent es mostren les deformacions globals del model a la segona fase, es a dir, quan es col·loquen es talussos. Cal reafirmar que es tracten de deformacions primàries; en condicions no drenades.

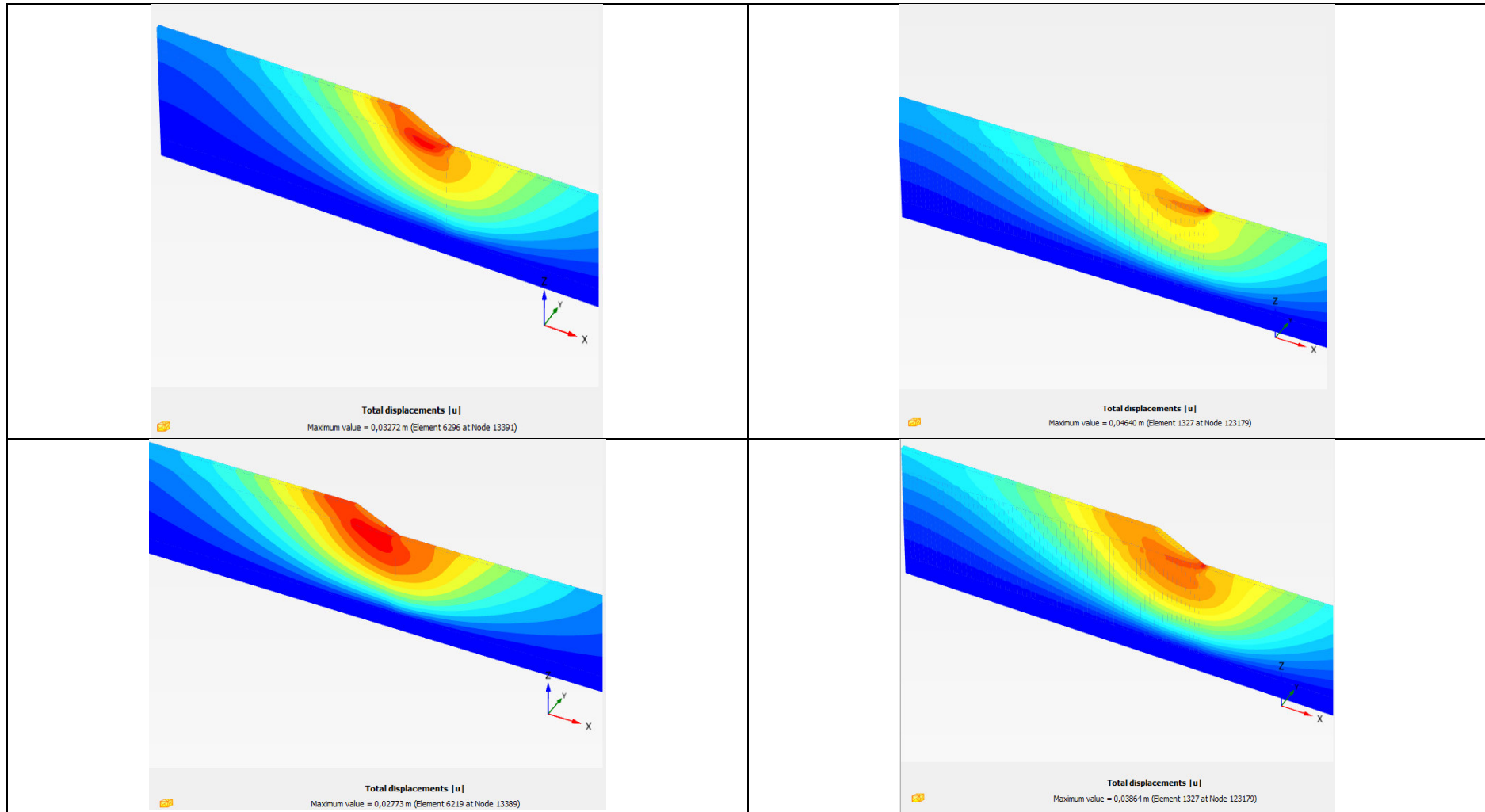
El més destacat és que el model àrea equivalent, "AE", és capaç de reproduir fidelment la forma d'aquest desplaçaments. La magnitud d'aquest presenta diferències, 1 cm aproximadament en els desplaçaments màxims. Pot no semblar massa però si tenim en compte que el total de desplaçament són 4 cm resulta en un 25 % d'error. Tot i això cal remarcar que en aquesta fase d'estudi existeix una diferencia important en el refinat de la malla en ambdues geometries. El refinament de la malla sembla ser un paràmetre que té certa influencia en el programa Plaxis, cosa que s'ha anat aprenent al llarg d'aquest treball.

Model à area equivalent



Model columnes





Taula 15. Comparativa desplaçament condicions no drenades després de col·locar el tal·lus. 1a fila: 0.25H, 2a fila 0.5H, 3a fila 0.5H argila 2.

4.3 Model Soft soil.

Aquest capítol inicia el càlculs dels models que representen de manera més real el comportament de l'argila. Com s'ha explicat en l'apartat 1.3.2 és un model similar a Cam-Clay on el comportament lineal elàstic i perfectament plàstic de MC s'abandona per un més real on les branques de carrega i descarrega tenen un comportament diferent segons l'historial de tensions del material. La relació entre tensió normal i tangencial abandona el cercle de MC i adopta una forma d'el·lipse. A més la resistència al tall es calcula en funció de la tensió vertical efectiva al final de cada fase de càlcul de manera automàtica i per tant es soluciona el problema que tenia el model MC, on la C_u només era variable en funció de una cota prefixada.

En primer lloc es calcularan els models amb les columnes discretitzades i l'argila definida per les lleis indicades en l'apartat 4. A continuació es definiran models d'àrea equivalent per trobar, variant la llei de C_u , que el FS coincideixin.

4.3.1 Geometria, propietats mecàniques i fases de càlcul

La geometria es la mateixa que trobem en tots capítols anteriors, és a dir la original, un terraplè de 5 metres d'alçada amb una pendent 1V:2H. El estrats que presenta el sòl són els mateixos amb la mateixa potencia.

Les propietats mecàniques que canvien evidentment son les de l'argila a conseqüència del canvi de model, en la taula a continuació podem veure les característiques més importants. Pel que fa als coeficients de compressió i dilatació, s'han utilitzats valors de referencia típics d'argiles de la desembocadura del Llobregat presentats en Tarragó (2010) per l'argila 1.

Material	Pes específic γ [kN/m ³]	Coefficient de compressió λ^*	Coefficient de dilatació κ^*	Cohesió C_u [kPa]	Angle de fricció ϑ [°]
Argila1	18.50	0.06	0.012	0	20° equivalent a $C_u 0.25 \cdot \sigma'_{vertical}$
Argila2	18.50	0.06	0.012	0	25° equivalent a $C_u 0.25 \cdot \sigma'_{vertical}$
Àrea equivalent 1	18.2	0.06	0.012	0	10
Àrea equivalent 2	18.2	0.06	0.012	0	12

Taula 16. Propietats mecàniques definitòries de l'argila en el model Soft Soil.

Es pot observar que l'argila queda caracteritzada per una cohesió nul·la i un angle de fregament diferent de 0, característiques totalment diferents a com es definia en els models basats en MC.

Aquest fet es degut a com funciona el model Soft Soil on trobem 2 mòduls de rigidesa en funció si el sòl està normalment consolidat o sobreconsolidat (branca de carrega recarrega). La tensió de preconsolidació marca la frontera entre ambdós branques i es directament proporcional a la cohesió efectiva seguint la següent expressió:

$$P_{p0} = c' \cdot \cotg(\varphi)$$

Per a valors elevats de cohesió, en funció de l'estat tensional inicial de l'argila podria estar sobreconsolidada amb un comportament més rígid que l'esperat. Per aquest motiu, s'utilitza un valor nul per a la cohesió.

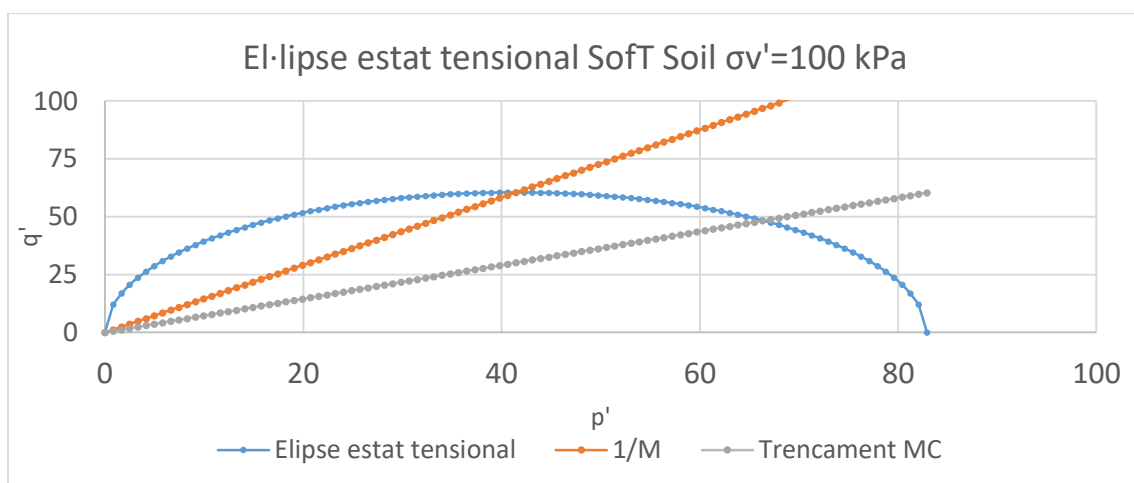
Per altra banda es pot demostrar que tot i que els valors que defineixen l'argila en ambdós models són diferents el comportament en trencament es el mateix. A continuació es comparará la resistència al tall de les argiles en els dos models. Es considera una tensió vertical efectiva vertical de 100 kPa.

Pel que fa al model basat en MC la resistència al tall esta basada en $\tau = Cu + \sigma \cdot tg(\theta)$. Com que en l'argila definim que l'angle de fregament es igual a 0 en condicions no drenades, la resistència al tall serà igual a la cohesió. Aquesta, com s'explica en capítols anteriors, varia linealment en funció de la tensió vertical efectiva segons la llei $Cu = 0.25 \cdot \sigma_v'$. En l'exemple que s'està valorant, la tensió vertical efectiva són 100 kPa. La resistència al tall τ serà de 25 kPa.

Pel que fa al model Soft Soil la resistència al tall es pot obtindrè segons les expressions indicades anteriorment en l'apartat 1.3.2.

Introduint les dades esmentades a l'inici del capítol ($c=0$ i $\phi=20^\circ$) s'obté l'el·lipse corresponent, representada en la següent imatge, a l'estat tensional: $\sigma_1=100$ kPa , $\sigma_3 =100 \cdot K_0 = 82.9$ kPa. La pressió de preconsolidació és 1 kPa. L'imatge següent conté a més:

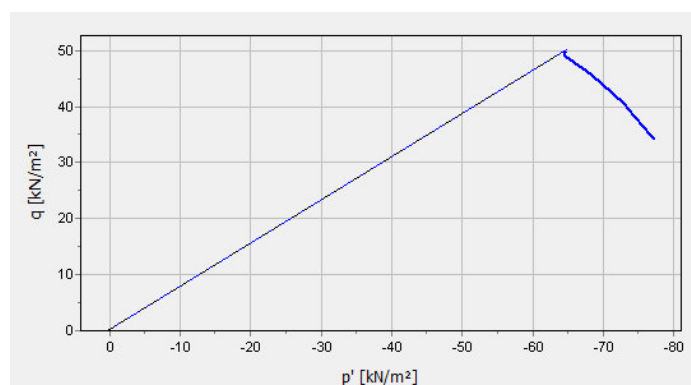
- El criteri de trencament del model Soft Soil. Aquest correspon al criteri de MC
- La línia de pendent 1/M que uneix la punta de totes les el·lipses que generarien diferents estats tensionals.



Imatge 17. Estat tensional del sòl segons el model Soft-Soil.

En el gràfic s'il·lustra el trencament, aquest es produeix en l'intersecció de l'el·lipse amb la recta gris que representa el criteri de trencament segons MC. El trencament es produeix aproximadament en $q'=50$ kPa.

La relació $q' = 2 \cdot \tau$ permet conèixer la resistència al tall, que és 25 kPa demostrant d'aquesta manera l'equivalència de comportament de ambdós models tot i que el input de propietats sigui diferent.



Imatge 18. Resultats d'un test de tall en condicions no drenades per l'argila.

En la imatge interior es mostren els resultats obtinguts d'un assaig de tall directe "DSS" per a l'argila d'estudi en aquest capítol. La tensió vertical efectiva es de 100 kPa. Es pot veure que el trencament es produeix quan la corba creua la recta de trencament del criteri de MC. El trencament es produeix, verificant el resultat de l'el·lipse anterior, per un valor de $q'=50$ kPa que equival a una resistència al tall $C_u=25$ kPa. A partir de la funció de assajos de tall directe del programa Plaxis es podran determinar les lleis de resistència al tall en funció de la $\sigma'_{vertical}$.

Les fases de càlcul són les mateixes que en els capítols anteriors.

4.3.2 Factors de seguretat.

Ningun dels models calculats ha resultat estable i tots han col·lapsat. Això es degut a la velocitat de col·locació del terraplè que genera altes pressions intersticials. En el model Soft Soil la resistència al tall depèn de les tensions efectives, la existència de grans pressions intersticials provoca que la tensió efectiva sigui pràcticament 0 o negativa. Aquest fet desemboca en una resistència al tall pràcticament nul·la.

En comparació el model MC, en condicions no drenades, la resistència al tall està regida per la resistència al tall no drenada i no es veu afectada per la presència de pressions intersticials.

4.3.3 Introducció procés de consolidació.

Per tal de evitar la concentració de tensions intersticials degudes a la introducció instantània del terraplè s'introdueix en el model una fase de consolidació. Aquesta fase es troba definida en l'apartat 1.3.

La utilització d'aquesta fase permet la entrada en carrega del terraplè de manera progressiva en un interval de temps, en aquest treball s'ha fixat un interval de 10 dies. A més, seguidament s'ha introduït una altre frase de consolidació amb una durada necessària per reduir les pressions intersticials a un valor per sota de 1 kPa. i que aquestes no tinguin efecte sobre el mecanisme de trencament dels diferents models estudiats

Per poder modelar la dissipació de les pressions d'aigua, pressions intersticials, cal definir una permeabilitat per a cada material i les condicions de contorn del model. La permeabilitat [k] és un paràmetre que defineix la velocitat de moviment que té l'aigua a través d'un medi porós. Pel valor de la permeabilitat de l'argila s'han utilitzat valors típics de les que es poden trobar a la desembocadura del Llobregat, en canvi, la resta de materials s'han considerat permeables (terraplè i estrat sorrenc) i se'ls ha assignat un valor de $k=1\text{m}/\text{dia}$ en totes les direccions.

Permeabilitat típica argila del Llobregat

$K_x=8.6e-3$

$K_y=8.6e-3$

$K_z=8.6e-4$

Taula 18. Valors típics per la permeabilitat en totes direccions de l'argila del Llobregat.

Les condicions de contorn s'ha deixat obertes en totes direccions excepte en la vertical en sentit descendent on roman tancat el flux d'aigua.

Les fases en aquest procés son les següents:

- Fase 1: En el sòl s'introdueixen les columnes però el terraplè encara no esta executat. Anàlisi tipus plàstic
- Fase 2: Es col·loca el terraplè, el procés d'execució es fixa en 10 dies. Anàlisi tipus consolidation.
- Fase 3: En un interval de temps determinat pel programa, les pressions intersticials es dissipen fins a ser inferiors a 1 kPa. Anàlisi tipus consolidation
- Fase 4: aplicant multiplicadors a la resistència al tall es fa col·lapsar l' estructura trobant un valor pel factor de seguretat. Anàlisi tipus safety.

4.3.4 Factors de seguretat

Cas	Angle de fregament model Soft Soil	FS
Àrea equivalent UC	10º equivalent a $CU=0.15 \cdot \sigma'_v$	1.141
	12º equivalent a $CU=0.17 \cdot \sigma'_v$	1.242
Columnes UC	20º equivalent a $Cu= 0.25 \cdot \sigma'_v$	1.225
	25º equivalent a $Cu= 0.30 \cdot \sigma'_v$	1.367

Taula 19. Factors de seguretat obtinguts amb el model Soft-Soil incloent una fase de consolidació 17

Dels resultats anteriors pot extreure que modelant l'àrea equivalent amb el model Soft Soil apareixen unes lleis de Cu molt més baixes que les originals per trobar una coincidència en el FS. Fins i tot models on la llei de Cu d'un material equivalent es més baix, amb evident menor resistència que els models on l'estrat argilós és del tipus phi 20 reforçat amb les columnes de graves, obtenen uns FS més alts.

Aquests resultats no són fidels a la realitat, és a dir, no és possible que un material més tou proporcioni un FS de seguretat al trencament que un material més resistent.

Degut a aquest resultat es decideix aprofundir més en el comportament del model Soft Soil degut a les incongruències mostrades en aquest apartat. S'analitzarà en el comportament del model en funció de la permeabilitat dels materials.

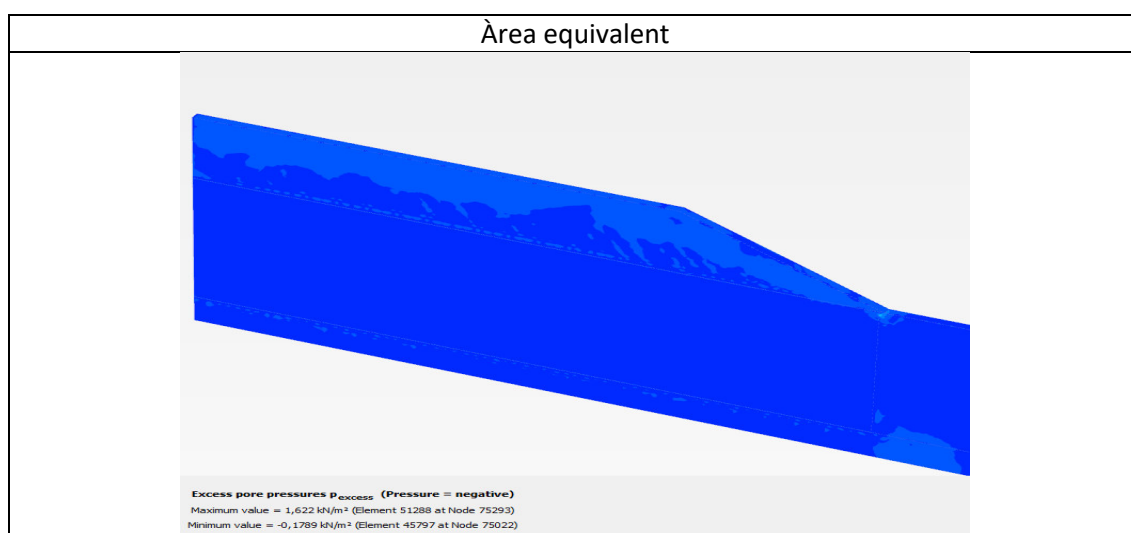
4.3.5 Calibrat model SOFT-SOIL

En aquest apartat es pretén aprofundir en el model Soft Soil a causa de la disparitat de resultats anteriors. Resulta sorprenent que per obtenir FS similar al model 3D discretitzat faci falta reduir la llei de resistència al tall per sota el valor del de l'argila.

En primer lloc es modelarà l'estructura sense reforços per poder comparar-la amb el model 3D discretitzat. Es comparà l'evolució de les pressions intersticials el en procés de càrrega del terraplè i dels mecanismes de trencament.

4.3.5.1 Pressions intersticial durant el procés de càrrega del terraplè.

En la taula que es mostra a continuació s'han representat l'augment de pressions intersticials produïts durant el procés de càrrega.



Taula 19. Pressions intersticials durant el procés de càrrega del terraplè. En color càlids s'indiquen els excessos de pressions.

El comportament del model sense columnes, i per tant sense drenatge, no és l'esperat. S'observa que les pressions intersticials no varien gens, com si el model fos drenat. Les condicions de contorn són les que haurien de ser, es permet el flux d'aigua a través de tots els límits del model excepte el inferior en direcció z per complir amb el flux que existeix en la realitat.

És clar que la no generació de pressions intersticials produeix que les tensions efectives siguin més altes. Com a conseqüència l'estat tensional es veu afavorit per tensions normals més altes

que permeten resistències al tall més altes, tal com regeix el criteri de trencament de MC. Aquesta hipòtesi seria vàlida si s'analitzés el comportament del trencament amb les pressions intersticials sense dissipar; en aquest cas hi ha una fase de consolidació després de la posada en carrega del terraplè que dissipa totalment aquest excés de pressió en l'aigua.

El paràgraf anterior no troba resposta a les incongruències de l'apartat anterior, on un material amb una permeabilitat baixa no es veu afectat per l'increment de les pressions intersticials, les quals no es produeixen per algun motiu desconegut, en condicions no drenades.

Per solucionar el fet de la no generació de pressions intersticials es proposa la següent solució:

- Com que l'argila té una permeabilitat baixa, es pot justificar el tancament del flux d'aigua a través de les cares longitudinals per intentar modelar millor la realitat.

A més, per continuar el calibrat del model Soft-Soil es compararan dos models idèntics amb l'única diferència en la permeabilitat de l'argila. Es valorarà l'influència d'aquest paràmetre, que no hauria de tenir ninguna afecció en el FS final tal com s'ha expressat en la presentació del model Soft-soil.

4.3.5.2 Efecte de la permeabilitat en el FS

A continuació es presentaran els resultats obtinguts per a dos models pràcticament idèntics amb l'única diferència en la permeabilitat k . Els materials són els presentats en els altres apartats amb l'excepció de l'argila, que presenta les següents característiques:

Material	Pes específic γ [kN/m ³]	Coefficient de compressió λ^*	Coefficient de dilatació κ^*	Cohesió c_u [kPa]	Angle de fricció ϑ [°]	Permeabilitat K [m/dia]
Argila1	18.50	0.06	0.012	0	20	1
Argila2	18.50	0.06	0.012	0	20	8.6e3

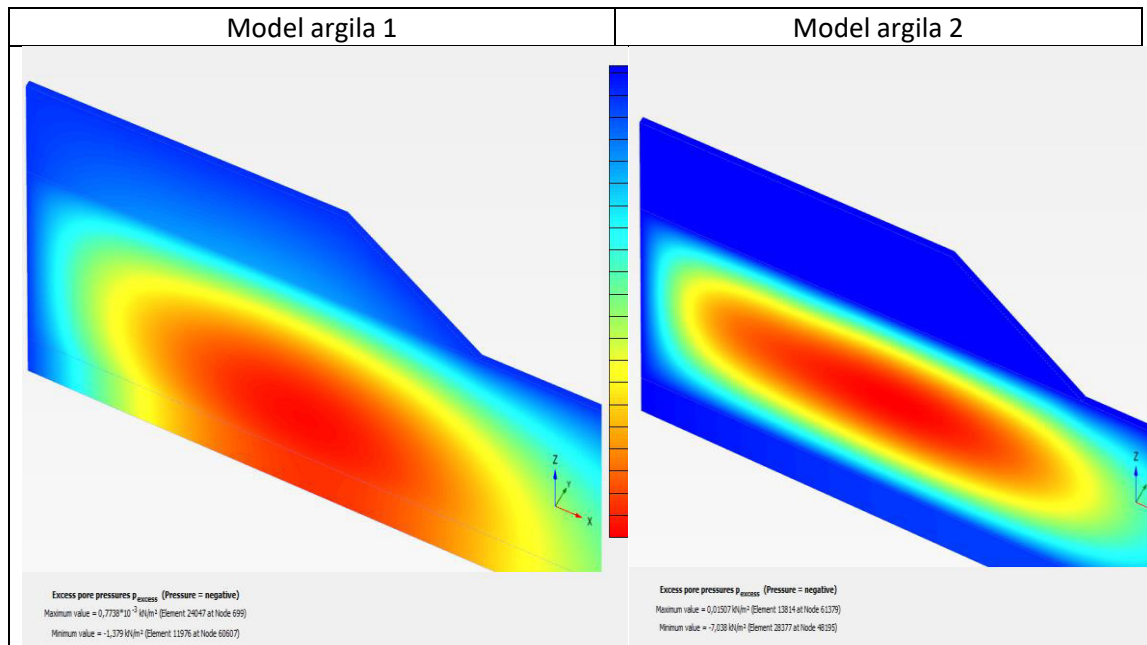
Taula 20. Propietats mecàniques emprades per la argila en els models a comparar.

La geometria és la mateixa que s'ha utilitzat en tots els models anteriors. En aquest cas no es vol tenir la influència del drenatge de les columnes de reforç de grava per tant no s'han inclòs al model. Les fases són les mateixes que s'han definit al inici del capítol, on es comença a utilitzar el model Soft Soil.

Recordar tal com s'ha indicat al final de l'apartat anterior que les condicions de contorn han canviat, el flux d'aigua no es permet al llarg del costat més gran de la llesca que el model representa. Aquest canvi es deu a la voluntat de forçar un increment de pressions intersticials i que no succeeixi com el capítol anterior on, es desconeix perquè, el model no generava pressions d'aigua.

Per començar es mostraran l'estat de les pressions intersticials durant el procediment de càrrega per poder avaluar la influència de les pressions intersticials en el valor del FS a l'última fase.

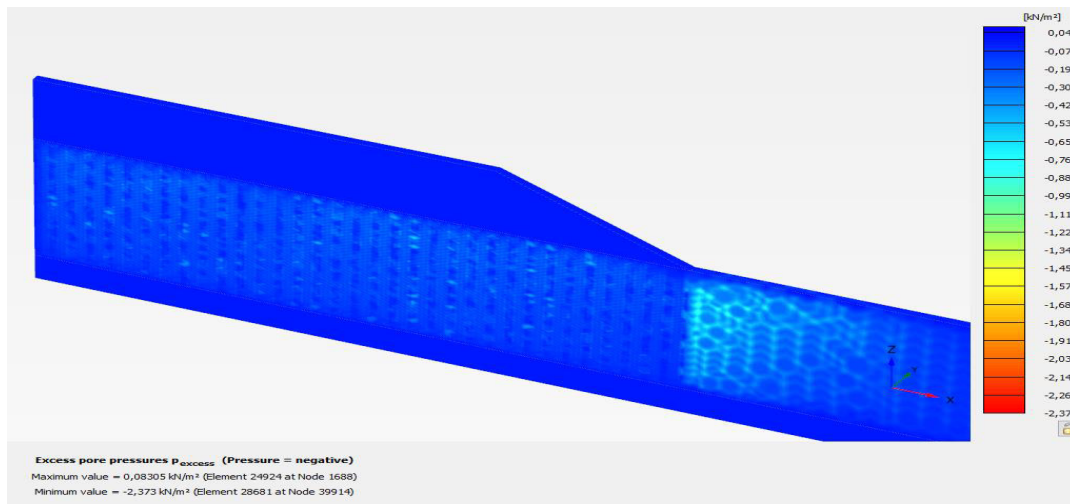
Després es compararan els factors de seguretat de ambdues simulacions i es valoraran els resultats.



Taula 21. Pressions intersticials. A l'esquerra model amb permeabilitat alta i a la dreta model de permeabilitat baixa.

La taula anterior mostra el valor màxim de les pressions intersticials durant el procés de càrrega del terraplè en un interval de 10 dies. S'observa a la imatge de l'esquerra, permeabilitat alta, que les pressions més altes (definides per l'àrea vermella) es troben gairebé sota tot el terraplè i apareixen tant en l'estrat sorrenc com en l'argilós. Aquest efecte es degut a que ambdues permeabilitats són molt similars i generen unes pressions màximes de al voltant 1.45 kPa. El comportament es l'esperat per al tipus de sòl i la distribució de les pressions és més realista que en el capítol anterior, per aquest motiu, es podria donar com a bona la hipòtesi de haver modificat les condicions de contorn.

La imatge de la dreta, cas de la permeabilitat típica per a l'argila, trobem que la concentracions de pressions es localitza sota el terraplè en l'estrat argilós. En aquest cas, en l'àrea vermella es generen al voltant de 8 kPa de pressió d'aigua durant el procediment de càrrega del terraplè en un interval de 10 dies. Les pressions intersticials presenten un altre cop una aparença que concorda amb l'esperat i per tant reforcen la hipòtesi de bloquejar el flux en direcció perpendicular al costat més llarg de la llesca.



Imatge 18. Pressions intersticials model argila 2 amb condicions de contorn pel flux d'aigua obertes en totes direccions.

Per acabar de confirmar la hipòtesis de la modificació de les condicions de contorn, en la imatge anterior es mostra el mateix model que conté el material argila 2, en canvi, les condicions de contorn permeten el flux d'aigua en totes direccions. Les pressions intersticials que es generen estan molt disperses, i amb un valor màxim de 2.3 kPa en les zones clares. Aquest comportament no reflexa la realitat per això es prenen com a més realistes els models expressats anteriorment. Per tant es confirma la validesa de la hipòtesi del tancament de les condicions de contorn per al flux de l'aigua en la direcció perpendicular al costat. A més, un altre comportament estrany es que les pressions es generen fora de l'àrea sota del terraplè.

A continuació es comparen en una taula els FS obtinguts en una fase posterior a la dissipació de les pressions intersticials. El comportament esperat després de la reducció de pressions s que els FS siguin els mateixos.

Cas	FS
Argila 1	1.204
Argila 2	1.197
Argila 2 C. Contorn flux obert	1.203

Taula 22. Comparació de FS del model en funció de la permeabilitat de l'argila.

Tal com s'esperava degut a l'etapa de consolidació on es dissipen les pressions intersticials i els FS obtinguts són pràcticament els mateixos. Ara bé el resultat es sorprenent per un altre fet. Si es revisen els resultats obtinguts en el capítol present, taula 19, s'observa que el FS obtingut en el model on es combinen les columnes discretitzades en 3D i l'argila modelitzada amb Soft Soil, el FS és 1.225.

Després de l'anàlisi del model Soft Soil per comprendre perquè en models tipus AE el FS de seguretat eren més alts que en el model 3D amb les columnes discretitzades, sembla que el problema es troba en el model discretitzat. No té sentit que en un model on hi ha solament un estrat argilós obtingui un FS més alt que en un mateix model on s'han introduït unes columnes

de reforç de graves. Per tant es pot concloure que el problema no es troba en els models AE sinó en la interacció entre l'estrat argilós i les columnes de grava.

4.3.5.3 Conclusions calibrat model Soft Soil.

En aquest capítol s'han treballat diferents hipòtesis per explicar el perquè dels resultats obtinguts en la taula 22 eren poc factibles comparats amb la realitat. Primerament es sospitava que el problema residia en l'argila modelitzada amb Soft Soil dels models tipus AE. Per això s'han modelat diferents situacions on s'han avaluat els factors de seguretat en funció de: l'angle de fregament, la permeabilitat i condicions de contorn.

En primer lloc s'ha demostrat que per a que els models Soft Soil i MC l'argila, ha de ser modelada amb diferents paràmetres mecànics. Mentre que en el model MC per definir el comportament de l'argila n'hi havia prou, en condicions no drenades, amb la resistència al tall (S_u) en el model Soft-Soil s'havia de definir per mitjà d'un angle de fregament. Això es degut a que l'estat tensional estava definit per un paràmetre M que depèn directament de l'angle de fregament. La similitud de comportament es va demostrar comparant la resistència al tall dels dos models per a una argila sota una tensió vertical efectiva de 100 kPa.

L'estudi de la influència de la permeabilitat en el model es va fer necessari perquè en el model Soft-Soil, tal com havia passat abans amb el MC amb resistència al tall variable amb la profunditat, el programa determinava que l'estructura col·lapsava durant la col·locació instantània del terraplè. La rapidesa del increment de carrega generava unes pressions intersticials massa altes, provocant plans on la resistència al tall era nul·la. Per solucionar aquest efecte es varia la fase de càrrega del terraplè, que es dilata en un interval de 10 dies i s'introdueix una fase de consolidació per a que les pressions intersticials es dissipin i no influeixin en el FS final. S'ha demostrat que degut a la fase de consolidació, el valor de la permeabilitat no té efecte en el FS final, mitjançant la comparació de models idèntics però amb diferents permeabilitats.

Per últim, l'estudi de les condicions de contorn es conseqüència del l'estudi de les pressions intersticials. Durant l'anàlisi es va detectar que per alguna raó desconeguda no es generaven pressions intersticials a l'argila sota el terraplè en condicions no drenades. Les condicions de contorn eren les correctes, el flux d'aigua estava permès en totes direccions excepte en la vertical en sentit ascendent. A més en l'estrat argilós fóra del terraplè si es generaven aquestes pressions. Com a solució es va optar per bloquejar el flux en direcció perpendicular a la cara més gran de la llesca que forma el model per a poder generar, d'aquesta manera, pressions intersticials. Aquesta solució ha mostrat resultats satisfactoris, d'ençà els models ja generaven pressions intersticials durant el procediment de construcció del terraplè.

Per últim, com a conclusió més important s'ha trobat que el model que no representava bé els resultats era el 3D amb les columnes discretitzades. Sembla ser que per algun motiu, encara no comprés, no es genera una interacció entre les columnes de graves i l'estrat argilós quan aquests elements estan modelats mitjançant MC i Soft Soil respectivament. El resultat és l'obtenció d'un FS de seguretat més baix quan s'utilitzen les columnes de reforç que sense aquestes. Com a hipòtesi preliminar, aquests FS baixos poden ser fruit de que el sistema col·lapsa a través d'un pla on no es troben les columnes de reforç. Aquest fenomen es degut a no haver aconseguit modelitzar la interacció entre les columnes de reforç i l'argila.

4.5 Obtenció del model àrea equivalent

En aquest capítol es voldria definir els criteris per a la creació d'un model del tipus àrea equivalent que es comportes de manera similar a un model 3D amb les columnes de reforç discretitzades. Malauradament, la impossibilitat de generar un model discretitzat vàlid, on l'estrat argilós es pogués definir mitjançant el model Soft Soil i les columnes de reforç mitjançant MC, tal com s'indica en el capítol anterior, impedirà la comparació amb un model àrea equivalent, com es pretenia a l'inici d'aquest treball de final de màster. De totes maneres en aquest capítol s'expressarà el procediment que es volia dur a terme per a la generació i comprovació d'aquest model àrea equivalent.

Arribats a aquest punt és important comprendre perquè es imprescindible comptar amb un model discretitzat formulat amb Soft Soil. En l'article de *Zhang (2013)* els autors comparen el seu model àrea equivalent amb un model discretitzat basat en MC. MC és un model que permet una aproximació inicial al comportament de materials com l'argila però, no té en compte l'historial de tensions del terreny, ni modelitza fidelment les deformacions fora del règim elàstic. Per aquets motius era important la utilització del model Soft Soil que si permet un modelat més realista del comportament de materials amb un alt grau de compressibilitat.

La idea a nivell teòric per definir les propietats mecàniques d'un model àrea equivalent s'expressa a continuació. En l'estudi d'estabilitat d'un terraplè sobre un estrat tou, el factor clau és la resistència al tall d'aquest últim, generalment el material d'aportació pel terraplè acostuma a ser amb millor propietats resistents si tenim en compte que l'estrat tou ha necessitat un reforç. A partir d'aquí es pretenia definir la resistència al tall d'un model discretitzat de referència i generar un model àrea equivalent que fos capaç de reproduir-la.

La primera dificultat és que la resistència al tall de les columnes de reforç i de l'argila esta definida per 2 models completament diferents. Pel que fa a les columnes, definides en MC, la resistència al tall depèn de l'angle de fregament i de les tensions verticals efectives. En canvi, en l'argila del model Soft Soil la resistència al tall és funció del paràmetre M, les tensions normals efectives i la pressió de preconsolidació. La resistència al tall del model equivalent compliria la següent relació:

$$\tau'_{AE} = (\alpha * \tau'_{argila,SS}(M, p', p_p)) + ((1 - \alpha) * \tau'_{reforç,MC}(\theta, \sigma'_v))$$

On α representa un factor de proporció entre el volum de columnes i el volum ocupat per l'estrat argilós.

Per $\alpha = 0.1963$ i una tensió vertical efectiva de 100 kPa la resistència al tall del reforç regit per MC és igual a $\sigma'_v \cdot \tan(\theta)$ i en el nostre cas te un valor de $\tau'_{reforç,MC} = 100 \cdot \tan(38) = 78.12 \text{ kPa}$.

La resistència al tall de l'argila seguint la llei de $0.25 \cdot \sigma'_v$ és $\tau'_{argila,SS} = 0.25 * 100 = 20 \text{ kPa}$. Ponderant els dos valors a través de $\alpha = 0.1963$ obtenim que la resistència al tall d'un material equivalent hauria de ser 31.40 kPa, és a dir, segueix una llei de $Cu = 0.31 \cdot \sigma'_v$. Aquesta llei sabem que equival a un angle de fregament del model Soft Soil de 28°.

A continuació es mostra la taula 19 actualitzada amb el valor d'angle de fregament d'un model àrea equivalent que es regeix per la llei de resistència al tall obtinguda anteriorment.

Cas	Angle de fregament model Soft Soil	FS
Àrea equivalent UC	10º equivalent a $Cu=0.15 \cdot \sigma'_v$	1.141
	12º equivalent a $Cu=0.17 \cdot \sigma'_v$	1.242
	28º equivalent a $Cu=0.31 \cdot \sigma'_v$	1.873
Columnes UC	20º equivalent a $Cu=0.25 \cdot \sigma'_v$	1.225

Taula 23. Comparació FS del model àrea equivalent amb el model de columnes discretitzades.

Com s'ha determinat anteriorment el FS obtingut pels models àrea equivalent són molt superiors als de les columnes discretitzades, ja que, es sospita que les simulacions discretitzades no proporcionen un FS real de la interacció reforç estrat argilós. Per aquest motiu es realitza una comprovació manual del factor de seguretat dels models discretitzats.

4.5.1 FS manual model columnes UC

Per realitzar la comprovació manual es seguiran els següents passos.

- Obtenció de les tensions vertical efectives, en diferents punts del mecanisme de trencament, en les fases de Safety i de consolidació.
- Transformació de les tensions verticals efectives en resistència al tall en funció del tipus de material. Per les columnes segons $\tau'_{reforc,MC} = \sigma'_v \cdot \tan(\theta)$ i per l'argila segons la llei de resistència al tall $\tau'_{argila,SS} = 0.25 \cdot \sigma'_v$
- Ponderar les resistències al tall en funció de $\alpha = 0.1963$ si el punt esta format per columnes i argila.
- Obtenir un factor de seguretat amb el rati de resistència la tall en la fase de consolidació sobre la resistència al tall en la fase de safety.

En la següent taula s'adjunten els valors obtinguts per als FS seguint el procediment anterior. Les seccions analitzades són a les columnes, numerades començant per el peu del terraplè.

Nº columna	Valors fase de consolidació					Valors fase safety					FS
	σ' argila	σ' columna	Cu argila	Cu columna	Cu mitjà	σ' argila	σ' columna	Cu argila	Cu columna	Cu mitjà	
1	14,00	55,00	3,50	42,97	11,25	9,00	23,00	2,25	17,97	5,34	2,11
2	22,00	120,00	5,50	93,75	22,83	13,00	82,00	3,25	64,07	15,19	1,50
3	25,00	114,00	6,25	89,07	22,51	20,00	75,00	5,00	58,60	15,52	1,45
4	40,00	137,00	10,00	107,04	29,05	25,00	84,00	6,25	65,63	17,91	1,62
5	40,00	133,00	10,00	103,91	28,44	15,00	90,00	3,75	70,32	16,82	1,69

Taula 24. FS manuals obtinguts per a diferents punts del mecanisme de trencament. FS mitjà= 1.675

Es pot observar que s'obte un FS mitjà de 1.675. aquest valor es superior al calculat per Plaxis per això es creu que el programa no ens proporciona un FS fruit de la interacció de les columnes de reforç i l'estrat argilós.

Afegir que el FS mitjà obtingut està proper al obtingut per el model àrea equivalent proposat en l'apartat 4.5, que té un valor de 1.873. Per tant es pot afirmar que la manera de transformar el model 3D al model equivalent pot funcionar.

Tot i estar en contacte amb l'equip de suport de Plaxis, per la necessitat de presentar aquest treball, no s'ha pogut trobar una solució al FS proporcionat en el model de columnes discretitzades i per tant aprofundir en el tipus de correlació entre els paràmetres del model àrea equivalent i el 3D real.

5. Conclusions

En aquest capítol es troba una síntesi de les conclusions extretes en cadascun dels capítols anteriors. A més, degut a impossibilitat d'haver arribat a complir els objectius proposats al principi d'aquest treball, es proposaran passos a seguir després d'aquest treball.

CAPITOL 2

Per començar, les primeres conclusions extretes són relatives al model realitzat en 2 D. Aquest era un model per introduir l'estructura analitzada però, ha proporcionat informació important. La conclusió més important és referent a la utilització del mètode 2, on es mantenien les propietats mecàniques de cada material però es ponderaven les geometries. Aquest mètode produeix models on les columnes de graves són molt esveltes i, per tant, es produïa el col·lapse de manera poc real. En canvi, el mètode 1 és molt més robust. No es veu afectat per els problemes d'esveltesa del mètode 2.

També ha permès corroborar els resultats obtinguts per Calabrese (2016) en el treball que precedeix aquest i la diferència de mecanismes de trencament segons les condicions del model. En condicions no drenades el trencament era de tipus profund, mentrestant en condicions drenades el trencament era de tipus superficial.

CAPITOL 3

Seguidament s'ha treballat amb el model en 3 D. Un cop més s'han pogut confirmar els resultats del treball anterior realitzat per Calabrese (2016). S'ha confirmat que tot i que els models de Calabrese (2016) i els presentats en Zhang (2013) semblaven afectats per el contorn del model, els resultats obtinguts amb un model propi, on el domini és més gran, han estat pràcticament els mateixos. En aquest capítol s'ha començat a detectar la importància del mallat del model. La diferència de precisió de la malla produïa que per models perfectament vàlids, Plaxis, proporcionés resultats molt diferents. Fins i tot, en alguns casos no fos capaç de calcular el model. Aquest problema va afectar de manera important el model tipus 3D real on el procés de mallat tenia certes dificultats per adaptar-se al contorn circular de les columnes de reforç. Per sort, durant la realització d'aquest treball, l'equip de Plaxis va presentar una important actualització del software on la incorporació d'un sistema de coordenades polars ha solucionat els problemes de mallat. La principal conclusió d'aquest capítol es que s'ha generat un model fiable capaç de reproduir els resultats dels treballs i articles que basaven aquesta tesina.

En el capítol 3.5 s'ha començat aprofundir en el comportament de la estructura en funció de la presència del nivell freàtic. S'ha sotmès el model ha diferents posicions del nivell freàtic per comprovar si reproduïa els resultats esperats. Aquets han complert les expectatives, quan el model estava sotmès a un nivell freàtic per sota l'estrat argilós aquest era molt més estable degut a la no generació de pressions intersticials en condicions no drenades i per tant un augment de la tensió vertical efectiva. En l'altre cas, en condicions drenades, la reducció de carrega per la no presència de l'aigua també proporcionava FS més alts. Finalment, quan el nivell freàtic estava sota de l'estrat argilós els FS eren pràcticament iguals en el càlcul drenat i el no drenat. Aquest resultats coincideixen, com ja s'apuntava en la bibliografia consultada *Christoulas (1997)* Com a conclusió més general, a partir d'aquest capítol el nivell freàtic es situa en superfície per a la resta de models per ser la condició més desfavorable.

CAPITOL 4

En el capítol 4.1 s'abandona l'argila on la cohesió era constant en tot l'estrat i es modifica el model per simular més fidelment la realitat. S'introdueix la cohesió variable linealment en funció de la profunditat. En aquest capítol han sorgit les diferències amb els models presentats anteriorment. S'ha demostrat que el MC és una bona aproximació pel comportament de l'argila però un model més realista proporciona diferents resultats. Tant diferents que la mateixa geometria no era estable, d'aquí es pot entendre la necessitat de modelar l'estructura utilitzant un model de material més realista per l'argila. En aquest capítol es varia l'alçada del terraplè per poder valorar la diferència de càrrega que hi ha entre utilitzar l'argila de cohesió variable i amb cohesió constant. La cohesió variable, i per tant, el comportament més realista de l'argila produeix una reducció de l'alçada de entre el 25 i 50% per obtenir una estructura estable.

El capítol 4.3 s'inicia la utilització del model de material Soft Soil. Es tracta d'un model tipus Cam-Clay que representa de manera més fidel els materials tous. En aquest capítol, com en l'anterior, els models no són estables seguint les mateixes directrius que en els capítols anteriors. En aquest capítol s'introdueix la col·locació del terraplè en un interval de 10 dies per reduir la generació de pressions intersticials.

En aquest capítol s'han començat a descobrir els problemes del model. Per alguna raó desconeguda, en models on no existien les columnes de reforç proporcionaven FS de seguretat més alts que en els models reforçats. Al principi aquest problema s'ha associat amb les pressions intersticials generades durant la col·locació del terraplè. S'ha descobert que el programa Plaxis, per algun error tenia problemes amb les condicions de contorn relatives al flux d'aigua. De fet a partir d'aquí s'ha començat a mantenir un cert contacte amb l'equip de suport de Plaxis degut al comportament del model. Seguint les seves recomanacions s'han modificat les condicions de contorn, el tancament del flux d'aigua a través de les cares del model per poder simular millor la generació de pressions intersticials. Però, com que el model tenia una fase de consolidació abans del càlcul del factor de seguretat, s'ha comprovat que independent de la generació de pressions intersticials durant la fase de càrrega el FS de seguretat és el mateix. Tot això ha conclòs en assumir que el problema no estava en el procés de càrrega del terraplè sinó en la interacció entre les columnes de reforç i l'estrat argilós.

Per altra banda s'ha presentat un procediment per transformar un model 3D en un model del tipus àrea equivalent. Mitjançant un càlcul de FS manual per a la simulació amb les columnes discretitzades s'ha pogut arribar a una conclusió optimista sobre la relació entre ambdós models. Ambdós FS tenen un valor semblant i faltaria aprofundir en alguna modificació de la ponderació de les propietats mecàniques a l'hora de determinar el model àrea equivalent.

6. Futures línies d'investigació

Com que el període per a la realització d'aquest treball de final de màster és limitat, no s'ha pogut aprofundir en perquè no es produïa la interacció entre el reforç i l'estrat argilós. Per tant el model amb el reforç discretitzat no s'ha considerat vàlid. Aquest fet, tal com s'explica en el capítol 4.3 ha deixat sense base per poder tenir un model de l'estructura, on l'argila és modelada segons Soft Soil, per comparar i desenvolupar un model d'àrea equivalent que era l'objectiu d'aquest treball de final de màster. De totes maneres en el capítol s'expressa l'idea teòrica per a poder determinar les propietats del model tipus àrea equivalent.

D'aquesta manera, queda pendent per a futurs treballs identificar el problema de la interacció entre les columnes de reforç i l'estrat argilós definit amb el model Soft Soil. Una vegada solucionada aquesta qüestió es podrà realitzar la creació del model àrea equivalent amb les directrius aquí indicades. Altres línies de investigació serien intentar reproduir els efectes de densificació produïts durant la realització dels reforços que de ben segur tenen un efecte important a tenir en compte.

7. Bibliografia

- Calabrese, A. (2016). *“Resistance of soil improved with stone columns in drained and undrained conditions”*. Tesina final Master Politecnico de Torino.
- Zhang, Z.; Han,J; Ye,G (2013). *“Numerical investigation on factors for deep-seated slope stability of Stone column-ssupported embankments over soft clay.”*
- Christoulas, St; Giannaros, Sh i Tsiambaos, S (1997). *“Stabilization of embankment foundations by using stone columns.”*
- Tan, S; Tjahyono, S and Oo, K (2008). *“Simplified Plane-Strain Modeling of Stone-Column Reinforced Ground “*
- Font, Irene (2010) *“Estabilidad de un muelle de cajones bajo carga considerando efectos tridimensionales.” Tesina fina de carrera Universitat Politècnica de Catalunya.*
- Tarragó, Dani (2010) *“Liquefacción de rellenos hidráulicos. Incidencia en la estabilidad de muelles.” Tesina final de màster Universitat Politècnica de Catalunya.*
- Kitazume, M; Maruyama, K (2006). *“ External stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading”*
- Kahlström, M (2013). *“ Plaxis 2D comparison of Mohr-Coulomb and Soft Soil Material Models” Tesina final Master Lulea University of Tecnology*
- *MANUAL DEL PLAXIS 3D (2017)*
- Keller (2010) *“Deep vibro techniques” Manual d’una empresa constructora de reforços de columnes de graves*

Llistat de símbols

A	Àrea de la secció.
c	Cohesió
c'	Cohesió efectiva
Cu	Resistència al tall en condicions no drenades
C _{inc}	increment de cohesió
e	porositat
E	índex de elasticitat/ índex de Young
H	Alçada del talús
K ₀	coeficient d'empenta al repòs
p	tensió isotròpica
p'	tensió isotròpica efectiva
q	tensió desviadora
u	pressió intersticial/ pressió porus d'aigua
ε _v	deformació volumètrica
ε _e	deformació elàstica
ε _p	deformació plàstica
κ	índex de dilatació
λ	índex de compressió
κ*	índex de dilatació modificat
λ*	índex de compressió modificat
ν	coeficient de Poisson
ρ	densitat
σ	tensió normal
σ'	tensió normal efectiva
γ	pes unitari
τ	tensió tangencial / resistència al tall
θ	angle de fregament