



UNIVERSITAT DE BARCELONA



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

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL FI DE CARRERA

Títol

Anàlisi de la metodologia de disseny d'un moll sobre pilots

Autor/a

Héctor Marín Moreno

Tutor/a

Antoni Lloret Morancho

Departament

Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica

Intensificació

Obres i Coneixement del terreny

Data

25-06-2009

Índex	Pàg.
0. Abstract	0
1. Introducció	1
2. Geometria del moll	3
3. Mètode de la ROM0.5-05. Aplicació del programa Slide 5.0	4
3.1 Explicació teòrica del mètode	4
3.2 Models constitutius i paràmetres del sòl	6
3.3 Càlcul del Factor de Seguretat. Mètodes de Bishop Simplificat i Janbu Simplificat	6
3.3.1 <i>Mètode de Bishop Simplificat</i>	8
3.3.2 <i>Mètode de Janbu Simplificat</i>	9
3.4 Resultats obtinguts.....	10
3.5 Conclusions i discussió de resultats	15
4. Anàlisi d'estabilitat amb Plaxis 8.2. Utilització de forces internes com a mesura estabilitzadora	16
4.1 Característiques de la modelització	16
4.1.1 <i>Elements finits utilitzats</i>	16
4.1.2 <i>Condicions de contorn aplicades</i>	17
4.1.3 <i>Condicions inicials</i>	17
4.1.4 <i>Models constitutius i paràmetres del sòl</i>	18
4.1.5 <i>Fases de càlcul implementades</i>	18
4.2 Anàlisi i resultats obtinguts	19
4.2.1 <i>Anàlisi del moll sense càrrega horitzontal interna</i>	19
4.2.2 <i>Anàlisi del moll amb càrrega horitzontal interna</i>	20
4.2.3 <i>Anàlisi del moll amb la distribució de càrregues horitzontals internes</i>	24
4.3 Conclusions i discussió de resultats.	25
5. Anàlisi d'estabilitat amb Plaxis 8.2. Els pilots com a mesura estabilitzadora	27
5.1 Dimensionament dels pilots.....	27
5.2 Anàlisi del moll sense accions externes	29
5.2.1 <i>Models constitutius i paràmetres dels elements estructurals</i>	29
5.2.2 <i>Fases de càlcul implementades</i>	29
5.2.3 <i>Resultats obtinguts</i>	30
5.2.6 <i>Conclusions i discussió de resultats</i>	30

6. Anàlisi d'estabilitat amb Plaxis 8.2. Els pilots com a mesura estabilitzadora en un problema real.	32
6.1 Càrregues considerades.	32
6.2 Verificacions de seguretat prèvies.	33
6.2.1 Verificacions realitzades.	33
6.2.2 Dimensionament final	45
6.3 Anàlisi d'estabilitat	45
6.3.1 Models constitutius i paràmetres dels elements estructurals	46
6.3.2 Fases de càlcul implementades.	46
6.3.3 Resultats obtinguts	47
6.4 Conclusions.	66
7. Anàlisi d'estabilitat amb Plaxis 3D Foundation 1.1. Els pilots com a mesura estabilitzadora en un problema real.	68
7.1 Característiques de la modelització	68
7.1.1 Elements finits utilitzats	69
7.1.2 Condicions de contorn aplicades	70
7.1.3 Condicions inicials	70
7.1.4 Models constitutius i paràmetres del sòl i estructures	70
7.2 Càrregues considerades.	71
7.3 Anàlisi d'estabilitat	72
7.3.1 Consideracions realitzades i limitacions del programa.	72
7.3.2 Fases de càlcul implementades	74
7.3.3 Resultats obtinguts	75
7.4. Conclusions.	90
8. Conclusions generals	92
9. Bibliografia	96
10. Annex 1. Gràfiques	97
11. Annex 2. Càlculs realitzats	99

Al meu tutor Antoni Lloret, per la confiança dipositada en mí.

Als meus pares, culpables i responsables de ser qui soc i de ser on he arribat.

A tota persona que hagi compartit algun moment amb mí durant aquesta etapa universitària.

A tots ells, gràcies.

Pròleg

La necessitat que tenim els humans de trobar respostes per resoldre tot tipus de problemes que una societat tant complexa com l'actual requereix, fa que les obres d'enginyeria i els enginyers/es que les pensen, les dissenyen, les dimensionen i les construeixen no es conformin, tant sols, amb aquella solució que els hi ha funcionat durant anys, amb allò que tants bons resultats, econòmics i tècnics, els hi ha donat en anteriors projectes, sinó que vulguin continuar millorant, innovant, experimentant amb noves pràctiques i criteris, que a més de complir amb la necessitat tècnica per la que han estat destinades aportin un extra a la societat i al grup encarregat de dur a terme la nova solució.

La societat actual és més exigent, la informació és més accessible, està disponible per un número major de persones i per tant allò que els enginyers fan, ja no és quelcom que només s'utilitza i s'observa, sinó que moltes vegades s'entén. Per aquest motiu, ja no només es valora un projecte per criteris tècnics o econòmics, ara criteris com l'impacte social o ambiental tenen molt pes en el moment de presa de decisions d'una alternativa o altre. Y això, és el que provoca que els enginyers, dia a dia, busquin allò que la societat demana i per tant es mantinguin actius i sempre informats de les exigències del mercat i de les novetats que apareixen en aquest món global.

En les pàgines d'aquest document, s'espera que el lector pugui apreciar aquest instint d'innovació que l'enginyer sempre vol donar a conèixer.

0. Abstract

Abstract: This final project is about the analysis of piles behaviour in pile supported quays. This constructive solution is presented as an alternative to the concrete caisson quay commonly used in Barcelona. It applies the methodology proposed by the *ROM0.5-05* by using the slope stability program *Slide 5.0* for calculating the safety factor. The program implements the limit equilibrium methods of *Bishop Simplified* and *Janbu Simplified*. With the *ROM0.5-05* methodology, is determined the distribution and horizontal thrust value that must withstand the piles, to obtain a safety factor of 1.7 of the critical surface. Piles are designed using the obtained thrusts. With the pile size, is analyzed the stability of the levee with the finite element program *Plaxis 8.2* using the *phi-c reduction* method. A comparison among safety factors and sliding surfaces obtained with both programs is provided. Subsequently, is considered a possible external loads distribution on the quay and a new design of the piles for the new system of loads is applied using the *ROM0.5-05* recommendations. The stability of the levee is analyzed by applying the external loads with *Plaxis 8.2* and considering two different construction processes. One considers the implementation of the piles before the embankment and the other later. Calculated efforts in both processes with those used in the design of the piles are compared. Then, the same case with the three-dimensional finite element program, *Plaxis 3D Foundations 1.1*, is analyzed. Finally, a brief comparison with the results obtained in the 2D model is presented and it is discussed the need for a three-dimensional model for this type of problem. Finally, the general project conclusions are presented.

Resumen: En esta tesina final de carrera se presenta el uso de pilotes como posible medida estabilizadora de muelles en puertos. Esta solución constructiva se propone como alternativa a los cajones de hormigón en masa habitualmente utilizados en Barcelona. Se aplica la metodología que propone la *ROM0.5-05* mediante el uso del programa de estabilidad de taludes *Slide 5.0* para el cálculo del factor de seguridad. El programa implementa los métodos de equilibrio límite de *Bishop Simplificado* y *Janbu Simplificado*. Con la metodología de la *ROM0.5-05* se determina la distribución y valores de empujes horizontales que deben resistir los pilotes para obtener un factor de seguridad de 1.7 de la superficie de deslizamiento crítica. Utilizando los empujes obtenidos, se dimensionan los pilotes. Con los pilotes dimensionados, se analiza la estabilidad del mismo muelle con el programa de elementos finitos *Plaxis 8.2* utilizando el método *phi-c reduction*. Se establece una comparativa de los factores de seguridad y superficies de rotura obtenidas con ambos programas. Posteriormente, se consideran unas posibles cargas externas sobre el muelle y se realiza un redimensionamiento de los pilotes para el nuevo sistema de cargas usando las recomendaciones de la *ROM0.5-05*. Se analiza la estabilidad del muelle aplicando las acciones externas con *Plaxis 8.2* considerando dos procesos constructivos distintos. Uno considera la ejecución de los pilotes antes del muelle y el otro posteriormente. Se comparan los esfuerzos calculados en ambos procesos con los utilizados en el dimensionamiento de los pilotes. A continuación, se analiza el mismo caso con el programa de elementos finitos tridimensional, *Plaxis 3D Foundations 1.1*. Se realiza una breve comparativa de los resultados obtenidos con el modelo 2D y se discute la necesidad de un modelo tridimensional para este tipo de problemas. Finalmente, se presentan las conclusiones generales de la tesina.

1. Introducció

La present tesina es centra en l'estudi i el càlcul d'estabilitat de molls en ports mitjançant pilots. Existeix un mètode a la ROM0.5-05, "Recomendaciones de Obras Marítimas". "Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuárias", que permet estimar les empentes sobre pilots en molls per mitja del càlcul del factor de seguretat. Amb aquestes empentes i considerant unes possibles càrregues externes es poden dimensionar els pilots .

Aquest mètode utilitza un procediment i hipòtesis poc intuïtives i vagament explicades al document, que seran l'objectiu d'estudi. Per a la realització d'aquest anàlisi s'han utilitzat tres programes: *Slide 5.0*, *Plaxis 8.2* i *Plaxis 3D Foundation 1.1*.

- *L'Slide 5.0* és un programa en 2D que pertany al paquet de programes desenvolupats per *Rocscience* i que permet el càlcul d'estabilitat de talussos utilitzant els mètodes d'equilibri límit de *Bishop Simplificat* i *Janbu Simplificat*. (Simons, Noel; Menzies, Bruce; Matthews, Marcus, 2005 i C. Wyllie, Duncan; W. Mah, Christopher, 2007).
- *El Plaxis 8.2* i *Plaxis 3D Foundation 1.1*, són dos programes de modelització numèrica en elements finits en 2D i 3D respectivament. Ambdós programes han estat desenvolupats per *Delft University of Technology* (Holanda) específicament per l'anàlisi de deformació i estabilitat de problemes geotècnics.

Plaxis 8.2, permet modelar utilitzant diferents models constitutius avançats, diversos problemes geotècnics en els que es requereix simular un comportament no lineal de sòls i roques.

Plaxis 3D Foundation 1.1, permet modelar utilitzant quatre models constitutius avançats que són *Mohr-Coulomb*, *Hardening* i model lineal i no lineal d'estructures, un gran número de problemes geotècnics relacionats amb les fonamentacions en sòls i roques.

El mètode abans mencionat de la ROM0.5-05, requereix de l'ús d'un programa d'estabilitat de talussos que permeti la introducció d'un força horitzontal dins de la massa mobilitzada. Aquest aspecte justifica l'ús del programa *Slide 5.0*. Una vegada aplicat el mètode i obtinguda la distribució d'empentes sobre els pilots amb un factor de seguretat d'1.7, imposat pel propi mètode, s'utilitzarà el programa *Plaxis 8.2* per analitzar, amb la mateixa geometria i paràmetres dels materials del moll, el factor de seguretat. En aquest anàlisi, s'utilitzaran les forces internes obtingudes amb el mètode de la ROM0.5-05, per substituir els pilots, i es compararan i discutiran els resultats. El càlcul del factor de seguretat es realitzarà utilitzant el procediment *phi-c reduction*. El procediment consisteix en reduir els paràmetres θ (angle de fricció interna) i c (cohesió) del sòl fins que es produeixi el trencament.

Arribat a aquest punt, es disposarà d'una distribució d'empentes internes que permetran el dimensionament dels pilots. Una vegada dimensionats els pilots, s'introduiran al model de *Plaxis 8.2* i es farà un anàlisi del factor de seguretat, dels moviments i dels esforços dels pilots. Seguidament, redimensionant els pilots considerant unes possibles accions externes actuant, es modelitzarà el mateix moll introduint aquestes accions al model. En aquest cas, es considerarà que el moll és estable amb un factor de seguretat major o igual a 1.25.

Finalment amb el programa *Plaxis 3D Foundations 1.1*. es tornarà a estudiar el problema general considerant el redimensionament de pilots aplicat a *Plaxis 8.2*. En aquest cas no serà possible fer l'estudi del factor de seguretat ja que el programa no contempla aquesta opció, però es farà l'estudi de moviments i esforços dels pilots. Amb aquest últim anàlisi es vol estudiar com varien els moviments i els esforços respecte al model en 2D.

Per tant, les anàlisis de la present tesina són les següents:

- Estimació de les empentes que actuen sobre pilots en molls amb el mètode de la ROM0.5-05. Anàlisi i discussió del procediment aplicat.
- Aplicació de les forces obtingudes amb el mètode de la ROM0.5-05 a *Plaxis 8.2*. Comparació i discussió dels factors de seguretat obtinguts respecte *Slide 5.0* per un mateix estat de forces horitzontals internes.
- Estudi del factor de seguretat, moviments i esforços amb *Plaxis 8.2* amb els pilots dimensionats. El dimensionament es realitzarà amb les empentes trobades al mètode de la ROM0.5-05.
- Redimensionament dels pilots utilitzant la més conservadora de les tres verificacions de seguretat (ruptura horitzontal del terreny, enfonsament individual dels pilots i enfonsament del grup de pilots i resistència estructural del pilot) pel mateix problema, considerant unes possibles accions externes. Anàlisi amb *Plaxis 8.2*.
- Estudi dels moviments i esforços amb *Plaxis 3D Foundations 1.1*. Estudi de la influència que té considerar un comportament tridimensional en el càlcul. Comparació amb els moviments i els esforços calculats a *Plaxis 8.2*.

I els objectius són dos.

- Demostrar que el mètode de la ROM0.5-05 permet obtenir una simplificació prou correcta de les empentes que actuen en pilots.
- Demostrar que amb la distribució d'empentes de la ROM0.5-05 i les càrregues externes que actuen, els pilots dimensionats i el moll pateixen uns moviments admissibles i el factor de seguretat calculat és major o igual a 1.25.

2. Geometria del moll

El moll analitzat a *Slide 5.0* i *Plaxis 8.2* és el següent.

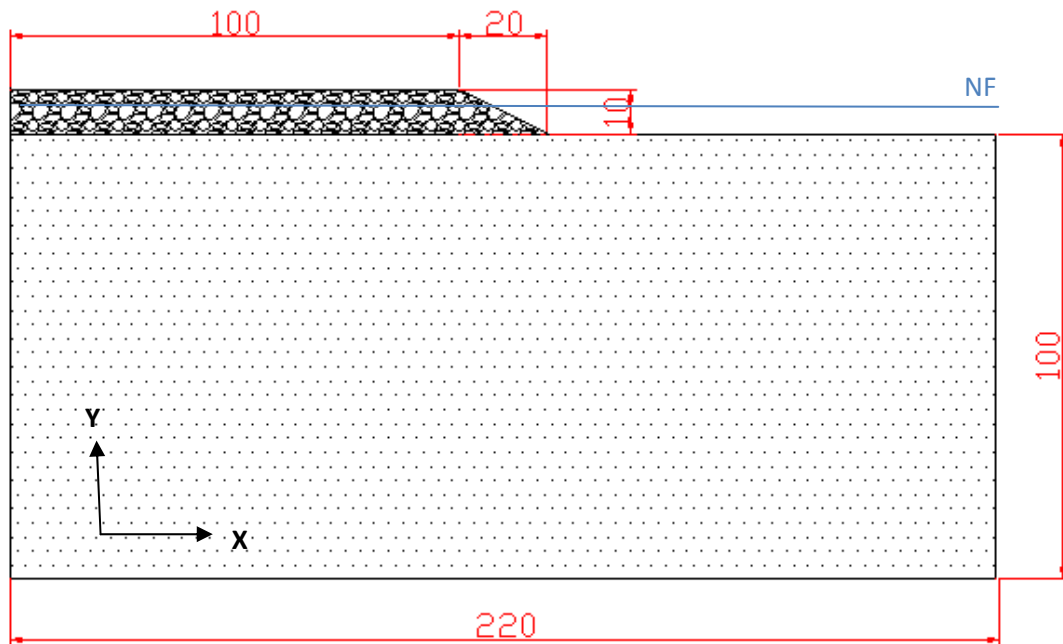


Figura 1. Geometria del moll analitzat amb les cotes en m. El material de la capa superior correspon al tot-u i el material de la capa inferior correspon a unes argiles llimoses.

S'ha considerat un moll amb la profunditat i longitud mostrades, perquè a efectes de càlcul, el contorn no influís en el càlcul d'estabilitat al programa *Plaxis 8.2*. La dimensió **z** es considera la unitat en els programes *Slide 5.0* i *Plaxis 8.2*.

Pel que fa a l'anàlisi en *Plaxis 3D Foundation 1.1* la geometria s'ha hagut de reduir, mantenint la mateixa alçada del moll, ja que aquesta geometria considerant la dimensió **z** feia inviable el càlcul degut al número elevat d'elements de malla. S'ha establert una longitud **z** tal que els efectes de contorn no distorsionessin els resultats.

El moll està format per 10m de gruix de tot-u i el terreny natural són unes argiles-llimoses.

3. Mètode de la ROM0.5-05. Aplicació del programa Slide 5.0

3.1 Explicació teòrica del mètode

En el següent apartat es mostra el problema d'estabilitat de talussos que cal analitzar.

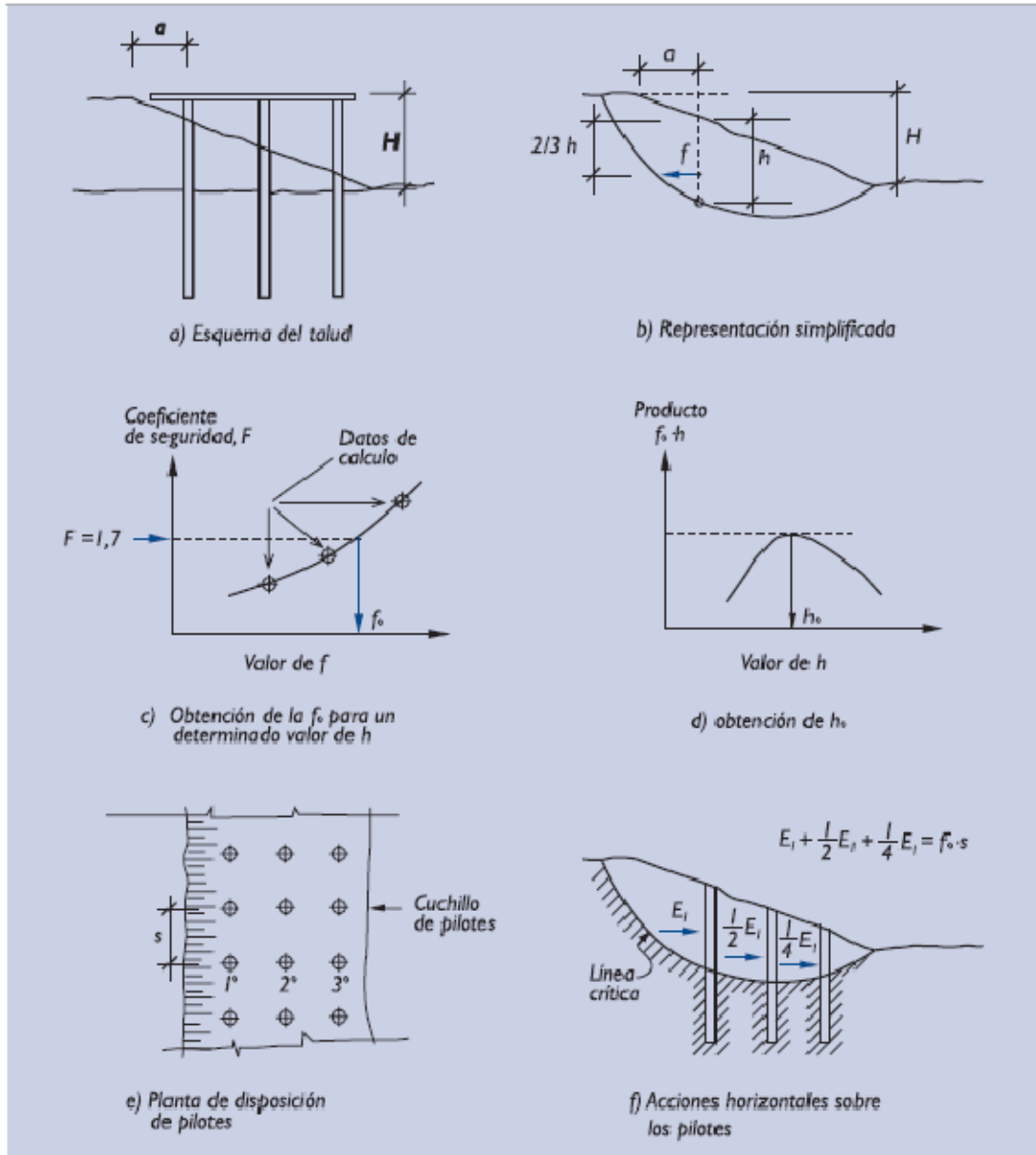


Figura 2. Procediment d'estimació d'empentes sobre pilots en talús. (Puertos del estado, 2005).

La figura anterior mostra els passos que cal seguir per resoldre el problema. La ROM0.5-05 deixa constància que els resultats obtinguts deurien ser una primera aproximació de les empentes sobre pilots en molls.

El càlcul requereix de l'ús d'un programa d'ordinador per l'anàlisi de problemes d'estabilitat de talussos que permeti la introducció d'una força horitzontal dins de la massa lliscant. S'ha decidit utilitzar el programa *Slide 5.0* per la seva facilitat d'ús i per la visualització amb la que presenta els resultats.

El mètode segueix els passos següents:

1. L'efecte del conjunt de tots els pilots es representarà per una única força horitzontal interna f que actuarà en la vertical de l'eix dels pilots més pròxim a la capçalera del talús i a una profunditat de $2/3h$ respecte la capçalera del talús, sent h la profunditat de la línia de lliscament en la vertical mencionada. Això requerirà especificar en el càlcul que les línies de lliscament passin per un determinat punt fix.
2. Aquest càlcul es repetirà, conservant el valor d' h però canviant el valor d' f per obtenir el valor que correspondria a un factor de seguretat de 1.7. Aquest valor es definirà com a f_0 (apartat c, de la figura 1).
3. Novament, el procediment es repetirà per diferents valors d' h i per tant utilitzant diferents superfícies de lliscament, amb l'objectiu d'estimar el valor màxim del producte de $f_0 \cdot h$ (apartat d, de la figura 1). La línia de ruptura corresponent i els valors associats de $f_0 \cdot h$ seran utilitzats posteriorment per determinar l'empenta sobre el conjunt de tots els pilots i el seu punt d'aplicació.
4. El càlcul de l'empenta del conjunt de pilots sobre un ganivet (conjunt de pilots sobre una mateixa secció transversal) serà:

$$E_{total} = s \cdot f_0 \quad (3.1)$$

sent s la separació entre ganivets de pilots (apartat e, figura 1). Si aquesta separació és major a l'alçada del talús H , s'agafarà aquest valor com a valor de la separació de càlcul.

5. L'empenta total sobre els pilots d'un ganivet es distribuirà entre ells de forma ponderada. Al primer pilot, el més pròxim a la capçalera del talús, se l'assignarà el doble de càrrega que al segon i a aquest el doble que al tercer i així successivament (apartat f, figura 1).

$$E_1 + \frac{1}{2} \cdot E_1 + \frac{1}{4} \cdot E_1 = f_0 \cdot s \quad (3.2)$$

Aquest raonament es basa en que a efectes de càlcul estructural, l'empenta que actua sobre cada pilot es pot suposar repartida de forma linealment creixent amb la profunditat, en l'alçada que va des de la capçalera fins a la intersecció amb la línia de lliscament crítica.

6. Finalment, el punt d'aplicació de la càrrega es suposarà a $2/3$ de la profunditat enterrada del pilot dins de la massa lliscant de la línia de ruptura crítica.

Una de les limitacions del mètode explicat, és la necessitat d'haver d'imposar una superfície de lliscament i mantenir un punt fix de la superfície per poder variar la h . En el talús analitzat a continuació, s'ha considerat com a superfície de lliscament, aquella que el programa calculés amb menor factor de seguretat i agafés tota la longitud del talús, ja que l'experiència indica que les ruptures habituals comencen a la part més alta del talús. Respecte al punt fix, s'ha decidit fixar el punt que intersecciona amb la capçalera del talús.

El fet d'imposar un factor de seguretat d'1.7 és deu a que la ROM0.5-05 suggereix els següents factors de seguretat mínims davant ruptures horitzontals del terreny.

Tabla 3.6.2. Coeficientes de seguridad mínimos frente a la rotura horizontal del terreno. Obras con ISA bajo (5 a 19)

Tipo de combinación	Coeficientes de seguridad, F
Cuasi-Permanente, F_1	1,8
Fundamental, F_2	1,6
Accidental o Sísmica, F_3	1,5

Taula 1. Coeficients de seguretat mínims davant la ruptura horitzontal del terreny. (Puertos del estado, 2005).

Per tant, el mètode considera un factor de seguretat mig entre una combinació de forces quasi-permanents i una combinació de forces fonamental.

3.2 Models constitutius i paràmetres del sòl

A la taula següent es mostren els paràmetres dels dos materials i els models constitutius utilitzats pel càlcul d'estabilitat amb el programa *Slide 5.0*.

Identificació	Model	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	c [kN/m ²]	θ °
Tot-u (moll)	Mohr-Coulomb	20	22	0,1	38
Argiles i Llims (substrat)	Mohr-Coulomb	16.5	18.5	1	20

Taula 2. Models constitutius i paràmetres dels materials que intervenen en el càlcul.

Mohr-Coulomb és un model elasto-plàstic sense enduriment i amb elasticitat lineal que s'utilitza com a primera aproximació al comportament de sòls en general.

L'elecció del model de *Mohr-Coulomb* pel tot-u és raonable pel tipus de material tractat. En el cas de les argiles i llims, un model *Soft Soil (tipus Cam-Clay)* hauria estat més correcte, però el programa no disposa d'aquest model.

3.3 Càlcul del Factor de Seguretat. Mètodes de Bishop Simplificat i Janbu Simplificat

L'*Slide 5.0* obté els resultats del càlcul del factor de seguretat utilitzant els mètodes de *Bishop Simplificat* i *Janbu Simplificat*. Ambdós mètodes pertanyen al grup de mètodes generals d'equilibri límit i concretament als "Mètodes de les Llesques". En aquests mètodes, la massa lliscant es divideix en llesques verticals que es consideren com a sòlids rígids o blocs i per tant cadascuna ha de satisfer les condicions d'equilibri.

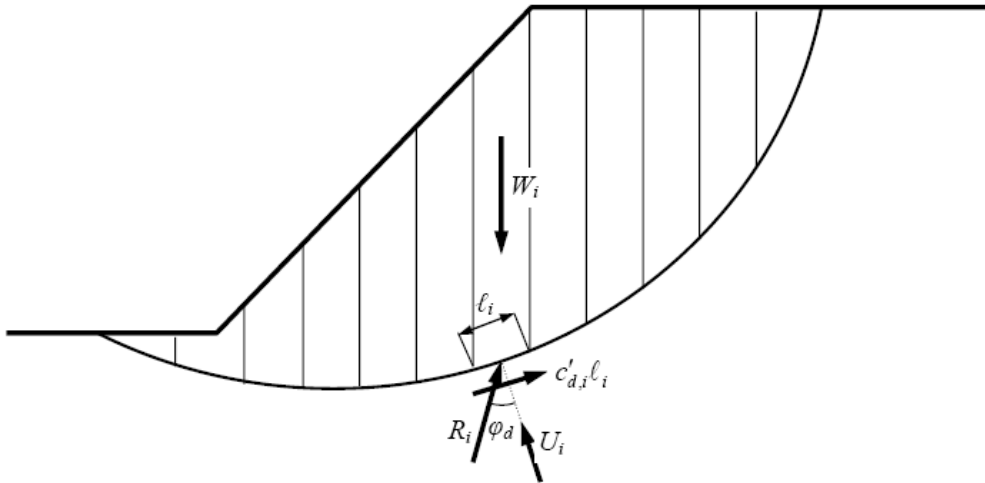


Figura 3. Divisió d'un lliscament en llesques amb l'objectiu d'aplicar el mètode d'equilibri límit. (Alonso, 2005)

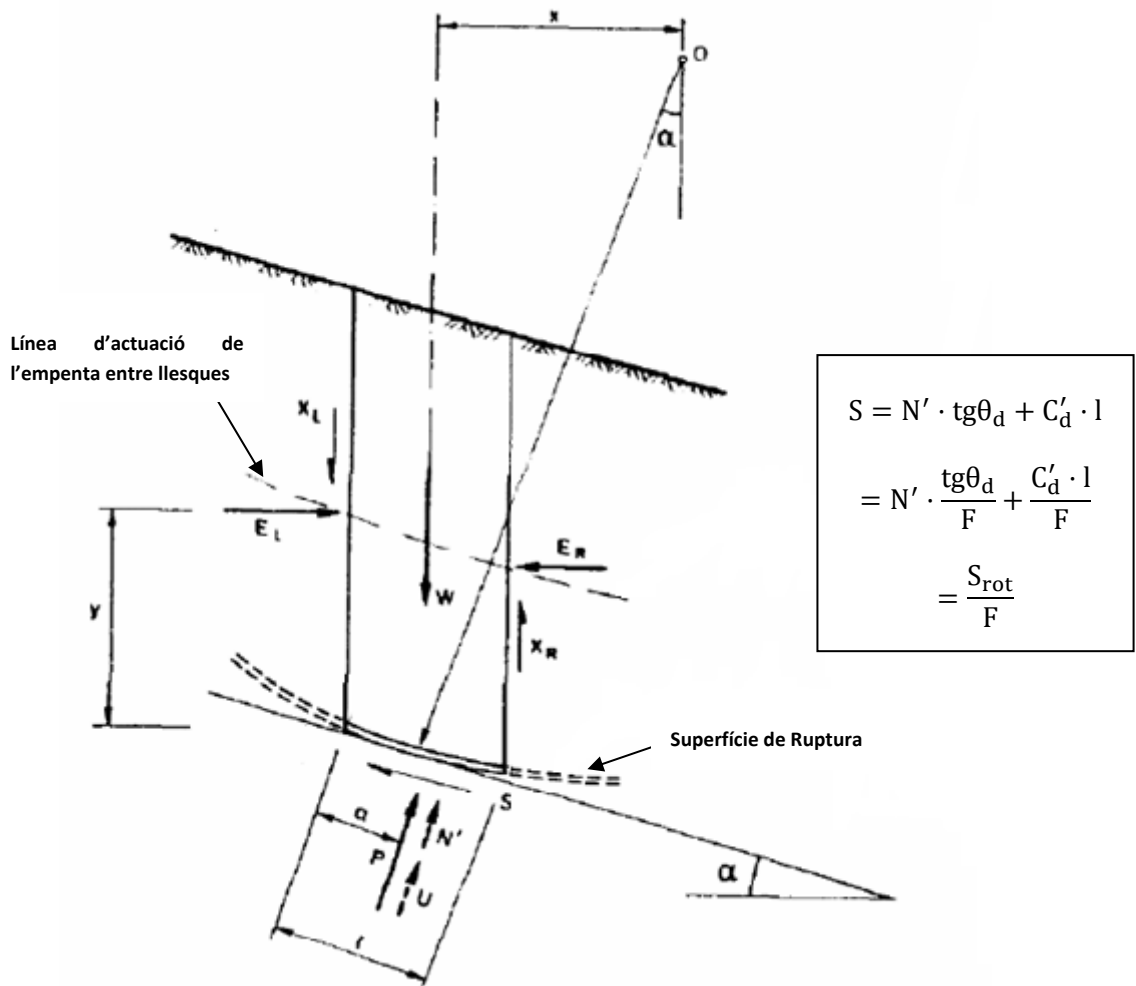


Figura 4. Forces sobre una llesca (E_R, X_R són forces en el costat dret de la llesca i E_L, X_L en el costat esquerre. (Alonso, 2005)

3.3.1 Mètode de *Bishop Simplificat*

El mètode de *Bishop Simplificat* (1955) és aplicable només per superfícies circulars de ruptura. Aquest mètode, a diferència del *Bishop Rigorós*, considera com a zero l' ΔX , diferència de les forces verticals del costat esquerre i dret de la llesca. Tot i ser una hipòtesi, els resultats que dona difereixen en 1% respecte el mètode rigorós. La simplicitat calculística del mètode fa que sigui un dels mètodes més utilitzats a la practica enginyeril.

El punt de partida pel càlcul del factor de seguretat és:

$$F = \frac{\text{Forces disponibles}}{\text{Forces necessàries per l'equilibri}}$$

- Aplicació d'equilibri global de moments

$$\sum S \cdot r = \sum W \cdot x = \sum W \cdot r \cdot \text{sen}\alpha' \quad (3.3)$$

- L'esforç de tall mobilitzat a la base, S , està relacionat amb el factor de seguretat per mitjà

$$S = \frac{c' \cdot l + N' \cdot \tan\theta'}{F} \quad (3.4)$$

- Si substituïm l'equació (3.4) en la (3.3) considerant llesques d'igual gruix, s'obté

$$F = \frac{\sum(c' \cdot l + N' \cdot \tan\theta')}{\sum W \cdot \text{sen}\alpha} \quad (3.5)$$

- N' és desconeguda. El valor va ser obtingut per *Bishop* aplicant la condició d'equilibri vertical de forces a cada llesca. En aquest moment és on es diferencien els mètodes de *Bishop Simplificat* i *Rigorós*. El primer considera l' ΔX igual a zero, en canvi el segon considera unes hipòtesis per la estimació d'aquest valor. Considerant *Bishop Simplificat*,

$$W = S \cdot \text{sen}\alpha + N' \cdot \text{cos}\alpha + U \cdot \text{cos}\alpha \quad (3.6)$$

- Substituint S pel seu valor en (3.4) i aïllant N' s'obté

$$N' = \frac{W - \left[\frac{c' \cdot l \cdot \text{sen}\alpha}{F} + U \cdot \text{cos}\alpha \right]}{\text{cos}\alpha + \frac{\tan\theta' \cdot \text{sen}\alpha}{F}} \quad (3.7)$$

- Finalment el Factor de Seguretat (3.5) queda de la forma

$$F = \frac{\sum[c' \cdot x + (W - U \cdot \text{cos}\alpha) \cdot \tan\theta'] \cdot M(\alpha)}{\sum W \cdot \text{sen}\alpha} \quad (3.8)$$

amb

$$M(\alpha) = \frac{1}{\cos\alpha \cdot \left[1 + \frac{\tan\alpha \cdot \tan\theta'}{F}\right]} \quad (3.9)$$

S'arriba a la solució partint d'un F hipotètic, habitualment si el talús es manté estable es considera equilibri límit ($F=1$) i es va iterant fins que el mètode convergeixi.

Una de les limitacions d'aquest mètode és que no assegura l'equilibri de forces horitzontals.

3.3.2 Mètode de Janbu Simplificat

Janbu Simplificat (1957) és un mètode d'anàlisi de lliscament de superfícies no circulars, que són habituals que es produeixin en capes de materials tous i heterogenis. Mentre que les superfícies de lliscament circular es poden mobilitzar sense distorsió interna, les no-circulars han de considerar les tensions de tall internes. En cas contrari, s'obtenen factors de seguretat ficticis menors a la realitat.

El punt de partida és:

$$F = \frac{\text{Forces disponibles}}{\text{Forces necessàries per l'equilibri}}$$

1. Aplicació d'equilibri global de moments

$$F = \frac{\sum s \cdot l}{\cos\alpha \cdot \sum W \cdot \tan\alpha} \quad (3.10)$$

2. Per tenir en compte les forces internes entre llesques s'utilitza un factor quasi-empíric de correcció f_0 definit per *Janbu*. Aquest factor és >1 i varia entre 1 i 1.13.

$$F = f_0 \cdot \frac{\sum s \cdot l}{\cos\alpha \cdot \sum W \cdot \tan\alpha} \quad (3.11)$$

3. Considerant llesques d'igual gruix

$$F = f_0 \cdot \frac{\sum [c' + (W - U) \cdot \tan\theta'] / n(\alpha)}{\sum W \cdot \tan\alpha} \quad (3.12)$$

amb

$$n(\alpha) = \cos^2\alpha \cdot \left(1 + \tan\alpha \cdot \frac{\tan\theta'}{F}\right) \quad (3.13)$$

3.4 Resultats obtinguts

Per tal de definir la superfície de ruptura crítica, l'*Slide 5.0* permet crear una graella on es situaran els centres de les superfícies de lliscament. Això implica que totes les superfícies obtingudes són circulars. El nivell freàtic de l'aigua s'ha situat a 8.25 m d'alçada respecte la base del talús.

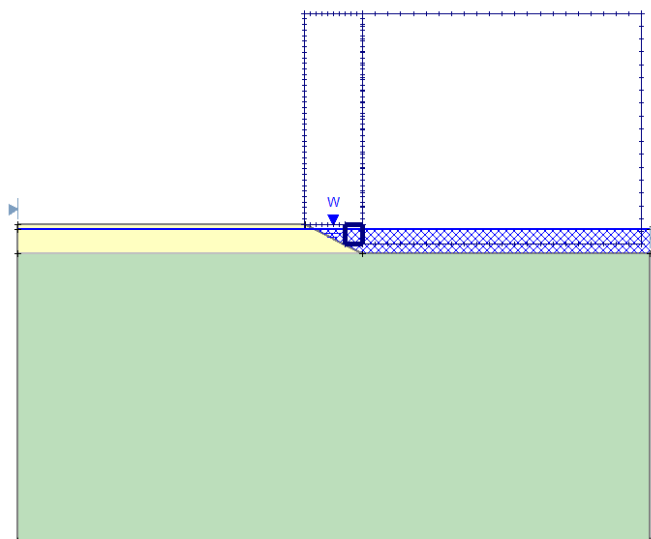


Figura 5. Moll estudiat a *Slide 5.0* i graella on es situen els centres de les superfícies de lliscament a analitzar.

A continuació s'exposen els resultats obtinguts de l'aplicació del mètode de la ROM0.5-05 utilitzant els factors de seguretat calculats amb el mètode de *Bishop Simplificat* i *Janbu Simplificat*.

Primerament es mostren dues figures amb les superfícies de lliscament corresponents a factors de seguretat menors a 2 per cadascun dels mètodes. La superfície que mostra el factor de seguretat és la que s'ha utilitzat per l'aplicació del mètode.

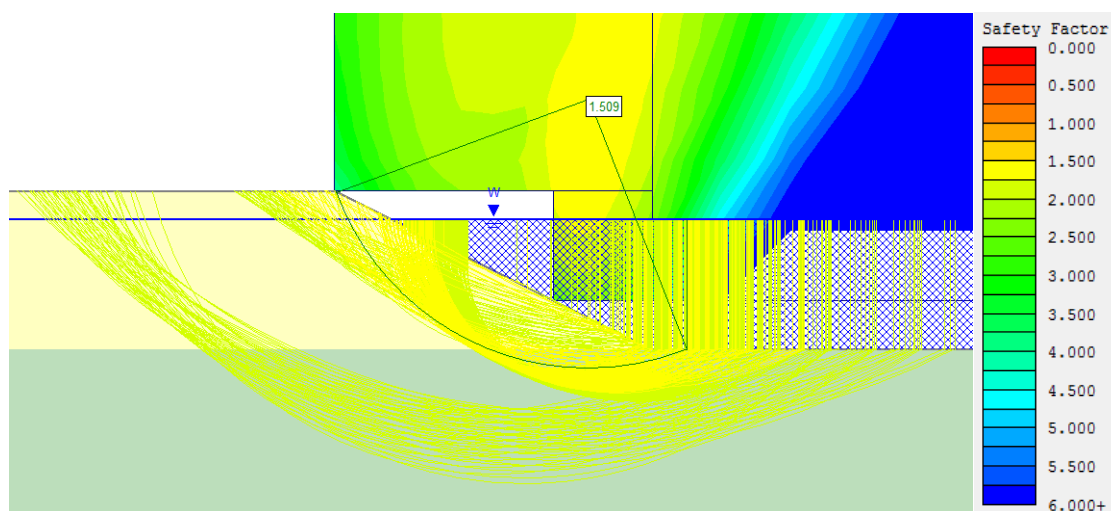


Figura 6. Superfícies de lliscament amb factors de seguretat menors a 2 obtingudes per *Bishop*. El factor de seguretat de la superfície analitzada és d'1.51.

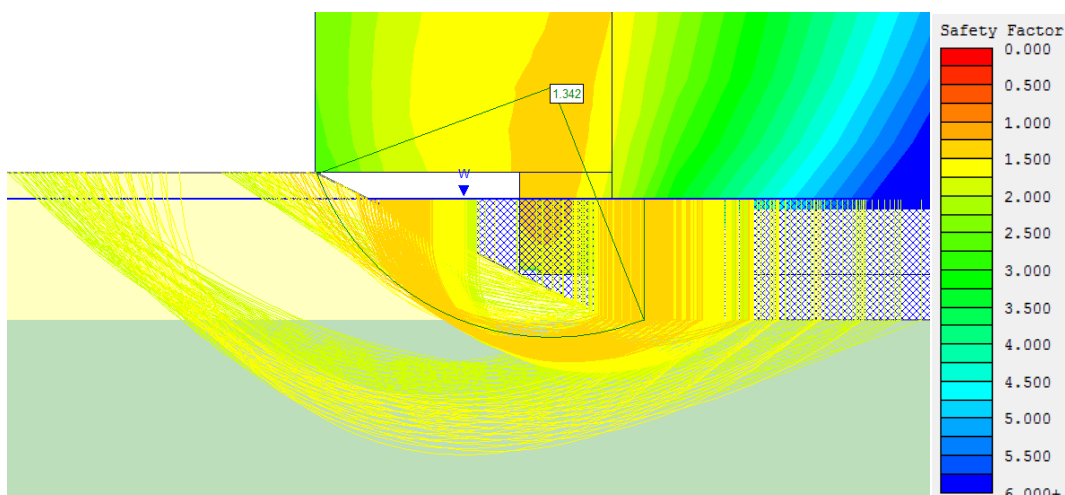


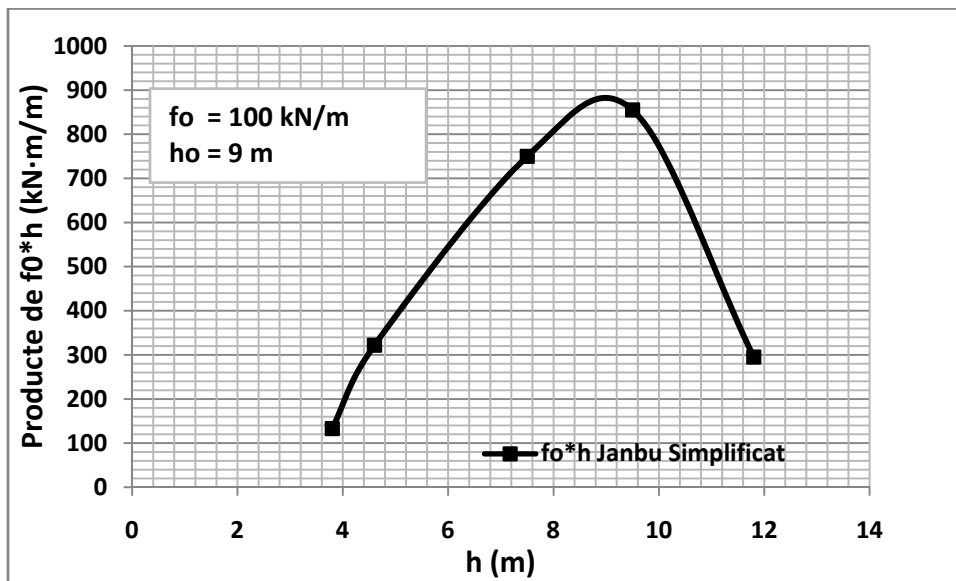
Figura 7. Superfícies de lliscament amb factors de seguretat menors a 2 obtingudes per Janbu. El factor de seguretat de la superfície analitzada és d'1.34.

S'ha considerat un distància a la primera fila de pilots (veure apartat b de la figura 1) de 5 m. A continuació es mostra la taula i gràfiques amb els resultats obtinguts. Les gràfiques de l'evolució del factor de seguretat versus la càrrega aplicada per cada **h**, es mostren a l'**Annex 1. Gràfiques**.

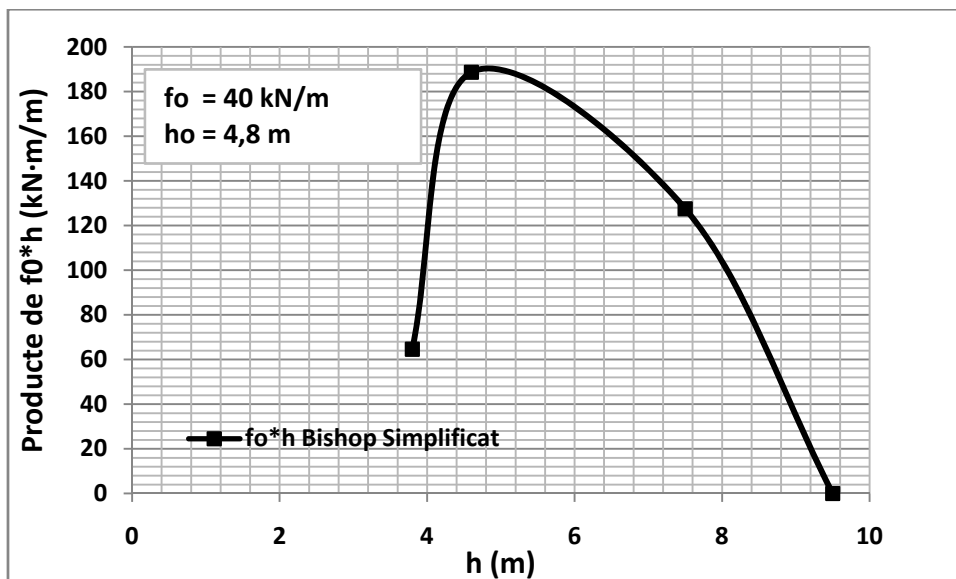
FS obtinguts amb Bishop Simplificat i Janbu Simplificat per cadascuna de les profunditats analitzades										
f (kN/m)	h=3.7 m		h=4.6 m		h=7.5 m		h=9.5 m		h=11.8 m	
	B. S.	J. S.	B. S.	J. S.	B. S.	J. S.	B. S.	J. S.	B. S.	J. S.
0	1.60	1.47	1.51	1.34	1.66	1.35	1.91	1.43	-	1.64
20	1.73	1.59	1.59	1.43	1.73	1.41	1.98	1.49	-	1.69
40	1.87	1.74	1.69	1.53	1.8	1.48	2.00	1.54	-	1.73
60			1.80	1.65	1.88	1.55	2.13	1.6		
80			1.93	1.78	1.96	1.63	2.20	1.66		
100					2.06	1.714	2.29	1.73		
120										

Taula 3. Factors de seguretat obtinguts en funció de la f, el mètode de càlcul i la profunditat. Per una profunditat de 11.8 m no es mostren els factors de seguretat ja que són més grans d'1.7 des del inici (les gràfiques corresponents a aquesta taula s'adjunten a l'Annex 1. Gràfiques)

Observant la taula anterior i les gràfiques de l'evolució del factor de seguretat versus la càrrega aplicada es dedueix clarament que el mètode més conservador és el de *Janbu*. Aquest fet es deu a que l'ordenada en l'origen, és a dir, el talús en estat natural sense càrregues internes estabilitzadores aplicades té un factor de seguretat major amb *Bishop* que amb *Janbu* en tots els casos estudiats. Una altra observació és el fet que a mesura que la profunditat de la superfície de lliscament augmenta aquesta diferència es fa cada vegada major. Respecte a la velocitat d'augment del FS d'un i altre mètode es comprova a partir de les pendents de les rectes de regressió lineal, que és molt semblant. (Veure **Annex 1. Gràfiques**)



Gràfica 1. Profunditat (h) en funció del producte de $f_0 \cdot h$ amb les forces obtingudes amb Janbu Simplificat. El màxim de la corba defineix la h_0 i la f_0 de la superfície de lliscament crítica.



Gràfica 2. Profunditat (h) en funció del producte de $f_0 \cdot h$ amb les forces obtingudes amb Bishop Simplificat. El màxim de la corba defineix la h_0 i la f_0 de la superfície de lliscament crítica.

Una vegada s'han obtingut les f_0 i les h_0 pels dos casos d'estudi s'ha de comprovar que realment els valors obtinguts proporcionen un factor de seguretat d'1.7. La superfície crítica en ambdós casos serà la mateixa que la utilitzada per iniciar al mètode, la de mínim factor de seguretat, però amb la profunditat crítica pertanyent a cadascun.

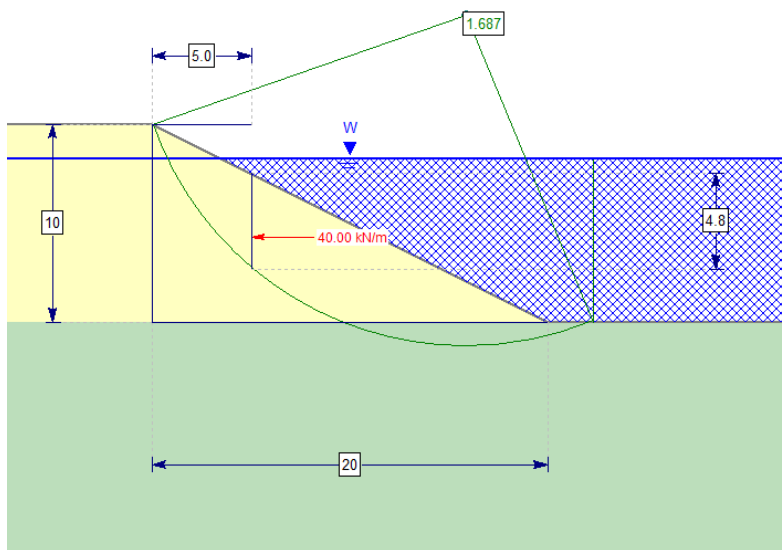


Figura 8. Superfície crítica obtinguda utilitzant Bishop Simplificat amb un factor de seguretat d'1.69.

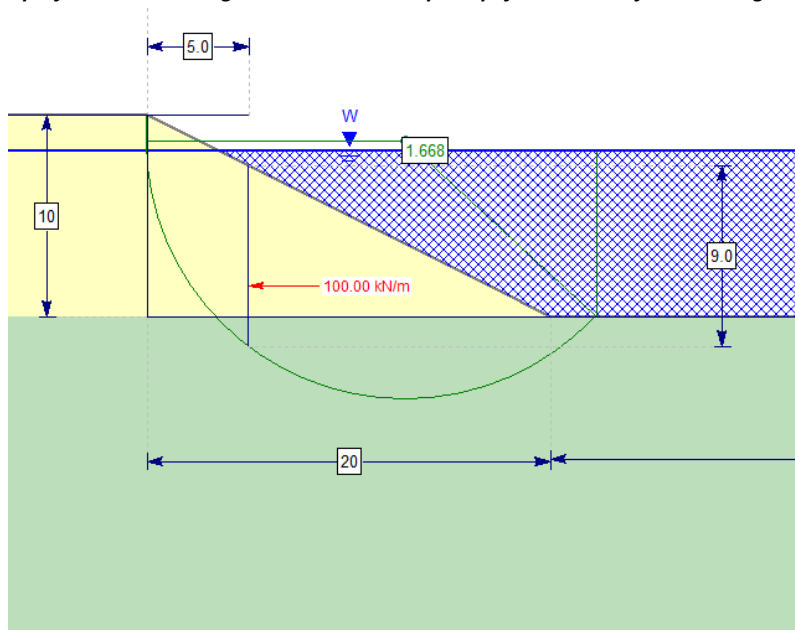


Figura 9. Superfície crítica obtinguda utilitzant Janbu Simplificat amb un factor de seguretat d'1.67.

A les figures vuit i nou s'ha observat com el factor de seguretat obtingut utilitzant els valors de h_0 i de f_0 no és exactament 1.7, en cap dels dos casos. Tot i això s'aproxima i per tant es pot considerar que el procediment s'ha realitzat de forma correcta.

El següent pas al mètode, és establir la distribució proporcional d'empentes que haurien de suportar els pilots. En aquest cas, com estem treballant en dos dimensions, es considera un ample de ganivet igual a un metre i això implica que les f_0 obtingudes en ambdós casos seran les empentes totals que hauran de suportar els pilots.

Per tant, considerant el següent:

- Tres files de pilots amb una separació de cinc metres.
- Un pilot per ganivet.
- Equació (3.2) del mètode de la ROM0.5-05.

Obtenim

Bishop Simplificat: $E_1 = 22.86 \text{ kN}$; $E_2 = 11.43 \text{ kN}$; $E_3 = 5.71 \text{ kN}$;

Janbu Simplificat: $E_1 = 57.14 \text{ kN}$; $E_2 = 28.57 \text{ kN}$; $E_3 = 14.29 \text{ kN}$;

En aquest moment el mètode de la ROM0.5-05 hauria finalitzat. Tot i això, a continuació es farà una nova comprovació per tal de satisfer que la distribució d'empentes aplicada, també compleix que el factor de seguretat obtingut és d'1.7 o pròxim (1.73 i 1.67 respectivament). Les forces aplicades es situaran a dos terços de la profunditat soterrada corresponent a les tres fileres de pilots i de forma linealment creixent amb la profunditat.

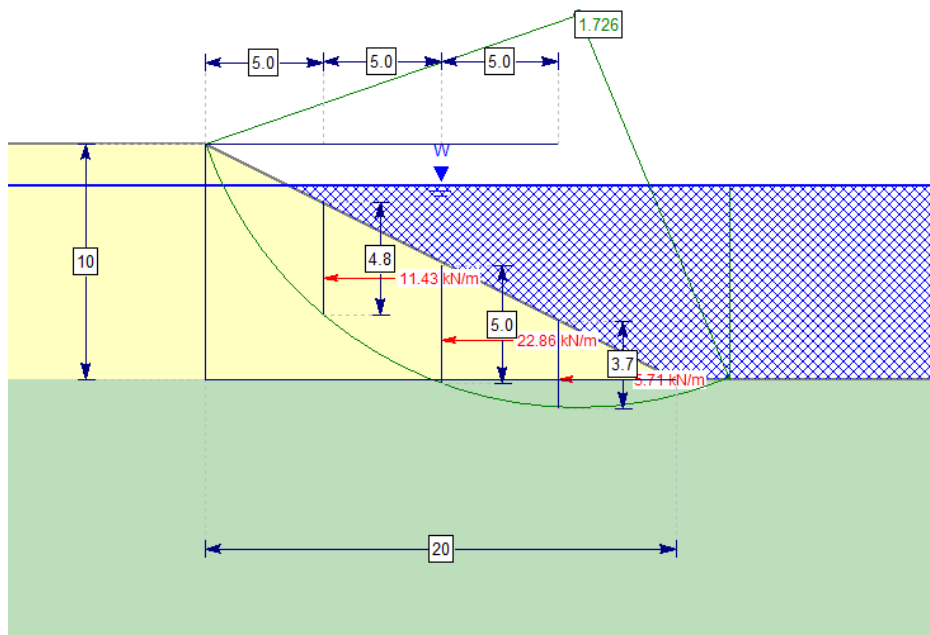


Figura 10. Distribució de tensions aplicada amb Bishop Simplificat. S'observa com l'empenta sobre cada pilot ha estat repartida de manera linealment creixent amb la profunditat. Amb aquesta distribució de tensions s'obté un factor de seguretat d'1.73.

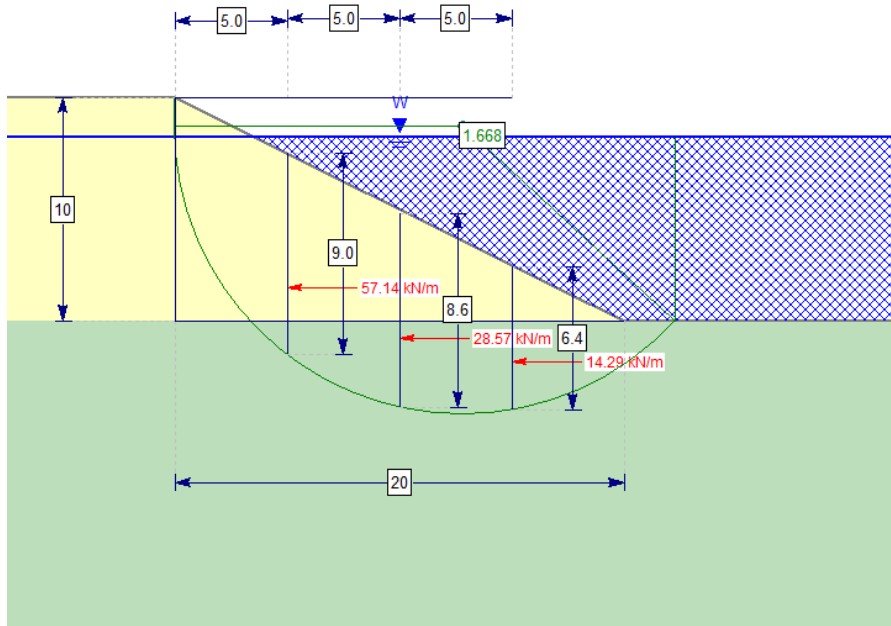


Figura 11. Distribució de tensions aplicada amb Janbu Simplificat. S'observa com l'empenta sobre cada pilot ha estat repartida de manera linealment creixent amb la profunditat. Amb aquesta distribució de tensions s'obté un factor de seguretat d'1.67.

S'ha comprovat que la distribució d'empentes proposada al mètode és coherent i per tant que els pilots dimensionats per un factor de seguretat d'1.7, haurien de suportar les empentes obtingudes.

3.5 Conclusions i discussió de resultats

El mètode de la ROM0.5-05 és un mètode que serveix com a primera aproximació de les empentes que actuen sobre pilots en molls ja que en fases avançades de projecte, no és adequat el seu ús pel següent motiu.

- S'ha d'imposar una superfície de ruptura amb la qual s'aplicarà el mètode. L'elecció d'aquesta superfície no és trivial i si no existeixen trencades anteriors en talussos amb materials i geometria similars no es pot saber quina superfície de lliscament es produirà. L'experiència de l'enginyer o geòleg encarregat de dur a terme el càlcul d'estabilitat serà important en aquest procediment. En aquest anàlisi s'ha estudiat la superfície amb menor factor de seguretat, que en aquest cas, era la mateixa tant per *Bishop* com per *Janbu*. Aquest fet no té perquè succeir, ja que les superfícies de lliscament crítiques obtingudes per diferents mètodes de càlcul, habitualment no són iguals.

Tot i això, s'ha demostrat que la distribució d'empentes trobada compleix que el factor de seguretat obtingut per a la superfície crítica, considerada aquesta la que maximitza el producte de $f_0 * h_0$, és molt proper al 1.7 desitjat.

4. Anàlisi d'estabilitat amb Plaxis 8.2. Utilització de forces internes com a mesura estabilitzadora

Una de les limitacions comentades respecte el mètode de la ROM0.5-05 era la necessitat d'imposar una superfície de lliscament. Amb l'ús de *Plaxis 8.2* la filosofia canvia completament ja que no s'ha d'imposar la superfície. El propi programa calcula la superfície de lliscament crítica que anirà variant en funció de l'estat de càrregues que s'apliqui. Per tant, l'augment infinit de la càrrega horitzontal interna teòricament possible que es podia realitzar a l'*Slide 5.0*, amb el conseqüent augment del factor de seguretat, ja no es produirà.

En aquest apartat s'intentarà estudiar l'estabilitat del moll per mitjà del càlcul del factor de seguretat i comparar el resultat amb els obtinguts aplicant el mètode de la ROM0.5-05. Primerament es determinarà quin dels factors de seguretat amb càrrega horitzontal interna igual a zero, obtinguts amb els mètodes de càlcul d'estabilitat d'*Slide 5.0*, s'aproxima més al factor de seguretat obtingut al *Plaxis 8.2* utilitzant l'opció *phi-c reduction*. Una vegada determinat el mètode que més s'aproxima, s'aplicarà la càrrega horitzontal interna que ha determinat un factor de seguretat d'1.7 i es valorarà el factor de seguretat obtingut. Finalment, s'aplicarà la distribució d'empentes establerta pel mètode i es tornarà a valorar el factor de seguretat.

4.1 Característiques de la modelització

En aquest apartat es descriuen totes les consideracions, els elements i/o valors utilitzats en el model així com les fases de càlcul realitzades per cadascun dels casos estudiats.

4.1.1 Elements finits utilitzats

El model utilitzat ha estat el de deformació plana ja que és el que s'utilitza quan la secció i la distribució de tensions associada és mantenen pràcticament uniformes al llarg de tota la longitud z . Per tant, aquest model considera que els desplaçaments i les deformacions associades a aquesta direcció són zero. Tot i això, el model té en compte les tensions normals a aquesta direcció.

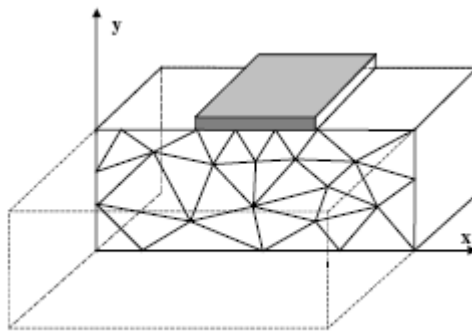


Figura 12. Exemple d'un model de deformació plana. (Brinkgreve, 2002).

La malla d'elements finits utilitzada està formada per elements de tipus *soil*, que són elements triangulars bidimensionals que modelitzen la zona d'estudi. La tipologia d'elements tipus *soil* escollida ha estat la de 15 nodes, ja que permet obtenir molt bons resultats en problemes

complexos. A cadascun dels elements triangulars de la malla se l'ha d'assignar un model constitutiu del material amb els paràmetres que el defineixen. En aquest anàlisi s'han utilitzat dos models constitutius.

- Model de *Mohr Coulomb*, es tracta d'un model elasto-plàstic sense enduriment i amb elasticitat lineal que s'utilitza com a primera aproximació al comportament de sòls en general. Els paràmetres que el defineixen són: el mòdul de Young, E , el coeficient de *Poisson*, ν , la cohesió, c , l'angle de fricció, ϕ i l'angle de dilatància, ψ .
- Model de *Soft Soil*, es tracta d'un model elasto-plàstic d'enduriment volumètric i d'elasticitat logarítmica com en el cas *Cam-Clay Modificat*. És a dir, existeix una relació logarítmica entre la deformació volumètrica i la tensió efectiva mitja.

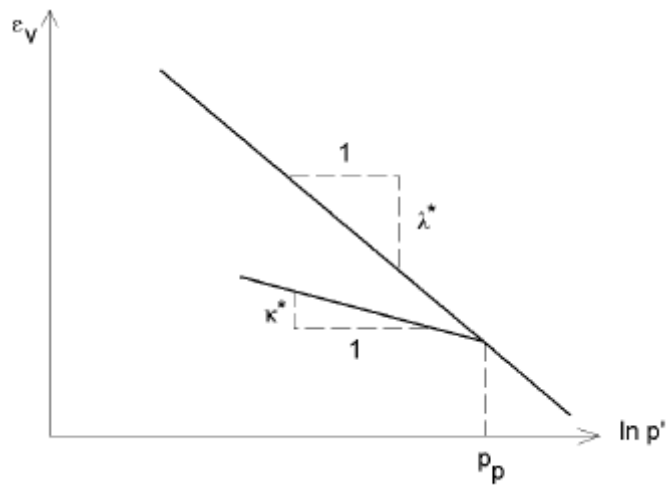


Figura 13. Relació logarítmica entre la deformació volumètrica i la tensió efectiva mitja . (Brinkgreve, 2002).

Els paràmetres que el defineixen són: el mòdul de Young, E , el coeficient de *Poisson*, ν , la cohesió, c , l'angle de fricció, ϕ , l'angle de dilatància, ψ , la pendent de la recta de càrrega, λ^* i la pendent de la recta de descàrrega-recàrrega, κ^* .

4.1.2 Condicions de contorn aplicades

Les condicions de contorn aplicades són de tipus mecànic.

- Desplaçaments horitzontals nuls en els contorns verticals del problema ($u_x=0$).
- Desplaçaments horitzontals i verticals nuls a la base del problema ($u_x=0$ i $u_y=0$).

4.1.3 Condicions inicials

S'ha considerat que el nivell freàtic es troba a 8.25 m d'alçada respecte la base del talús. La distribució de tensions s'ha calculat considerant el coeficient d'empentes al repòs determinat per cada material en funció dels paràmetres geotècnics d'aquest. Per defecte, el programa calcula el K_0 utilitzant la fórmula de *Jáky* (1948).

$$K_0^{NC} = 1 - \text{sen}\phi' \quad (4.1)$$

4.1.4 Models constitutius i paràmetres del sòl

A la taula següent es mostren els paràmetres dels dos materials i els models constitutius utilitzats pel càlcul d'estabilitat.

Identificació	Model	Tipus	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E_{ref} [kN/m ²]	ν
Tot-u (moll)	Mohr-Coulomb	Drenat	20	22	$2.5 \cdot 10^4$	0.3
Argiles i Llims (substrat)	Soft Soil	No drenat	16.5	18.5	---	---

Taula 4. Models constitutius i paràmetres dels materials que intervenen en el càlcul.

Identificació	c [kN/m ²]	θ °	ψ [°]	λ^*	κ^*	K_x [m/s]	K_y [m/s]	K_0	R_{inter}
Tot -u (moll)	0,1	38	0	---	---	10^{-3}	10^{-3}	0.384	0.67
Argiles i Llims (substrat)	1	20	0	0.05	0.01	10^{-7}	10^{-8}	0.658	0.67

Taula 5. Paràmetres dels materials que intervenen en el càlcul.

4.1.5 Fases de càlcul implementades

Per l'anàlisi d'estabilitat del moll s'han realitzat dos fases de càlcul.

- *Staged of construction* és la fase que correspon al càlcul dels inputs de càrrega. Aquesta fase permet la simulació de processos diversos de càrrega, excavació i construcció. Aquest anàlisi pot ser executat amb un càlcul plàstic o un càlcul per consolidació.

S'han considerat quatre *staged of construction* per poder simular l'execució del moll per tongades horitzontals de 2,5 m d'alçada de tot-u. S'ha realitzat un càlcul plàstic ignorant el comportament no drenat. D'aquesta forma el factor de seguretat que es calcularà amb el mètode *phi - c reduction*, que s'explica tot seguit, serà un factor de seguretat a llarg termini, un cop s'hagin dissipat les pressions intersticials.

- *Phi - c reduction* és la fase que permet el càlcul de factors de seguretat. En aquesta fase els paràmetres resistents del sòl, $\tan\theta$ i c , es van reduint fins que es produeix el col·lapse. Les estructures presents en el problema analitzat no estan influenciades per aquest anàlisi. Aquest cal s'ha de realitzar en condicions drenades, per a què els resultats puguin ser interpretats correctament.

El càlcul del factor de seguretat es realitza de la forma següent.

$$\begin{aligned}
 FS &= \frac{\text{forces disponibles}}{\text{forces necessàries per la ruptura}} = \frac{c_{\text{input}}}{c_{\text{reduïda}}} = \frac{\tan\theta_{\text{input}}}{\tan\theta_{\text{output}}} \\
 &= \text{valor} \sum \text{MSF en ruptura} \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

4.2 Anàlisi i resultats obtinguts

En els tres casos que es presenten a continuació s'ha calculat el factor de seguretat amb el mètode *phi-c reduction* i la superfície crítica es mostra per mitjà del % de l'increment de deformació de tall. Els casos analitzats són.

- 1) Càlcul del factor de seguretat sense forces horitzontals internes. Comparació amb els factors de seguretat obtinguts amb el mètode de la ROM0.5-05 en el mateix cas.
- 2) Càlcul del factor de seguretat amb la força horitzontal interna. La força horitzontal interna és l'obtinguda amb el mètode de la ROM0.5-05 que presenta el factor de seguretat més pròxim a l'obtingut amb *Plaxis* en el cas 1.
- 3) Càlcul del factor de seguretat amb la distribució de forces proposada per la ROM0.5-05. Aquesta distribució de forces correspon a la força horitzontal interna considerada en el cas 2.

4.2.1 Anàlisi del moll sense càrrega horitzontal interna

A continuació es mostra la superfície de trencament obtinguda i el seu factor de seguretat.

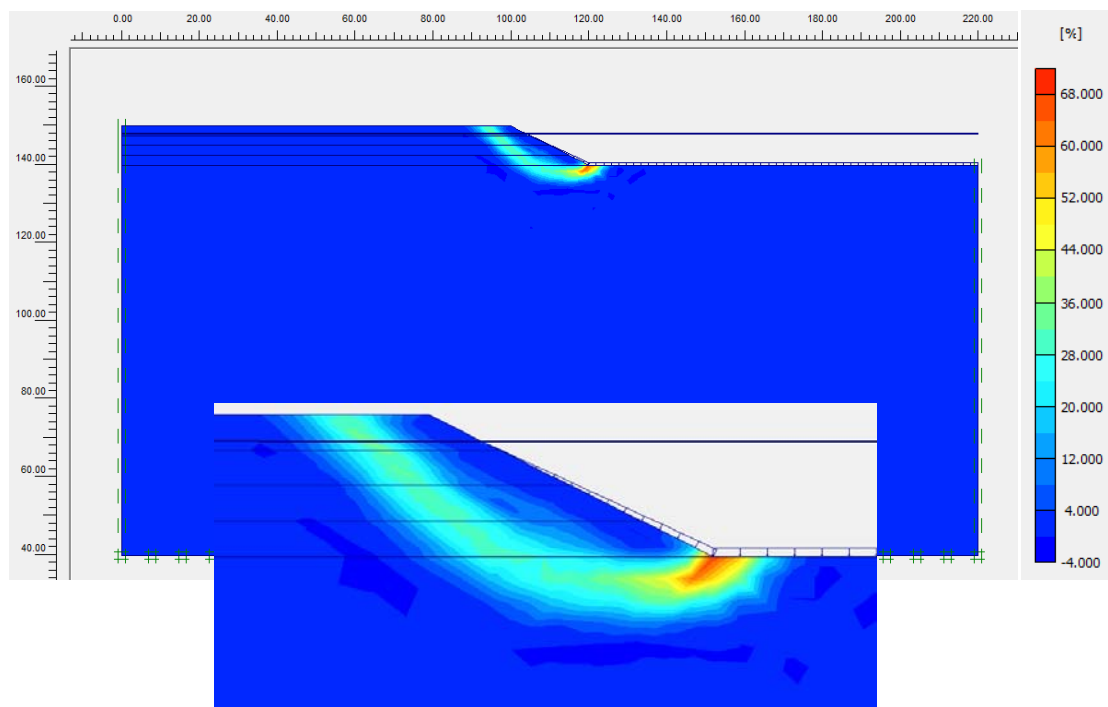


Figura 14. Superfície de trencament obtinguda amb l'aplicació del mètode *phi-c reduction*. El factor de seguretat calculat és d'1.29.

Una primera observació interessant és la geometria de la superfície de lliscament. Com ja s'havia comentat amb anterioritat (apartat 3.1), una de les limitacions del mètode de la ROM0.5-05 era la necessitat d'haver d'imposar una superfície de lliscament. L'anàlisi, per tant, es va realitzar amb la superfície de lliscament amb menor factor de seguretat. Si comparem la superfície de trencament imposada a *Slide 5.0* i les obtingudes amb *Plaxis 8.2* s'observa que

presenten dues diferències clares. Mentre que la superfície de lliscament amb *Slide 5.0* tenia el seu límit superior justament en el punt on començava el talús, les superfícies de lliscament amb *Plaxis 8.2* s'estenen més i agafen una part de l'esplanada del moll. Aquest tipus de trencades amb forma d'espiral logarítmica són més habituals a la realitat.

El factor de seguretat obtingut amb el *Plaxis 8.2* és de 1.29 mentre que els factors de seguretat obtinguts sense càrregues externes en *Slide 5.0* eren, 1.50 amb *Bishop Simplificat* i 1.34 amb *Janbu Simplificat*.

Les diferències entre els factors de seguretat de *Plaxis 8.2* i *Slide 5.0* són degudes a tres causes.

- 1 - El càlcul del factor de seguretat amb *Slide 5.0* s'ha dut a terme per mitjà de mètodes analítics on en el càlcul només intervenen tensions, mentre que el càlcul amb *Plaxis 8.2* s'ha fet amb el mètode de *phi-c reduction*, que és un mètode molt més global que considera també les deformacions del terreny.
- 2 - La totalitat dels paràmetres necessaris per definir els models constitutius dels materials no és poden introduir a l'*Slide 5.0* així com tampoc contempla l'opció d'utilitzar un model de *Soft Soil* per materials tous.
- 3 - Les superfícies de lliscament analitzades no són iguals.

Aquests motius són els que fan que els factors de seguretat siguin diferents i també impliquen que els factors de seguretat calculats siguin teòricament més correctes amb *Plaxis 8.2* que amb *Slide 5.0*.

Tot i les diferències explicades entre els factors de seguretat, *Janbu Simplificat* presenta un factor de seguretat menor al de *Bishop Simplificat* i molt més pròxim al calculat amb *Plaxis*. Per tant, s'ha decidit utilitzar la força horitzontal interna obtinguda pel mètode de la ROM0.5-05 corresponent a *Janbu* per augmentar el factor de seguretat de la superfície de lliscament de *Plaxis*. Un altre motiu que justifica l'ús de *Janbu Simplificat* és la morfologia de la trencada. Com ja s'havia comentat amb anterioritat, *Bishop Simplificat* és un mètode que només és pot aplicar per superfícies de ruptura circulars i la superfície de lliscament de *Plaxis* presenta una morfologia d'espiral logarítmica. Les raons anteriors justifiquen que la força horitzontal interna que s'aplicarà, per tal d'augmentar el factor de seguretat, serà la que per *Janbu* determinava un factor de seguretat d'1.7. Com que el factor de seguretat amb *Plaxis* és menor, és raonable pensar que el fet d'aplicar la força horitzontal interna no comporti un factor de seguretat d'1.7. A més, com les superfícies de lliscament en *Plaxis* varien en funció de la distribució de càrregues, no són fixes, el factor de seguretat en lloc d'augmentar pot disminuir o no variar.

4.2.2 Anàlisi del moll amb càrrega horitzontal interna

A continuació es mostren els resultats obtinguts per una càrrega horitzontal interna de 100 kN/m. Aquesta càrrega, de la mateixa manera que al mètode de la ROM0.5-05, es situarà a una profunditat de $2/3h$, sent h la profunditat soterrada de la primera filera de pilots, (distància de 5 metres des de l'inici del talús) des de la superfície del talús fins a la intersecció amb la línia

de lliscament. La profunditat de la línia de lliscament és de 10.5 metres i per tant la h és de 8 metres.

S'han aplicat les mateixes fases de càlcul que a l'apartat anterior però a l'últim *staged of construction* s'ha activat la càrrega horitzontal interna mencionada.

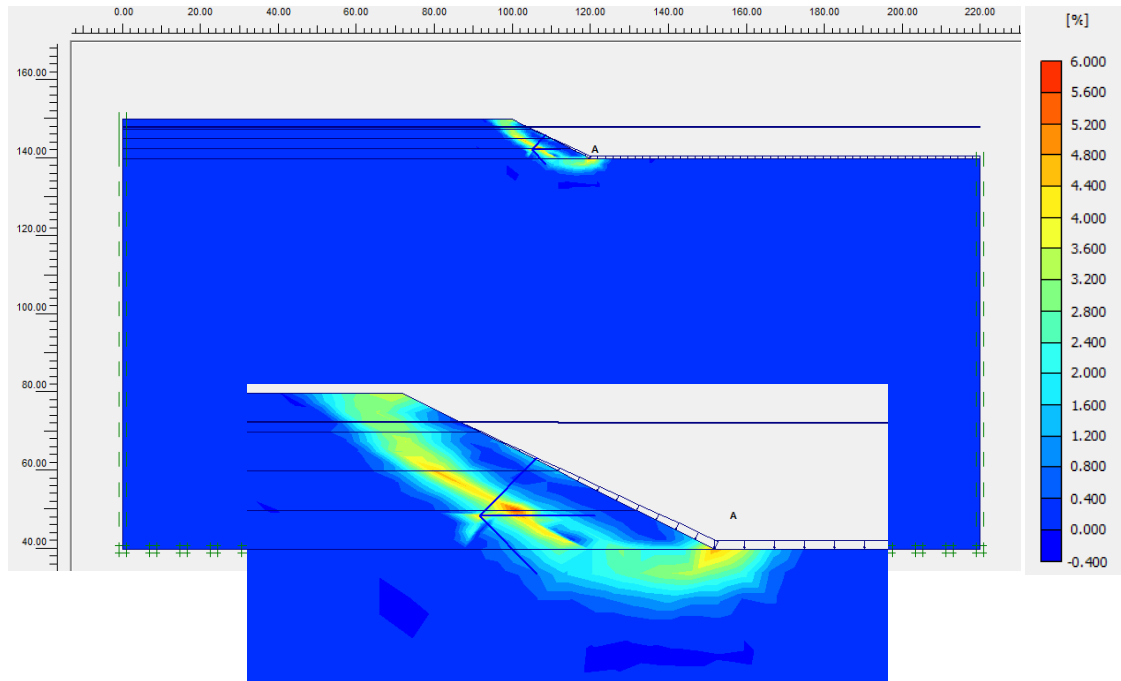


Figura 15. Superfície de trencament obtinguda amb l'aplicació del mètode ϕ -c reduction amb una càrrega interna horitzontal de 100 kN/m. El factor de seguretat calculat és d'1.29.

La superfície de lliscament obtinguda no és la mateixa, que l'obtinguda sense càrregues internes horitzontals, ja que l'estat de càrregues ha variat. Una de les diferències que s'observa és que la superfície de lliscament disminueix la seva longitud i profunditat.

Pel que fa al factor de seguretat, la càrrega horitzontal interna no ha provocat cap modificació en el seu valor. Per tal de comprovar si existeix relació entre la càrrega horitzontal interna aplicada i el factor de seguretat en *Plaxis*, es proposen tres estudis més. En el primer s'aplicarà un increment positiu de la càrrega interna de 100 kN/m, en el segon un de 200 kN/m i en el tercer un de 300 kN/m. Amb les noves càrregues internes es calcularà el factor de seguretat. D'aquesta manera es veurà si augmentant la càrrega en dos, en tres i en quatre vegades el seu valor, el factor de seguretat creix de forma proporcional. Si l'estat de càrregues tingués una influència notòria en el càlcul del factor de seguretat, el fet d'haver aplicat una càrrega de 100 kN/m hagués produït un increment en el factor de seguretat.

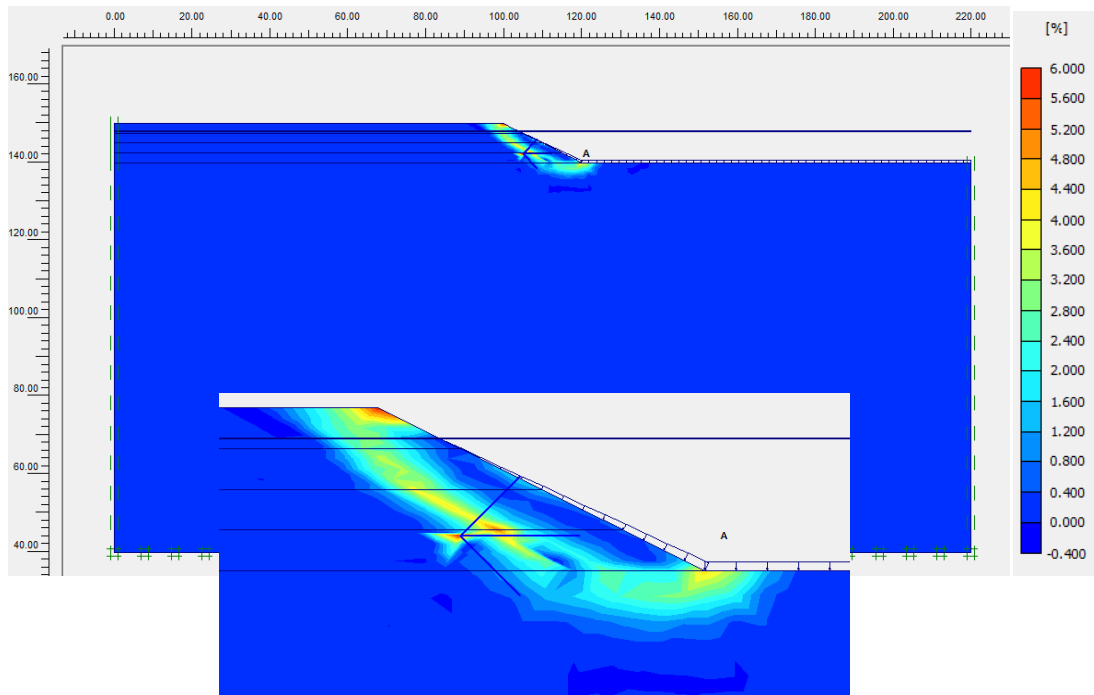


Figura 16. Superfície de trencament obtinguda amb l'aplicació del mètode phi-c reduction amb una càrrega interna horitzontal de 200 kN/m. El factor de seguretat calculat és d'1.285.

A la figura 16 s'observa com la superfície de lliscament no varia respecte l' obtinguda amb 100 kN/m. Pel que fa al factor de seguretat, aquest es manté pràcticament constant amb un augment de la càrrega.

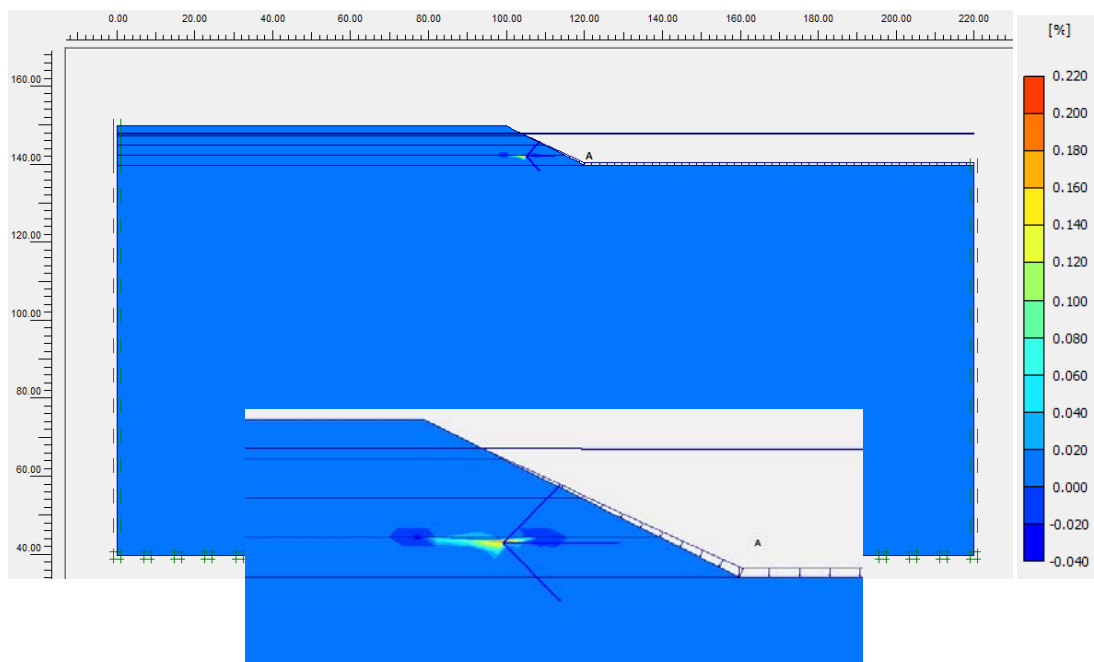


Figura 17. % d'increment de les deformacions de tall obtingudes amb l'aplicació del mètode phi-c reduction amb una càrrega interna horitzontal de 300 kN/m. El factor de seguretat calculat és d'1.25.

A la figura 17 s'observa com la superfície de lliscament ha desaparegut totalment per acció de la càrrega interna elevada que s'ha aplicat. L'aplicació d'una càrrega interna horitzontal elevada, provoca que el factor de seguretat calculat estigui associat a la trencada local produïda per la càrrega i localitzada al voltant d'aquesta i no a una possible ruptura per lliscament que pogués produir-se.

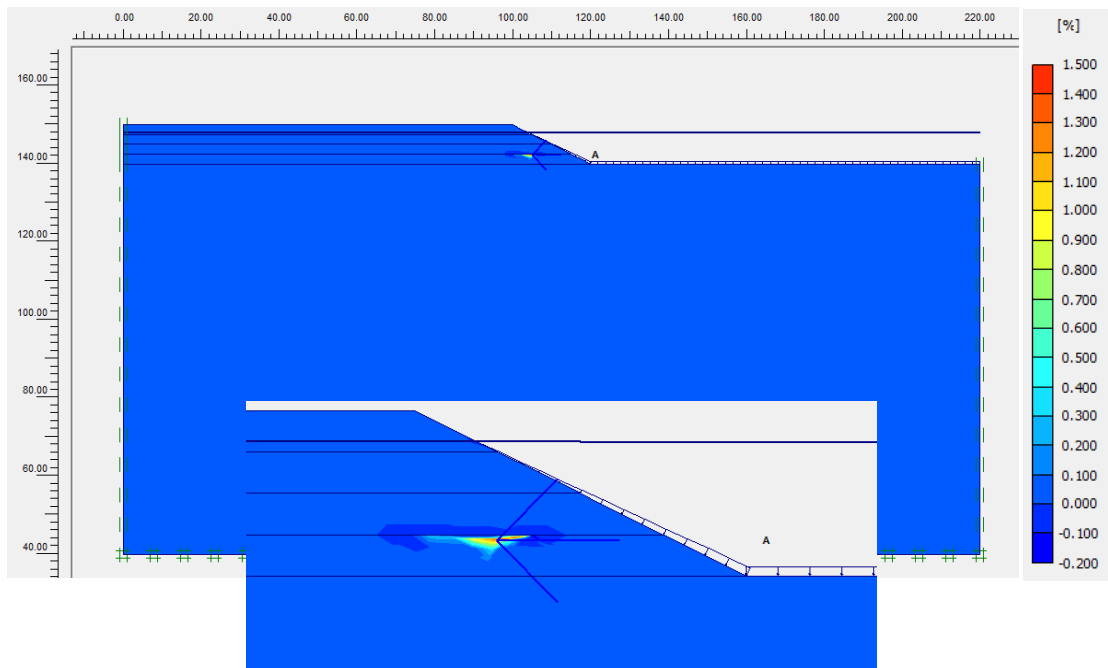
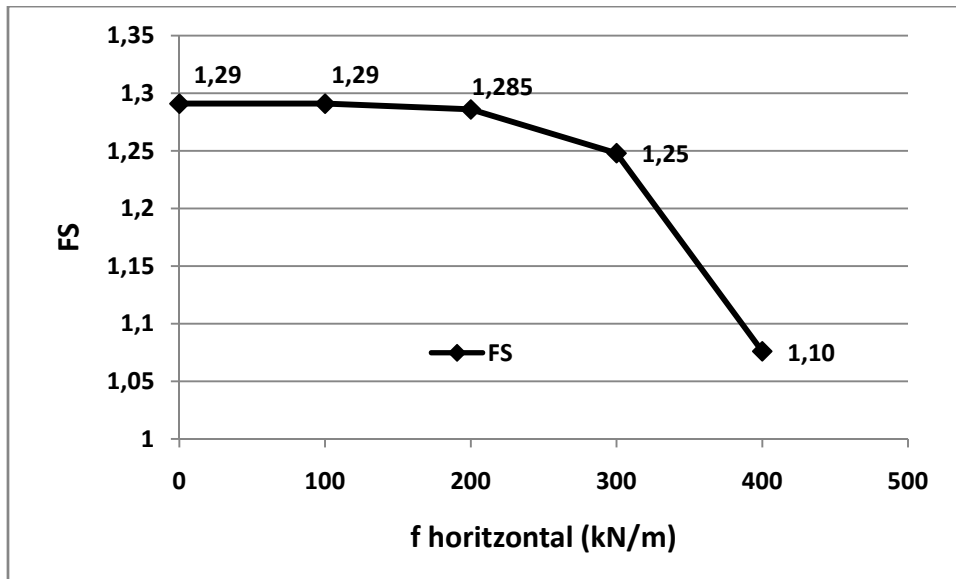


Figura 18. % d'increment de les deformacions de tall obtingudes amb l'aplicació del mètode phi-c reduction amb una càrrega interna horitzontal de 400 kN/m. El factor de seguretat calculat és d'1.1.

A la figura 18, com en el cas de la figura 17, s'observa com la superfície de lliscament ha desaparegut totalment.

Si s'analitzen els resultats s'observa que no és possible establir una relació directe entre els increments positius o negatius de càrrega amb increments positius o negatius proporcionals del factor de seguretat.

D'altra banda, d'aquest anàlisi es pot extreure la següent observació. Existeix una càrrega interna horitzontal màxima, per sobre de la qual el factor de seguretat en lloc d'augmentar disminueix. Això és degut a que la ruptura ja no es produeix únicament per lliscament d'una massa de material, sinó per ruptura local d'una zona al voltant del punt d'aplicació de la càrrega horitzontal interna i per tant el factor de seguretat calculat està associat a aquesta ruptura puntual localitzada i no a la superfície de lliscament.



Gràfica 3. Variació dels factors de seguretat a Plaxis versus la càrrega horitzontal aplicada.

En el següent apartat s'analitzarà el moll amb la mateixa càrrega interna horitzontal, 100 kN/m, però aplicant la distribució de forces que proposa el mètode de la ROM0.5-05 i que ja s'ha analitzat amb *Slide 5.0*. Amb aquesta distribució de forces es tornarà a calcular el factor de seguretat.

4.2.3 Anàlisi del moll amb la distribució de càrregues horitzontals internes.

La distribució de càrregues que s'aplicarà en l'anàlisi és la següent.

- $E_1 = 57.14 \text{ kN}$; $E_2 = 28.57 \text{ kN}$; $E_3 = 14.29 \text{ kN}$.

On cada càrrega s'aplicaria en una filera teòrica de pilots separats 5 metres entre ells des de l'inici del talús. Aquestes càrregues es distribuïran de forma proporcional a la profunditat soterrada del pilot, sent aquesta, la profunditat des del cap del talús fins a la intersecció amb la línia de lliscament i es situaran a 2/3 d'aquesta profunditat.

- La càrrega E_1 s'aplicarà en la primera filera de pilots i li correspon una h de 8 m.
- La càrrega E_2 s'aplicarà en la segona filera de pilots i li correspon una h de 7.5 m.
- La càrrega E_3 s'aplicarà en la tercera filera de pilots i li correspon una h de 5.5 m.

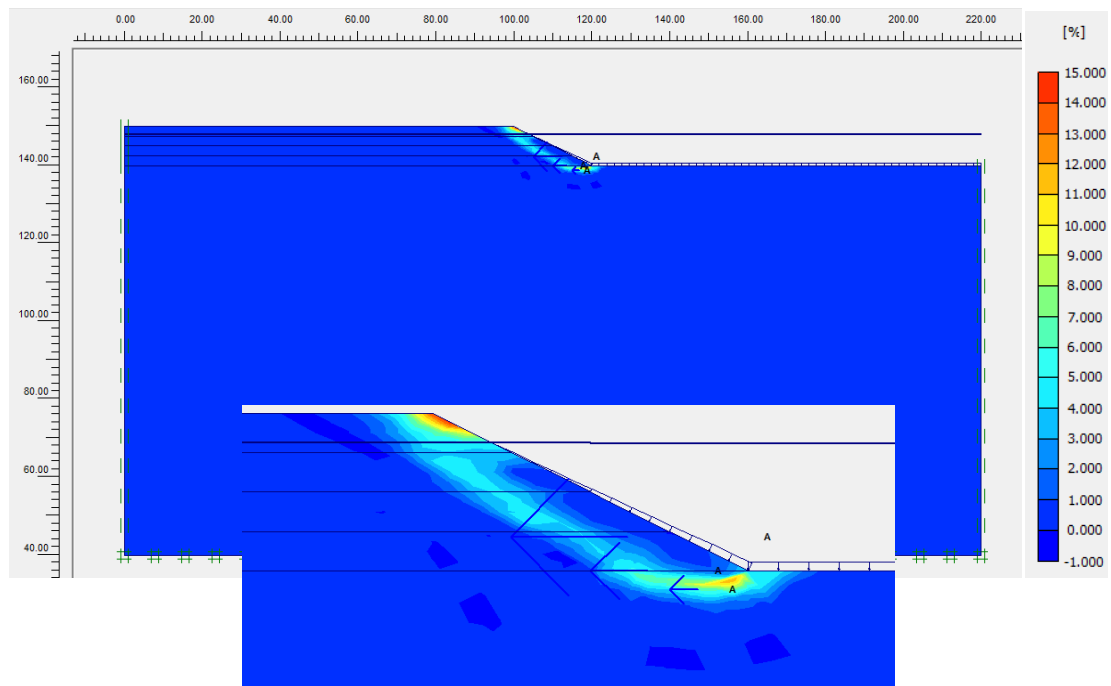


Figura 19. Superfície de trencament obtinguda amb l'aplicació del mètode phi-c reduction amb la distribució de càrregues indicada. El factor de seguretat calculat és d'1.30.

Respecte a la geometria de la superfície de lliscament, s'observa com aquesta recupera la morfologia original que tenia amb el moll original, però amb una disminució de la seva profunditat i longitud.

Amb la distribució de càrregues aplicada el factor de seguretat associat a la superfície de lliscament obtinguda és d'1.30. Aquest factor de seguretat és el major de tots els obtinguts en els casos d'estudi encara que l'augment respecte el factor de seguretat amb el moll natural o amb la càrrega de 100 kN/m és insignificant.

4.3 Conclusions i discussió de resultats.

Els resultats obtinguts amb *Plaxis 8.2* no han donat els valors de factors de seguretat que s'esperava.

El mètode de la ROM0.5-05, mitjançant l'ús del programa *Slide 5.0*, calculava un augment del factor de seguretat en funció d'un augment de la càrrega horitzontal interna. Posteriorment, continuant amb el procediment per estimar les empentes sobre pilots en molls, permetia obtenir una distribució d'empentes que teòricament eren les que els pilots haurien de suportar i per tant, considerant acció reacció, aquestes empentes serien les que els pilots aplicarien per estabilitzar la massa mobilitzada i obtenir un factor de seguretat d'1.7. I així ha succeït. Si ara s'aplica el mateix raonament amb *Plaxis 8.2*, el factor de seguretat hauria d'haver estat molt proper a 1.7 amb una càrrega igual a la que implicava aquest valor a *Slide 5.0*, els factors de seguretat haurien d'haver augmentat amb un augment de la càrrega interna i la distribució de càrregues aplicada també hauria d'haver suposat un factor de seguretat proper a 1.7. A diferència del que s'esperava, no s'ha pogut establir una relació proporcional entre les càrregues internes aplicades i els factors de seguretat obtinguts.

El fet de no haver pogut establir una relació entre las càrregues internes aplicades i els factors de seguretat associats es deu principalment a les següents consideracions.

- *Plaxis 8.2* és un programa de modelació numèrica en elements finits. Per establir un model en elements finits s'ha de modelar cada estructura i element del problema de la forma més aproximada a la realitat possible. Simular el comportament d'un conjunt de pilots per una única força puntual o per una distribució de forces puntuals estabilitzadores és una simplificació poc estricta. Com s'ha comprovat, fer aquesta simplificació pot provocar que si la càrrega aplicada és massa gran, la ruptura no es produeixi únicament per lliscament sinó també de forma puntual i localitzada al voltant de la càrrega horitzontal interna. Per tant el factor de seguretat calculat estarà associat a la superfície de lliscament i a la ruptura local.
- Variabilitat de les superfícies de lliscament obtingudes amb *Plaxis* en funció de la distribució de càrregues i la diferència entre la quantitat de paràmetres introduïts en els models constitutius entre un programa i l'altre. Aquesta variabilitat de les superfícies de lliscament pot provocar que la massa afectada per les càrregues sigui la que no és mou. És a dir, les forces estan actuant sobre una massa de material que no és susceptible a lliscar i per tant no permeten l'augment del factor de seguretat.

Aquestes consideracions són les possibles causes de les diferències entre els resultats obtinguts d'un programa a l'altre.

5. Anàlisi d'estabilitat amb Plaxis 8.2. Els pilots com a mesura estabilitzadora.

L'objectiu d'aquest apartat és comprovar que el mètode per estimar empentes sobre pilots en molls i el dimensionament que proposa la ROM0.5-05 permeten obtenir un factor de seguretat proper a 1.7.

Per dimensionar els pilots s'utilitzaran les empentes obtingudes amb el mètode de la ROM0.5-05 a partir de la força horitzontal interna calculada amb *Janbu Simplificat*. S'ha comprovat i comentat en l'apartat anterior que el factor de seguretat amb la distribució de càrregues aplicades no augmentava considerablement.

5.1 Dimensionament dels pilots

Pel dimensionament del pilots s'ha utilitzat el gràfic de *Broms* per terrenys purament cohesius.

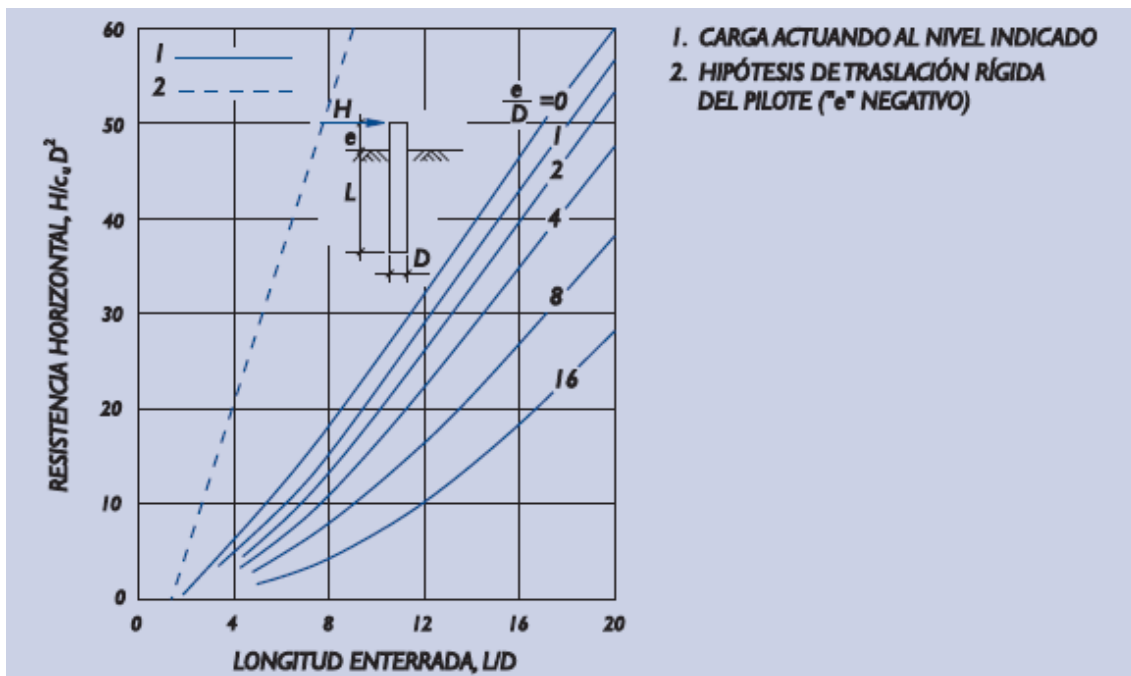


Figura 20. Gràfica de Broms. Ruptura horitzontal del terreny. Sòls purament cohesius. (Puertos del estado, 2005).

Les variables que intervenen en el gràfic són: la resistència al tall no drenada (C_u), la càrrega horitzontal aplicada (H), el diàmetre (D), la longitud del pilot (L) i la excentricitat o distància entre el punt d'aplicació de la càrrega i la superfície del terreny (e).

La superfície de lliscament considerada així com la distribució d'empentes són les de l'apartat 4.2.3. Com l'objectiu és dimensionar uns pilots que resisteixin les empentes produïdes per la massa que llisca, s'ha considerat que la superfície del terreny està situada en la superfície de lliscament i per tant l'excentricitat és la longitud del pilot per sobre d'aquesta.

De totes les variables que intervenen en el gràfic de *Broms* les úniques incògnites són la geometria del pilot i la C_u . Respecte al diàmetre, s'ha imposat que sigui d'un metre. Pel que fa

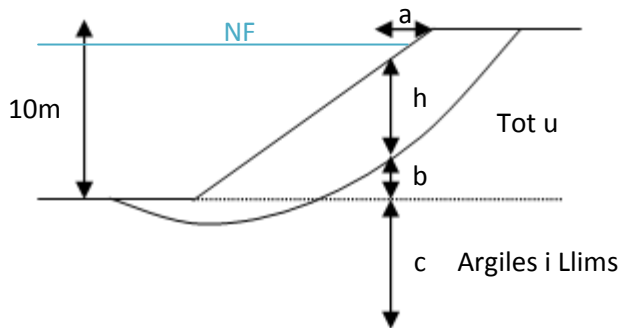
al càlcul de **Cu**, s'ha considerat la següent fórmula que correspon a un ϕ' d'aproximadament 20° amb model *Soft Soil*.

$$C_u = 0.25 \cdot \sigma'_v = 0.25 \cdot \gamma' \cdot z \quad (5.1)$$

On:

- σ'_v = tensió vertical efectiva.
- γ' = pes específic submergit (tot el moll es troba submergit, menys els primers 1.75 metres des de la capçalera que no influeixen en el càlcul de la C_u).
- z = profunditat .

La següent figura mostra un esquema pel càlcul de la profunditat màxima del pilot per sota la superfície de lliscament.



$b + c$ = prof. màx per sota sup. lliscament

a = distància a la fila de pilots.

$$(H - h) = b + \left(\frac{a}{2 \cdot 10}\right) \cdot 10;$$

c = prof. màx per sota sup. lliscament- b

Figura 21. Croquis pel càlcul de la profunditat màxima del pilot per sota la superfície de lliscament.

La fórmula (5.1) considera un creixement lineal de **Cu** amb la profunditat. Això implica que a efectes de càlcul caldrà considerar una **Cu** mitja. Per calcular la **Cu** mitja, s'ha considerat que el pilot tindrà una profunditat aproximada de cinc metres per sota la superfície de lliscament.

A continuació es mostra una taula amb les **Cu** calculades en kN/m^2 .

	Cu₀	Cu_{5m}	Cu_{mitja}
1a fila de pilots (h=8m ; a=5m)	1.1	11.9	6.39
2a fila de pilots (h=7.5m ; a=10m)	5.3	15.9	10.6
3a fila de pilots (h=5.5m ; a=15m)	6.4	17	11.7

Taula 6. Taula pel càlcul de la C_u considerada en el gràfic de Broms.

Finalment entrant les variables en el gràfic de Broms es pot obtenir la longitud del pilot per sota la superfície de lliscament. Seguidament es mostra una taula resum amb els valors de les variables utilitzades i les longituds calculades.

	H [kN]	e [m]	D [m]	Cu[kN/m ²]	L [m]	L _{total soterrada} [m]
1a fila de pilots	57	2.7	1	6.39	7	15
2a fila de pilots	29	2.5	1	10.6	4	11.5
3a fila de pilots	14	1.8	1	11.7	3.5	9

Taula 7. Taula amb els valors de les variables utilitzades i les longituds dels pilots per sota de la superfície de lliscament obtingudes amb el gràfic de Broms. El valor de la longitud total soterrada és considerant el moll completament executat.

5.2 Anàlisi del moll sense accions externes

En aquest apartat és modelitzaran els pilots dimensionats i s'estudiarà l'estabilitat del moll. Els pilots es modelitzaran com si d'una pantalla de formigó de secció circular es tractés. La ROM0.5-05 aconsella aixecar els molls mitjançant tongades de capes horitzontals. En el model que es proposa a continuació aquest és el procediment constructiu que s'ha dut a terme. Com en aquest apartat l'objectiu és comprovar el factor de seguretat obtingut amb els pilots sense càrregues externes actuant i comparar-lo amb l'obtingut amb l'*Slide*, l'*E*A* i l'*E*I* utilitzats seran per metre d'espessor.

5.2.1 Models constitutius i paràmetres dels elements estructurals

A la taula següent es mostren els paràmetres del pilot i el model constitutiu utilitzat pel càlcul.

Identificació	Model	Diàmetre [m]	A[m ²]	I[m ⁴]	E[kN/m ²]	E*A [kN]	E*I[kN/m ²]	ν	γ [kN/m ³]
Pilot	Elàstic	1	0.7853	0.0491	30*10 ⁶	23561944.9	1472621.6	0.2	25

Taula 8. Taula amb el model constitutiu i paràmetres utilitzats en els pilots.

5.2.2 Fases de càlcul implementades.

A continuació es mostra una taula amb les fases de càlcul implementades. Tots els *staged of construction* són plàstics i ignorant el comportament no drenat.

Fase	Tipus de Fase	Descripció
1	<i>Staged of construction</i>	Execució de la primera fila de pilots
2	<i>Staged of construction</i>	Execució de la segona fila de pilots
3	<i>Staged of construction</i>	Execució de la tercera fila de pilots
4	<i>Staged of construction</i>	Execució de la primera tongada horitzontal de material del moll
5	<i>Staged of construction</i>	Execució de la segona tongada horitzontal de material del moll
6	<i>Staged of construction</i>	Execució de la tercera tongada horitzontal de material del moll
7	<i>Staged of construction</i>	Execució de la quarta tongada horitzontal de material del moll
8	<i>Phi-c reduction</i>	Càlcul del factor de seguretat

Taula 9. Taula amb les fases de càlcul implementades.

5.2.3 Resultats obtinguts.

Seguidament es presenten els resultats obtinguts de l'aplicació de les fases de càlcul anteriors. En aquest apartat no s'han activat les *interfaces*, ja que l'objectiu és calcular el factor de seguretat obtingut amb els pilots dimensionats a partir de les forces obtingudes amb el mètode de la ROM0.5-05, sense modificar cap aspecte que pugui influir en els resultats. En l'apartat sis d'aquest document, un cop actuïn les accions externes i es considerin en el dimensionament dels pilots, es farà una anàlisi exhaustiva i més pròxima a la realitat, considerant l' R_{int} , dels esforços dels pilots i moviments que succeeixen.

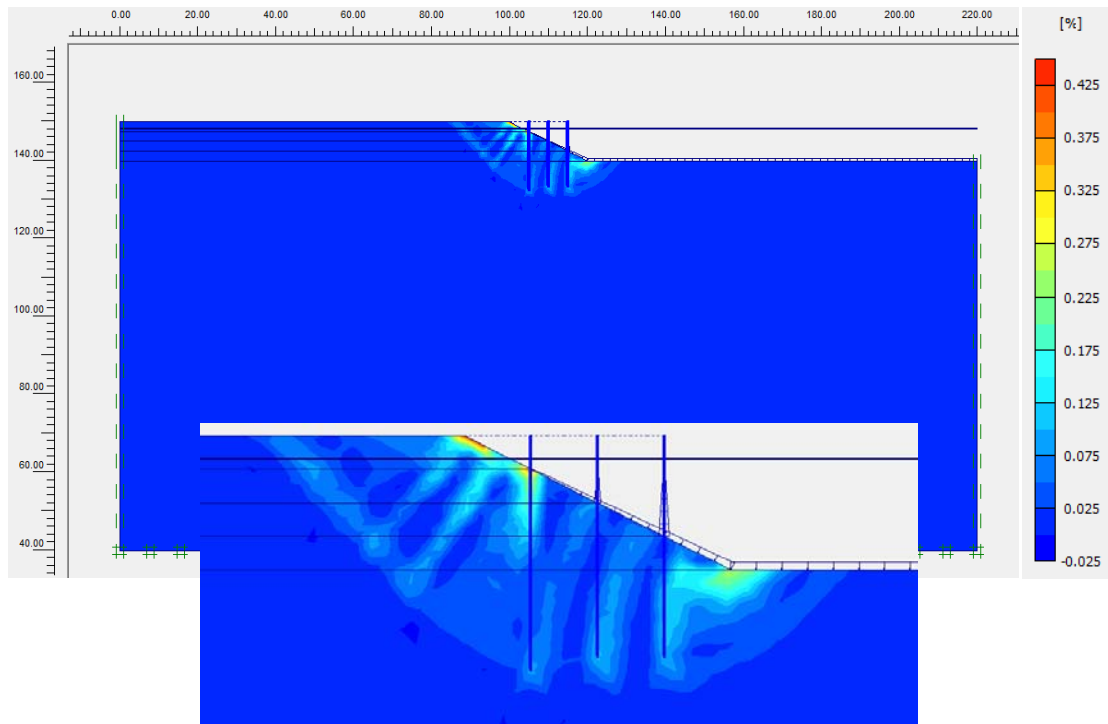


Figura 22. % d'increments de les deformacions de tall i superfície de trencament resultant, obtinguda amb l'aplicació del mètode phi-c reduction. El factor de seguretat calculat és d'1.29.

El dimensionament considerat té un factor de seguretat associat de 1.29. Aquest factor de seguretat està lluny del 1.7 esperat.

5.2.6 Conclusions i discussió de resultats.

Recordant un dels objectius, demostrar que el mètode de la ROM0.5-05 permet obtenir el dimensionament de pilots en molls de forma correcta per mitjà de les empentes calculades, s'ha comprovat que el dimensionament realitzat no ha permès obtenir un factor de seguretat d'1.7, com imposa el propi mètode i que la ROM0.5-05 considera com el mínim necessari (veure taula apartat 3.1)

Pel dimensionament va ser necessari estimar una C_u mitja en funció de la profunditat de la superfície de lliscament. Els valors de càlcul de C_u considerats, possiblement siguin més petits als que es poden donar a la realitat en un estrat argilós-llimós com el considerat en el model. Tot i això, aquesta hipòtesi ens situa del costat de la seguretat, ja que els pilots dimensionats

tenen una longitud major a la que en realitat haurien de tenir. Una altra de les hipòtesis considerades en el dimensionament, va ser la necessitat d'imposar un diàmetre. Es va considerar un diàmetre d'1 metre ja que existeixen casos on els pilots que es van adoptar com a solució constructiva per estabilitzar talussos, presenten un diàmetre d'aquest ordre.

Aquesta consideració, pot haver influït en el càlcul del factor de seguretat amb *Plaxis* i per tant en ella pot residir la diferència entre factors de seguretat. Si s'hagués considerat un diàmetre relativament major els termes de dimensionament E^*A i E^*I haguessin estat majors i per tant els pilots haguessin resistit més. Per altre banda, s'ha comprovat que la superfície de trencada es troba per sota de la longitud soterrada dels pilots, el que indica que aquests són suficientment resistents i per tant aquesta no pot ser la causa principal. L'única variable que queda per analitzar és la longitud soterrada. Aquesta longitud soterrada s'ha calculat amb el gràfic de *Broms* (figura 18). A priori, si la longitud dels pilots és major, la superfície de trencament ha de ser més profunda i per tant, si els pilots son suficientment resistents com per no trencar-se, el factor de seguretat hauria d'augmentar. S'ha comprovat que si s'augmenta en dos metres la profunditat soterrada dels pilots el factor de seguretat associat és de 1.36, mentre que si s'augmenta la profunditat soterrada en 5 metres el factor de seguretat associat és de 1.47. Clarament es conclou que si la profunditat de disseny hagués estat major el factor de seguretat s'hagués apropiat més al 1.7 desitjat.

Dit això, cal tenir present que els pilots s'han dimensionat per suportar únicament unes empentes horitzontals del terreny provocades pel lliscament d'una massa per un superfície. En problemes més globals, com el que s'estudiarà tot seguit, intervenen moltes més càrregues que cal considerar. Per tant, la implementació del mètode de la ROM0.5-05, des d'un punt de vista pragmàtic, pot no ser estrictament necessària quan existeixin altres càrregues que puguin tenir molta més influència en l'estudi d'estabilitat global i per tant deixin en un segon pla les empentes provocades pel lliscament.

6. Anàlisi d'estabilitat amb Plaxis 8.2. Els pilots com a mesura estabilitzadora en un problema real.

En aquest apartat s'estudiarà el mateix moll que l'utilitzat fins ara, però sotmès a unes possibles accions externes. De la mateixa forma que en l'apartat anterior, s'aplicarà la ROM0.5-05 per poder determinar un dimensionament dels pilots que doni un factor de seguretat major que 1. En aquest cas, com es tracta d'un problema més global on s'haurà d'estudiar l'estabilitat enfront càrregues horitzontals, càrregues verticals i resistència estructural dels pilots, els factors de seguretat associats a cadascuna de les verificacions seran els determinats per la ROM0.5-05, però el factor de seguretat global que es voldrà obtenir serà d'1.25.

Com cadascuna de les verificacions donarà un dimensionament diferent, el dimensionament final serà el més desfavorable, considerat aquest el que defineixi una longitud i diàmetre majors de pilot.

6.1 Càrregues considerades.

Per tal de ponderar les accions externes considerades es farà ús de la taula següent.

Tabla 3.3.2. Coeficientes de ponderación parciales* de las acciones para la verificación de modos de fallo adscritos a Estados Límite Últimos (ELU). Combinaciones fundamentales.

Acción	Símbolo	Tipo de modo de fallo				
		EQU	STR	GEO	UPL	HYD
Permanente						
Desfavorable	γ_g	1,10	1,35	1,00	1,00	1,35
Favorable		0,90	1,00	1,00	0,90	0,90
Variable						
Desfavorable	γ_q	1,50	1,50	1,30	1,50	1,50
Favorable		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

(*) Estos coeficientes no son de aplicación en aquellas obras en que por criterios de optimización económica no puedan admitirse probabilidades de ocurrencia de los modos de fallo geotécnicos similares a las consideradas con carácter general en esta ROM* (p.e. en los diques de abrigo). Ver comentario del apartado 3.3.5.3

Taula 10. Taula de coeficients de ponderació parcials de les accions davant falls adscrits a ELU definida a la ROM 0.5-05. (Puertos del estado, 2005).

Les accions externes considerades són les següents.

G : Càrregues permanents.

- Càrrega de la llosa damunt dels pilots: $1,5\text{m} \times 2,33 \text{ Tn/m}^3 = 3,5 \text{ Tn/m}^2$; $\gamma_g = 1$.
- Càrrega sobre la llosa de formigó: 3Tn/m^2 ; $\gamma_g = 1$.
- Càrrega horitzontal dels vaixells: 6Tn/m ; $\gamma_g = 1$.

Q : Càrregues variables.

- Càrrega sobre l'esplanada corresponent a un edifici de 10 plantes: 10T/m^2 ; $\gamma_q = 1,3$.

Aquestes càrregues són altes i els moviments que poden originar es possible que també ho siguin.

6.2 Verificacions de seguretat prèvies.

Es realitzaran les verificacions de seguretat davant:

- Ruptura horitzontal del terreny.
- Enfonsament individual dels pilots i enfonsament del grup de pilots.
- Resistència estructural del pilot.

6.2.1 Verificacions realitzades

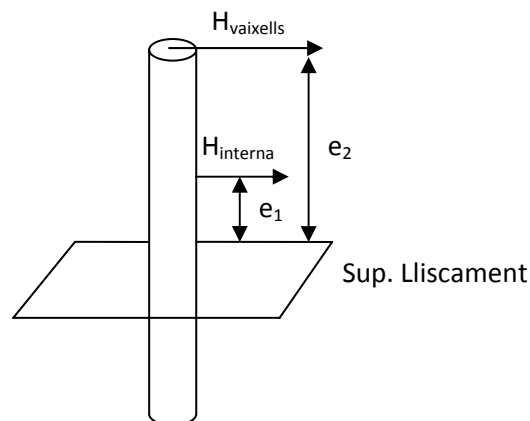
Verificació de la seguretat davant ruptura horitzontal del terreny.

Per tal de verificar la seguretat davant ruptura horitzontal del terreny s'han de considerar les empentes horitzontals internes calculades amb el mètode de la ROM0.5-05 així com la càrrega horitzontal produïda pels vaixells. En aquesta verificació s'haurà d'obtenir un factor de seguretat 1.7 que és el que imposa la ROM0.5-05 considerant el factor de seguretat mig entre un combinació de càrregues quasi-permanent, F_1 , i una combinació de càrregues fonamental, F_2 (veure taula 1 de l'apartat 3.1). Com les empentes horitzontals internes ja estan calculades considerant un factor de seguretat d'1.7 no caldrà recalculer-les. En canvi, pel que fa a la càrrega dels vaixells, aquesta serà:

$$FS = \frac{H_{rot}}{H} \geq 1.7 \rightarrow H_{rot} = 1.7 \cdot H = 1.7 \cdot \frac{60\text{kN}}{\text{m}} = 102 \text{ kN/m} \quad (6.1)$$

Aquesta càrrega horitzontal s'ha de repartir entre les tres files de pilots. Per tant, la càrrega horitzontal per pilot és de 34 kN/m.

S'ha de tenir present que la càrrega puntual horitzontal no actua en el mateix punt que les càrregues internes degudes a la massa mobilitzada per la superfície de trencament. Això implica que, considerant com a superfície de càlcul per aplicar el gràfic de *Broms* la superfície de trencament obtinguda amb el moll natural, sense pilots i càrregues externes, l'excentricitat de les empentes internes i de la carga del vaixell serà diferent. Com a solució es proposa el següent:



$$H_{vaixells} \cdot e_2 + H_{interna} \cdot e_1 = H_{equivalent} \cdot e_2 \quad (6.2)$$

Figura 23. Croquis de la distribució de les càrregues puntuals horitzontals que actuen sobre els pilots.

A continuació es mostra una taula amb les excentricitats i forces equivalents utilitzades.

	e_1 [m]	e_2 [m]	$H_{vaixells}$ [kN/m]	$H_{interna}$ [kN/m]	$H_{equivalent}$ [kN/m]
1a fila de pilots	2.7	9	34	57.14	51.14
2a fila de pilots	2.5	12	34	28.57	39.95
3a fila de pilots	1.8	13	34	14.29	35.97

Taula 11. Taula d'excentricitats i forces horitzontals.

De la mateixa forma que s'havia realitzat en l'apartat 5.1 s'ha de considerar un **Cu** per cada fila de pilots. Degut a que les càrregues que actuen són majors, es raonable pensar que en principi els pilots necessitaran més profunditat soterrada per assegurar l'estabilitat. Per aquest motiu, es considerarà una Cu màxima a 7.5 metres de profunditat respecte la superfície de lliscament i es calcularà la mitja. La **Cu** s'ha calculat amb la fórmula 5.1 i s'expressa en kN/m^2 .

	Cu_0	$Cu_{7.5m}$	Cu_{mitja}
1a fila de pilots (h=8m ; a=5m)	1.1	17	9.1
2a fila de pilots (h=7.5m ; a=10m)	5.3	21.3	13.3
3a fila de pilots (h=5.5m ; a=15m)	6.4	22.3	14.4

Taula 12. Taula pel càlcul de la Cu considerada en el gràfic de Broms.

Imposant un diàmetre d'1.5 metres i introduint els valors de les variables en el gràfic de *Broms*, es poden obtenir les longituds soterrades dels pilots per sota la superfície de lliscament. A continuació es mostra una taula amb les variables utilitzades.

	H [kN]	e [m]	$M_{màx}$ [kN·m/m]	D [m]	Cu [kN/m^2]	L [m]	L_{total} soterrada[m]
1a fila de pilots	51	9	460	1.5	9.1	7.5	15.5
2a fila de pilots	40	12	480	1.5	13.3	6	13.5
3a fila de pilots	36	13	468	1.5	14.4	6	11.5

Taula 13. Taula amb els valors de les variables utilitzades i les longituds dels pilots per sota de la superfície de lliscament obtingudes amb el gràfic de Broms. El valor de la longitud total soterrada és considerant el moll completament executat.

Verificació de la seguretat davant l'enfonsament individual dels pilots i del grup de pilots.

El fet de comprovar l'enfonsament del grup de pilots equivalent, és degut a que en un grup de pilots pròxims entre sí, és possible que la càrrega d'enfonsament d'un pilot equivalent al conjunt del grup de pilots sigui menor que la suma de les càrregues d'enfonsament de cadascun dels pilots.

En tots els càlculs exposats a continuació, s'ha considerat el sostre de les argiles com a superfície a partir de la qual els pilots estan soterrats.

Per la verificació de la seguretat davant l'enfonsament individual dels pilots i del grup de pilots s'ha de complir el següent.

Figura 3.6.11. Verificación de la seguridad frente al hundimiento

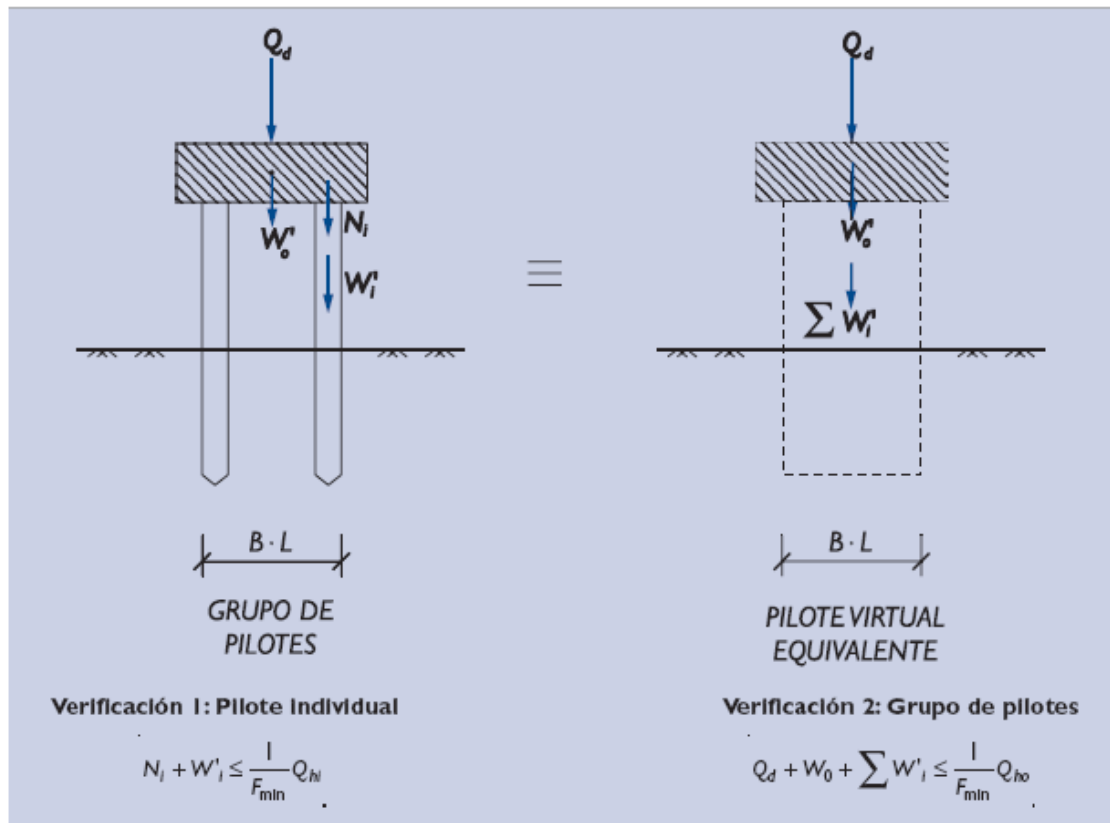


Figura 24: Verificació de la seguretat davant l'enfonsament definida a la ROM 0.5-05. (Puertos del estado, 2005).

on:

- N_i = càrrega vertical que actua sobre el pilote. Per a la seva obtenció s'haurà distribuït la càrrega que actua sobre el conjunt de pilots en cadascun d'ells, considerant el pes del possible encepament i eventualment el de les terres que poguessin gravitar sobre ell. Les càrregues deuran ser majorades.
- W'_i = pes efectiu de la part exenta del pilote (fora del terreny) que eventualment pogués existir.
- Q_{hi} = càrrega d'enfonsament del pilote aïllat
- Q_d = component vertical de les càrregues correctament majorades.
- W'_0 = pes efectiu de l'encepat, submergit si fos el cas.
- Q_{h0} = càrrega d'enfonsament del pilote virtual equivalent al grup, considerant que la longitud del pilote virtual serà la longitud mitja dels diferents pilots del grup i l'àrea de la seva secció transversal serà igual a l'àrea interior de la línia de geometria simple (cercle, quadrilàter...) que pot circumscriure al grup en planta. Com a contorn del pilote equivalent s'adoptarà la longitud d'aquesta línia. Per tal de poder calcular correctament aquesta càrrega s'haurà de restar a la resistència per punta i per fricció, el pes enterrat del pilote equivalent, que serà la suma de la part soterrada dels pesos de tots els pilots més el terreny interior a la línia de contorn equivalent, abans mencionada, des del nivell superior del terreny fins al nivell mig de les puntes.

- $\sum W_i'$ = suma dels pesos efectius de la part exenta (per sobre del terreny) de tots els pilots del grup.
- F_{\min} = coeficient de seguretat mínim que s'indica a la taula següent.

Tabla 3.6.1. Coeficientes de seguridad, F, mínimos frente al hundimiento de pilotes. Obras con ISA bajo (5 a 19)

Procedimiento de análisis utilizado en la estimación de la carga de hundimiento	Coeficiente de seguridad (Combinaciones)		
	Cuasi-Permanente, F ₁	Fundamental, F ₂	Accidental o sísmica, F ₃
Cualquier tipo de pilotaje (1)			
Método del SPT en suelos granulares	2,5	2,2	2,0
Método basado en el penetrómetro estático	2,0	1,8	1,7
Métodos basados en otros ensayos penetrométricos continuos, ensayos presiométricos y otros ensayos de campo	2,6	2,3	2,1
Método basado en la resistencia a compresión simple de la roca (sólo para pilotes empotrados en roca)	2,5	2,2	2,0
Método basado en las fórmulas analíticas y ensayos de laboratorio para medir el ángulo de rozamiento (o de laboratorio o campo para medir la resistencia al corte sin drenaje de arcillas)	2,5	2,2	2,0
Pilotes hincados			
a) Con control del avance y aplicación de la fórmula de Hiley (2)	2,5	2,2	2,0
b) Con control de avance y aplicación de la ecuación de la onda (2)	2	1,8	1,7
c) Con control electrónico de la hincada	1,6	1,5	1,4
d) Con control electrónico de la hincada y contraste con pruebas de carga	1,4	1,3	1,3

(1) Cuando el cálculo sea contrastado con ensayos de carga de hundimiento "in situ", los coeficientes de seguridad indicados pueden reducirse entre un 10% y un 15%, dependiendo del número de pilotes ensayados y de la dispersión de resultados obtenidos en las pruebas. Ver apartado 3.6.4.8.

(2) Los coeficientes indicados corresponden a hincadas suaves o moderadamente duras, entendiéndose por tales aquellas en las que el rechazo final (avance de la hincada con un golpe de maza) es superior a 2 mm (dos milímetros). Para hincadas más duras deben utilizarse coeficientes de seguridad mayores, o, alternativamente, limitar la carga en las curvas de hincada de forma que no crezca para rechazos inferiores al indicado.

Taula 14. Taula de coeficients de seguretat mínims davant l'enfonsament de pilots definits a la ROM 0.5-05.
(Puertos del estado, 2005)..

En el cas d'estudi, com la verificació es realitzarà utilitzant fórmules analítiques i els paràmetres s'han obtingut per mitjà d'assaigs de laboratori, el factor de seguretat mínim definit serà de 2.35 (factor de seguretat mig entre considerar una combinació de forces quasi-permanents i fonamentals).

En el càlcul de forma simplificada de la càrrega d'enfonsament d'un pilot s'han de considerar dos resistències; la resistència per punta i la resistència per fricció. Una vegada calculades, es pot obtenir la càrrega d'enfonsament com:

$$Q_h + W' = Q_p + Q_f \quad (6.3)$$

on:

- Q_h = càrrega vertical que aplicada al cap del pilot produeix el seu enfonsament. Si el pilot està exent, s'agafarà, a efectes de càlcul de la càrrega d'enfonsament, la secció horitzontal del pilot al nivell del terreny.
- W' = pes efectiu del pilot. Sota el nivell freàtic es considerarà el pes submergit.
- Q_p = part de la càrrega que es suposa suportada per la punta. Resistència per punta.

- Q_f = part de la càrrega que es suposa suportada pel contacte pilot-terreny al llarg de tot el perímetre del pilot. Resistència per fricció.

Les resistències per punta i per fricció es poden calcular utilitzant les següents expressions:

$$Q_p = q_p \cdot A_p \quad (6.4)$$

$$Q_f = \int_0^L \tau_f \cdot C \cdot dz \quad (6.5)$$

on:

- q_p = resistència unitària per punta.
- A_p = àrea de la punta.
- τ_f = resistència unitària per fricció.
- L = longitud del pilot dins del terreny.
- C = perímetre de la secció transversal del pilot.
- z = profunditat contada des de la superfície del terreny.

Donat un valor del diàmetre i la longitud del pilot, les úniques incògnites són la q_p i la τ_f . Aquestes es poden calcular utilitzant les expressions empíriques següents, considerant sòls cohesius i condicions no drenades.

$$q_p = (9 - 3 \cdot D) \cdot C_u > 6 \cdot C_u \quad (6.6)$$

On:

- D = diàmetre real o virtual expressat en metres.
- C_u = resistència al tall no drenada del sòl cohesiu al nivell de la punta (entorn de \pm dos diàmetres).

$$\tau_f = \frac{100 \cdot C_u}{100 + C_u} \quad (C_u \text{ i } \tau_f \text{ en kPa}) \quad (6.7)$$

Si incorporem l'expressió 6.7 a l'expressió 6.5, s'observa com el valor de τ_f no es manté constant, ja que aquest depèn de la C_u que a la vegada varia amb la profunditat ($C_u = 0.25\sigma'_v$). Per tant, la integral a resoldre no és directe i per aquest motiu s'ha decidit utilitzar la següent simplificació.

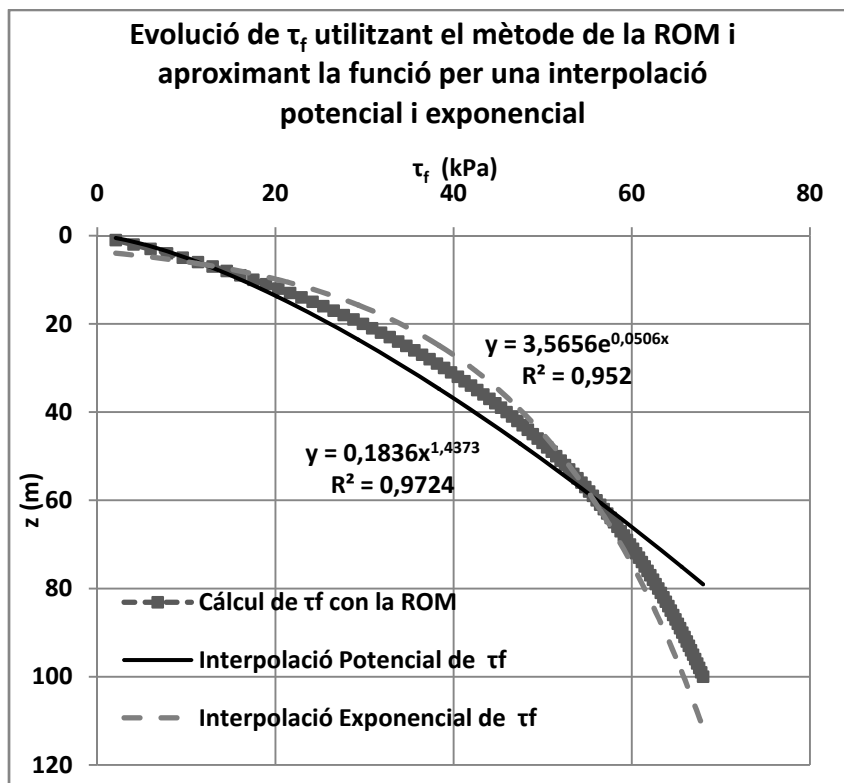
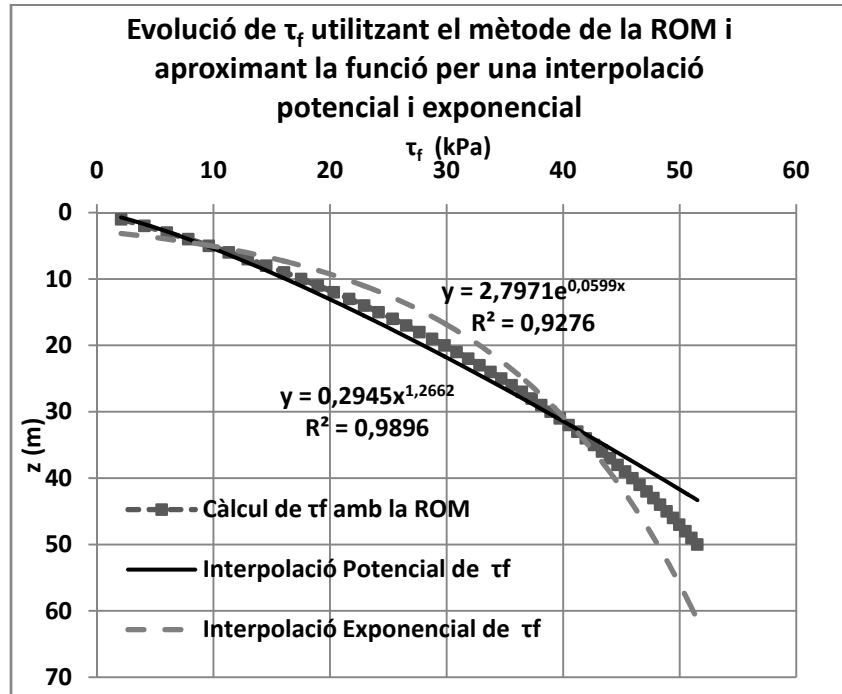
$$\text{En } z = 0 \rightarrow C_u = 0 \rightarrow \tau_f = 0$$

$$\text{En } z = L \rightarrow C_u = 0.25 \cdot \gamma' \cdot L \rightarrow \tau_f = \frac{100 \cdot 0.25 \cdot \gamma' \cdot L}{100 + 0.25 \cdot \gamma' \cdot L}$$

Finalment considerant la mitja entre ambdós casos, s'obté que la Q_f és:

$$Q_f = \frac{1}{2} \cdot \frac{100 \cdot 0.25 \cdot \gamma' \cdot L}{100 + 0.25 \cdot \gamma' \cdot L} \cdot L \cdot C \quad (6.8)$$

És important tenir present que pel càlcul de la Q_f s'ha considerat una variació lineal de τ_f amb la profunditat. Com mostren les gràfiques següents, aquesta variació no és lineal. De fet, depenent de la profunditat, les aproximacions realitzades varien el seu paràmetre d'aproximació R^2 , aproximant millor el comportament a una profunditat superior que a una inferior o a la inversa.



Gràfiques 4. Variació de la τ_f amb la profunditat. La gràfica superior mostra la variació fins a 50 metres de profunditat i la inferior fins a 100 metres.

A la gràfica superior, profunditat màxima de 50 metres, s'observa que la interpolació que millor aproxima la funció és l'aproximació potencial amb un exponent proper a 1. A mesura que la profunditat augmenta, la velocitat de creixement de la τ_f amb la profunditat disminueix, i la interpolació que millor aproxima el comportament final de la funció de la ROM0.5-05 és la exponencial, tot i continuar presentant un menor paràmetre d'interpolació R^2 . D'altra banda, en totes dues gràfiques, la profunditat necessària per aconseguir una τ_f determinada és menor pel cas de la interpolació potencial i major pel cas de la interpolació exponencial.

Dit això, es pot concloure que per una profunditat menor a uns 50 metres, una interpolació potencial amb exponent proper a 1.3 presenta una molt bona aproximació, que serà millor quanta menys profunditat considerem, provocant una tendència a la linealitat i per tant a un exponent de la equació d'un. En canvi per profunditats majors, l'aproximació exponencial és més correcte.

Pel cas que estem estudiant, a-priori, la longitud soterrada dels pilots no hauria de ser major a 50 metres i per tant es pot considerar com a bona l'aproximació lineal utilitzada en el dimensionament.

Recapitulant, l'objectiu d'aquest punt era la verificació de la seguretat davant l'enfonsament de pilots individuals o del grup de pilots. Com el factor de seguretat mínim està determinat per la pròpia ROM0.5-05, 2.35, les variables que s'han de calcular per obtenir aquest factor són la longitud soterrada i diàmetre del pilot (individual o virtual). Tal com s'havia fet en la verificació de la seguretat davant forces horitzontals, en aquest cas s'ha imposat un diàmetre de 1.5 metres i per tant l'única incògnita del sistema és la longitud soterrada.

Com s'han de verificar els tres pilots i el pilot equivalent, en aquest apartat només es mostren els càlculs i procediment seguit pels pilots de la primera fila i pel pilot equivalent. Els càlculs dels pilots de la segona i tercera fila es poden observar a l'**Annex 2. Càlculs realitzats**.

a) Càlcul de la longitud soterrada dels pilots de la primera fila.

1. Càlcul de la N_i .

- Càrrega de la llosa de formigó $\rightarrow 35 \text{ kPa} \cdot \frac{20+17}{2} \text{ m} = 647.5 \text{ kN/m}$

el terme $\frac{20+17}{2} \text{ m}$, és la longitud mitja de la llosa de formigó.

- Sobrecàrrega $\rightarrow 30 \text{ kPa} \cdot 20 \text{ m} = 600 \text{ kN/m}$
- $N_i = 647.5 + 600 = 1247.5 \text{ kN/m}$
- Suposant ara que cada pilot suporta la mateixa càrrega \rightarrow

$$\rightarrow \frac{1247.5}{3} = 415.83 \text{ kN/m}$$

2. Càlcul de la W'_i .

- $W'_i = ((\gamma_f \cdot 2.5) - (\gamma_w \cdot 2.25)) \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \pi = ((25 \cdot 2.5) - (10 \cdot 2.25)) \cdot$

$$\cdot \frac{1.5^2}{4} \pi = 70.7 \text{ kN per metre d'espessor}$$

3. Aplicació de la definició de factor de seguretat davant enfonsament d'un pilot individual segons la ROM0.5-05.

$$F = \frac{Q_{hi}}{N_i + W'_i} \geq F_{\min} \rightarrow Q_{hi} = F_{\min} \cdot (N_i + W'_i) \quad (6.9)$$

$$Q_{hi} = 2.35 \cdot (415.83 + 70.7) = 1143.35 \text{ kN/m}$$

4. Definició del terme W' de l'equació (6.3).

$$\begin{aligned} W' &= ((\gamma_f \cdot (L + 8.5)) - (\gamma_w \cdot (L + 8.25))) \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \pi = \\ &= ((25 \cdot (L + 8.5)) - (10 \cdot (L + 8.25))) \cdot \frac{1.5^2}{4} \cdot \pi \end{aligned}$$

5. Si s'incorporen les equacions (6.4) i (6.8) en l'equació (6.3), l'equació resultant és:

$$\begin{aligned} 1143.35 + ((25 \cdot (L + 8.5)) - (10 \cdot (L + 8.25))) \cdot \frac{1.5^2}{4} \cdot \pi = \\ = 6 \cdot 0.25 \cdot \gamma' \cdot L \cdot \frac{1.5^2}{4} \cdot \pi + \frac{1}{2} \cdot \frac{100 \cdot 0.25 \cdot \gamma' \cdot L}{100 + 0.25 \cdot \gamma' \cdot L} \cdot L \cdot (\pi \cdot 1.5) \quad (6.10) \end{aligned}$$

que és una equació on l'única incògnita és la L , longitud soterrada del pilot.

6. Finalment, utilitzant la funció *Solver* de l'*Excel* es pot calcular la L .

$$L_{1a \text{ fila}} = 20.40 \text{ m}$$

Aquesta longitud soterrada correspon a la primera fila de pilots, pel que fa a les longituds soterrades dels pilots de la segona i tercera fila, aquestes són: (veure **Annex 2. Càlculs realitzats.**)

$$L_{2a \text{ fila}} = 21.70 \text{ m} ; L_{3a \text{ fila}} = 22.97 \text{ m}$$

b) Verificació de seguretat del pilot equivalent o virtual.

La verificació de la seguretat del pilot equivalent o virtual és realitzarà considerant la càrrega d'enfonsament definida com a Q_{h0} .

1. Càlcul de la profunditat mitja, l'àrea i el contorn del pilot equivalent o virtual.

$$\begin{aligned} \text{Profunditat mitja} &= \frac{1}{3} \cdot (L_{1a \text{ fila}} + L_{2a \text{ fila}} + L_{3a \text{ fila}}) = \\ &= \frac{1}{3} \cdot (20.40 + 21.70 + 22.97) = 21.70 \text{ m} \end{aligned}$$

Pel que fa al contorn i l'àrea, considerant una separació de 5 m entre pilots i 1.5 m de diàmetre de pilots, s'obté un diàmetre fictici de 14.5 m ($2 \cdot 5 + 3 \cdot 1.5$). Per tant,

$$\begin{aligned} \text{Àrea} &= \pi \cdot \frac{D^2}{4} = \pi \cdot \frac{14.5^2}{4} = 165.13 \text{ m}^2 \\ \text{Contorn} = C &= \pi \cdot D = \pi \cdot 14.5 = 45.55 \text{ m} \end{aligned}$$

2. Càlcul de la Q_{h0} .

$$Q_{h0} + \text{Pes soterrat pilot equivalent} = Q_p + Q_f$$

$$Q_{h0} = \left(6 \cdot 0.25 \cdot \gamma' \cdot L_{mitja} \cdot \frac{D_{equi}^2}{4} \cdot \pi \right) + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{100 \cdot 0.25 \cdot \gamma' \cdot L_{mitja}}{100 + 0.25 \cdot \gamma' \cdot L_{mitja}} \cdot L_{mitja} \cdot (\pi \cdot D_{equi}) \right) -$$

$$- \left(3 \cdot ((\gamma_f - \gamma_w) \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L_{mitja} + (\gamma_s - \gamma_w) \cdot \left(\pi \cdot \frac{D_{equi}^2}{4} - 3 \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \right) \cdot L_{mitja} \right) =$$

$$= \left(6 \cdot 0.25 \cdot \gamma' \cdot 15.36 \cdot \frac{14.5^2}{4} \cdot \pi \right) + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{100 \cdot 0.25 \cdot \gamma' \cdot 15.36}{100 + 0.25 \cdot \gamma' \cdot 15.36} \cdot 15.36 \cdot (\pi \cdot 14.5) \right) - \left(3 \cdot \right.$$

$$\left. (\gamma_f - \gamma_w) \cdot \pi \cdot 1.524 \cdot 15.36 + \gamma_s - \gamma_w \cdot \pi \cdot 14.524 - 3 \cdot \pi \cdot 1.524 \cdot 15.36 \right) =$$

$$= 38368.01 \text{ kN per metre d'espessor}$$

3. Càlcul de W'_0 , Q_d i $\sum W'_i$.

- $W'_0 = 35 \text{ kPa} \cdot \frac{20+17}{2} \text{ m} = 647.5 \text{ kN/m}$

el terme $\frac{20+17}{2} \text{ m}$, és la longitud mitja de la llosa de formigó.

- $Q_d = 30 \text{ kPa} \cdot 20 \text{ m} = 600 \text{ kN/m}$

- $\sum W'_i = ((\gamma_f \cdot 2.5) - (\gamma_w \cdot 2.25)) \cdot \frac{1.5^2}{4} \cdot \pi + ((\gamma_f \cdot 5) - (\gamma_w \cdot 4.75)) \cdot \frac{1.5^2}{4} \cdot \pi + ((\gamma_f \cdot 7.5) - (\gamma_w \cdot 7.25)) \cdot \frac{1.5^2}{4} \cdot \pi = 70.7 + 136.95 + 203.32 = 410.97 \text{ kN per metre d'espessor}$

4. Finalment es procedeix al càlcul del factor de seguretat utilitzant la l'expressió definida per la ROM0.5-05 per un pilot equivalent.

$$F = \frac{Q_{h0}}{Q_d + W'_0 + \sum W'_i} \geq F_{\min} \rightarrow \frac{58201.53}{600 + 647.5 + 410.97} \geq 2.35 \rightarrow 35 \geq 2.35 \rightarrow$$

→ Verificació correcte

Verificació de la seguretat estructural del pilot.

La verificació estructural realitzada a continuació té l'objectiu d'assegurar que els pilots dimensionats no necessiten una armadura excessiva. Per realitzar aquesta comprovació, s'utilitzaran els diagrames d'interacció adimensionals per seccions circulars utilitzats a la EHE.

Les variables necessàries pel càlcul són:

- f_{ck} = resistència característica del formigó.
- f_{yk} = resistència característica de l'acer.
- f_{cd} = resistència de càlcul del formigó = $\frac{f_{ck}}{\gamma_c}$
- f_{yd} = resistència de càlcul de l'acer = $\frac{f_{yk}}{\gamma_y}$

on els valors de γ_c i γ_y es defineixen a la EHE com:

Situació de Projecte	Formigó γ_c	Acer actiu i passiu γ_y
Persistent o transitòria	1.5	1.15
Accidental	1.3	0

Taula 15. Taula de coeficients parcials de seguretat per Estats Límit Últims.

- N_d = axil considerat.
- h = diàmetre.
- $M_{m\grave{a}x}$ = moment màxim calculat considerant la força horitzontal equivalent que actua en cada pilot per la excentricitat que hi ha des de la superfície crítica (superfície de lliscament) fins el cap del pilot (e_2)
- e_0 = excentricitat definida com $= \frac{M_{m\grave{a}x}}{N_d}$
- d' = separació existent entre el contorn de la estructura i l'armadura $= 0.10 \cdot h$
- A_c = àrea de formigó.
- A_{tot} = àrea d'acer.

Amb les variables definides es poden calcular els següents paràmetres adimensionals.

- $\nu = \frac{N_d}{A_c \cdot f_{cd}}$
- $\mu = \frac{N_d \cdot e_0}{A_c \cdot h \cdot f_{cd}}$
- $\omega = \frac{A_{tot} \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}}$

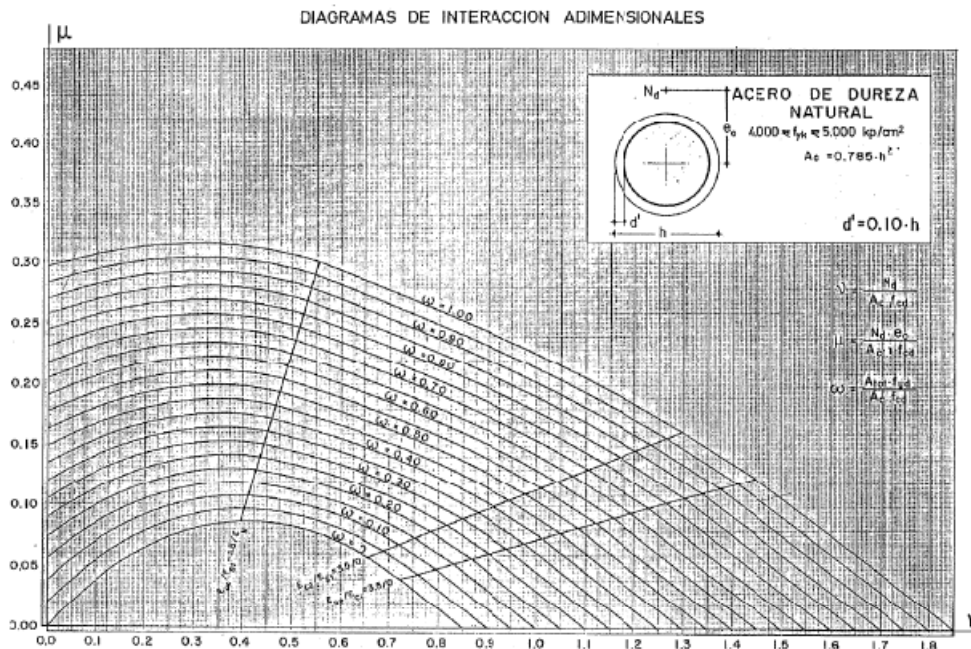


Figura 25: Diagrama d'interacció adimensional.

Els valors de les variables utilitzades són:

- $f_{ck} = 25\text{MPa} \rightarrow f_{cd} = \frac{25\text{MPa}}{1.5} = 16.6\text{MPa}$
- $f_{yk} = 400\text{MPa} \rightarrow f_{cd} = \frac{400\text{MPa}}{1.15} = 300\text{MPa}$
- $N_d =$
Càrrega de la llosa de formigó $\rightarrow 35\text{ kPa} \cdot \frac{20+17}{2}\text{ m} = 647.5\text{ kN/m}$

el terme $\frac{20+17}{2}\text{ m}$, és la longitud mitja de la llosa de formigó.

Sobrecàrrega $\rightarrow 30\text{ kPa} \cdot 20\text{ m} = 600\text{ kN/m}$

$$N_d = 647.5 + 600 = 1247.5\text{ kN/m}$$

Suposant ara que cada pilot suporta la mateixa càrrega $\rightarrow \frac{1247.5}{3} = 415.83\text{ kN/m}$

- $h=150\text{ cm}$
- Pel càlcul de l' e_0 s'ha fet servir la taula següent.

	$H_{\text{equivalent}} [\text{kN/m}]$	$e_2 [\text{m}]$	$M_{\text{màx}} [\text{kN}\cdot\text{m/m}]$	$N_d [\text{kN/m}]$	$e_0 [\text{m}]$
1a fila de pilots	51	9	460	415.83	1.11
2a fila de pilots	40	12	480	415.83	1.15
3a fila de pilots	36	13	468	415.83	1.12

Taula 16. Taula utilitzada pel càlcul del e_0 .

- $A_c = \frac{h^2}{4} \cdot \pi = \frac{150^2}{4} \cdot \pi = 17671.46\text{ cm}^2$

Definits els valors de les variables, es poden determinar els paràmetres ν i μ . Si s'introdueixen aquests valors al diagrama adimensional es pot obtenir el paràmetre ω , paràmetre que defineix l'àrea d'acer necessària.

- $\nu = \frac{N_d}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{415.83\text{ kN}}{1.77\text{ m}^2 \cdot 16600\text{ kN/m}^2} = 8 \cdot 10^{-3}$

Pel càlcul del paràmetre μ s'ha considerat la mateixa e_0 per les tres files de pilots ja que els valors són molt similars. Per tant la e_0 considerada és de 1.15 metres, sent aquesta la més gran i per tant la més desfavorable respecte a l'àrea d'acer necessari.

- $\mu = \frac{N_d \cdot e_0}{A_c \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{415.83\text{ kN} \cdot 1.15}{1.77\text{ m}^2 \cdot 1.5 \cdot 16600\text{ kN/m}^2} = 0,011$

Si s'entren aquests valors al diagrama adimensional es comprova que la ω és 0,025. Si s'introdueix aquest valor a la equació d' ω es pot obtenir l'àrea d'acer necessària.

- $A_{\text{tot}} = \frac{\omega \cdot A_c \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,025 \cdot 1.77\text{ m}^2 \cdot 16600\text{ kN/m}^2}{300000\text{ kN/m}^2} = 24.5 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2 = 24.5\text{ cm}^2$

A continuació, s'ha de comparar aquesta àrea d'acer amb les quanties d'acer mínimes tant mecàniques com geomètriques determinades per la EHE, per tal de seleccionar l'àrea d'acer major.

La EHE defineix l'armadura mecànica mínima davant sol·licitacions de compressió com:

$$\Delta s \cdot f_{yd} \geq 0.05 \cdot N_d \quad (6.11)$$

On:

- Δs = àrea d'acer

$$\text{Per tant, } \Delta s \geq \frac{0.05 \cdot N_d}{f_{yd}} = \frac{0.05 \cdot 415.83 \text{ kN}}{3 \cdot 10^5 \text{ kN/m}^2} = 0,7 \text{ cm}^2$$

Pel que fa a l'armadura geomètrica mínima la EHE la defineix com:

$$\Delta s = \frac{\omega_g}{1000} \cdot A_c \quad (6.12)$$

On el paràmetre ω_g s'obté de la taula següent.

Tipo de elemento estructural		Tipo de acero	
		Aceros con $f_y = 400 \text{ N/mm}^2$	Aceros con $f_y = 500 \text{ N/mm}^2$
Pilares		4,0	4,0
Losas ⁽¹⁾		2,0	1,8
Forjados unidireccionales	Nervios ⁽²⁾	4,0	3,0
	Armadura de reparto perpendicular a los nervios ⁽³⁾	1,4	1,1
	Armadura de reparto paralela a los nervios ⁽³⁾	0,7	0,6
Vigas ⁽⁴⁾		3,3	2,8
Muros ⁽⁵⁾	Armadura horizontal	4,0	3,2
	Armadura vertical	1,2	0,9

- (1) Cuantía mínima de cada una de las armaduras, longitudinal y transversal repartida en las dos caras. Para losas de orientación y zapatas armadas, se adoptará la mitad de estos valores en cada dirección dispuestos en la cara inferior.
- (2) Cuantía mínima referida a una sección rectangular de ancho b_w y canto h del forjado de acuerdo con la Figura 4.2.3.5. Esta cuantía se aplica estrictamente en los nervios y no en las zonas macizadas. Todas las viguetas deben tener en la cabeza inferior, al menos, dos armaduras activas o pasivas longitudinales simétricas respecto al plano medio vertical.
- (3) Cuantía mínima referida al espesor de la capa de compresión hormigonada in situ.
- (4) Cuantía mínima correspondiente a la cara de tracción. Se recomienda disponer en la cara opuesta una armadura mínima igual al 30% de la consignada.
- (5) La cuantía mínima vertical es la correspondiente a la cara de tracción. Se recomienda disponer en la cara opuesta una armadura mínima igual al 30% de la consignada. A partir de los 2,5 m de altura del fuste del muro y siempre que esta distancia no sea menor que la mitad de la altura del muro podrá reducirse la cuantía horizontal a un 2%. En el caso en que se dispongan juntas verticales de contracción a distancias no superiores a 7,5 m, con la armadura horizontal ininterrumpida, las cuantías geométricas horizontales mínimas pueden reducirse al 2%. La armadura mínima horizontal deberá repartirse en ambas caras. Para muros vistos por ambas caras debe disponerse el 50% en cada cara. En el caso de muros con espesores superiores a 50 cm, se considerará un área efectiva de espesor máximo 50 cm distribuidos en 25 cm a cada cara, ignorando la zona central que queda entre estas capas superficiales.
- (6) En el caso de elementos pretensados, la armadura activa podrá tenerse en cuenta en relación con el cumplimiento de las cuantías geométricas mínimas sólo en el caso de las armaduras pretensas que actúen antes de que se desarrolle cualquier tipo de deformación térmica o reológica.

Taula 17. Taula amb els valors del paràmetre de necessari pel càlcul de la quantia geomètrica.

Per tant, considerant un element estructural de tipus pila, s'obté que l' Δs és:

$$\Delta s = \frac{\omega_g}{1000} \cdot A_c = \frac{4}{1000} \cdot 17671.46 \text{cm}^2 = 70.7 \text{cm}^2$$

Fets ambdós càlculs d'armadura mínima es pot concloure que l'àrea d'acer necessària és la calculada amb la quantia geomètrica i són 70.7 cm^2 .

6.2.2 Dimensionament final

En l'apartat anterior s'han realitzat un sèrie de verificacions per tal d'obtenir el dimensionament dels pilots pel sistema de càrregues existent. Per tant, el dimensionament que s'utilitzarà en els posteriors apartats de la present tesina serà el següent:

	D[m]	L _{soterrada} [m]	L _{total} [m]
1a fila de pilots	1.5	20.40	28.9
2a fila de pilots	1.5	21.70	30.2
3a fila de pilots	1.5	22.97	31.47

Taula 18. Taula amb les dimensions del pilot.

6.3 Anàlisi d'estabilitat

A continuació es mostra el model realitzat amb *Plaxis 8.2* del moll amb els pilots i les accions externes actuants. Com l'anàlisi es realitza en 2D i es vol estudiar el comportament que tindria el moll considerant una pantalla de pilots en 3D, per poder comparar els resultats amb el programa *Plaxis 3D Foundations*, els termes $E \cdot A$, $E \cdot I$ i w (pes del pilot) es dividiran entre la distància entre pilots d'una mateixa fila (d'un mateix ganivet de pilots). Aquesta s'ha considerat de 5 metres.

En aquest apartat s'ha decidit estudiar dos processos constructius diferents per poder analitzar la influència que tenen en els factors de seguretat i moviments calculats. La diferència principal entre ambdós processos és, que mentre que en el procés constructiu A els pilots s'executen abans del moll i per tant aquests estan afectats pels moviments provocats per la construcció d'aquest, en el procés constructiu B, els pilots s'executen després de que es completi la primera i la que més material aporta de les fases del moll. En aquest mateix procés s'aplicarà una precàrrega de 80 kN/m^2 abans de l'execució dels pilots.

Respecte al càlcul del factor de seguretat, just abans d'implementar la fase de càlcul corresponent, s'ha decidit canviar el material de la part més externa del talús per un formigó que té les característiques següents:

Identificació	Model	Tipus	γ_{unsat} [kN/m ³]	E [kN/m ²]	ν	R_{int}
Formigó de protecció a una zona superficial del talús.	Linear-Elastic	Non-Porous	25	$3 \cdot 10^7$	0.2	0.67

Taula 19. Taula amb el model constitutiu i paràmetres utilitzats en el formigó de protecció.

Amb aquesta idea, es pretén que el factor de seguretat calculat no estigui associat a una possible trencada superficial del talús i per tant que sigui el factor de seguretat associat a una possible superfície de lliscament profunda que es pugui produir.

Pels dos processos constructius s'han analitzat dos casos.

1. Càlcul del factor de seguretat sense considerar la càrrega sobre la superfície de l'esplanada. D'aquesta manera es vol estudiar el factor de seguretat obtingut amb les càrregues utilitzades en el dimensionament dels pilots.
2. Aplicació de totes les càrregues externes que actuen en el sistema. D'aquesta forma es pretén estudiar a més del factor de seguretat existent en el problema global, els assentaments de l'esplanada i els desplaçaments horitzontals dels pilots produïts per aquesta càrrega.

6.3.1 Models constitutius i paràmetres dels elements estructurals

A la taula següent es mostren els paràmetres i models constitutius dels pilots i de la llosa de formigó utilitzats pel càlcul i modelitzats com elements tipus *plate*.

Identificació	Model	D [m]	A [m ²]	I [m ⁴]	E [kN/m ²]	E*A /5 [kN]	E*I/5 [kN/m ²]	v	γ [kN/m ³]	w/5 [KN]
Pilot	Elàstic	1.5	1.77	0.25	30*10 ⁶	10602875.2	1491029.3	0.2	25	8.84
Llosa de formigó	Elàstic	---	1.5	0.28	30*10 ⁶	45000000.0	8437500.0	0.2	23.3	34.95

Taula 20. Taula amb el model constitutiu i paràmetres utilitzats en els pilots i llosa de formigó.

6.3.2 Fases de càlcul implementades.

A continuació és mostra una taula amb les fases de càlcul implementades en cadascun del processos constructius simulats. Tots els *staged of construction* són plàstics i ignorant el comportament no drenat.

- **Procés constructiu A. Casos 1 i 2.**

Fase	Tipus de Fase	Descripció
1	<i>Staged of construction</i>	Execució de la primera fila de pilots
2	<i>Staged of construction</i>	Execució de la segona fila de pilots
3	<i>Staged of construction</i>	Execució de la tercera fila de pilots
4	<i>Staged of construction</i>	Execució de la primera tongada horitzontal de material del moll
5	<i>Staged of construction</i>	Execució de la segona tongada horitzontal de material del moll
6	<i>Staged of construction</i>	Execució de la tercera tongada horitzontal de material del moll
7	<i>Staged of construction</i>	Execució de la quarta tongada horitzontal de material del moll
8	<i>Staged of construction</i>	Construcció de la llosa de formigó
9	<i>Staged of construction</i>	Aplicació de la càrrega horitzontal i la càrrega sobre la llosa
10	<i>Phi-c reduction</i>	Càlcul del factor de seguretat amb formigó a la part superficial (cas 1)
11	<i>Staged of construction</i>	Activació de la càrrega de l'esplanada
12	<i>Phi-c reduction</i>	Càlcul del factor de seguretat amb formigó a la part superficial (cas 2)

Taula 21. Taula amb les fases de càlcul implementades pel procés constructiu A.

- **Procés Constructiu B. Casos 1 i 2.**

Fase	Tipus de Fase	Descripció
1	<i>Staged of construction</i>	Execució de la primera tongada horitzontal de la primera fase del moll
2	<i>Staged of construction</i>	Execució de la segona tongada horitzontal de la primera fase del moll
3	<i>Staged of construction</i>	Execució de la tercera tongada horitzontal de la primera fase del moll
4	<i>Staged of construction</i>	Execució de la quarta tongada horitzontal de la primera fase del moll
5	<i>Staged of construction</i>	Aplicació d'una precàrrega de 80 kN/m ²
6	<i>Staged of construction</i>	Desactivació de la precàrrega
7	<i>Staged of construction</i>	Execució de la primera fila de pilots
8	<i>Staged of construction</i>	Execució de la segona fila de pilots
9	<i>Staged of construction</i>	Execució de la tercera fila de pilots
10	<i>Staged of construction</i>	Execució de la primera tongada horitzontal de la segona fase del moll
11	<i>Staged of construction</i>	Execució de la segona tongada horitzontal de la segona fase del moll
12	<i>Staged of construction</i>	Execució de la tercera tongada horitzontal de la segona fase del moll
13	<i>Staged of construction</i>	Execució de la quarta tongada horitzontal de la segona fase del moll
14	<i>Staged of construction</i>	Construcció de la llosa de formigó
15	<i>Staged of construction</i>	Aplicació de la càrrega horitzontal i la càrrega sobre la llosa
16	<i>Phi-c reduction</i>	Càlcul del factor de seguretat amb formigó a la part superficial (cas 1)
17	<i>Staged of construction</i>	Activació de la càrrega sobre l'esplanada
18	<i>Phi-c reduction</i>	Càlcul del factor de seguretat amb formigó a la part superficial (cas 2)

Taula 22. Taula amb les fases de càlcul implementades pel procés constructiu B.

6.3.3 Resultats obtinguts

A continuació es mostren els resultats obtinguts pels dos processos constructius implementats.

El criteri de signes utilitzat és el següent: assentaments positius, desplaçaments cap a la dreta positius i moments flectors de tracció i compressió, positius i negatius respectivament.

6.3.1.1 Resultats obtinguts en ambdós processos constructius i discussió de resultats

En aquest apartat es realitzarà una comparativa dels moviments i esforços dels pilots i dels factors de seguretat calculats pels dos mètodes constructius. Com ja s'ha comentat a l'inici d'aquest apartat, la diferència bàsica que existeix entre ambdós processos és el moment d'execució dels pilots. En el primer procés constructiu els pilots s'executen abans del moll i en el segon, els pilots s'excaven amb una part del moll ja executada. Això fa que els moviments que pateixen els pilots durant el procés constructiu B siguin menors, a priori, que pel procés A.

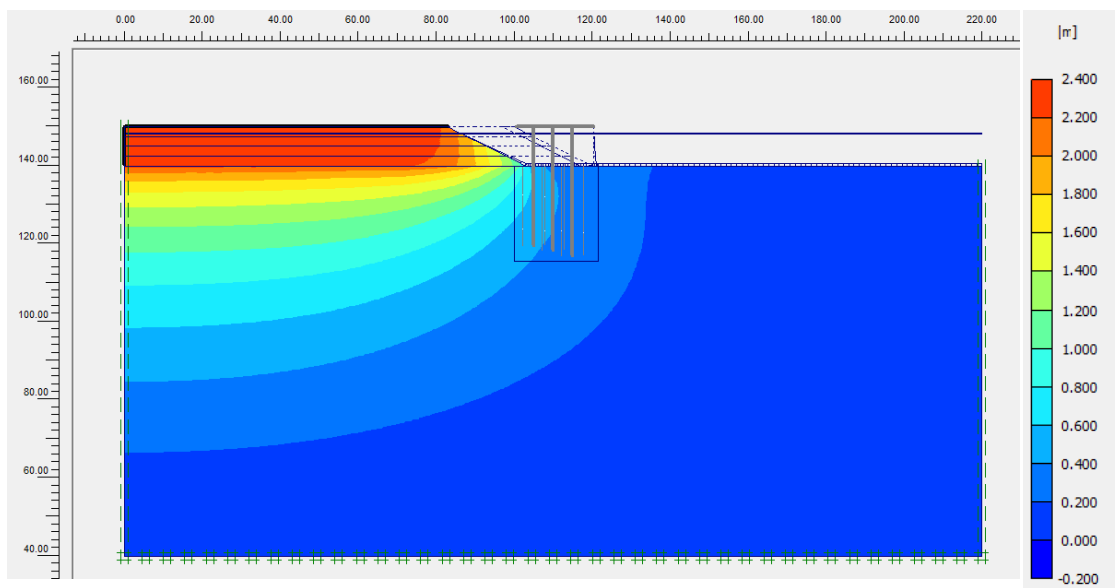
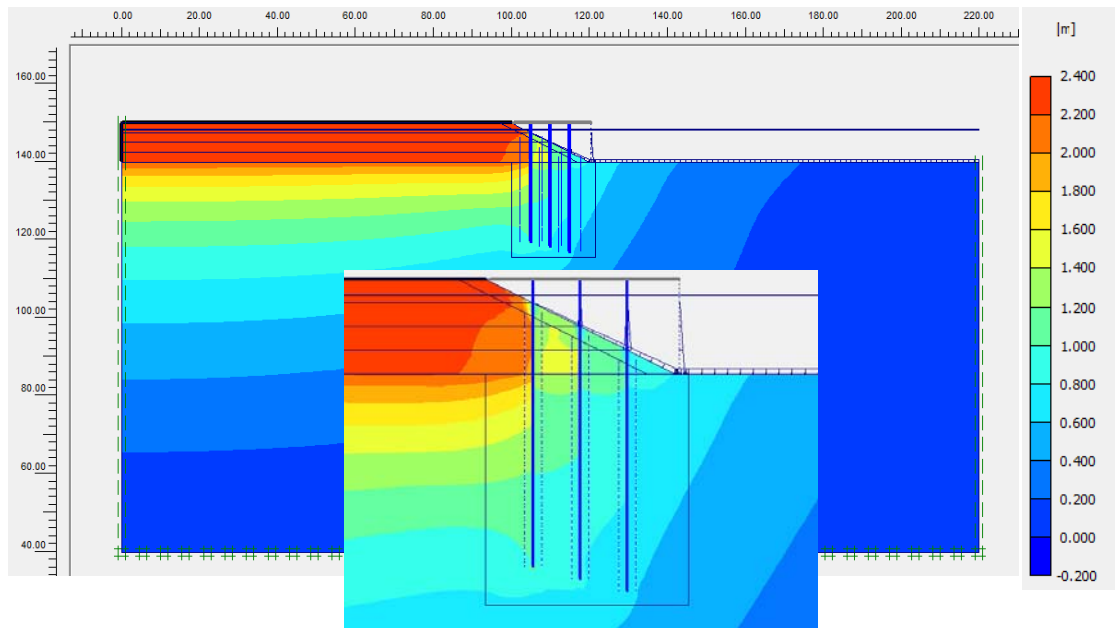


Figura 26. Desplaçaments totals. La figura superior correspon al procés constructiu A on els pilots s'han executat abans del moll. La figura inferior correspon al procés constructiu B on una part del moll no està construïda, s'ha aplicat una precàrrega i els pilots encara no s'han executat.

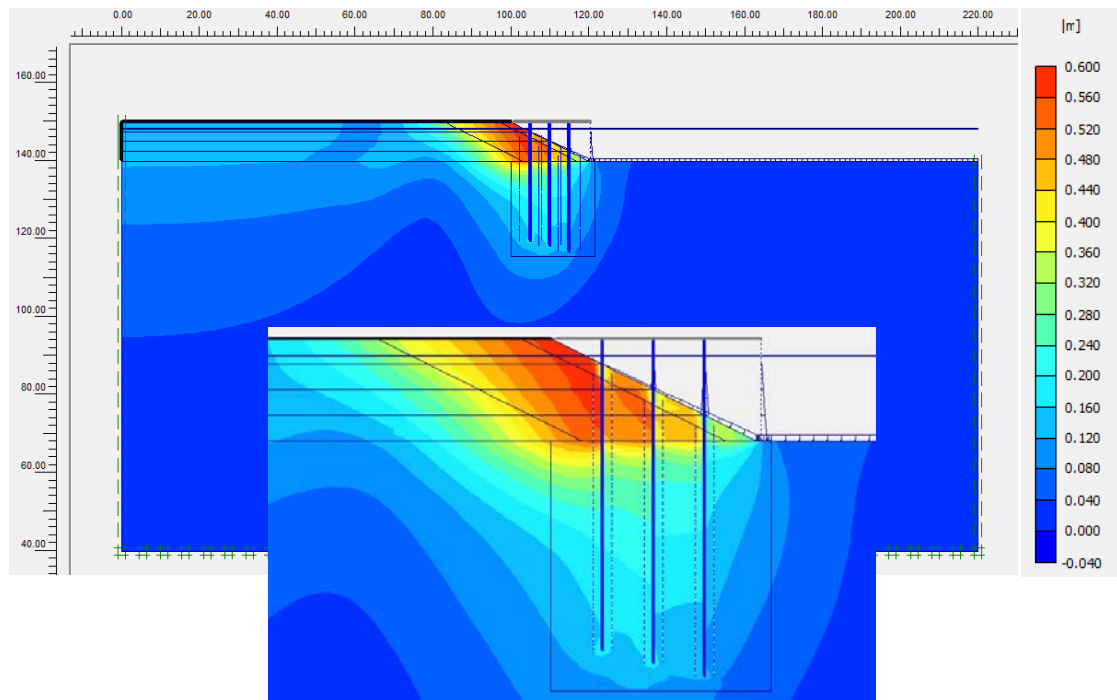


Figura 27. Desplaçaments totals del procés B amb el moll completament executat. Abans de l'execució de la primera fila de pilots s'ha imposat el desplaçament a zero.

S'ha imposat que el desplaçament sigui zero a la fase d'execució de la primera fila de pilots al procés constructiu B, per poder analitzar els desplaçaments que pateixen els pilots independentment dels desplaçaments existents durant la construcció de la primera part del moll.

L'aplicació d'una precàrrega al procés constructiu B, fa que al treure-la el terreny experimenti un aixecament per alliberament de tensions. Aquesta precàrrega té l'objectiu de sobreconsolidar el terreny de la part del moll on s'ha aplicat i per tant fer que un vegada es construeixi el moll en la seva totalitat i s'apliqui la càrrega real sobre l'esplanada, la trajectòria d'un punt del terreny per sota la precàrrega segueixi un tram de la branca de pendent k del gràfic deformació volumètrica versus tensió efectiva mitja (veure figura 13 de l'apartat 4.1.1) i per tant pateixi menys assentament.

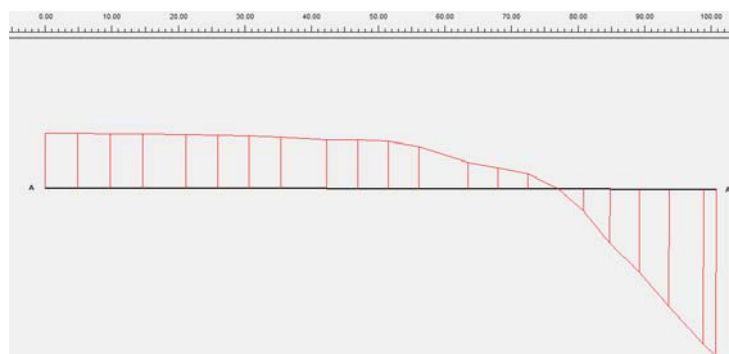
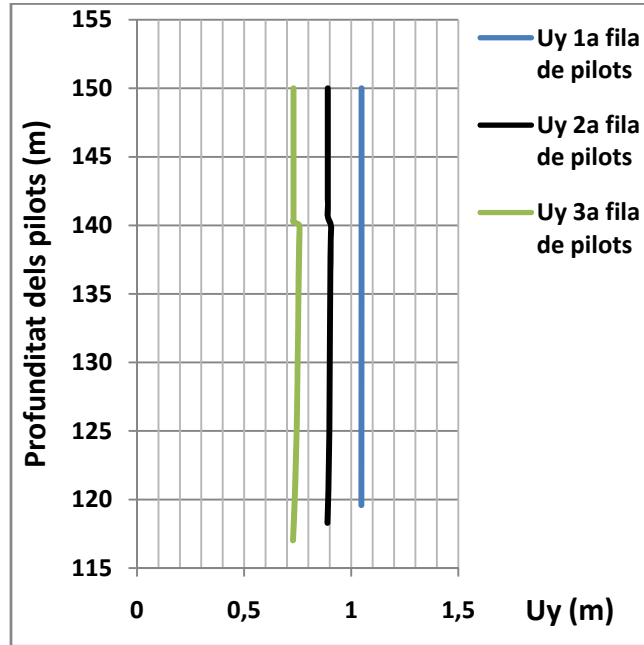
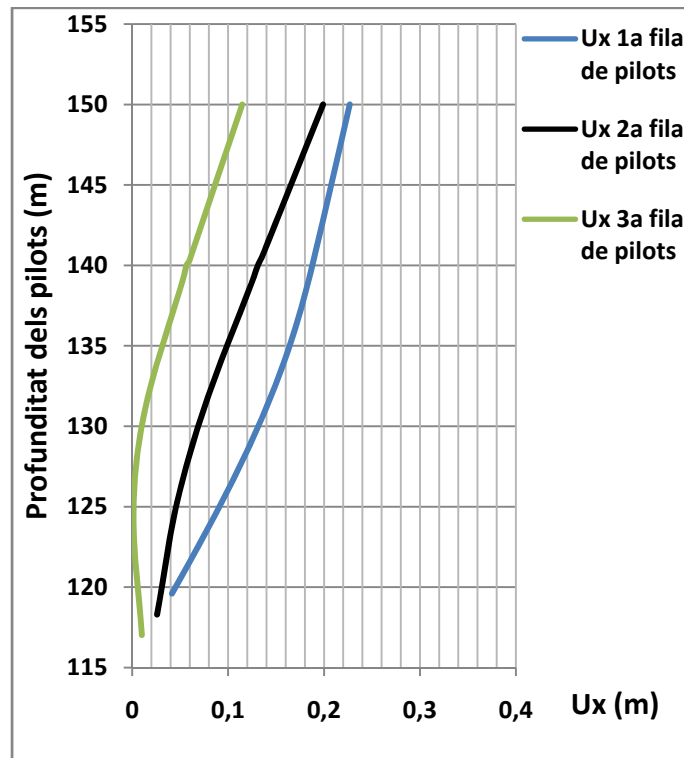


Figura 28. Desplaçaments verticals a la part superior del moll un cop extreta la precàrrega i amb el moll completament construït. S'observa com a la zona on s'ha aplicat la precàrrega s'ha produït un aixecament del terreny de 15 cm i a la zona on no, un assentament de 44 cm.

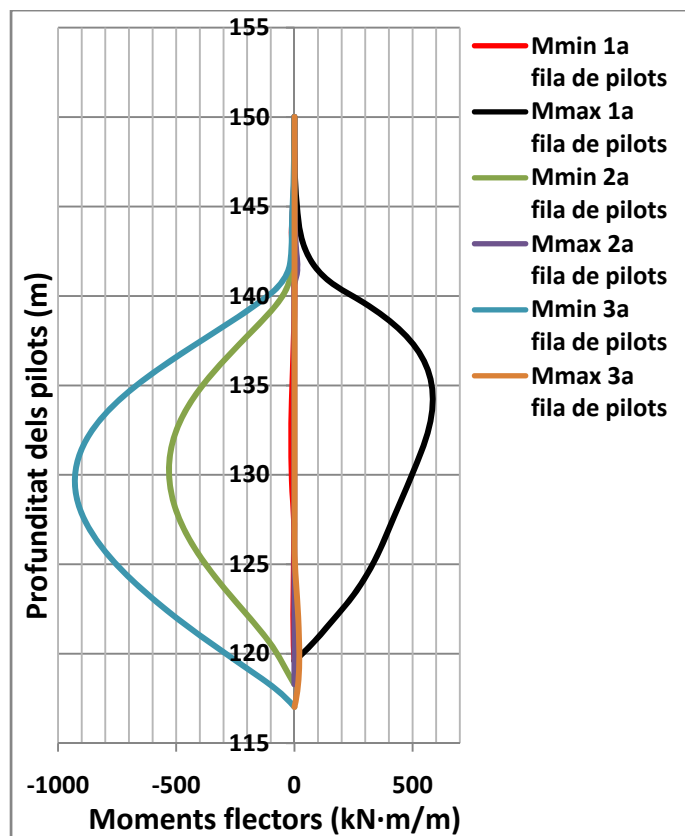
A continuació es mostren els desplaçaments verticals, horitzontals i moments flectors de cadascuna de les files de pilots pels dos processos constructius aplicats. Les figures corresponen a la fase de càlcul on el moll ja s'ha executat en la seva totalitat i encara no s'han aplicat les càrregues.



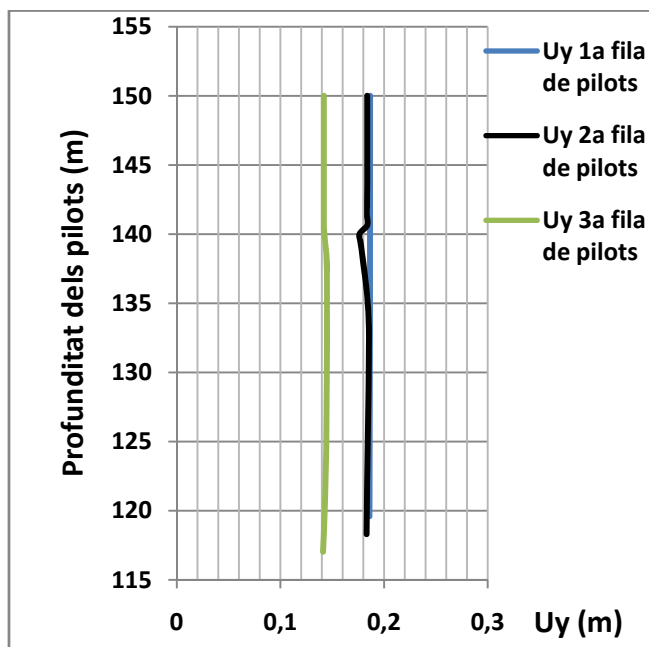
Gràfica 5. Desplaçaments verticals de les tres files de pilots pel procés constructiu A sense l'aplicació de les càrregues.



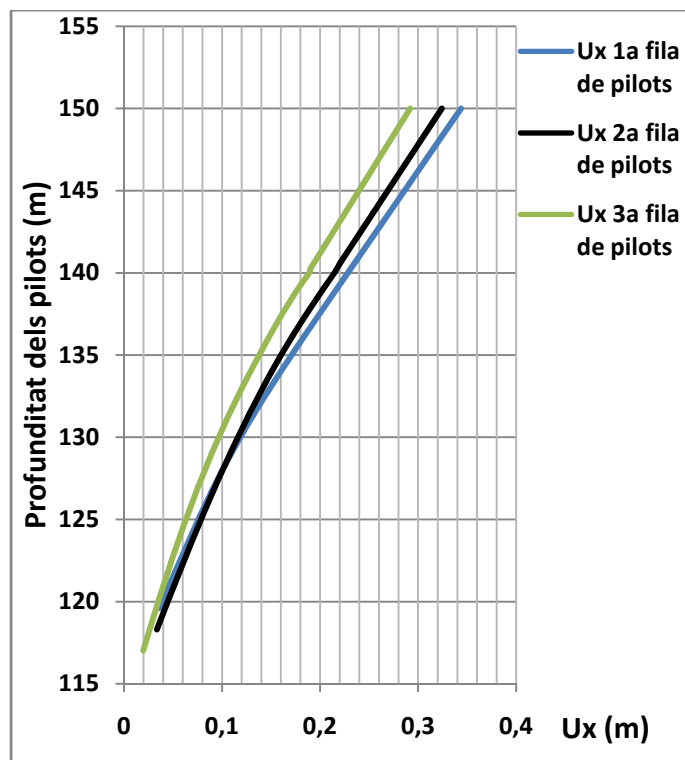
Gràfica 6. Desplaçaments horitzontals de les tres files de pilots pel procés constructiu A sense l'aplicació de les càrregues.



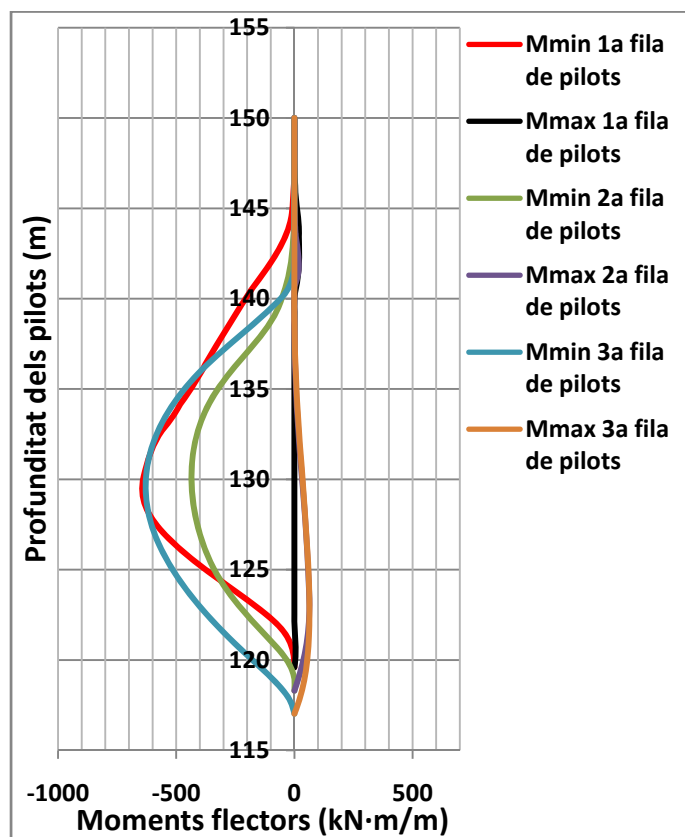
Gràfica 7. Envolupants de moments flectors de les tres files de pilots pel procés constructiu A sense l'aplicació de les càrregues.



Gràfica 8. Desplaçaments verticals de les tres files de pilots pel procés constructiu B sense l'aplicació de les càrregues.



Gràfica 9. Desplaçaments horitzontals de les tres files de pilots pel procés constructiu B sense l'aplicació de les càrregues.



Gràfica 10. Envolupants de moments flectors de les tres files de pilots pel procés constructiu B sense l'aplicació de les càrregues.

A continuació es mostra una taula amb els valors màxims obtinguts de desplaçament horitzontal, vertical i moment flector pels dos processos constructius.

	Procés constructiu A				Procés constructiu B			
	U _x [cm]	U _y [cm]	M _{màx} [kN·m/m]		U _x [cm]	U _y [cm]	M _{màx} [kN·m/m]	
			Negatiu	Positiu			Negatiu	Positiu
1a f. pilots	22.7	100.0	-13.9	585.5	34.4	18.6	-642.5	20
2a f. pilots	19.9	90.5	-530.7	12.5	32.4	18.5	-434.9	63.4
3a f. pilots	11.4	75.7	-928.5	20.7	29.2	14.4	-629.5	64.1

Taula 23. Taula amb els valors màxims obtinguts amb el moll completament executat sense l'aplicació de les càrregues

Seguidament s'analitzen alguns dels resultats observats.

- S'observa en les gràfiques de desplaçament horitzontal com tant en el procés constructiu A com en el B els pilots pateixen un flexió que es fa més marcada a mesura que la distància al cap del talús augmenta, degut possiblement a que els pilots tenen major longitud exenta. Una altre característica, és el comportament de la primera fila de pilots del procés A, respecte la resta de files en ambdós processos. Aquest comportament diferencial queda després reflectit en el signe de moments màxims en les envolupants de moments flectors.

Respecte als valors de desplaçament horitzontal, s'observa com aquests són menors en el procés constructiu A que en el B. L'explicació pot residir en la influència que té la construcció de la segona part del moll del procés B afectant de forma més directa als pilots. Una característica comuna a ambdós processos és la disminució dels desplaçaments horitzontals dels pilots conforme la distància a la capçalera del talús augmenta. Aquest comportament és lògic ja que ens allunyem de la zona d'influència de moviments horitzontals.

- Pel que fa als desplaçaments verticals, en el procés A els assentaments es situen entre 75 i 100 cm mentre que en el procés B entre 30 i 35 cm. Aquest diferència és deguda a l'ordre d'execució dels pilots. En el procés A els pilots estan influenciats pels moviments del moll en la seva totalitat, mentre que en el procés B els pilots només pateixen els moviments de la segona part de l'execució del moll. Una característica comuna en ambdós processos és la disminució dels assentaments dels pilots a mesura que la distància a la capçalera del talús va augmentant. Aquesta disminució és deguda, en primer lloc, a la disminució de la influència dels assentaments provocats per la construcció del talús a mesura que ens allunyem d'aquest i en segon lloc, degut al increment de la longitud soterrada dels pilots provocant una major resistència friccional i per tant uns menors assentaments. Aquest motiu probablement sigui poc influent, ja que la diferència entre longituds soterrades és petita.
- Segons la distribució d'empentes considerada per ROM0.5-05 en funció de la profunditat del talús a la superfície de lliscament, el primer pilot havia de resistir més que el segon i aquest més que el tercer, ja que aquesta profunditat disminuïa a mesura que la distància a l'inici del talús augmentava. Els moments flectors equivalents al cap

dels pilots calculats a partir d'aquestes empentes són de 514, 342 i 185 kN·m/m per la primera, segona i tercera fila de pilots respectivament. Si ara s'analitzen els resultats obtinguts amb *Plaxis 8.2*, s'observa com aquesta relació no és manté. El primer pilot té un moment màxim absolut major que el segon i aquest menor que el tercer, en ambdós processos. També s'observa que els moments flectors obtinguts a *Plaxis 8.2* són més grans.

Pel que fa a la situació dels moments màxims absoluts existeixen diferències entre el procés A i B. Al procés A, el moment màxim absolut de la primera filera de pilots es troba situat per sobre dels moments màxims absoluts de les altres dues, que tenen el moment màxim a la mateixa profunditat. Això fa pensar que el possible inici de la superfície de lliscament estigui a prop de la primera fila de pilots i per tant aquesta estigui afectada per la part superior de la superfície de lliscament mentre que les altres dos files de pilots estiguin afectades per la part més baixa d'aquesta. Pel que fa al procés B, el moment màxim es troba situat a la mateixa profunditat en les tres files de pilots i per tant es creu que la possible superfície de lliscament podria iniciar-se a una distància major que en el procés A.

L'explicació anterior pot estar relacionada amb el fet de que la primera fila de pilots del procés A, pateixi una curvatura oposada a la resta de files de pilots, en ambdós processos.

A continuació es mostren un seguit de figures corresponents a la fase de càlcul on s'han aplicat totes les càrregues menys la de l'esplanada. Amb aquestes figures, es vol estudiar el desplaçament total del terreny així com els desplaçaments i els moments flectors dels pilots, provocats per les càrregues que s'han utilitzat en el dimensionament.

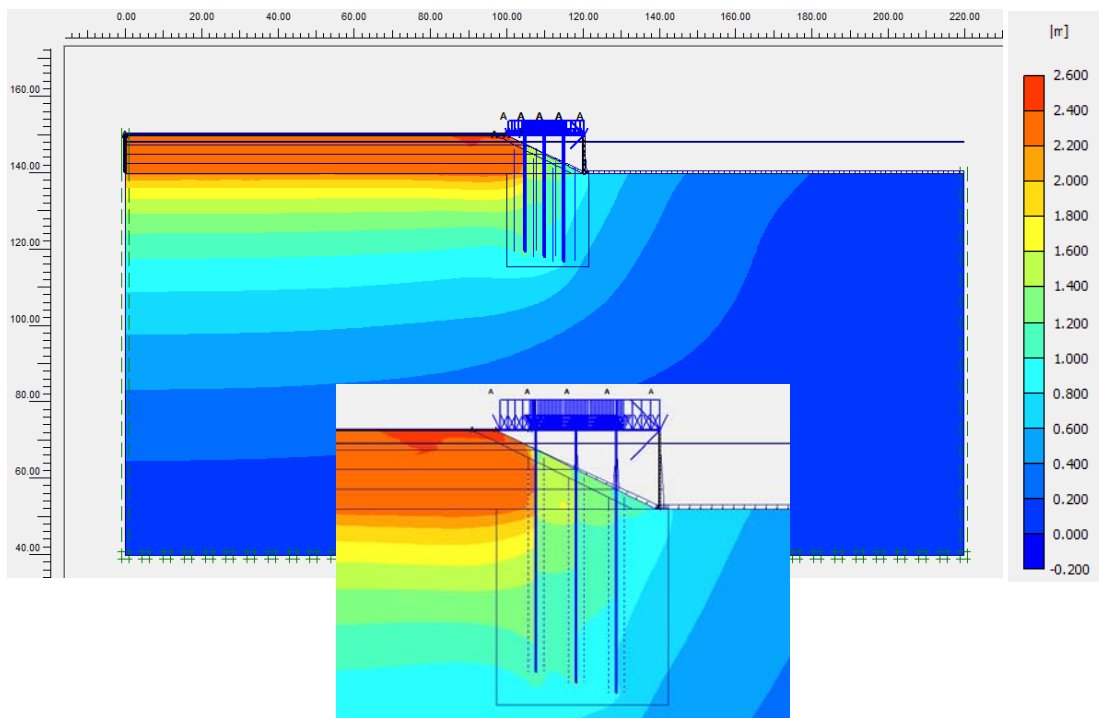


Figura 29. Desplaçaments totals pel procés constructiu A.

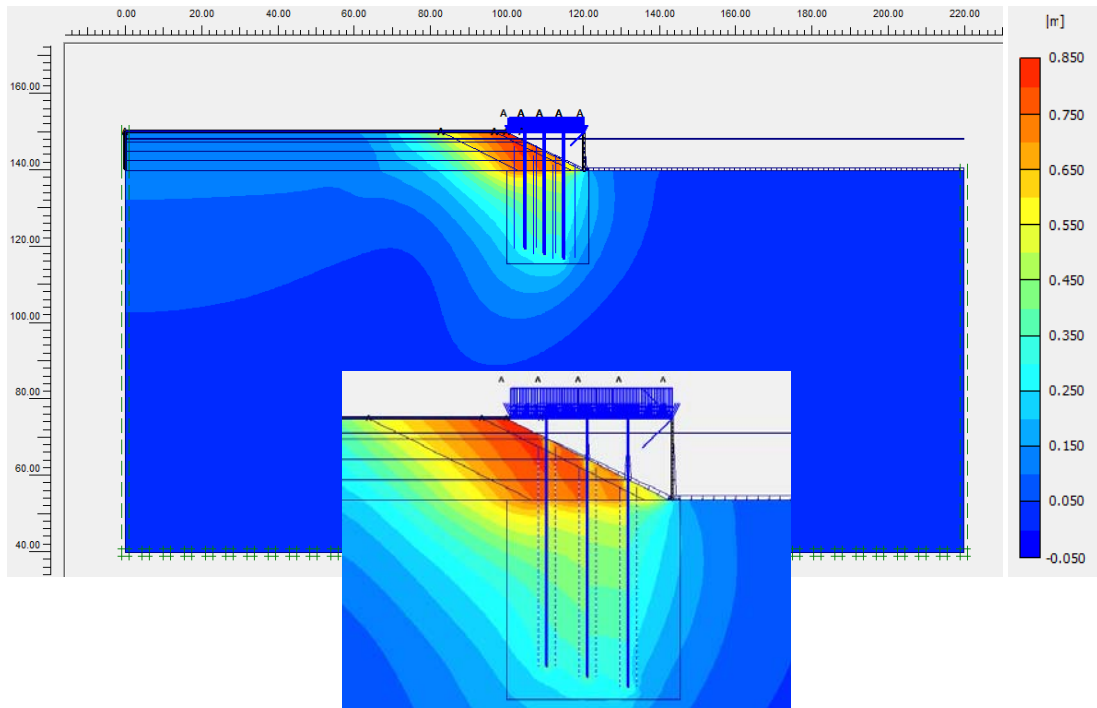
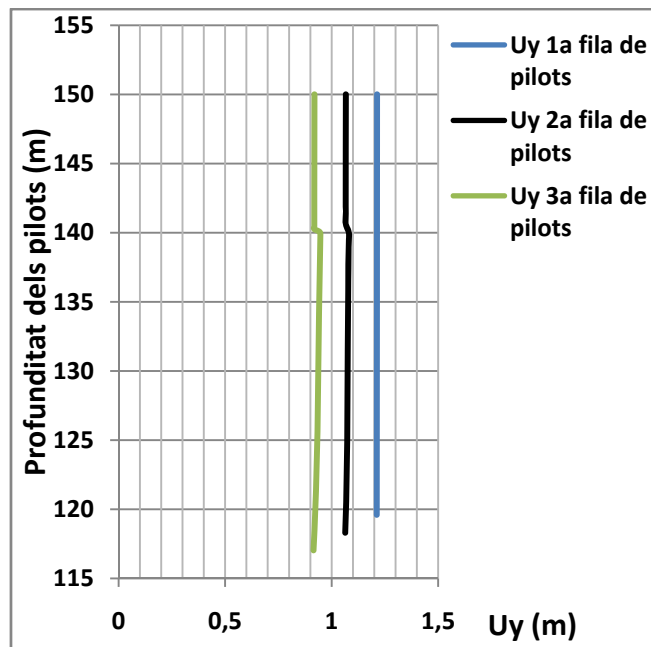
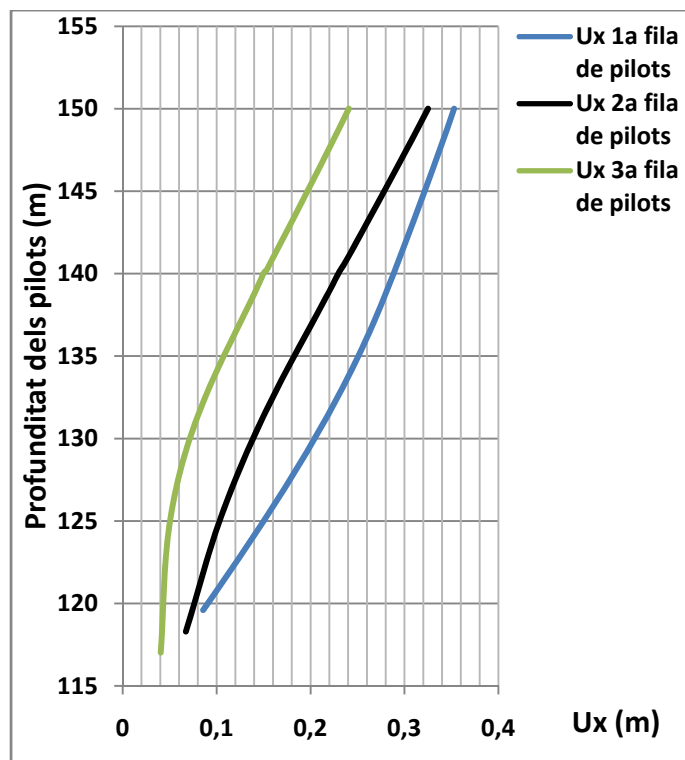


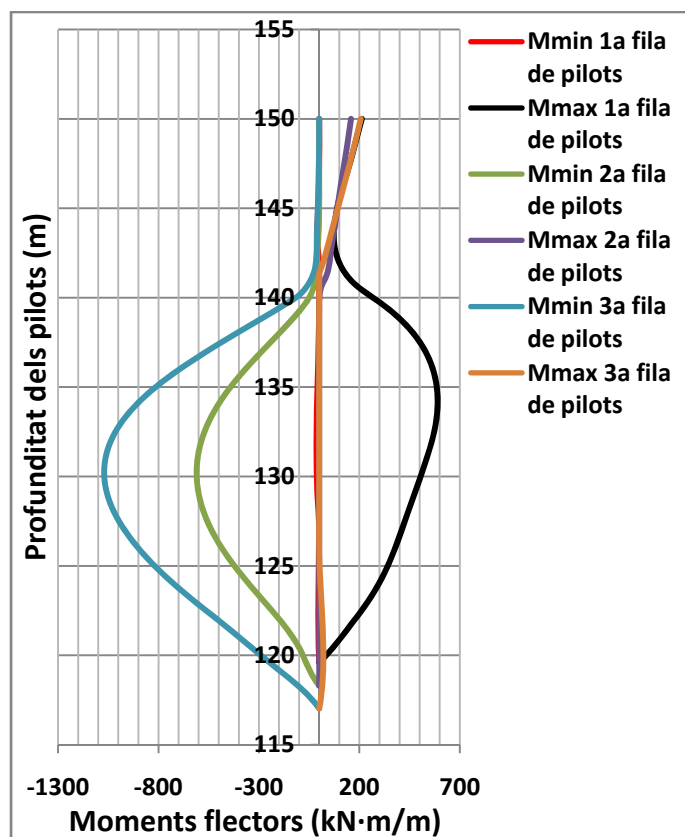
Figura 30. Desplaçaments totals pel procés constructiu B.



Gràfica 11. Desplaçaments verticals de les tres files de pilots pel procés constructiu A amb l'aplicació de les càrregues (sense considerar la de l'esplanada).



Gràfica 12. Desplaçaments horitzontals de les tres files de pilots pel procés constructiu A amb l'aplicació de les càrregues (sense considerar la de l'esplanada).



Gràfica 13. Envolupants de moments flectors de les tres files de pilots pel procés constructiu A amb l'aplicació de les càrregues (sense considerar la de l'esplanada).

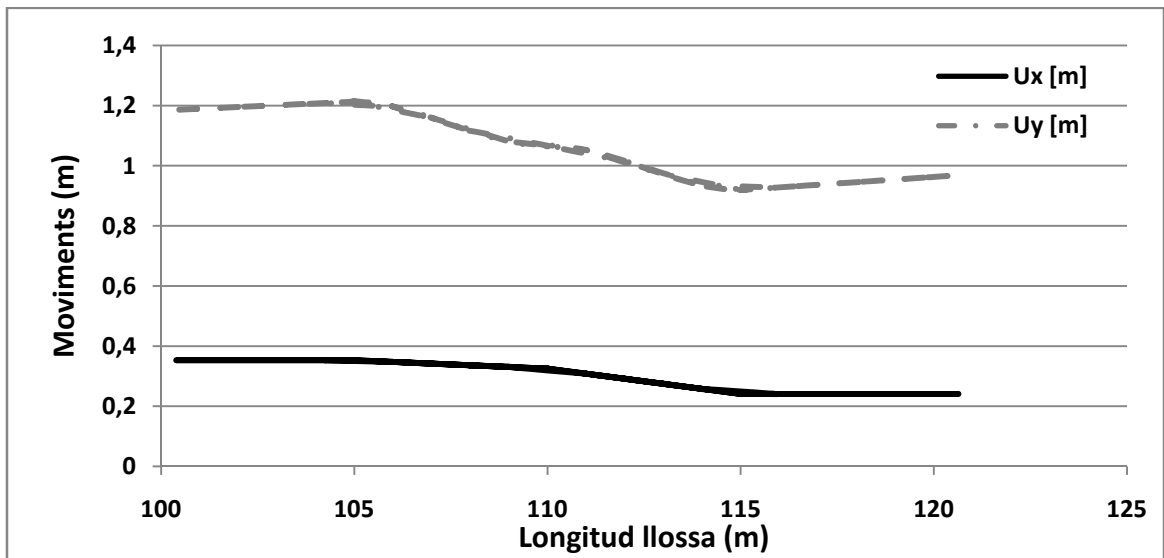
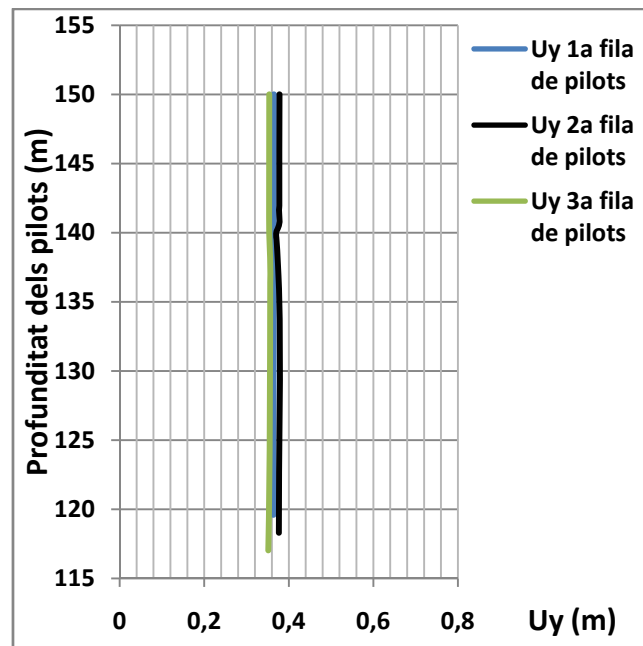
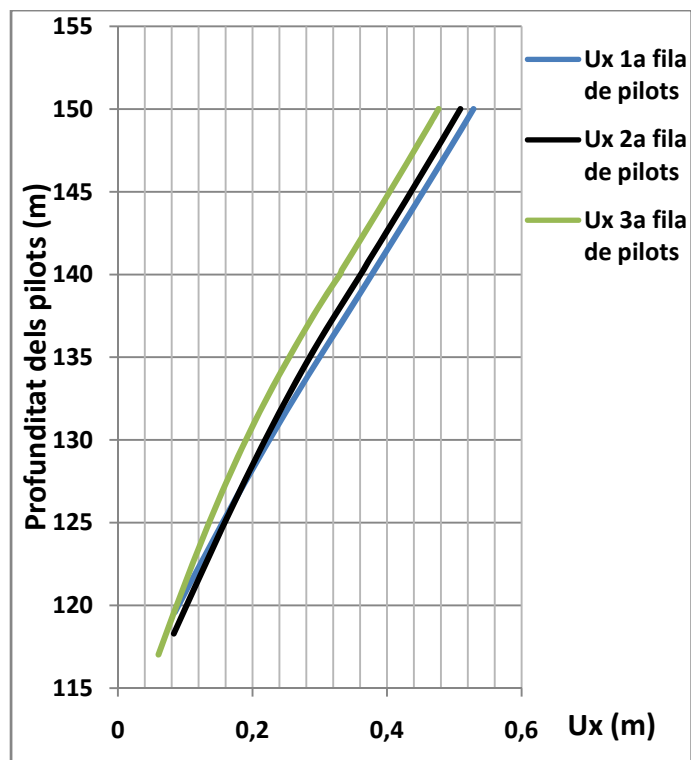


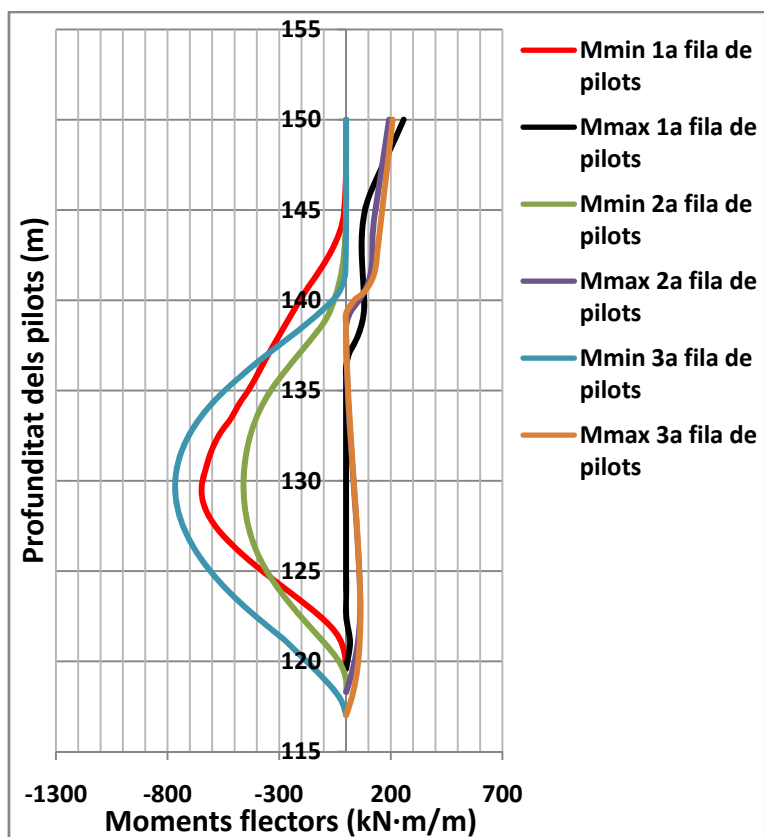
Figura 31. De dalt a baix. Desplaçaments horitzontals (màx. 35.3 cm) i desplaçaments verticals (màx. 121 cm) de la llosa de formigó en el procés constructiu A (sense considerar la de l'esplanada).



Gràfica 14. Desplaçaments verticals de les tres files de pilots pel procés constructiu B amb l'aplicació de les càrregues (sense considerar la de l'esplanada).



Gràfica 15. Desplaçaments horitzontals de les tres files de pilots pel procés constructiu B amb l'aplicació de les càrregues (sense considerar la de l'esplanada).



Gràfica 16. Envolupants de moments flectors de les tres files de pilots pel procés constructiu B amb l'aplicació de les càrregues (sense considerar la de l'esplanada).

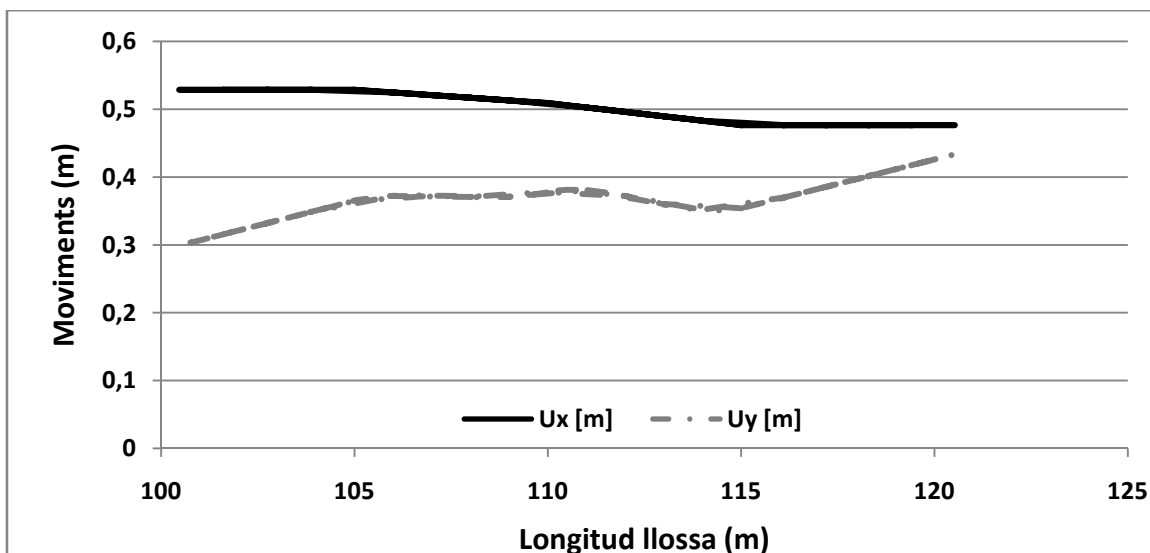


Figura 32. De dalt a baix. Desplaçaments horitzontals (màx. 52.9 cm) i desplaçaments verticals (màx. 43.3 cm) de la llosa de formigó en el procés constructiu B (sense considerar la de l'esplanada).

A continuació s'exposa una taula amb els valors de desplaçament horitzontal i vertical màxim i moment flector màxim (negatiu i positiu) abans i després de l'aplicació de les càrregues. Cal recordar que no s'ha aplicat la càrrega de l'esplanada per poder comparar els moments flectors calculats amb els dos mètodes constructius i respecte els moments màxims calculats i utilitzats en el dimensionament dels pilots.

	Procés constructiu A							
	Abans de l'aplicació de les càrregues				Després de l'aplicació de les càrregues			
	U _x [cm]	U _y [cm]	M _{màx} [kN·m/m]		U _x [cm]	U _y [cm]	M _{màx} [kN·m/m]	
			Negatiu	Positiu			Negatiu	Positiu
1a f. pilots	22.7	100.0	-13.9	585.5	35.2	121	13.9	590.6
2a f. pilots	19.9	90.5	-530.7	12.5	32.5	108	-609.8	158.8
3a f. pilots	11.4	75.7	-928.5	20.7	24.8	94.6	-1007	207
	Procés constructiu B							
	Abans de l'aplicació de les càrregues				Després de l'aplicació de les càrregues			
	U _x [cm]	U _y [cm]	M _{màx} [kN·m/m]		U _x [cm]	U _y [cm]	M _{màx} [kN·m/m]	
			Negatiu	Positiu			Negatiu	Positiu
1a f. pilots	34.4	18.6	-642.5	20	52.8	40	-438.4	258.1
2a f. pilots	32.4	18.5	-434.9	63.4	50.9	37.9	-432.4	192.7
3a f. pilots	29.2	14.4	-629.5	64.1	47.6	35.6	-766.12	208.8

Taula 24. Taula amb els valors màxims obtinguts abans i després de l'aplicació de les càrregues (sense considerar la de l'esplanada).

Seguidament s'analitzen alguns dels resultats observats.

- Respecte als desplaçaments horitzontals s'observa com l'increment en el procés constructiu A és situa entre 12.5 i 13.5 cm mentre que pel procés constructiu B és igual en els tres pilots amb 18.5 cm. A priori, es podia esperar que els increments de desplaçament fossin iguals en ambdós processos, ja que les càrregues horitzontals que s'apliquen són les mateixes. Per tant, es pot observar que el procés constructiu B és

més sensible als desplaçaments horitzontals no només en magnitud sinó també en la velocitat de creixement respecte la càrrega aplicada.

- Respecte als desplaçaments verticals s'observa com l'increment d'aquests és aproximadament constant i de valor 20 cm per les tres files de pilots i pels dos processos constructius.
- S'observa clarament com l'aplicació de la càrrega horitzontal provoca un augment del moment positiu, de valor 150-200kN·m/m en les tres files de pilots pels dos processos constructius. El fet de que la càrrega horitzontal estigui aplicada a l'extrem dret de la llosa, podria fer pensar que la tercera fila de pilots estaria més afectada per aquesta càrrega. S'ha comprovat que no és així, i això és degut a que els pilots estan units rígidament a la llosa de formigó, provocant un comportament solidari.

Si ara comparem els valors de moments màxims absoluts calculats a *Plaxis*, amb els calculats utilitzant el mètode de la ROM0.5-05 (veure taula 13 de l'apartat 6.2.1) s'observa que són semblants en la primera i segona fila de pilots mentre que en la tercera són majors els de *Plaxis*. El fet que els moments màxims absoluts siguin majors en la tercera fila de pilots, indica que la distribució d'empentes considerada pel mètode de la ROM0.5-05 no és la correcte. No és la correcte pel nou sistema de càrregues i deformacions al terreny. La ROM0.5-05 parteix d'una superfície de lliscament estàtica, de geometria constant i busca les forces que estableixen el talús amb un factor de seguretat d'1.7. Les forces tangencials que considera sempre es troben sobre la mateixa corba. En canvi, *Plaxis* va variant la geometria de possibles zones de lliscament i per tant zones on es poden desenvolupar tensions tangencials en funció de les càrregues i actuacions al terreny. Possiblement, pel sistema inicial de tensions la distribució d'empentes considerada per la ROM0.5-05 podria ser correcte però no per una situació on s'han introduït estructures i càrregues.

Una característica general que es pot apreciar en ambdós processos constructius, és que independentment dels canvis que pot produir el nou sistema de càrregues aplicat, els moviments dels pilots són deguts bàsicament a l'execució del moll i a les possibles actuacions que es faci a sobre d'ell.

A continuació és mostren dues figures amb els desplaçaments totals del terreny un cop s'aplica la càrrega sobre la superfície de l'esplanada.

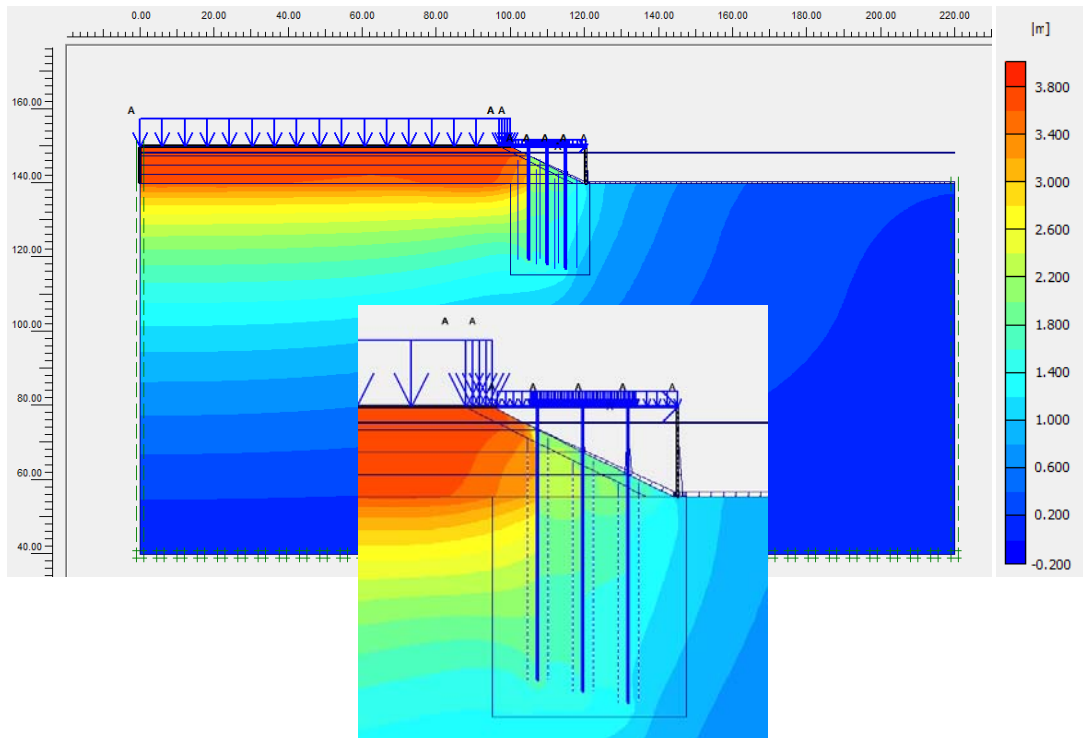


Figura 33. Desplaçaments totals del procés constructiu A amb totes les càrregues aplicades.

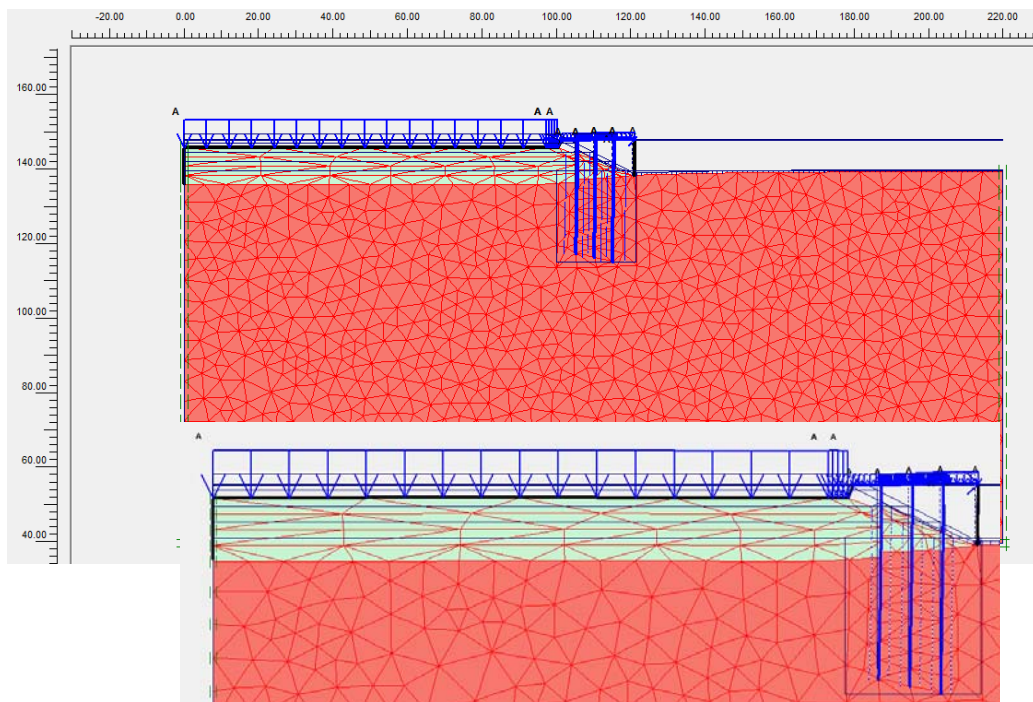


Figura 34. Malla deformada a escala real, del procés constructiu A amb totes les càrregues aplicades.

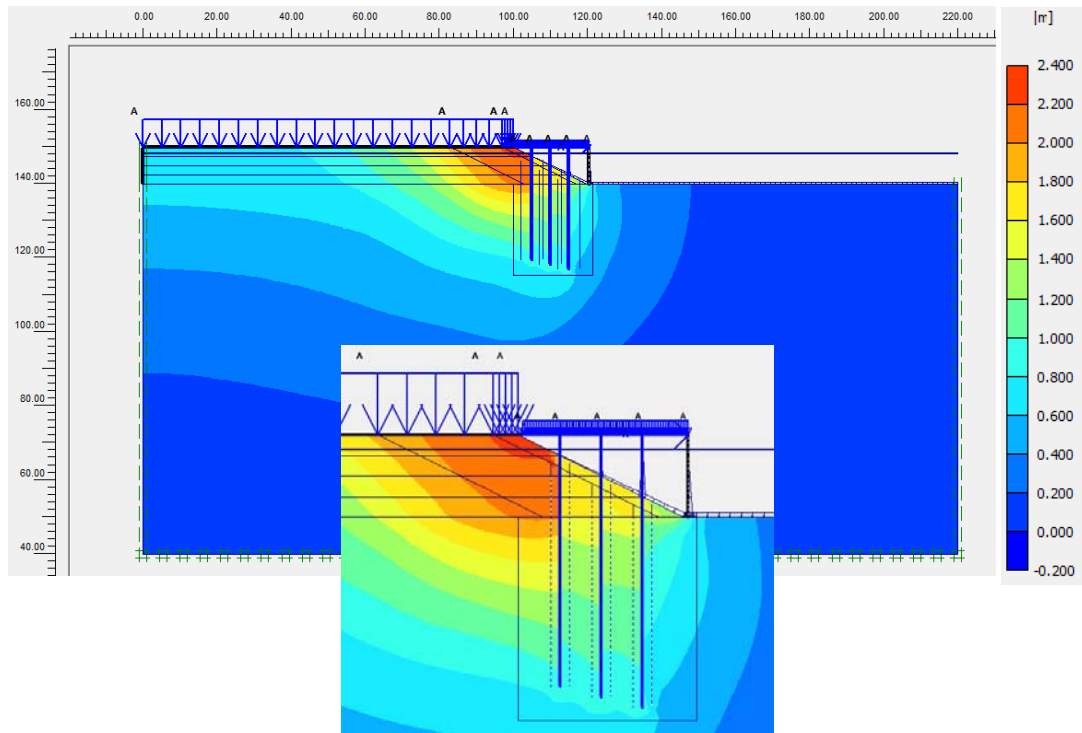


Figura 35. Desplaçaments totals del procés constructiu B amb totes les càrregues aplicades.

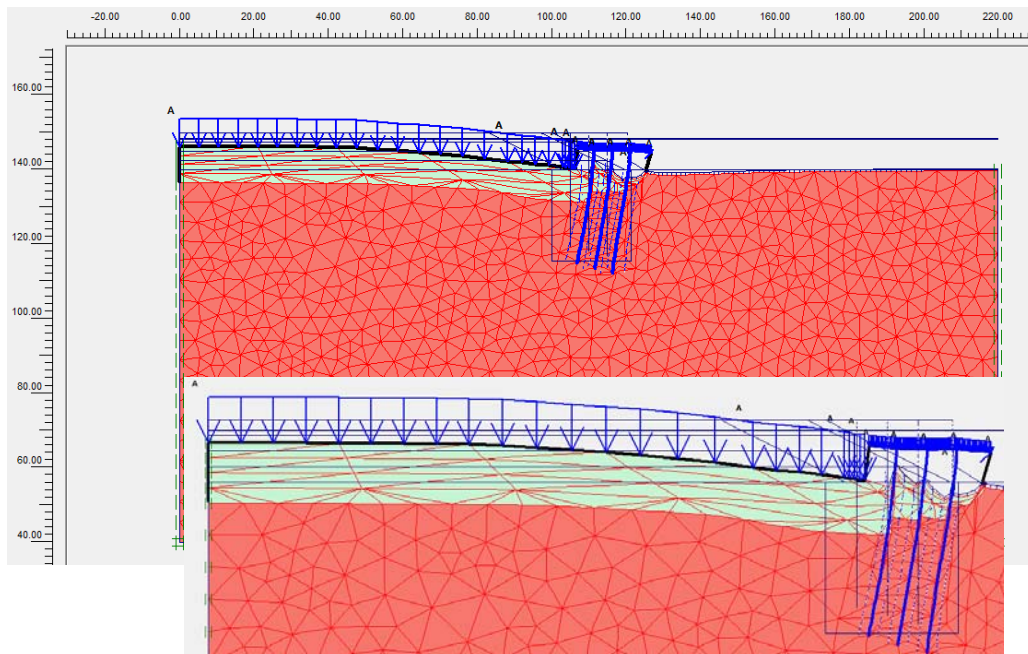


Figura 36. Malla deformada a 5 vegades l'escala real, del procés constructiu B amb totes les càrregues aplicades .

Amb aquestes quatre figures es vol mostrar la influència que té l'aplicació de la precàrrega en el procés constructiu B. Mentre que en el procés constructiu A l'aplicació de la càrrega sobre la superfície de l'esplanada provoca un increment de desplaçament d'aproximadament 1 m, en la superfície de l'esplanada en el procés B, l'increment és aproximadament de 60 cm.

Seguidament s'exposa una taula amb els valors de desplaçament horitzontal i vertical màxim i moments flectors màxims (negatius i positius) abans i després de l'aplicació de la càrrega sobre la superfície de l'esplanada.

Procés constructiu A								
Abans de l'aplicació de la càrrega sobre la superfície de l'esplanada					Després de l'aplicació de la càrrega sobre la superfície de l'esplanada			
	U _x [cm]	U _y [cm]	M _{màx} [kN·m/m]		U _x [cm]	U _y [cm]	M _{màx} [kN·m/m]	
			Negatiu	Positiu			Negatiu	Positiu
1a f. pilots	35.2	121	-13.9	590.6	71.5	179	-13.9	2302
2a f. pilots	32.5	108	-609.8	158.8	68.7	162	-609.8	1552
3a f. pilots	24.8	94.6	-1007	207	60.2	146	-1027.5	2540
Procés constructiu B								
Abans de l'aplicació de la càrrega sobre la superfície de l'esplanada					Després de l'aplicació de la càrrega sobre la superfície de l'esplanada			
	U _x [cm]	U _y [cm]	M _{màx} [kN·m/m]		U _x [cm]	U _y [cm]	M _{màx} [kN·m/m]	
			Negatiu	Positiu			Negatiu	Positiu
1a f. pilots	52.8	40	-438.4	258.1	131	92.5	-646.16	1980
2a f. pilots	50.9	37.9	-432.4	192.7	129	95.3	-459.5	1770
3a f. pilots	47.6	35.6	-766.12	208.8	126	94.7	-959.3	2610

Taula 25. Taula amb els valors màxims obtinguts abans i després de l'aplicació de la càrrega sobre l'esplanada.

Seguidament s'analitzen alguns dels resultats observats.

- Dels valors de desplaçament horitzontal de la taula anterior es pot extreure que el comportament amb el nou sistema de càrregues continua sent el mateix. La càrrega aplicada té major influència en els desplaçaments horitzontals al procés constructiu B, ja que la relació d'increments entre un procés i l'altre és d'aproximadament del doble. A les figures 34 i 36, s'observa com la malla deformada en el procés constructiu A pateix un desplaçament uniforme i amb component únicament vertical en tota la longitud del moll. D'altra banda, en el procés constructiu B s'observa que el desplaçament ja no és únicament vertical i existeix una component de desplaçament horitzontal elevada. Abans de l'aplicació de les càrregues ja s'havia comprovat que els pilots al procediment B eren molt més sensibles a patir desplaçaments horitzontals. Aquest comportament es va justificar considerant que la construcció de la segona part del moll afectava de forma més directa als pilots. El fet que una vegada aplicades les càrregues també pateixi més desplaçament horitzontal el procés B, es deu a la precàrrega considerada. La precàrrega no es va aplicar a tot el moll i per tant els assentaments d'aquest no són uniformes en tota la seva longitud. Això provoca que la part precarregada assenti menys i per tant es produeixi una "flexió" del moll que origina una major empenta sobre els pilots i un major desplaçament horitzontal d'aquests.
- Pel que fa als desplaçaments verticals, aquests s'incrementen en 50-60 cm aproximadament en els dos processos.

- Respecte als valors dels moments màxims absoluts, aquests són amb signe positiu indicant moments màxims de tracció.

Una vegada s'han analitzat els desplaçaments totals del terreny i els desplaçaments horitzontals, verticals i moments màxims dels pilots, es procedeix a mostrar els factors de seguretat obtinguts pels dos processos constructius i per cada cas d'estudi. Es recorda, que el primer cas d'estudi correspon al factor de seguretat associat a l'aplicació de totes les càrregues menys la de l'esplanada i el segon cas considerant la càrrega de l'esplanada. Per realitzar aquest càlcul es va imposar que la trencada no fos superficial, establint que la part més superficial de la pendent del talús fos de formigó. Això es va fer perquè s'havia comprovat que considerant el tot-u, el factor de seguretat era petit i estava associat a una trencada molt localitzada i puntual. Al considerar el formigó es pensava que el factor de seguretat augmentaria i estaria associat a una trencada més profunda i per tant més perillosa des d'un punt de vista d'estabilitat global. Tot i això, tampoc el formigó va permetre que la trencada estigués associada a una superfície de lliscament, encara que si va augmentar el factor de seguretat. D'altra banda, va permetre que es comencés a apreciar una possible superfície de lliscament. Per tant, els factors de seguretat que es mostren a la següent taula no estan associats a una possible superfície de lliscament però es pot afirmar que el factor de seguretat d'aquesta possible superfície de trencada sempre serà més gran o com a mínim igual, als mostrats a continuació.

	Procés constructiu A	Procés constructiu B
Cas 1 (sense la càrrega de l'esplanada)	2.40	1.70
Cas 2 (amb la càrrega de l'esplanada)	1.60	1.38

Taula 26. Taula amb els factors de seguretat pels dos casos d'estudi i pels dos processos constructius.

Clarament s'observa com el procés constructiu B té uns factors de seguretat associats menors als del procés constructiu A. Aquest fet, es creu que és conseqüència dels desplaçaments horitzontals majors que existeixen aplicant aquest procediment.

Com tots els factors de seguretat de la taula estan associats a una mateix tipus de trencada, s'ha decidit mostrar només la figura corresponent al cas 2 del procés constructiu B. També en aquest cas i procés, és on es comença a desenvolupar la possible superfície de lliscament. Aquesta superfície de lliscament s'activa degut a la càrrega sobre la superfície de l'esplanada, ja que abans de l'aplicació d'aquesta càrrega no es pot observar cap indicatiu de formació d'aquesta superfície. Per tant, la figura següent mostra l'increment de les deformacions tangencials entre l'abans i el després de l'aplicació de la càrrega de l'esplanada.

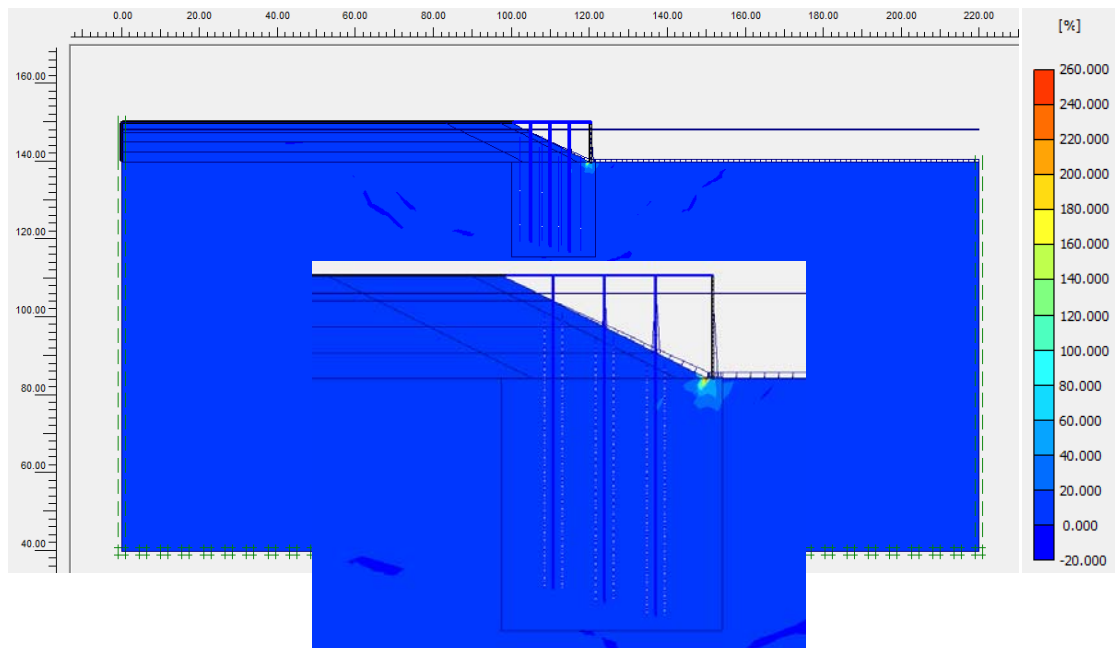


Figura 37. % d'increment de les deformacions de tall mostrant la trencada puntual i localitzada del cas 2 del procés constructiu B.

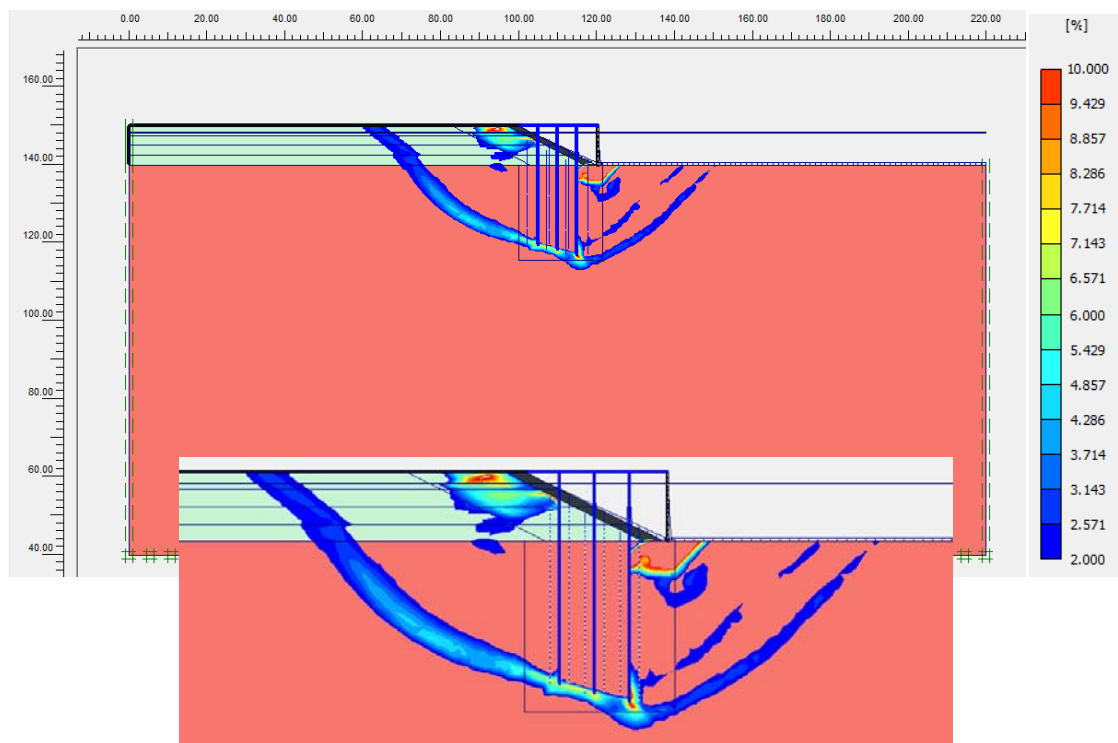


Figura 38. % d'increment de les deformacions de tall provocats per l'aplicació de la càrrega de l'esplanada al cas 2 del procés constructiu B i superfície de trencament associada.

Per poder visualitzar la superfície de lliscament s'ha hagut de variar l'escala, ja que amb l'increment de deformacions de tall màxim, 245.2 % no era possible apreciar-la. Per tant, és evident que el factor de seguretat associat a aquesta superfície lliscament és molt més gran que el mostrat a la taula 26.

6.4 Conclusions

Les conclusions que es presenten a continuació, donen resposta als objectius d'estudi d'aquest document. Recordem els objectius amb els quals s'iniciava la present tesina.

- Demostrar que el mètode de la ROM0.5-05 permet obtenir una aproximació prou correcta de les empentes que actuen en pilots.
- Demostrar que amb la distribució d'empentes de la ROM0.5-05 i les càrregues externes que actuen, els pilots dimensionats permeten uns assentaments admissibles i un factor de seguretat del moll major o igual a 1.25.

Juntament amb els objectius marcats satisfets, s'han extret altres resultats que han estat interessants. A continuació es presenten, primer les conclusions extretes referents als objectius d'estudi i posteriorment altres conclusions que poden resultar profitoses.

- El mètode de la ROM0.5-05 és un mètode empíric que permet obtenir, sent estrictament correcte, una força horitzontal interna que estabilitza el talús. Posteriorment aplicant una distribució proporcional a la profunditat de la superfície de lliscament imposada, permet obtenir una distribució d'empentes. Comparant els moments al cap dels pilots provocats per aquesta distribució d'empentes i els moments calculats amb *Plaxis*, s'ha observat que el valor, ordre de magnitud general de l'empenta, s'aproxima però que la distribució d'empentes considerada per la ROM0.5-05 no és coherent amb els resultats obtinguts a *Plaxis*. L'explicació, moltes vegades ja mencionada a llarg del document, és el fet de que el mètode de la ROM0.5-05 aplica una distribució d'empentes per una superfície de lliscament inicial i imposada per l'usuari, que segons *Plaxis* i segons l'experiència enginyeril, canviarà en funció de les actuacions que es realitzin sobre el terreny. La pròpia ROM0.5-05 ja menciona que aquest mètode és un mètode que serveix com a primera aproximació però no com a definitiu. Per tant, es pot concloure que realment és un bon mètode per aproximar l'ordre de magnitud de les empentes que actuen sobre pilots en molls, però que la distribució d'empentes que aplica no és segura i es requeriran de més anàlisis per poder establir-la.
- Els resultats obtinguts deixen clara la resposta al segon objectiu. Els moviments obtinguts no són admissibles. És cert, que aquests moviments són provocats pràcticament en la seva totalitat per la construcció del moll i per la sobrecàrrega a l'esplanada i que es podrien minimitzar amb les correctes actuacions abans de la construcció del moll evitant que les argiles patissin tant assentament. En certa manera, és el que es va intentar valorar amb l'aplicació del procés constructiu B. Posteriorment, es va comprovar que com s'esperava, els moviments verticals als pilots eren menors, però els moviments horitzontals eren considerablement majors, aspecte encara més perillós des d'un punt d'estabilitat. Els pilots es van dimensionar per factor de seguretat i en cap moment és van considerar els moviments. Concloent, s'ha comprovat que per factor de seguretat el moll és molt més estable que el considerat, l'objectiu era un valor del factor de seguretat major o igual a 1.25, però

els moviments fan que la utilització de pilots per estabilitzar molls en ports en les condicions aplicades sigui inviable, a menys que, sense considerar el dimensionament per factor de seguretat de carga, es decidís que els pilots es sotressin, a gran profunditat, es densifiqués la malla de pilots i es fes una millora del tot-u del moll i de les argiles-llims superiors per evitar l'assentament.

Altres conclusions extretes són:

- La utilització de programes de modelització no és un aspecte trivial. La validació o no dels resultats depèn pràcticament en un 100% de la correcte elaboració del model i per tant, depèn del coneixement que tingui l'usuari del problema d'estudi. Aquests programes proporcionen un gran número de resultats que l'usuari haurà d'interpretar com a bons o no en funció de la seva experiència enginyeril i del comportament teòric demostrat.
- Els models numèrics implementats són sensibles a les diferents fases de càlcul, o el que a la realitat seria, a diferents processos constructius. Per tant, aquests models no només serveixen per poder conèixer el possible comportament abans de l'execució de l'obra, sinó també per valorar quin és l'ordre d'execució òptim per minimitzar el risc de possibles moviments.

7. Anàlisi d'estabilitat amb Plaxis 3D Foundation 1.1. Els pilots com a mesura estabilitzadora en un problema real

La complexitat i el desconeixement que existeix al voltant del comportament tridimensional de problemes enginyerils, fa que moltes vegades es desestimi la idea de fer ús de models tridimensionals. Tot i això, en determinats problemes on la geometria del problema fa que la hipòtesi de deformació plana no sigui prou precisa i es vulgui conèixer la deformació, moments i tensions de les estructures en la direcció no carregada obliga a la utilització de models 3D.

El problema objectiu d'estudi d'aquest document, és un anàlisi on la hipòtesi de deformació plana es correcte, considerant únicament el moll, ja que es pot considerar que una secció d'aquest no patirà deformacions en la direcció z . Respecte els pilots, aquesta afirmació no és tan clara i l'estudi del comportament en la tercera dimensió pot ajudar a conèixer i entendre la interacció sòl-estructura de forma més propera a la realitat.

7.1 Característiques de la modelització

En aquest apartat es descriuen totes les consideracions, els elements i/o valors utilitzats en el model així com les fases de càlcul realitzades. El funcionament del programa *Plaxis 3D Foundations 1.1* presenta les següents característiques des d'un punt de vista de la geometria.

- Les coordenades x i z defineixen el pla de treball, mentre que la y defineix la coordenada vertical en la que s'està treballant.

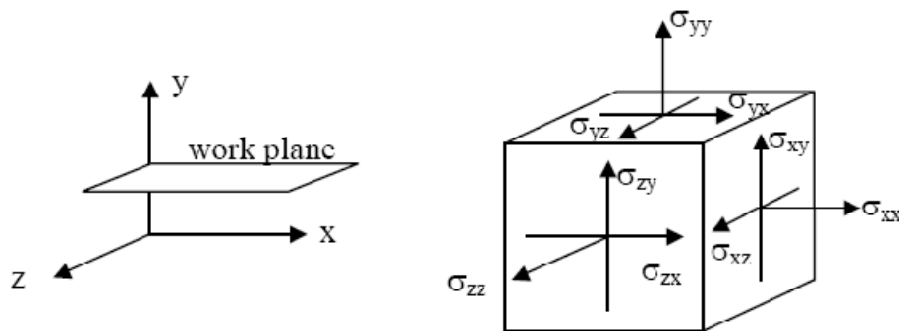


Figura 39. Sistema de coordenades, exemple d'un pla de treball i sistema de tensions positives. (Brinkgreve & Broere, 2004).

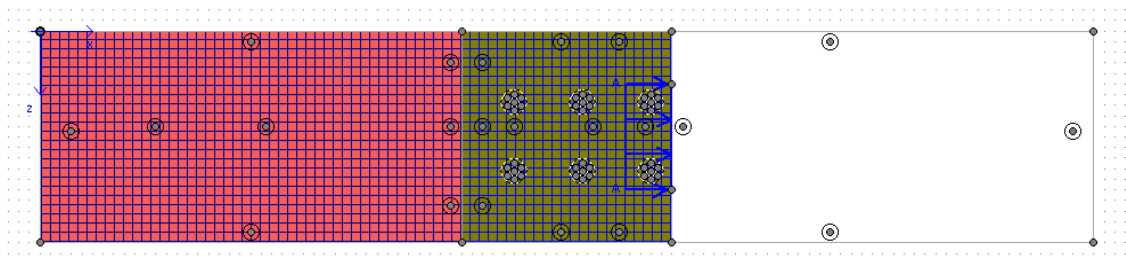


Figura 40. Pla de treball superior del model ($100 \times 20 \text{ m}^2$). Es poden observar els pilots (6 a la zona central), els sondeigs distribuïts per tota la figura, la llosa de formigó de color marró i les càrregues aplicades (la quadrícula correspon a la vertical i les fletxes a la horitzontal).

- La continuïtat o no de les estructures i càrregues en profunditat es defineix mitjançant plans o nivells bidimensionals. Fent ús de la informació que conté cadascun d'aquests plans, el programa interpola per tal de poder establir un geometria en 3D.
- La geometria del terreny i la seva distribució en l'espai s'introdueix al programa mitjançant *bore holes*. Aquests sondeigs permeten definir el conjunt de materials i la morfologia de les capes així com el nivell freàtic.

7.1.1 Elements finits utilitzats

La malla d'elements finits utilitzada consta de diferents elements bidimensionals que units formen un element finit tridimensional, element tipus cunya (*wedge*). Els elements finits utilitzats són:

- *Elements triangulars 2D de 6 nodes*. Aquests elements es creen durant la generació de la malla 2D prèvia i són utilitzats com plans verticals del model 3D per formar les cares dels elements tipus cunya de 15 nodes. Aquests elements també són els utilitzats per definir les càrregues en z en el model 3D.
- *Elements quadràtics 2D de 8 nodes*. Aquests elements es creen durant la generació de la malla 3D i són utilitzats en les cares dels elements tipus cunya de 15 nodes en la direcció z . També són els elements bàsics per definir les càrregues distribuïdes en superfícies en el model 3D i per modelitzar els elements estructurals, pantalles i *interfaces*.
- *Elements tipus cunya 3D de 15 nodes*. Aquests elements es creen durant la generació de la malla 3D i són els elements definitius utilitzats per modelitzar el comportament del sòl.

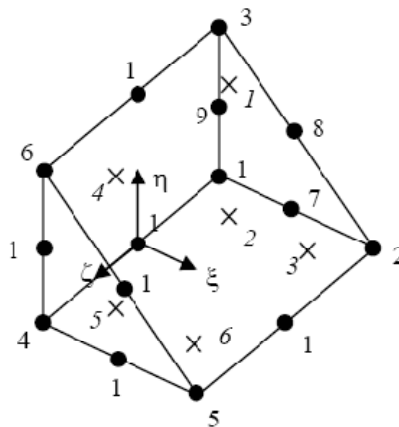


Figura 41. Element tipus cunya de 15 nodes(•) i punts d'integració de Gauss(x) en coordenades locals. (Brinkgreve & Broere, 2004).

A la figura anterior es pot observar com els elements triangulars de 6 nodes i els elements quadràtics de 8 nodes formen l'element tipus cunya de 15 nodes.

A cadascun dels elements tipus cunya de la malla 3D se l'ha d'assignar un model constitutiu del material amb els paràmetres que el defineixen. En aquest anàlisi s'han utilitzat dos models constitutius.

- Model de *Mohr Coulomb*, es tracta d'un model elastoplàstic sense enduriment i amb elasticitat lineal que s'utilitza com a primera aproximació al comportament de sòls en general. Els paràmetres que el defineixen són: el mòdul de Young, E , el coeficient de Poisson, ν , la cohesió, c , l'angle de fricció, ϕ i l'angle de dilatància, ψ .
- Model de *Hardening Soil*, es tracta d'un model d'enduriment volumètric i de tall. L'enduriment volumètric s'activa quan es produeixen deformacions plàstiques irreversibles, degudes a la compressió primària produïda per una càrrega isòtropa en condicions edomètriques. L'enduriment de tall s'activa quan es produeixen deformacions de tall irreversibles degudes a una càrrega desviadora primària. Els paràmetres que el defineixen són: dependència de la rigidesa respecte les tensions amb una llei potencial, m , deformacions plàstiques degudes a una càrrega desviadora primària controlades per, E_{50}^{ref} , deformacions plàstiques degudes a la compressió primària controlades per, E_{oed}^{ref} , control del comportament en descàrrega-recàrrega, E_{ur}^{ref} , ν_{ur} , i els paràmetres de Mohr-Coulomb, cohesió, c , angle de fricció, ϕ i angle de dilatància, ψ .

7.1.2 Condicions de contorn aplicades

Les condicions de contorn aplicades són de tipus mecànic.

- Desplaçaments horitzontals nuls en els contorns verticals del problema paral·lels a la direcció z ($u_x=0$).
- Desplaçaments horitzontals nuls en els contorns verticals del problema paral·lels a la direcció x ($u_z=0$).
- Desplaçaments horitzontals i verticals nuls a la base del problema ($u_x=0$, $u_z=0$ i $u_y=0$).

7.1.3 Condicions inicials

S'ha considerat que el nivell freàtic es troba a 8.25m d'alçada respecte la base del moll. A diferència del programa en 2D, on l'estat de tensions inicials es calcula considerant un K_0 (veure apartat 4.1.3), al *Plaxis 3D Foundations* l'estat de càrregues inicials és calcula com si d'un fase de càrrega (*gravity loading*) es tractés. Això fa que, quan finalitzi aquesta fase de càrrega s'hagin produït desplaçaments i per tant aquests s'hagin de inicialitzar a zero per iniciar la primera fase de càrrega. D'aquesta manera l'estat de tensions inicial serà el calculat i no hi haurà deformacions.

7.1.4 Models constitutius i paràmetres del sòl i estructures

A les taules següents es mostren els paràmetres i els models constitutius dels dos materials i les estructures utilitzades pel càlcul d'estabilitat.

Una de les diferències respecte el model bidimensional, és que *Plaxis 3D Foundations 1.1* no conté el model *Soft Soil* i per tant el comportament de les argiles i llims s'ha modelat utilitzant

un model *Hardening Soil*. Aquesta diferència de models pot provocar que el comportament de les argiles i llims no sigui el mateix, tot i això s'ha intentat que els paràmetres que defineixen el *Hardening Soil* s'ajustin al comportament que presenten les argiles i llims amb el model *Soft Soil*.

Identificació	Model	Tipus	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E_{ref} [kN/m ²]	ν
Tot u (moll)	Mohr-Coulomb	Drenat	20	22	$2.5 \cdot 10^4$	0.3
Argiles i Llims (substrat)	Hardening Soil	No drenat	16.5	18.5	---	---

Taula 27. Paràmetres dels materials que intervenen en el càlcul.

Identificació	c [kN/m ²]	θ °	ψ °	E_{50}^{ref} [kN/m ²]	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ [kN/m ²]	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ [kN/m ²]	ν_{ur}	m	K_x [m/s]	K_y [m/s]	R_{inter}
Tot u (moll)	0,1	38	0	---	---	---	---	---	10^{-3}	10^{-3}	0.67
Argiles i Llims (substrat)	1	20	0	10.000	10.000	40.000	0.2	0.5	10^{-7}	10^{-8}	0.67

Taula 28. Paràmetres dels materials que intervenen en el càlcul.

Identificació	Tipus d'estructura	Model	Diàmetre [m]	A [m ²]	E [kN/m ²]	ν	γ [kN/m ³]
Pilot	Non-massive Pile	---	1.5	1.77	---	---	---
Placa	Wall	Elàstic	---	1.5	$30 \cdot 10^6$	0.2	25
Llosa de formigó	Floor	Elàstic	---	1.5	$30 \cdot 10^6$	0.2	23.3

Taula 29. Paràmetres de les estructures que intervenen en el càlcul.

7.2 Càrregues considerades.

Les càrregues considerades en el model 3D són les mateixes que les utilitzades en el model 2D. Aquestes són:

G : Càrregues permanents.

- Càrrega de la llosa damunt dels pilots: $1,5\text{m} \times 2,33 \text{ Tn/m}^3 = 3,5 \text{ Tn/m}^2$; $\gamma_g = 1$.
- Càrrega sobre la llosa de formigó: 3 Tn/m^2 ; $\gamma_g = 1$.
- Càrrega horitzontal, en direcció x , dels vaixells: 6 Tn/m ; $\gamma_g = 1$.

Q : Càrregues variables.

- Càrrega sobre l'esplanada, corresponent a un edifici de 10 plantes: 10 T/m^2 ; $\gamma_q = 1,3$.

Els coeficients de ponderació parcials utilitzats, són els definits a la taula 10 de l'apartat 6.1.

7.3 Anàlisi d'estabilitat

Abans d'explicar les fases de càlcul implementades i mostrar els resultats obtinguts, s'ha cregut convenient destinar un apartat a tots els problemes i limitacions trobades durant la modelització per tal de que els resultats posteriors es puguin entendre e interpretar correctament.

7.3.1 Consideracions realitzades i limitacions del programa.

A continuació s'expliquen algunes de les consideracions realitzades per poder elaborar el model i limitacions observades del programa.

A part de la ja mencionada absència del model constitutiu tipus *Soft Soil*, que ha obligat a modelitzar les argiles i llims amb un model *Hardening Soil*, del que no es disposava dels paràmetres reals de laboratori i s'han aproximat utilitzant els del *Soft Soil*, existeixen altres limitacions que poden haver influït en els resultats obtinguts.

Plaxis 3D Foundation 1.1 és un programa, que com el seu nom indica, està destinat a modelitzar problemes de fonamentacions, on les fases constructives estiguin relacionades amb excavacions o actuacions sota el terreny. Un dels aspectes que recolza aquesta filosofia, és la introducció del material mitjançant sondeigs. Aquests sondeigs, permeten establir la distribució en l'espai de les capes de material i per tant, la part superior del sondeig que no tingui un material assignat durant l'elaboració de la geometria, posteriorment no podrà tenir-ho. En conseqüència, la distribució espacial del material que forma el moll s'ha definit i assignat al sondeig prèviament. Posteriorment, durant la fase inicial de càlcul, s'ha simulat un excavació del moll total i s'han imposat els desplaçaments produïts per aquesta excavació a zero.

Relacionat amb la definició de la geometria i dels sondeigs existeix un altre problema. Com s'acaba de comentar, si el sondeig no té material en la part superior durant la creació del model, posteriorment no se li pot assignar cap durant la fase de càlcul. Per tant, la part dels pilots per sobre la superfície, és a dir, a la longitud exenta dels pilots, no se li pot assignar cap material. Això fa pensar que, es podria haver considerat un material lleuger fictici al sondeig, a la zona on posteriorment estaria la part exenta dels pilots, que no modifiqués l'estat de tensions al terreny, més dens que l'aigua perquè no flotés i després canviar-ho pel formigó. Aquesta idea es va intentar i funcionava, però llavors va aparèixer una altre limitació del programa. Els pilots massissos no són modelitzats com elements estructurals, són considerats com elements tipus sòl, i per tant no es poden extreure les lleis d'esforços. És per aquest motiu que es va desestimar l'idea de modelitzar els pilots com a massissos i es va considerar modelitzar-los com a pilots de corona circular, que sí es poden tractar com una estructura, i assignar a la corona circular una placa amb un espessor per metre d'1,5 metres, amb l'objectiu de modelitzar el pilot d'1,5 metres de diàmetre correctament. (veure taula 29 tipus d'estructura *wall*). A aquesta tipologia de pilot, també li pots assignar material dins de la corona i es podria haver assignat de la forma anteriorment mencionada. No es va considerar, ja que la placa modelitzada es va pensar perquè el pilot és comportés com si fos massís.

En conclusió, els pilots modelitzats varen ser de tipus corona circular formada per elements tipus placa. I és aquí, on apareix un dels problemes més importants des d'un punt de vista de la interpretació i de la comparació amb el model realitzat amb *Plaxis 8.2*. La corona circular del

pilot està formada per sis plaques i per tant els resultats que s'obtenen no estan associats a la corona circular o pilot en conjunt, sinó a la placa en qüestió que s'estigui analitzant. Respecte als desplaçaments, aquest fet no ha estat un greu problema, ja que totes les plaques presentaven pràcticament el mateix desplaçament, exceptuant els primers cinc metres de tots els pilots, que possiblement degut a problemes numèrics, oscil·len lleugerament, i per tant s'ha pogut realitzar la mitja per cada punt de la longitud del pilot.

Respecte els moments flectors s'ha procedit de forma diferent. Com els moments flectors no són els mateixos a cadascuna de les plaques, s'ha decidit estudiar els moments flectors corresponents a la placa més pròxima i la placa més allunyada al talús per cadascun dels pilots. En conseqüència, és molt important tenir present que els moments presentats i analitzats no són els del pilot en la seva totalitat sinó els de la placa davantera i darrere respecte el talús de cada pilot.

Per solucionar aquest problema i obtenir uns possibles moments flectors globals del pilot, s'han intentat dos procediments.

1. Imaginem un possible tram del pilot i tres punts a l'alçada marcades **a**, **b**, **c**.

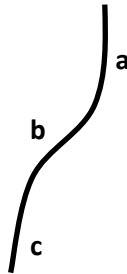


Figura 42. Croquis d'un possible tram d'un pilot

Coneixem la distància entre **ab**, la distància entre **bc** i el desplaçament horitzontal en els tres punts. Considerant l'equació de la deflexió d'una biga.

$$y'' = \frac{M}{EI} \quad (7.1)$$

On:

- y'' = segona derivada del desplaçament.
- M = moment flector.
- E = mòdul elàstic.
- I = mòdul d'inèrcia

Podem obtenir el moment aproximat en el punt **b** de la següent forma.

$$M = EIy'' = EI \cdot \frac{\frac{(y_a - y_b)}{\text{dist}(ab)} - \frac{(y_b - y_c)}{\text{dist}(bc)}}{0,5 \cdot (y_a - y_c)} \quad (7.2)$$

On:

- y_i = desplaçament de cada punt amb $i=a, b, c$.
- $\text{dist}()$ = distància entre dos punts.

L'equació anterior calcula el moment en el punt mig considerant una aproximació a la derivada del desplaçament, la pendent, de forma incremental i posteriorment una altra aproximació a la derivada de la pendent, deflexió, en forma incremental en una zona propera al punt mig.

Aquest raonament hagués estat correcte si els desplaçaments horitzontals a la part superior no oscil·lessin. L'oscil·lació d'aquests desplaçaments i per tant els errors en els primers 5 metres fan que els moments calculats no siguin els correctes. Per tant aquest procediment queda desestimat.

2. En el segon procediment s'ha intentat aproximar la corba de desplaçaments horitzontals utilitzant una interpolació polinòmica del grau que millor l'aproximés, per tal d'evitar aquestes oscil·lacions en els primers metres. S'ha comprovat que depenent del pilot, la corba s'aproximava millor amb un polinomi de grau 4 o de grau 6, màxim grau permès a *Excel*, però tot i resoldre el problema de les oscil·lacions en els primers metres, no s'ajustava bé al comportament de desplaçaments horitzontals en la majoria de pilots.



Figura 43. Aproximació amb un polinomi de grau 6 (negre) a la corba de desplaçaments horitzontals d'un dels pilots (vermell).

S'observa, que tot i que l'error quadràtic de l'aproximació (R^2) no és petit, la interpolació no permet reproduir el comportament correctament.

Per tant, cap dels dos procediments intentats han permès obtenir uns moments globals correctes.

Finalment, l'última limitació ha estat la impossibilitat de modelitzar la longitud exacta dels pilots. No s'ha pogut modelitzar la longitud corresponent a cada pilot, ja que si es feien *work-planes* tan pròxims entre si, recordem que la diferència entre les longituds dels pilots era petita, (veure taula 18 de l'apartat 6.2.2) el programa donava un error en la creació de la malla 3D. S'ha decidit adoptar la longitud màxima dels pilots com a longitud global.

7.3.2 Fases de càlcul implementades

A continuació es mostra una taula amb l'ordre de les fases executades. Tots els *staged of construction* són plàstics i ignorant el comportament no drenat.

Fase	Tipus de Fase	Descripció
0	<i>Staged of Construction</i>	Fase inicial, pel càlcul de les tensions inicials, considerant només les argiles i llims. Els desplaçaments calculats s'imposen a zero a l'inici de la fase següent
1	<i>Staged of construction</i>	Execució de la primera fila de pilots

Fase	Tipus de Fase	Descripció
2	<i>Staged of construction</i>	Execució de la segona fila de pilots
3	<i>Staged of construction</i>	Execució de la tercera fila de pilots
4	<i>Staged of construction</i>	Execució de la primera tongada horitzontal de material del moll
5	<i>Staged of construction</i>	Execució de la segona tongada horitzontal de material del moll
6	<i>Staged of construction</i>	Execució de la tercera tongada horitzontal de material del moll
7	<i>Staged of construction</i>	Execució de la llosa de formigó
8	<i>Staged of construction</i>	Aplicació de la càrrega horitzontal dels vaixells
9	<i>Staged of construction</i>	Aplicació de la càrrega vertical sobre la llosa de formigó
10	<i>Staged of construction</i>	Aplicació de la càrrega vertical sobre la superfície de l'esplanada

Taula 30. Fases de càlcul implementades.

7.3.3 Resultats obtinguts

A continuació es mostren alguns dels resultats obtinguts.

El criteri de signes utilitzat és el següent: assentaments positius, desplaçaments horitzontals en la direcció x positius cap a la dreta, desplaçaments en la direcció z positius cap a fora de la pantalla i moments flectors de tracció i compressió, positius i negatius respectivament. Els moments flectors que es mostraran són els M_{11} , que són els moments existents sobre el pla horitzontal. S'ha desestimat mostrar els moments M_{22} , moments sobre el pla vertical, ja que els valors d'aquests eren insignificants en relació als M_{11} i per tant irrellevants des d'un punt de vista de resistència estructural dels pilots.

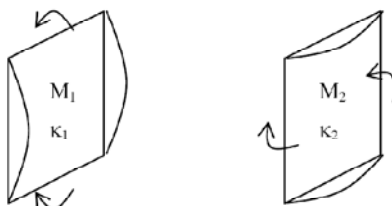


Figura 44. D'esquerra a dreta. Moment flector M_{11} i M_{22} respectivament. (Brinkgreve & Broere, 2004).

7.3.3.1 Resultats obtinguts i discussió de resultats

Les figures que es mostren a continuació corresponen a la fase de càlcul on el moll s'ha executat en la seva totalitat i no s'ha aplicat cap càrrega.

En totes les gràfiques on s'analitza el comportament dels pilots, s'ha considerat el criteri que es presenta en la figura següent per poder identificar-los.

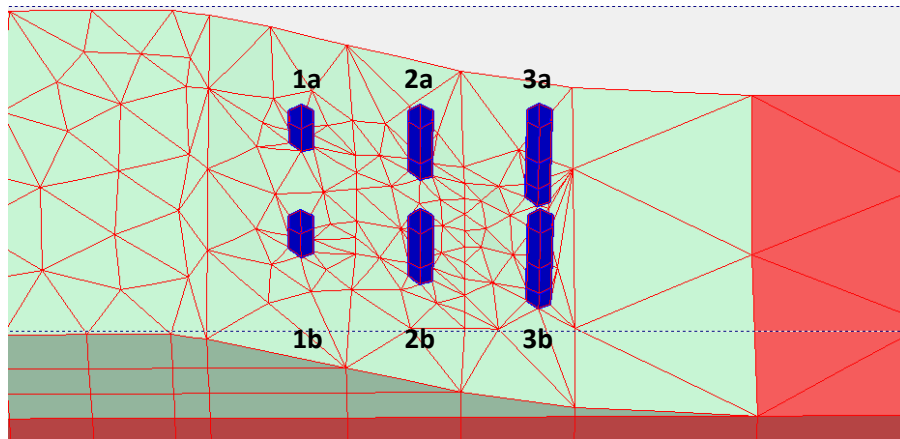


Figura 45. Identificació de cadascun dels pilots.

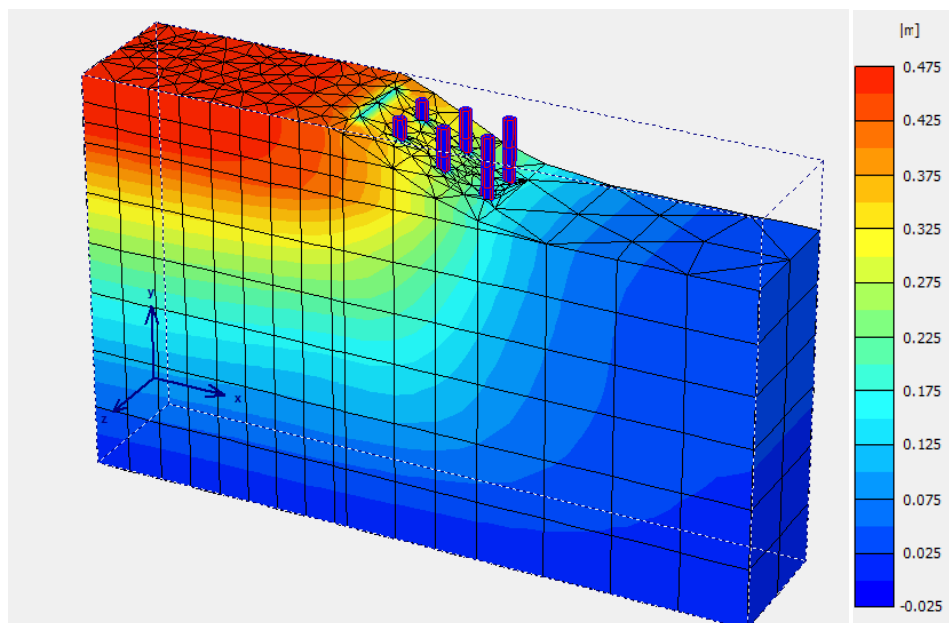
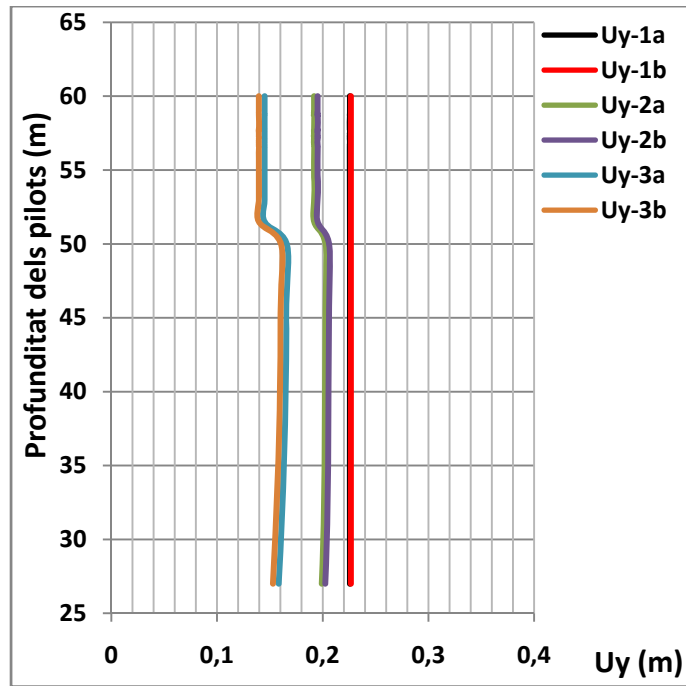


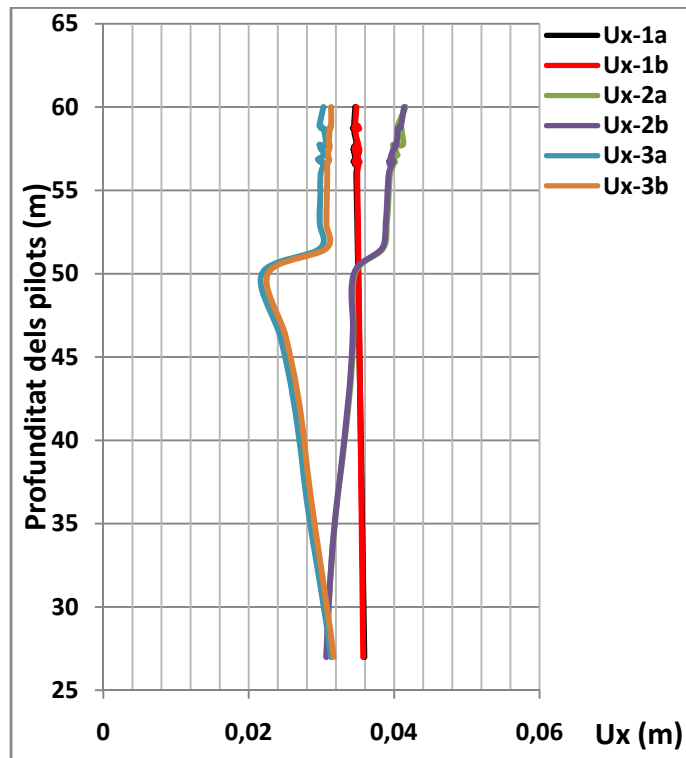
Figura 46. Desplaçaments totals al moll sense càrregues externes aplicades

Si es comparen aquests desplaçaments amb els desplaçaments calculats amb el model 2D, en el procés constructiu A, s'observa com aquests són de l'ordre de 4.5 vegades menors. Aquesta diferència és deguda als diferents models utilitzats per modelar el comportament de les argiles i llims.

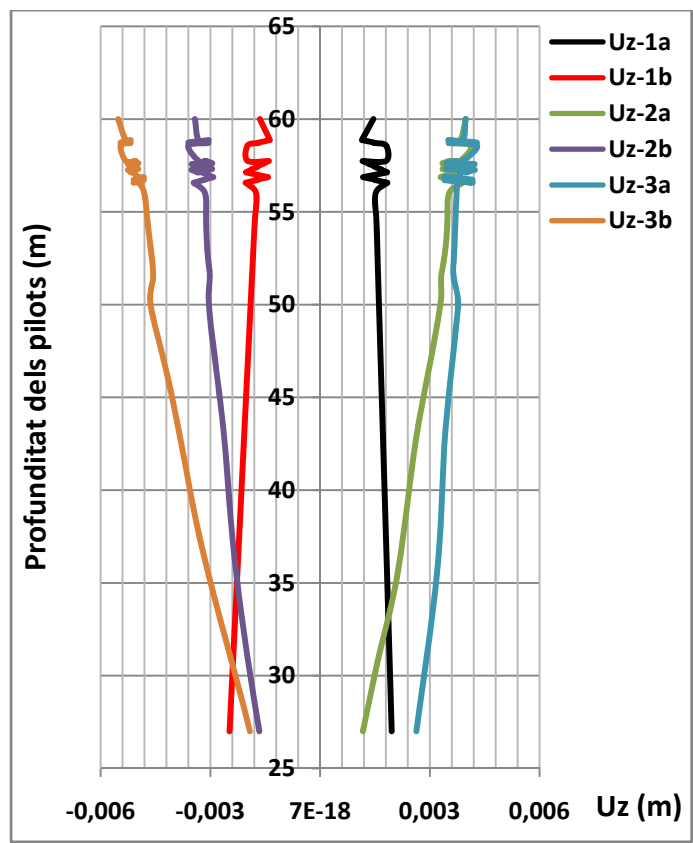
A continuació es mostren els desplaçaments verticals, horitzontals en x i en z i moments flectors de cadascun dels pilots. Es recorda que, els moments flectors no són els globals dels pilots sinó els de la placa del davant i del darrere respecte el talús.



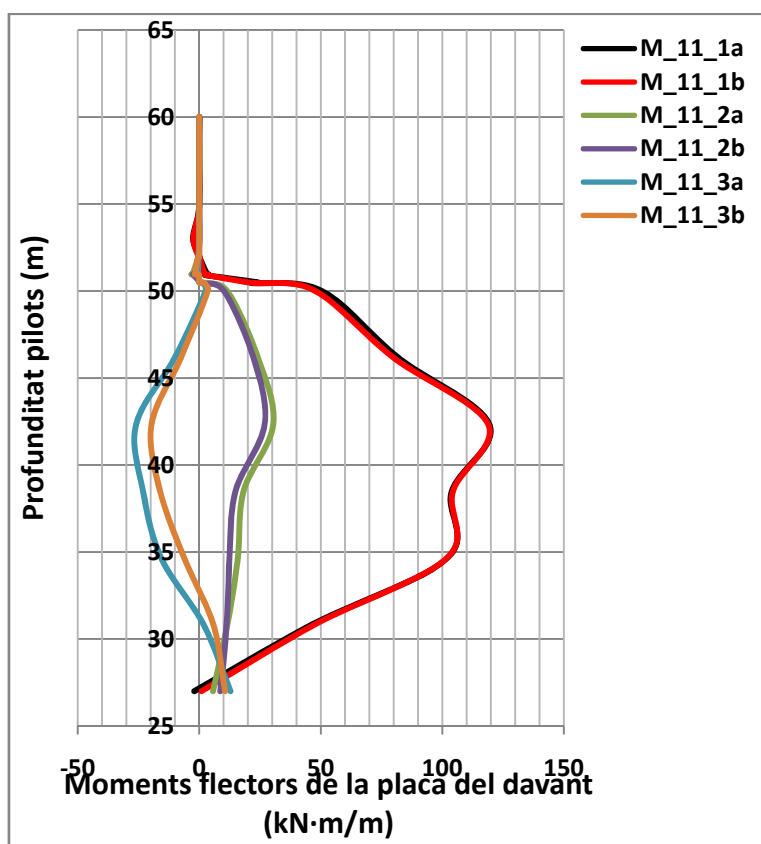
Gràfica 17. Desplaçaments verticals dels pilots sense l'aplicació de les càrregues.



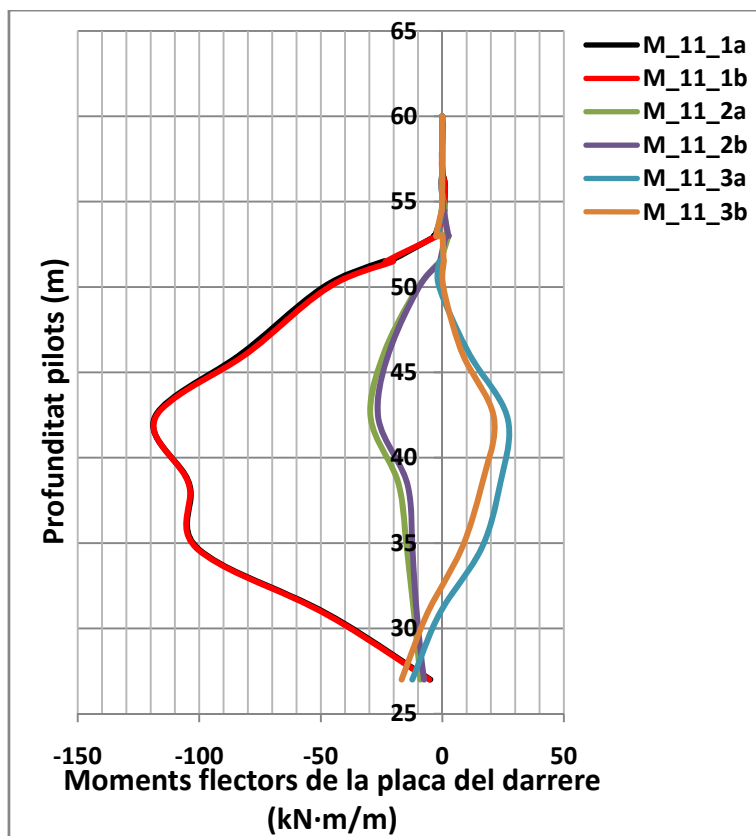
Gràfica 18. Desplaçaments horitzontals en direcció x dels pilots sense l'aplicació de les càrregues.



Gràfica 19. Desplaçaments horitzontals en direcció z dels pilots sense l'aplicació de les càrregues.



Gràfica 20. Moments flectors de la placa del davant sense l'aplicació de les càrregues.



Gràfica 21. Moments flectors de la placa del darrere sense l'aplicació de les càrregues.

A continuació es mostra una taula amb els valors màxims obtinguts de desplaçament horitzontal en x i en z, vertical i moment flector.

	Valors màxims calculats sense aplicació de les càrregues				
	U_x [cm]	$ U_z $ [cm]	U_y [cm]	$ M_{\text{màx}} $ [kN·m/m]	
				Placa del davant	Placa del darrere
Pilot 1a	3,5	0,2	23	120	120
Pilot 1b	3,5	0,25	23	120	120
Pilot 2a	4	0,35	21	27	27
Pilot 2b	4	0,4	21	27	27
Pilot 3a	3,2	0,4	16	25	25
Pilot 3b	3,2	0,55	16	20	20

Taula 31. Taula amb els valors màxims obtinguts amb el moll completament executat sense l'aplicació de les càrregues.

Seguidament es comenten els resultats obtinguts.

- Pel que fa als desplaçaments en direcció x, la primera fila de pilots es mou com un sòlid rígid, mentre que les files segona i tercera pateixen una clara flexió en la zona on s'acaba el moll i comença l'estrat d'argiles i llims. Pel que fa als valors màxims de desplaçament, aquests són molt inferiors als obtinguts amb *Plaxis 8.2*. (veure taula 23).

- Respecte als desplaçaments verticals, s'observa una disminució d'aquests conforme la distància a la part més alta del talús augmenta. Els valors de desplaçament vertical màxim calculats, són molt menors que els calculats a *Plaxis 8.2*. (veure taula 23)
- Conèixer els desplaçaments en la direcció *z*, permet validar o no la hipòtesi de deformació plana realitzada en el model bidimensional. A la taula anterior, s'observa que els desplaçaments màxims en la direcció *z* són d'ordre mil·limètric i per tant es confirma que la hipòtesi de deformació plana era correcte.
- Respecte als moments flectors, s'observa com els valors de la placa del davant i del darrere de cada pilot són els mateixos però canviats de signe. També s'observa que els valors màxims es troben a la mateixa profunditat (42.5 metres). Un altre aspecte a destacar és que mentre la placa del davant dels pilots de la primera i segona fila està en tracció la de la tercera fila està compressió. El mateix succeeix amb la placa del darrere però de forma contrària.
Com ja s'ha comentat anteriorment, els moments flectors de les plaques dels pilots, no poden ser comparables amb els moments flectors globals obtinguts amb *Plaxis 8.2*.

Un aspecte important a analitzar és l'efecte de la fricció negativa. Aquest efecte és degut a la consolidació del terreny provocada per:

- Consolidació natural, per pes propi, d'un reblert poc compactat.
- Consolidació provocada per un terraplè.
- Consolidació induïda per una disminució del nivell freàtic.
- Consolidació induïda pel canvi de l'estructura del sòl (argiles tixotròpiques) causada per la pròpia inca del pilot.

Els efectes de la fricció negativa són els següents:

- Disminució de la resistència a l'enfonsament del pilot.
- Augment de l'estat tensional del pilot.
- Augment de l'assentament.

La fricció negativa es desenvolupa de forma diferent en funció del tipus de pilot analitzat. Per pilots columna aquesta es pot desenvolupar al llarg de tota la longitud del pilot, mentre que per pilots flotants es desenvolupa en una zona per la part alta de la longitud del pilot.

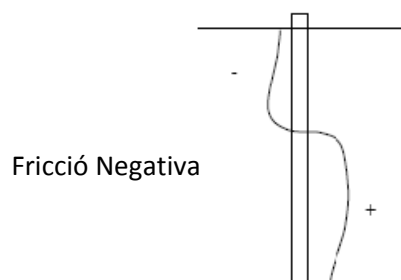
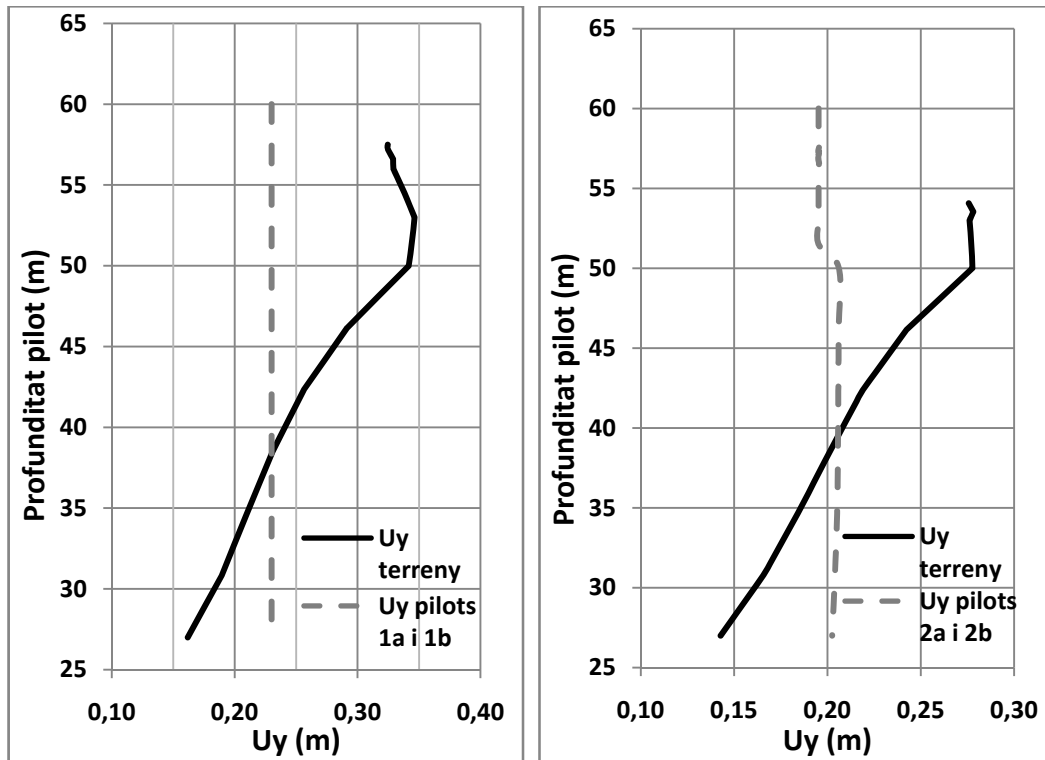
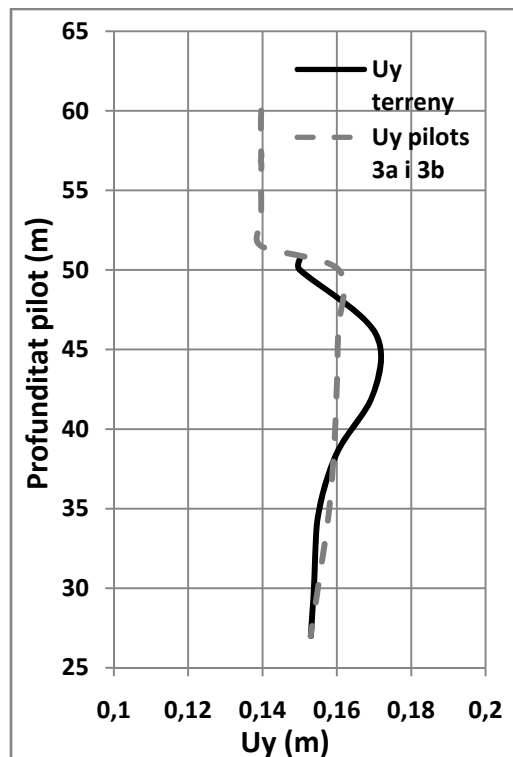


Figura 47. Croquis del desenvolupament de la fricció negativa a la part alta del pilot.

A continuació es mostren tres gràfiques corresponents a un tall en direcció z per cadascuna de les files de pilots i pels centres d'aquests. En aquestes figures es vol mostrar els desplaçaments verticals diferencials pilot-terreny i per tant la zona on es desenvolupa la fricció negativa.



Gràfica 22. Desenvolupament de la fricció negativa en la primera i segona fila de pilots sense càrregues aplicades.



Gràfica 23. Desenvolupament de la fricció negativa en la tercera fila de pilots sense càrregues aplicades.

De la comparació de les tres gràfiques de desenvolupament de la fricció negativa, zona on el terreny assenta més que el pilot, es pot extreure que a mesura que la distància a la part més alta del talús augmenta, la zona on es produeix la fricció negativa es redueix i la diferència entre l'assentament del pilot i l'assentament del terreny també. Aquest aspecte és el calia esperar, ja que quan més lluny es troben els pilots de la part més alta del talús, menys material tot-u pot consolidar i per tant menys assentament patirà.

Analitzats diferents aspectes del comportament dels pilots sense càrregues externes actuant, es pot concloure que els resultats són els mateixos per a pilots d'una mateixa fila, considerant un pla de simetria que passi pel centre del moll en direcció **x-y**.

A continuació es procedeix a mostrar alguns dels resultats obtinguts un cop s'ha executat la llosa i s'han aplicat la càrrega vertical i càrrega horitzontal damunt i a l'extrem de la llosa.

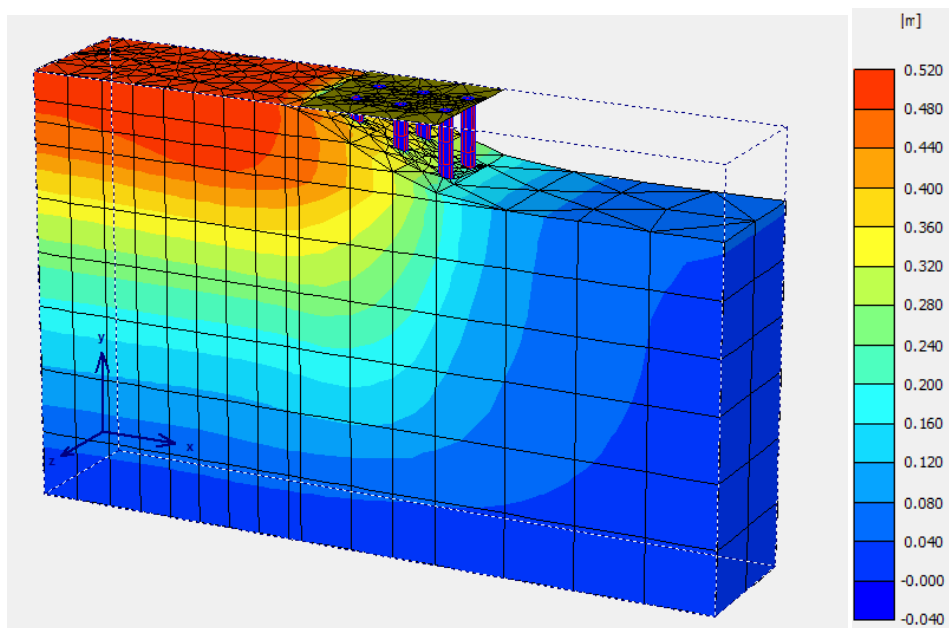


Figura 48. Desplaçaments totals al moll amb les càrregues aplicades (sense considerar la de l'esplanada).

La figura que es mostra a continuació correspon als desplaçaments verticals i horitzontals de la llosa de formigó deguts a les càrregues horitzontal i vertical aplicades.

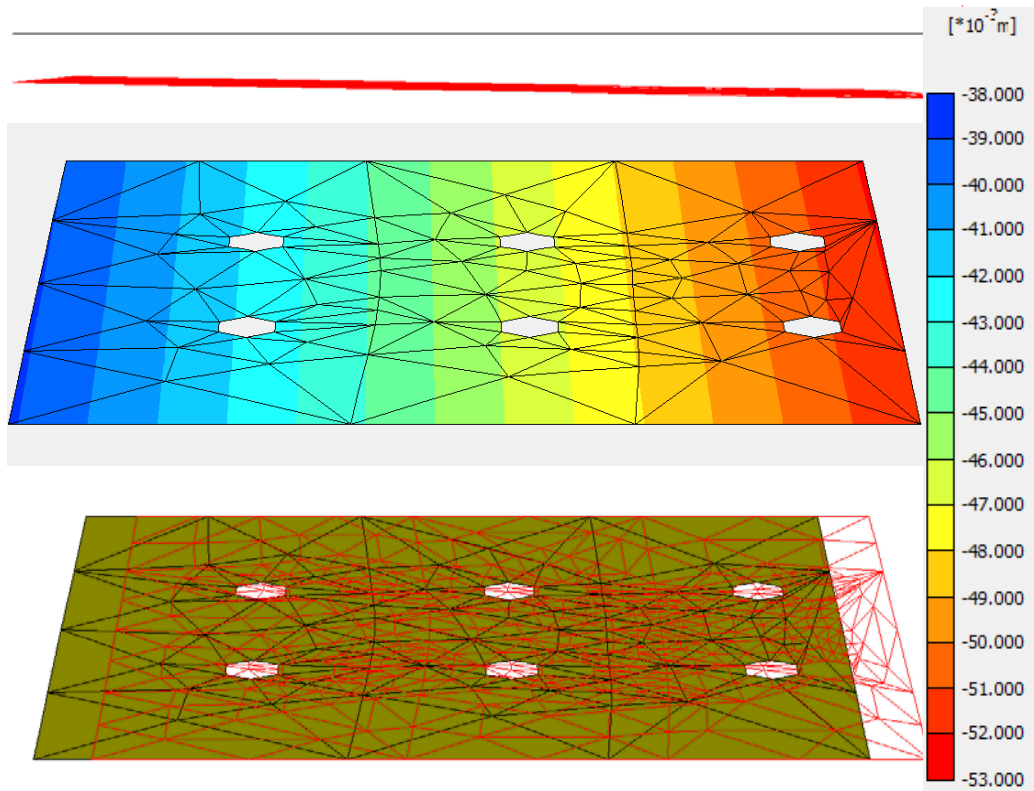
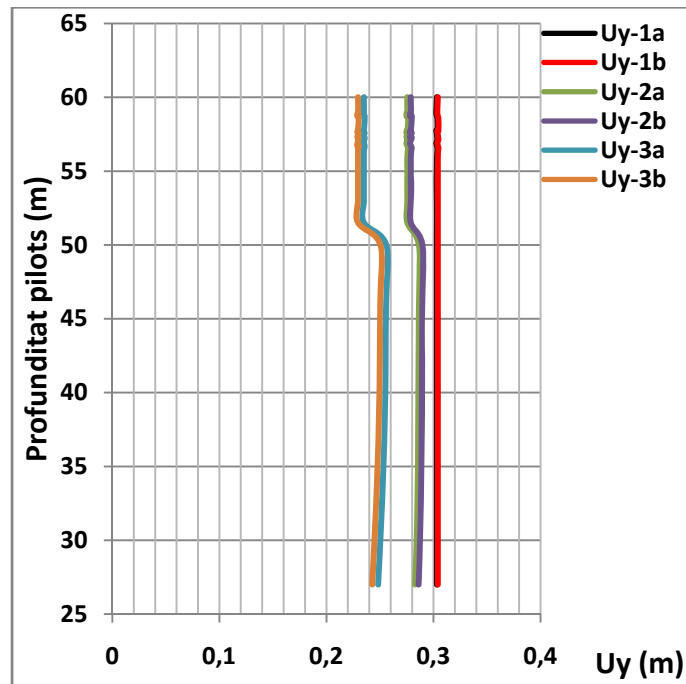
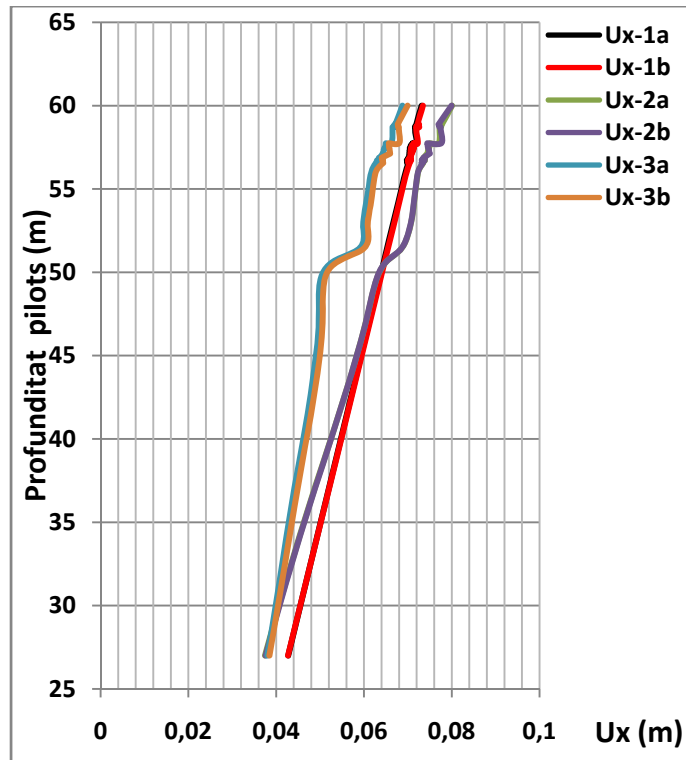


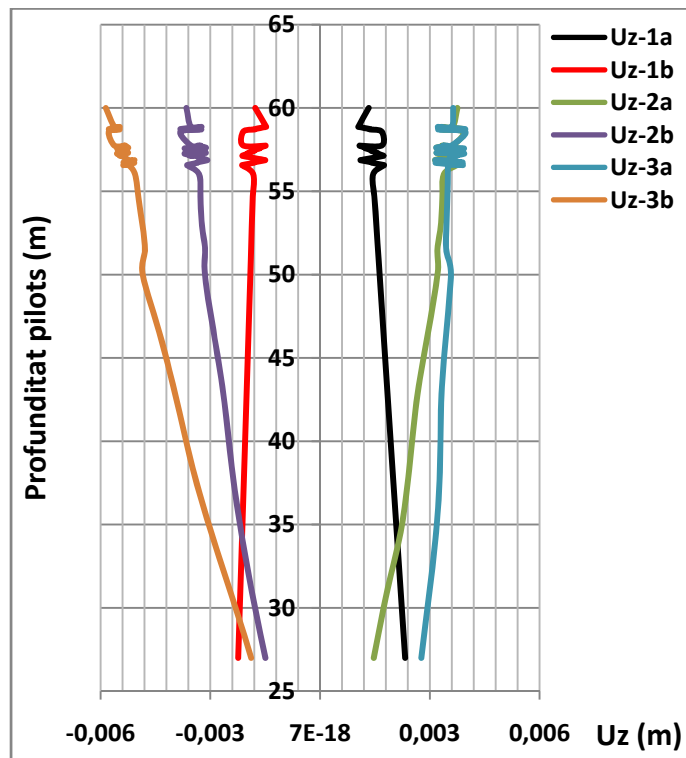
Figura 49. De dalt a baix. Desplaçaments verticals de la fase amb el pla de deformació i amb "shadings" (ombres de colors). El desplaçament vertical màxim és de 5,2 cm. Desplaçaments horitzontals de la fase, en la direcció x, amb el pla de deformació. El desplaçament horitzontal màxim és de 2,5 cm.



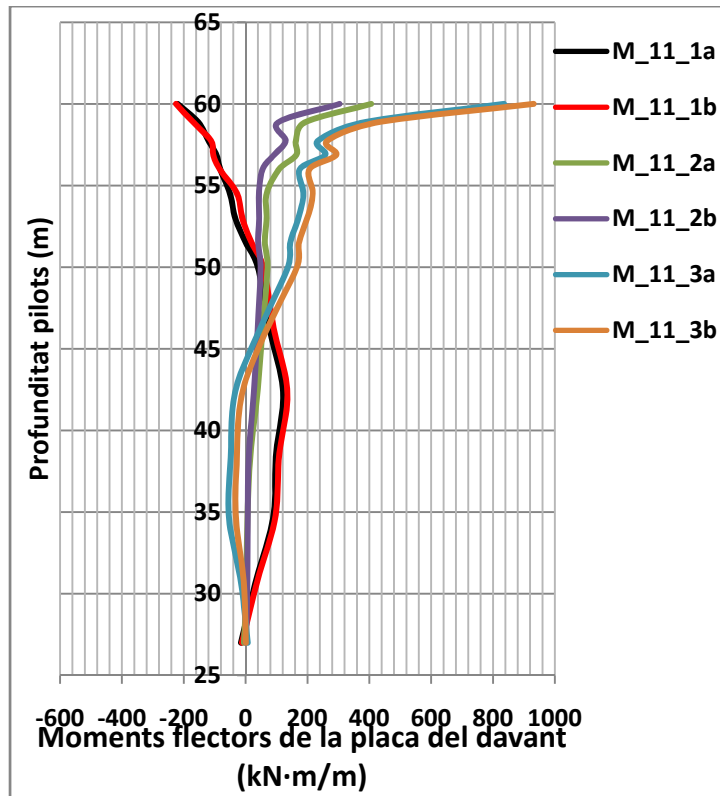
Gràfica 24. Desplaçaments verticals dels pilots amb les càrregues aplicades (sense considerar la de l'esplanada).



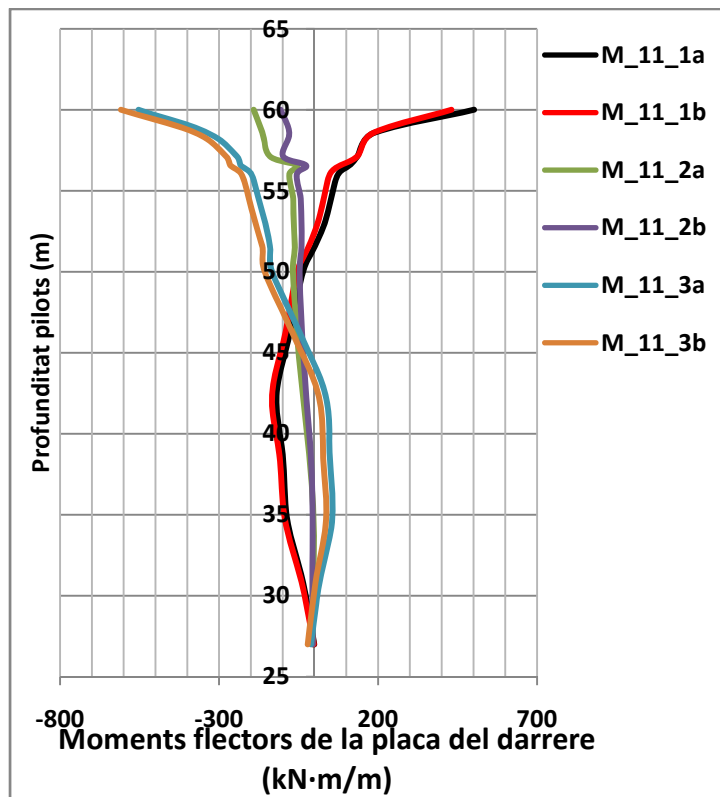
Gràfica 25. Desplaçaments horitzontals en direcció x dels pilots amb les càrregues aplicades (sense considerar la de l'esplanada).



Gràfica 26. Desplaçaments horitzontals en direcció z dels pilots amb les càrregues aplicades (sense considerar la de l'esplanada).



Gràfica 27. Moments flectors de la placa del davant amb les càrregues aplicades (sense considerar la de l'esplanada).



Gràfica 28. Moments flectors de la placa del darrere amb les càrregues aplicades (sense considerar la de l'esplanada).

A continuació es mostra una taula amb els valors màxims obtinguts de desplaçament horitzontal en x i en z, vertical i moment flector sense i amb l'aplicació de les càrregues.

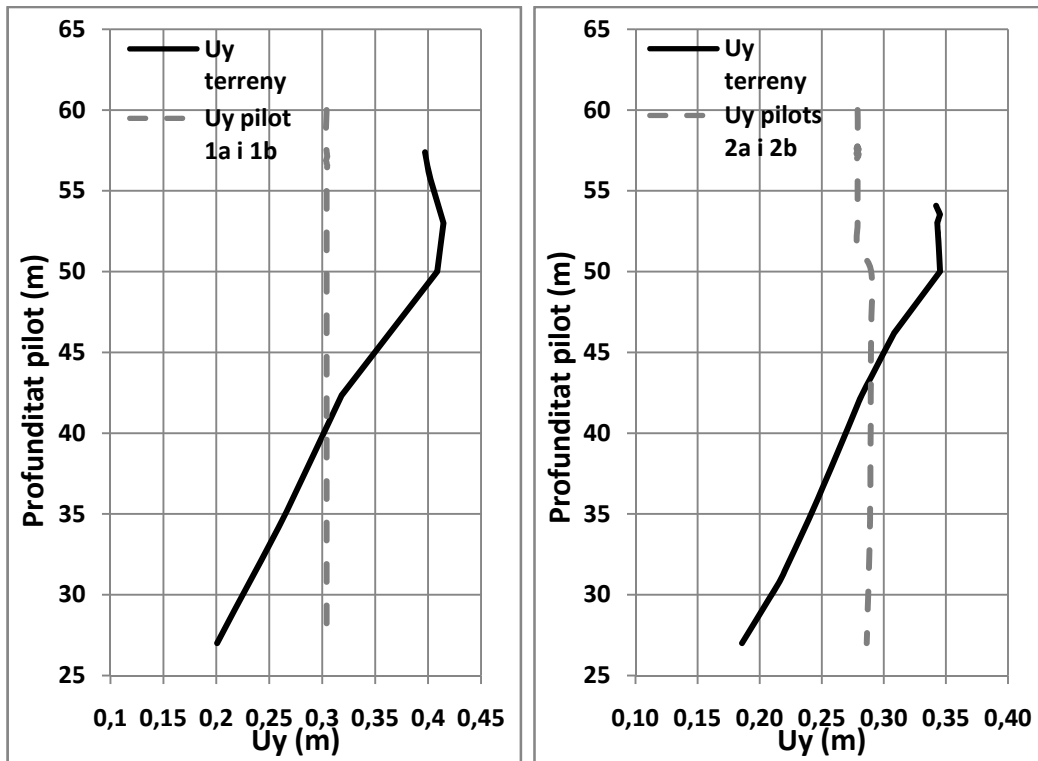
	Valors màxims calculats sense aplicació de les càrregues				
	U _x [cm]	U _z [cm]	U _y [cm]	M _{màx} [kN·m/m]	
				Placa del davant	Placa del darrere
Pilot 1a	3.5	0.2	23	120	120
Pilot 1b	3.5	0.25	23	120	120
Pilot 2a	4	0.35	21	27	27
Pilot 2b	4	0.4	21	27	27
Pilot 3a	3.2	0.4	16	25	25
Pilot 3b	3.2	0.55	16	20	20
	Valors màxims calculats amb l'aplicació de les càrregues (sense la de l'esplanada)				
	U _x [cm]	U _z [cm]	U _y [cm]	M _{màx} [kN·m/m]	
				Placa del davant	Placa del darrere
Pilot 1a	7.3	0.23	30.5	225	502
Pilot 1b	7.3	0.22	30.5	225	430
Pilot 2a	8	0.36	28	406	191
Pilot 2b	8	0.36	28	303	106
Pilot 3a	7	0.36	25	835	553
Pilot 3b	7	0.6	25	931	608

Taula 32. Taula amb els valors màxims obtinguts sense l'aplicació i amb l'aplicació de les càrregues (sense considerar la de l'esplanada).

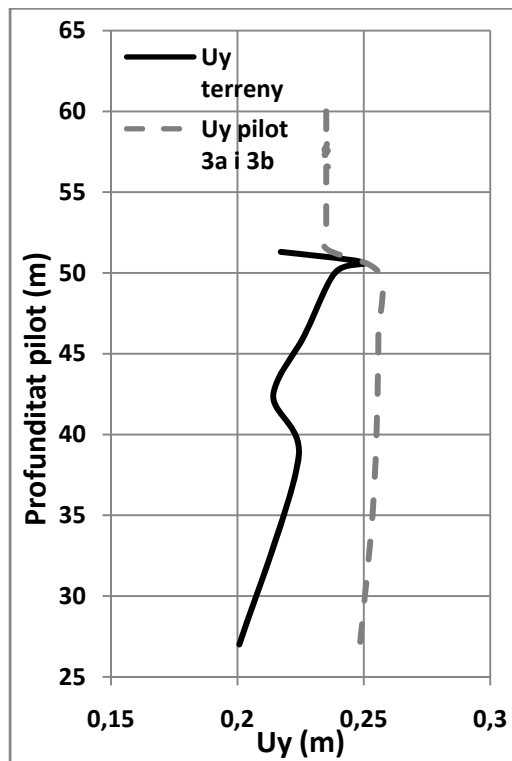
Seguidament es comenten els resultats obtinguts.

- L'aplicació de la càrrega horitzontal ha provocat un gir en els pilots i un augment del desplaçament horitzontal al cap d'aquests de 4 cm aproximadament. Aquest augment és constant a les tres files, el que implica, que la càrrega horitzontal afecta de la mateixa manera a tots els pilots independentment de la distància al punt d'aplicació.
 - Per efecte de la càrrega vertical s'ha produït un increment de l'assentament de 7 cm en la primera i segona fila de pilots i de 9 cm en la tercera.
 - L'efecte de les càrregues aplicades no ha produït un desplaçament important en z i per tant els valors romanen iguals als calculats sense càrregues.
 - Pel que fa als moments, s'observa com el moment màxim ja no es troba a una profunditat aproximada de 42.5 m, sinó que per efecte de la càrrega horitzontal, aquest es troba al cap dels pilots. Una aspecte a destacar és que mentre que les plaques del davant de la segona i tercera fila tenen un moment màxim de tracció, la placa del davant de la primera fila el té en compressió. El mateix passa amb la placa del darrere però de forma contrària.
- Els valors de moments flectors de la part alta dels pilots poden no ser els reals de les plaques, degut a que existeixen oscil·lacions en els desplaçaments horitzontals en aquesta zona.

A continuació es procedeix a mostrar l'efecte de la fricció negativa.



Gràfica 29. Desenvolupament de la fricció negativa en la primera i segona fila de pilots amb les càrregues aplicades (sense considerar la de l'esplanada).



Gràfica 30. Desenvolupament de la fricció negativa en la tercera fila de pilots amb les càrregues aplicades (sense considerar la de l'esplanada).

Si es comparen l'efecte de la fricció negativa sense i amb les càrregues, s'observa el mateix comportament. Els pilots més propers al cap del talús presenten un desenvolupament de la fricció negativa major que els més allunyats. També s'observa com la fricció negativa és menor amb les càrregues que sense les càrregues. Aquesta situació era la que calia esperar, ja que els pilots estan suportant una nova càrrega vertical que provoca un major assentament dels pilots, mentre que el terreny que provoca aquesta fricció ja ha patit gran part de la consolidació. En la gràfica anterior s'observa com l'efecte de la fricció negativa ja no es desenvolupa en la tercera fila de pilots.

Els resultats que es presenten seguidament, pertanyen a la fase on ja s'ha aplicat la càrrega sobre la superfície de l'esplanada. En aquest cas es mostren tres figures, una figura amb els desplaçaments totals del moll, una altre amb la malla deformada del moll i l'última, amb els desplaçaments verticals i horitzontals en direcció x de la llosa de formigó. Posteriorment es presenta una taula amb els valors màxims de desplaçaments horitzontals, en x i en z , verticals i moments flectors dels pilots.

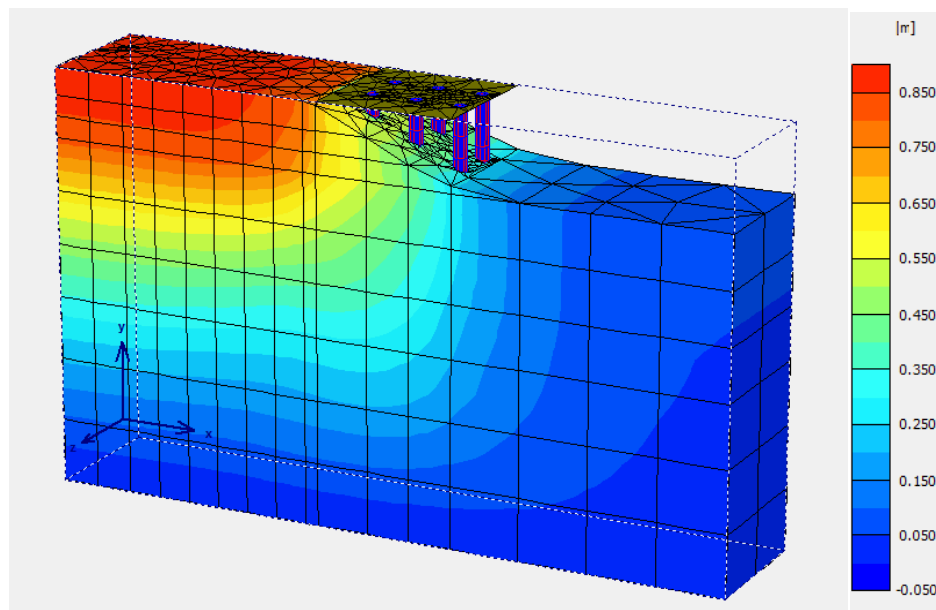


Figura 50. Desplaçaments totals amb totes les càrregues aplicades.

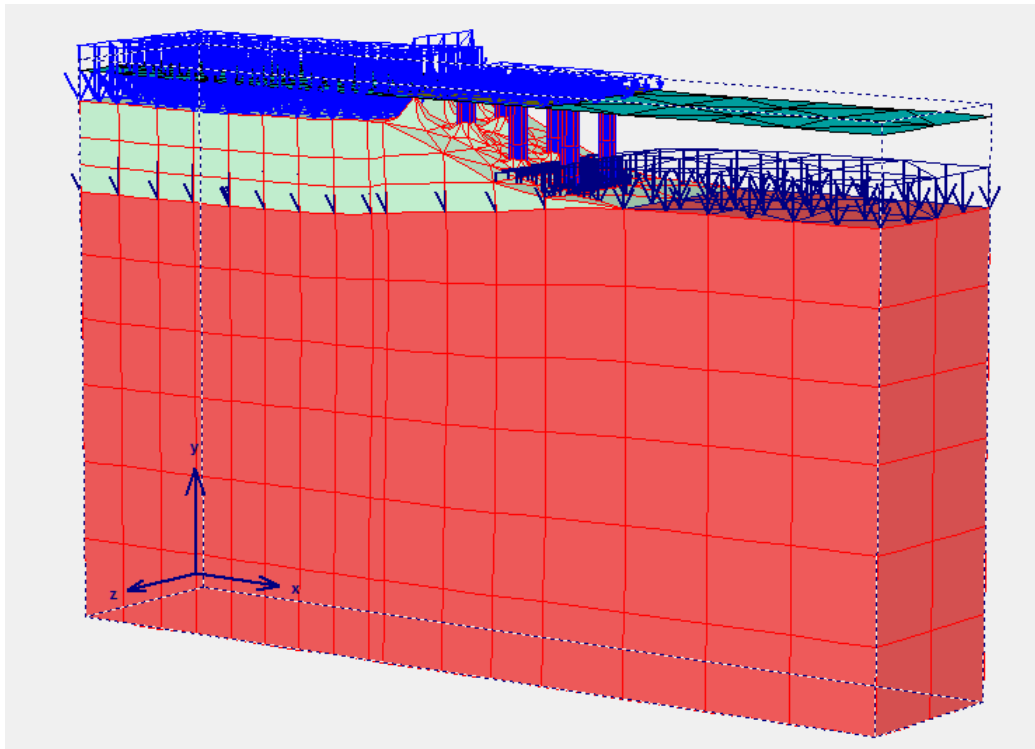


Figura 51. Malla deformada a 5 vegades l'escala real amb totes les càrregues aplicades .

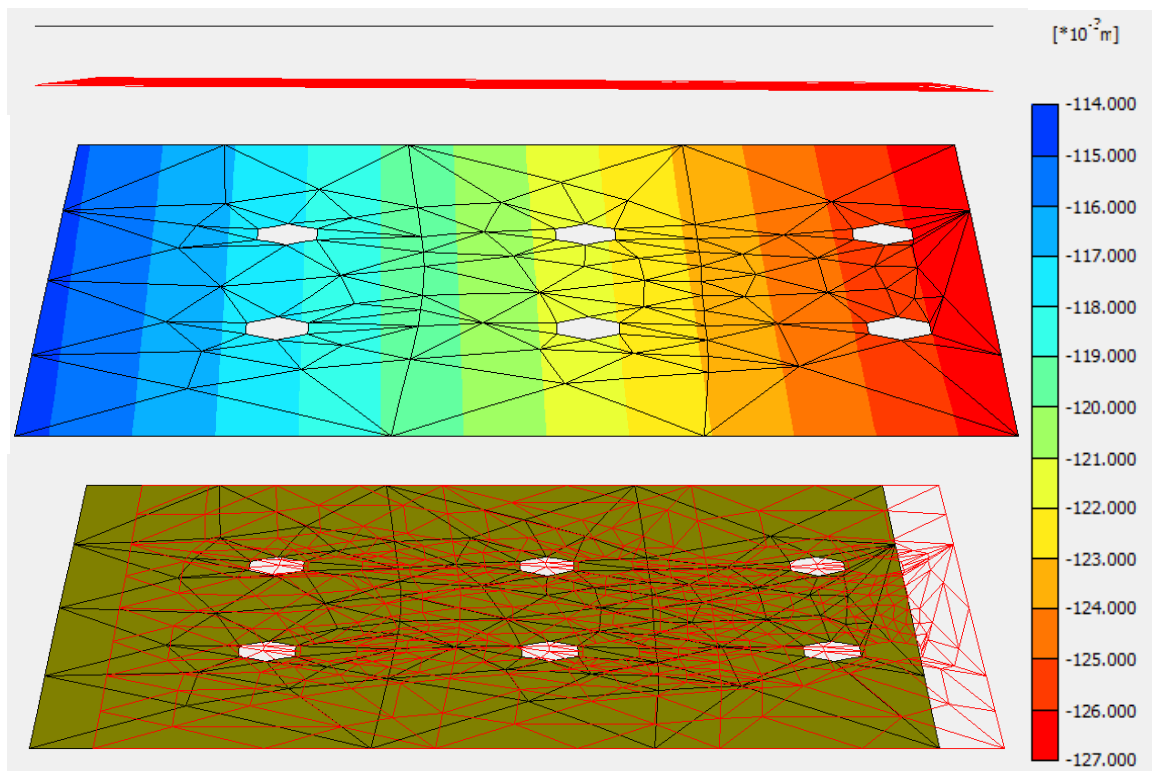


Figura 52. De dalt a baix. Desplaçaments verticals de la fase amb el pla de deformació i amb "shadings"(ombres de colors). El desplaçament vertical màxim és de 12.7 cm. Desplaçaments horitzontals de la fase, en la direcció x, amb el pla de deformació. El desplaçament horitzontal màxim és de 7.8 cm.

Valors màxims calculats amb l'aplicació de les càrregues (sense la de l'esplanada)					
	U _x [cm]	U _z [cm]	U _y [cm]	M _{màx} [kN·m/m]	
				Placa del davant	Placa del darrere
Pilot 1a	7.3	0.23	30.5	225	502
Pilot 1b	7.3	0.22	30.5	225	430
Pilot 2a	8	0.36	28	406	191
Pilot 2b	8	0.36	28	303	106
Pilot 3a	7	0.36	25	835	553
Pilot 3b	7	0.6	25	931	608
Valors màxims calculats amb aplicació de totes les càrregues					
	U _x [cm]	U _z [cm]	U _y [cm]	M _{màx} [kN·m/m]	
				Placa del davant	Placa del darrere
Pilot 1a	15.1	0.12	42.2	3801	4858
Pilot 1b	15.1	0.19	42.3	3758	4763
Pilot 2a	15.8	0.35	40.1	2759	1119
Pilot 2b	15.7	0.38	41.2	2246	1566
Pilot 3a	14.7	0.32	38.2	7055	5376
Pilot 3b	14.8	0.62	37.6	7531	5886

Taula 33. Taula amb els valors màxims obtinguts abans i després de l'aplicació de la càrrega sobre l'esplanada.

Seguidament es comenten els resultats obtinguts.

- La càrrega sobre la superfície de l'esplanada ha provocat un increment dels desplaçaments horitzontals màxims de tots els pilots d' aproximadament 8 cm.
- Respecte als desplaçaments verticals, s'ha produït un increment de 12 cm en tots el pilots.
- S'observa que no s'han produït increments de desplaçament en z.
- Pel que fa als moments flectors, els valors que es mostren són molt grans i conseqüència dels problemes numèrics que existeixen a la part alta dels pilots. Aquests moments màxims corresponen al cap de les plaques davantera i del darrere, i per tant no es poden considerar como a reals. Aquest comportament, ja es començava a apreciar abans de l'aplicació de la càrrega sobre la superfície de l'esplanada ja que els moments màxims també pertanyien a la part alta de les plaques dels pilots.

7.4. Conclusions

De l'anàlisi amb *Plaxis 3D Foundations*, no s'han pogut extreure tots els resultats que al començament de la present tesina s'esperava. La gran quantitat d'hipòtesis i aproximacions que han calgut per poder realitzar el model, fan que els resultats obtinguts no puguin ser directament comparables amb els resultats calculats amb el model bidimensional.

Tots el resultats obtinguts han estat, en primera instància, condicionats al model constitutiu considerat per les argiles-llims. S'ha comprovat que els desplaçaments produïts per l'execució del moll i els provocats per l'aplicació de les cargues, són molt menors als obtinguts amb el

model 2D, el que implica que els paràmetres resistents i de rigidesa utilitzats al model 2D són pitjors als considerats al model 3D. Si es comparen tots els resultats de desplaçament del model 2D amb els seus homòlegs del model 3D, s'observa que tots tenen un factor multiplicador de 4.5 aproximadament. Això indica que, tot i la no similitud dels valors existeix un factor multiplicador que permet relacionar-los directament i per tant, considerant que aquest factor prové únicament de la definició del model de les argiles i llims, es pot concloure que ambdós models presenten resultats similars. Confirmant aquesta afirmació, la comprovació que els desplaçaments horitzontals en direcció z són menyspreables, en comparació a la resta de desplaçaments, permet considerar com a bona la hipòtesi de deformació plana que s'ha realitzat al model 2D.

El paràgraf anterior fa referència als desplaçaments. Respecte als moments flectors, no es pot establir cap relació entre ambdós models, exceptuant la fase sense càrregues. En aquesta fase, on la part superior de les plaques dels pilots no estaven molt afectades per oscil·lacions dels valors, sí que es poden observar dues similituds. Els moments flectors màxims estan situats aproximadament entre 12 i 15 metres de profunditat respecte el cap dels pilots i els pilots de la primera fila es comporten de forma diferent als de la resta de files.

Pel que fa als desplaçaments de la llosa de formigó, s'ha observat que aquesta es mou solidàriament amb els moviments dels pilots, aspecte que també s'havia comprovat al model bidimensional.

Tot i què els resultats del model 3D no són gaire satisfactoris des d'un punt de vista del coneixement del comportament de pilots estabilitzant molls, l'elaboració del model i la posterior interpretació dels resultats ha reflectit que moltes vegades la utilització de models 3D per entendre el comportament no és adequada, ja que els resultats no són analitzables fàcilment. Per tant, és convenient realitzar primer models 2D per entendre el problema, i si fos necessari, posteriorment, modelitzar en 3D. En aquest cas, s'ha comprovat que el model 3D no era necessari ja que els resultats obtinguts amb el 2D eren prou precisos.

8. Conclusions generals

La motivació d'aquest document era justificar l'ús de pilots per establir molls en ports com alternativa als calaixos de formigó en massa que habitualment s'utilitzen.

Les conclusions que es presenten a continuació recullen tots els resultats que s'han anat obtenint durant la tesina.

En el capítol 3, es va aplicar el mètode que proposa la ROM 0.5-05 per establir talussos i es va obtenir una força horitzontal interna que estabilitzava la superfície crítica, considerada aquesta la que maximitzava el producte $f_0 \cdot h_0$ per un factor de seguretat d'1.7. Com s'havia d'imposar una trencada inicial, es va considerar la que el programa va calcular amb menor factor de seguretat.

S'ha comprovat que considerar com a superfície de càlcul la que maximitza el producte $f_0 \cdot h_0$, sempre ens situarà del costat de la seguretat ja que la f_0 és la força vertical necessària màxima que estabilitza la superfície de lliscament més desfavorable. Per tant, superfícies amb productes inferiors a aquest, sempre tindran un factor de seguretat associat major i d'altre banda superfícies amb un producte superior a aquest no es podran produir. Posteriorment, es va realitzar l'anàlisi invers. És a dir, es van imposar la superfície de lliscament i la força horitzontal interna obtingudes i es va calcular el factor de seguretat. Els resultats varen ser satisfactoris ja que el factor de seguretat obtingut va ser d'1.69 amb *Bishop Simplificat* i d'1.67 amb *Janbu Simplificat*, ambdós molt pròxims a l'1.7 desitjat. Comprovat això, es va aplicar la distribució d'empentes considerada pel mètode i es va tornar a realitzar l'anàlisi invers. Novament, els resultats varen ser satisfactoris ja que els factors de seguretat obtinguts van ser iguals a 1.72 i 1.67 amb *Bishop Simplificat* i amb *Janbu Simplificat* respectivament.

En conclusió, es va demostrar que el mètode està correctament definit i les empentes que es calculen són les que els pilots han de resistir per establir el talús. Ara bé, el mètode necessita d'una hipòtesi important perquè es pugui aplicar. Totes les superfícies que intervenen en el càlcul han de tenir un punt fix que no variï entre elles. Aquesta hipòtesi descarta la possibilitat que es puguin produir moltes altres trencades i com es va comprovar amb *Plaxis 8.2*, la trencada pot variar en geometria i situació en funció de l'estat de càrregues al terreny.

En el capítol 4, per tal d'escollir la distribució d'empentes adequada, es van comparar els factors de seguretat obtinguts amb el talús inicial, sense càrregues, amb *Slide 5.0* i *Plaxis 8.2*. Es va comprovar que el factor de seguretat obtingut amb *Plaxis 8.2* era d'1.29, molt pròxim a l'obtingut amb *Janbu Simplificat*, 1.34. Per tant, es va considerar la distribució d'empentes de *Janbu Simplificat*. Els resultats dels anàlisis posteriors, aplicant la força horitzontal interna i la distribució de forces internes, van demostrar que en programes d'elements finits on es calculen deformacions, considerar unes forces internes com a mesura estabilitzadora no funciona, ja que no es pot establir una relació entre la força aplicada i el factor de seguretat obtingut. També es va comprovar que depenent de la força aplicada, la superfície de trencada variava la seva geometria i situació al talús i si aquesta força augmentava considerablement, el factor de seguretat obtingut ja no estava associat a una superfície de trencada sinó a una trencada puntual i localitzada al voltant de la càrrega.

En conclusió, els resultats a *Plaxis 8.2* demostren que la metodologia de la ROM 0.5-05 s'hauria d'aplicar utilitzant el mètode de *Janbu Simplificat* i la hipòtesi de considerar sempre un punt fix no és correcte, ja que les trencades varien en situació i geometria en funció de l'estat de càrregues que existeixi al terreny.

En el capítol 5, es va realitzar l'anàlisi d'estabilitat a *Plaxis 8.2* amb els pilots dimensionats utilitzant les empentes obtingudes amb la metodologia de la ROM0.5-5. El factor de seguretat obtingut va ser d'1.3, menor a l'1.67 obtingut amb la distribució d'empentes aplicades directament a *Slide 5.0*. De fet, el factor de seguretat obtingut amb pilots no varia respecte a l'obtingut amb el talús inicial, encara que si la geometria de la trencada.

En conclusió, les empentes trobades no permeten obtenir un dimensionament que doni un factor de seguretat 1.7 a *Plaxis 8.2*. Això no implica que el valor o situació de les empentes sigui incorrecte, sinó que com l'estat tensional al talús ha canviat, la trencada també ho ha fet i per tant és com si s'estigués analitzant un altre problema d'estabilitat. Aleshores, el mètode de la ROM0.5-05 no és correcte ja que les empentes que calcula, estan associades a una superfície de lliscament, que una vegada els pilots s'executin, previ dimensionament amb les empentes calculades, serà una altra i el factor de seguretat associat també. S'ha comprovat que augmentant la longitud dels pilots el factor de seguretat augmentava considerablement, en conseqüència es confirma que la nova superfície de lliscament obtinguda necessita una major longitud de pilots i per tant l'empenta horitzontal associada a aquesta superfície de lliscament és major .

En el capítol 6, es va realitzar l'anàlisi d'estabilitat del moll sotmès a unes accions externes i es van executar dos processos constructius diferents. En el procés A es van executar els pilots abans del moll i en el procés B es van executar els pilots quan la major part del moll estava construïda i es va aplicar una precàrrega.

S'ha observat que els desplaçaments verticals absoluts dels pilots són majors en el procés A degut a l'ordre d'execució dels pilots respecte el moll. Pel que fa als increments de desplaçament vertical dels pilots per efecte de les càrregues, aquests són iguals en ambdós processos constructius i en les tres files de pilots. Respecte als desplaçaments verticals incrementals del moll, s'han obtingut uns valors quatre vegades menors en el procés B que en l'A, per efecte de la precàrrega aplicada. El desplaçament vertical màxim calculat amb totes les càrregues aplicades ha sigut de 179 cm al procés A i de 95 cm al procés B.

Els valors de desplaçament horitzontal absoluts i incrementals dels pilots, en cada fase de càrrega, són majors en el procés B que en l'A. Abans d'aplicar les càrregues, aquesta circumstància només pot ser deguda a que l'execució de la segona part del talús afecti de forma més directa i concentrada als pilots. Després d'aplicar la càrrega sobre la superfície, s'ha observat que el desplaçament al moll no és uniforme i vertical com en el procés A, sinó que es produeix un "flexió" del moll, per efecte d'un assentament diferencial entre la zona precarregada i la zona que no ho estava, i per tant això provoca un increment de les empentes sobre els pilots i un augment dels desplaçaments horitzontals. L'increment de desplaçaments horitzontals és contant en les tres files de pilots en els dos processos constructius. El desplaçament horitzontal màxim calculat amb totes les càrregues aplicades ha sigut de 71.5 cm al procés A i de 131 cm al procés B.

Tant en l'anàlisi de desplaçaments verticals com horitzontals dels pilots corresponent a la fase sense càrregues i amb el talús completament executat, s'ha observat que aquests disminueixen a mesura que la distància al talús augmenta.

Els moments flectors calculats amb *Plaxis 8.2*, sense considerar unes possibles accions externes, són més grans que els moments provocats per les empentes obtingudes amb el mètode de la ROM0.5-05 al cap dels pilots. De la mateixa manera, els moments flectors obtinguts amb la càrrega horitzontal utilitzada en el dimensionament, també són menors als que s'han obtingut amb *Plaxis 8.2*. Les diferències són variables però es situen en torn als 150 kN·m/m en tots els pilots i en els dos processos constructius, exceptuant els pilots de la tercera fila de procés A que presenten moments molt més elevats.

Respecte a la distribució d'empentes que s'ha obtingut aplicant la metodologia de la ROM0.5-05 i la de moments associada, s'ha demostrat que pel cas del moll sense càrregues no és correcte, ja que els moments flectors de la primera i tercera fila de pilots eren majors que els de la segona pels dos processos constructius.

En referència als factors de seguretat, s'ha obtingut que el procés constructiu B té associats factors de seguretat menors al procés constructiu A i aquests factors són menors quan s'aplica la càrrega sobre l'esplanada. Que els factors de seguretat hagin sigut menors al procés B, es deu a que pateix més desplaçaments horitzontals, això implica que les tensions de tall són majors i per tant la ruptura es produeix abans en aquest procediment constructiu. Els factors de seguretat obtinguts amb les càrregues utilitzades en el dimensionament dels pilots han sigut de 2.4 amb el procés A i de 1.7 amb el procés B, i de 1.6 i 1.38 considerant la càrrega sobre l'esplanada.

En conclusió, el mètode de la ROM0.5-05 aproxima l'ordre de magnitud del valor de les empentes sobre pilots en molls correctament, però la distribució d'empentes que aplica no és l'adequada.

Els factors de seguretat obtinguts amb els pilots dimensionats utilitzant les recomanacions que ella proposa, permeten obtenir uns factors de seguretat superiors l'1.25 que és el factor de seguretat que s'acostuma a requerir en aquests casos.

Els moviments calculats no són admissibles i per tant la metodologia d'utilitzar pilots como a mesura estabilitzadora no és aplicable en aquestes circumstàncies. (per assolir moviments més petits es necessita prolongar els pilots fins profunditats majors)

En el capítol 7, es va analitzar el mateix moll amb el programa *Plaxis 3D Foundation 1.1*. L'objectiu d'aquest apartat era fer una comparativa amb els resultats obtinguts en el model bidimensional. Per poder realitzar el model i degut a les limitacions del programa per modelitzar aquest tipus de problemes, es van considerar una sèrie d'hipòtesis que no van permetre establir una comparativa directa dels resultats. Una de les hipòtesis més influents, va ser la de considerar un model constitutiu en les argiles-llims tipus *Hardening Soil* en lloc del *Soft Soil* aplicat al model 2D, ja que no es disposava d'aquest model al programa. Com els paràmetres d'aquest model es desconeixien es van considerar uns que es va creure que donarien uns resultats semblants. Respecte els desplaçaments, el comportament dels pilots observat és similar al model 2D. Una disminució dels desplaçaments absoluts verticals i horitzontals en direcció x , a mesura que la distància al talús augmenta i uns increments de desplaçament per efecte de les càrregues constants a tots els pilots. Els valors de desplaçament són de l'ordre de quatre vegades i mitja més petits que els obtinguts amb el

model 2D sense les càrregues, amb les càrregues de dimensionament i amb la totalitat d'aquestes. Els valors màxims de u_y i de u_x als pilots i de desplaçament total al moll, amb totes les càrregues aplicades, han sigut de 42.3, 15.8 i 85 centímetres respectivament.

L' u_z calculat, ha confirmat que la hipòtesis de deformació plana utilitzada en el model 2D és correcte ja que aquests desplaçaments han sigut mil·limètrics.

Respecte als moments flectors, no s'han pogut obtenir uns moments globals dels pilots i per tant no s'ha pogut establir una comparativa amb els calculats al model 2D.

L'anàlisi de desenvolupament de la fricció negativa realitzat per mitja de l'assentament diferencial pilot-terreny, ha mostrat una disminució de la zona on es desenvolupa la fricció negativa i del valor d'aquest assentament diferencial, a mesura que la distància a la part més alta del talús augmentava. Aquest efecte era l'esperat, ja que la quantitat de tot-u disponible per consolidar disminuïa. En el cas del moll amb les càrregues aplicades, sense la de l'esplanada, també s'ha observat una disminució de l'efecte de la fricció negativa respecte al cas sense càrregues, degut a que els pilots assenten per efecte de les càrregues i el terreny circumdant ja havia patit gran part de la consolidació.

En conclusió, definir un model en 3D és interessant per la immensa quantitat de resultats que presenta. Per contra, la interpretació d'aquests és complicada. Donades les hipòtesis que han calgut per definir el model i els resultats de desplaçament en z que confirmen que la hipòtesis de deformació plana al model 2D era correcte, l'anàlisi en 3D d'aquest problema no era necessari.

Comentari final

La facilitat d'ús que tenen molts programes de modelització en elements finits, fa que habitualment s'utilitzin aquests programes en molt problemes d'enginyeria, sense el coneixement del comportament teòric del problema necessari.

Aquests programes sempre et calculen resultats, però en moltes ocasions aquest resultats no són els observats a la realitat, ja sigui perquè el model definit no sigui el correcte o perquè el programa calculi comportaments erronis.

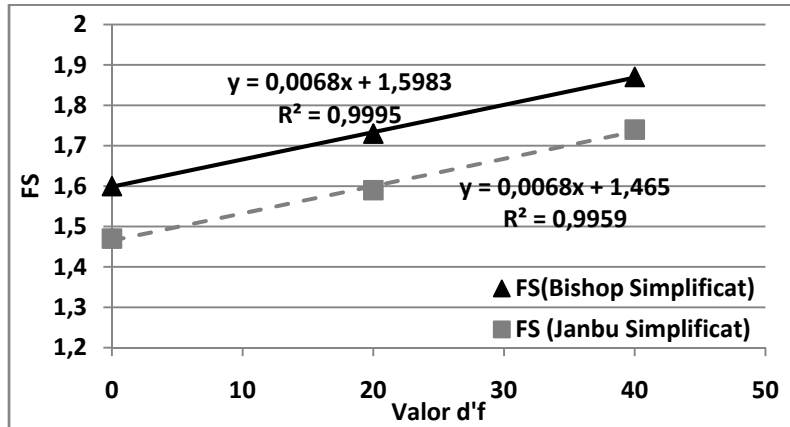
Sempre serà l'usuari qui haurà de validar els resultats i mai haurà d'anteposar-los al seu criteri.

9. Bibliografia

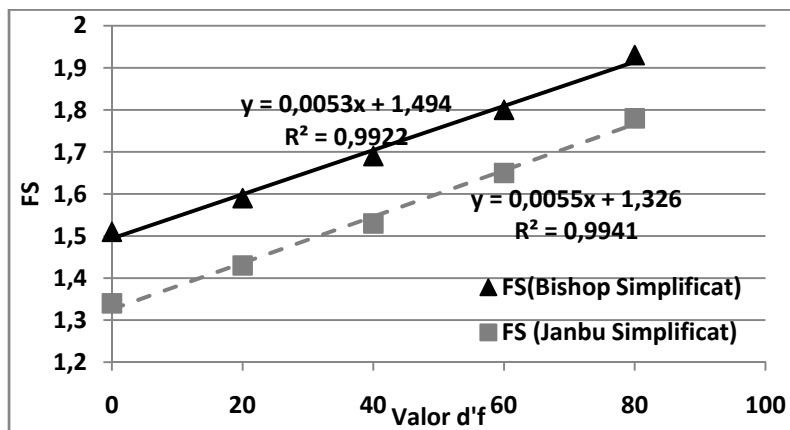
- **Puertos del estado (2005).** *Recomendaciones geotécnicas para el proyecto de obras marítimas y portuarias, ROM 0.5-05.* Capítulo 3-Criterios Geotécnicos.
- **Brinkgreve, R.B.J.(2002).** *Plaxis 2D Manual - version 8.* Delft University of Technology & Plaxis b.v. : A.A. Balkema Publishers.
- **Brinkgreve, R.B.J.; Broere, W.(2004).** *Plaxis 3D Foundation Manual-version 1.* Delft University of Technology & Plaxis b.v. : A.A. Balkema Publishers.
- **Alonso Pérez de Agreda, Eduardo (2005).** *Estabilidad de Taludes.* Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica de l'ETSECCP de Barcelona, UPC.
- **Simons, Noel; Menzies, Bruce; Matthews, Marcus (2005).** *Soil & Rock Slope Engineering.* Ed. Thomas Telford, 2ª edició. p. 77-113.
- **C. Wyllie, Duncan; W. Mah, Christopher (2007).** *Rock Slope Engineering (Civil & Mining).* Ed. Spon Press, 4ª edició. p. 176-197.
- **G. Poulos, H.; H. Davis, E (1990).** *Pile Foundation Analysis and Design.* Ed. Robert E. Krieger publishing company, Inc. p. 1-23, 264-277, 388-411.
- **Prakash, Shamsheer; D. Sharma, Hari (1990).** *Pile Foundation in Engineering Practice.* Ed. John Wiley & Sons, Inc. p. 1-40, 71-96, 143-146, 177-182, 237-243, 269.

10. Annex 1. Gràfiques

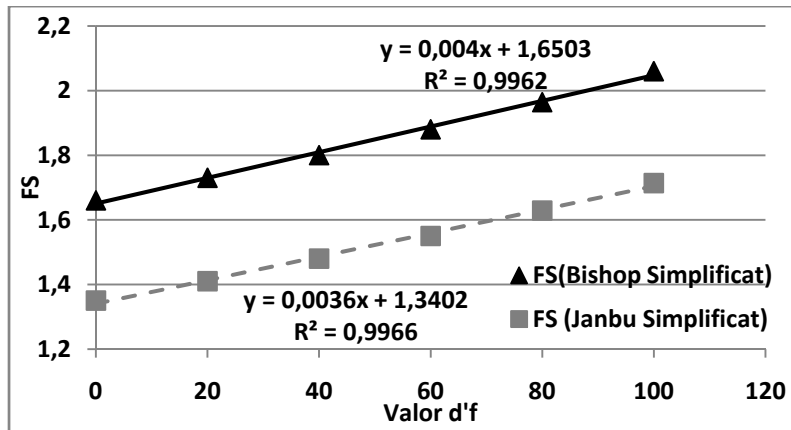
- Gràfiques d'evolució del factor de seguretat versus la càrrega aplicada per cada h i pels dos mètodes de càlcul, *Bishop Simplificat* i *Janbu Simplificat*.



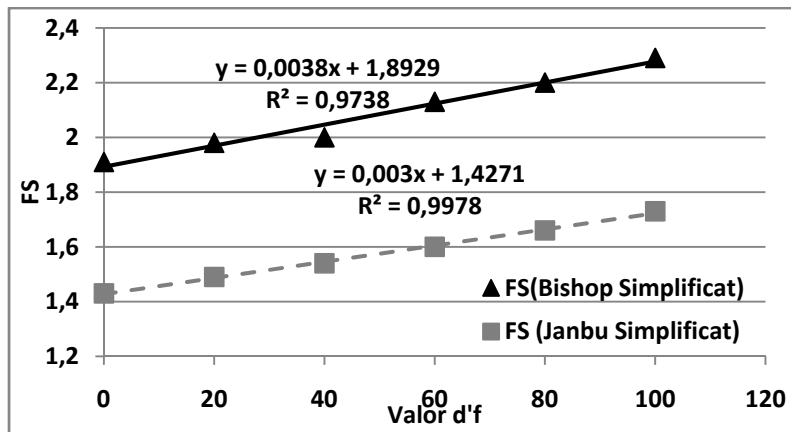
Gràfica 1. Variació del factor de seguretat versus la força horitzontal aplicada per una h igual a 3.7 metres.



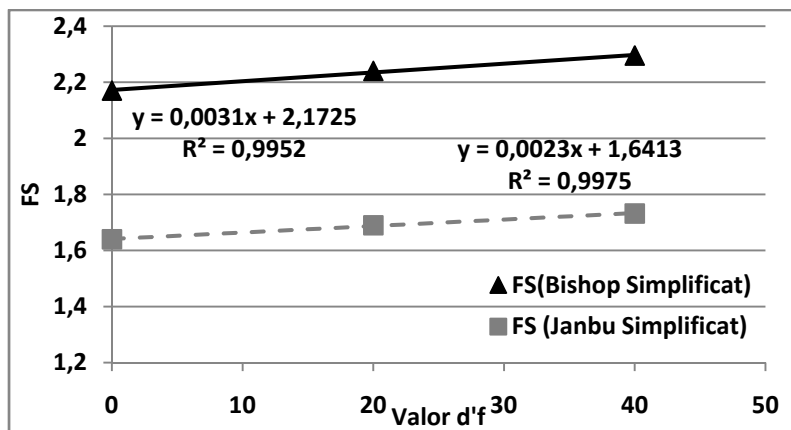
Gràfica 2. Variació del factor de seguretat versus la força horitzontal aplicada per una h igual a 4.6 metres.



Gràfica 3. Variació del factor de seguretat versus la força horitzontal aplicada per una h igual a 7.5 metres.



Gràfica 4. Variació del factor de seguretat versus la força horitzontal aplicada per una h igual a 9.5 metres.



Gràfica 5. Variació del factor de seguretat versus la força horitzontal aplicada per una h igual a 11.8 metres.

11. Annex 2. Càlculs realitzats

Càlcul de la longitud soterrada dels pilots de la segona fila.

1. Càlcul de la N_i .

- Carga de la llosa de formigó $\rightarrow 35 \text{ kPa} \cdot \frac{20+17}{2} \text{ m} = 647.5 \text{ kN/m}$

el terme $\frac{20+17}{2} \text{ m}$, és la longitud mitja de la llosa de formigó.

- Sobrecarga $\rightarrow 30 \text{ kPa} \cdot 20 \text{ m} = 600 \text{ kN/m}$
- $N_i = 647.5 + 600 = 1247.5 \text{ kN/m}$
- Suposant ara que cada pilot suporta la mateixa carga \rightarrow
 $\rightarrow \frac{1247.5}{3} = 415.83 \text{ kN/m}$

2. Càlcul de la W'_i .

- $W'_i = ((\gamma_f \cdot 5) - (\gamma_w \cdot 4.75)) \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \pi = ((25 \cdot 5) - (10 \cdot 4.75)) \cdot$
 $\frac{1.5^2}{4} \pi = 136.95 \text{ kN per metre d'espessor}$

3. Aplicació de la definició de factor de seguretat davant enfonsament d'un pilot individual segons la ROM.

$$F = \frac{Q_{hi}}{N_i + W'_i} \geq F_{\min} \rightarrow Q_{hi} = F_{\min} \cdot (N_i + W'_i)$$

$$Q_{hi} = 2.35 \cdot (415.83 + 136.95) = 1299.03 \text{ kN/m}$$

4. Definició del terme W' .

$$W' = ((\gamma_f \cdot (L + 8.5)) - (\gamma_w \cdot (L + 8.25))) \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \pi =$$
$$= ((25 \cdot (L + 8.5)) - (10 \cdot (L + 8.25))) \cdot \frac{1.5^2}{4} \cdot \pi$$

5. Càlcul de la L utilitzant la funció *Solver* de l'Excel i aplicant l'expressió ,
 $Q_h + W' = Q_p + Q_f$

$$1299.03 + ((25 \cdot (L + 8.5)) - (10 \cdot (L + 8.25))) \cdot \frac{1.5^2}{4} \cdot \pi =$$
$$= 6 \cdot 0.25 \cdot \gamma' \cdot L \cdot \frac{1.5^2}{4} \cdot \pi + \frac{1}{2} \cdot \frac{100 \cdot 0.25 \cdot \gamma' \cdot L}{100 + 0.25 \cdot \gamma' \cdot L} \cdot L \cdot (\pi \cdot 1.5)$$

$$L_{2a \text{ fila}} = 21.70 \text{ m}$$

Càlcul de la longitud soterrada dels pilots de la tercera fila.

1. Càlcul de la N_i .

- Carga de la llosa de formigó $\rightarrow 35 \text{ kPa} \cdot \frac{20+17}{2} \text{ m} = 647.5 \text{ kN/m}$

el terme $\frac{20+17}{2} \text{ m}$, és la longitud mitja de la llosa de formigó.

- Sobrecarga $\rightarrow 30 \text{ kPa} \cdot 20 \text{ m} = 600 \text{ kN/m}$
- $N_i = 647.5 + 600 = 1247.5 \text{ kN/m}$
- Suposant ara que cada pilot suporta la mateixa carga \rightarrow
 $\rightarrow \frac{1247.5}{3} = 415.83 \text{ kN/m}$

2. Càlcul de la W'_i .

- $W'_i = ((\gamma_f \cdot 7.5) - (\gamma_w \cdot 7.25)) \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \pi = ((25 \cdot 7.5) - (10 \cdot 7.25)) \cdot$
 $\cdot \frac{1.5^2}{4} \pi = 203.22 \text{ kN per metre d'espessor}$

3. Aplicació de la definició de factor de seguretat davant enfonsament d'un pilot individual segons la ROM.

$$F = \frac{Q_{hi}}{N_i + W'_i} \geq F_{\min} \rightarrow Q_{hi} = F_{\min} \cdot (N_i + W'_i)$$

$$Q_{hi} = 2.35 \cdot (415.83 + 203.22) = 1454.77 \text{ kN/m}$$

4. Definició del terme W' .

$$W' = ((\gamma_f \cdot (L + 8.5)) - (\gamma_w \cdot (L + 8.25))) \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \pi =$$
$$= ((25 \cdot (L + 8.5)) - (10 \cdot (L + 8.25))) \cdot \frac{1.5^2}{4} \cdot \pi$$

5. Càlcul de la L utilitzant la funció *Solver* de l'Excel i aplicant l'expressió ,
 $Q_h + W' = Q_p + Q_f$

$$1454.77 + ((25 \cdot (L + 8.5)) - (10 \cdot (L + 8.25))) \cdot \frac{1.5^2}{4} \cdot \pi =$$
$$= 6 \cdot 0.25 \cdot \gamma' \cdot L \cdot \frac{1.5^2}{4} \cdot \pi + \frac{1}{2} \cdot \frac{100 \cdot 0.25 \cdot \gamma' \cdot L}{100 + 0.25 \cdot \gamma' \cdot L} \cdot L \cdot (\pi \cdot 1.5)$$

$$L_{3a \text{ fila}} = 22.97 \text{ m}$$