



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ESTUDIO DE MOVIMIENTOS Y FILTRACIÓN EN UNA EXCAVACIÓN CON PANTALLAS

Trabajo realizado por:

Carlos Alberto Gálvez Jarén

Dirigido:

Almudena da Costa García

Titulación:

Grado en Ingeniería Civil

Santander, junio de 2014

TRABAJO FINAL DE GRADO

ÍNDICE

ÍNDICE	3
RESUMEN.....	5
SUMMARY	9
1. INTRODUCCIÓN	13
2. CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO.....	14
2.1. GEOLOGÍA DE LA ZONA.....	14
2.2. RECONOCIMIENTO DEL TERRENO REALIZADO	14
2.3. PERFIL Y CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL TERRENO.....	22
3. ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS.....	27
3.1. DESCRIPCIÓN DE LA EXCAVACIÓN	27
3.2. MODELIZACIÓN DEL PROBLEMA	27
3.3. RESULTADOS	33
4. ANÁLISIS DE FILTRACIONES.....	43
4.1. PERFIL DEL TERRENO.....	43
4.2. MODELIZACIÓN DEL PROBLEMA	43
4.3. RESULTADOS	45
5. CONCLUSIONES	59
BIBLIOGRAFÍA.....	61
ÍNDICE DE FIGURAS.....	63
ÍNDICE DE TABLAS	65
ANEJO	67

RESUMEN

Título: Estudio de movimientos y filtración en una excavación con pantallas

Autor: Carlos Alberto Gálvez Jarén

Director: Almudena da Costa García

Convocatoria: junio 2014

Palabras clave: pantalla, excavación, análisis numérico, filtración, caudal y levantamiento del fondo.

En una determinada parcela se van a construir unos edificios con dos niveles de sótanos. La excavación necesaria para los sótanos se va a realizar al abrigo de pantallas hormigonadas *in situ*. La proximidad de los edificios existentes a la excavación hace que se tenga una restricción importante con relación a los movimientos del terreno en el entorno de la excavación. Por ello, tras un dimensionamiento previo se propone una excavación con pantalla apuntalada a dos niveles.

Se ha llevado a cabo una campaña de trabajos de campo consistente en sondeos mecánicos, ensayos de penetración y ciertos ensayos de laboratorio con el fin de conocer los materiales presentes en la zona y sus características geotécnicas. El perfil del terreno de acuerdo al reconocimiento llevado a cabo, consiste en un estrato de arena de espesor variable, situándose por debajo una capa de arcillas también de espesor variable, y finalmente unas gravas de espesor medio de 6 m que se sitúan sobre la roca que aparece a una profundidad aproximada de 20 m. Con respecto al nivel de arcillas, en algunos de los sondeos realizados esta capa no fue detectada.

Otro aspecto a analizar es el relacionado con la filtración en el entorno de la excavación. El nivel freático en la zona se sitúa a una profundidad aproximada de dos metros siendo la excavación prevista de unos siete metros. La excavación se va a realizar en seco, lo que supone una filtración desde la zona exterior al interior de la excavación. En este caso, es importante tener en cuenta el distinto perfil del terreno con zonas en las que aparece un espesor de arcillas de hasta 4m y otras en las que este estrato no fue detectado.

De acuerdo con lo anterior, los objetivos del presente estudio son:

- Analizar los movimientos generados en la pantalla y en el terreno durante la excavación, así como las tensiones en el terreno y los esfuerzos sobre los elementos estructurales.
- Analizar la filtración en el entorno de la excavación.

Análisis de movimientos y tensiones

Para modelizar el problema y analizar los movimientos, se ha empleado el software *Plaxis 2D Version 8* (Brinkgreve R.B.J, 2007). Este software está basado en el método de elementos finitos para el análisis, en dos o tres dimensiones, de deformaciones y tensiones.

Del análisis de los resultados obtenidos se pueden destacar las siguientes conclusiones. Se observa cómo el terreno situado por debajo del fondo de la excavación tiende a levantarse y cómo los puntos del terreno más próximos a la pantalla tienden a moverse hacia el interior de la excavación, con unos valores máximos de 4,550 cm de desplazamiento vertical y de 1,138 cm de horizontal. En cuanto a la superficie de terreno no excavado en la zona, el desplazamiento total ascendente máximo es de 0,7332 cm y se produce en la zona cercana a la pantalla.

La distribución de las tensiones verticales refleja unos valores máximos de compresión de 399,8 kN/m², en el caso de las tensiones totales verticales, y de 219,8 kN/m², en el caso de las tensiones efectivas verticales.

Se observa cómo la pantalla tiende a flectar hacia el interior de la excavación y a elevarse, como consecuencia de los empujes del terreno sobre ella. El desplazamiento máximo total de la pantalla es de 1,353 cm siendo el horizontal de 1,138 cm.

Por último, se han estudiado, tras la excavación, los cortantes y momentos flectores en la pantalla y las fuerzas en los puntales. Los cortantes máximos y mínimos que sufre la pantalla son de 81,66 kN/m y de -179,20 kN/m y los flectores máximos y mínimos de 2,030 kN*m/m y de -405,8 kN*m/m. La máxima fuerza que soportan los puntales superiores e inferiores, por metro lineal, en valor absoluto, es de 76,929 kN y de 192,121 kN, respectivamente.

Análisis de filtración en el entorno de la excavación

Para el estudio de la filtración en el entorno de la excavación, se ha empleado el software *SEEP/W 2012* de *Geo-Slope* (Seep/W 2001). Éste es un software que, mediante el método de elementos finitos, permite el análisis de la filtración de agua en el interior el terreno.

Los resultados obtenidos muestran cómo los caudales filtrados son del mismo orden de magnitud para los casos con presencia de la capa de arcillas con distintos espesores, estando estos valores comprendidos entre $7,5 \cdot 10^{-10}$ m³/s y $3,0 \cdot 10^{-9}$ m³/s. Los caudales aumentan al disminuir el espesor de arcillas y aumentar el de arena, lo cual resulta lógico. Con respecto al caso sin arcilla, el caudal resulta muy superior, tal y como era de esperar. En concreto, el caudal obtenido es de $3,2 \cdot 10^{-3}$ m³/s, seis órdenes de magnitud mayor a los casos con arcilla. Esto también es lógico dadas las permeabilidades de las arenas y las arcillas.

Con respecto a la posición de la superficie libre y al descenso del nivel freático en las cercanías de la excavación, los resultados muestran cómo en los casos con presencia de arcilla no se produce descenso apreciable del nivel freático. En cambio, en el caso de no presencia de arcilla, se aprecia un descenso del nivel freático en el entorno de la excavación, siendo máximo, de valor 50 cm, en el contacto con la pantalla y reduciéndose de forma progresiva al alejarse de la pantalla.

El último aspecto a analizar es el posible levantamiento del fondo de excavación. En este sentido, para los casos con presencia de arcillas, los gradientes hidráulicos generados en el estrato arcilloso son grandes, ya que es en dicho estrato donde se producen las mayores pérdidas de potencial por unidad de longitud. En concreto, en la base de la capa de arcillas, la presión intersticial es de 120 kPa. Si se compara este valor con el de la tensión total vertical a esa profundidad (140 kPa) se concluye que no habrá levantamiento del fondo, resultando $\sigma_v/u = 1,17$. En el caso de no presencia de arcillas, los gradientes hidráulicos son suficientemente bajos como para que no se produzcan problemas de sifonamiento.

SUMMARY

Title: Analysis of movements and seepage in an open excavation with diaphragm walls

Author: Carlos Alberto Gálvez Jarén

Director: Almudena da Costa García

Date: June 2014

Key words: diaphragm wall, strut, excavation, numerical analysis, seepage, discharge, water flow rate and piping.

Some buildings with two basement floors are going to be built. Diaphragm walls will be used for the excavation. As a consequence of the short distance between the excavation and some other existing buildings, there is an important constraint regarding the possible soil movements in the excavation area. Therefore, a previous design has suggested that diaphragm walls with two rows of struts should be used.

Some field work has been carried out so as to know the different materials in the area and their geotechnical properties. For site investigation, boreholes, penetration tests and laboratory tests were performed. The soil profile, based on the field work, consists of a first layer of sand, then a clay stratum (both of them with variable thickness depending on the location) and a 6 m thick layer of gravel. The rock is located below the gravel at a depth of 20 m. Dealing with the clay layer, this material was not detected in one of the borings.

Another important issue is the analysis of the seepage in the excavation area. The ground water level in this area is located two meter deep. The excavation is to take place keeping dry the excavation. This will result in some seepage from the excavation surroundings to the cutting. For the analysis of the seepage, the different thickness of both the sand and clay layers has to be taken into account.

Accordingly, the objectives of this study are:

- To analyze the diaphragm wall and soil movements during the excavation, and the stresses in the soil and the structural elements after the excavation.
- To evaluate the seepage process in the excavation surroundings.

Analysis of movements and stresses

Plaxis 2D Version 8 (Brinkgreve R.B.J, 2007) has been used for the study of the diaphragm wall and soil movements. This software, based on the finite element method, is commonly used in geotechnical problems for the analysis of deformations and stresses in 2D or 3D.

From the analysis of the results, some conclusions can be made. On the one hand, the soil which is located below the excavation tends to move upwards being the maximum vertical displacement 4,550 cm. On the other hand, the soil which is close to the wall tends to move sideways to the excavation with a maximum horizontal displacement of 1,138 cm. Concerning the excavation surrounding area, the maximum upwards total displacement takes place in the points that are closest to the wall and its value is equal to 0,7332 cm.

With regard to the vertical stresses distribution, the maximum total vertical stress is equal to 399,8 kN/m² whereas the maximum effective vertical is 219,8 kN/m².

The wall is likely to bend to the excavation and to move upwards as a consequence of the earth pressure on it. The maximum total wall displacement is 1,353 cm and the maximum horizontal one is 1,138 cm.

Finally, the distributions of the shear stresses and the bending moments in the wall have been studied as well as the strut forces. The maximum and minimum shear stresses are equal to 81,66 kN/m and -179,20 kN/m while the maximum and minimum bending moments are 2,030 kN*m/m and -405,8 kN*m/m. For the struts, the maximum absolute value force of the top and bottom struts is equal to 76,929 kN/m and 192,121 kN/m respectively.

Analysis of the seepage in the excavation surroundings

In order to analyze the seepage in the excavation surroundings, *SEEP/W 2012* (Seep/W 2001) by *Geo-Slope* has been used. This software, based on the finite element method, is commonly used to study the seepage process in the ground.

According to the obtained results, in those cases with different thickness of the clay layer, the discharge values are quite similar: between $7,5 \cdot 10^{-10}$ m³/s and $3,0 \cdot 10^{-9}$ m³/s. The higher discharge was obtained for the situation with a lower thickness of the clay layer, as it was expected. When there is not clay, the discharge appears to be much higher, as it is supposed to, with a value of $3,2 \cdot 10^{-3}$ m³/s. In other words, the presence of the clay layer results in a water

flow rate six orders of magnitude larger than the case without clay. This is also logical because of the values of sand and clay permeability, which are clearly different.

In relation to the position of the free surface and to the drop of the ground water level in the excavation surrounding area, the results show that there is not that significant drop when there is some clay. However, if there is not any clay, this drop of the ground water level is relevant. The maximum value of this drop is 50 cm and it appears in the points which are closest to the wall. This drop decreases with the distance to the wall.

The last issue that has been studied is the possibility of piping in the excavation. On this subject, the hydraulic gradients in the clay layer are important because of its permeability. Particularly, at the bottom of the clay layer, the pore water pressure is 120 kPa and the vertical total stress at that depth is 140 kPa. These values result in a ratio $\sigma_v/u = 1,17$ so it can be concluded that piping will not occur. On the other hand, if there is no clay, the hydraulic gradients are too small to let piping take place.

Bibliografía / Bibliography

- Brinkgreve R.B.J. 2007. *Plaxis finite element code for soil and rock analysis*, 2D, version 8. Rotterdam: Balkema.
- *Flow towards open excavations with bottom grouted seal*. Sánchez-Alciturri, J.M., Cañizal, J. y Sagasetta, C. *3rd European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE' 94)* (1994). PP. 363,367. Balkema.
- Geotecnia y Cimientos II. Mecánica del suelo y de las rocas. Jiménez Salas, J.A. y otros (1981). Ed. Rueda.
- Seep/W 2011. Groundwater Seepage Analysis. Geo-Slope International Ltd., Canada.

1. INTRODUCCIÓN

En una determinada parcela se van a construir unos edificios con dos niveles de sótanos. La parcela donde se va a realizar la edificación limita, en gran parte de su perímetro, con la vía pública. Por los otros lados, se encuentra muy próxima a algunos edificios cercanos.

La excavación necesaria para los sótanos se va a realizar al abrigo de pantallas hormigonadas *in situ*. La proximidad de los edificios existentes a la excavación hace que se tenga una restricción importante con relación a los movimientos del terreno en el entorno de la excavación. Por ello, tras un dimensionamiento previo se propone una excavación con pantalla apuntalada a dos niveles.

Se ha llevado a cabo una campaña de trabajos de campo consistente en sondeos mecánicos, ensayos de penetración y ciertos ensayos de laboratorio con el fin de conocer los materiales presentes en la zona y sus características geotécnicas, así como analizar la excavabilidad, las contenciones y la carga admisible y la tipología de cimentación más adecuadas.

Otro aspecto a analizar es el relacionado con la filtración en el entorno de la excavación. El nivel freático en la zona se sitúa a una profundidad aproximada de dos metros siendo la excavación prevista de unos siete metros. La excavación se va a realizar en seco, lo que supone una filtración desde la zona exterior al interior de la excavación. En relación a la filtración, se deben analizar varios aspectos como los caudales filtrados; el rebajamiento del nivel freático que pueda tener lugar en las zonas cercanas, lo que puede suponer problemas en los edificios existentes; y el posible sifonamiento o levantamiento del fondo de la excavación.

De acuerdo a lo anterior, los objetivos del presente estudio son:

- Analizar los movimientos generados en la pantalla y en el terreno durante la excavación así como las tensiones en el terreno y los esfuerzos sobre los elementos estructurales.
- Analizar la filtración en el entorno de la excavación.

2. CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO

2.1. GEOLOGÍA DE LA ZONA

La zona objeto de estudio se sitúa entre los accidentes tectónicos más significativos de la región vizcaína, como son el Anticlinal de Bilbao, al Oeste-Suroeste, y el Sinclinorio de Vizcaya, al Noreste, accidentes estos achacados a la Orogenia Alpina.

Los materiales existentes en la zona de estudio pertenecen al Cretácico inferior (Albiense) y se encuentran recubiertos por depósitos cuaternarios aluviales y antropogénicos de espesor importante.

El estrato Albiense está constituido por margas grises hojosas en la parte inferior, que van pasando hacia arriba a otras más calizas, haciéndose tabulares con vetas de calcita y explotables en cantera. La presencia de estas margas en el sustrato rocoso queda patente mediante los registros de los sondeos realizados. También se han atravesado lutitas que se presentan en niveles que alternan o incluyen estratos poco potentes de arenisca.

Recubriendo las formaciones descritas, existen depósitos cuaternarios aluviales del río Nervión de una potencia de unos 19,00 – 21,00 metros, constituidos por arenas, arcillas, limos, bolos y gravas en la base, de naturaleza fundamentalmente areniscosa, aunque también calcárea. Asimismo, recubriendo a estos depósitos, existen otros más recientes (rellenos heterogéneos), constituidos por rellenos con espesor del orden de 1,50 metros.

2.2. RECONOCIMIENTO DEL TERRENO REALIZADO

Los trabajos de campo han consistido en una inspección de la zona desde el punto de vista geológico-geotécnico, así como en la realización de sondeos mecánicos, toma de muestras y ensayos de penetración.

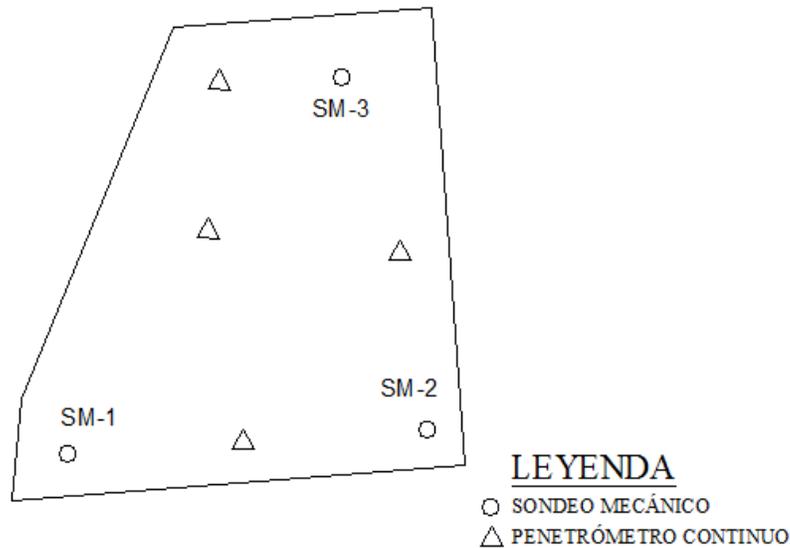


Figura 1: Ubicación de los puntos de reconocimiento

Se han llevado a cabo tres (3) sondeos mecánicos a rotación con extracción continua de testigo, mediante una máquina de sondeos tipo CIBELES C60. En la Figura 1 se recoge su localización en planta. En la Tabla 1 se muestra la profundidad alcanzada en cada uno de los sondeos.

Tabla 1: Profundidad de sondeos

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)
SM-1	27,70
SM-2	24,00
SM-3	25,00

Durante la ejecución de los sondeos se han llevado a cabo ensayos de penetración dinámica *standard* (SPT, *Standard Penetration Test*). El ensayo consiste en la introducción en el terreno de un tomamuestras bipartido, normalizado para este ensayo. Como energía de impacto se utiliza una maza de 63,5 kilogramos que cae desde una altura de 75 centímetros.

Para su realización se contabilizan los golpes necesarios para la hincada de 60 centímetros en intervalos de 15 centímetros. El resultado, número de golpes N_{SPT} , viene definido por la suma de los dos intervalos centrales, ya que se considera que en los primeros 15 centímetros el sondeo puede estar alterado y el último valor se puede obtener simplemente para completar la longitud de la cuchara. En la Tabla 2 se recopilan los resultados de golpes obtenidos.

Tabla 2: Resultados ensayos SPT

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)	N _{SPT}
SM-1	3,60 – 4,20	8
SM-1	6,60 – 7,20	4
SM-1	9,60 – 10,20	10
SM-1	12,60 – 13,20	20
SM-2	3,90 – 4,50	4
SM-2	6,60 – 7,20	6
SM-2	9,60 – 10,20	13
SM-2	11,30 – 11,90	12
SM-3	3,80 – 4,40	4
SM-3	6,60 - 7,20	6
SM-3	9,60 – 10,20	8
SM-3	12,60 – 13,20	16

Durante la ejecución de los sondeos se ha procedido también a la toma de muestras, tanto alteradas como testigos parafinados. En la Tabla 3 se recogen las muestras tomadas.

Tabla 3: Toma de muestras

SONDEO	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)
SM-1	MI	6,00 – 6,60
SM-1	MI	9,00 - 9,60
SM-1	MI	12,00 – 12,60
SM-2	MI	3,30 – 3,90
SM-2	MI (no salió)	6,00 – 6,60
SM-2	MI	9,00 – 9,60
SM-2	MI	10,70 - 11,30
SM-2	TP	23,60 – 24,00
SM-3	MI	3,20 – 3,80
SM-3	MI	6,00 – 6-60
SM-3	MI	9,00 – 9-60
SM-3	MI	12,00 – 12,60

MI: Muestra inalterada

TP: Testigo parafinado

Una vez finalizada la perforación de los sondeos mecánicos se instaló una tubería piezométrica de PVC, procediéndose a comprobar la presencia de agua en el terreno. Las profundidades detectadas se indican en la Tabla 4.

Tabla 4: Nivel freático en sondeos

SONDEO	PROFUNDIDAD DEL NIVEL DEL AGUA (m)
SM-1	2,10
SM-2	2,10
SM-3	1,80

La situación de los sondeos y sus perfiles están reflejados, respectivamente, en la Figura 1 y en la Figura 2.

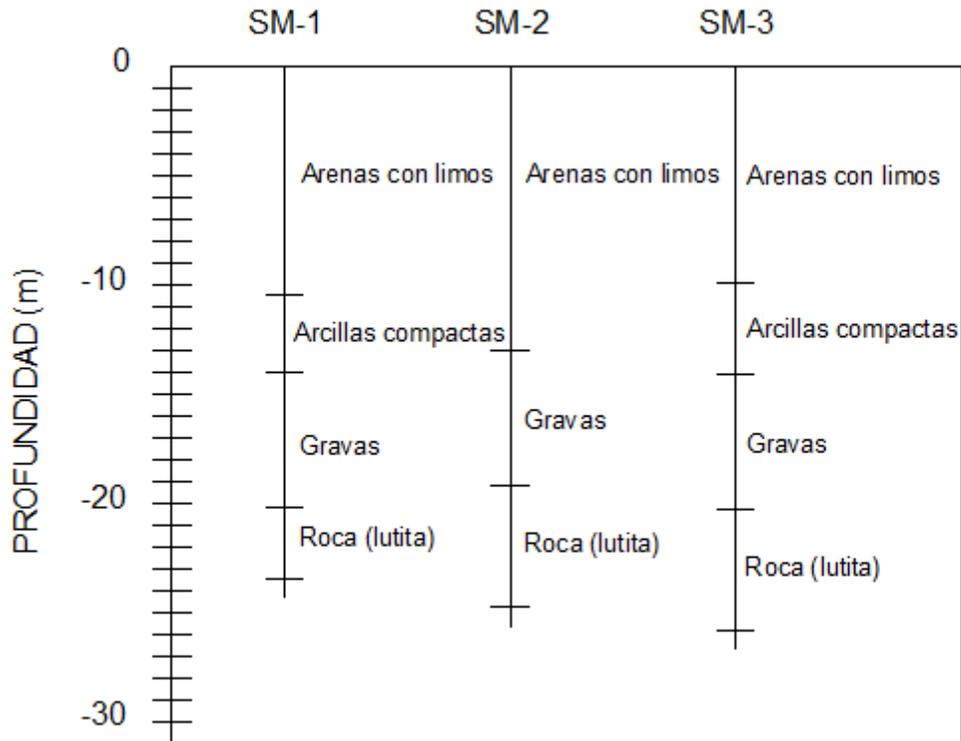


Figura 2: Perfil del terreno en los sondeos

Se han llevado a cabo cuatro (4) ensayos de penetración dinámica continua, mediante un penetrómetro tipo DPSH (Dynamic Penetration - Super Heavy). El ensayo consiste en contabilizar el número de golpes necesarios para introducir en el terreno una puntaza normalizada, en intervalos de 20 centímetros, golpeada por una maza de 63,5 kilogramos que cae desde una altura de 75 centímetros. Las profundidades alcanzadas son las que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Profundidades en ensayos DPSH.

PENETRÓMETRO	PROFUNDIDAD (m)
P-1	14,20
P-2	13,20
P-3	14,20
P-4	14,20

La ubicación de los ensayos de penetración se indica en la Figura 1 y los resultados de golpes de los mismos están reflejados en el anejo.

Los ensayos de laboratorio realizados sobre las muestras tomadas se recogen en la Tabla 6.

Tabla 6: Ensayos de laboratorio realizados

SONDEO	TIPO MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	ENSAYOS
SM-1	MI	6,00 – 6,60	H-D-LA-EG-E
SM-1	MI	12,00 – 12,60	H-D-LA-EG-CS
SM-2	MI	3,30 – 3,90	H-D-LA-EG-E
SM-2	TP	23,60 – 24,00	H-D-CS
SM-3	MI	3,20 – 3,80	H-D-LA-EG-CD
SM-3	MI	9,00 – 9-60	H-D-LA-EG-E

H: Humedad; D: Densidad/es; LA: Límites de Atterberg; EG: Ensayo granulométrico;
CS: Compresión simple; E: Edómetro; CD: Corte directo

Por otro lado se ha tomado una muestra de agua en el sondeo SM-3 y se ha ensayado su agresividad al hormigón (norma EHE), dando lugar a los resultados de la Tabla 7.

Tabla 7: Agresividad del agua al hormigón

ENSAYO	RESULTADO
pH	7,5
Residuo seco (mg/l)	243
Sulfatos (mg/l)	48
Magnesio (mg/l)	3
Dióxido de carbono libre CO ₂ (mg/l)	5
Amonio NH ₄ ⁺ (mg/l)	1
Agresividad al hormigón: NO AGRESIVA	

2.3. PERFIL Y CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL TERRENO

En este apartado se definen el perfil y las características del terreno de acuerdo al reconocimiento realizado y su interpretación.

En superficie existe una capa de rellenos heterogéneos de pequeño espesor. A continuación, aparecen los materiales de origen aluvial, tales como las deposiciones de la ría del Nervión, y finalmente el sustrato rocoso, que se encuentra a una profundidad de unos 19-21 metros con respecto a la superficie actual. El nivel freático se ha detectado somero, a profundidades entre 1,80 y 2,10 metros, considerándose un valor medio de 2,00 metros.

A continuación se recoge una descripción de los diferentes niveles detectados en los trabajos de campo.

Nivel I: Arenas con limos

El espesor de este nivel oscila en los sondeos realizados entre 9,90 metros en el sondeo SM-3 y 13,00 metros en el sondeo SM-2. Se trata de materiales de color marrón y gris, con materia orgánica. La compacidad de las arenas está relacionada con los golpes obtenidos en los ensayos. En la Tabla 8 se presenta un resumen de la compacidad obtenida de acuerdo a los resultados de los ensayos SPT. Como se puede ver en dicha tabla, se trata de arenas flojas a medianamente

densas. Muestras de estos materiales se han ensayado en el laboratorio. Los principales resultados de los ensayos realizados se recogen en la Tabla 9.

Tabla 8: Compacidad de las arenas

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)	N* _{SPT}	COMPACIDAD
SM-1	3,60 – 4,20	12	Medianamente densas
SM-1	6,60 – 7,20	6	Flojas
SM-1	9,60 – 10,20	15	Medianamente densas
SM-2	3,90 – 4,50	6	Flojas
SM-2	6,60 – 7,20	9	Flojas
SM-2	9,60 – 10,20	19	Medianamente densas
SM-3	3,80 – 4,40	6	Flojas
SM-3	6,60 – 7,20	9	Flojas

Donde $N^*_{SPT} = 1,5 * N_{SPT}$, al haberse empleado un equipo automatizado para la realización de los ensayos.

Tabla 9: Resultados de los ensayos de laboratorio sobre arenas con limos

REFERENCIAS			CARACTERÍSTICAS FÍSICAS					DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS				
SONDEO	PROFUNDIDAD	TIPO DE MUESTRA	HUMEDAD (%)	DENSIDAD APARENTE (kN/m ³)	% PASA TAMIZ 200	PLASTICIDAD			CORTE DIRECTO	ENSAYO EDMÉTRICO			
						LL (%)	IP (%)			c' (kPa)	Ø' (°)	e _{oi}	C _c
SM-1	6,00 - 6,60	MI	31,0	18,77	16,4	N.P.	N.P.	Arenas con limos	-	-	0,868	0,082	0,005
SM-2	3,30 - 3,90	MI	30,7	19,17	9,2	N.P.	N.P.	Arenas con limos	-	-	0,807	0,099	0,007
SM-3	3,20 - 3,80	MI	54,4	19,83	34,3	N.P.	N.P.	Arenas con limos	10,3	36,2	-	-	-
SM-3	9,00 - 9,60	MI	39,9	19,84	13,5	N.P.	N.P.	Arenas con limos	-	-	1,088	0,116	0,008

Todas las muestras han resultado no plásticas. Además, se ha llevado a cabo un ensayo de corte directo en una de las muestras cuyo resultado se muestra en el anejo. De la interpretación de dicho ensayo se han obtenido los siguientes valores de los parámetros resistentes: cohesión efectiva de 10,3 kPa y ángulo de rozamiento interno efectivo de 36,2°.

Los edómetros han dado resultados concordantes con la naturaleza arenosa de estos materiales. Los índices de compresión y de hinchamiento indican que estos materiales no son tan compresibles como otros materiales más finos en los que la teoría edométrica es aplicable con un mayor grado de realismo. En este caso, la proporción de limos no influye tanto como para condicionar este comportamiento.

Nivel II: Arcillas compactas

Este nivel, caracterizado por una consistencia muy superior al de las arenas con limos suprayacente, presenta un espesor variable entre 4,10 y 3,40 metros. En el sondeo SM-2, esta capa de arcillas no fue detectada. Son materiales de color ocre, con algunos restos de materia orgánica. En la Tabla 10 se presenta la consistencia de estas arcillas, en función de los resultados de los ensayos SPT.

Tabla 10: Consistencia de las arcillas

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)	N* _{SPT}	CONSISTENCIA
SM-1	12,60 – 13,20	30	Firme
SM-3	12,60 – 13,20	24	Firme

Donde $N^*_{SPT} = 1,5 * N_{SPT}$, al haberse empleado un equipo automatizado para la realización de los ensayos.

En relación a estos materiales, teniendo en cuenta los datos de los trabajos de campo, cabe señalar que serán más competentes y menos compresibles que los anteriores. Del ensayo de compresión simple, realizado sobre la muestra inalterada SM-1 a 12,00-12,60 metros, se ha obtenido una resistencia de 300 kPa, lo que está de acuerdo con la consistencia deducida con los golpes SPT. Su permeabilidad será también más baja, estimándose un valor de $k = 10^{-10}$ m/s.

Nivel III: Gravas

Este material se ha detectado a una profundidad aproximada de 14,00 metros, siendo su espesor medio de 6 metros. Su descripción es la siguiente: gravas de naturaleza calcárea y areniscosa, de diámetro inferior a 12 centímetros, sobrerredondeadas, densas y con algún bolo de arcillas y arenas.

3. ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA EXCAVACIÓN

Para los dos niveles de sótano previstos se ha planteado una excavación hasta una profundidad de 7 metros, con un ancho de 12 metros y realizada al abrigo de pantallas hormigonadas in situ. Como se ha comentado anteriormente, la parcela se sitúa en una zona de edificaciones cercanas por lo que existe una limitación importante en cuanto a los movimientos del terreno en el entorno de la excavación. Por ello, se han planteado dos niveles de apuntalamiento de la pantalla a 1 y 3 metros de profundidad.

El nivel freático en la zona se encuentra a una profundidad media de 2 metros. La excavación se va a realizar en seco, lo que supone unas filtraciones en el entorno de la excavación. El cálculo de caudales y rebajamiento del nivel freático en el entorno de la excavación se presenta en el apartado 4.

De acuerdo con el perfil del terreno definido en el apartado anterior, en base al reconocimiento del terreno realizado, el estudio de la excavación se realiza considerando los siguientes niveles:

- De 0 a -10 metros: Arenas
- De -10 a -14 metros: Arcillas
- De -14 a -20 metros: Gravas
- Nivel freático a 2 metros de profundidad

3.2. MODELIZACIÓN DEL PROBLEMA

El software empleado para analizar el problema es *Plaxis 2D Version 8* (Brinkgreve R.B.J, 2007). Este software está basado en el método de elementos finitos para el análisis, en dos o tres dimensiones, de deformaciones y tensiones. Se trata de un software muy empleado en problemas geotécnicos tales como excavaciones, cimientos, muros de contención, túneles, etc. ya que tiene en cuenta las presiones intersticiales en el terreno.

Modelos de comportamiento y parámetros del terreno

Se ha adaptado un modelo de comportamiento y unos parámetros geotécnicos para cada uno de los niveles de terreno del perfil que hay en la zona, de acuerdo a sus propiedades deducidas del reconocimiento del terreno realizado.

- Arenas: Se ha considerado un comportamiento elastoplástico con el modelo de Mohr-Coulomb y con los siguientes parámetros:
 - Cohesión, $c = 10 \text{ kPa}$
 - Ángulo de rozamiento interno, $\phi = 35^\circ$
 - Ángulo de dilatación, $\psi = 3^\circ$
 - Módulo de elasticidad, $E = 10.000 \text{ kPa}$
 - Coeficiente de Poisson, $\nu = 0,3$
 - Peso específico saturado, $\gamma_{\text{sat}} = 19,0 \text{ kN/m}^3$
 - Coeficiente de permeabilidad, $k = 10^{-3} \text{ m/s}$
- Arcillas: Dado que se trata de arcillas de consistencia firme, se han considerado como un material elástico con los siguientes parámetros:
 - Módulo de elasticidad, $E = 20.000 \text{ kPa}$
 - Coeficiente de Poisson, $\nu = 0,3$
 - Peso específico saturado, $\gamma_{\text{sat}} = 20,5 \text{ kN/m}^3$
 - Coeficiente de permeabilidad, $k = 10^{-10} \text{ m/s}$
- Gravas: Se ha considerado un modelo de comportamiento elástico con los siguientes parámetros:
 - Módulo de elasticidad, $E = 60.000 \text{ kPa}$
 - Coeficiente de Poisson, $\nu = 0,3$
 - Peso específico saturado, $\gamma_{\text{sat}} = 22,0 \text{ kN/m}^3$
 - Coeficiente de permeabilidad, $k = 10^{-2} \text{ m/s}$
- Pantallas: Se ha empleado el elemento “Plate” con los siguientes parámetros:
 - $EA = 1,68E7 \text{ kN/m}$
 - $EI = 8,96E5 \text{ kN}\cdot\text{m}^2/\text{m}$
 - $w = 0,00 \text{ kN/m/m}$
 - $v = 0,00 \text{ kN}\cdot\text{m}^2/\text{m}$

- Puntales: Modelados mediante el elemento “*Fixed-end anchor*” y con los siguientes parámetros:
 - $EA = 2100000 \text{ kN}$
 - $L_{\text{spacing}} = 2,00 \text{ m}$

Geometría y condiciones de contorno

La geometría del problema se ha definido de acuerdo con el perfil del terreno descrito anteriormente. El estudio se ha realizado en deformación plana (2D) y, dada su simetría, se ha considerado únicamente la mitad de la excavación. El nivel freático se ha dispuesto inicialmente a 2 metros de profundidad y los puntales se han situado a 1 y 3 metros.

Como condiciones de contorno se han establecido desplazamientos horizontales nulos en el eje de simetría y en el lateral, y desplazamientos horizontales y verticales nulos en el contorno inferior. En la Figura 3 se muestran estas condiciones y en la Figura 4 la malla de elementos finitos empleada en el cálculo.

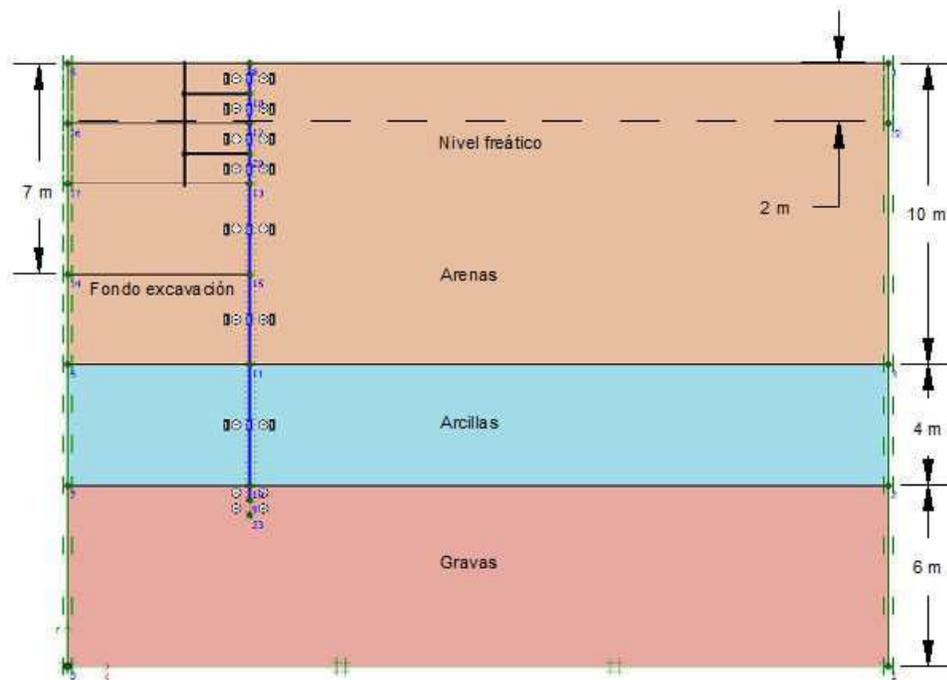


Figura 3: Geometría y condiciones de contorno

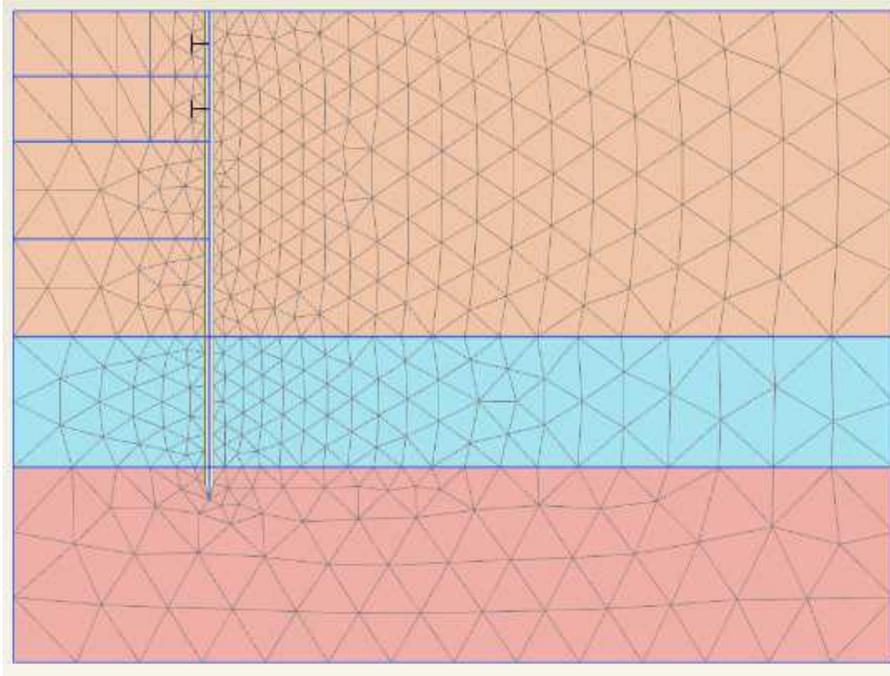


Figura 4: Malla generada

Fases de cálculo

A continuación se presentan las fases de cálculo consideradas en el análisis:

- Fase inicial
- Activación de la pantalla
- Excavación del primero de los tres tramos de terreno a excavar
- Colocación de los puntales superiores
- Excavación del segundo de los tres tramos de terreno a excavar
- Colocación de los puntales inferiores
- Excavación del tercer y último tramo de terreno a excavar

En los siguientes párrafos se describe con más detalle cada una de las fases anteriores.

En la fase inicial se generan las tensiones correspondientes al peso propio del terreno y las presiones intersticiales, en este caso hidrostáticas correspondientes al nivel freático localizado a 2 metros de profundidad. En la Figura 5 se muestran dichas presiones hidrostáticas.

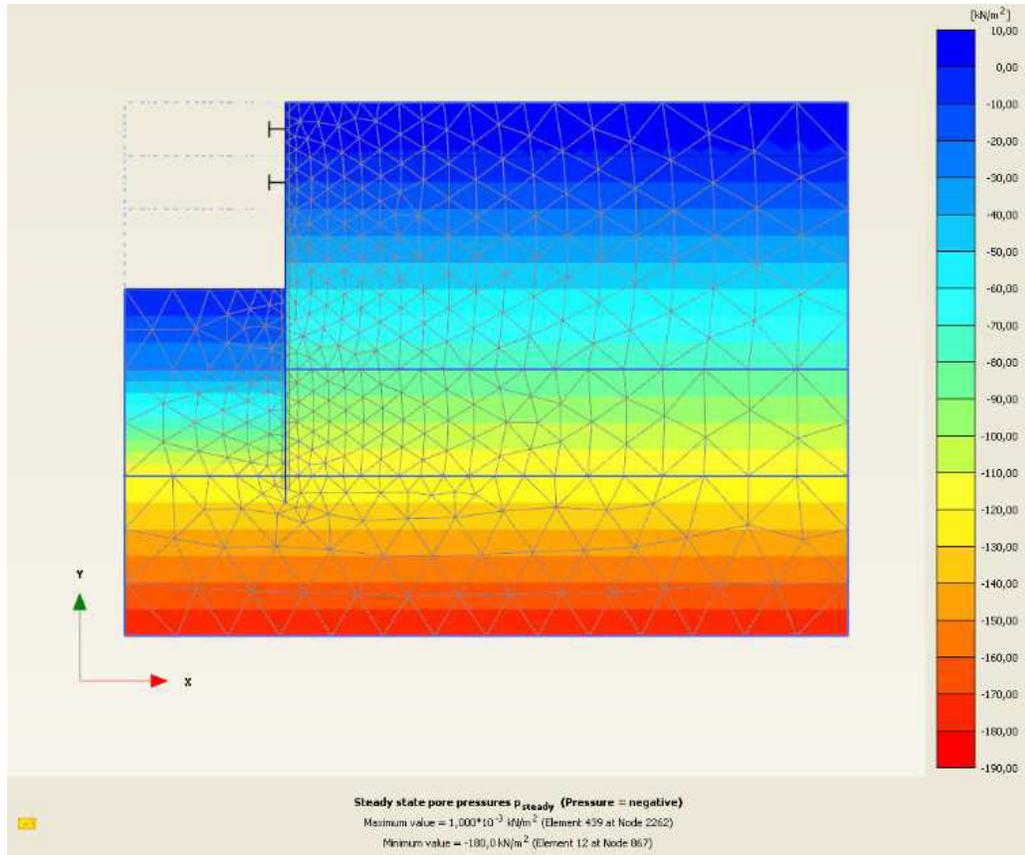


Figura 5: Distribución de presiones hidrostáticas en la fase inicial

En la fase siguiente, la número uno, se activa la pantalla simbolizando esto su proceso de construcción *in situ*.

En la fase dos, se desactiva el primer tramo de terreno a excavar simbolizando esto su proceso de excavación. A partir de esta fase se modifica la forma que tiene *Plaxis* de calcular las presiones intersticiales, debido a la diferencia de cota del nivel freático entre el exterior y el interior de la excavación. Esta diferencia de cotas hace que exista una filtración, por lo que ahora se escoge la opción “*Steady state groundwater flow*”. Las condiciones de contorno en relación a la filtración se muestran en la Figura 6 y en este caso son:

- Lateral derecho: Potencial conocido de 18 metros
- Eje de simetría: Contorno impermeable
- Contorno inferior: Contorno impermeable
- Nivel freático a la cota 18 m en el interior de la excavación.

En base a lo anterior, y teniendo en cuenta las permeabilidades de cada suelo, el programa calcula las presiones intersticiales correspondientes.

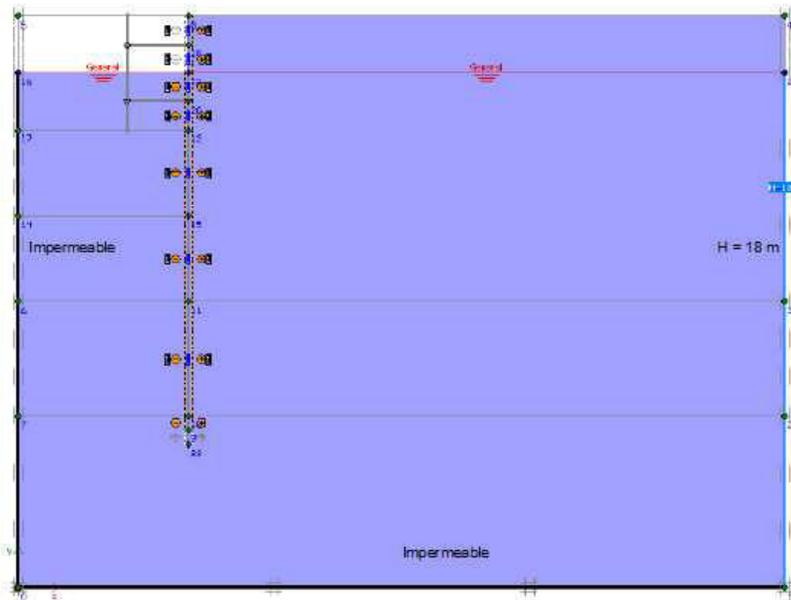


Figura 6: Condiciones de contorno para filtración en la fase dos del cálculo de la excavación

En la fase tres se activan los puntales superiores simbolizando esto su proceso de colocación en obra.

En la fase cuatro se desactiva el segundo tramo de terreno a excavar y se vuelve a cambiar la posición del nivel freático dado que la excavación se está haciendo en seco. El cálculo de presiones intersticiales con filtración se hace de forma idéntica a la descrita en la fase dos.

En la fase cinco se activan los puntales inferiores simbolizando esto su proceso de colocación en obra.

En la fase seis se desactiva el último tramo de terreno a excavar y se vuelve a cambiar la posición del nivel freático. Las presiones intersticiales se generan de forma idéntica a la descrita en las fases dos y cuatro, puesto que la excavación se está haciendo en seco.

3.3. RESULTADOS

Con la malla de elementos finitos generada y las fases de la excavación modelizadas, se procede a obtener diferentes resultados sobre el proceso de la excavación.

Se presenta en la Figura 7 la malla deformada al final de la fase dos; en la Figura 8, la malla deformada al final de la fase cuatro y, en la Figura 9, la malla deformada al final de la excavación. Ha de tenerse en cuenta que las deformadas de cada caso se encuentran ampliadas tal y como se indica en la parte inferior de cada una de las Figuras.

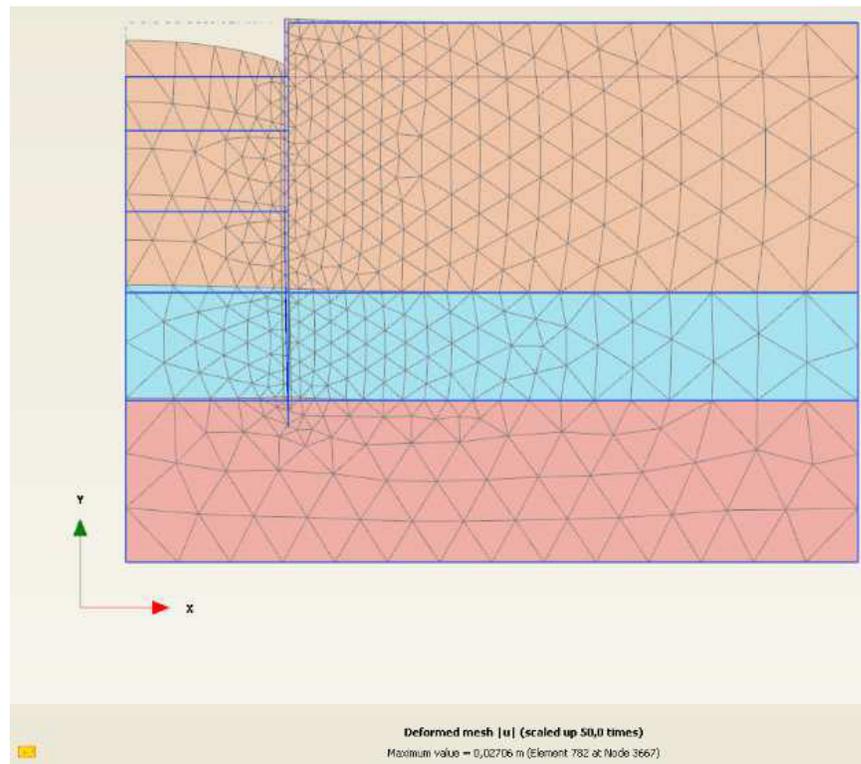


Figura 7: Malla deformada tras la fase 2

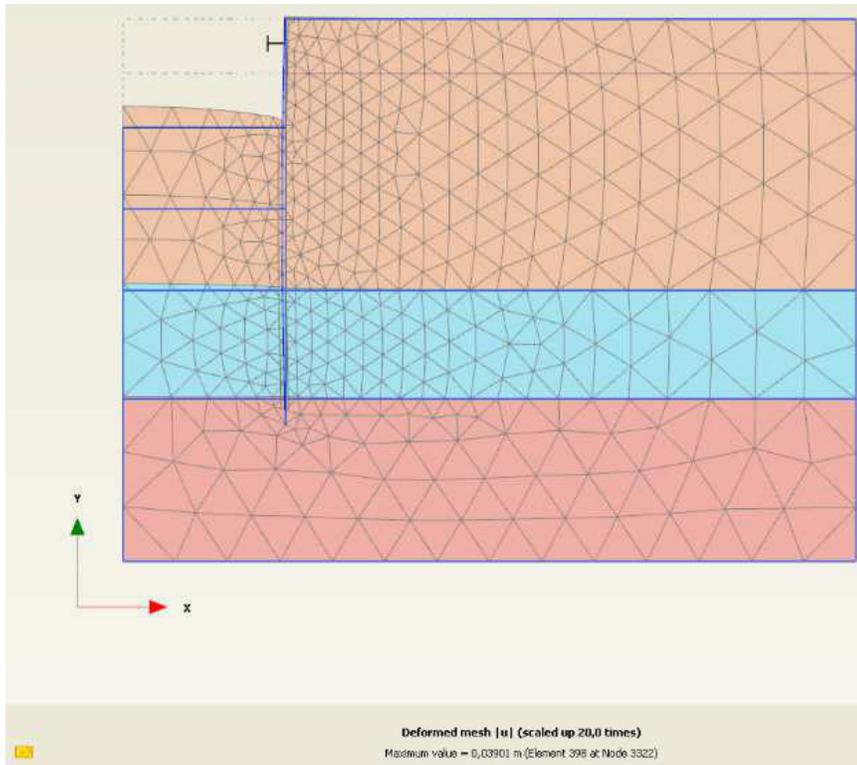


Figura 8: Malla deformada tras la fase 4

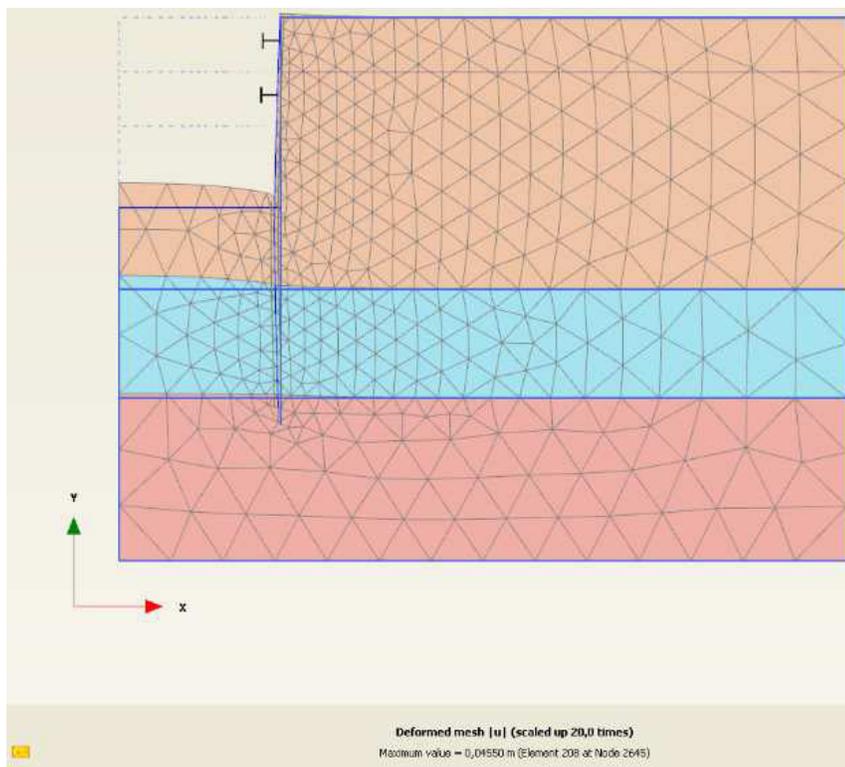


Figura 9: Malla deformada tras la fase 6

En todas las figuras relativas a mallas deformadas se observan, tal y como era de esperar, desplazamientos verticales hacia arriba en la zona del fondo de la excavación. Estos desplazamientos son mayores a medida que avanzan las fases de excavación. El desplazamiento máximo de estos puntos del terreno es de 4,550 centímetros y, lógicamente, se produce una vez finalizada la excavación.

Tras la fase seis de cálculo, con la excavación terminada, se estudian los desplazamientos del terreno. La Figura 10 muestra los desplazamientos totales y la Figura 11 y la Figura 12 presentan, respectivamente, los desplazamientos totales verticales y horizontales.

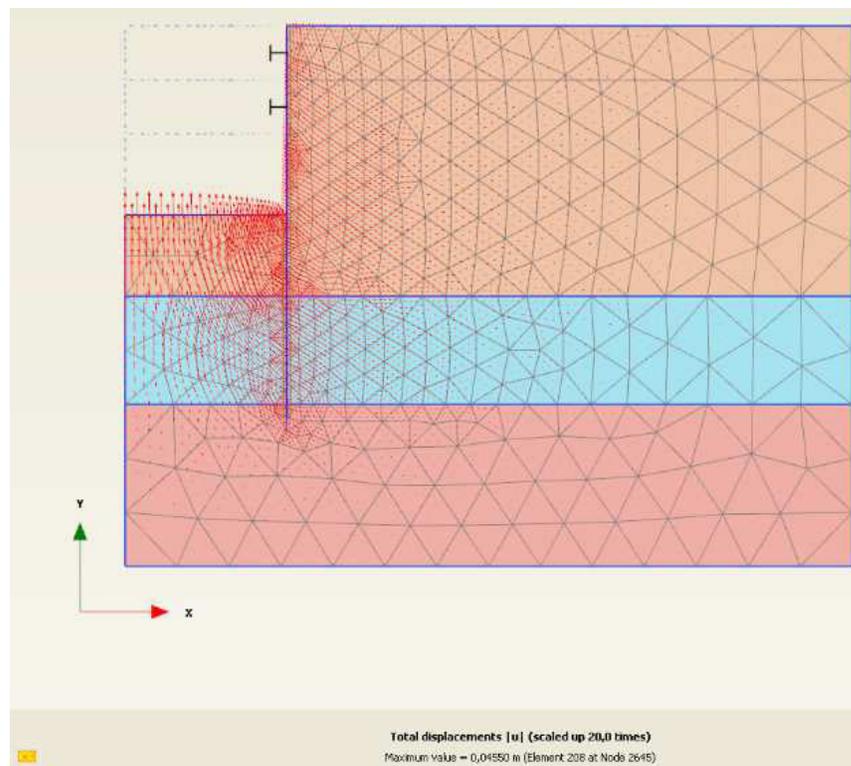


Figura 10: Desplazamientos totales del terreno

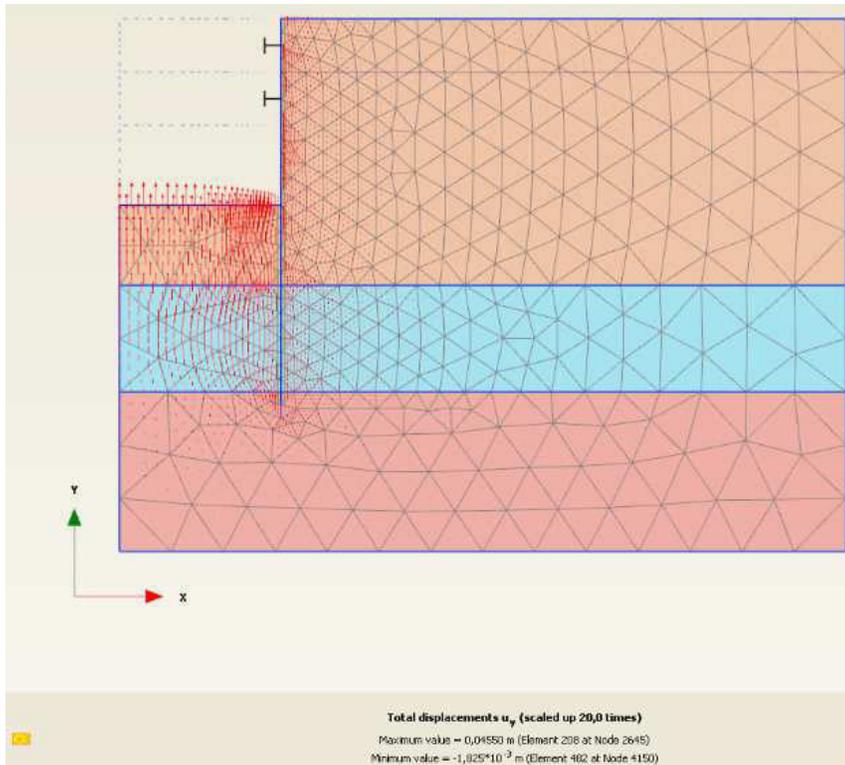


Figura 11: Desplazamientos totales verticales del terreno

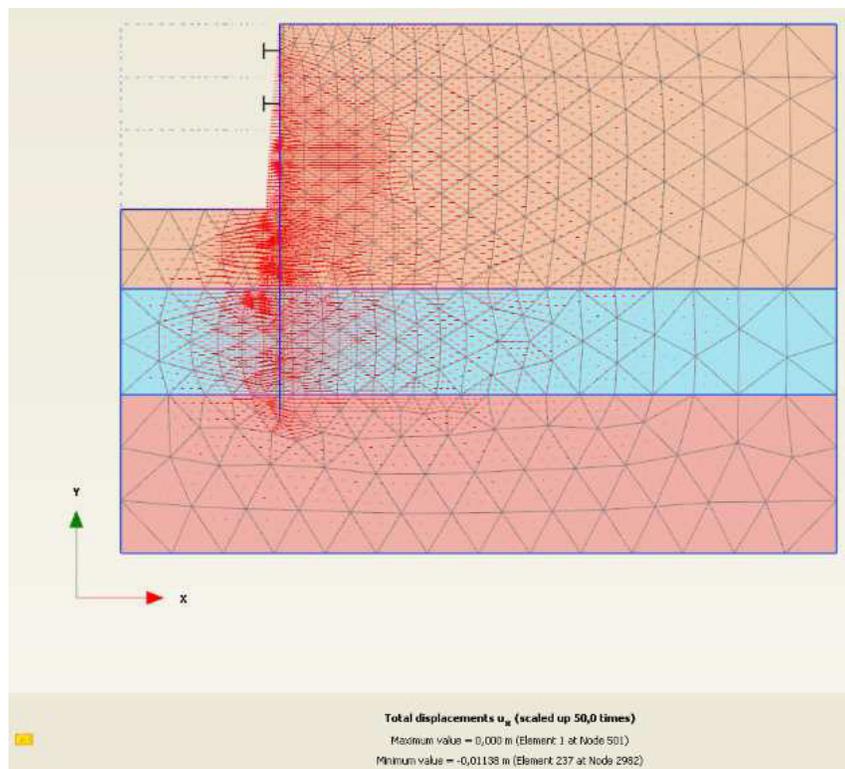


Figura 12: Desplazamientos totales horizontales del terreno

De nuevo, se observa cómo el terreno situado por debajo del fondo de la excavación tiende a levantarse y cómo los puntos del terreno más próximos a la pantalla tienden a moverse hacia el interior de la excavación. El desplazamiento total máximo coincide con el desplazamiento vertical máximo ya citado, de valor 4,550 centímetros, mientras que el desplazamiento horizontal máximo tiene un valor de 1,138 centímetros. Con respecto a la zona de la superficie del terreno sin excavar, los desplazamientos totales verticales se muestran en la Figura 13.

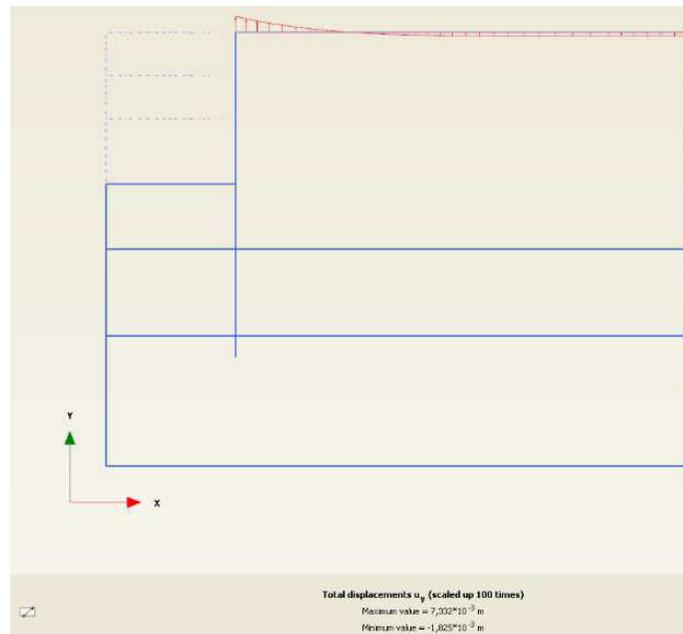


Figura 13: Desplazamientos totales verticales de la superficie

Los desplazamientos totales verticales en la superficie muestran cómo los puntos situados más cerca de las pantallas suben, mientras que los más alejados bajan. El desplazamiento total ascendente máximo es de 0,7332 centímetros y el descendente de 0,1825 centímetros.

En lo que respecta a las tensiones en cada punto del terreno, la Figura 14 muestra las tensiones totales verticales y la Figura 15 las tensiones efectivas verticales.

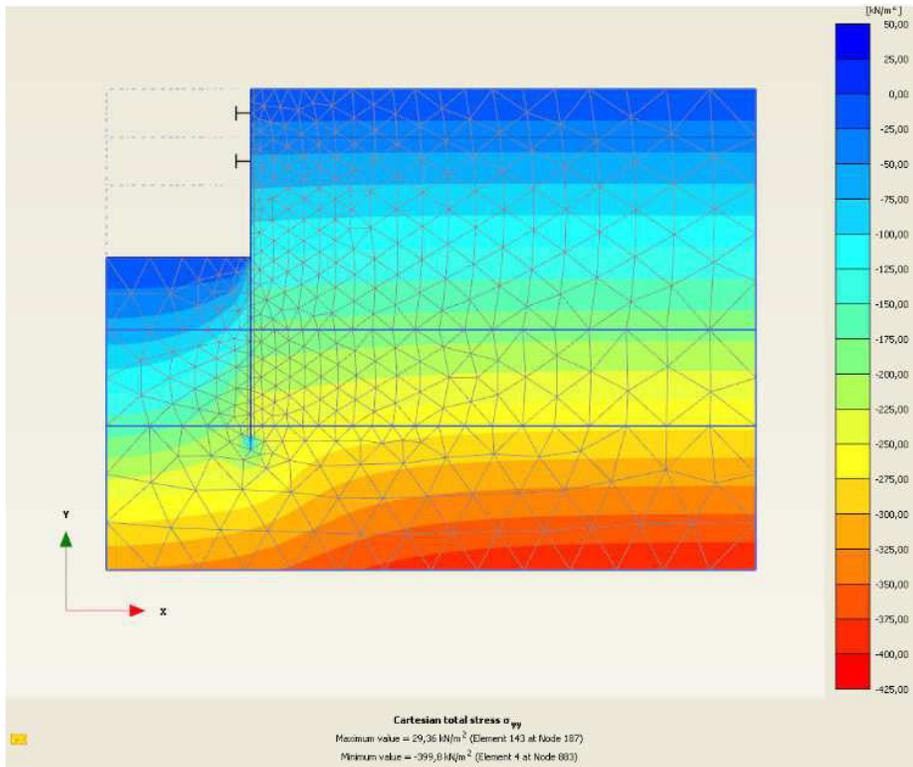


Figura 14: Tensiones totales verticales en el terreno

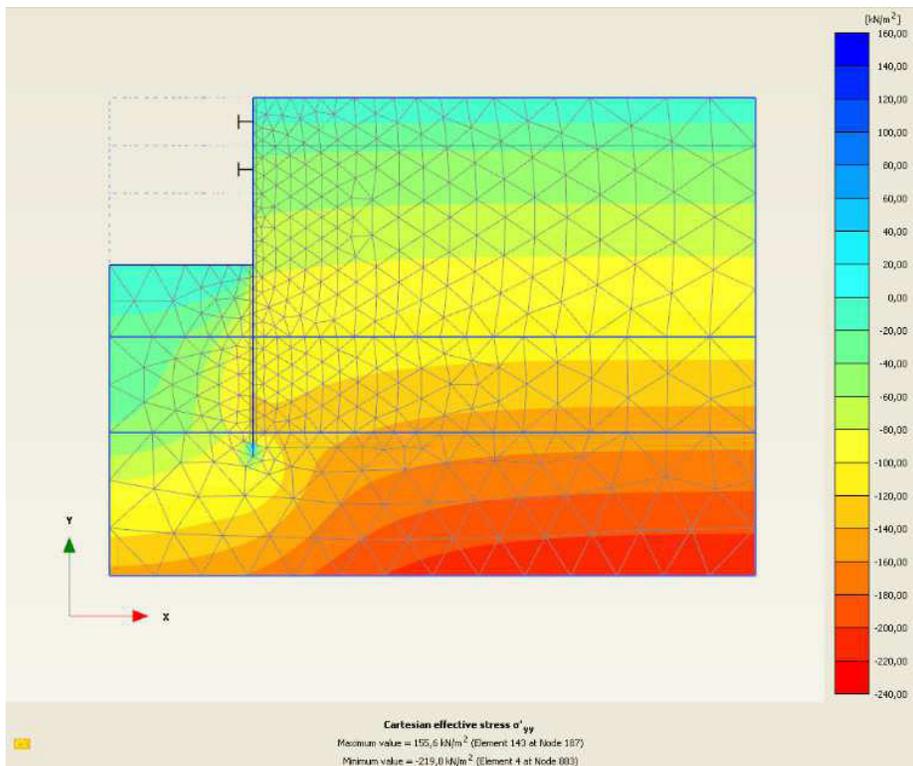


Figura 15: Tensiones efectivas verticales en el terreno

La distribución de las tensiones verticales refleja unos valores máximos de compresión de 399,8 kN/m^2 , en el caso de las tensiones totales verticales, y de 219,8 kN/m^2 , en el caso de las tensiones efectivas verticales.

Una vez terminada la excavación, se estudia la deformada de la pantalla. La Figura 16 muestra los desplazamientos totales de la pantalla y la Figura 17 la componente horizontal de dicho desplazamiento.

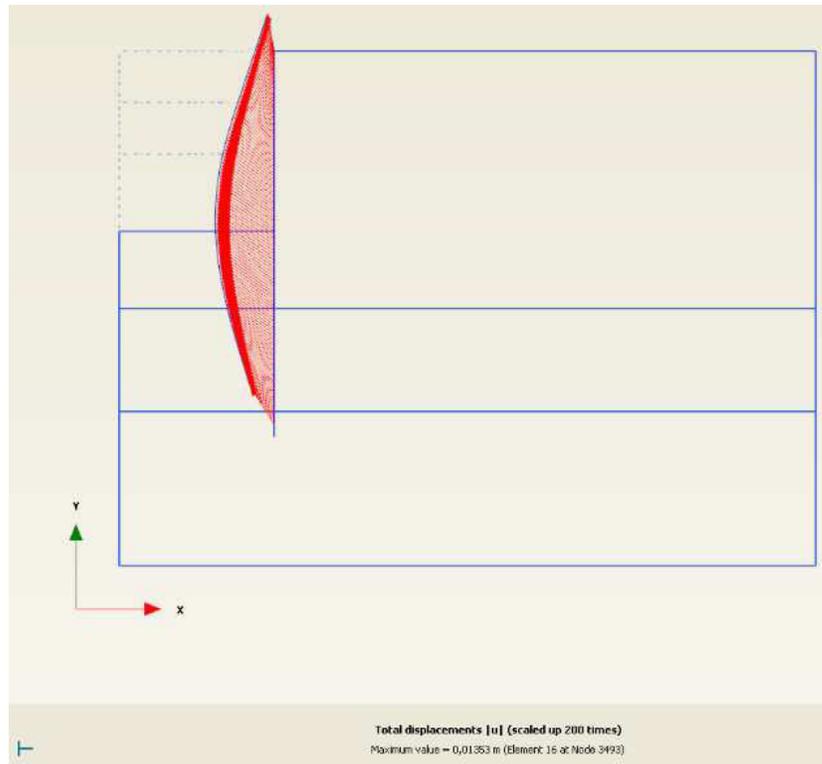


Figura 16: Desplazamientos totales de la pantalla

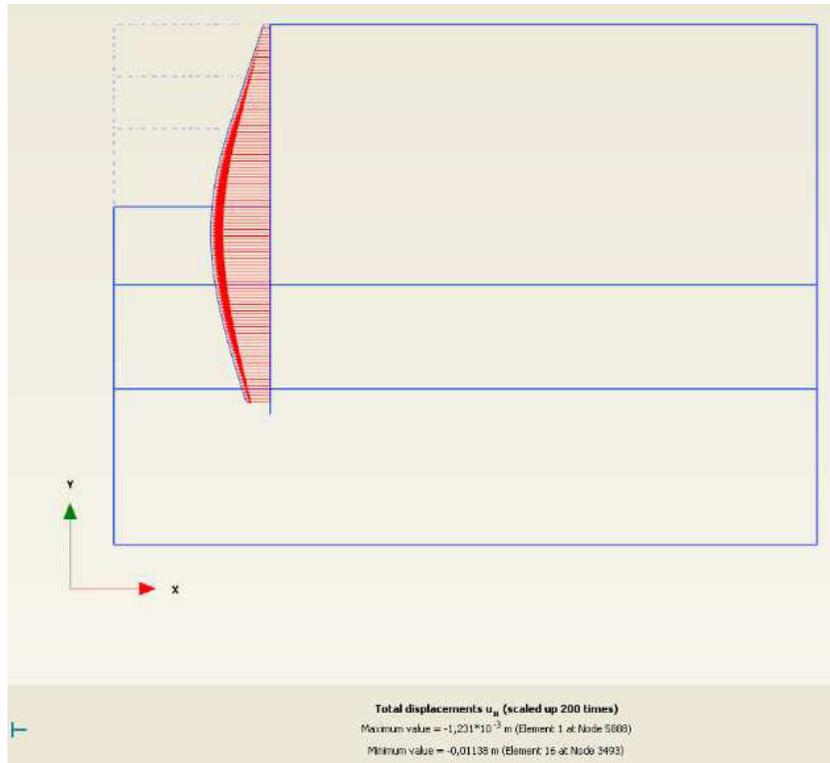


Figura 17: Desplazamientos horizontales de la pantalla

Se observa cómo la pantalla tiende, por una parte, a elevarse y, por otra, a flectar hacia el interior de la excavación, como consecuencia de los empujes del terreno sobre ella. El desplazamiento máximo total es 1,353 centímetros y el horizontal, 1,138 centímetros.

A continuación, se analizan los cortantes y momentos flectores en la pantalla. En la Figura 18 y en la Figura 19 se presentan, respectivamente, los estados de cortantes y de momentos flectores en la pantalla al final de la excavación.

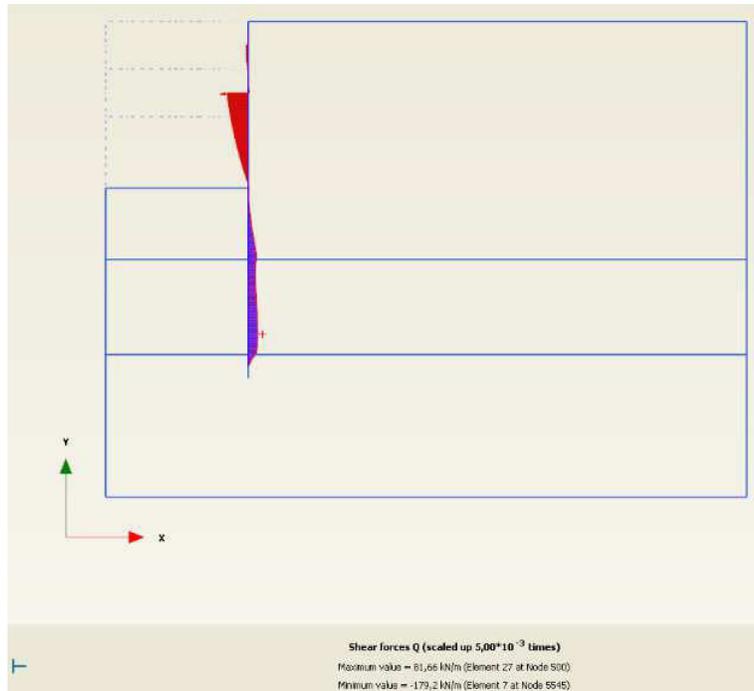


Figura 18: Estado de cortantes en la pantalla tras la última fase

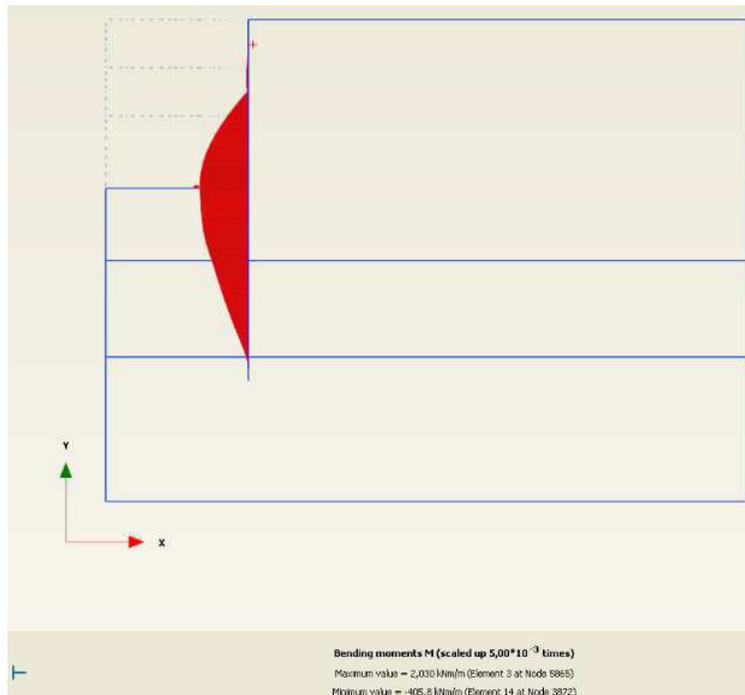


Figura 19: Estado de flectores en la pantalla tras la última fase

Los cortantes máximos y mínimos que sufre la pantalla son de 81,66 kN/m y de -179,20 kN/m y los flectores máximos y mínimos de 2,030 kN*m/m y de -405,8 kN*m/m.

En lo que respecta a los puntales, la Tabla 11 presenta las fuerzas máximas al final de la excavación.

Tabla 11: Fuerzas en los puntales tras la excavación

Structural element ▲	Node ▲	Local number ▲	X ▲ [m]	Y ▲ [m]	N ▲ [kN/m]	N _{min} ▲ [kN/m]	N _{max} ▲ [kN/m]	Rotation ▲ [°]	Length ▲ [m]
Fixed-end anchor 1-1	5865	1	6,000	19,000	-20,998	-76,929	0,000	180,000	6,000
Fixed-end anchor 2-2	5545	1	6,000	17,000	-192,121	-192,121	0,000	180,000	6,000

La máxima fuerza que soportan los puntales superiores e inferiores, por metro lineal, en valor absoluto, es de 76,929 kN y de 192,121 kN, respectivamente.

4. ANÁLISIS DE FILTRACIONES

En este apartado se presenta un análisis de las filtraciones en el entorno de la excavación, consecuencia del rebajamiento del nivel freático en el interior de la misma, con el fin de poder excavar en seco. Se pretende analizar aspectos como el caudal filtrado hacia la excavación, el descenso del nivel freático en las cercanías de la excavación, por su posible influencia en edificios cercanos, y problemas relacionados con el levantamiento del fondo.

4.1. PERFIL DEL TERRENO

El perfil del terreno deducido del reconocimiento realizado consta de una capa de 10 metros de arenas; una capa de arcillas de espesor 4 metros, salvo en uno de los sondeos donde no fue detectada; un estrato de gravas de espesor 6 metros y, bajo las gravas, el sustrato rocoso. Para el análisis de las filtraciones influirá de forma notable la presencia o no de la capa de arcillas, dada su diferente permeabilidad con respecto a las arenas y gravas. En aquellas zonas donde no existan las arcillas, los caudales serán lógicamente muy superiores.

Por todo lo anterior, y en previsión de que el espesor de arcillas sea variable en distintas zonas entre 4 metros y la no presencia de dicho estrato, se han realizado distintos cálculos con espesores variables de la capa de arcillas. En concreto, se han analizado 5 perfiles diferentes, con espesores de arcillas de 4, 3, 2, 1 y 0 metros, manteniendo siempre la localización de la capa de gravas entre las cotas -14 y -20 metros, aumentando por tanto el espesor de arenas a medida que disminuye el de arcillas, tal y como se deduce del reconocimiento del terreno realizado.

4.2. MODELIZACIÓN DEL PROBLEMA

El software empleado para el estudio de la filtración en el entorno de la excavación es *SEEP/W 2012* de *Geo-Slope* (Seep/W 2001). Éste es un software de diseño que, mediante el método de elementos finitos, permite el análisis de filtración en el interior del terreno. Su formulación integral permite considerar desde análisis simples con situaciones estacionarias y de

saturación total del terreno, hasta análisis más complejos con terrenos saturados e insaturados con parámetros dependientes del tiempo. Es por ello por lo que SEEP/W se utiliza de forma generalizada en el análisis y diseño de proyectos de ingeniería geotécnica, civil, hidrogeológica y minera.

El análisis realizado es bidimensional y, por simetría, se ha estudiado solamente la mitad de la excavación. Para modelizar este caso, primero se ajusta el espacio de trabajo, se precisa la geometría del proyecto y se fijan las condiciones de contorno. Una vez tenemos la geometría definida, podemos generar materiales con las propiedades del terreno para después asignarlos a los respectivos estratos. En lo relativo a los materiales, se han considerado las siguientes permeabilidades:

- Arenas con limos: $k = 10^{-3}$ m/s
- Arcillas compactas: $k = 10^{-10}$ m/s
- Gravas: $k = 10^{-2}$ m/s

La opción elegida para introducir estos materiales en el software es la de “*Saturated only*”.

En cuanto a las condiciones de contorno, las correspondientes al nivel freático se pueden establecer de dos formas: Presión del agua- u (“*Pressure head-P*”) constante e igual a cero o Potencial (*Head-H*), conocido, y de valor 18 metros, en el lateral derecho, y 13 metros, en el fondo de la excavación.

Se analiza la excavación para una distancia de 20 metros entre la línea de potencial conocido (18 metros) y la pantalla, de forma que esta distancia sea suficiente para no influir en los resultados.

El programa permite definir una sección para el cálculo del caudal; en este caso se ha seleccionado la sección correspondiente al fondo de la excavación.

Por último, tras hacer los cálculos, se estudian los resultados obtenidos y se observa la red de filtración, la forma de la superficie libre, la zona de afección en sentido vertical u horizontal, los puntos del terreno donde la velocidad de filtración es mayor o menor, las líneas de corriente y las equipotenciales, el caudal que atraviesa una superficie previamente definida, el gradiente hidráulico, las presiones intersticiales, etc.

Sirva como ejemplo la Figura 20, en la que se muestra el perfil del terreno y las condiciones de contorno consideradas para el caso de espesor de arcillas de 4 metros.

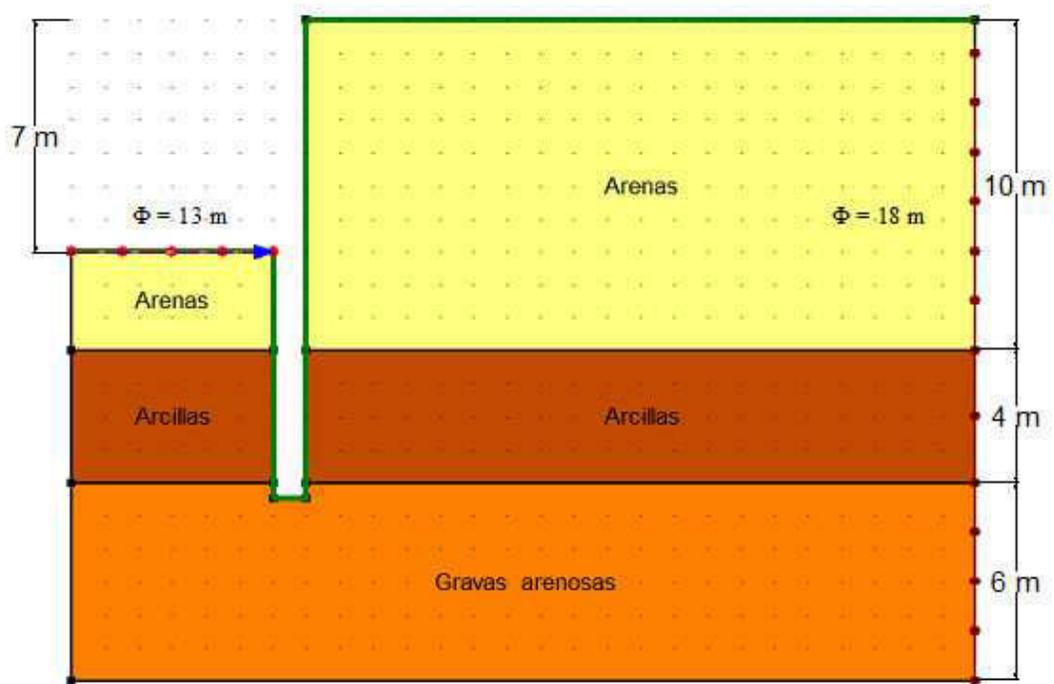


Figura 20: Perfil del terreno y condiciones de contorno para el estudio de la filtración

4.3. RESULTADOS

Análisis previo

De acuerdo con el perfil del terreno, las mayores pérdidas de potencial se producirán a lo largo de la capa de arcillas debido a su baja permeabilidad en relación a las arenas y las gravas. Por tanto, y debido a la geometría del problema, se puede plantear un cálculo inicial manual considerando un permeámetro vertical formado por una capa de arenas sobre una de arcillas, de espesores distintos según el caso a estudiar, y con condiciones de contorno de $\Phi = 18$ metros en la base de las arcillas y de $\Phi = 13$ metros en la superficie de las arenas (ver Figura 21).

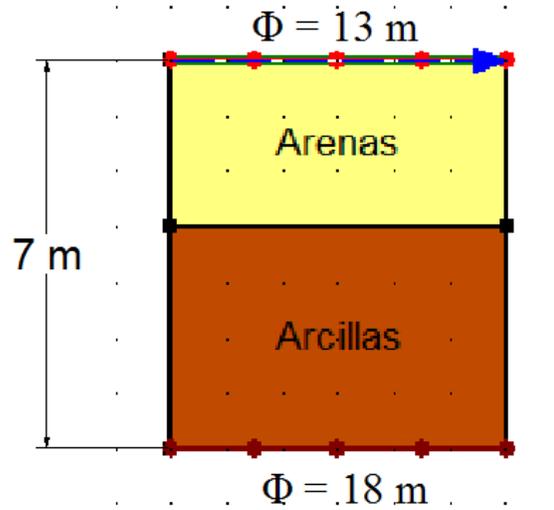


Figura 21: Permeámetro vertical para el cálculo inicial manual de la filtración

Imponiendo las condiciones de continuidad y pérdida de carga entre la entrada y la salida, se puede obtener tanto el caudal filtrado, como los gradientes hidráulicos en cada suelo. Los resultados que se obtienen para cada caso correspondiente a unos espesores distintos se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12: Resultados del cálculo inicial manual

CASO	ESPESOR DE ARCILLA (m)	Q (m ³ /s)
1	4	7,499E-10
2	3	9,999E-10
3	2	1,499E-9
4	1	2,999E-9
5	0	4,286E-3

El cálculo anterior no permite evaluar aspectos de gran importancia en este caso como el descenso del nivel freático que puede producirse en las inmediaciones de la excavación. Este aspecto es de gran importancia debido a las posibles afecciones en los edificios cercanos. Es por ello que se ha realizado el cálculo con el programa *SEEP/W 2012* de *Geo-Slope* (Seep/W 2001), con los resultados obtenidos que se muestran en los siguientes apartados.

Caso 1: Espesor de arcilla igual a 4 metros

Para el espesor máximo de arcilla (4 metros) y espesor mínimo de arenas bajo la excavación (3 metros), se pueden observar las líneas equipotenciales, la superficie libre y el caudal filtrado en la Figura 22; la componente vertical máxima del gradiente hidráulico y el caudal filtrado, en la Figura 23, y la red de filtración, en la Figura 24.

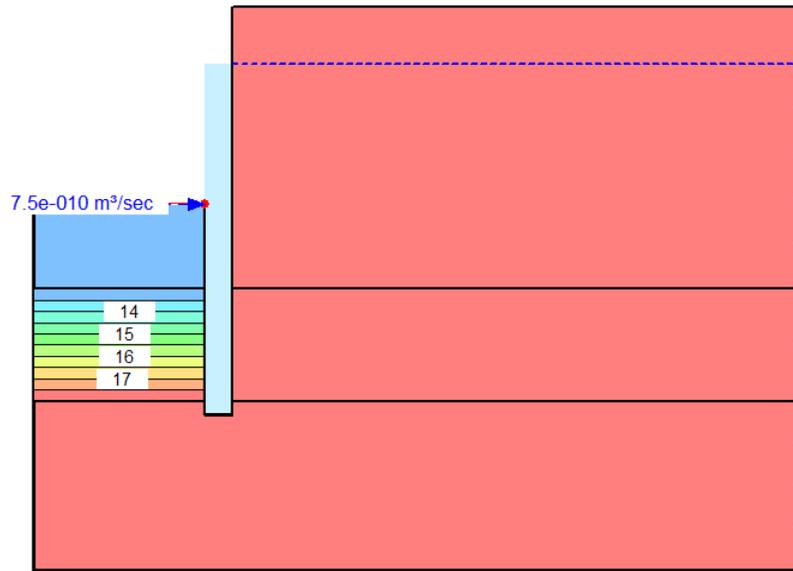


Figura 22: Líneas equipotenciales, superficie libre y caudal filtrado para el caso 1

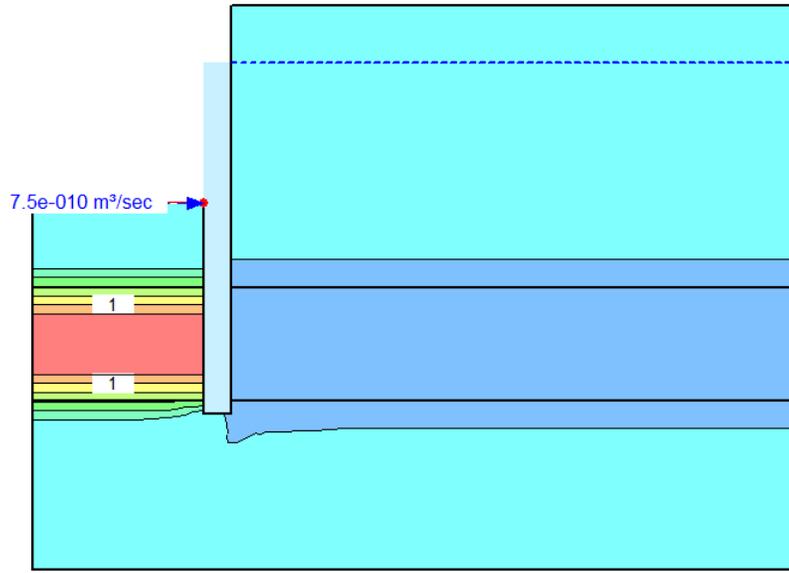


Figura 23: Componente vertical máxima del gradiente hidráulico para el caso 1

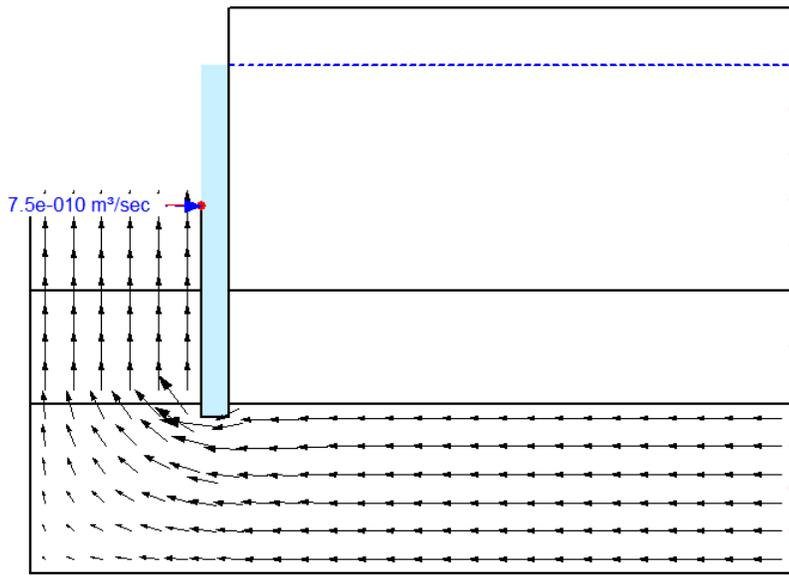


Figura 24: Red de filtración para el caso 1

Caso 2: Espesor de arcilla igual a 3 metros

En el caso de 3 metros de espesor de arcilla y de 4 metros de espesor de arenas bajo la excavación, se pueden observar las líneas equipotenciales, la superficie libre y el caudal filtrado en la Figura 25; la componente vertical máxima del gradiente hidráulico y el caudal filtrado, en la Figura 26, y la red de filtración, en la Figura 27.

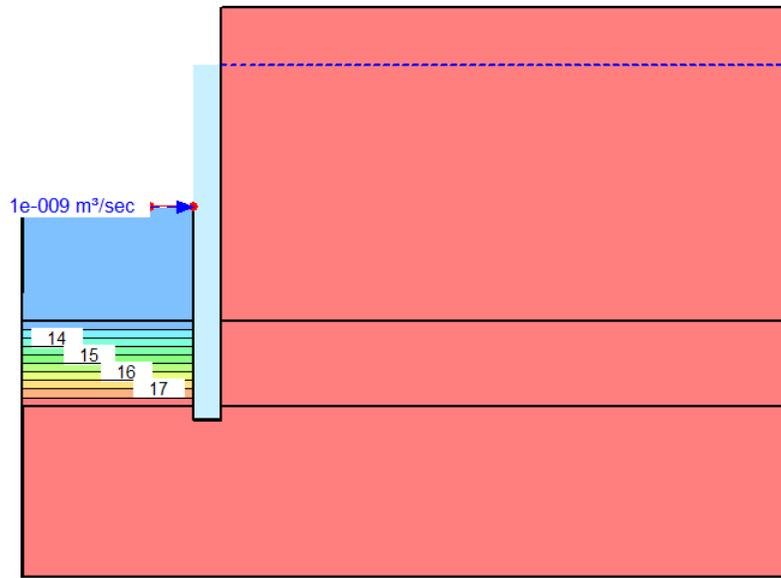


Figura 25: Líneas equipotenciales, superficie libre y caudal filtrado para el caso 2

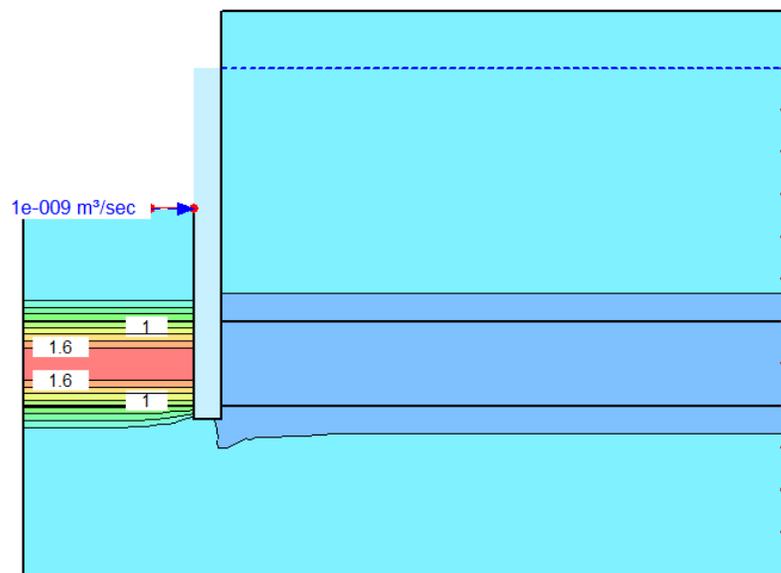


Figura 26: Componente vertical máxima del gradiente hidráulico para el caso 2

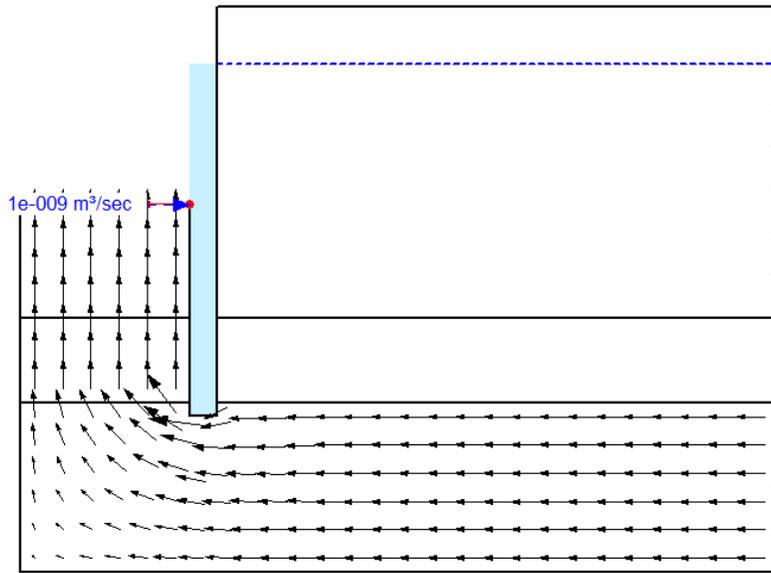


Figura 27: Red de filtración para el caso 2

Caso 3: Espesor de arcilla igual a 2 metros

En el caso de 2 metros de espesor de arcilla y de 5 metros de espesor de arenas bajo la excavación, se pueden observar las líneas equipotenciales, la superficie libre y el caudal filtrado en la Figura 28; la componente vertical máxima del gradiente hidráulico y el caudal filtrado, en la Figura 29, y la red de filtración, en la Figura 30.

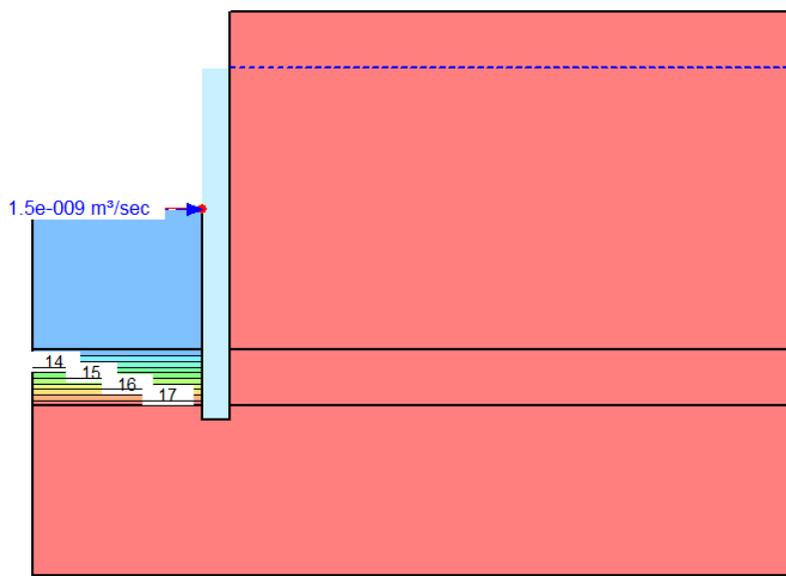


Figura 28: Líneas equipotenciales, superficie libre y caudal filtrado para el caso 3

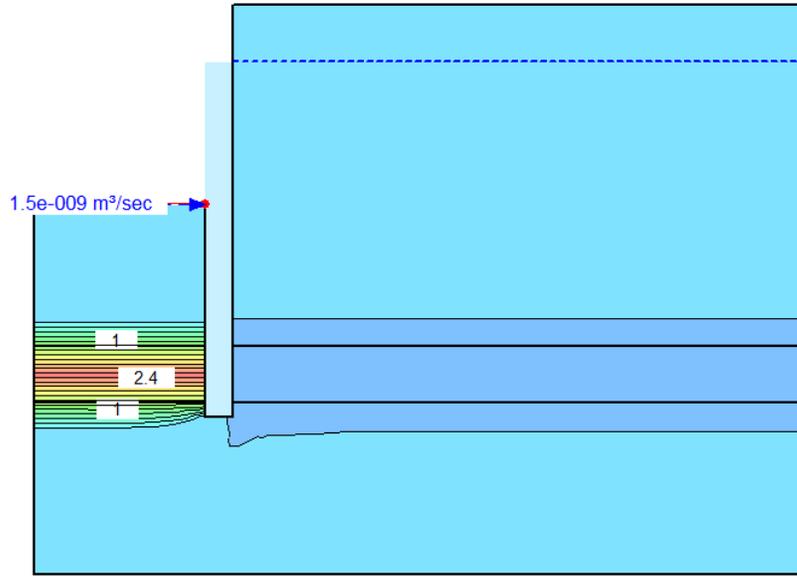


Figura 29: Componente vertical máxima del gradiente hidráulico para el caso 3

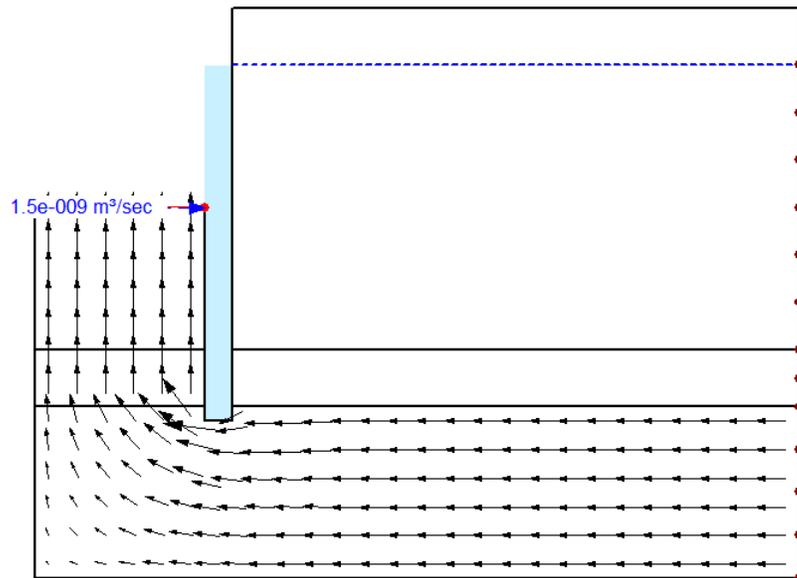


Figura 30: Red de filtración para el caso 3

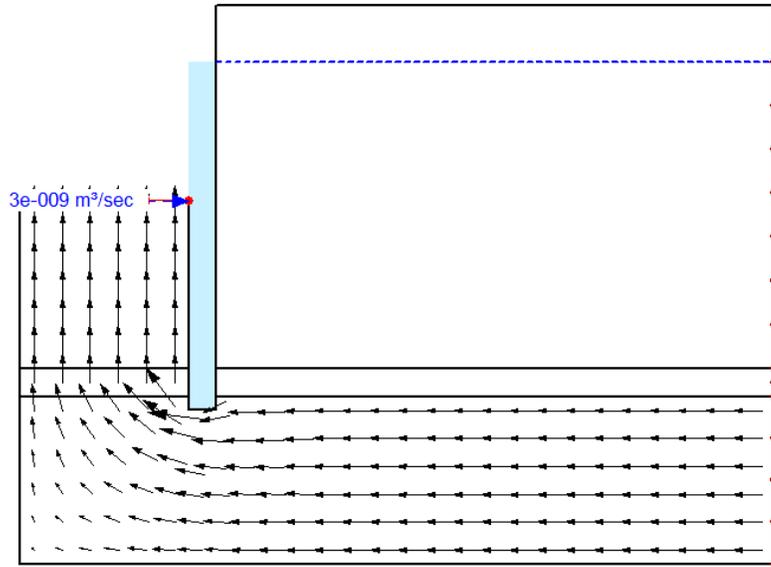


Figura 33: Red de filtración para el caso 4

Caso 5: Sin arcilla

Para el espesor mínimo de arcilla (nulo) y espesor máximo de arenas bajo la excavación (7 metros), se pueden observar las líneas equipotenciales, la superficie libre y el caudal filtrado en la Figura 34; la componente vertical máxima del gradiente hidráulico y el caudal filtrado, en la Figura 35, y la red de filtración, en la Figura 36.

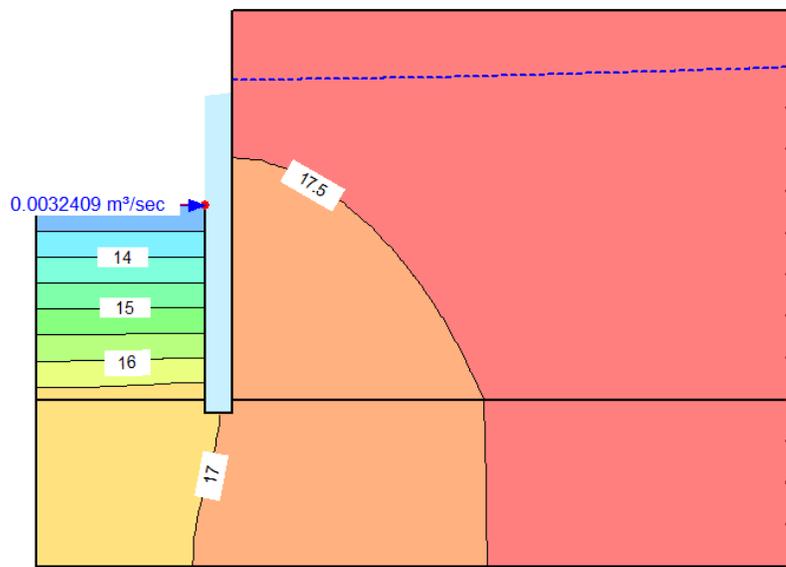


Figura 34: Líneas equipotenciales, superficie libre y caudal filtrado para el caso 5

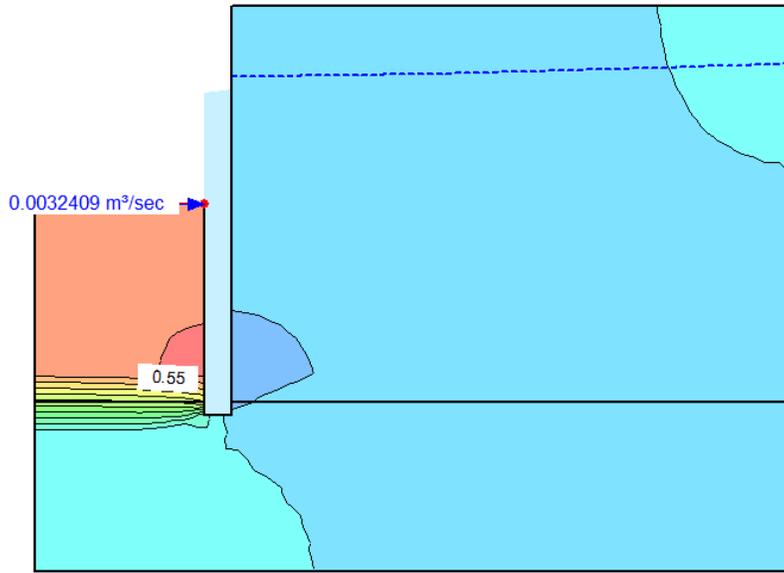


Figura 35: Componente vertical máxima del gradiente hidráulico para el caso 5

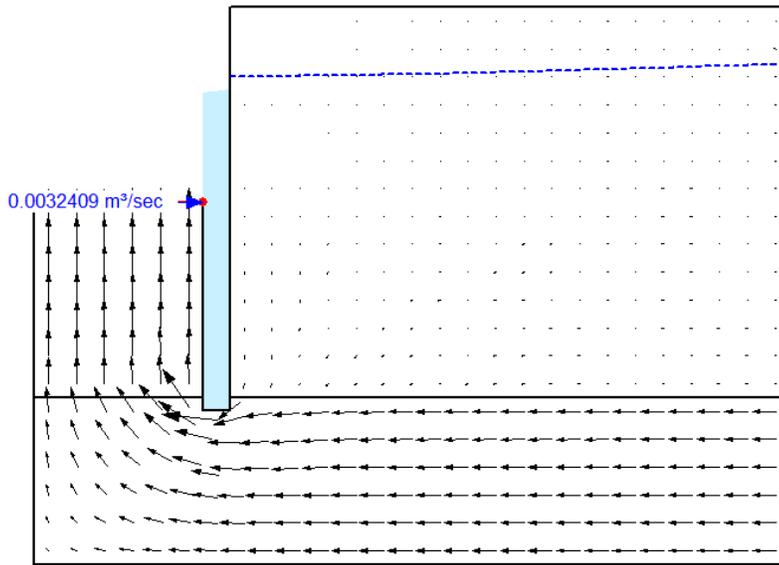


Figura 36: Red de filtración para el caso 5

Análisis de resultados

En la Tabla 13 se muestran los caudales filtrados para cada uno de los casos estudiados.

Tabla 13: Relación entre espesor de arcilla y el caudal filtrado para los casos 1 - 5

CASO	ESPESOR DE ARCILLA (m)	Q (m ³ /s)
1	4	7,5E-10
2	3	1,0E-9
3	2	1,5E-9
4	1	3,0E-9
5	0	3,2E-3

Se observa cómo estos caudales son del mismo orden de magnitud para los casos 1 a 4, con presencia de la capa de arcillas de distintos espesores. En la Figura 37 se muestran estos resultados de forma gráfica.

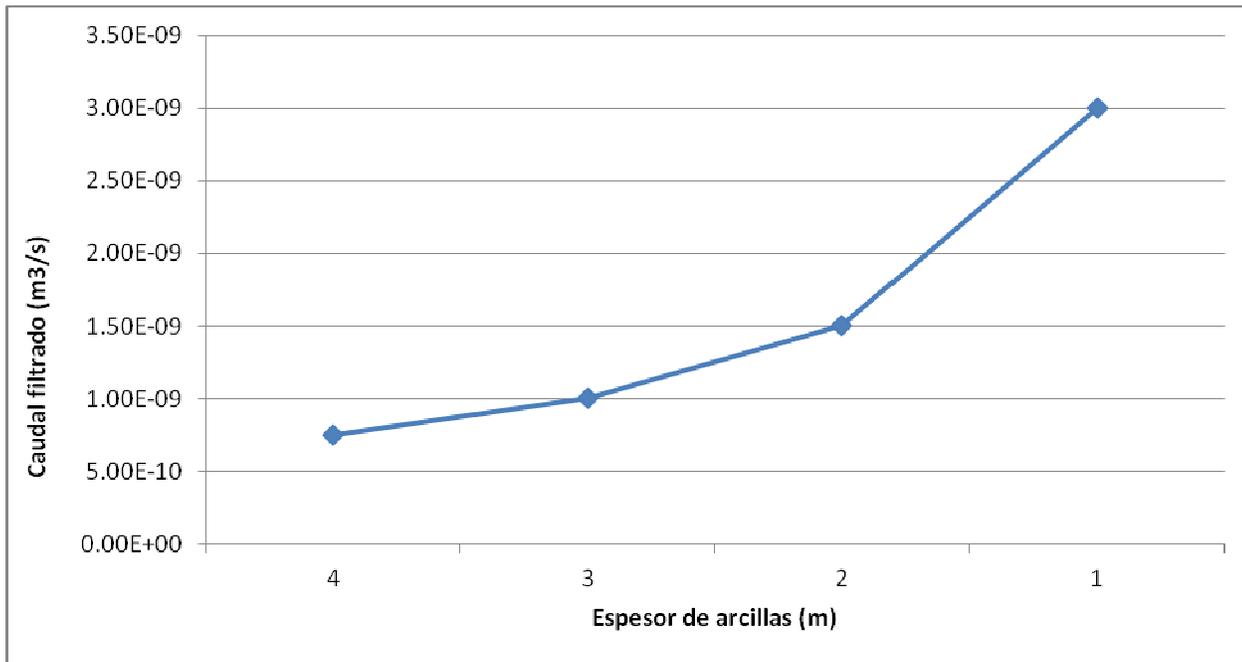


Figura 37: Relación entre espesor de arcilla y caudal filtrado para los casos 1 – 4

Se observa que los caudales aumentan al disminuir el espesor de arcillas y aumentar el de arena, lo cual resulta lógico. Por otro lado, los valores obtenidos se corresponden con los deducidos en el análisis previo.

Con respecto al caso sin arcilla, el caudal resulta muy superior, tal y como era de esperar. En concreto, el caudal obtenido es 6 órdenes de magnitud mayor y con un valor similar al resultado del análisis previo. Esto también es lógico dadas las permeabilidades de las arenas y las arcillas. En la Figura 38 se muestran los caudales para todos los casos.

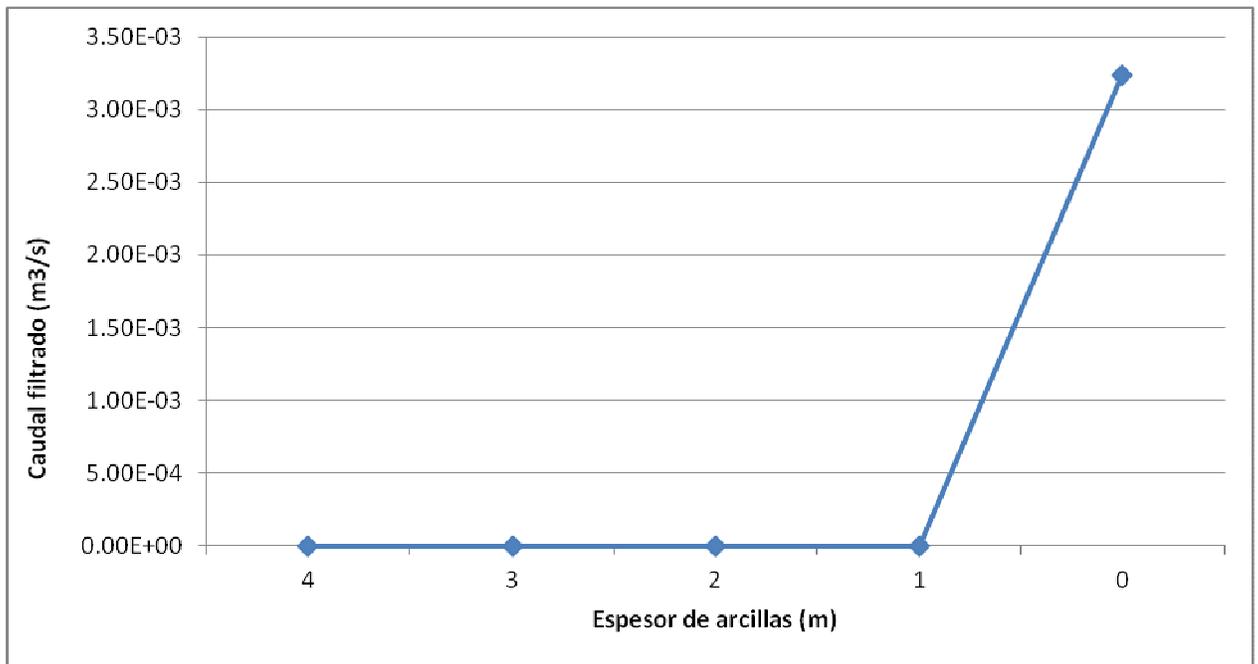


Figura 38: Relación entre espesor de arcilla y caudal filtrado para los casos 1 - 5

Con respecto a la posición de la superficie libre y al descenso del nivel freático en las cercanías de la excavación, los resultados muestran cómo en los casos con presencia de arcilla no se produce descenso apreciable del nivel freático. En cambio, en el caso de no presencia de arcilla, se aprecia un descenso del nivel freático en el entorno de la excavación, siendo máximo, de valor 50 centímetros, en el contacto con la pantalla y reduciéndose de forma progresiva al alejarse de la pantalla.

El último aspecto a analizar es el posible levantamiento del fondo de la excavación. En este sentido, para los casos con presencia de arcillas, los gradientes hidráulicos generados en el estrato arcilloso son grandes, ya que es en dicho estrato donde se producen las mayores pérdidas de potencial por unidad de longitud. En dichos casos, no se habla de un posible sifonamiento, sino de un posible levantamiento del fondo de excavación. Para evaluar este aspecto se puede comparar la tensión total con la presión intersticial en la base de las arcillas. Considerando despreciable la pérdida de potencial en las arenas y gravas, el potencial en la base de las arcillas es de 18 metros, al que corresponde, considerando el origen de cotas en el fondo de las gravas, una presión intersticial de $u = 120 \text{ kPa}$. En cuanto a la tensión total en la base de las arcillas, para un peso específico saturado de 20 kN/m^3 , se obtiene un valor de $\sigma_v = 140 \text{ kPa}$. Con ello, la relación σ_v/u queda establecida en 1,17. En el caso de no presencia de arcillas, los gradientes

hidráulicos son suficientemente bajos como para que no se produzcan problemas de sifonamiento.

5. CONCLUSIONES

A continuación se recogen las conclusiones y recomendaciones relativas a los aspectos estudiados y a los resultados de los trabajos.

Del estudio de los movimientos con *Plaxis 2D Version 8* (Brinkgreve R.B.J, 2007) se extraen los siguientes resultados y conclusiones. Primero, se observa en la malla deformada al final de la excavación, cómo el terreno del fondo de la excavación muestra desplazamientos hacia arriba, tal y como era de esperar, con un desplazamiento máximo de estos puntos del terreno de 4,550 centímetros. Los desplazamientos totales verticales, a lo largo de la superficie de terreno en la zona no excavada, muestran cómo los puntos situados más cerca de la pantalla suben, mientras que los más alejados bajan. El desplazamiento total ascendente máximo es de 0,7332 centímetros y el descendente de 0,1825 centímetros.

La distribución de las tensiones verticales refleja unos valores máximos de compresión de 399,8 kN/m², en el caso de las tensiones totales verticales, y de 219,8 kN/m², en el caso de las tensiones efectivas verticales.

Analizando los desplazamientos o la deformada de la pantalla, se observa cómo la pantalla tiende a flectar hacia el interior de la excavación y a elevarse, como consecuencia de los empujes del terreno sobre ella. El desplazamiento máximo total es 1,353 centímetros y el horizontal 1,138 centímetros.

Por último, se estudian, tras la excavación, los cortantes y momentos flectores en la pantalla y las fuerzas en los puntales. Los cortantes máximos y mínimos que sufre la pantalla son de 81,66 kN/m y de -179,20 kN/m y los flectores máximos y mínimos de 2,030 kN*m/m y de -405,8 kN*m/m y la máxima fuerza que soportan los puntales superiores e inferiores, por metro lineal, en valor absoluto, es de 76,929 kN y de 192,121 kN, respectivamente.

Para estudiar la filtración en el entorno de la excavación, se ha empleado el software *SEEP/W 2012* de *Geo-Slope* (Seep/W 2001). Los resultados y las conclusiones extraídas son los que siguen.

Los resultados obtenidos muestran cómo los caudales filtrados son del mismo orden de magnitud para los casos con presencia de la capa de arcillas con distintos espesores, estando

estos valores comprendidos entre $7,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ y $3,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$. Los caudales aumentan al disminuir el espesor de arcillas y aumentar el de arena, lo cual resulta lógico. Con respecto al caso sin arcilla, el caudal resulta muy superior, tal y como era de esperar. En concreto, el caudal obtenido es de $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, seis órdenes de magnitud mayor que los correspondientes a las situaciones con arcilla. Esto también es lógico dadas las permeabilidades de las arenas y las arcillas.

Con respecto a la posición de la superficie libre y al descenso del nivel freático en las cercanías de la excavación, los resultados muestran cómo en los casos con presencia de arcilla no se produce descenso apreciable del nivel freático. En cambio, en el caso de no presencia de arcilla, se aprecia un descenso del nivel freático en el entorno de la excavación, siendo máximo, de valor 50 centímetros, en el contacto con la pantalla y reduciéndose de forma progresiva al alejarse de la pantalla.

El último aspecto analizado es el posible levantamiento del fondo de excavación. En este sentido, para los casos con presencia de arcillas, los gradientes hidráulicos generados en el estrato arcilloso son grandes, ya que es en dicho estrato donde se producen las mayores pérdidas de potencial por unidad de longitud. En concreto, en la base de las arcillas, la presión intersticial es de 120 kPa y la tensión total vertical, de 140 kPa, lo que supone un cociente $\sigma_v/u = 1,17$, por lo que no es previsible el levantamiento del fondo de excavación. En el caso de no presencia de arcillas, los gradientes hidráulicos son suficientemente bajos como para que no se produzcan problemas de sifonamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Brinkgreve R.B.J. 2007. *Plaxis finite elementcode for soil and rock analysis*, 2D, version 8. Rotterdam: Balkema.
- *Flow towards open excavations with bottom grouted seal*. Sánchez-Alciturri, J.M., Cañizal, J. y Sagasetta, C. *3rd European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE' 94)* (1994). PP. 363,367. Balkema
- Geotecnia y Cimientos II. Mecánica del suelo y de las rocas. Jiménez Salas, J.A. y otros (1981). Ed. Rueda.
- Seep/W 2011. Groundwater Seepage Analysis. Geo-Slope International Ltd., Canada.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de los puntos de reconocimiento	15
Figura 2: Perfil del terreno en los sondeos	19
Figura 3: Geometría y condiciones de contorno	29
Figura 4: Malla generada.....	30
Figura 5: Distribución de presiones hidrostáticas en la fase inicial	31
Figura 6: Condiciones de contorno para filtración en la fase dos del cálculo de la excavación ...	32
Figura 7: Malla deformada tras la fase 2.....	33
Figura 8: Malla deformada tras la fase 4.....	34
Figura 9: Malla deformada tras la fase 6.....	34
Figura 10: Desplazamientos totales del terreno	35
Figura 11: Desplazamientos totales verticales del terreno	36
Figura 12: Desplazamientos totales horizontales del terreno.....	36
Figura 13: Desplazamientos totales verticales de la superficie.....	37
Figura 14: Tensiones totales verticales en el terreno	38
Figura 15: Tensiones efectivas verticales en el terreno.....	38
Figura 16: Desplazamientos totales de la pantalla	39
Figura 17: Desplazamientos horizontales de la pantalla	40
Figura 18: Estado de cortantes en la pantalla tras la última fase.....	41
Figura 19: Estado de fletores en la pantalla tras la última fase	41
Figura 20: Perfil del terreno y condiciones de contorno para el estudio de la filtración.....	45
Figura 21: Permeámetro vertical para el cálculo inicial manual de la filtración.....	46
Figura 22: Líneas equipotenciales, superficie libre y caudal filtrado para el caso 1.....	47
Figura 23: Componente vertical máxima del gradiente hidráulico para el caso 1	48
Figura 24: Red de filtración para el caso 1.....	48
Figura 25: Líneas equipotenciales, superficie libre y caudal filtrado para el caso 2.....	49
Figura 26: Componente vertical máxima del gradiente hidráulico para el caso 2	49
Figura 27: Red de filtración para el caso 2.....	50
Figura 28: Líneas equipotenciales, superficie libre y caudal filtrado para el caso 3.....	50
Figura 29: Componente vertical máxima del gradiente hidráulico para el caso 3	51
Figura 30: Red de filtración para el caso 3.....	51
Figura 31: Líneas equipotenciales, superficie libre y caudal filtrado para el caso 4.....	52
Figura 32: Componente vertical máxima del gradiente hidráulico para el caso 4	52
Figura 33: Red de filtración para el caso 4.....	53
Figura 34: Líneas equipotenciales, superficie libre y caudal filtrado para el caso 5.....	53
Figura 35: Componente vertical máxima del gradiente hidráulico para el caso 5	54
Figura 36: Red de filtración para el caso 5.....	54
Figura 37: Relación entre espesor de arcilla y caudal filtrado para los casos 1 – 4.....	56

Figura 38: Relación entre espesor de arcilla y caudal filtrado para los casos 1 - 557

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Profundidad de sondeos	15
Tabla 2: Resultados ensayos SPT	17
Tabla 3: Toma de muestras	18
Tabla 4: Nivel freático en sondeos	19
Tabla 5: Profundidades en ensayos DPSH	20
Tabla 6: Ensayos de laboratorio realizados	21
Tabla 7: Agresividad del agua al hormigón	22
Tabla 8: Compacidad de las arenas	23
Tabla 9: Resultados de los ensayos de laboratorio sobre arenas con limos	24
Tabla 10: Consistencia de las arcillas	25
Tabla 11: Fuerzas en los puntales tras la excavación	42
Tabla 12: Resultados del cálculo inicial manual	46
Tabla 13: Relación entre espesor de arcilla y el caudal filtrado para los casos 1 - 5	55

ANEJO

