



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS**



ANEJO Nº 10 – ANÁLISIS Y CÁLCULOS GEOTÉCNICOS

Proyecto básico y estructural de piscina cubierta y aparcamiento subterráneo en AV/ Augusta. Jávea (Alicante)

Grado en Ingeniería Civil

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	3
2.	BASES DE CÁLCULO	3
2.1.	NORMATIVA APLICADA.....	3
2.2.	ESTADOS LÍMITE	3
3.	COMPROBACIONES REALIZADAS.....	4
3.1.	ASIENTO	4
3.2.	HUNDIMIENTO	5
3.3.	ESTABILIDAD DEL MURO PANTALLA	5
4.	ANÁLISIS Y CÁLCULO GEOTÉCNICO DE LOS MUROS PANTALLA.....	6
4.1.	PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS MUROS PANTALLA	6
4.1.1.	ANÁLISIS DE LA TIPOLOGÍA A ADOPTAR.....	6
4.2.	COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS DE LOS MUROS PANTALLA	9
4.2.1.	PROGRAMA DE CÁLCULO EMPLEADO	9
4.2.2.	MODELIZACIÓN DEL MURO PANTALLA.....	9
4.2.3.	COMPROBACIONES Y DIMENSIONAMIENTO	9
5.	ANÁLISIS Y CÁLCULO GEOTÉCNICO DE LA LOSA DE CIMENTACIÓN	12
5.1.	PREDIMENSIONAMIENTO DE LA LOSA DE CIMENTACIÓN	12
5.2.	COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS DE LA LOSA DE CIMENTACIÓN	12

1. Introducción

El objeto del presente documento es el cálculo y dimensionamiento geotécnico de las estructuras cimentación y muros de contención.

El cálculo consiste principalmente en dimensionar estos elementos para su posterior comprobación estructural donde se calculará y dimensionará el armado. A tal efecto, se describe la normativa aplicada, los modelos empleados para el cálculo y las acciones a considerar en las comprobaciones.

2. Bases de cálculo

2.1. Normativa aplicada

Para el cálculo geotécnico de la losa de cimentación y de los muros pantallas, ha sido empleada la siguiente normativa:

- Guía de cimentaciones en obra de carretera (2009)
- EC-07 – Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico.
- CTE – Documento Básico de Seguridad estructural. Cimientos.

Para la estimación de cargas actuantes en las estructuras se ha empleado la siguiente normativa:

- CTE – Documento Básico de Seguridad Estructural – Acciones en la edificación

2.2. Estados límite

Según el Eurocódigo 7 EN 1997-1:2004 se definen como estados límite las situaciones a partir de las cuales se considera que la estructura cesa de cumplir la función para la que fue proyectada, definidas según una magnitud escalar (tensiones, deformaciones, etc.).

Se clasifican en dos tipos:

- Estados límite últimos.
 - Pérdida de equilibrio (EQU)
 - Fallo interno o deformación excesiva de la estructura (STR)
 - Fallo o deformación excesiva del terreno (GEO)
 - Pérdida de equilibrio debido a la elevación de la presión del agua (UPL)
 - Levantamiento o inestabilidad hidráulica (HYD)
- Estados límite de servicio.

En el dimensionamiento de estructuras de cimentación y contención el estado límite GEO es a menudo el crítico.

Según el Eurocódigo 7, el equilibrio estático EQU es relevante en el proyecto estructural. Para el proyecto geotécnico la comprobación de EQU queda limitada a casos puntuales, como una cimentación rígida apoyada en roca y es, principalmente, característico de la estabilidad global y los problemas de subpresiones.

A continuación, se muestran los cuatro tipos de estado límite del terreno en situaciones persistentes y transitorias (GEO), donde se produce un fallo o deformación excesiva del terreno:

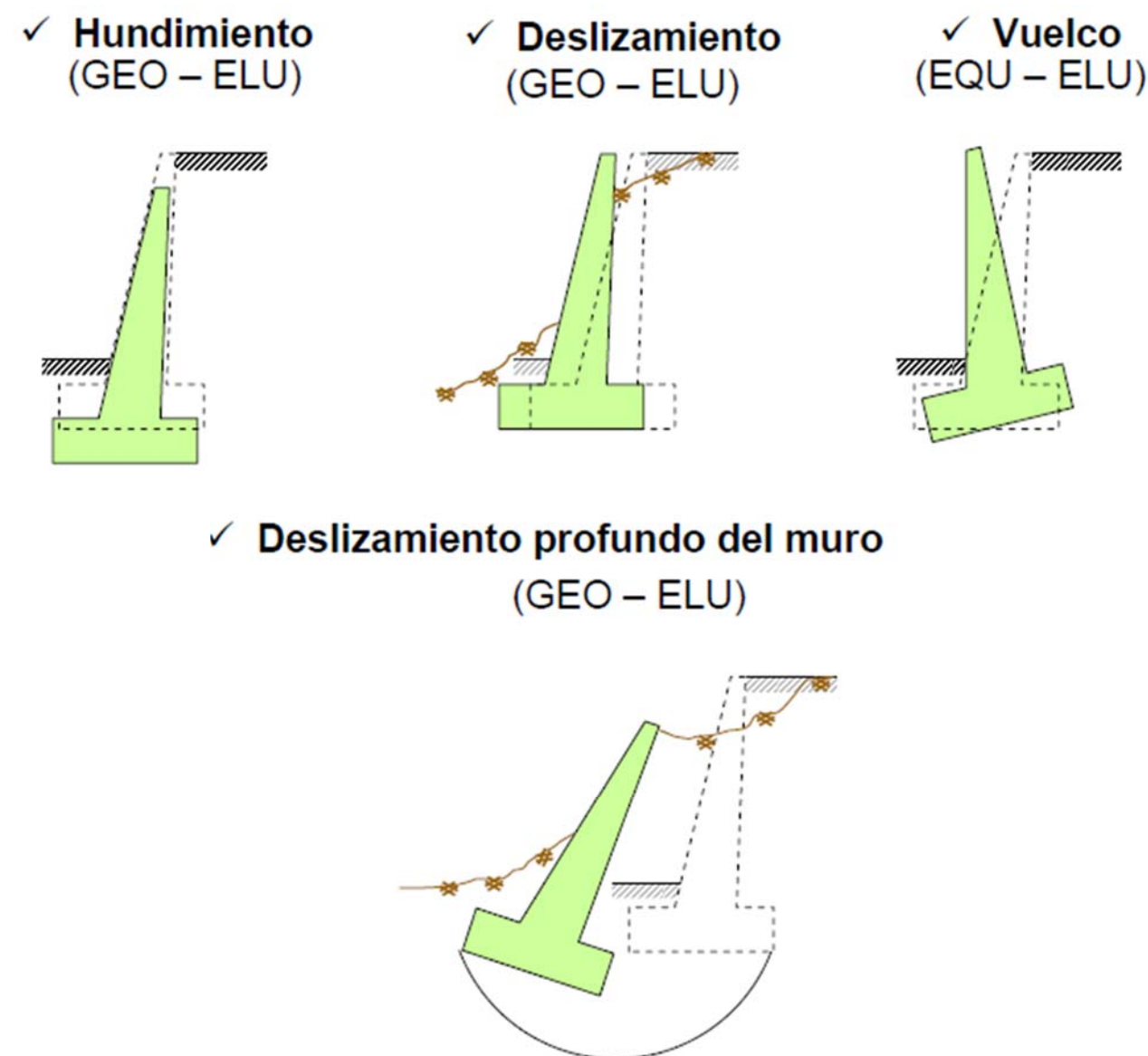


Imagen 1. Estados límites GEO - ELU. Fuente: Apuntes de la asignatura de diseño estructural de cimentaciones y muros de contención

En este estado límite se debe comprobar que el valor de cálculo de las acciones (E_d) es inferior al valor de cálculo de la resistencia (R_d), donde (dependiendo de a qué factores se aplican los coeficientes parciales):

$$E_d = E\{\gamma_F F_{rep}; X_k/\gamma_M; a_d\} \quad E_d = \gamma_E E\{F_{rep}; X_k/\gamma_M; a_d\}$$

$$R_d = R\{\gamma_F F_{rep}; X_k/\gamma_M; a_d\} \quad R_d = R\{\gamma_F F_{rep}; X_k; a_d\}/\gamma_R \quad R_d = R\{\gamma_F F_{rep}; X_k/\gamma_M; a_d\}/\gamma_R$$

Según como se aplican estos coeficientes parciales se pueden tener distintos enfoques de proyectos. En la siguiente imagen se muestra un resumen de las mismas (donde “A” se refiere a acciones o efectos de las acciones; “M” a los parámetros del suelo y “R” a la resistencia):

🔗 **Enfoque de proyecto 1**

☐ Excepto para el proyecto de pilotes y anclajes bajo carga axil

● Combinación 1: A1 “+” M1 “+” R1

● Combinación 2: A2 “+” M2 “+” R1

☐ En caso contrario

● Combinación 1: A1 “+” M1 “+” R1

● Combinación 2: A2 “+” (M1 ó M2) “+” R4

*M2 se emplea para acciones desfavorables en pilotes,
p.e rozamiento negativo*

🔗 **Enfoque de proyecto 2**

☐ Combinación: A1 “+” M1 “+” R2

🔗 **Enfoque de proyecto 3**

☐ Combinación: (A1* ó A2†) “+” M1 “+” R3

* En acciones estructurales † En acciones geotécnicas

Resistencia	Símbolo	Conjunto		
		R1	R2	R3
Capacidad portante	$\gamma_{R,v}$	1,0	1,4	1,0
Deslizamiento	$\gamma_{R,h}$	1,0	1,1	1,0

Tabla N°3– Coeficientes parciales de resistencia (γ_R) para las cimentaciones directas

Resistencia	Símbolo	Conjunto		
		R1	R2	R3
Capacidad portante	$\gamma_{R,v}$	1,0	1,4	1,0
Resistencia al deslizamiento	$\gamma_{R,h}$	1,0	1,1	1,0
Resistencia de las tierras	$\gamma_{R,e}$	1,0	1,4	1,0

Tabla N°4– Coeficientes parciales de resistencia (γ_R) para las estructuras de contención

3. Comprobaciones realizadas

La normativa utilizada para las comprobaciones es la “Guía de cimentaciones en obras de carretera” que, aunque este indicada para obras de carreteras, también contempla los casos del presente documento.

Las comprobaciones realizadas son: asiento y hundimiento de la losa y estabilidad global del muro pantalla.

3.1. Asiento

Según el apartado 4.8.5 Movimientos Admisibles, de la “Guía de cimentaciones en obras de carretera se puede extraer:

“Los movimientos que puede admitir una cimentación sin causar daño significativo a la estructura que soporta dependen de su tipología. Por dicho motivo, este aspecto se considera en la Parte 6, al tratar de las distintas obras de cimentación que suelen presentarse con mayor frecuencia en obras de carretera.

En general, para estructuras convencionales de hormigón y/o acero, se suelen recomendar ciertos límites. Son de amplio uso los siguientes valores:

- Asiento máximo de zapatas aisladas = 2,5 cm.
- Asiento máximo de losas de cimentación = 5 cm.
- Asiento diferencial máximo entre apoyos contiguos = L/200 a L/500 dependiendo de la rigidez de la estructura (L = distancia entre apoyos).
- Inclinaciones máximas: entre $\theta = 1/1000$ y $6/1000$.

Estos datos son sólo orientativos y deben especificarse en cada Proyecto concreto.”

Imagen 2. Enfoques de proyecto. Fuente: Apuntes de la asignatura de diseño estructural de cimentaciones y muros de contención

Los coeficientes parciales adquieren diferentes valores en función del enfoque de proyecto. A continuación, se adjuntan las tablas del Anexo A del Eurocódigo 7 con los coeficientes parciales aplicables a los elementos de este proyecto:

Acción		Símbolo	Conjunto	
			A1	A2
Permanente	Desfavorable	γ_G	1,35	1,0
	Favorable		1,0	1,0
Variable	Desfavorable	γ_Q	1,5	1,3
	Favorable		0	0

Tabla N°1– Coeficientes parciales para las acciones (γ_F) o los efectos de las acciones (γ_E)

Parámetro del suelo	Símbolo	Conjunto	
		M1	M2
Ángulo de rozamiento interno en efectivas ^a	γ_ϕ	1,0	1,25
Cohesión efectiva	γ_c	1,0	1,25
Resistencia a cortante no drenada	γ_{cu}	1,0	1,4
Resistencia a compresión simple	γ_{qu}	1,0	1,4
Peso específico	γ_γ	1,0	1,0

^a Este factor se aplica a $\tan \phi'$.

Tabla N°2– Coeficientes parciales para los parámetros del suelo (γ_M)

3.2. Hundimiento

Según el apartado 4.2.1.2 Hundimiento, de la “Guía de cimentaciones en obras de carretera se puede extraer:

“El modo de fallo denominado «hundimiento» se produce cuando la capacidad del soporte del terreno es inferior a la carga que transmite la cimentación al terreno. En tales circunstancias, tanto el elemento de cimentación (zapata o losa) como el terreno situado inmediatamente debajo experimentan movimientos inadmisibles que arruinan la construcción que estaban soportando.

Este modo de fallo puede idealizarse mediante superficies de rotura que parten del plano apoyo en el terreno y se incurvan hasta volver a emerger a cierta distancia de la cimentación, tal como se describe en el apartado 4.5.”

Cálculo de la carga de hundimiento

Según el apartado 4.5.5 Cálculo analítico de la carga de hundimiento, de la “Guía de cimentaciones en obras de carretera se puede extraer:

“En algunas ocasiones, como resultado del reconocimiento geotécnico, habrá sido posible definir las características resistentes del terreno con precisión suficiente como para realizar un cálculo analítico de la carga de hundimiento.

La fórmula más frecuente para la determinación de la carga de hundimiento es la conocida como de Brinch-Hansen, de la que existen diferentes versiones que presentan ligeras variaciones en la obtención de algunos coeficientes. En esta Guía se recomienda la versión que se expone a continuación.

Según este método, la presión vertical de hundimiento es la suma de tres términos que representan la contribución a la capacidad de soporte, de la sobrecarga existente al nivel de cimentación q , de la cohesión del terreno c , y de su peso propio.”

3.3. Estabilidad del muro pantalla

Según el apartado 6.3.2.2 Estabilidad, del “Código Técnico de la Edificación” se puede extraer:

“La comprobación de la estabilidad de una pantalla de contención debe hacerse, según los criterios definidos en el apartado 6.3.1, en la situación pésima para todas y cada una de las fases de la excavación o de la construcción del edificio, a menos que la estabilidad en una determinada fase implique necesariamente la estabilidad en otras con un mayor grado de seguridad, en cuyo caso podrá prescindirse de las comprobaciones correspondientes a éstas.”

Estabilidad global y fallo combinado del terreno y del elemento estructural

Según el apartado 6.3.2.2.1 Estabilidad global y fallo combinado del terreno y del elemento estructural, del “Código Técnico de la Edificación” se puede extraer:

1. El conjunto de la estructura y la pantalla pueden fallar mediante un mecanismo de rotura aún más profundo que la pantalla, o que no siendo tan profundo pudiera cortar a ésta.

2. Debe comprobarse que la seguridad al deslizamiento a lo largo de la superficie pésima posible, que incluya en la masa deslizante a la pantalla completa y a sus elementos de sujeción, no es inferior al establecido.
3. Las acciones de los elementos de sujeción de la pantalla que queden incluidos por completo en las superficies de rotura no deben ser consideradas.
4. En la Figura 6.9 se esquematizan algunas de las posibles formas de rotura, por deslizamiento profundo.

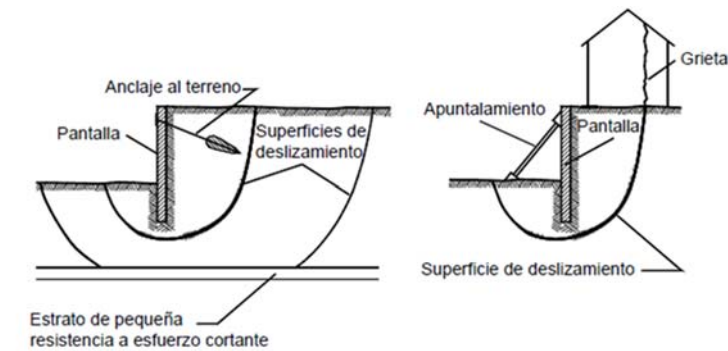


Imagen 1. Formas de rotura por deslizamiento profundo. Fuente: Apuntes de la asignatura de diseño geotécnico de cimentaciones y muros de contención

5. Debe comprobarse también los mecanismos de rotura a lo largo de superficies de deslizamiento que corten a los elementos de anclaje o que no incluyan en la masa deslizante a los sistemas de apuntalamiento por completo. En la Figura 6.10 se indican esquemáticamente algunas de estas posibles formas de rotura.
6. En tales casos se contará con las fuerzas de los anclajes o de los apuntalamientos, con su valor de trabajo sin afectar de coeficiente de seguridad alguno, como fuerzas exteriores. Además, puede ser necesario, como en el caso de anclajes cortados por la superficie deslizante, tener en cuenta las tensiones provocadas por los anclajes sobre la pantalla.

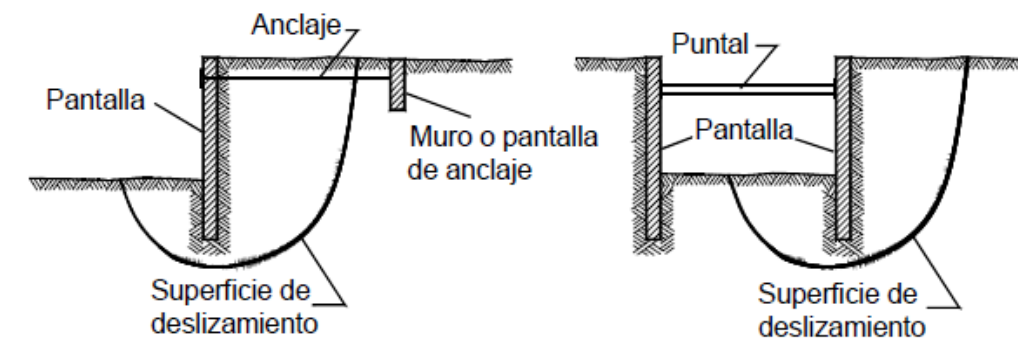


Imagen 2. Ejemplos de deslizamientos profundos que interceptan elementos de sujeción. Fuente: Apuntes de la asignatura de diseño geotécnico de cimentaciones y muros de contención

4. Análisis y cálculo geotécnico de los muros pantalla

4.1. Predimensionamiento de los muros pantalla

Los muros pantallas se dimensionan equilibrando los momentos de los empujes activos y pasivos que actúan sobre ellos, que se consigue modificando la profundidad de empotramiento y/o disponiendo anclajes intermedios. Se deben asumir ciertas simplificaciones durante el cálculo manual ya que los muros pantalla se encuentran en una situación de equilibrio hiperestática.

A continuación, se proporciona un croquis de la situación del muro pantalla, con datos de los terrenos en los que hay que ejecutarla, la cota de excavación y la carga que actúa en superficie del trasdós:

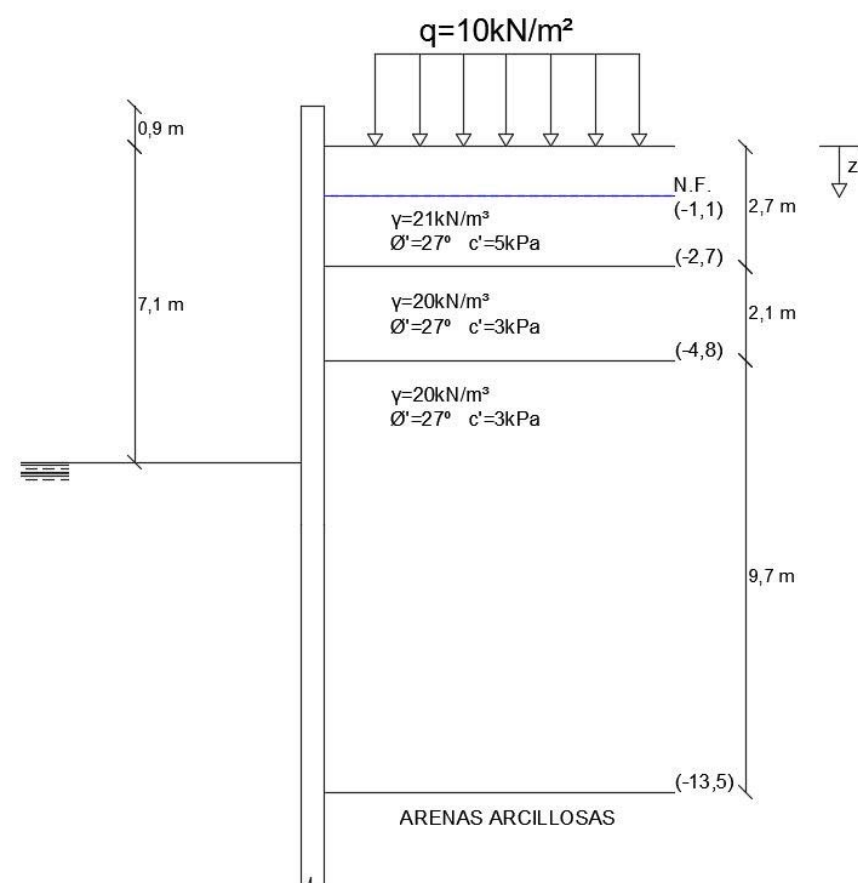


Imagen 3. Datos de partida para el predimensionamiento del muro pantalla. Fuente: Propia

Para prevenir posibles inundaciones debido al canal o a la rambla situado en las inmediaciones de la parcela, este se levantará 0.9 metros sobre la cota de la rasante de la vía de circulación. Como se ha dicho en el anejo de estudio geotécnico, se considera que el nivel freático se encuentra 2 metros debajo de la cota cero de la rasante de la parcela (o un metro encima de la cota del canal), y no a 3,5 metros como indica el sondeo realizado en el estudio.

La carga corresponde a la recomendada por la norma para un tráfico pesado. Aunque esta carga solo actuará en dos laterales de la obra se adopta en todas las secciones por si se llevaran actuaciones futuras en

alguna de las parcelas colindantes, estando de esta manera del lado de la seguridad. Esta carga no actúa en las inmediaciones del muro, pero para simplificar el cálculo a mano se ha considerado que sí. Más adelante se realizará un cálculo mediante software informático para determinar si el muro cumple las comprobaciones de estabilidad global, tratándose el cálculo a mano como un predimensionamiento del muro pantalla.

En los cálculos que se realizan a continuación se supondrá que el terreno está formado por dos estratos. La primera hasta la cota 2,7 metros (por debajo de la rasante) con las propiedades que se muestran en la imagen. La segunda capa estará formada por ambas capas de limos (con las mismas propiedades) y la capa de arenas arcillosas.

El cálculo de empujes y momentos se hará aplicando el método de Rankine.

4.1.1. Análisis de la tipología a adoptar

Se estudiarán dos soluciones distintas, comparando la altura total de muro de ambas soluciones para determinar cuál escoger.

Muro pantalla en voladizo

Esta solución consiste en ejecutar el muro pantalla sin apoyos intermedios entre la cabeza y la cota de excavación en el intradós. Para poder resolver el equilibrio se supone que cuando el muro pantalla entra en carga, gira alrededor de un punto O, cerca de la base del empotramiento, movilizandolos empujes activos y pasivos. Por encima del punto O en el trasdós se movilizan empujes activos, mientras que en el intradós los empujes movilizados son pasivos.

Para poder determinar la posición del punto O se supone que el momento flector en este punto es nulo. Gracias a esto se puede determinar una ecuación de equilibrio de momentos de los empujes activos y pasivos en O en la que la única incógnita es d, la profundidad de empotramiento, siendo el empotramiento real $d_s = 1,2d$.

En primer lugar, se va a calcular si existen grietas de tracción, ya que se trata de un suelo cohesivo. La fórmula para sacar los empujes efectivos unitarios es la siguiente:

$$e'_a = K_a \cdot \sigma'_v - 2 c' \cdot \sqrt{ka}$$

El coeficiente de empuje activo (de ambas capas, $\phi = 27^\circ$) es:

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = 0,3755$$

Para determinar la profundidad a la que alcanzan las grietas de tracción, se iguala la expresión de empujes efectivos unitarios a cero, para así determinar a partir de qué punto aparecen tracciones:

$$0 = K_a \cdot (q + \gamma \cdot z) - 2 c' \cdot \sqrt{ka}$$

$$0 = 0,3755 \cdot (10 + 21z) - 2 \cdot 5 \cdot \sqrt{0,3755}$$

$$z_G = 0,30 \text{ m}$$

Por tanto, los empujes activos en el trasdós del muro actuarán a partir de 0,30 metros.

Para poder calcular los empujes que actúan sobre el muro será necesario calcular el empuje efectivo unitario de los puntos que se encuentren entre capas y en el nivel freático, ya que cambiara la distribución de empujes. Una vez determinados podremos descomponer el empuje en rectángulos y triángulos para facilitar el cálculo de la resultante.

- Empuje activo a la cota del nivel freático:

$$e'_a (z=1.1\text{m}) = 0,3755 \cdot (10+21 \cdot 1,1) - 2 \cdot 5 \cdot \sqrt{0,3755} = 6,30 \text{ kPa}$$

- Empuje activo a la cota del muro del primer estrato:

$$e'_a (z=2,7\text{m}) = 0,3755 \cdot (10+21 \cdot 1,1+(21-10) \cdot (2,7-1,1)) - 2 \cdot 5 \cdot \sqrt{0,3755} = 12,91 \text{ kPa}$$

- Empuje activo a la cota del techo del segundo estrato:

$$e'_a (z=2,7\text{m}) = 0,3755 \cdot (10+21 \cdot 1,1+(21-10) \cdot (2,7-1,1)) - 2 \cdot 5 \cdot \sqrt{0,3755} = 12,91 \text{ kPa}$$

- Empuje activo a la cota de excavación, que es 7,1 metros, ya que la coronación del muro y la rasante de la parcela están 0,9 metros por encima

$$e'_a (z=7,1\text{m}) = 0,3755 \cdot (10+21 \cdot 1,1+(21-10) \cdot (2,7-1,1)+(20-10) \cdot (7,1-2,7)) - 2 \cdot 5 \cdot \sqrt{0,3755} = 29,43 \text{ kPa}$$

- Empuje activo en función de la profundidad de empotramiento:

$$e'_a (d) = 0,3755 \cdot (10+21 \cdot 1,1+(21-10) \cdot (2,7-1,1)+(20-10) \cdot (7,1-2,7)+(20-10) \cdot d) - 2 \cdot 5 \cdot \sqrt{0,3755} = \\ = (29,43 + 3,755 d) \text{ kPa}$$

También se utilizará el método de Rankine para el cálculo de los empujes pasivos. Se les aplicará un coeficiente de reducción de 1,5. La expresión es la siguiente:

$$e'_a = K_a \cdot \sigma'_v + 2 c' \cdot \sqrt{K_a}$$

El coeficiente de empuje pasivo es:

$$K_a = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = 2,663$$

Y la distribución:

$$e'_p (d) = 2,663 \cdot (20-10) \cdot d + 3 \cdot 2 \cdot \sqrt{2,663} = (26,63 d + 9,79) \text{ kPa}$$

A continuación, se muestra una imagen representando la descomposición de empujes:

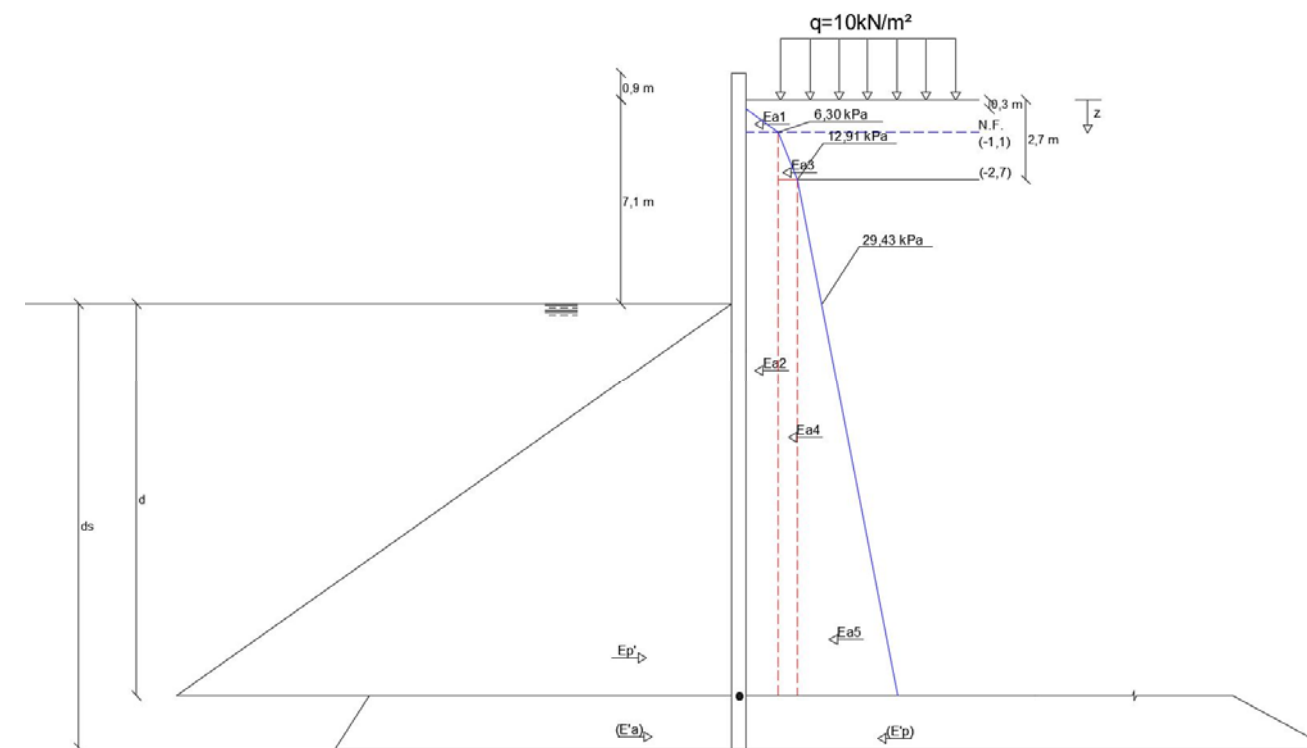


Imagen 4. Ley de empujes en el trasdós e intradós del muro pantalla en voladizo. Fuente: Propia

Utilizando los valores de empuje unitario calculados anteriormente se calculan las resultantes y su distancia al punto O:

$$E'_{a1} = 0,5 \cdot 6,3 \cdot (1,1 - 0,3) = 2,52 \text{ kN/m}$$

$$E'_{a2} = 6,3 \cdot (7,1 - 1,1 + d) = 37,8 + 6,3d \text{ kN/m}$$

$$E'_{a3} = 0,5 \cdot (12,91 - 6,9) \cdot (2,7 - 1,1) = 4,81 \text{ kN/m}$$

$$E'_{a4} = (12,91 - 6,9) \cdot (7,1 - 2,7 + d) = 26,44 + 6,01d \text{ kN/m}$$

$$E'_{a5} = 0,5 \cdot [(29,43 + 3,755d) - 12,91] \cdot (7,1 - 2,7 + d) \text{ kN/m}$$

$$d_{E'a1} = 0,33 \cdot (1,1 - 0,3) + (7,1 - 1,1 + d) = (6,13 + d) \text{ m}$$

$$d_{E'a2} = 0,5 \cdot (7,1 - 1,1 + d) = (3 + 0,5d) \text{ m}$$

$$d_{E'a3} = 0,33 \cdot (2,7 - 1,1) + (7,1 - 2,7 + d) = (4,93 + d) \text{ m}$$

$$d_{E'a4} = 0,5 \cdot (7,1 - 2,7 + d) = (2,2 + 0,5d) \text{ m}$$

$$d_{E'a5} = 0,33 \cdot (7,1 - 2,7 + d) = (1,45 + 0,33d) \text{ m}$$

$$E'p = 0,5 \cdot (26,63 d + 9,79) \cdot d / 1,5 \text{ kN/m}$$

$$d_{E'p} = (0,33 d) \text{ m}$$

Una vez obtenidas los empujes en función de la profundidad de empotramiento, se igualan los momentos en el punto O a cero y se despeja esta:

$$\sum M_O = 0 \rightarrow \sum (E'_a \cdot dE'_a) = E'_p \cdot dE'_p$$

Se obtiene $d = 10,89$ m, pero, debido a la hipótesis de cálculo simplificada, se suele admitir que la profundidad de empotramiento real es del orden del 20% superior, siendo $d_s = 1,2 \cdot 10,89 = 13,07$ metros, lo cual significa que el muro tendría una longitud de 21,07 metros en el caso de disponerse en voladizo (se han sumado los 0,9 metros de muro/viga de coronación que sobresalen por encima de la rasante).

Muro pantalla apuntalado o anclado:

Una alternativa a la anterior solución es disponer algún tipo de elemento que arriestre al muro y reduzca por tanto la profundidad de empotramiento necesario.

Se utilizará el método americano, en el que se acepta que cuando el muro entra en carga, el giro se produce alrededor del punto de aplicación del elemento de arriostamiento, movilizándose un empuje activo en el trasdós del muro debajo de este (se desprecia el empuje por encima), y por tanto permite calcular la profundidad igualando momentos en este punto. La fuerza del elemento de arriostamiento será igual a la diferencia entre el empuje activo y el empuje pasivo.

El apuntalamiento o anclaje lo colocaremos a una profundidad de 1,1 metros, ya que a priori no queremos dejar una longitud excesiva en voladizo, y además nos facilitara el cálculo, al encontrarse en el nivel freático (cambio de pendiente del empuje activo). Ya realizaremos un cálculo exhaustivo con software informático para determinar la posición óptima del anclaje.

La distribución de empujes unitarios es idéntica a la anterior, excepto en la parte superior, ya que hemos dicho que no se producen empujes por encima del apuntalamiento o anclaje:

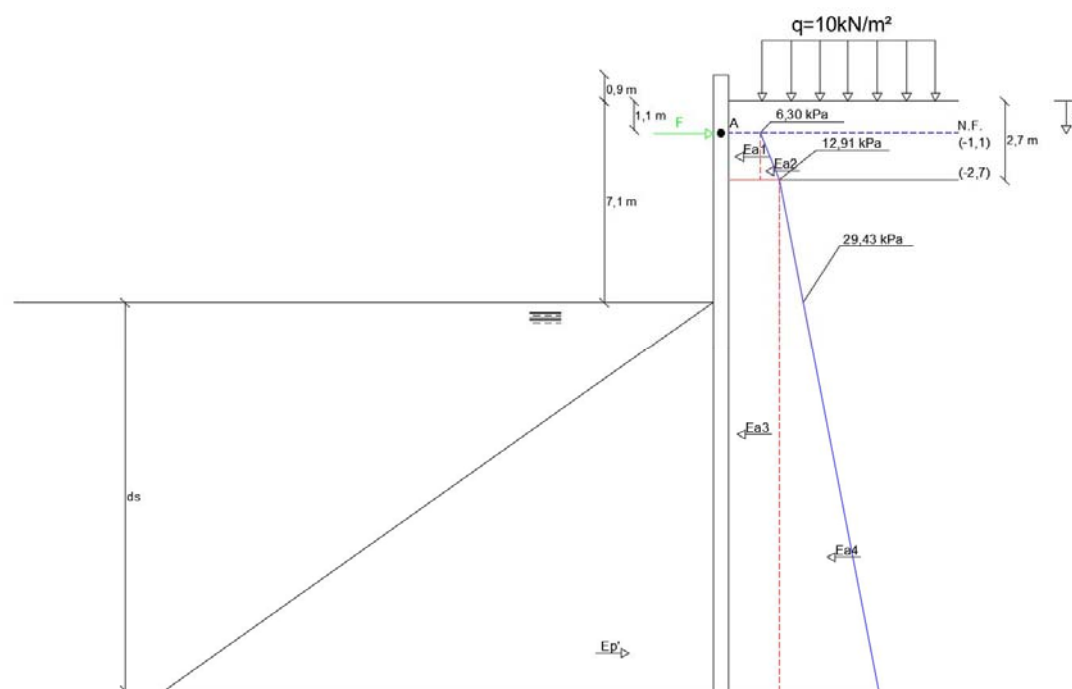


Imagen 5. Ley de empujes en el trasdós e intradós del muro pantalla con apuntalamiento o anclaje. Fuente: Propia

Los resultantes y distancias al punto A son los siguientes:

$$E'_{a1} = 6,3 \cdot (2,7 - 1,1) = 10,08 \text{ kN/m}$$

$$E'_{a2} = 0,5 \cdot (12,91 - 6,3) \cdot (2,7 - 1,1) = 5,29 \text{ kN/m}$$

$$E'_{a3} = 12,91 \cdot (7,1 - 2,7 + d_s) = (56,80 + 4,4 d_s) \text{ kN/m}$$

$$E'_{a4} = 0,5 \cdot [(29,43 + 3,755 d_s) - 12,91] \cdot (7,1 - 2,7 + d_s) \text{ kN/m}$$

$$d_{E'a1} = 0,5 \cdot (2,7 - 1,1) = 0,8 \text{ m}$$

$$d_{E'a2} = 0,66 \cdot (2,7 - 1,1) = 1,07 \text{ m}$$

$$d_{E'a3} = 0,5 \cdot (7,1 - 2,7 + d_s) + (2,7 - 1,1) = (3,8 + 0,5 d_s) \text{ m}$$

$$d_{E'a4} = 0,66 \cdot (7,1 - 2,7 + d_s) + (2,7 - 1,1) = (4,53 + 0,66 d_s) \text{ m}$$

$$E'_p = 0,5 \cdot (26,63 d_s + 9,79) \cdot d_s / 1,5 \text{ kN/m}$$

$$dE'_p = 0,66 \cdot d_s + (7,1 - 1,1) \text{ m}$$

Por tanto, igualando momentos en el punto A y despejando la profundidad de empotramiento, da un valor de.

$$\sum M_A = 0 \rightarrow d_s = 4,14 \text{ m}$$

Si se suman los 8,0 metros por encima del empotramiento (7,1 metros y 0,9 metros por debajo y encima de la rasante respectivamente) dará que el muro tendría una longitud de 12,2 metros.

Como se ha dicho anteriormente, la fuerza que se transmite al apuntalamiento o anclaje es igual a la diferencia entre el empuje activo y el empuje pasivo:

$$\sum E'_a = 227,3 \text{ kN/m}$$

$$E'_p = 165,65 \text{ kN/m}$$

$$F = \sum E'_a - E'_p = 61,65 \text{ kN/m}$$

A la vista de los resultados obtenidos, se decide elegir la segunda alternativa, de muro pantalla arriestrada con apuntalamiento o anclaje.

Se recuerda que esto se trata de un predimensionamiento con un cálculo simplificado basado en el equilibrio de momentos. Las comprobaciones de estabilidad global (círculo de desplazamiento pésimo), relación de empuje pasivo teórico y el realmente movilizado, etc. que se realizarán con software informático pueden ocasionar la necesidad de ampliar considerablemente esta longitud de muro.

4.2. Comprobaciones geotécnicas de los muros pantalla

Una vez realizado el predimensionamiento del muro, es necesario hacer una comprobación más exhaustiva de la estabilidad global del muro pantalla.

4.2.1. Programa de cálculo empleado

Para realizar esta comprobación se ha utilizado el módulo de Muros pantalla del programa de cálculo CYPE 2015. Este permite el cálculo con varias tipologías de muros pantalla y además dispone de un asistente para facilitar la modelización de diversas situaciones, como la existencia de edificios colindantes o la definición de las fases constructivas.

El programa se utilizará para obtener las dimensiones geométricas definitivas de los tramos de muro pantalla (sin perjuicios a que se tenga que aumentar el ancho cuando se dimensione el armado), mediante comprobaciones geotécnicas de estabilidad general. Además, proporcionara las leyes de esfuerzos para poder dimensionar su armado.

4.2.2. Modelización del muro pantalla

Se modelizan los muros pantalla mediante el asistente que proporciona el programa, definiendo las cotas a las que se encuentran los forjados y la losa de cimentación (0.9m, -2.6m y -6.3m, siendo estas las cotas superiores de los elementos), la cota a la que se encuentra el nivel freático (-1,1 m), apoyos provisionales durante la construcción, etc. No se introducen datos de terreno ni cargas uniformes sobre el trasdós del muro ya que no nos ofrece la posibilidad de personalizar estas en el asistente.

Una vez completada los pasos del asistente, el programa modeliza el tramo de muro en un espacio de trabajo, donde se podrá modificar sus dimensiones, materiales, fases, cargas aplicadas, terrenos en los que se encuentra, etc.

Se introduce en el programa los datos de terrenos tal como figuran en Anejo de Estudio Geotécnico, habiéndose asumido la simplificación descrita en el predimensionamiento de suponer los estratos limo arcillosos como uno conjunto al tener las mismas propiedades geotécnicas (peso específico, ángulo de rozamiento efectivo y cohesión efectiva).

A continuación, se definen las cargas que actúan en el trasdós del muro. Estas actúan sobre la rasante del terreno (0,9 metros por debajo de la coronación del muro). Se considera que puede circular un tráfico pesado ($q=10 \text{ kN/m}^2$) en un ancho de banda de 5 metros a 8 metros de la parcela, mínima distancia entre los muros pantalla y alguna vía de circulación, y que puede circular un tráfico ligero ($q=4 \text{ kN/m}^2$) en los 8 metros entre las vías de circulación y los muros.

Antes de definir las fases de construcción, se asignan los valores de altura y anchura del muro pantalla. Para la altura se escoge el obtenido en el predimensionamiento (redondeando al alza), igual a 13 metros, mientras que la anchura se escoge en función de esta altura, eligiendo inicialmente 50 cm.

Las fases de construcción son imprescindibles para realizar un correcto análisis y dimensionamiento de muros pantalla, ya que es necesario verificar que se cumplen todas las comprobaciones durante cada una de estas fases. Para el primer cálculo se realizará una primera excavación a la cota 2,1 m, se colocará un anclaje activo con carga de tesado 500 kN (en el predimensionamiento salía 61,65kN/m, por 5 metros de separación,

saldrían 308,25kN, que se incrementa para estar del lado de la seguridad) a la cota -1,1 m, se realizará una segunda excavación hasta la cota -7,1 m y posteriormente se ejecutará la losa y los forjados.

4.2.3. Comprobaciones y dimensionamiento

Se ejecutan las comprobaciones de círculos de deslizamiento pésimo, relación entre el momento originado por los empujes pasivos en el intradós y el momento originado por los empujes activos en el trasdós y relación entre el empuje pasivo total en el intradós y el empuje realmente movilizado en el intradós.

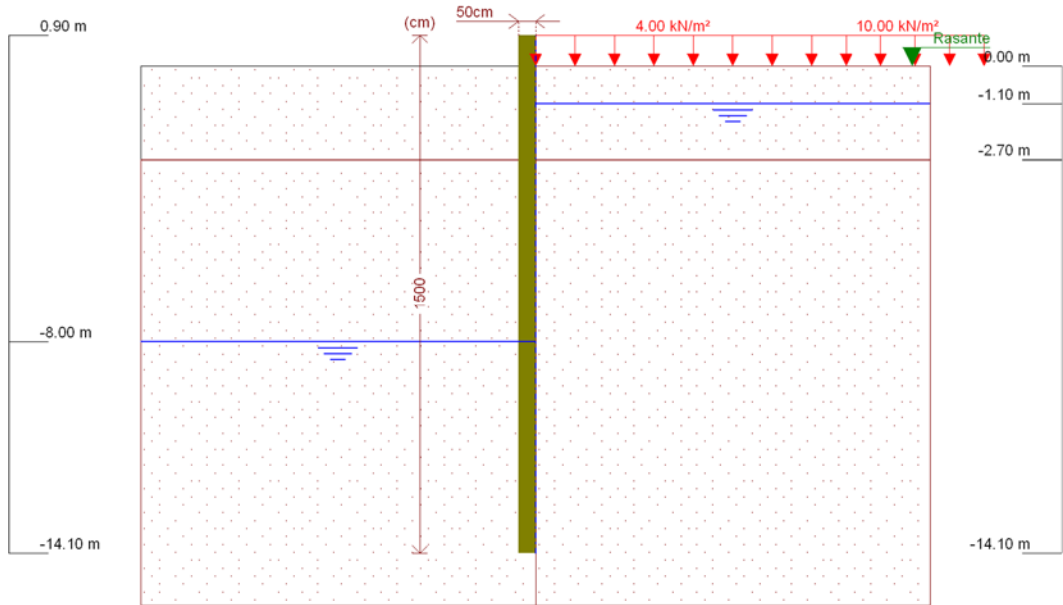
No se cumplen las comprobaciones de relación entre el empuje pasivo total en el intradós y el empuje realmente movilizado en el intradós, siendo el valor obtenido en la fase de excavación a la cota -7,1 m de 1.42 (inferior a la exigida de 1,5).

Se procede a realizar varias combinaciones de cotas de primera excavación y cota de disposición del anclaje, buscando la posición que permita reducir al máximo la altura total de muro. Se determina que realizando una primera fase de excavación hasta la cota -2,5 m y colocando el anclaje a -1,8 m se consigue la menor altura del muro (unos 13,5 metros).

Se escoge finalmente una altura de muro de 15 metros, con espesor de 50 cm dividido en módulos de 5 metros, cumpliendo de esta manera todas las comprobaciones con un margen de seguridad.

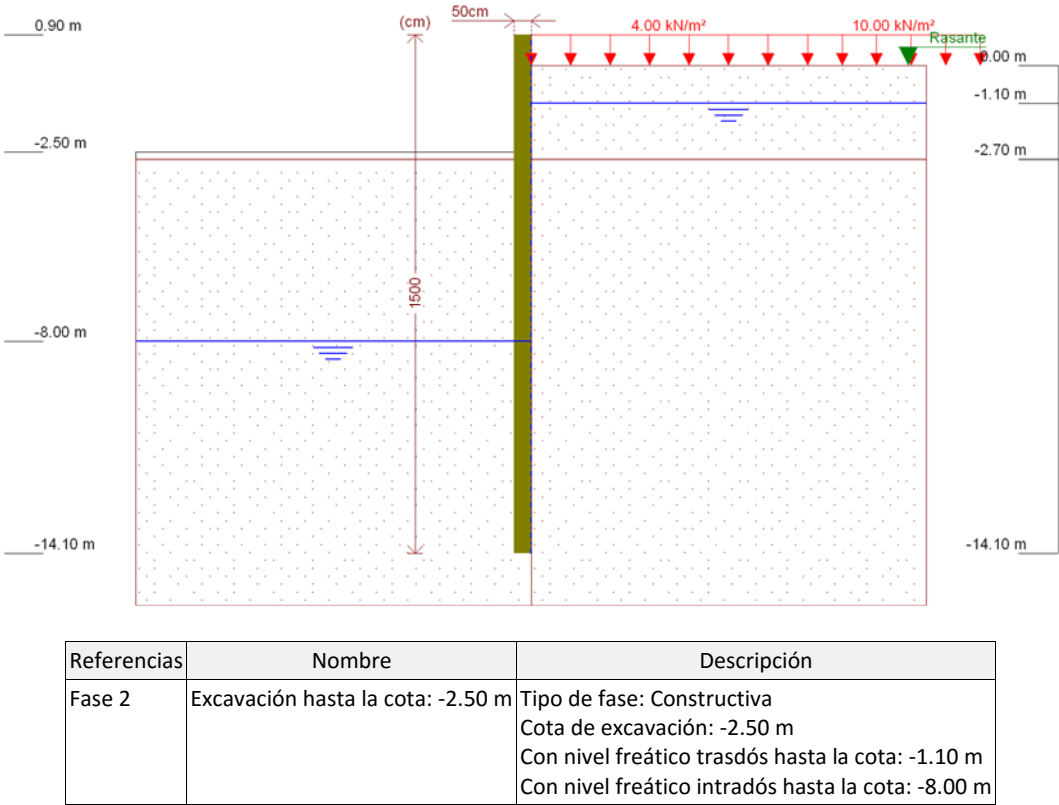
A continuación, se muestran las distintas fases consideradas en el cálculo, proporcionadas por el programa, con imagen y tabla informativa al pie de la imagen

Fase 1.

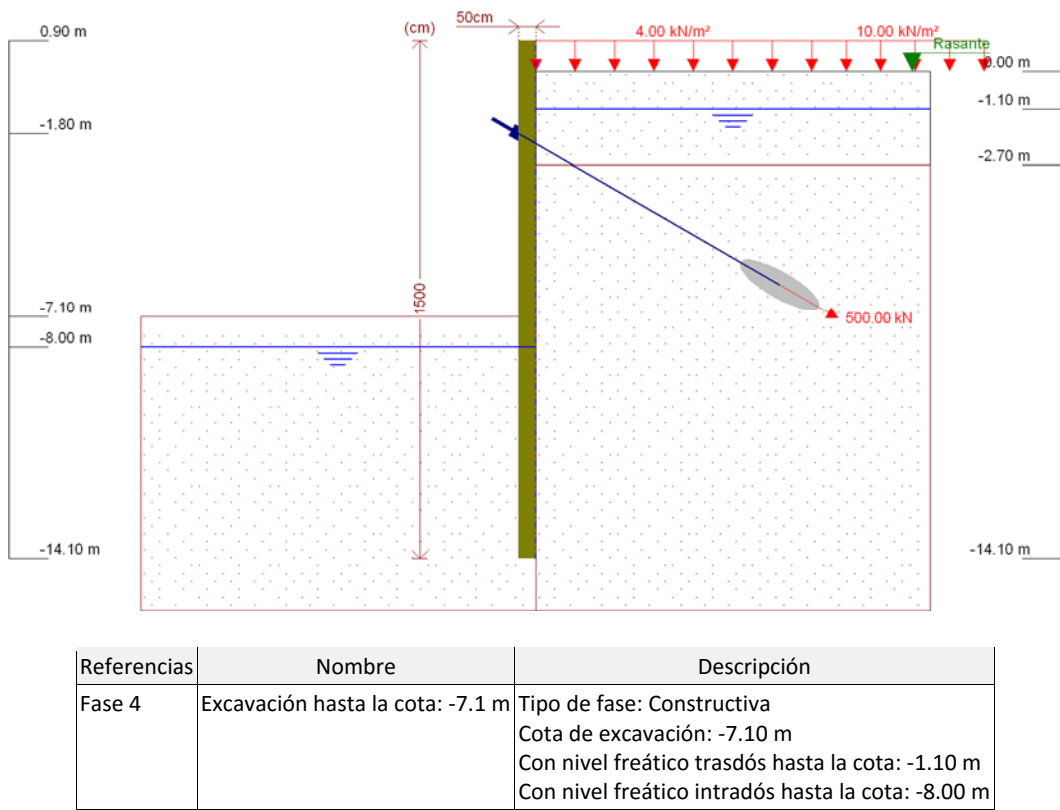


Referencias	Nombre	Descripción
Fase 1	Disminución del nivel freático a la cota -9.00 m	Tipo de fase: Constructiva Cota de excavación: 0.00 m Con nivel freático trasdós hasta la cota: -1.10 m Con nivel freático intradós hasta la cota: -8.00 m

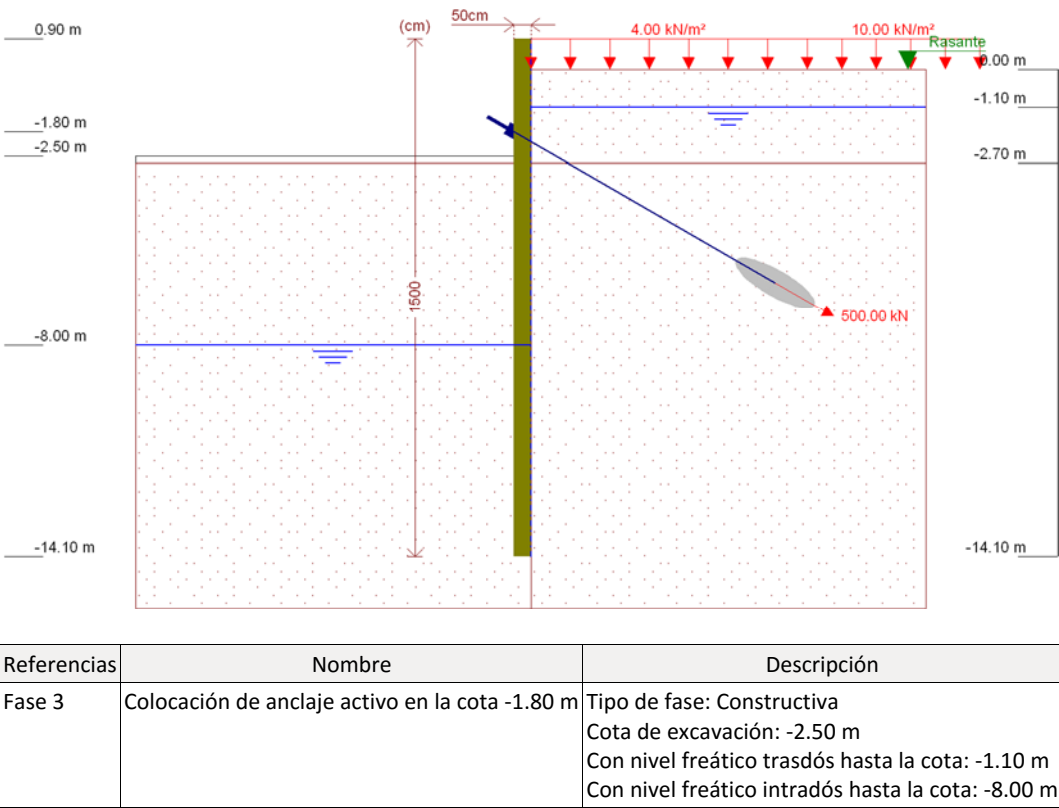
Fase 2.



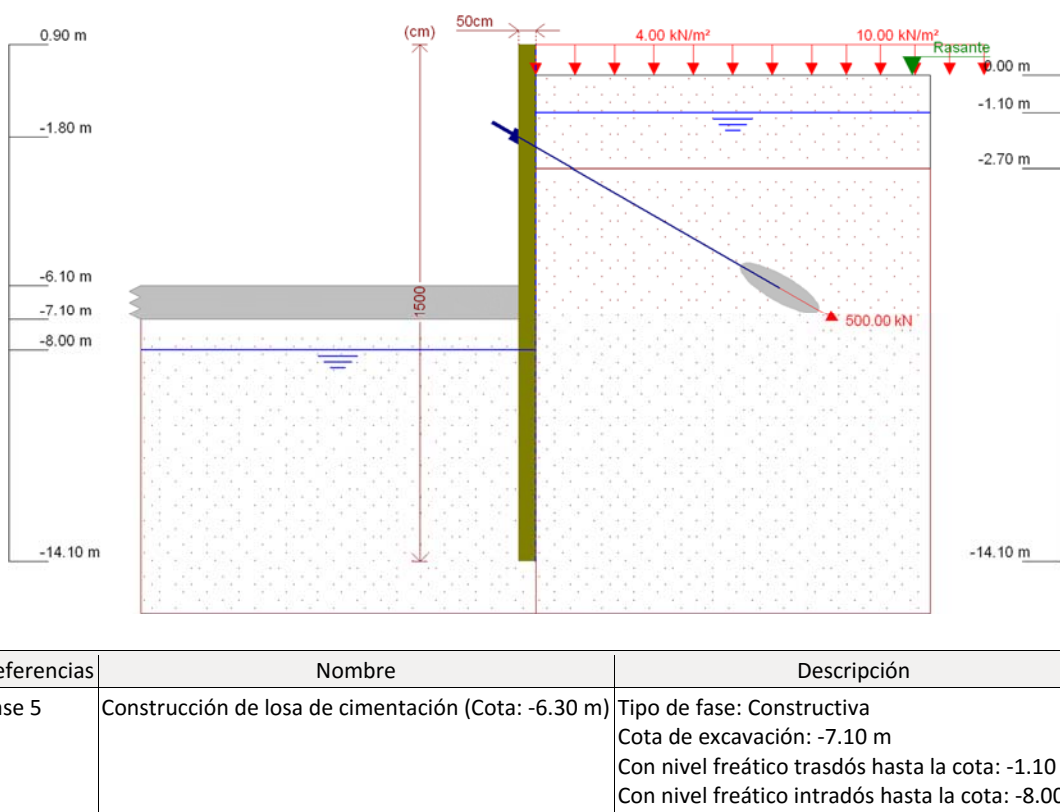
Fase 4.



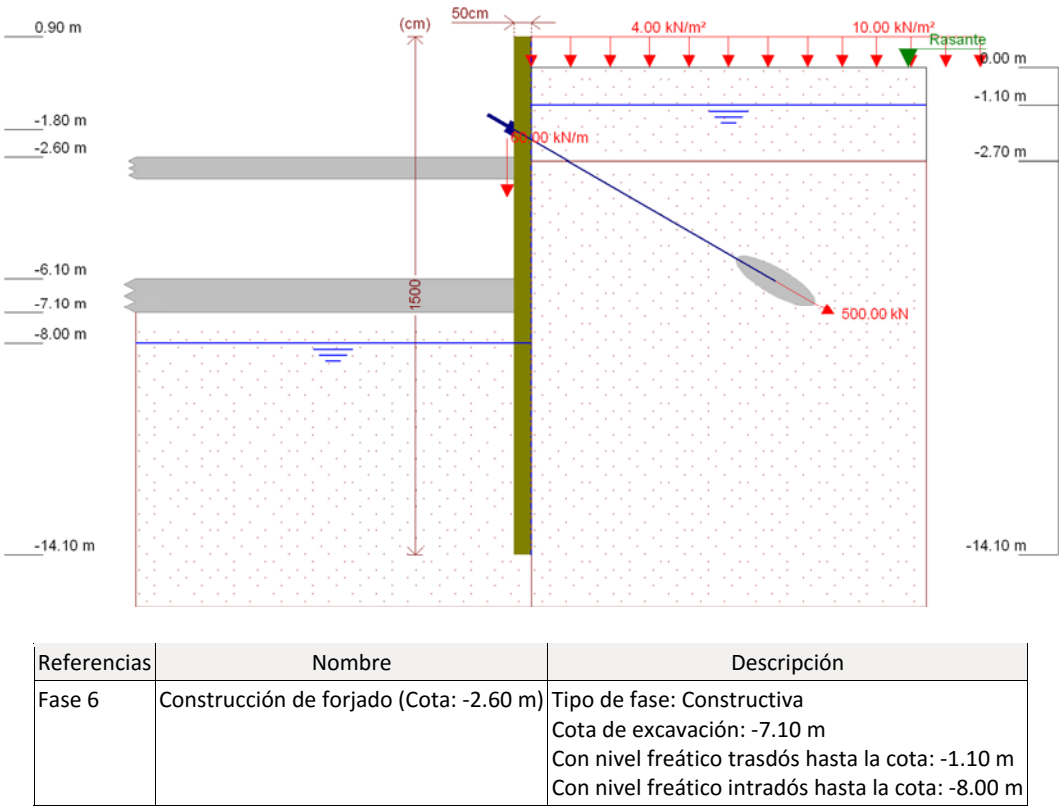
Fase 3.



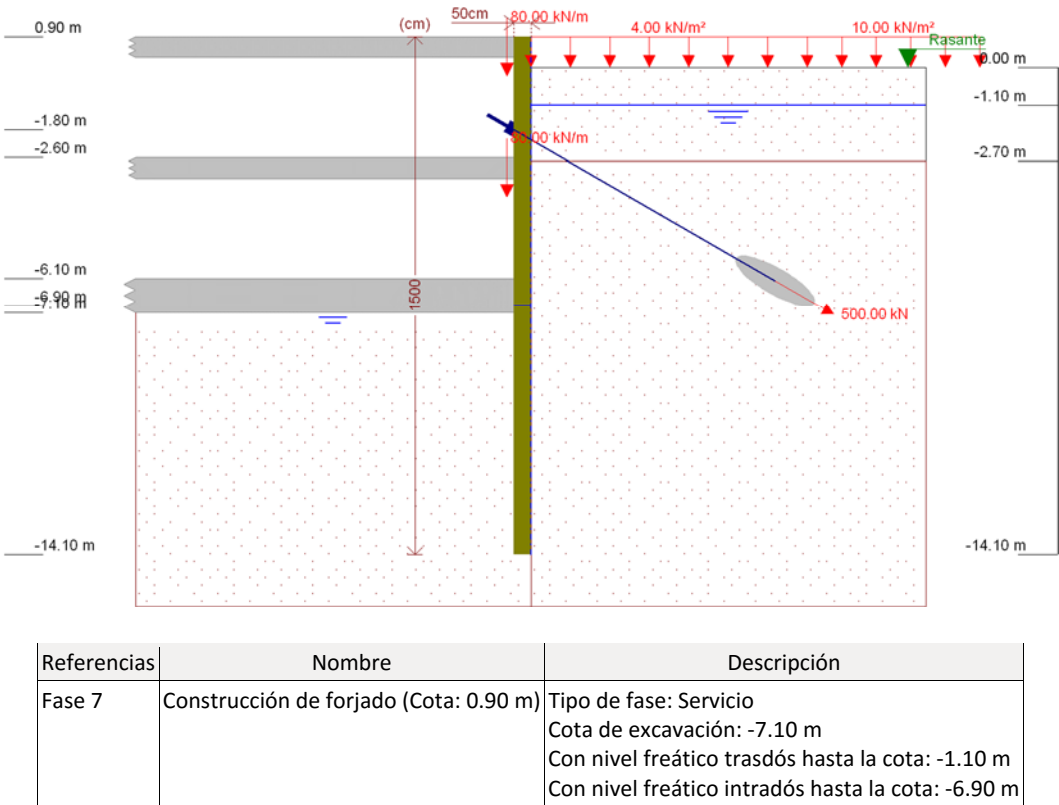
Fase 5



Fase 6



Fase 7



A continuación, se muestra una tabla resumen de las comprobaciones de círculo de desplazamiento pésimo proporcionada por CYPE:

Referencia: Comprobaciones de estabilidad (Círculo de deslizamiento pésimo): Muro pantalla		
Comprobación	Valores	Estado
Círculo de deslizamiento pésimo:		
- Combinaciones sin sismo:		
Valor introducido por el usuario.	Mínimo: 1.8	
- Excavación hasta la cota: -2.50 m: Coordenadas del centro del círculo (-4.36 m ; 3.47 m) - Radio: 18.16 m:	Calculado: 8.468	Cumple
- Colocación de anclaje activo en la cota -1.80 m: Coordenadas del centro del círculo (-4.36 m ; 3.47 m) - Radio: 18.16 m:	Calculado: 8.468	Cumple
- Excavación hasta la cota: -7.10 m: Coordenadas del centro del círculo (-2.53 m ; 1.34 m) - Radio: 15.70 m:	Calculado: 2.596	Cumple
- Construcción de losa de cimentación (Cota: -6.30 m) ⁽¹⁾		No procede
- Construcción de forjado (Cota: -2.60 m) ⁽¹⁾		No procede
- Construcción de forjado (Cota: 0.90 m) ⁽¹⁾		No procede
⁽¹⁾ No es necesario comprobar la estabilidad global (círculo de deslizamiento pésimo) cuando en la fase se ha definido algún forjado.		

Se muestra a continuación una imagen de la comprobación más desfavorable asociada a la fase de excavación hasta la cota -7,1 metros, que cumple con un coeficiente de seguridad de 2,596:

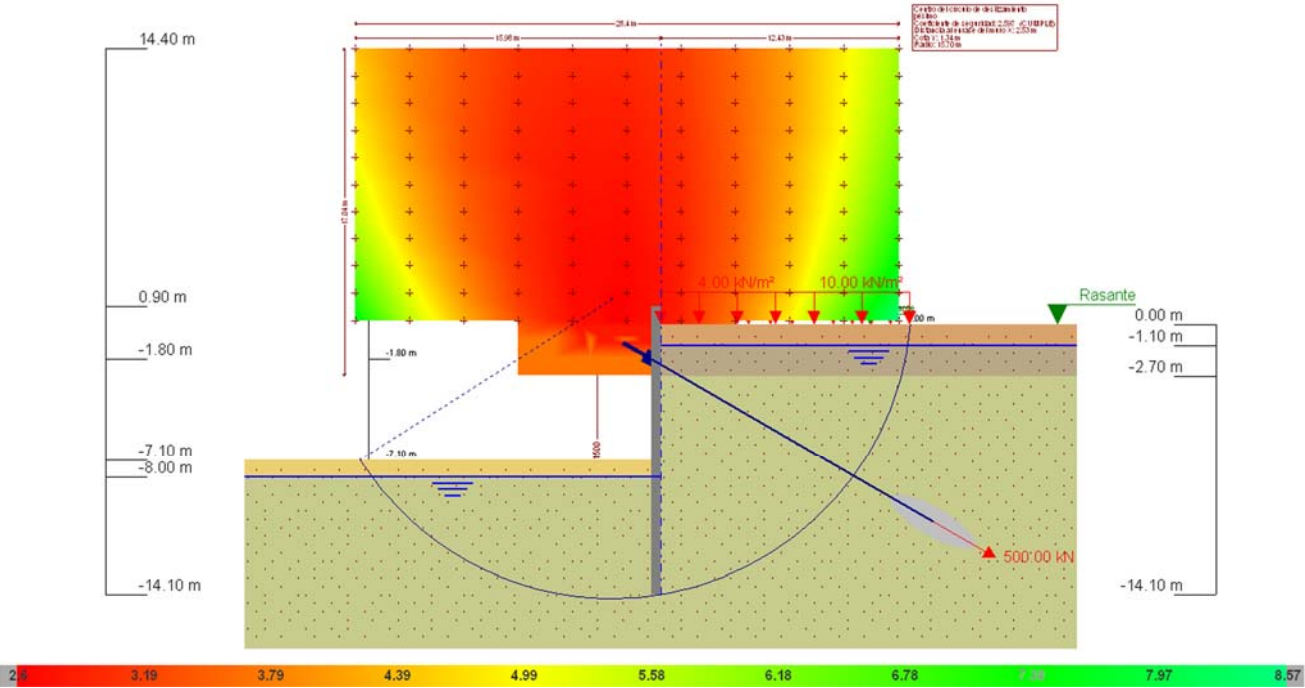


Imagen 6. Círculo de deslizamiento pésimo en la fase 4. Fuente: Propia

Además, como se ha dicho anteriormente, se realizarán comprobaciones de las relaciones de relación entre el momento originado por los empujes pasivos en el intradós y el momento originado por los empujes activos en el trasdós (el mismo que realizado en el cálculo a mano) y relación entre el empuje pasivo total en el intradós y el empuje realmente movilizado en el intradós. Se proporcionan seguidamente las tablas resumen de estas comprobaciones:

Referencia: Comprobaciones de estabilidad (Coeficientes de seguridad): Muro pantalla		
Comprobación	Valores	Estado
Relación entre el momento originado por los empujes pasivos en el intradós y el momento originado por los empujes activos en el trasdós: - Hipótesis básica: <i>Valor introducido por el usuario.</i> - Disminución del nivel freático a la cota -9.00 m: - Excavación hasta la cota: -2.50 m: - Colocación de anclaje activo en la cota -1.80 m: - Excavación hasta la cota: -7.10 m: - Construcción de losa de cimentación (Cota: -6.30 m) ⁽¹⁾ - Construcción de forjado (Cota: -2.60 m) ⁽¹⁾ - Construcción de forjado (Cota: 0.90 m) ⁽¹⁾ <i>(1) Existe más de un apoyo.</i>	Mínimo: 1.5 Calculado: 7.715 Calculado: 4.221 Calculado: 5.532 Calculado: 2.418	Cumple Cumple Cumple Cumple No procede No procede No procede
Relación entre el empuje pasivo total en el intradós y el empuje realmente movilizado en el intradós: <i>Valor introducido por el usuario.</i> Hipótesis básica: - Disminución del nivel freático a la cota -9.00 m: - Excavación hasta la cota: -2.50 m: - Colocación de anclaje activo en la cota -1.80 m: - Excavación hasta la cota: -7.10 m: - Construcción de losa de cimentación (Cota: -6.30 m): - Construcción de forjado (Cota: -2.60 m): - Construcción de forjado (Cota: 0.90 m):	Mínimo: 1.5 Calculado: 4.944 Calculado: 3.971 Calculado: 4.057 Calculado: 2.107 Calculado: 2.107 Calculado: 2.107 Calculado: 2.125	Cumple Cumple Cumple Cumple Cumple Cumple Cumple
Se cumplen todas las comprobaciones		

Por tanto, se ve que se cumplen todas las comprobaciones y seguidamente se pasará a dimensionar el armado de los muros pantalla en el Anejo 11 Análisis y cálculos estructurales.

5. Análisis y cálculo geotécnico de la losa de cimentación

5.1. Predimensionamiento de la losa de cimentación

La losa de cimentación se debe dimensionar teniendo en cuenta la subpresión producida por el nivel freático, en este proyecto se encuentra una subpresión de:

$$\text{Subpresión} = 7,1 - 1,1 = 6,0 \text{ m.c.a}$$

Para resistir esta subpresión será necesario que el peso propio de la estructura sea superior a esta sobrecarga, por lo que mediante el siguiente cálculo obtenemos el espesor de hormigón necesario para resistir esta subpresión:

- $6,0 \times 10$ (peso específico del agua)/ 25 (peso específico del hormigón) = 2,4 m de espesor del hormigón para resistir la subpresión

Por lo tanto, entre la losa de cimentación y los forjados del aparcamiento se debe conseguir un valor próximo a dicho espesor, ya que en este proyecto el peso que supone la disposición del vaso de la piscina proporcionará un coeficiente de seguridad aceptable frente al levantamiento que podría provocar la subpresión en el centro de la losa de cimentación. En los extremos de dicha losa se procura conseguir una unión óptima entre los muros pantalla y la losa de cimentación que garantice la estabilidad.

5.2. Comprobaciones geotécnicas de la losa de cimentación

En el estudio geotécnico se justifica la cimentación mediante losa de cimentación, por lo que en el siguiente punto se realizan las comprobaciones geotécnicas necesarias.

Las comprobaciones que se deben realizar para garantizar la estabilidad geotécnica de la losa de cimentación son las mismas comprobaciones que se realizarían en el cálculo de zapatas, pero en el caso de losa de cimentación es necesario hacer las consideraciones que se mencionan a continuación.

En una losa de cimentación no es necesario realizar las comprobaciones de deslizamiento y vuelco, por lo que se debe realizar la comprobación frente a hundimiento.

La carga de hundimiento se calcula mediante la siguiente expresión:

$$q_h = c \cdot N_c + q \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot B \cdot \gamma \cdot N_\gamma$$

Donde:

- c = cohesión del terreno.
- q = tensión total vertical a la profundidad del plano de cimentación.
- B = ancho de la cimentación.
- γ = peso específico del terreno.
- N_c, N_q y N_γ = factores de capacidad de carga.

Puesto que la losa de cimentación se apoya sobre un terreno arcilloso, blando y saturado la carga de hundimiento limitante será la que se produce a corto plazo, para la cual se deben hacer las siguientes consideraciones:

- $\Phi_u=0$
- $C_u=q_u/2$

Al ser $\Phi_u=0$, el término $N_\gamma=0$, por lo que no aporta ninguna resistencia a la presión de hundimiento. Además, al tratarse de una arcilla normalmente consolidada el valor de la cohesión sin drenaje es muy pequeño.

En el cálculo a corto plazo para terrenos arcillosos blandos $N_q=1$ y $N_c=\pi+2$, de tal forma que la expresión a calcular es la siguiente:

$$q_h = 15 \cdot (\pi+2) + (20 \cdot 8,5) \cdot 1 + 0 = 247,12 \text{ KN/m}^2$$

Este cálculo se realiza con los valores obtenidos del anejo geotécnico, señalados a continuación:

- $\gamma=20\text{KN/m}^3$
- $C_u=15 \text{ KPa}$
- $\Phi_u= 7^\circ$
- $C'=3 \text{ KPa}$
- $\Phi'= 27^\circ$

También es importante destacar que por exigencias geométricas la losa está situada a una profundidad de 7,1 m desde la superficie, es decir, la cara inferior de la losa está a la cota -7,1 m.

En las siguientes imágenes se puede apreciar la distribución en planta de los sótanos de los del aparcamiento subterráneo, además, se muestra donde se sitúa la estructura y el vaso de la piscina.

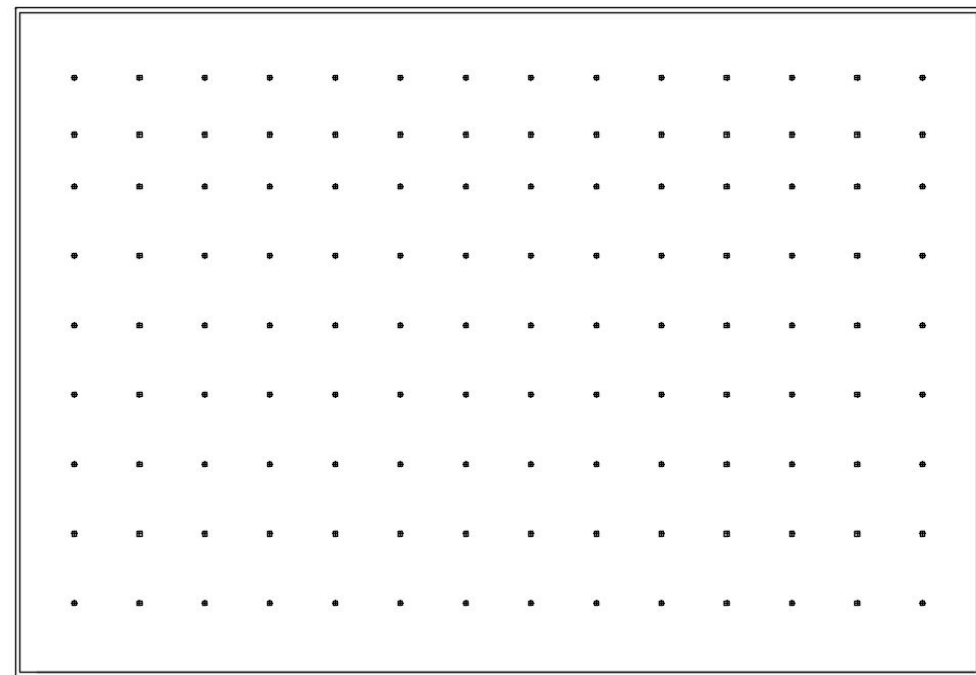


Imagen 7. Distribución en planta sin estructura de piscina. Fuente: Propia

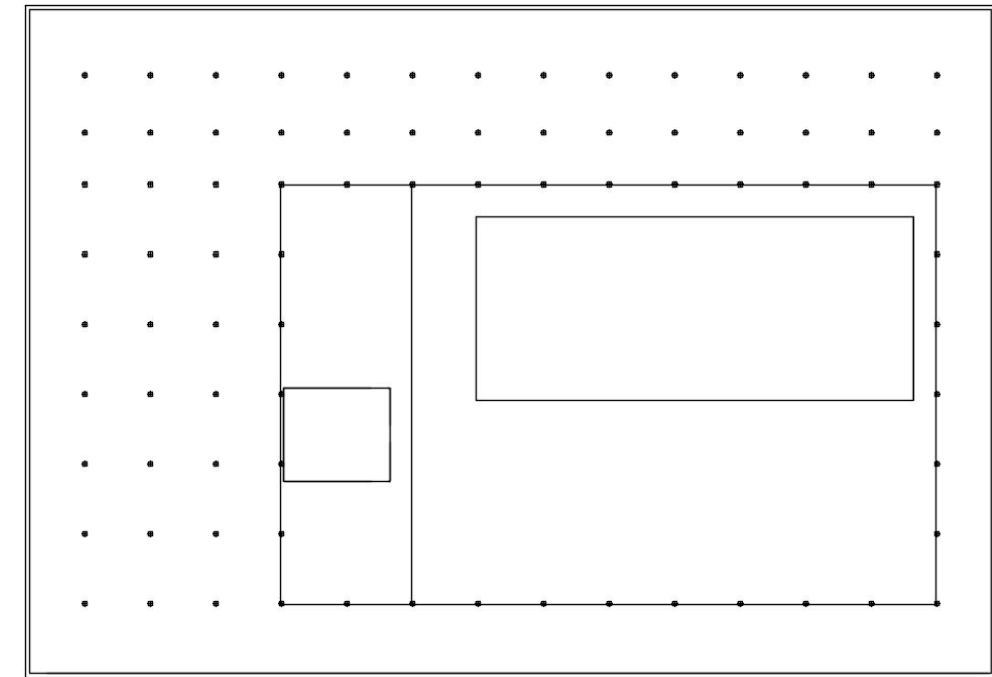


Imagen 8. Distribución en planta con estructura piscina. Fuente: Propia

El cálculo de las cargas transmitidas se ha realizado mediante una estimación, puesto que hasta que no se realice el cálculo estructural no se conocen las cargas con exactitud.

En las siguientes tablas se muestra la estimación de cargas:

PILAR		Y																						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
X	1	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10	1-11	1-12	1-13	1-14	1-15	1-16	1-17	1-18	1-19	1-20	1-21	1-22	1-23
	2	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10	2-11	2-12	2-13	2-14	2-15	2-16	2-17	2-18	2-19	2-20	2-21	2-22	2-23
	3	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9	3-10	3-11	3-12	3-13	3-14	3-15	3-16	3-17	3-18	3-19	3-20	3-21	3-22	3-23
	4	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6	4-7	4-8	4-9	4-10	4-11	4-12	4-13	4-14	4-15	4-16	4-17	4-18	4-19	4-20	4-21	4-22	4-23
	5	5-1	5-2	5-3	5-4	5-5	5-6	5-7	5-8	5-9	5-10	5-11	5-12	5-13	5-14	5-15	5-16	5-17	5-18	5-19	5-20	5-21	5-22	5-23
	6	6-1	6-2	6-3	6-4	6-5	6-6	6-7	6-8	6-9	6-10	6-11	6-12	6-13	6-14	6-15	6-16	6-17	6-18	6-19	6-20	6-21	6-22	6-23
	7	7-1	7-2	7-3	7-4	7-5	7-6	7-7	7-8	7-9	7-10	7-11	7-12	7-13	7-14	7-15	7-16	7-17	7-18	7-19	7-20	7-21	7-22	7-23
	8	8-1	8-2	8-3	8-4	8-5	8-6	8-7	8-8	8-9	8-10	8-11	8-12	8-13	8-14	8-15	8-16	8-17	8-18	8-19	8-20	8-21	8-22	8-23
	9	9-1	9-2	9-3	9-4	9-5	9-6	9-7	9-8	9-9	9-10	9-11	9-12	9-13	9-14	9-15	9-16	9-17	9-18	9-19	9-20	9-21	9-22	9-23
	10	10-1	10-2	10-3	10-4	10-5	10-6	10-7	10-8	10-9	10-10	10-11	10-12	10-13	10-14	10-15	10-16	10-17	10-18	10-19	10-20	10-21	10-22	10-23
	11	11-1	11-2	11-3	11-4	11-5	11-6	11-7	11-8	11-9	11-10	11-11	11-12	11-13	11-14	11-15	11-16	11-17	11-18	11-19	11-20	11-21	11-22	11-23
	12	12-1	12-2	12-3	12-4	12-5	12-6	12-7	12-8	12-9	12-10	12-11	12-12	12-13	12-14	12-15	12-16	12-17	12-18	12-19	12-20	12-21	12-22	12-23
	13	13-1	13-2	13-3	13-4	13-5	13-6	13-7	13-8	13-9	13-10	13-11	13-12	13-13	13-14	13-15	13-16	13-17	13-18	13-19	13-20	13-21	13-22	13-23
	14	14-1	14-2	14-3	14-4	14-5	14-6	14-7	14-8	14-9	14-10	14-11	14-12	14-13	14-14	14-15	14-16	14-17	14-18	14-19	14-20	14-21	14-22	14-23
	15	15-1	15-2	15-3	15-4	15-5	15-6	15-7	15-8	15-9	15-10	15-11	15-12	15-13	15-14	15-15	15-16	15-17	15-18	15-19	15-20	15-21	15-22	15-23

Nz	Y																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
X	1	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08
	2	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08
	3	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08
	4	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08
	5	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08
	6	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08
	7	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08
	8	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08
	9	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08
	10	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	1449,00	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08
	11	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	1900,82	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08
	12	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08
	13	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08
	14	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08
	15	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08	869,08

Como se muestra en la Imagen 9 la rama de hinchamiento del material tiene una pendiente aproximadamente nula, por lo que se puede concluir que en el terreno no se va a producir un hinchamiento apreciable.

[illegible]
$$V = (0,5 \cdot 110 \cdot 76) \cdot 21 + (2,2 \cdot 110 \cdot 76) \cdot 21 + (2,1 \cdot 110 \cdot 76) \cdot 20 + (2,3 \cdot 110 \cdot 76) \cdot 20$$
