



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ETS INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS



# Estudio de soluciones para la ejecución del recinto subterráneo de un aparcamiento en la calle Valencia, nº 30 de Sedaví (Valencia)

MEMORIA

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Titulación: Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Curso: 2017/2018

*Valencia, mayo de 2018*

Alumno: Muñoz Contell, José

Tutora: Garrido de la Torre, María Elvira

Cotutor: Molina Cobos, Casimiro



## ÍNDICE

<b>1. ANTECEDENTES.....</b>	<b>3</b>
1.1. LOCALIZACIÓN .....	3
1.2. OBJETIVO Y ALCANCE .....	4
1.3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	4
1.4. DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA.....	4
1.5. SOFTWARE UTILIZADO .....	4
<b>2. MARCO GEOLÓGICO .....</b>	<b>5</b>
2.1. GEOLOGÍA GENERAL.....	5
2.1.1. Lito-estratigrafía .....	5
<b>3. OTROS ESTUDIOS.....</b>	<b>6</b>
3.1. CONDICIONES HIDROGEOLOGICAS .....	6
3.2. CONDICIONES SÍSMICAS.....	7
<b>4. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA .....</b>	<b>8</b>
4.1. CAMPAÑA GEOTÉCNICA. RECONOCIMIENTOS Y ENSAYOS.....	8
4.1.1. Columna estratigráfica .....	9
4.2. ANÁLISIS DE DATOS.....	10
4.2.1. Corte estratigráfico definitivo .....	10
4.2.2. Corrección del número de golpes <i>NSPT</i> .....	11
4.3. PARAMETRIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL TERRENO.....	11
<b>5. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS .....</b>	<b>12</b>
5.1. PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES.....	12
5.1.1. Excavación en talud.....	12
5.1.2. Muros pantalla .....	13
5.1.3. Tablestacas .....	17
5.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS .....	20
5.2.1. Preselección.....	20
5.2.2. Cálculos adicionales: Muro pantalla.....	21
5.2.3. Diseño de anclajes.....	22
5.2.4. Valoración económica.....	22
5.2.5. Criterios finales de elección .....	23
<b>6. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN RECOMENDADA .....</b>	<b>24</b>
6.1. ANÁLISIS Y ESTUDIO DEL REBAJE DEL NIVEL FREÁTICO.....	24
6.2. SOLUCIÓN RECOMENDADA .....	24
6.3. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.....	28
<b>7. RESUMEN Y CONCLUSIÓN.....</b>	<b>34</b>

### ANEJOS

Anejo nº 1: Estudio geológico – geotécnico.

Anejo nº 2: Estudio de alternativas.

Anejo nº 3: Valoración económica.

Anejo nº 4: Planos.

Anejo nº 5: Agotamiento del nivel freático.

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1. LOCALIZACIÓN

El presente Trabajo Final de Máster (TFM) consiste en el estudio de soluciones para la ejecución del movimiento de tierras necesario para la excavación de un solar hasta la profundidad correspondiente a dos sótanos que se emplearán como estacionamiento subterráneo de vehículos, en una parcela situada en la localidad de Sedaví (Valencia), concretamente entre las calles Valencia, Sagunt, Alpuente y Salvador Giner.



Ilustración 1: Localización de la zona de actuación. Fuente: Google Maps y elaboración propia

El proyecto inicial para este solar contempla la construcción de un Centro Sociocultural promocionado por el Ayuntamiento que cuenta con dos sótanos para aparcamiento. La parcela tiene una superficie total de 2.616,26 m<sup>2</sup> y se encuentra rodeada de edificios próximos que condicionarán el método de excavación a utilizar para evitar daños estructurales y/o movimientos en estos.

La parcela cuenta con un ancho de 48 metros, y una longitud de aproximadamente 59.20 m. La parcela se encuentra rodeada de viales, luego no existen condiciones de medianería. En el *Anejo nº 4: Planos*, se muestran con mayor precisión las dimensiones del recinto.

Además de los dos sótanos, se construirán distintas edificaciones a diferentes alturas:

- Edificio con planta baja y dos alturas (Para la Policía y Juez de Paz)
- Edificio con planta baja y una altura (Auditorio, Biblioteca y Holl)
- Planta baja y cinco alturas (Destinado para Actividades culturales)

La *ilustración 2* muestra la disposición de las diversas edificaciones con las alturas descritas anteriormente, la ejecución de estos edificios no influirá en el estudio de soluciones de la excavación.

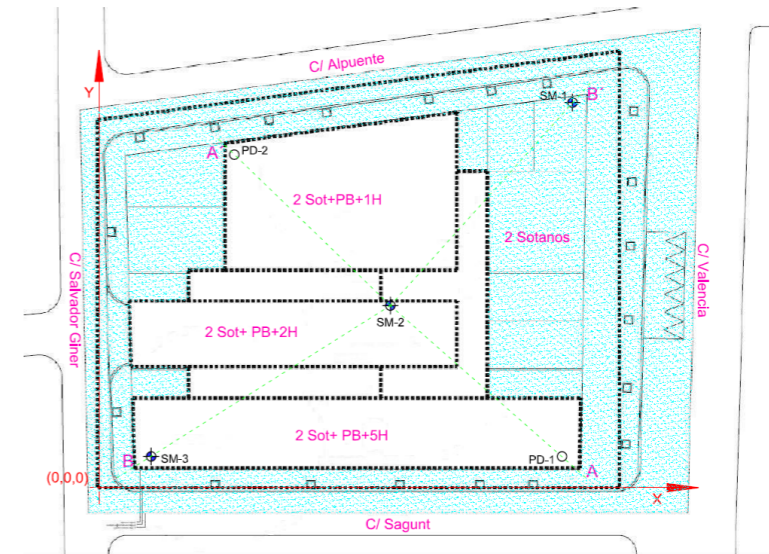


Ilustración 2: Disposición de las edificaciones. Fuente: Informe del estudio geotécnico de AT. CONTROL S.A.

Existen distintos motivos por los que se construirán los dos sótanos en la ubicación descrita. El primero de ellos es debido a que la parcela está exenta de edificaciones y tiene mayores dimensiones que las parcelas situadas en los alrededores, ahorrando así costes por demoliciones. Otro de los motivos, es que se encuentra situada en una zona donde existen edificios con planta baja más 5 alturas sin sótano, de manera que, la construcción de estos sótanos de carácter público, tiene el objetivo de mejorar la disponibilidad de aparcamiento en esta región de la localidad. Por último, la parcela en la que se prevé la actuación, ya es utilizada por los vecinos como aparcamiento habitual en superficie, por la necesidad ya comentada.



Ilustración 3: Vista de la parcela (Aparcamiento de vehículos habitual). Fuente: Google Earth



## 1.2. OBJETIVO Y ALCANCE

El principal objetivo de este estudio de soluciones es comparar las distintas posibilidades para la excavación del terreno y la elección de la opción más eficiente de todas ellas, analizando tanto aspectos técnicos y constructivos, como económicos.

Se definirá y diseñará de manera estimada el proceso de agotamiento del agua freática mediante bombeo de la solución recomendada. El rebaje del nivel freático será de vital importancia para poder excavar en seco hasta la profundidad deseada y construir los elementos necesarios.

En cuanto al alcance del estudio, se plantearán varias alternativas para el proceso de excavación y sostenimiento del terreno y se realizará el cálculo de las alternativas técnica y económicamente más favorables para concluir con la elección de la solución óptima.

Para finalizar, se detallará el procedimiento constructivo de la solución elegida y se realizará una valoración económica de la misma, teniendo en cuenta excavaciones, agotamiento del nivel freático...

## 1.3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para la elección de la solución más eficiente y constructivamente posible, se analizará primero el tipo de terreno y los distintos problemas que puede presentar este, observando el estudio geotécnico y los distintos ensayos realizados en la zona de actuación.

En este contexto, la metodología a seguir debe contemplar un estudio básico del marco geológico, analizando la geología general y otros estudios en la zona de actuación para posteriormente realizar un análisis pormenorizado de los parámetros geomecánicos de cada uno de los estratos del terreno que se verán afectados por el movimiento de tierras. Para esto último, se contará de base con el estudio geotécnico realizado para esta obra.

Una vez caracterizado el terreno se estudiarán las distintas alternativas de excavación y/o contención del terreno.

En primera instancia y en base a criterios técnicos se descartarán algunas alternativas para, posteriormente estudiar con más detalle las que hayan superado este primer descarte.

Las alternativas que cumplan los requerimientos exigidos se compararán con criterios técnicos, económicos... Para finalmente escoger, de entre ellas, la más adecuada.

De la solución elegida se detallará su procedimiento constructivo y su valoración económica.

## 1.4. DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA

Para el desarrollo del estudio de soluciones de la excavación, se parte de la documentación facilitada por la empresa ISCHEBECK IBÉRICA S.L. Esta documentación consiste en el estudio geotécnico del recinto a analizar y los planos que muestran las dimensiones de la parcela, así como la definición de la estructura y detalles constructivos de la obra.

Además, se cuenta con algún estudio del proceso del agotamiento de agua para su bombeo, necesario para rebajar el nivel freático.

El estudio geotécnico fue realizado por la empresa A.T. Control S.A. y cuenta con distintos sondeos y ensayos de reconocimiento del terreno realizados. Los resultados obtenidos en estos ensayos se encuentran en el *Anejo nº1: Estudio geológico-geotécnico*.

También se ha utilizado documentación relacionada con los mapas geológicos extraídos del Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Concretamente, la Hoja número 722 denominada "Valencia" del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000.

Durante el desarrollo del documento, se utilizarán las correspondientes normativas vigentes y recomendaciones, según sea el caso.

## 1.5. SOFTWARE UTILIZADO

A continuación, se adjunta un listado de las aplicaciones informáticas que se emplearán en este trabajo:

- DC-Pit (v.6.16), distribuido por DC Software GmbH (Alemania)
- DC-Slope (v.7.10), distribuido por DC Software GmbH (Alemania)
- Excel (Hojas de cálculo)
- AutoCAD

La aplicación **DC-Pit** se utilizará para el cálculo de tablestacas y muros pantalla, y el análisis de la resistencia del terreno, con el fin de obtener la distribución precisa de empujes aplicados sobre las pantallas y sus deformaciones, previo contraste mediante cálculos manuales sencillos. Además, permite el cálculo seccional de las pantallas siguiendo el Eurocódigo 3.

El programa **DC-Slope** servirá para calcular la estabilidad global para la alternativa de excavación en talud.

Estos programas informáticos alemanes consisten en un software centrado en la ingeniería del terreno y permiten la utilización de distintas normativas y recomendaciones.

Además, se utilizarán distintas hojas de cálculo para obtener el dimensionamiento del armado del muro pantalla y los distintos anclajes de cada alternativa.

Por último, se empleará el programa AutoCAD para elaborar los distintos planos que se incluirán en el *Anejo nº4: Planos*.

## 2. MARCO GEOLÓGICO

Para definir el marco geológico y geotécnico del terreno en la zona de actuación, primero se definirá de una forma más general el material que se puede encontrar en la zona y sus alrededores, y a continuación se detallará con más precisión el terreno que se muestra en la parcela.

### 2.1. GEOLOGÍA GENERAL

Para definir de una manera más general la geología existente en los alrededores de la localidad de Sedaví, se ha utilizado la Hoja número 722 denominada "Valencia" de la serie del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 proporcionada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en su página web. Este mapa con su leyenda se adjunta en el *Anejo nº1: Estudio geológico-geotécnico*, concretamente, en el *Apéndice: Campaña geotécnica. Reconocimientos y ensayos*.

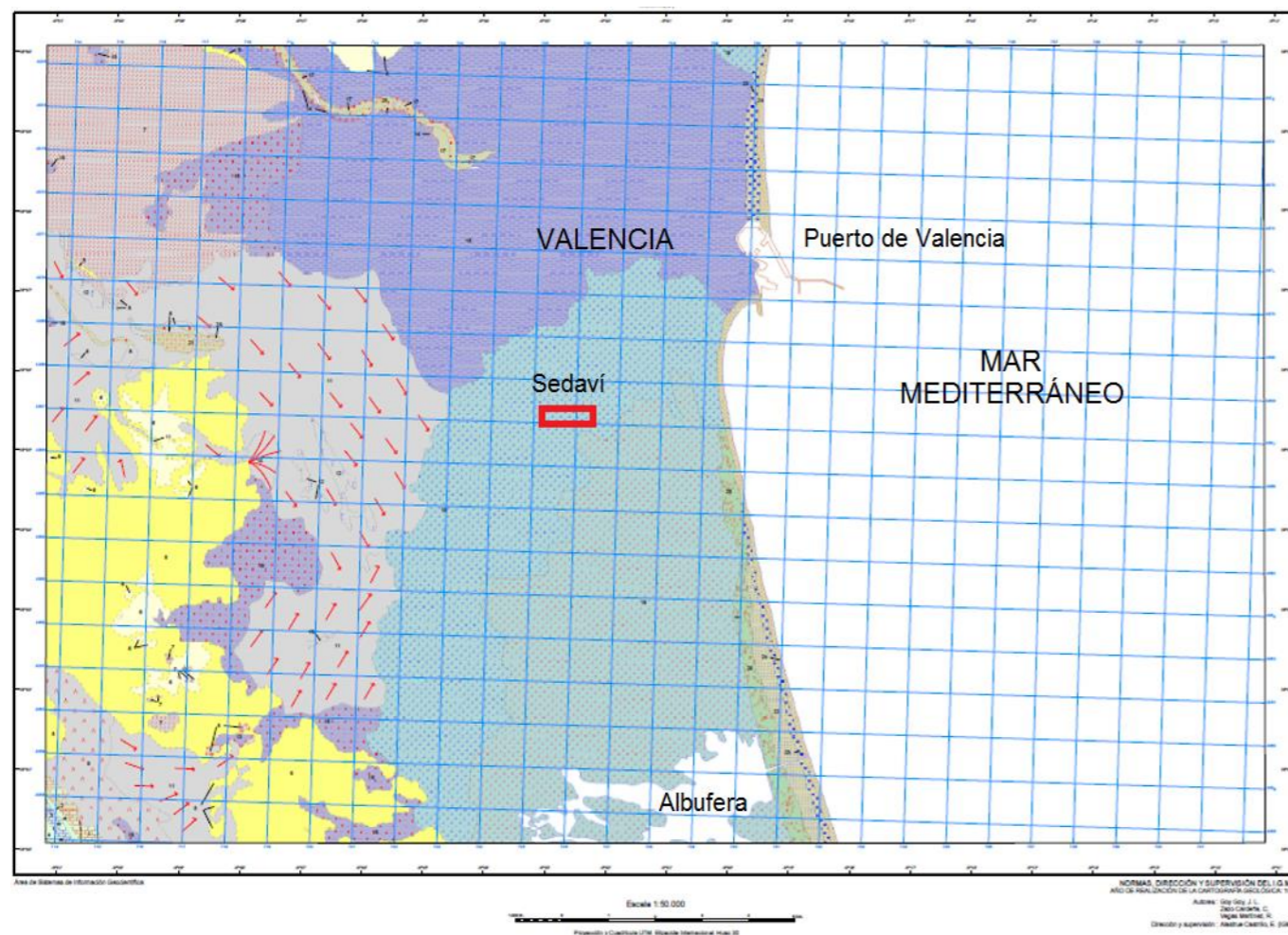


Ilustración 4: Mapa geológico de la Hoja de Valencia. Fuente: Hoja 722 del Mapa Geológico de España del IGME a escala 1:50.000

El rectángulo dibujado en color rojo marca la zona donde está situada la localidad de Sedaví.

Tal y como indica la memoria asociada a la Hoja 722 del IGME, prácticamente toda la zona pertenece a una amplia depresión morfológica de origen tectónico complejo, denominada "Huerta de Valencia".

#### 2.1.1. Lito-estratigrafía

Desde una visión general, en el esquema estratigráfico de la Hoja de Valencia se muestran tres grupos principales de materiales.

- Materiales del Cretácico Superior. Los materiales indicados en el rectángulo de color verde.
- Materiales del Terciario Superior. Los materiales indicados en el rectángulo de color amarillo.
- Materiales del Cuaternario. Los materiales indicados en el rectángulo de color violeta.

En el mapa geológico se observa que los materiales más abundantes y que están más próximos a la zona de actuación son los materiales del Terciario Superior (Indicados de color amarillo) y los materiales del Cuaternario (Indicados de color violeta, marrón claro y verde oscuro).

Como los materiales del Cretácico Superior afloran en una esquina de la hoja y se encuentran muy lejos de la zona de estudio tendrán poca importancia y simplemente se mencionarán.

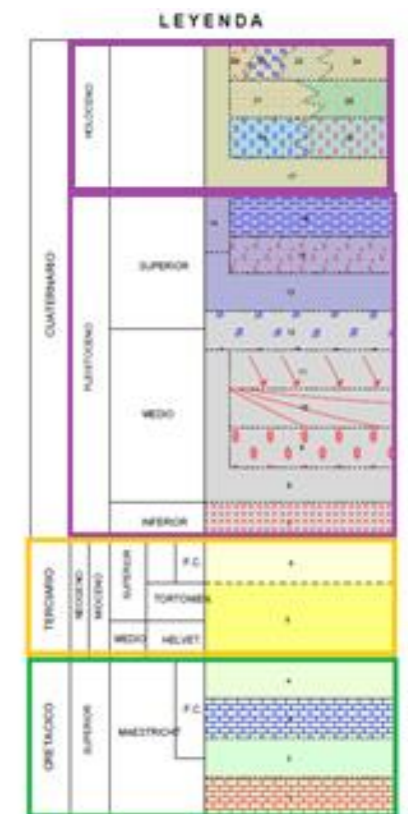


Ilustración 5: Esquema Estratigráfico. Fuente: IGME, Hoja 722 del Mapa geológico de España.

#### Materiales del Cretácico Superior

Estos materiales no abundan en esta Hoja aflorando por el Sud - Oeste donde se diferencian cuatro niveles litológicos:

- Calizas con nódulos de sílex.
- Margas blancas.
- Calcarenitias ligeramente pisolíticas
- Margas grises

Se tratan de los niveles más bajos de la Hoja asignados al Maastrichtiense, donde los dos niveles superiores del Cretácico Superior se clasifican en facies Garúmnica.

### Materiales del Terciario

Los materiales del Terciario, indicados de color amarillo, afloran también en la zona suroccidental y occidental de la Hoja, extendiéndose en mayor proporción que los materiales del Cretácico superior.

Estos afloramientos están cubiertos por capas de vegetación o también por edificaciones pertenecientes al Neógeno, donde se puede distinguir dos facies principales que forman el Mioceno Superior:

- La serie inferior, areno-arcillosa con niveles calcáreos.
- La serie superior, con calizas lacustres.

La serie inferior está formada por areniscas limosas, limolitas y arcillas calcáreas. Tienen un color ocre muy claro a rojizo. Puntualmente pueden existir niveles bioclásticos configurados por la concentración de restos de conchas.

A medida que se avanza hacia la parte superior de la estratificación, se percibe un aumento del tamaño de grano, con niveles de areniscas gruesas. En estos niveles pueden aparecer costras ferruginosas muy compactas de pequeño espesor.

En cuanto a la serie superior, es calcárea, formada por micritas y biomicritas recristalizadas que pasan a esparita con un espesor entre unos 10 y 15 metros. Presenta una mala estratificación, ya que existen oquedades y lentejones arcilloso-margoso.

### Materiales del Cuaternario

Los materiales del Cuaternario tienen una gran importancia, debido a que están extendidos en casi toda la Hoja y también por la diversidad de sus formaciones.

Se pueden apreciar tres tipos de depósitos:

- *Depósitos continentales* (Indicados de color gris claro)

Los depósitos continentales están formados por costras, depósitos de pie de monte, conos de deyección, mantos de arroyada antiguos, mantos de arroyada modernos y terrazas. Es decir, consisten en terrenos formados por arcillas rojas y algunas costras formadas por calizas o arcillas cementadas.

- *Depósitos marinos* (Indicados de marrón claro)

Estos depósitos están formados principalmente por arenas finas formando una franja en la línea de costa. Forman parte de materiales del Holoceno.

- *Depósitos mixtos (Continental-marinos)* (Indicados de color morado y verde oscuro)

Por último, los depósitos mixtos están formados por limos de inundación, limos pardos o depósitos de relleno pertenecientes de la Albufera y dunas que forman cordones litorales encerrando esta.

En los tres tipos de depósitos ya nombrados se muestra una capa superficial de encostramiento con formación de nódulos calcáreos.

Como la localidad de Sedaví se encuentra en una zona cercana a la Albufera, los materiales existentes en esta consisten en unos limos pardos o depósitos de rellenos, indicados de color verde, que corresponden con los depósitos mixtos comentados anteriormente. Es decir, observando desde un punto de vista general, se puede decir que es muy probable la existencia de arcillas o limos en la zona de actuación.

En los siguientes apartados se analizarán los sondeos ejecutados generando un corte estratigráfico con las características de cada material para el cálculo de las distintas alternativas.

## 3. OTROS ESTUDIOS

En este apartado se estudiarán las condiciones y las características hidrogeológicas, además de las condiciones sísmicas para determinar si pueden afectar a las alternativas de estudio.

### 3.1. CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS

La localidad de Sedaví se encuentra en la unidad Hidrogeológica número 25, La Plana de Valencia Norte, tal y como indica la Confederación Hidrográfica del Júcar.

La Plana de Valencia tiene un área total de 1.300 km<sup>2</sup> comprendida entre la localidad de Cullera y Puzol, contando la zona Norte y la del Sud.

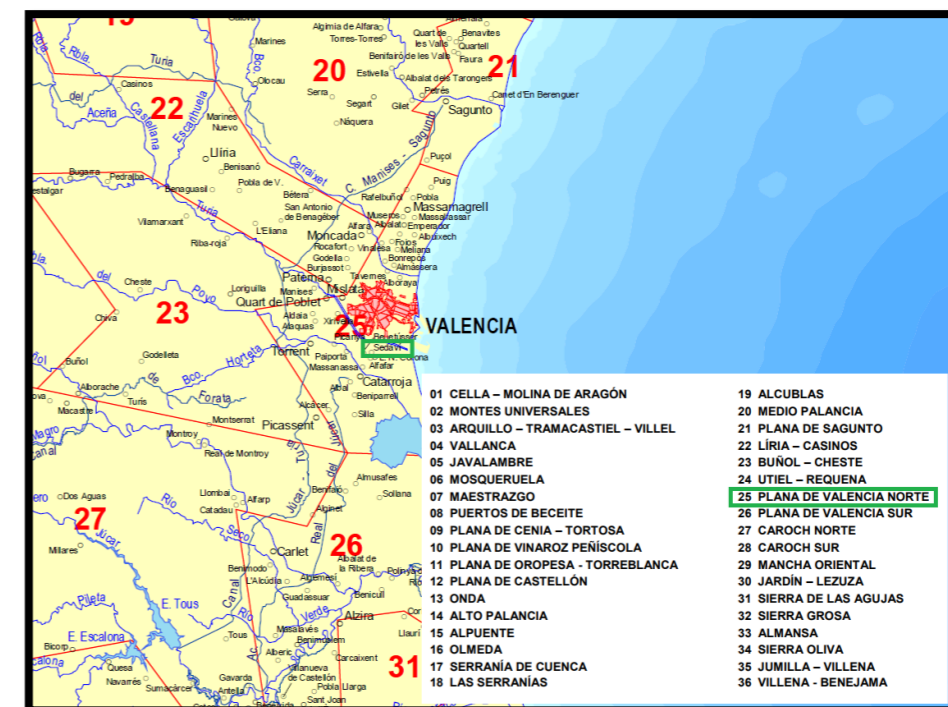


Ilustración 6: Unidades Hidrogeológicas. Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar y Elaboración propia.

El acuífero de la Plana de Valencia se puede diferenciar en dos capas. Una superior, de espesor máximo de 200 m, formada por materiales detríticos cuaternarios, intercalados en una formación limo-arcilloso y calizas lacustres del Mioceno terminal en zonas puntuales. Otra inferior con intercalaciones bioclásticas donde predominan las formaciones margo-arcillosa con un espesor en la vertical de 660 m, haciendo de sustrato impermeable de la capa superior. Este segundo tramo tiene una elevada heterogeneidad y anisotropía.

**Características hidrogeológicas**

En este apartado se resumen las características hidrogeológicas de las distintas formaciones y analiza sus repercusiones en las condiciones constructivas de los terrenos.

Se analizan la permeabilidad de los materiales, las distintas características de los acuíferos y las condiciones de drenaje. Estos datos se encuentran en el mapa geotécnico general de Valencia Hoja 56 del IGME escala 1:400.000, y en una ficha resumen, recogiendo las características hidrogeológicas fundamentales de cada unidad de clasificación de 2º orden según áreas.

Indica que en el modelado de las arcillas pueden considerarse como un conjunto esencialmente impermeable, dado el alto grado de compresión de estos materiales en el terreno.

El drenaje es casi totalmente superficial (por escorrentía) y, por lo tanto, su eficacia condicionada por el relieve de la zona. En general, se trata de un drenaje aceptable, aunque algunas áreas llanas aparecen con cierta frecuencia.

Tal y como indica el mapa geotécnico general el término municipal de Sedaví se encuentra en una región de tipo I, en el área I1, es decir, con un drenaje deficiente y materiales impermeables.

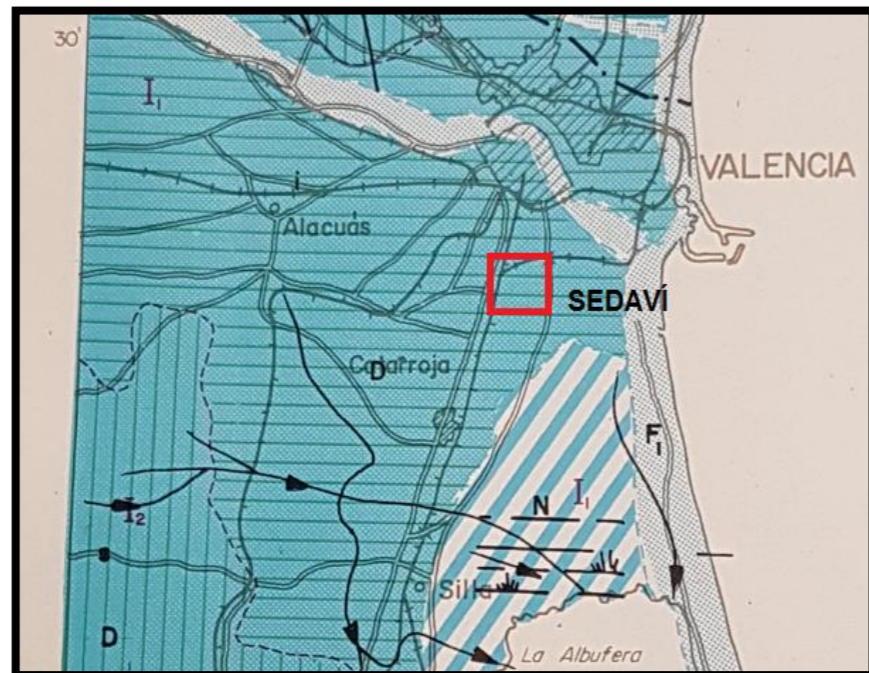


Ilustración 7: Mapa de las características hidrológicas de Valencia. Escala 1:400.000. Fuente: IGME

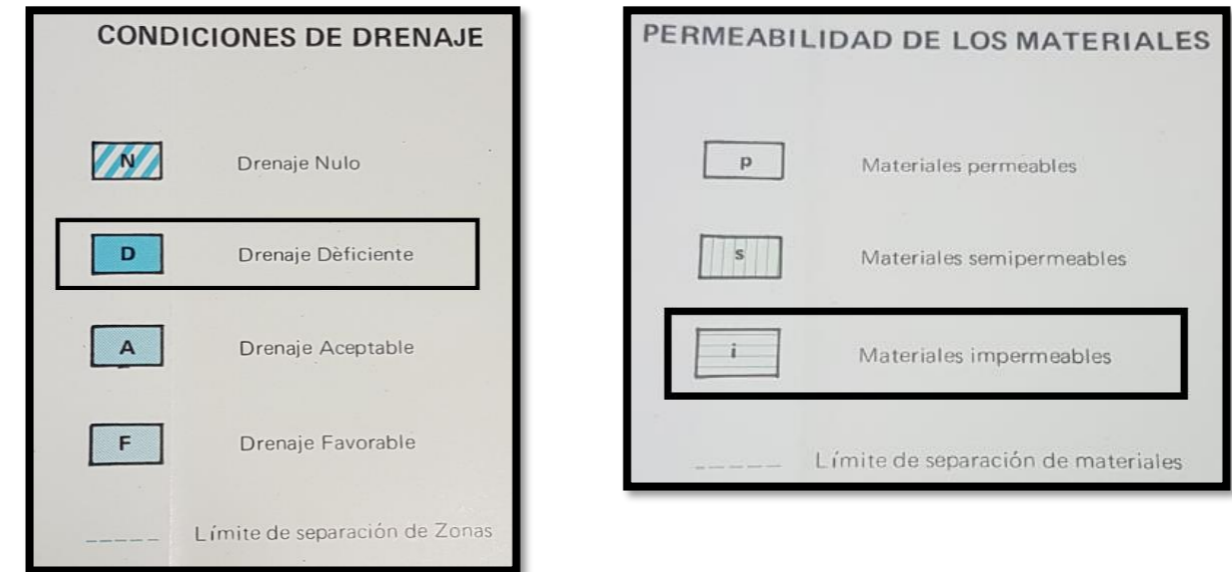


Ilustración 8: Leyenda de las condiciones de drenaje. Fuente: IGME

Según la ficha de características hidrológicas el drenaje por escorrentía es muy desfavorable, y el drenaje por infiltración es muy variable en cada punto. Los acuíferos son muy distintos en cantidad y naturaleza.

La permeabilidad de los materiales es sumamente heterogénea y la disposición anárquica. Existen muchas zonas donde se producen persistentes encharcamientos. En general, la permeabilidad mejora al acercarse a las sierras.

En dicha ficha, se acaba indicando que las condiciones de drenaje son muy variadas en esta zona, por lo tanto, se precisan de estudios puntuales para conocer mejor estas condiciones.

**3.2. CONDICIONES SÍSMICAS**

Tal y como indica la Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02, la población de Sedaví se encuentra en una zona donde según el mapa de peligrosidad sísmica tiene una aceleración básica de entre 0.04g y 0.08g.

En el anejo nº 1 de dicha norma indica que, concretamente en este municipio, la aceleración básica será de 0,07g con un coeficiente de contribución de K=1.

La norma clasifica una obra de importancia normal como aquella cuya destrucción por el terremoto pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio para la colectividad, o producir importantes pérdidas económicas, sin que en ningún caso se trate de un servicio imprescindible ni pueda dar lugar a efectos catastróficos.

Por tanto, la obra se clasificará como de importancia normal.

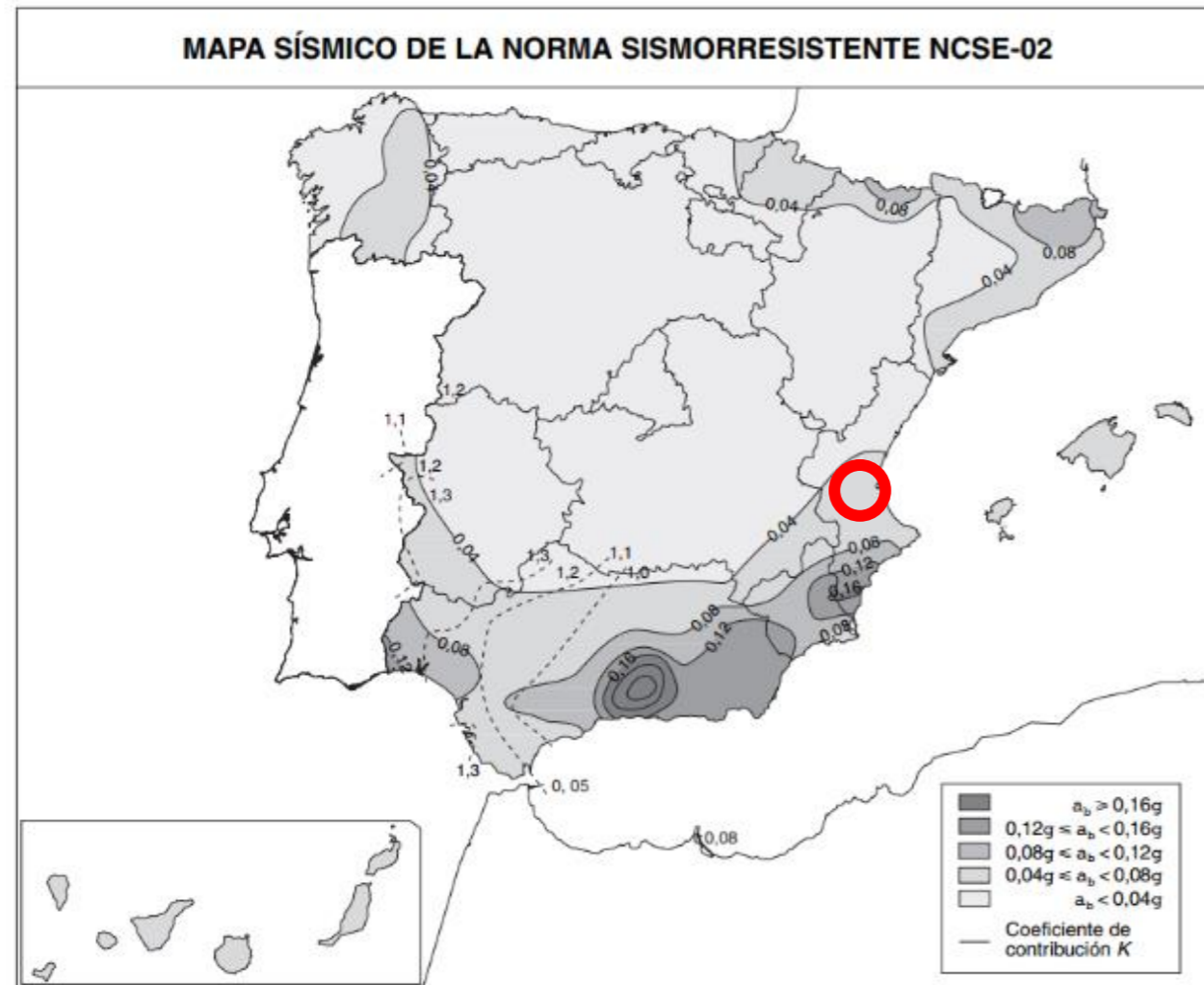


Ilustración 9: Mapa de peligrosidad sísmica

No se han tenido en cuenta los efectos dinámicos del sismo en los cálculos que se muestran en el presente trabajo puesto que la norma indica que no será de aplicación en las construcciones de importancia normal con pórticos arriostrados entre sí cuando la aceleración sísmica básica sea inferior a 0,08g.

#### 4. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

En el presente apartado se definirán los parámetros resistentes del terreno según recomendaciones y ensayos realizados. Además, para poder ejecutar los cálculos de cada alternativa, se escogerá un corte estratigráfico común para todas ellas.

Este corte estratigráfico definitivo se escogerá observando los tres sondeos realizados, de manera que, combinando estos, se diseñará el corte más desfavorable. Es decir, los estratos con menor capacidad portante o con menor resistencia, se les asignará el mayor espesor de los tres sondeos realizados. De la misma forma, la cota del nivel freático será la que más cerca esté de la superficie en los tres sondeos explicados anteriormente.

Con la geología descrita en el apartado anterior se analizará con mayor precisión los ensayos ejecutados y se realizarán las correcciones oportunas.

##### 4.1. CAMPAÑA GEOTÉCNICA. RECONOCIMIENTOS Y ENSAYOS

La campaña geotécnica ha sido diseñada por la empresa A.T. Control S.A. y cuenta con distintos sondeos y ensayos de reconocimiento del terreno. Los resultados obtenidos en estos se encuentran en el *Anejo nº1: Estudio geológico-geotécnico*. Con estos datos de entrada se valorarán los tipos de materiales y si son competentes.

En la campaña de investigación para la ejecución de los ensayos y reconocimientos del terreno, se han tenido en cuenta las disposiciones del Código Técnico de la Edificación, donde indica el número mínimo de sondeos, el porcentaje de sustitución por pruebas continuas de penetración, distancias máximas entre puntos y profundidades.

La campaña geotécnica se basa en cinco puntos de reconocimiento de los cuales, dos son ensayos de penetración dinámica (DPSH) y tres se tratan de sondeos mecánicos a rotación. La máxima profundidad alcanzada en estos puntos de reconocimiento ha sido de aproximadamente 30 metros.

##### - Penetraciones Dinámicas

Se ha alcanzado rechazo a estas profundidades:

PENETRACIÓN	PROFUNDIDAD (m)
PD-1	24,15
PD-2	24,47

Tabla 1: Profundidad de rechazo. Fuente: Anejo Geotécnico de AT. CONTROL

##### - Sondeos de reconocimiento

La profundidad a la que se ha alcanzado en estos sondeos se muestra en la tabla siguiente:

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)
SM-1	20,10
SM-2	30,60
SM-3	30,10

Tabla 2: Profundidad de los sondeos. Fuente: Anejo Geotécnico de AT. CONTROL



En la siguiente ilustración se observa la posición y la distribución de los sondeos y de las penetraciones dinámicas.

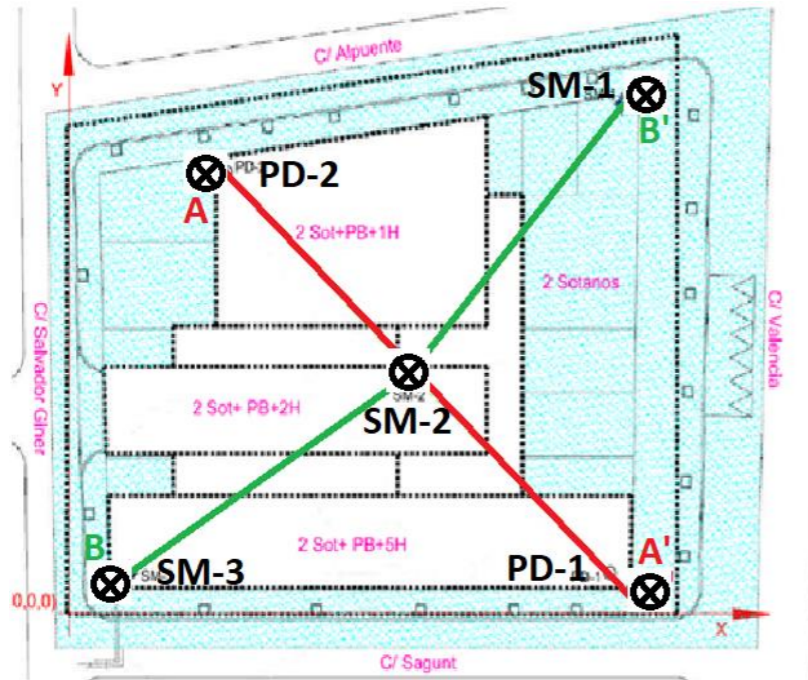


Ilustración 10: Distribución de los sondeos. Fuente: Anejo Geotécnico de AT. CONTROL y elaboración propia.

- Profundidad del nivel freático

En los tres sondeos de reconocimiento se ha encontrado el nivel freático a distinta cota.

SONDEO	PROFUNDIDAD DEL N.F.
SM-1	2,40 m
SM-2	2,20 m
SM-3	2,30 m

Tabla 3: Profundidades del N.F. Fuente: Anejo geotécnico de AT. CONTROL

- Toma de muestras inalteradas

En la perforación de los sondeos se han obtenido 27 muestras inalteradas mediante toma-muestras de pared gruesa.

- Ensayos S.P.T

Entre los tres sondeos, se han realizado 14 ensayos Standard de Penetración (S.P.T., Standard Penetration Test).

- Ensayos de laboratorio

Las muestras obtenidas en los sondeos se han analizado en el laboratorio siguiendo las normas correspondientes.

GRUPO	ENSAYOS BÁSICOS		NORMATIVA
	ENSAYO	Nº	
IDENTIF. Y CLASIFICACIÓN	Granulometría	14	UNE 103.101/95
	Límite líquido	14	UNE103.103/94
	Índice de plasticidad	14	UNE103.104/93
VOLUMÉTRICOS	Humedad	35	UNE103.300/93
	Densidad de un suelo	1	UNE 103.301/94
	Densidad relativa de partículas	3	UNE 103.302/94
MECÁNICOS	Compresión simple	6	UNE 103.400/93
	Corte directo	1	UNE 103.401/98
	Edómetro	2	UNE 103.405/94
QUÍMICOS	Contenido en sulfatos (suelo)	1	EHE Anejo 5
	Agresividad agua	1	EHE Anejo 5

Tabla 4: Ensayos de laboratorio. Fuente: Anejo Geotécnico de AT. CONTROL

En el Anejo nº1: Estudio geológico-geotécnico se explica el procedimiento de cada uno de los ensayos nombrados. Además, en el Apéndice: Campaña geotécnica. Reconocimientos y ensayos, se muestran los distintos sondeos ejecutados con sus respectivos ensayos de SPT y penetraciones dinámicas, además de la documentación fotográfica del terreno.

4.1.1. Columna estratigráfica

Para definir el corte estratigráfico se han analizado los tres sondeos realizados en la zona de actuación, dividiendo el terreno en dos estratos principales:

- Nivel I: Rellenos de arenas y gravas, y suelo vegetal.
- Nivel II: Arcilla limosa y arenosa.
  - o Subnivel IIa: Arcilla limosa y arenosa de baja compacidad:
  - o Subnivel IIb: Arcilla limosa y arenosa de compacidad media-alta:

A continuación, se muestran los cortes estratigráficos A-A' y B-B', señalados en la ilustración 11 y 12, que reflejan una aproximación del espesor de las capas de cada uno de los materiales. Además, se observan el número de golpes obtenidos en cada ensayo.

En estos cortes estratigráficos se observa una capa con un espesor de aproximadamente 1,00 metro, compuesto por arenas y gravas encostradas o cementadas en alguna zona de la parcela. En dicha capa, muestra un resultado de rechazo en los ensayos de SPT y golpes elevados en las penetraciones dinámicas.

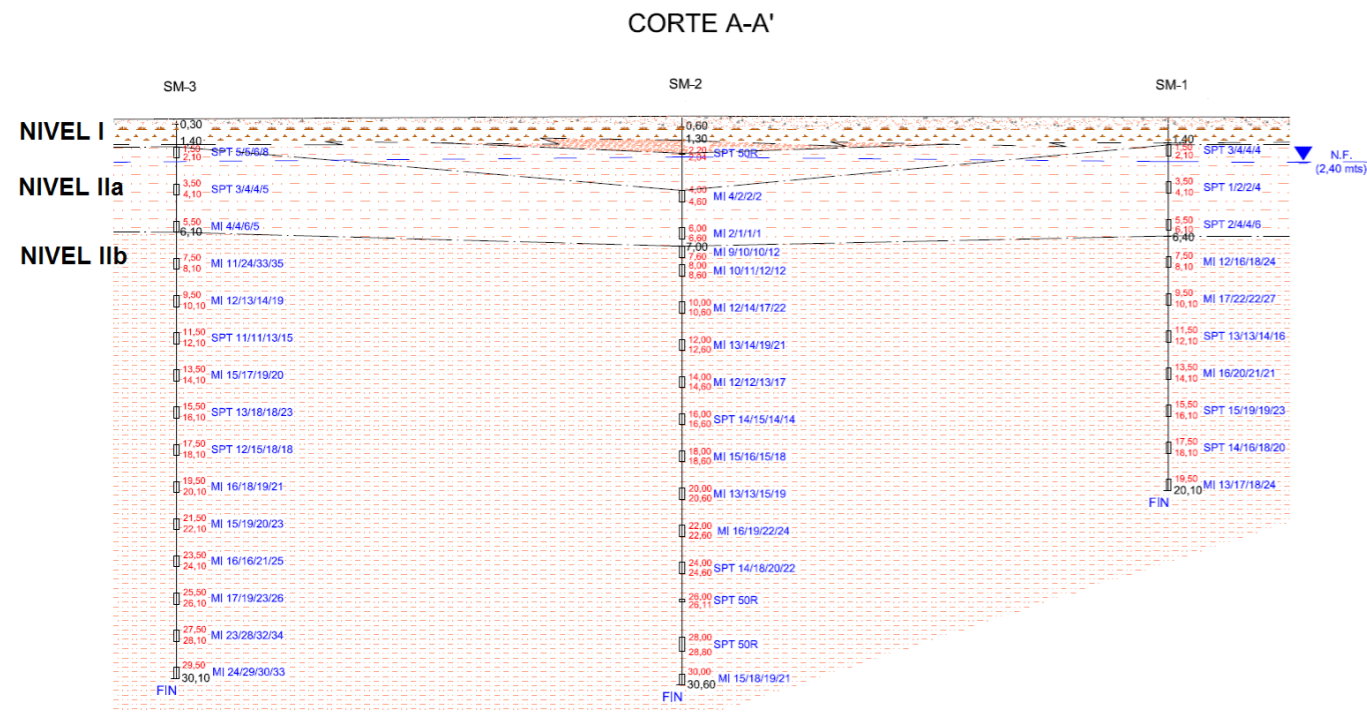


Ilustración 11: Corte estratigráfico A-A'. Fuente: Anejo Geotécnico de AT. CONTROL.

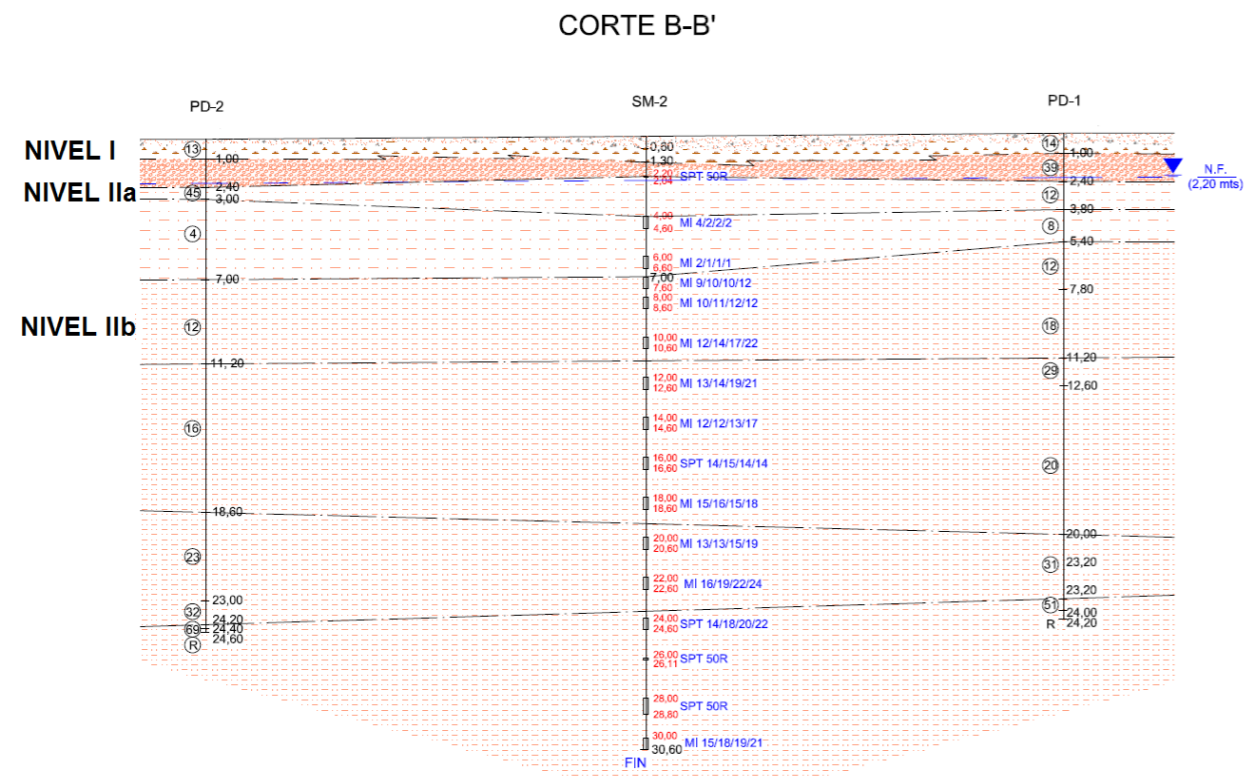


Ilustración 12: Corte estratigráfico B-B'. Fuente: Anejo Geotécnico de AT. CONTROL.

En cuanto al nivel freático se ha detectado entre los 2,20-2,40 metros de profundidad, respecto a la cota de embocadura de los sondeos. Desde el punto de vista del cálculo, para estar del lado de la seguridad se tomará que el nivel freático esté a la cota -2,20 metros, lo que supone mayor empuje del agua sobre la pantalla que contenga el terreno.

#### 4.2. ANÁLISIS DE DATOS

##### 4.2.1. Corte estratigráfico definitivo

Como corte estratigráfico definitivo a estudiar, se ha escogido el más desfavorable que se corresponde con el siguiente:

Estrato	Profundidad (m)
NIVEL I	De 0,00 a 1,40
NIVEL IIa	De 1,40 a 7,00
NIVEL IIb	> 7,00
NIVEL FREÁTICO	2,20

Tabla 5: Distribución de profundidades. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra el esquema definitivo del corte estratigráfico comentado:

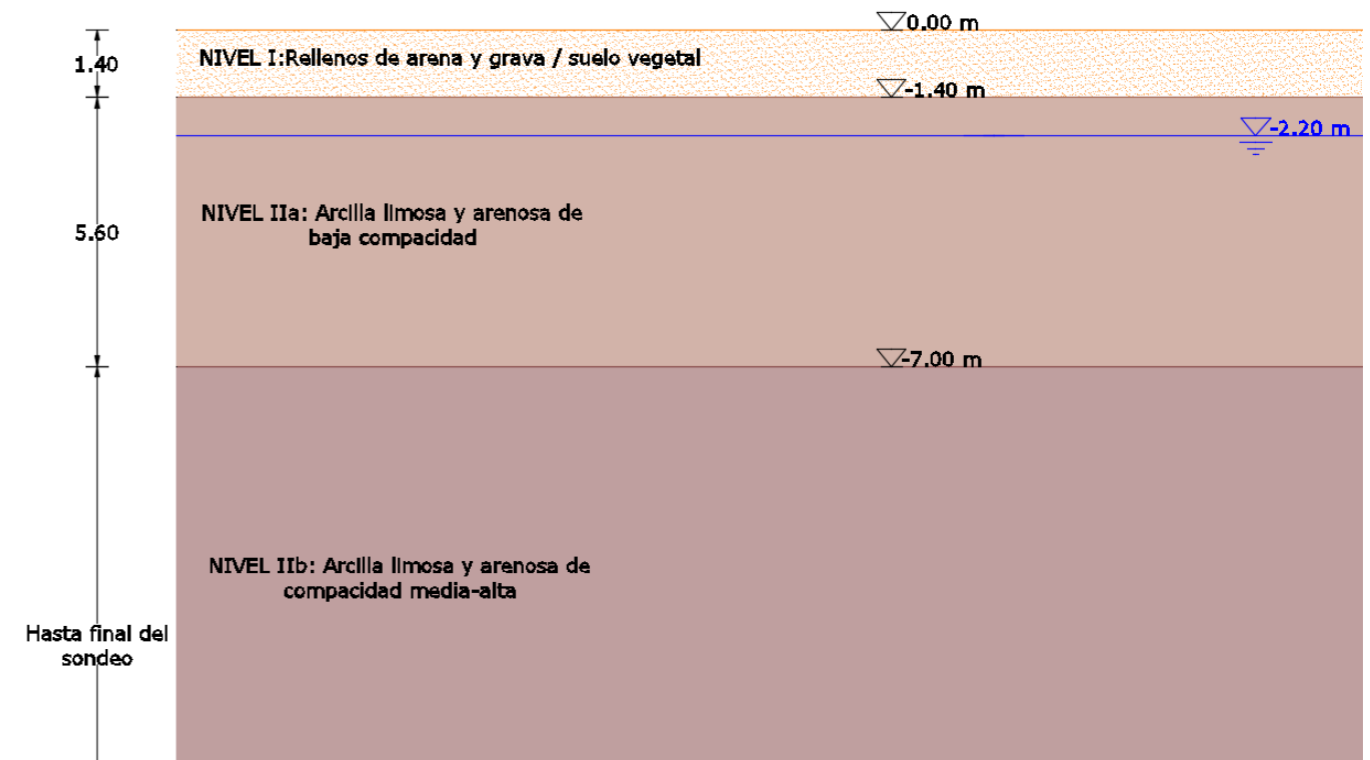


Ilustración 13: Corte estratigráfico definitivo. Fuente: Elaboración propia.



#### 4.2.2. Corrección del número de golpes $N_{SPT}$

Suele ser habitual que los resultados de los ensayos SPT no estén corregidos con respecto a la cota, presencia del nivel freático, rendimiento del equipo de golpeo, etc.

Para poder caracterizar el terreno asignándole a cada estrato los parámetros resistentes más cercanos a la realidad, en primer lugar, se corregirán y homogeneizarán los valores de golpeo, obteniendo los valores medios en cada estrato, necesarios para el cálculo.

##### Nivel I (Rellenos de arena y grava/suelo vegetal)

No se han realizado ensayos de golpeo en este estrato.

##### Nivel II (Arcilla limosa y arenosa).

- Subnivel IIa: Arcilla limosa y arenosa de baja compacidad.

N_30 'Media	6,6 ≈ 7
-------------	---------

- Subnivel IIb: Arcilla limosa y arenosa de compacidad media-alta.

N_30 'Media	11
-------------	----

Los cálculos realizados en cada estrato se encuentran en el *Apéndice: Campaña geotécnica. Reconocimientos y ensayos.*

#### 4.3. PARAMETRIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL TERRENO

Con la información disponible se han obtenido los siguientes parámetros geotécnicos de cada nivel estratigráfico:

- Peso específico
- Parámetros de resistencia al corte
- Deformabilidad
- Permeabilidad

La deformabilidad y permeabilidad no se calcularán para el primer nivel, debido a que no se tienen ensayos en este estrato, se trata de un terreno heterogéneo y tiene poco espesor y relevancia.

Los distintos procedimientos y correlaciones utilizadas para la obtención de los parámetros se muestran en el *Anejo nº2: Estudio geológico-geotécnico.*

#### TABLA RESUMEN

Parámetros geotécnicos	Nivel I	Nivel IIa	Nivel IIb
<b>Peso específico aparente (<math>\gamma_a</math>)</b> (KN/m <sup>3</sup> )	16,88	20,95	20,04
<b>Peso específico seco (<math>\gamma_d</math>)</b> (KN/m <sup>3</sup> )	15	18	16,88
<b>Peso específico saturado (<math>\gamma_{sat}</math>)</b> (KN/m <sup>3</sup> )	17,5	21.13	20,40
<b>Resistencia al corte sin drenaje (<math>c_u</math>)</b> (KPa)	0	41,25	88
<b>Ángulo de rozamiento (<math>\varphi'</math>)</b>	26	26	27
<b>Cohesión efectiva (<math>c'</math>)</b> (kPa)	0	20	22
<b>Módulo de deformación sin drenaje (<math>E_u</math>)</b> (MPa)	-	9,07	19,36
<b>Módulo de deformación efectivo (<math>E'</math>)</b> (MPa)	-	13,86	23,52
<b>Coefficiente de permeabilidad (<math>k</math>)</b> (m/s)	-	$6 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$

Tabla 6: Parámetros geotécnicos de cada nivel. Fuente: Elaboración propia.

## 5. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

Una vez descritos los distintos niveles y establecidos los parámetros geotécnicos correspondientes, se deben analizar las distintas alternativas posibles para acometer la excavación prevista de 7,75 metros de profundidad y poder realizar los trabajos de construcción dentro de la parcela con unas dimensiones de 59,20 metros de longitud y 48 metros de ancho. El perímetro a estudiar se indica en la *ilustración 14*, marcada en línea roja.

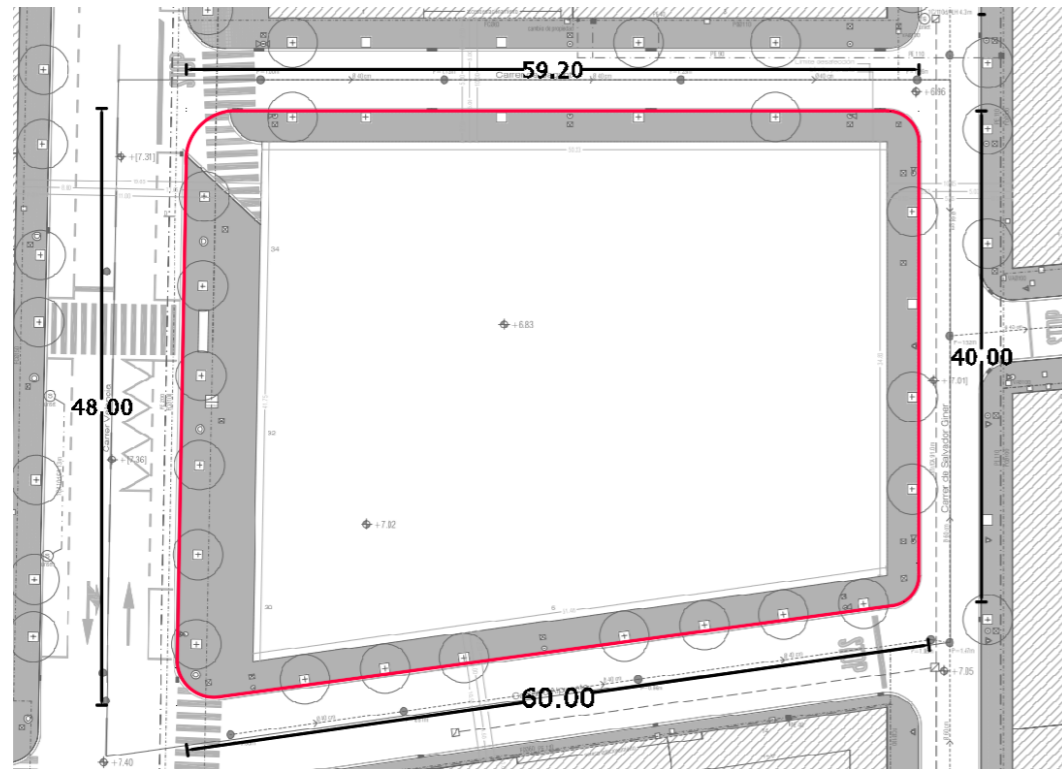


Ilustración 14: Dimensiones de la parcela. Fuente: Elaboración propia.

### 5.1. PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES

En este apartado, se plantearán las distintas posibilidades del proceso de excavación y contención del terreno y se analizará su viabilidad, debido a que cada una de las alternativas tendrá unas condiciones para poder ejecutarlas, en lo que se refiere a necesidades de espacio, afección a edificaciones cercanas a la excavación...

Además, se describirá el proceso constructivo de forma general de las alternativas más viables, y una vez hecha la comparación entre ellas, se definirá con más detalle la solución escogida.

El detalle de todos los cálculos al que se refiere este apartado se puede consultar en el *Anejo nº2: Estudio de alternativas*, concretamente, en el *Apéndice: Listados de cálculo*.

A continuación, se detallan las soluciones analizadas.

#### 5.1.1. Excavación en talud.

La primera de las alternativas propuestas consiste en realizar una excavación en talud, sin utilizar ningún tipo de entibación o sistema de contención.

Las características del terreno permiten sospechar que la posibilidad de realizar una excavación con un talud vertical sería inestable debido a que se trata de una excavación elevada de 7,75 metros de profundidad en un terreno arcilloso caracterizado con unos parámetros resistentes que impedirían la estabilidad de este.

Para certificar esta sospecha, se ha analizado la alternativa de excavar con un talud vertical mediante el programa informático **DC-Slope** calculando la estabilidad global del terraplén con un ángulo de 90°. Observando que el coeficiente de seguridad confirma lo argumentado anteriormente, se ha vuelto a calcular la estabilidad con distintos ángulos, como se muestra a continuación.

##### A) TALUD VERTICAL (90°)

El primer caso de cálculo ha sido el de excavar con un talud de 90°.

El resultado de introducir los parámetros geotécnicos resistentes del terreno al programa informático **DC-Slope** indica que sería inestable, obteniendo un valor de la inversa del coeficiente de seguridad de  $\mu = 1,65$ , superior al que indica el Eurocódigo 7 ( $\mu \leq 1$ ).

Por lo tanto, se verifica la anterior suposición. El talud sería inestable, y no se podría realizar una excavación con un talud vertical.

##### B) TALUD 45 GRADOS

El siguiente caso de cálculo consistiría en realizar el vaciado del solar excavado con un talud de 45° y con las mismas características del terreno y nivel freático.

La inversa del coeficiente de seguridad mínimo correspondiente al círculo de deslizamiento pésimo, con un talud de 45°, es de 0,84. Es decir, con este talud cumpliría con la recomendación indicada en el *Eurocódigo 7*.

Por lo tanto, la excavación sería estable con un talud de 45°. El problema principal, comentado anteriormente, será el espacio necesario para poder realizar la excavación y construir los sótanos pertinentes.

En la siguiente imagen, se puede observar una línea roja que delimita el perímetro de la parcela, y un sombreado que indica el espacio necesario para realizar una excavación de 7,75 metros con un talud de 45°.

Como muestra la *ilustración 15*, para poder excavar con un talud de 45° sería necesario invadir las calzadas contiguas y parte de las edificaciones vecinas. Por esta razón, se buscará el talud con el ángulo límite que cumpla el coeficiente de seguridad necesitando menor espacio de excavación.

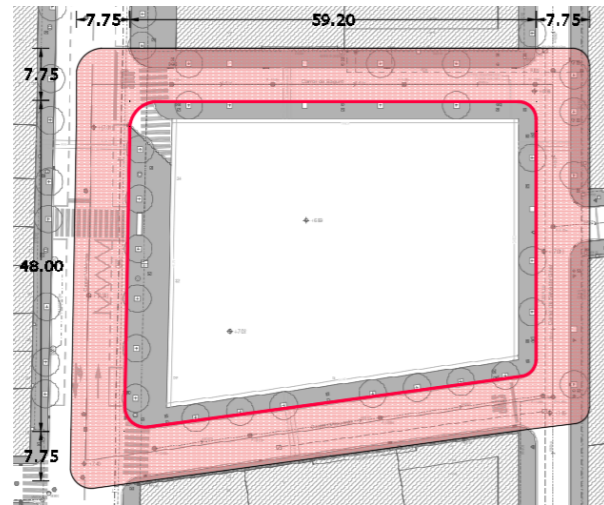


Ilustración 15: Dimensiones del talud a 45°. Fuente: Elaboración propia.

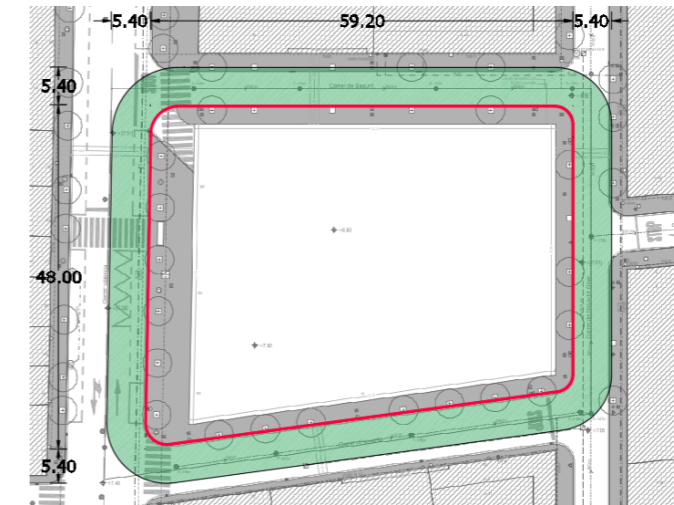


Ilustración 17: Espacio necesario con un talud de 55°. Fuente: Elaboración propia.

### C) TALUD 55 GRADOS

Finalmente, iterando con distintas inclinaciones de talud, el ángulo límite que cumple con el coeficiente de seguridad es de 55 grados, necesitando una distancia en horizontal de 5,40 metros.

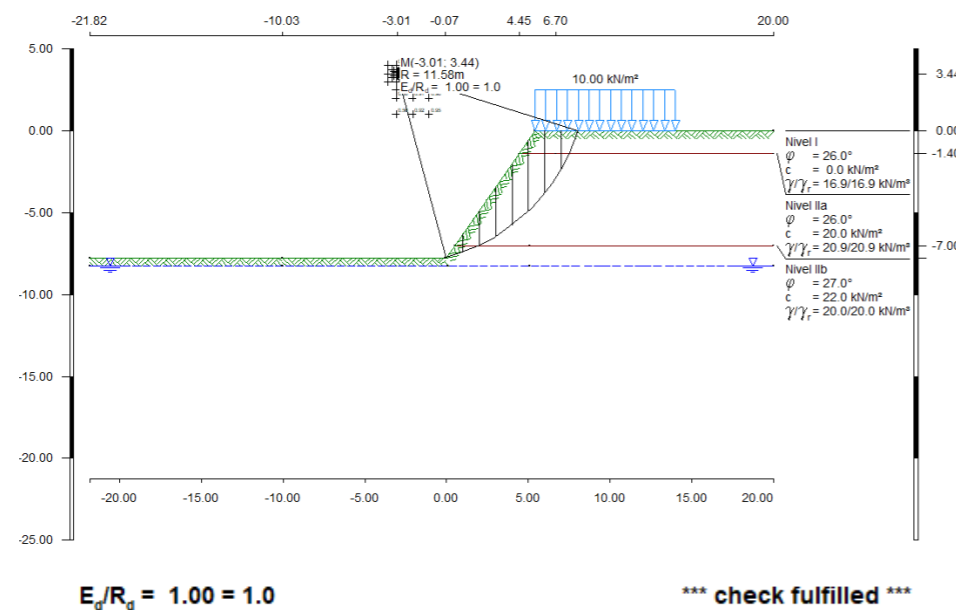


Ilustración 16: Talud de 55 grados. Fuente: DC-Slope y elaboración propia

El espacio necesario para la excavación en talud de 55 grados también hace imposible su ejecución, ya que invade los viales que rodean la parcela y, aunque no invade el espacio de las edificaciones cercanas, se acerca tanto a ellas que la excavación afectaría a las cimentaciones de los edificios pudiendo desestabilizar estos y producir esfuerzos o movimientos no deseados, por lo tanto, como conclusión se puede afirmar que esta alternativa es inviable por razones de espacio.

### 5.1.2. Muros pantalla

Puesto que la excavación sin contención parece descartada, una posible excavación con contención previa es la ejecución de muros pantalla. Se trata de estructuras de contención de tierras que se ejecutan cuando el terreno es inestable sin ningún tipo de sujeción, cuando se quiere reducir las deformaciones del terreno o disminuir la facilidad del paso del agua en el interior del recinto.

El muro pantalla de hormigón armado y el de tablestacas, ofrecen distintas posibilidades para solucionar el problema de la contención del terreno (ménsula, arriostrada, anclada...).

Primero se realizará un prediseño del muro pantalla de hormigón armado para cada una de las soluciones que ofrece este sistema (ménsula, arriostrada, anclada...), teniendo en cuenta las acciones a considerar. Este prediseño consistirá en obtener la longitud y canto necesario del muro que resista los empujes y, al mismo tiempo, sea una solución estable.

Para abordar las distintas alternativas de pantalla se van a utilizar diferentes procesos de cálculo dependiendo de la solución.

La ventaja de ejecutar el muro pantalla es la posible conexión posterior con los forjados, sin necesidad de construcción de un muro de sótano adicional, como sucede en el caso de pantallas de tablestacas.

En el cálculo de la estabilidad de las pantallas se han utilizado métodos de equilibrio límite. Esto implica tomar como hipótesis principal que el movimiento de la pantalla es suficientemente grande como para que se movilicen íntegramente los empujes límite activo y pasivo del terreno en el trasdós o intradós, dependiendo de las condiciones de deformación.

En primer lugar, se plantea la solución de pantalla en ménsula abordando el cálculo mediante el método simplificado de Blum, utilizándolo tanto para muros pantalla de hormigón armado, como para pantallas de tablestacas.

En segundo lugar, la solución planteada consiste en arriostrar la pantalla mediante un nivel de arriostramiento. En esta solución se ha empleado, por un lado, el método de pie libre mediante un cálculo manual sencillo (Método americano) y, por otro lado, el método de pie empotrado (Método europeo) mediante el programa informático DC-Pit. Además, se ha estudiado también la solución de pantallas con dos niveles de arriostramiento, con este último método.

De la misma forma, también se ha empleado el método europeo para plantear la solución de pantalla con uno y dos niveles de anclaje. Asimismo, la longitud mínima necesaria que deben tener los anclajes se ha obtenido con el método de Kranz.

Todos los métodos mencionados están definidos y explicados en el anejo del estudio de alternativas.

### A) MÉNSULA

La alternativa de elegir una solución en ménsula sería la más económica en el caso de que resultara una longitud de pantalla y de empotramiento asequible, debido a que no se necesitarían ningún tipo de arriostramiento o anclajes y podría aprovecharse para conectar los forjados a este muro, formando el muro de sótano definitivo. Es probable que la longitud de pantalla necesaria sea elevada con tanta excavación a realizar, es decir, una estructura muy robusta con excesiva longitud que reduciría el espacio dedicado para los sótanos y supondría un coste elevado por la cantidad de material necesario para su ejecución.

Para evaluar la alternativa, a continuación, se ha calculado la longitud de pantalla requerida con el programa informático DC-Pit y mediante "cálculos manuales".

#### Cálculo en ménsula ("cálculos manuales")

Para comparar los resultados obtenidos mediante el programa DC-Pit, se han realizado unos cálculos manuales.

Con los parámetros obtenidos del estudio geológico-geotécnico del terreno y los coeficientes de empuje activo ( $K_a$ ) y pasivo ( $K_p$ ) calculados en el Anejo nº2: *Estudio de alternativas*, se pueden extraer los empujes sobre la pantalla.

La distribución de empujes será como se muestra en la *ilustración 18*.

Finalmente, se ha obtenido la longitud necesaria bajo la excavación  $t$  y la añadida  $t'$ :

$$t = 8,38 \text{ m} \quad t' = 0,2 \cdot t = 0,2 \cdot 8,38 = 1,68 \text{ m}$$

Es decir, para que el muro pantalla pueda resistir los empujes descritos, tendrá que tener una longitud de 17,80 m.

$$\text{Longitud total} = 7,75 + 8,38 + 1,676 = 17,81 \text{ m} \approx 17,80 \text{ m}$$

La longitud resultante utilizando el programa informático **DC-Pit** y empleando los mismos parámetros característicos del terreno es de 24,76 metros, tal y como se observa en la *ilustración 19*.

Este software sigue unas recomendaciones alemanas definidas para excavaciones que son:

- **EAB** Recommendations on Excavations (DGGT-German Geotechnical Society)
- **EAU** Recommendations of the Committee for the Waterfront Structures-Harbours and Waterways.

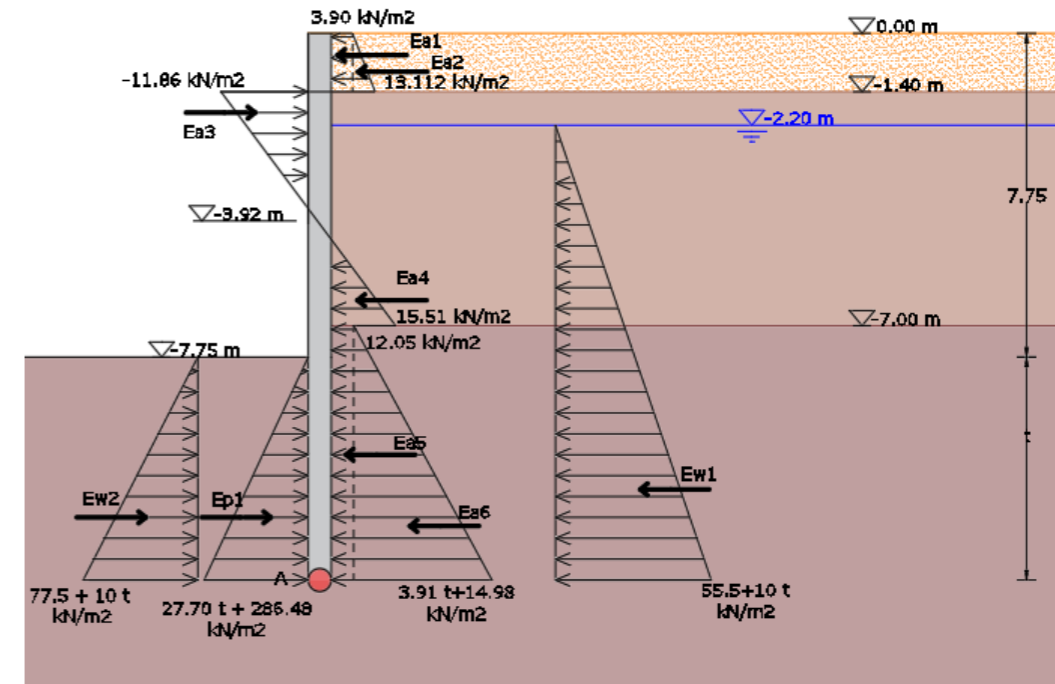


Ilustración 18: Distribución de empujes. Fuente: Elaboración propia.

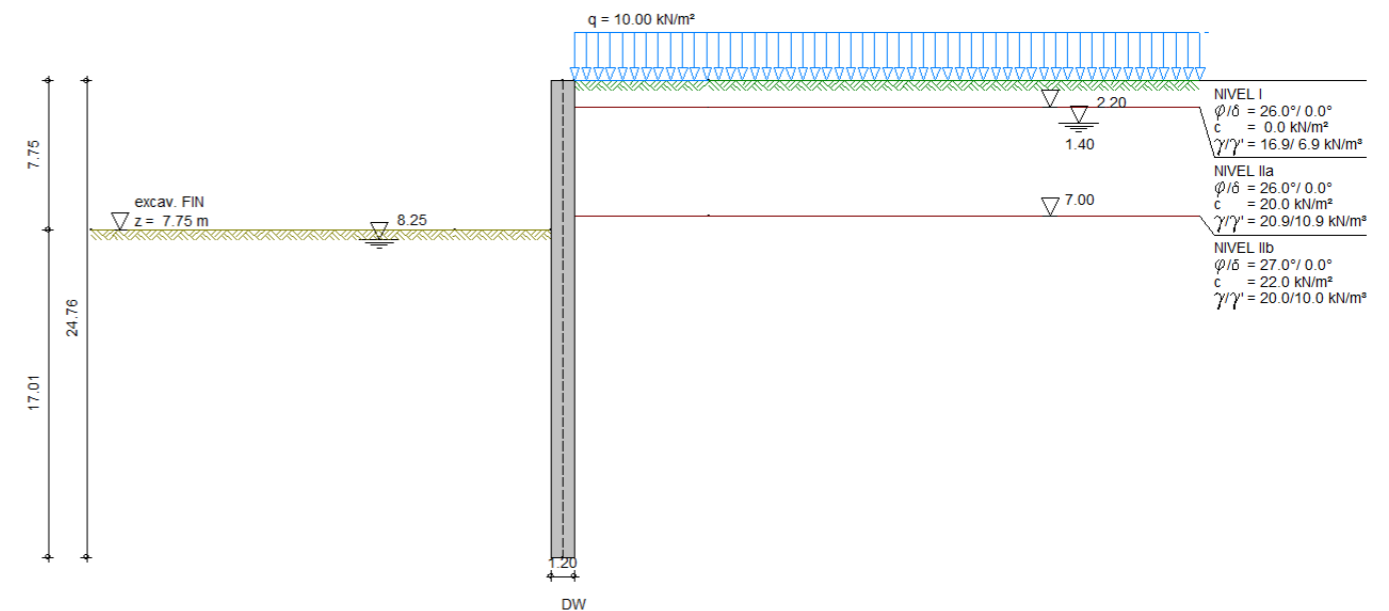


Ilustración 19: Sección muro pantalla en ménsula. Fuente: DC-Pit y elaboración propia



La diferencia de longitud entre la del cálculo manual y la obtenida mediante el programa es debida a varias razones según se detalla a continuación.

La primera de ellas es que, en el cálculo realizado por el programa, se exige una presión mínima sobre el muro siguiendo las recomendaciones de la EAB apartado R 4.3. Por lo tanto, en la zona del muro donde existan presiones negativas o menores que la mínima presión recomendada afectadas por el término de la cohesión, se colocará la mínima, obteniendo mayor empuje y mayor empotramiento.

Otra de las razones por las que se incrementa la diferencia entre longitudes es debido a que, a la calculada, se le suma una longitud adicional  $t'$ , tal y como se ha indicado en el método de Blum. Como la resultante por cálculo mediante el programa es mayor que la obtenida mediante cálculos manuales, el incremento de longitud adicional también será mayor.

En cuanto al canto del muro pantalla, se han iterado distintos valores observando sus deformaciones en cabeza, necesitando un canto de muro de 1,20 m para tener deformaciones asequibles, es decir, de 13 cm.

### B) ARRIOSTRADO MEDIANTE CELOSÍAS

Debido a que la solución en ménsula requiere de una gran longitud de empotramiento, el siguiente caso a estudiar como posible solución sería la de arriostrar el muro pantalla mediante celosías o perfiles metálicos. Debido a las dimensiones de la parcela, no se podrá arriostrar mediante codales o perfiles soldados, serán necesarias las celosías para distribuir la carga a soportar por el empuje del terreno.

Es necesario tener en cuenta que los arriostramientos son un obstáculo para las máquinas de excavación, además de también obstaculizar y retrasar el proceso de construcción de los distintos sótanos. Es decir, se deberán colocar en una posición o cota en la que no coincidan con los forjados ni molesten su proceso de construcción.

#### Un nivel de arriostramiento

Por este motivo se ha determinado que el arriostramiento se colocará a la cota -2,00 m para evitar obstaculizar el procedimiento de construcción de los sótanos.

Como se ha comentado al inicio de este capítulo, se ha empleado tanto el método americano como el método europeo. En el primer caso, mediante el método de "base libre", en el cálculo manual, resulta una longitud de pantalla de 9,11 metros y una carga en el arriostramiento de 99,79 kN/m.

En el método de "base libre" se trata de un problema isostático, en el que se tiene poca longitud de empotramiento y donde los desplazamientos y giros se tienen en cuenta.

En cuanto al segundo caso, método de "base empotrada", se trata de un problema hiperestático en el que se tiene una longitud de empotramiento mayor y se coartan los desplazamiento y giros. Para resolverlo se necesita una hipótesis adicional, debido a que se tiene una incógnita más, la reacción concentrada de la zona inferior de la pantalla.

El diseño de la pantalla con este último método se ha realizado con el programa **DC-Pit**, resultando una longitud total de pantalla de 14,60 metros y una carga en el arriostramiento de 229,72 kN/m. El programa informático

permite disminuir o aumentar la longitud de empotramiento cargando más o menos el arriostramiento asignando un porcentaje de Blum que indica el porcentaje de empotramiento.

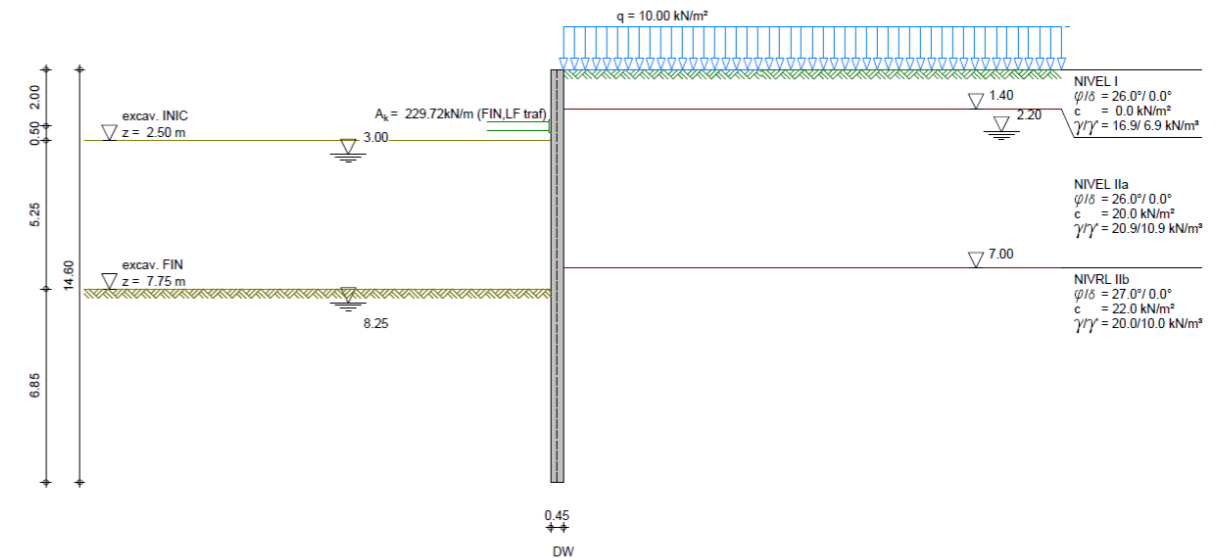


Ilustración 20: Pantalla arriostrada con un nivel. Fuente: Elaboración propia.

#### Dos niveles de arriostramiento

El método de cálculo con dos niveles de arriostramiento es el mismo que el utilizado para un nivel de arriostramiento (método de pie empotrado), salvo que en este caso se tiene otra reacción más. Mediante esta solución se podría reducir más la longitud de empotramiento de la pantalla, resultando de 4,90 metros, tal y como se observa en la Ilustración 21.

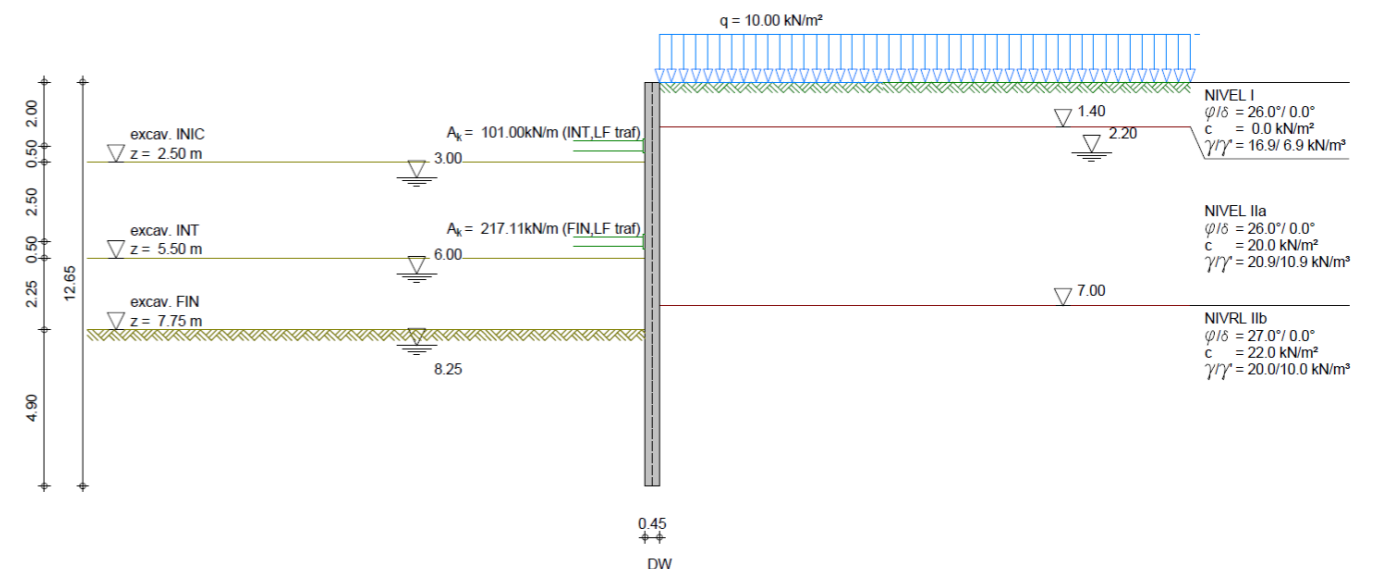


Ilustración 21: Pantalla arriostrada con dos niveles. Fuente: Elaboración propia.



Además, se observa una carga mayor sin mayor aplicada en el arriostramiento inferior de 217,11 kN/m, siendo en el arriostramiento superior de 101,00 kN/m. La posición de este segundo nivel se ha previsto a la cota -5,00 m para evitar que coincida con el forjado inferior.

Una de las desventajas principales de colocar un segundo nivel de arriostramiento es que obstaculiza todavía más la excavación y los procedimientos que se quieren realizar en el recinto, pero se consigue una longitud de pantalla menor.

Se ha realizado la comprobación contra las inestabilidades hidráulicas (levantamiento de fondo o sifonamiento), aunque se traten de materiales arcillosos, por el gran rebaje del nivel freático que se debe ejecutar y cumpliría con la longitud de pantalla propuesta.

### C) ANCLADO.

Como última alternativa propuesta para arriostrar el muro pantalla de hormigón armado es mediante anclajes al terreno. Es una solución adecuada debido a que permite tener una altura libre sin tener ningún obstáculo durante la excavación o trabajos en el interior del recinto.

Es una solución óptima para grandes profundidades de excavación y pueden colocarse varias líneas de anclajes. Además, una vez se pueda contar con elementos que contrarresten los empujes del terreno, se cortan los anclajes y se dejan perdidos sin necesidad de utilizar maquinaria para retirarlos.

Es importante tener en cuenta la cota en la que se colocarán, para evitar que coincidan con los forjados de las plantas del sótano.

Además, se deberá tener en cuenta la posición del anclaje intentando evitar que el anclaje esté situado muy por debajo del nivel freático, debido a que al perforar la pantalla podría producirse un escape del agua y un arrastre del terreno. Existen métodos para evitar este fenómeno, pero encarecerían de forma considerable la alternativa.

#### Un nivel de anclaje

Utilizando el programa informático ya mencionado, se obtiene una longitud de anclaje mínima de aproximadamente 15,50 metros, es decir, la necesaria para evitar que el bulbo del anclaje esté situado en la zona de la cuña activa. En el momento de calcular el anclaje, es posible que se necesite mayor longitud de anclaje para poder soportar la carga actuante. Se situará a una cota de -2,00 metros de la superficie, y con un ángulo de 20 grados.

Para obtener la longitud mínima de anclaje se ha utilizado el método de Kranz explicado en el anejo correspondiente al estudio de alternativas.

De la misma forma, con el método de pie empotrado resulta una pantalla de 14,60 metros de los cuales 6,85 metros se quedarán empotrados una vez se haya realizado la excavación completa, y el espesor será de 0,45 m. La carga que deberá soportar el anclaje será de 244,45 kN/m.

Se podría reducir todavía más la longitud de pantalla colocando un segundo nivel de anclaje en la zona inferior. Esta opción se analiza en el apartado siguiente.

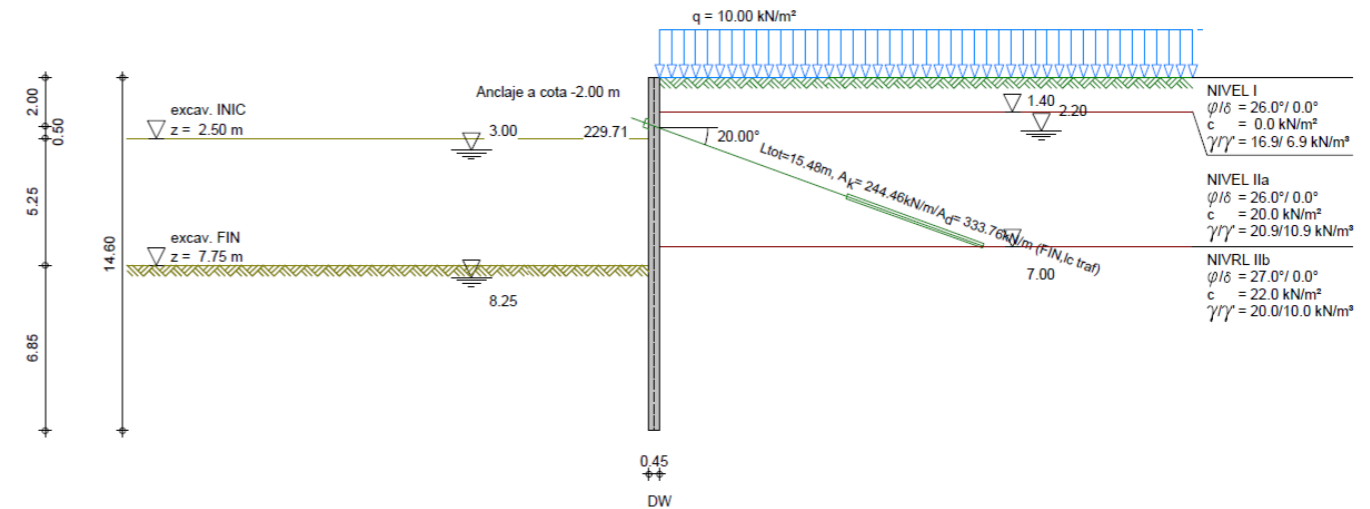


Ilustración 22: Pantalla anclada a un nivel. Fuente: Elaboración propia.

#### Dos niveles de anclaje

Colocando otro nivel de anclaje a la cota -5,00 m la pantalla se reduce a una longitud de 12,65 m, cumpliendo de la misma forma la recomendación contra las inestabilidades hidráulicas. El espesor de muro será idéntico al anterior, es decir, de 0,45 m.

El anclaje superior resistirá una carga de 107,54 kN/m y el anclaje inferior una carga de 230,78 kN/m. Como era de esperar, el anclaje inferior tendrá que soportar una carga mayor al situarse a más profundidad.

El anclaje superior deberá tener una longitud de 12,00 m y el inferior de 12,80 m como mínimo, para cumplir con las condiciones de separación explicadas en el Anejo nº2: *Estudio de alternativas* y cumplir con el método de Kranz.

Un posible problema a tener en cuenta será la ejecución del segundo anclaje por la razón antes comentada, es decir, al tener el nivel freático a esta cota, puede provocar la salida de agua en este punto y producir un arrastre de material, pero considerando que el terreno está formado por arcillas con una permeabilidad muy baja no se rechazará esta solución.

En el diseño de estos anclajes, es posible que esa longitud tenga que ser superior a la mínima para resistir las cargas actuantes.



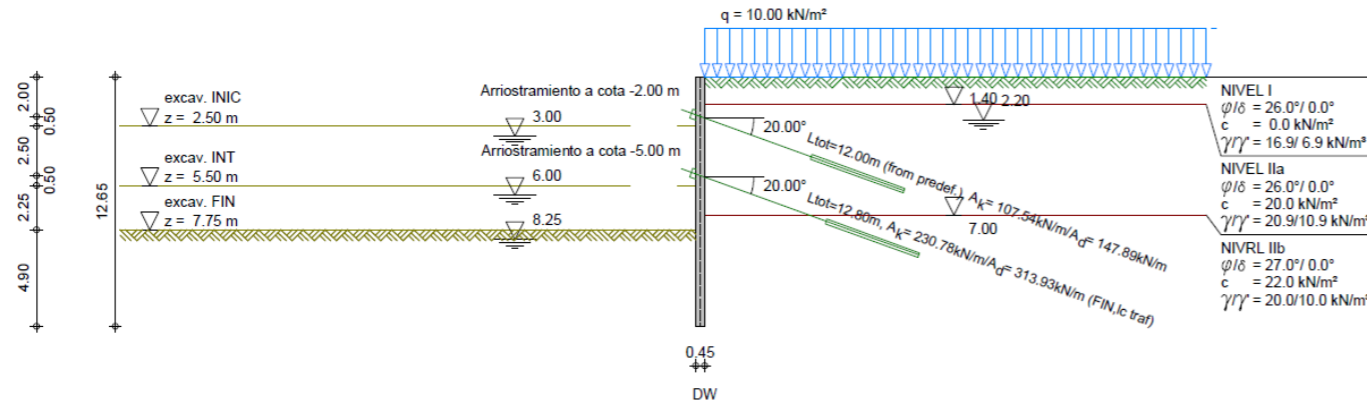


Ilustración 23: Pantalla anclada a dos niveles. Fuente: Elaboración propia

TABLA RESUMEN DE DIMENSIONES DEL MURO PANTALLA

	MÉNSULA	ARRIOSTRADA (1 Nivel)	ARRIOSTRADA (2 Niveles)	ANCLADA (1 NIVEL)	ANCLADA (2 Niveles)
Longitud (m)	24,76	14,60	12,65	14,60	12,65
Espesor/Diámetro (m)	1,20	0,45	0,45	0,45	0,45
Carga N. Superior (kN/m)	---	229,72	101,00	244,46	107,54
Carga N. Inferior (kN/m)	---	---	217,11	---	230,78
Longitud anclaje superior (m)	---	---	---	15,48	12,00
Longitud anclaje inferior (m)	---	---	---	---	12,80

Los listados de cálculo, de cada una de las soluciones, se muestran en el Anejo nº2: Estudio de alternativas, concretamente, en el Apéndice: Listados de cálculo.

En estos listados la longitud de anclaje de cada nivel es la solución definitiva una vez dimensionados según la "Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera".

### 5.1.3. Tablestacas

Las tablestacas son perfiles metálicos laminados en frío o en caliente y con forma de chapa grecada. Estas chapas pueden resistir grandes esfuerzos producidos por los empujes del terreno y también por los del agua.

Las tablestacas se hincan en el terreno formando un recinto estanco que permite el vaciado del interior. Se colocan en el perímetro de todo el recinto quedando machihembradas entre ellas y una vez terminados los trabajos en su interior (excavación, ejecución de una estructura, etc.), se pueden extraer y reutilizar.

Alguna de las desventajas de esta alternativa es que las tablestacas no se pueden hincar en roca o en terrenos donde los ensayos de penetración dinámica o SPT den rechazo o golpes muy elevados. En este caso no existe material rocoso en la parcela, pero sí que se observa un rechazo a los 2,00 metros debido a las arenas o gravas encostradas. Como esta capa de arenas y gravas encostradas tiene un espesor muy pequeño, de 1,00 metros o menor, y está situada cerca de la superficie, es posible que no haya problemas de hinca.

En el caso de que en obra no se pudiera hincar la tablestaca en alguna zona, se puede utilizar eventualmente una perforadora para picar o romper esta pequeña capa e hincar la tablestaca.

La solución mediante tablestacas permite ejecutar el muro de sótano una vez realizada la excavación. Además, ofrece la posibilidad de hormigonar contra la tablestaca realizando la función de encofrado.

En los siguientes apartados se estudiarán las distintas alternativas que ofrecen las tablestacas para la contención del terreno.

Para el cálculo seccional de tablestacas se ha seguido el Eurocódigo 3. Además, los modelos con los que se estudiarán las alternativas serán los más empleados como alquiler en la empresa Ischebeck Ibérica S.L. Estos modelos y sus características se muestran en el anejo número 2 de este documento.

#### A) MÉNSULA

La alternativa de utilizar una solución en ménsula usando tablestacas, en principio, al tener una profundidad de excavación considerable no resistirían los empujes del terreno. Se ha comprobado que con el modelo disponible de tablestaca que tiene mayor módulo resistente, mejor calidad de acero, mayor área de sección y mayor espesor no resistirá dichos esfuerzos.

El cálculo indica que la tablestaca no resistirá el momento máximo actuante y se produciría una deformación en cabeza de 4 metros.

Una vez comprobado que la tablestaca con mayor módulo resistente (Hoesch 2500) no cumple la resistencia por flexión, se puede afirmar que no es posible esta solución y deberá arriostrarse o anclarse al terreno para poder resistir sus empujes.

### B) ARRIOSTRADA MEDIANTE CELOSÍAS

En este apartado se analizará la solución de contención del terreno mediante tablestacas arriostradas a un nivel y a dos niveles, iterando con distintos modelos de tablestaca para elegir la más eficiente y económica. De manera que, cuanto menos peso tenga la tablestaca, más económico resultará en lo que se refiere a transporte y cantidad de material.

#### Un nivel de arriostramiento

Con idénticas condiciones de partida que las utilizadas para muros de hormigón: empujes de tierras, arriostramiento colocado a cota -2,00 m y las mismas hipótesis de cálculo, la carga será de 229,71 kN/m sin mayorar.

En este caso se necesitarán tablestacas de 15 metros de longitud, donde 7,75 m serán entibados, 6,85 m serán empotrados y 0,40 m serán libres para poder extraer la tablestaca una vez se hayan realizado los trabajos en el interior del recinto.

El modelo de tablestaca más eficiente para esta alternativa será la Hoesch 1805, que tiene 0,35 metros de canto y un ancho de 1,15 metros.

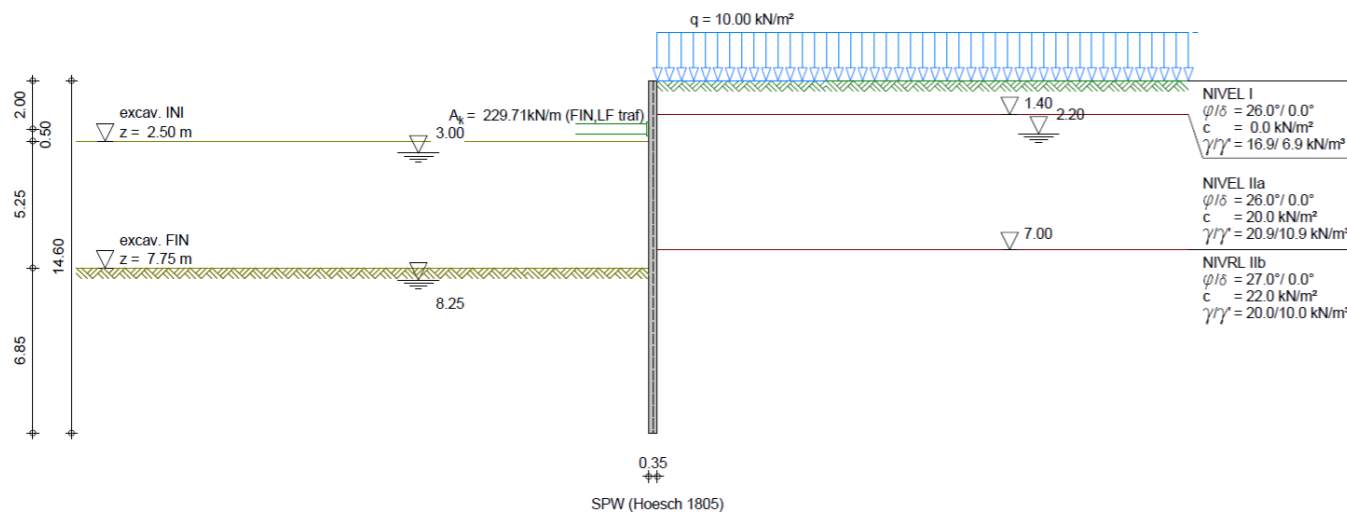


Ilustración 24: Tablestaca arriostrada. Fuente: Elaboración propia.

#### Dos niveles de arriostramiento

De la misma forma que en el caso de muro pantalla el primer arriostramiento se colocará a la cota -2,00 m y el segundo a -5,00 m.

Las cargas sin mayorar serán:

- Carga sin mayorar del primer arriostramiento: 101,00, kN/m
- Carga sin mayorar del segundo arriostramiento: 229,93 kN/m

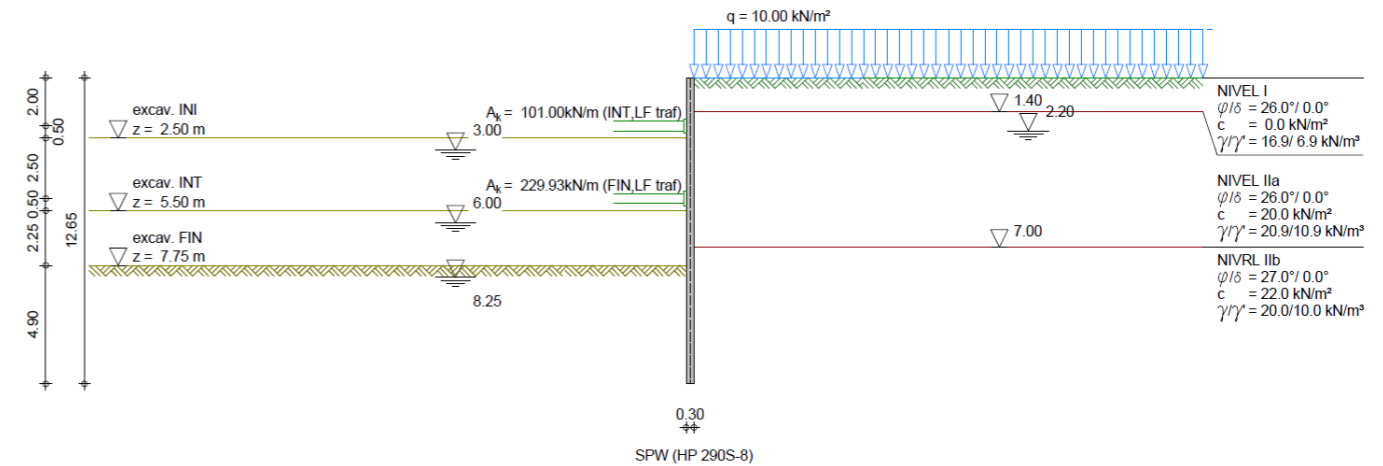


Ilustración 25: Tablestaca con dos niveles de arriostramiento. Fuente: Elaboración propia

El modelo de tablestaca a emplear será la HP 290S-8, es decir, un modelo con menos módulo resistente y menor peso que la considerada en el caso de un único nivel de arriostramiento. La tablestaca tendrá una longitud de 13 metros, donde tendrá 0,35 metros libres, 7,75 metros entibados y 4,90 metros empotrados en el terreno.

Este modelo tiene 0,30 metros de canto y 0,71 metros de ancho.

Los inconvenientes principales de estas dos soluciones son idénticas a las explicadas anteriormente para el caso de muros pantalla arriostrados, es decir, los arriostramientos pueden obstaculizar el proceso de excavación y construcción, y consistiría en arriostramientos en celosía, debido a que el recinto tiene unas dimensiones demasiado grandes para arriostrarlo con perfiles simples.

En cuanto a las ventajas, la solución del tablestacado frente al hormigonado del muro pantalla ofrece mayor rapidez del proceso y menor maquinaria a utilizar, debido a que para el tablestacado sólo se necesitará la maquinaria de hinca.

Sólo se necesitará el hormigonado del muro se sótano, evitando el hormigonado adicional que necesitaría el muro pantalla. Como consecuencia, proporciona una reducción del tiempo de ejecución de la pantalla y se reduciría además el tiempo de espera para el fraguado del hormigón.

### C) ANCLADA

Como última de las posibles soluciones, utilizando tablestacas, es la alternativa de que estén ancladas el terreno. Con las mismas hipótesis de cálculo y colocando a la misma altura los anclajes que en el caso de muro pantalla de hormigón armado, ofrece la misma longitud y las mismas cargas que deben soportar los anclajes.

#### Un nivel de anclaje

El primer y único nivel de anclaje se colocará a 2,00 metros de la superficie y deberá soportar una carga horizontal sin mayorar de 229,71 kN/m. También deberá tener al menos una longitud de 15,45 m. En cuanto a la tablestaca, deberá tener una longitud total de 15 metros (0,40 metros libres, 7,75 m entibados y 6,85 m empotrados en el suelo) y consistirá en una Hoesch 1805 con 0,35 m de canto y 1,15 m de ancho.

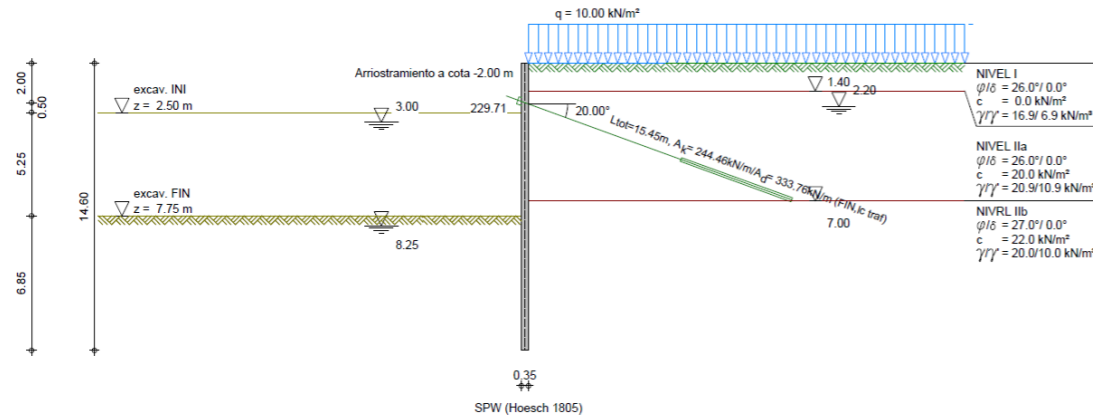


Ilustración 26: Tablestaca con un nivel de anclaje. Fuente: Elaboración propia.

Esta alternativa ofrece diversas ventajas ya comentadas anteriormente. Es posible que en alguna pequeña zona del recinto haya problemas de hinca, en este caso, se perforará el terreno para la posterior hinca.

Dos niveles de anclaje

La alternativa de colocar un anclaje inferior podría ser problemático por la existencia del nivel freático cerca de la superficie. En la ejecución del anclaje es posible que se produzca la salida de agua y por lo tanto arrastre del material. Al ser un terreno arcilloso con permeabilidad muy baja es muy probable que no se tenga este problema.

En este caso se reduciría la longitud de tablestaca a los 13 metros dejando 0,45 metros libres, con una carga sin mayorar en el anclaje superior de 107,59 kN/m y de 230,92 kN/m en el anclaje inferior.

El modelo de tablestaca consistiría en una HP 290S-8 de 0,30 metros de canto y 0,71 metros de ancho.

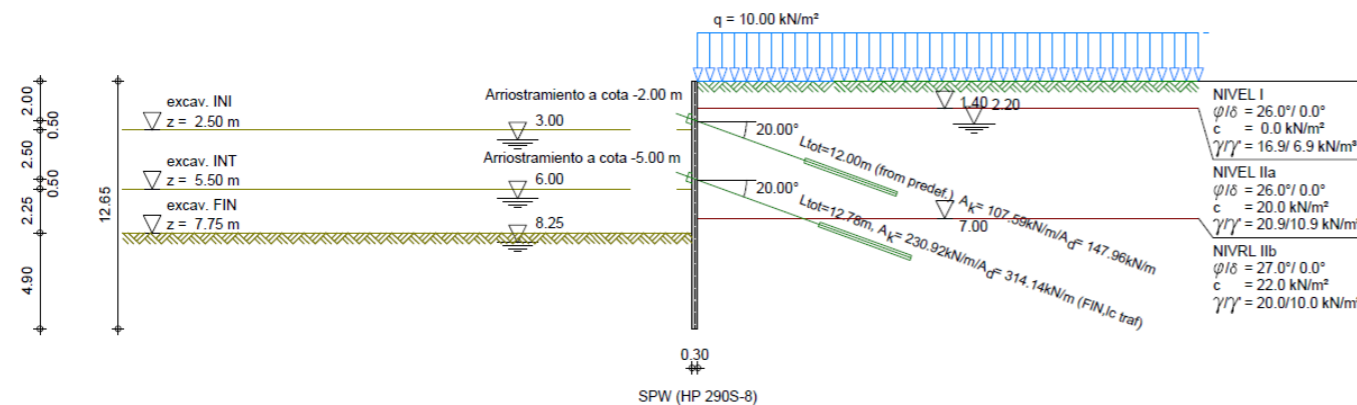


Ilustración 27: Tablestaca con dos niveles de anclaje. Fuente: Elaboración propia

**D) ATIRANTADA**

Existe otra alternativa adicional que consiste en que la pantalla de tablestacas esté atirantada a otra pantalla que hace de reacción. Estos tirantes estarán constituidos por barras de acero.

Esta alternativa ofrece la posibilidad de alcanzar grandes profundidades de excavación sin perfiles ni codales que obstaculicen los trabajos de movimiento de tierras.

El problema principal por el que no es posible esta alternativa como solución a este caso es debido a que se necesita una gran cantidad de espacio para poder transmitir al terreno la reacción en el arriostramiento. Por tanto, es una alternativa que se rechazará directamente sin realizar ningún análisis ni comparación.



Ilustración 28: Tablestaca atirantada. Fuente: Página web de Ischebeck Ibérica.

**TABLA RESUMEN DE PANTALLA DE TABLESTACAS**

	ARRIOSTRADA (1 Nivel)	ARRIOSTRADA (2 Niveles)	ANCLADA (1 NIVEL)	ANCLADA (2 Niveles)
Longitud (m)	14,60	12,65	14,60	12,65
Modelo	Hoesch 1805	HP290S-8	Hoesch 1805	HP290S-8
Carga N. Superior (kN/m)	229,71	101,00	244,46	107,59
Carga N. Inferior (kN/m)	---	229,93	---	230,92
Longitud anclaje superior(m)	---	---	15,45	12,00
Longitud anclaje inferior (m)	---	---	---	12,78

Los listados de cálculo, de cada una de las soluciones, se muestran en el Anejo nº2: Estudio de alternativas, concretamente, en el Apéndice: Listados de cálculo. En estos listados la longitud de anclaje de cada nivel es la solución definitiva una vez dimensionados según la "Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera".



## 5.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS

En este apartado se compararán las alternativas expuestas anteriormente en dos fases. En primer lugar, aquellas que por razones técnicas no sea posible ejecutarlas se desearán, y en segundo lugar, aquellas que ofrezcan más ventajas y sean posibles llevarlas a cabo se analizarán con mayor profundidad.

Para poder comparar las alternativas viables, se realizarán algunos cálculos adicionales con el fin de conocer, con más precisión, las mediciones a qué darían lugar, y posteriormente efectuar una valoración económica de cada alternativa analizando aspectos importantes como rendimientos, tiempo de ejecución, etc.

### 5.2.1. Preselección

Una vez analizado el estudio de alternativas se puede proceder a una preselección, desechando aquellas que son inviables por aspectos técnicos, de espacio...

#### - *Excavación en talud:*

La causa principal por la que se desestima esta solución es debido al espacio necesario para ejecutar una excavación estable en talud. Se necesitaría una distancia adicional en cada lado del recinto de 5,40 metros, invadiendo los viales existentes alrededor de la parcela, e incluso edificaciones cercanas, pudiendo comprometer la estabilidad general del entorno.

#### - *Muro pantalla de hormigón armado en ménsula:*

La alternativa del muro pantalla de hormigón armado en ménsula se desestima por tres razones principales:

- **Espesor de muro:** El espesor de muro de 1,20 metros produce una reducción del espacio en el interior del recinto, además de un aporte importante de material (Hormigón y acero) y excavación llegando casi a los 25 metros de muro.
- **Longitud de muro pantalla:** La longitud necesaria que debe tener la pantalla es de 24,7 metros, lo que implica un volumen de excavación y un movimiento de tierras excesivo. La pantalla con una longitud tan elevada podría derivar en una mala ejecución del muro y tener problemas durante la construcción de los sótanos. Además, que el tiempo que tardaría el hormigón en obtener la resistencia suficiente reduciría mucho los rendimientos, encareciendo la obra.
- **Deformaciones:** Se producirán mayores deformaciones que en soluciones arriostradas o ancladas. Es un factor a tener en cuenta debido a que la parcela se encuentra rodeada de aceras y viales.

#### - *Tablestacado en ménsula:*

Se ha demostrado con el cálculo de esta alternativa que no cumpliría, aun empleando la tablestaca más resistente que se dispone. La chapa no resistiría a flexión, es por eso que se rechaza esta solución.

#### - *Tablestacado atirantado:*

La alternativa de atirantar la pantalla de tablestacas principal a otras traseras que sirven de reacción se han rechazado por el mismo motivo que la excavación en talud, es decir, no se tiene suficiente espacio para poder colocar las tablestacas traseras, y evitar así arriostramientos que obstaculicen el proceso de construcción de los sótanos.

#### - *Muro pantalla con dos niveles de arriostramiento en celosía:*

El principal problema de colocar dos niveles de arriostramiento es que son un obstáculo en el interior del recinto, limitando la altura libre y entorpeciendo el proceso de construcción de los dos sótanos. Además, influiría significativamente en el aspecto económico.

#### - *Tablestacado con dos niveles de arriostramiento en celosía:*

Se rechazará esta alternativa por el mismo motivo indicado anteriormente, por problemas de obstaculizar el procedimiento de construcción.

Como conclusión de esta primera preselección, se puede afirmar que las alternativas viables para la contención del terreno a excavar y las cuales se deben estudiar y comparar con mayor precisión son:

#### - *Muro pantalla de hormigón armado con un nivel de arriostramiento en celosía*

En esta alternativa no se calculará el arriostramiento en celosía. Sólo se evaluará y comparará económicamente conociendo el coste total de arriostramiento en obras con condiciones similares a la del presente trabajo, tales como profundidad de excavación, área del recinto, perímetro, etc.

#### - *Muro pantalla de hormigón armado con un nivel de anclaje*

Para la presente alternativa, se estudiará en el siguiente apartado el predimensionamiento del muro pantalla, además de los anclajes, para evaluar el coste estimado y poder comparar las alternativas con mayor precisión. Se ha decidido diseñar el muro pantalla de esta alternativa porque tiene mayor longitud (14,60 metros) y se podría estimar la cantidad de materiales de los muros pantalla con menor dimensión (12,65 metros) por proporción del anterior.

#### - *Muro pantalla de hormigón armado con dos niveles de anclaje*

En este caso, la longitud del muro pantalla se reduce en 2 metros en comparación a la alternativa de muro pantalla de hormigón armado con un nivel de anclaje. No se calculará el predimensionamiento del muro pantalla de 12,65 m, sino que se evaluará económicamente obteniendo la medición de materiales necesarios para su construcción en proporción a la alterativa de muro pantalla con un nivel de anclaje, es decir, en la medición, se reducirán 2 metros de muro pantalla. Los anclajes se diseñarán más adelante.



- *Tablestacado con un nivel de arriostramiento en celosía.*

De la misma forma que con el muro pantalla, no se calculará el arriostramiento necesario, simplemente se comparará económicamente conociendo el coste de obras con condiciones de excavación y dimensiones similares.

- *Tablestacado con un nivel de anclaje*

En el anejo número 2 se han diseñado los anclajes necesarios para esta alternativa.

- *Tablestacado con dos niveles de anclaje.*

En el anejo número 2 se han diseñado los anclajes necesarios para esta alternativa.

En los casos en que se utilicen tablestacas, la ejecución del muro de sótano se tendrá en cuenta valorando económicamente su ejecución de una manera sucinta, es decir, no se realizará el cálculo específico del armado ni el predimensionamiento de este.

5.2.2. Cálculos adicionales: Muro pantalla

En el presente apartado se realizarán algunos cálculos adicionales para definir mejor la estructura y poder valorar económicamente las alternativas posibles.

En un primer apartado se diseñará el muro pantalla de hormigón armado de 14,60 metros, y en un segundo apartado se diseñarán los anclajes necesarios tanto para las soluciones de muros pantalla como para las pantallas de tablestacas.

El procedimiento detallado de dichos cálculos se muestran en el *Anejo nº2: Estudio de alternativas.*

Los esfuerzos sometidos al muro pantalla en el caso de un nivel de anclaje son prácticamente idénticos al de muro pantalla con un nivel de arriostramiento.

El muro de hormigón armado se dimensionará de acuerdo a la instrucción de hormigón estructural EHE-08.

Características geométricas, materiales y durabilidad

El muro pantalla estará formado por paneles con las siguientes dimensiones:

- Ancho: 3,00 metros.
- Canto: 0,45 metros.
- Longitud: 14,60 metros.

Se dejarán esperas de 0,40 metros completando así los 15 metros de longitud.

Los materiales empleados son:

- Acero: Se utilizarán barras de acero corrugado soldable B 500 S.
- Hormigón: Consistirá en un hormigón de 25 MPa de resistencia característica con un árido grueso y de consistencia plástica. HA-25/P/20/IIa

Dimensionamiento de la armadura

Una vez definido las características geométricas y la de los materiales, se procederá al cálculo de la armadura y disposiciones necesarias para soportar las cargas, resultando la cuantía que se muestra en la siguiente tabla.

TABLA ARMADURA A COLOCAR POR PANEL DE 3 m DE ANCHO DE MURO PANTALLA

Armadura de flexión	Armadura base		Armadura de refuerzo	
	Intradós de muro	18 $\phi$ 20	Intradós de muro	17 $\phi$ 20
Trasdós de muro	16 $\phi$ 10	Trasdós de muro	----	
Armadura horizontal (Por metro de prof.)	Intradós de muro	4 $\phi$ 12	----	----
	Trasdós de muro	4 $\phi$ 12	----	----

Armadura de cortante	$\phi$ 12/25 6 ramas
----------------------	----------------------

Las cuantías de armado quedarán distribuidas tal y como se muestra en la siguiente imagen:

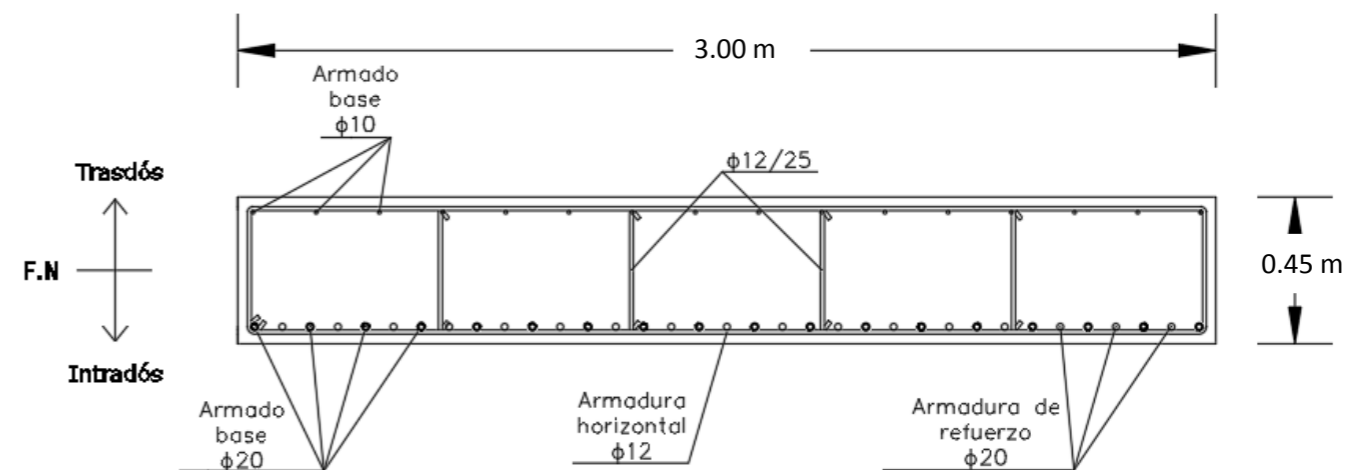


Ilustración 29: Disposición de la armadura del muro pantalla. Fuente: Elaboración propia.



### 5.2.3. Diseño de anclajes.

En este apartado se han calculado el número y el tipo de anclajes que se necesitan para poder arriostrar tanto el muro pantalla como el tablestacado a un nivel y a dos niveles. Será necesario para poder valorar económicamente estas alternativas y poder elegir la más adecuada.

Los anclajes de las alternativas del tablestacado y muro pantalla están situados a la misma cota y tienen que soportar una carga idéntica, pero tendrán distintas separaciones dependiendo del ancho del módulo del panel. Por tanto, el resultado será distinto.

El diseño se basará en la “Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera”.

Los anclajes consistirán en barras huecas autoperforantes TITAN proporcionadas por la empresa *Ischebeck Ibérica S.L.*

El cálculo y diseño de los anclajes de cada alternativa se muestran en el *Anejo nº2: Estudio de alternativas*. Finalmente, se obtienen en cada situación las longitudes y características de los anclajes indicadas en la tabla que se muestra a continuación:

#### TABLA RESUMEN

TIPO	NIVELES DE ANCLAJE	SEPARACIÓN (m)	CARGA (KN/m)	LONGITUD TOTAL (m)	LONGITUD DE BULBO (m)	BARRA TITAN	DIAM. BOCA DE PERFORACIÓN (mm)
MURO PANTALLA	UNO	3,00	244,46	30	21	73/45	200
	DOS	3,00	107,54	24	15	40/20	150
		3,00	230,78	24	18	73/53	200
TABLESTACA	UNO	2,30	251,45	24	15	73/56	200
	DOS	3,55	107,59	24	15	40/16	150
		3,55	230,92	27	21	73/45	200

En los listados de cálculo se muestra la longitud de anclaje calculada en estos apartados.

### 5.2.4. Valoración económica

Una vez realizados los distintos cálculos para conocer con más detalle las alternativas planteadas, se elabora una valoración económica de cada solución técnicamente viable.

El procedimiento seguido para realizar esta parte del trabajo ha consistido en analizar precios aproximados de los materiales y procedimientos a utilizar para la contención del terreno, de manera que posteriormente se pueda comparar la viabilidad económica y tener mayor facilidad de elegir la solución definitiva que más se ajusta a esta obra.

Los precios y unidades de obra se han basado en la base de precios del instituto valenciano de la edificación (IVE) y, en el caso de elementos especiales como tablestacas y anclajes, se han tomado precios comerciales facilitados por la empresa *Ischebeck Ibérica S.L.*

No se han incluido en esta valoración aquellas unidades de obra comunes a todas las alternativas como el agotamiento del nivel freático para la ejecución del vaciado en seco o la excavación del terreno.

El coste de cada alternativa que se muestra a continuación corresponde al total incluyendo materiales, mano de obra y ejecución.

COMPARACIÓN ECONÓMICA DE ALTERNATIVAS	
TABLESTACA CON UN NIVEL DE ANCLAJE	461.526 €
TABLESTACA CON UN NIVEL DE ARRIOSTRAMIENTO EN CELOSÍA	471.715 €
MURO PANTALLA DE HORMIGÓN ARMADO CON UN NIVEL DE ARRIOSTRAMIENTO EN CELOSÍA	486.672 €
TABLESTACA CON DOS NIVELES DE ANCLAJE	492.710 €
MURO PANTALLA DE HORMIGÓN ARMADO CON DOS NIVELES DE ANCLAJE	494.842 €
MURO PANTALLA DE HORMIGÓN ARMADO CON UN NIVEL DE ANCLAJE	498.106 €



### 5.2.5. Criterios finales de elección

Para finalizar el estudio de soluciones, se comparan todas las alternativas viables valorando los aspectos técnicos-constructivos y económicos, derivados de la valoración anterior, para finalmente elegir la solución más eficiente.

#### A) ASPECTO ECONÓMICO.

Desde el punto de vista económico se observa que la alternativa de menor coste resulta ser la constituida por tablestacas con un nivel de anclaje como método de contención, y la de mayor coste será la de muro pantalla de hormigón armado con un nivel de anclaje, con una diferencia entre ellas de aproximadamente 36.000 €, diferencia suficiente para plantearse desestimar esta última.

Analizando los resultados económicos generales, se puede afirmar que las soluciones que contemplan un nivel de anclaje frente a un nivel de arriostramiento mediante celosías, utilizando tablestacas, se tiene un ahorro de entre 10.000 y 11.000 €. Sin embargo, con muros pantalla se obtiene el caso contrario. Esto es debido a que la separación de anclajes es mayor con muros pantalla, y aunque se reduzca el número de anclajes a ejecutar, tendrán que soportar mayores cargas, y esto obliga a usar barras con mayor diámetro y mayor longitud de anclaje, resultando ser más caros.

La diferencia económica entre realizar la pantalla mediante tablestacas y muros de hormigón armado se debe al volumen de los materiales necesarios para la construcción del muro (hormigón y acero), es decir, para las soluciones con tablestacas, la cantidad de hormigón y acero a utilizar para construir el muro de sótano es mucho menor que para ejecutar el muro pantalla. Por lo tanto, cuanto mayor sea la longitud de pantalla necesaria, mayor será la diferencia de precio entre tablestacas y muros pantalla, siendo más económica la primera.

Siguiendo con este argumento se puede afirmar que, en las soluciones con anclaje a un nivel, la cantidad de acero y hormigón adicional que se necesita para la alternativa de muro pantalla es más costoso que el alquiler de tablestacas con la ejecución del muro de sótano. A esta diferencia de precio también se le debe añadir la diferencia de coste del anclaje por la distancia de separación anteriormente comentada, es decir, el anclaje para muro pantalla tiene una separación mayor y está más cargado, aunque resulten menor número de anclajes, se necesita una longitud y una barra con mayor precio que para el anclaje utilizado en tablestacas.

Las alternativas con dos niveles de anclaje, aunque se tiene un ahorro de hormigón y acero, al disminuir la longitud de empotramiento de la pantalla, resultan más costosas que la ejecución mediante un nivel de arriostramiento con celosía.

Finalmente, comparando las alternativas de muro pantalla con dos niveles de anclaje y muro pantalla con un nivel de anclaje, resulta más económica ejecutar la primera, debido a que se reducen longitudes y diámetros de anclaje, y esto permite acortar la longitud total de la pantalla en aproximadamente 2 metros.

En el caso de tablestacas, esta misma comparación ofrece el resultado contrario. La diferencia del coste del alquiler entre una pantalla dos metros más corta que otra es netamente menor que la misma diferencia en la ejecución de un muro pantalla.

Por tanto, las dos alternativas que resultan más económicas corresponden a la ejecución de tablestacas con un nivel de anclaje y con arriostramiento en celosía, teniendo que valorar los aspectos técnicos o constructivos para decidir definitivamente la solución.

#### B) ASPECTOS TÉCNICOS Y CONSTRUCTIVOS

Cada una de las alternativas ofrece distintas ventajas e inconvenientes desde el punto de vista técnico o constructivo. La comparación se realizará entre opciones con tablestacas y muros pantalla por un lado, y por otro lado, entre anclajes y arriostramientos metálicos.

En la ejecución de la pantalla mediante tablestacas, en primer lugar, estas se hincan y posteriormente se construye el muro de sótano. Posteriormente, una vez se ha finalizado la obra, se extraen y se recuperan las tablestacas.

En cambio, la construcción del muro pantalla de hormigón armado permite aprovecharlo para conectar posteriormente la losa y los distintos forjados una vez realizada la excavación. Frente a esta ventaja del muro pantalla de HA, existen distintos inconvenientes que no tienen la solución de tablestacas:

- El acabado del muro será peor con el muro pantalla, debido a que se hormigona contra el terreno, aunque se usen lodos bentoníticos. Por el contrario, el tablestacado permite hormigonar contra él sirviendo de encofrado a una cara, ofreciendo mejor acabado.
- Se necesita mayor cantidad de materiales, hormigón y acero, por la necesidad de empotramiento del muro pantalla. Utilizando una alternativa con tablestacas permite realizar un muro de sótano con la profundidad de excavación, es decir, con menor longitud que el muro pantalla, puesto que el arriostramiento de los forjados de cada sótano y la losa de cimentación compensaría el empuje de tierras y de agua freática en el trasdós. De la misma forma, el muro pantalla una vez arriostrado a los forjados y a la losa de cimentación, no necesitará el empotramiento adicional que, en un principio, es necesario para resistir los empujes en la fase de ejecución de la estructura y que supone un efecto barrera importante en el movimiento natural del agua freática en el subsuelo.
- Ejecutar el muro de sótano al abrigo de las tablestacas con la excavación finalizada permite alargar la distancia entre juntas y asegurar muros más estancos para la fase de servicio de la estructura.

En cuanto a la comparación entre el arriostramiento mediante perfiles metálicos en celosía y el uso de anclajes, se puede asegurar que los anclajes permiten realizar la excavación de forma más segura y rápida, sin obstáculos.

El arriostramiento con celosía obstaculiza la excavación y la construcción de los sótanos, además de que el tiempo de montaje y la complejidad de colocación de las celosías es mayor que la instalación de los anclajes.

Como conclusión final y atendiendo a criterios técnicos, constructivos y económicos, la solución recomendada para la contención del terreno para la construcción de dos sótanos en la parcela, objeto de este estudio, será la de tablestacas de 15 metros de longitud con un nivel de anclaje a cota -2.00 metros con barra TITAN 73/56 cada 2,30 m y con 24º de inclinación, con una longitud total de anclaje de 24 m y 15 m de bulbo.

## 6. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN RECOMENDADA

En este apartado se diseñará la opción elegida, es decir, se describirá con mayor detalle todo el proceso a realizar para la excavación de la parcela.

Como primera fase del proceso de vaciado del solar, se estudiará el rebaje del nivel freático hasta la cota necesaria de forma temporal para poder realizar la excavación en seco sin causar problemas de estabilidad en el entorno cercano como viales o edificaciones.

### 6.1. ANÁLISIS Y ESTUDIO DEL REBAJE DEL NIVEL FREÁTICO.

El objeto del estudio es justificar el diseño de agotamiento para el recinto anteriormente descrito, donde el nivel freático se encuentra a una profundidad de 2,20 metros de la superficie.

La descripción del sistema a emplear, el modelo analítico y la justificación de los cálculos se muestran en el *anejo nº5: Agotamiento del nivel freático*.

Según los cálculos realizados en dicho anejo se ha comprobado que, para conseguir el agotamiento de la parcela, se necesitarán 8 pozos con un diámetro de 0,25 metros y bombearán cada uno de ellos 1,67 m<sup>3</sup>/h. La longitud total de cada pozo será de 13 metros.

El tiempo aproximado para agotar totalmente el recinto hasta la cota -8,25 metros será de 18 días.

En cuanto a la bomba sumergible elegida para la extracción del agua, se ha escogido de la empresa *ESPA Innovative Solutions*. Será la ES4 02-05.

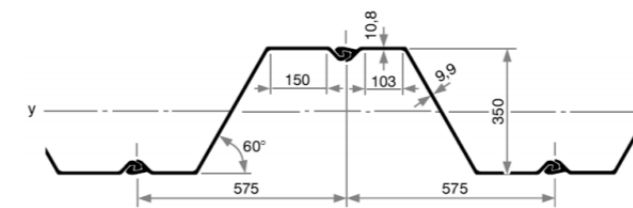


Ilustración 30: Bomba sumergible para el agotamiento. Fuente: Página web de ESPA Innovative Solutions.

### 6.2. SOLUCIÓN RECOMENDADA

La solución recomendada una vez evaluados los aspectos económicos, técnicos y constructivos será ejecutar como sistema de contención del terreno una pantalla de tablestacas de 15 metros de longitud ancladas al terreno.

La pantalla estará formada por tablestacas de modelo Hoesch 1805 con un canto de 0,35 m y una anchura de 1,15 metros. Se tratan de perfiles laminados en caliente con un espesor de chapa de 9,9 mm en las almas y de 10,8 mm en las alas. En la siguiente tabla se muestran sus características:



MODELO	HOESCH 1805
ANCHO PERFIL	1.150 mm
ALTO PARED	350 mm
PESO/ m <sup>2</sup>	125 kg/m <sup>2</sup>
PESO/ m	144 kg/m
MÓDULO RESISTENTE	1800 cm <sup>3</sup> /m de pared
ÁREA DE LA SECCIÓN	183 cm <sup>2</sup>
ESPESOR	9,9-10,8 mm
TIPO	MACHIHEMBRADA
CALIDAD DEL ACERO	S 355 GP

Ilustración 31: Hoesch 1805. Fuente: Página web Ischebeck Ibérica S.L.

Las chapas irán machiembreadas entre ellas para evitar el paso del agua en todo el recinto. Para que la conexión sea correcta y aseguren la estanqueidad no pueden formar entre ellas un ángulo mayor a 5 grados.

Para las esquinas del recinto se utilizarán tablestacas esquineras, es decir, tendrán un perfil en L soldado para ángulos de 90 grados que conectará con la siguiente tablestaca.

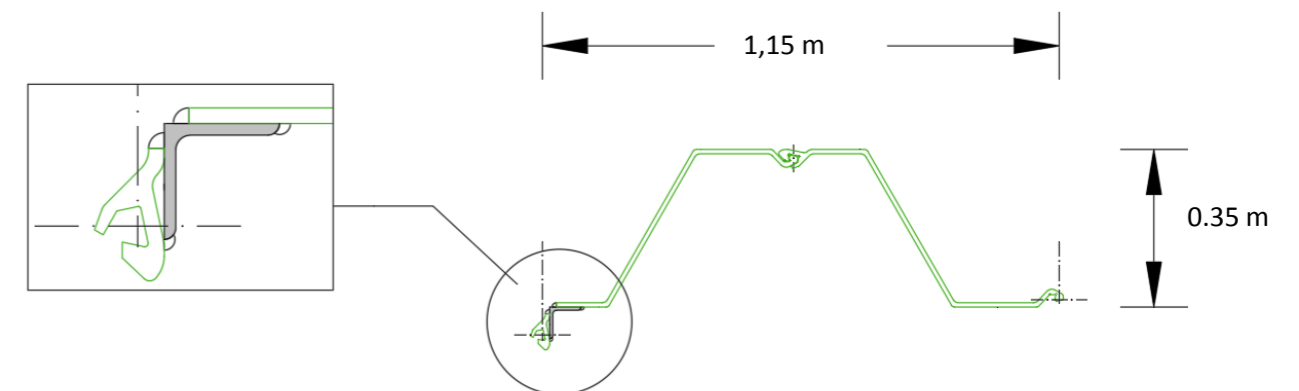


Ilustración 32: Tablestaca Hoesch 1805. Fuente: Página web de la empresa Ischebeck Ibérica.



Para esquinas con ángulos mayores de 95 grados o menores de 85 grados se pueden fabricar piezas especiales soldando el machambre al ángulo deseado. Otra opción es ajustar las tablestacas normales al recinto girando cada una de ellas 5 grados hasta que coincida con la línea del recinto. Evidentemente, la primera opción es más cara por la soldadura en taller y la fabricación de estas secciones. Por otro lado, se ajustan mejor al recinto.

Para evitar el desvío excesivo de las tablestacas sobre el perímetro del recinto, se usarán tablestacas especiales en estos casos.

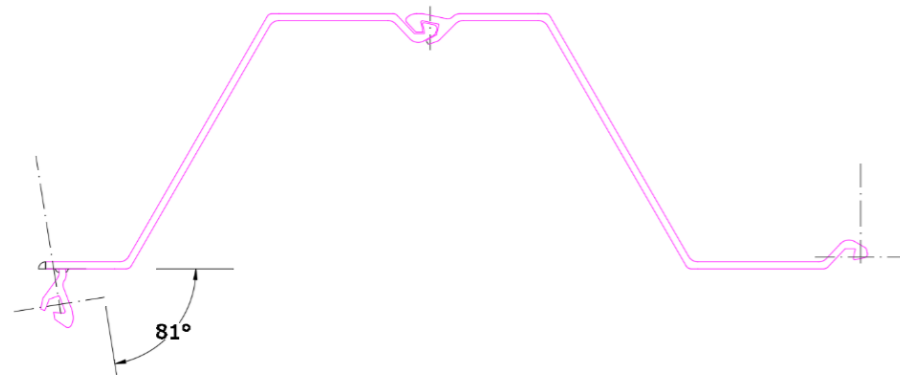


Ilustración 33: Tablestaca especial. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los anclajes, consistirán en barras roscadas y huecas autoperforantes TITAN 73/56 colocadas cada 2,30 metros a cota -2,00 metros y con una inclinación de 24 grados, con una calidad del acero de S 460 NH. En la siguiente tabla se especifican sus características:

TIPO DE ANCLAJE:	PROVISIONAL
<b>BARRA ISCHEBECK:</b>	<b>TITAN 73/56</b>
Carga en nivel de anclajes:	A = <b>251,45</b> kN/m
Separación entre anclajes:	S = <b>2,30</b> m
Carga nominal por anclaje:	P <sub>N</sub> = <b>578,34</b> kN
Longitud total del anclaje:	L <sub>TOTAL</sub> = <b>24,00</b> m
Longitud del bulbo:	L <sub>B</sub> = <b>15,00</b> m
Diámetro exterior del anclaje:	D <sub>EXT</sub> = <b>73</b> mm
Diámetro interior del anclaje:	D <sub>INT</sub> = <b>56</b> mm
Sección efectiva de acero:	A <sub>T</sub> = <b>1360</b> mm <sup>2</sup>
Carga de rotura del anclaje:	P <sub>pk</sub> = <b>1035</b> kN
Límite elástico:	f <sub>yk</sub> = <b>610</b> MPa
Tensión de rotura:	f <sub>pk</sub> = <b>761</b> MPa
Diámetro de la boca de perforación:	D <sub>bp</sub> = <b>200</b> mm

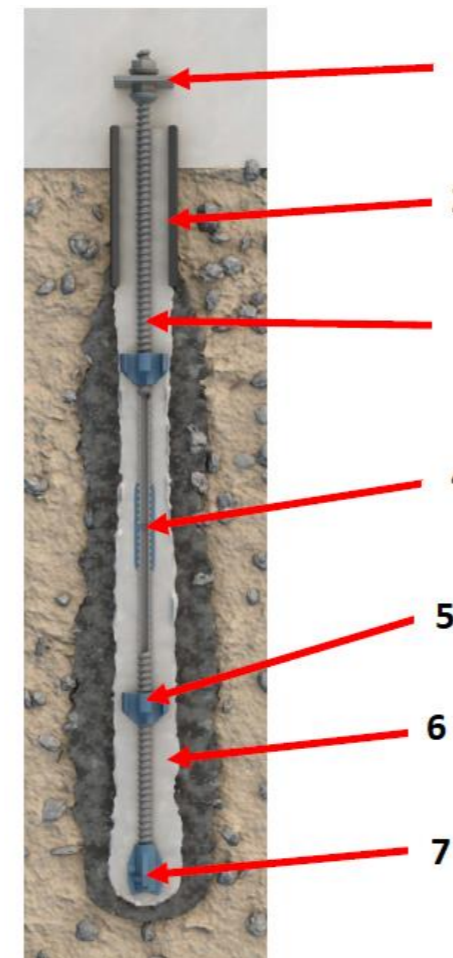
Dicha barra tiene 3 funciones que puede ejecutar en una sola fase de forma simultánea.

- Sirve como varillaje de perforación y no necesita entubación.
- Es la armadura del anclaje (Elemento portante).
- Realiza la función de tubería de inyección.

Existen muchas ventajas en el uso de este sistema:

- Grandes rendimientos.
- Sin necesidad de entubación.
- Mejora del terreno circundante, aumento del diámetro del bulbo y también la adherencia entre el bulbo y el terreno.
- No necesita maquinaria especial de perforación.
- Se puede utilizar para perforaciones que tengan distinta naturaleza.

El anclaje está formado por distintas piezas que se definen a continuación:



1. CONEXIÓN EN CABEZA: Transmisión de cargas pertenecientes a la estructura.
2. TUBO DE ACERO O PE-HD (Polietileno): Para la protección frente a la corrosión en la transición estructura/subsuelo.
3. BARRA HUECA DE ACERO: 3 funciones.
4. MANGUITO DE CONEXIÓN CON TOPE ESTRUCTURAL: Conexión entre barras.
5. CENTRADOR: Permite asegurar el recubrimiento de la barra e impide el desvío de la barra.
6. BULBO INYECTADO: Transferencia de carga al subsuelo y protección frente a la corrosión.
7. BOCA DE PERFORACIÓN: Existen distintas bocas dependiendo del tipo de suelo. En este caso será la boca de arcilla.

Ilustración 34: Piezas utilizadas en el sistema de anclaje. Fuente: Proporcionado por Ischebeck Ibérica S.L.

En el proceso de ejecución del anclaje, primero se realiza la perforación a rotopercusión con una inyección estabilizadora (lechada de cemento con una relación de agua-cemento alta, alrededor de 0,7) que contribuye a refrigerar las bocas de perforación, aumentando la durabilidad de estas y la eficiencia.

Esta inyección también realiza un lavado de la perforación, elevando el detritus hacia el exterior, y además estabiliza las paredes de la perforación (efecto similar a la bentonita).

A continuación, se inyecta con una lechada de cemento más densa (a/c entre 0,4 y 0,5), con un movimiento de rotación, desde el fondo de la excavación hasta que rebose la lechada por la boca del taladro.



El resultado del bulbo inyectado se muestra en la ilustración 35. Se puede observar el aumento de diámetro del bulbo explicado en el apartado del cálculo de los anclajes, donde dependiendo del material del terreno se tiene un aumento del diámetro.

- D + 75 mm en gravas
- D + 50 mm en arenas
- D + 25 mm en suelos cohesivos (Escogido en el cálculo)
- D + 10 mm en roca

donde D = Diámetro de la perforación.

Ilustración 35: Bulbo inyectado. Fuente: Ischebeck Ibérica.

Por último, la maquinaria requerida para la ejecución de esta solución consistirá en la hinca y extracción de las tablestacas, además del tesado y ejecución de los anclajes.

Para la hinca y extracción de las tablestacas se ejecutará por vibración generada por masas excéntricas, pero con un impacto de ruidos y vibraciones controlables, es decir, con un vibrador de par variable.

Este método es válido hasta para terrenos con compacidades densas y consistencias firmes, con rendimientos altos comparados con los métodos de golpeo o de presión.

- **Mäkler:** Para la hinca de las tablestacas se ejecutará con una Mäkler con equipo de vibración tipo \*MS 16 HFMV o similar, accionado por vehículo portador con mástil telescópico tipo TGL 350 o similar. Se puede llegar a hincar hasta tablestacas de 19 metros de longitud.



Ilustración 36: Mäkler. Fuente: Página web de Ischebeck Ibérica.

- **Colgada:** Para la extracción de las tablestacas se utilizará la grúa o colgada con equipo de vibración tipo MÜLLER MS-24 HFV o similar, con grupo hidráulico acoplado a grúa estacionada.



Ilustración 37: Grúa colgada. Fuente: Página web Ischebeck Ibérica.

- Equipos necesarios para la perforación del anclaje:

- Carro de perforación provisto con un martillo (en cabeza) de rotopercusión.



Ilustración 38: Carro para ejecución de anclaje. Fuente: Empresa Ischebeck Ibérica.

- Cabezal de lavado o inyección que conecta martillo, estación de mezclado-bombeo y barra autopercutora.



Ilustración 39: Cabezal de lavado y martillo de rotopercusión. Fuente: Ischebeck Ibérica.

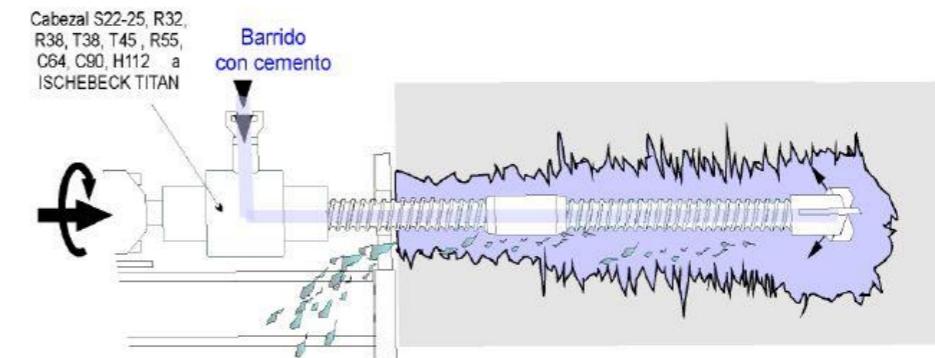


Ilustración 40: Esquema de conexión entre elementos durante la perforación inyección. Fuente: Ischebeck Ibérica.

- Estación de mezclado y bombeo de la inyección (fabricación y bombeo de lechada de cemento). Están compuestos por equipos de dosificación de agua, tanques de mezclado con turbomezclador, tanques de almacenamiento con agitador, turbomezclador y bomba de doble émbolo.

- Equipos utilizados para la excavación:

- Retroexcavadora de neumáticos con pala cargadora frontal: Tendrán el objetivo de excavar el terreno y depositarlo posteriormente con la pala cargadora. La potencia será de 150 caballos de vapor con una capacidad de la cuchara retroexcavadora de 1,40 m<sup>3</sup>.



Ilustración 41: Retroexcavadora. Fuente: Ischebeck Ibérica.

- Camiones: Transportará el material excavado hasta la zona de vertido. Tendrá una capacidad de transportar 27 metros cúbicos y tendrá 3 ejes.



Ilustración 42: Camión. Fuente: Google

### 6.3. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

El procedimiento a seguir para la ejecución de los sótanos se dividirá en las siguientes fases:

- **REPLANTEO**
- **TRANSPORTE DEL MATERIAL DE TABLESTACADO E HINCA DE TABLESTACAS**
- **SISTEMAS DE BOMBEO INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA.**
- **INICIO DE EXCAVACIÓN DEL TERRENO**
- **INSTALACIÓN DE LOS ANCLAJES.**
- **VACIADO COMPLETO DEL SOLAR**
- **EJECUCIÓN DE LAS DOS PLANTAS DE SÓTANO Y DEL FORJADO SUPERIOR.**
- **EXTRACCIÓN DEL TABLESTACADO Y FINALIZACIÓN DE OBRAS.**

#### REPLANTEO

En primer lugar, se deberá realizar el replanteo en el lugar donde se construirán los dos sótanos indicando también la línea de hinca que deberá servir de guía para formar el recinto con las tablestacas hincadas. Se deberá comprobar la no afección a redes o acometidas de servicios u otros elementos ocultos.

A continuación se realizaría el desbroce de la parcela y la eliminación y/o marcado de gálbo de tendidos aéreos si existen, como mínimo a 5.00 m de la zona de trabajo con la maquinaria de hinca.

El recinto tiene un perímetro de 207,20 metros y se proyecta alcanzar una profundidad de excavación de 7,75 metros

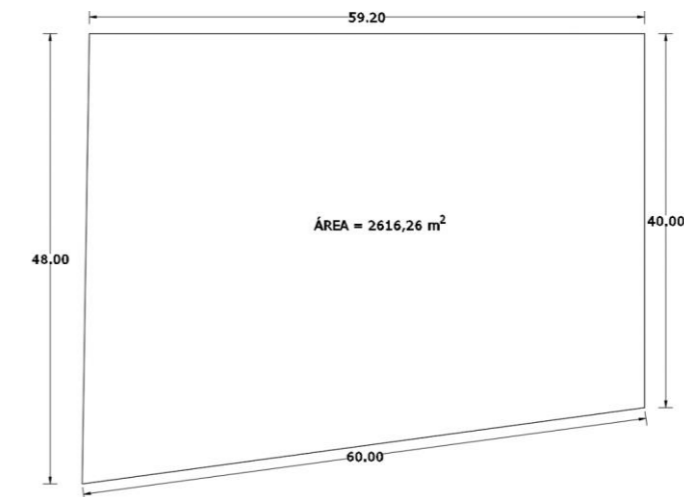


Ilustración 43: Perímetro y área del recinto. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las dimensiones del recinto, al no ajustarse al ancho de la tablestaca se girarán cada una de ellas para ajustarse lo máximo posible en las esquinas de la parcela. En la esquina inferior izquierda, como tiene un ángulo inferior a 90 grados (81 grados), se colocará una tablestaca especial para evitar una separación excesiva de las tablestacas.

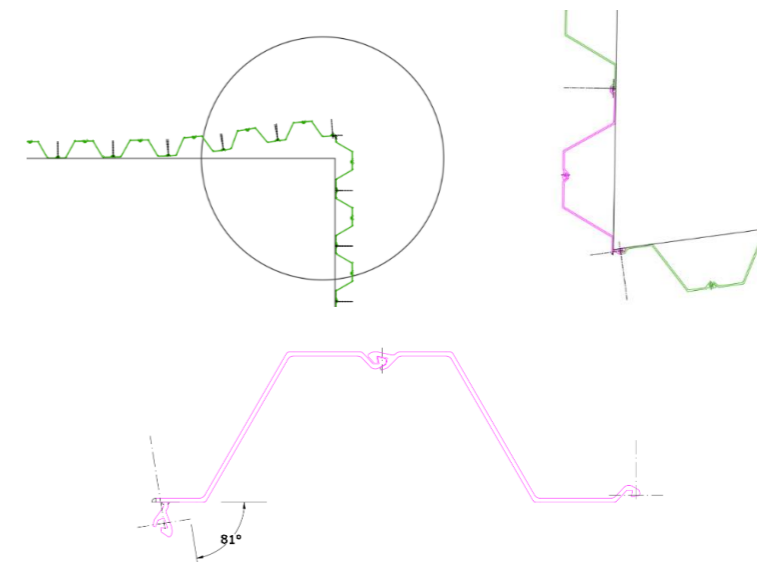


Ilustración 44: Ajuste de tablestacas al recinto y tablestaca especial. Fuente: Elaboración propia.

Dicha tablestaca especial consistirá en una Hoesch 1805 en la que se le soldará un machambre con una inclinación de 81 grados.

### TRANSPORTE DEL MATERIAL DE TABLESTACADO E HINCA DE TABLESTACAS

Una vez marcada la línea de tablestacas y replanteada la obra se deberá realizar la medición del número de tablestacas distinguiendo entre tablestacas normales, esquineras y especiales para el transporte del material.

- 178 Normales
- 3 Esquineras:
- 1 Especial

Además, se deberán cargar el material correspondiente para ejecutar 90 anclajes, y las correspondientes vigas de reparto HEB 240.

Se descargará y acopiará el material en un lugar cercano al tajo, con una ubicación ordenada que evite al máximo el traslado de la maquinaria. La buena disposición del acopio mejoraría los rendimientos de la maquinaria de hinca.

A continuación, se procedería a la preparación de la plataforma de trabajo nivelada y labores para permitir la accesibilidad de la maquinaria a la cota de hinca deseada, es decir, a la cota 0,00 metros.

Seguidamente se hincarán las tablestacas con la Mäkler a la cota 0.00 m, dejando 40 cm libres por la parte superior para sujetar con la pinza de la vibradora el borde superior de la tablestaca.

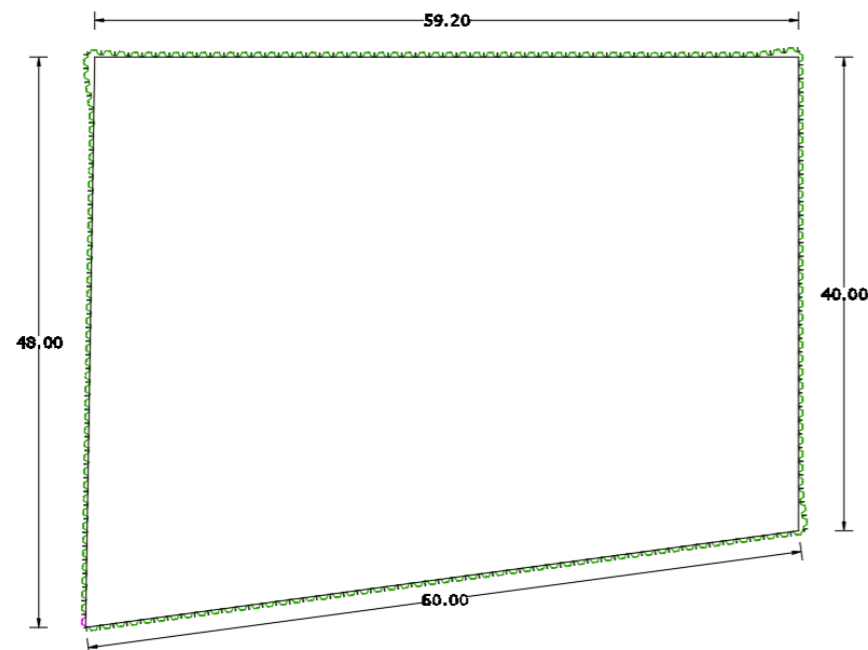


Ilustración 45: Disposición del tablestacado. Fuente: Elaboración propia.

Maquinaria de hinca: Equipo de vibración tipo MS 16 HFMV o similar, accionado por vehículo portador con mástil telescópico tipo TGL 350 o similar.

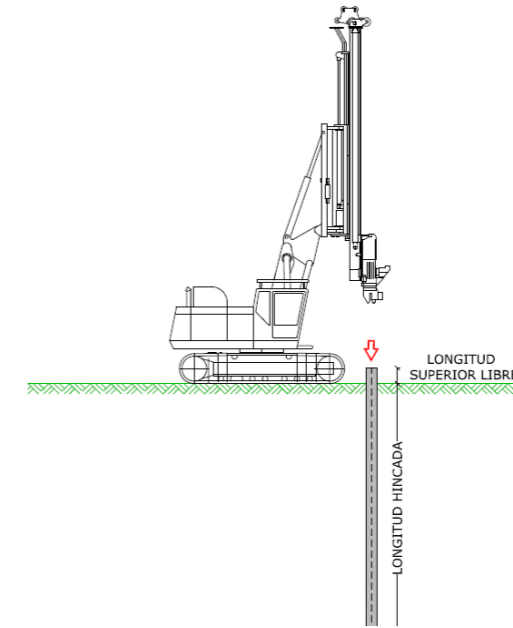


Ilustración 46: Mäkler (Maquinaria de hinca. Fuente: Ischebeck Ibérica.

Si en el momento de la hinca se observa que se tiene una gran dificultad de clavar las tablestacas en algún tramo del recinto debido a la pequeña capa de arenas o gravas encostradas o cementadas, sería necesario realizar perforaciones para facilitar dicha hinca. Se perforaría con la Mäkler mediante un tornillo sin fin.

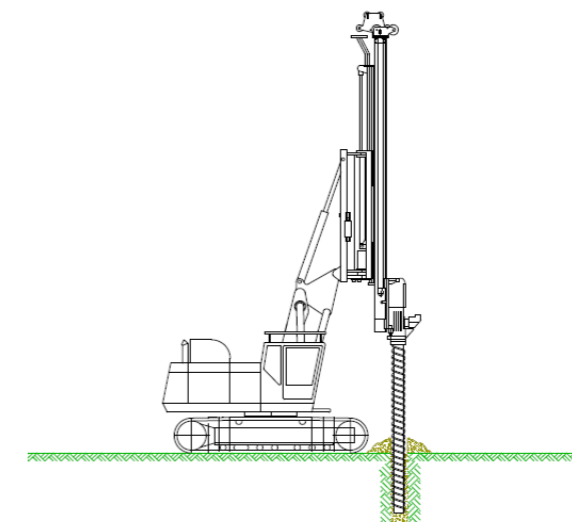


Ilustración 47: Mäkler con tornillo sin fin. Fuente: Ischebeck Ibérica.

### SISTEMAS DE BOMBEO, INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA

Para el agotamiento del agua como ya se ha dicho en apartados anteriores, los pozos se ejecutarán con sistemas de perforación OD (conocidos como sistemas de perforación Dual), perforando en continuo y de manera simultánea con tubería auxiliar de revestimiento, garantizando el diámetro en toda la longitud, y evitando el uso de lodos bentonínicos.

Seguidamente, se introducirá la tubería de PVC con el ranurado adecuado y empaque de prefiltro.

Los pozos estarán conectados a las conducciones que se situarán alrededor de todo el recinto y recogerán el agua bombeada de los 6 pozos distribuidos como se muestra en la siguiente imagen a modo de ejemplo.

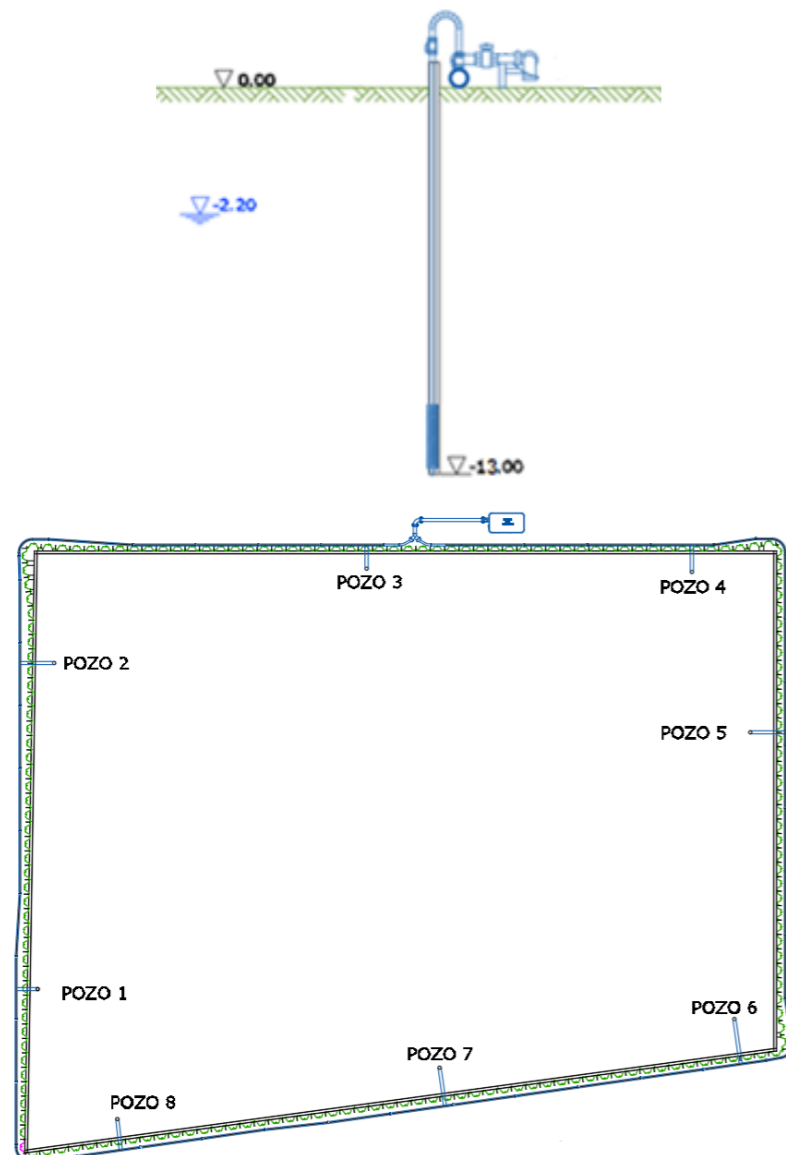


Ilustración 48: Distribución de pozos. Fuente: Elaboración propia

Antes de proceder a la excavación inicial se deberá rebajar el nivel freático al menos 1,00 metros por debajo de la cota del anclaje, y 0,50 metros de la excavación inicial.



Ilustración 49: Ejemplo de pozos. Fuente: Empresa Ferrer S.L.

### INICIO DE EXCAVACIÓN DEL TERRENO

Una vez rebajado el nivel freático a la cota -3,00 metros se realizaría la excavación inicial retirando completamente la primera capa de rellenos y llegando hasta la cota -2,50 metros para poder instalar los anclajes a los 2,00 metros de profundidad.

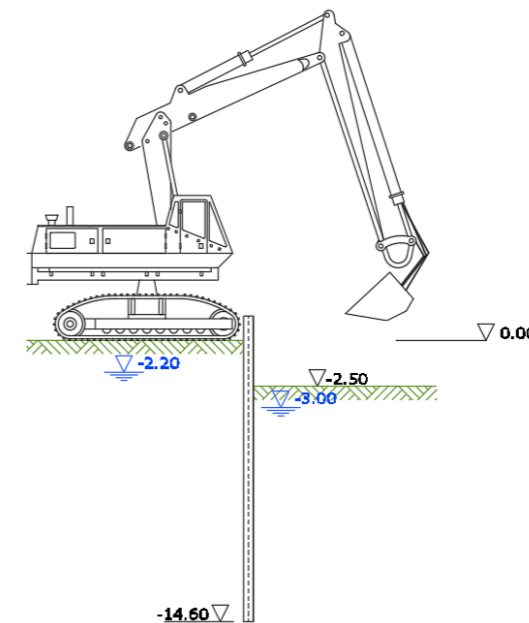


Ilustración 50: Excavación inicial. Fuente: Elaboración propia.

### INSTALACIÓN DE LOS ANCLAJES

Antes de la ejecución de los anclajes se preparará:

- Una plataforma de 9 m de ancho aproximadamente 0,50 metros por debajo de la cota de perforación de los anclajes con la suficiente capacidad portante para que no se hunda el carro de perforación (10-12 t).
- Apertura de ventanas mediante corte de las tablestacas afectadas para el paso de los anclajes.

Seguidamente se montará el nivel de arriostramiento mediante anclajes autoperforantes Ischebeck Titan a la cota -2.00 m de 24.00 m de longitud total, divididos en 15.00 m de bulbo, 8.00 m de longitud libre y 1.00 m de barra libre exterior para poder realizar el posterior tesado.

La armadura consistirá en barra Ischebeck Titan 73/56 suministrada en tramos empalmados en obra mediante manguitos de conexión. La cabeza de perforación tendrá 200 mm de diámetro. Los anclajes se colocarán con una separación en planta de 2.30 metros y con una inclinación aproximada de 24º respecto a la horizontal.

Se deberá montar la respectiva placa de apoyo en cada anclaje, y de la viga de reparto compuesta por dos perfiles HEB -240 empresillados. Pasados 7 días de fraguado de la inyección, se realizará al tesado del anclaje, aplicando una carga de tesado de 50 toneladas.

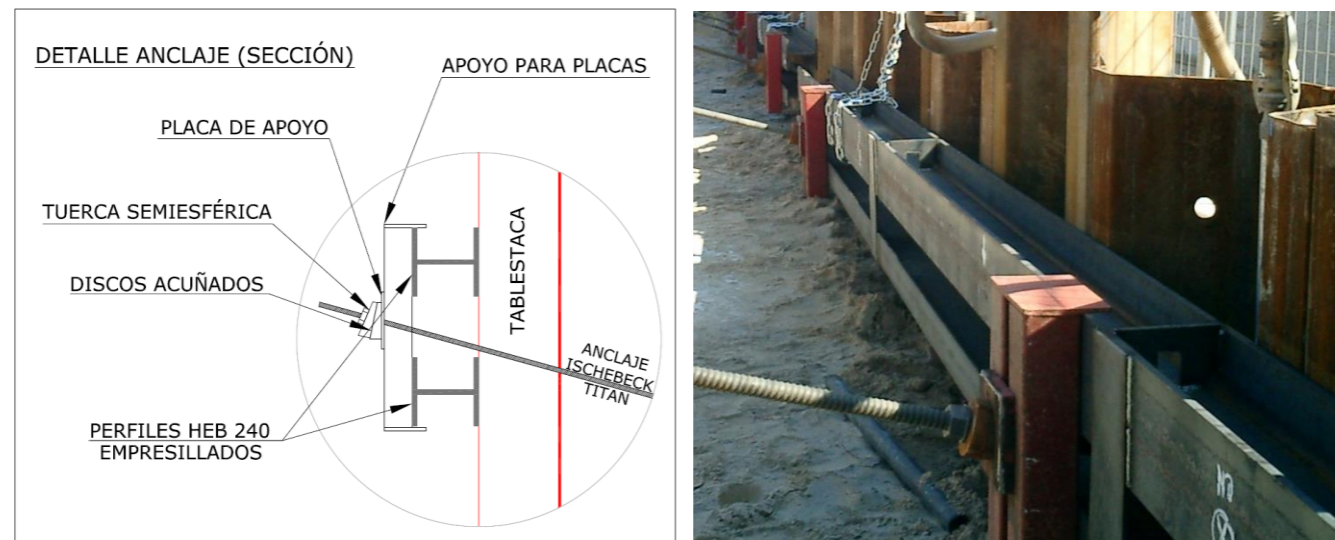


Ilustración 51: Esquema de los elementos del anclaje. Fuente: Ischebeck Ibérica

### VACIADO COMPLETO DEL SOLAR

Para terminar con el proceso de excavación se excavará hasta la cota final -7,75 metros, habiendo rebajado anteriormente el nivel freático hasta la cota -8,25 metros mediante los pozos instalados.

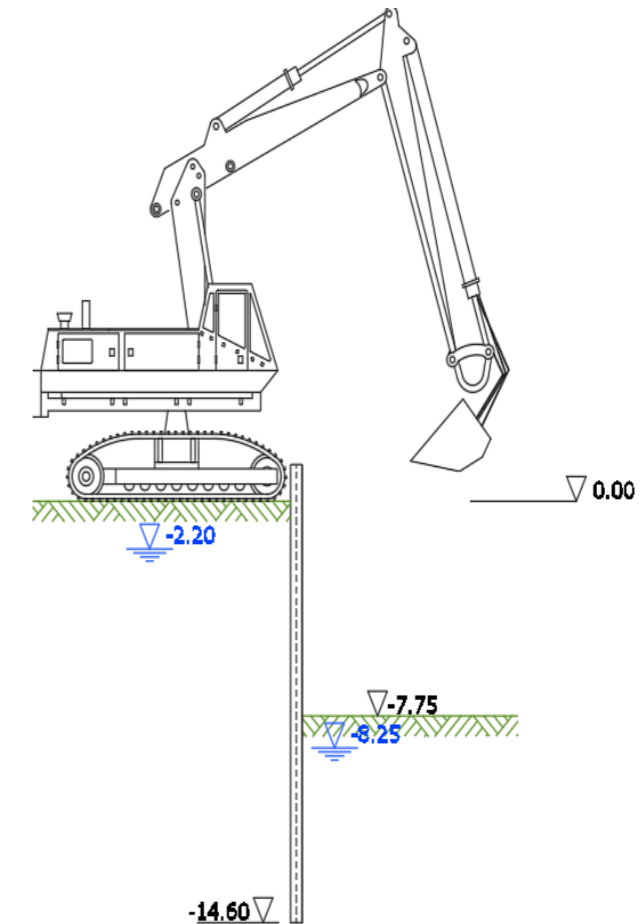
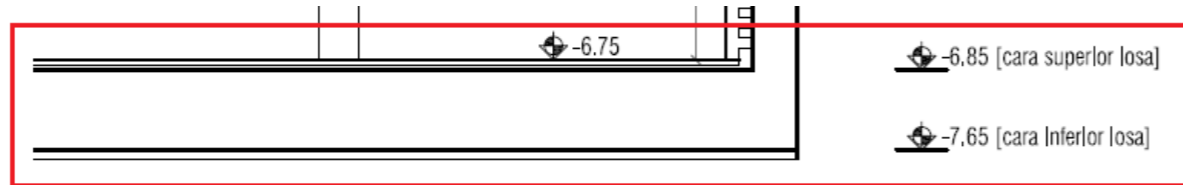


Ilustración 52: Excavación final. Fuente: Elaboración propia.

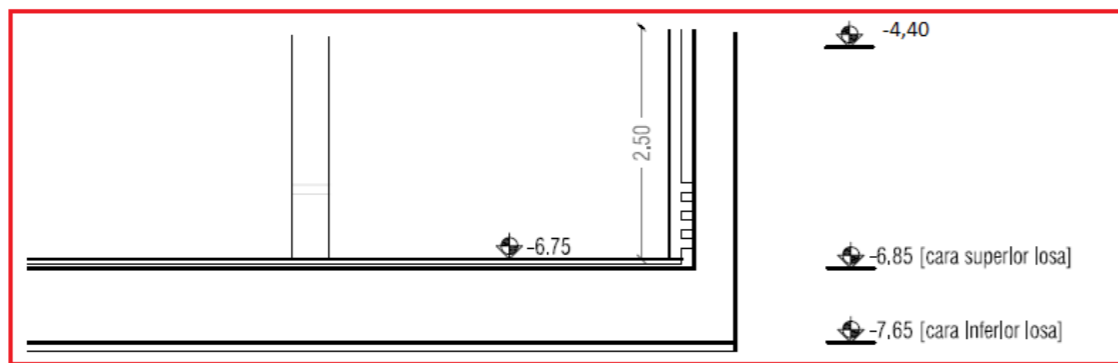
**EJECUCIÓN DE LAS DOS PLANTAS DE SÓTANO Y DEL FORJADO SUPERIOR**

Con la excavación finalizada hasta la cota requerida se procedería al vertido del hormigón de limpieza de 10 cm de espesor, y a continuación, la colocación de la armadura, hormigonado y vibrado de la losa.

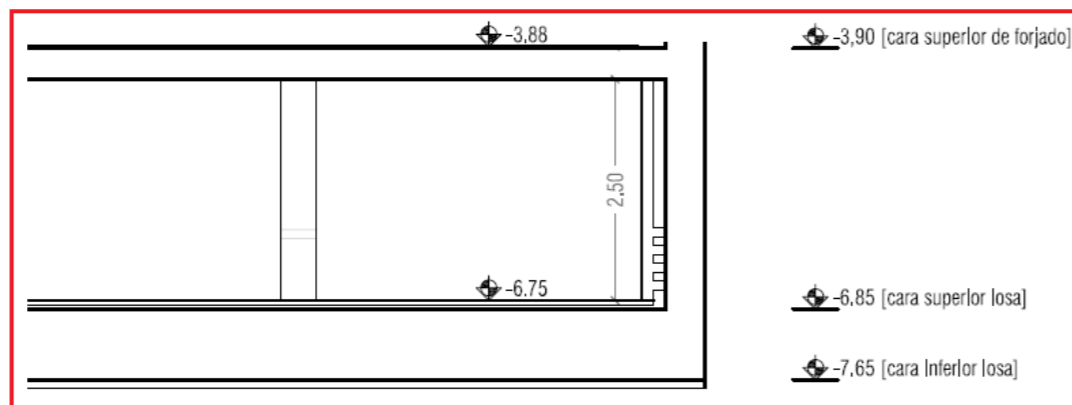


Dicha losa se hormigona contra la tablestaca hasta la cota -6,85 metros. Se aplicará desencofrante con láminas finas de porexpán.

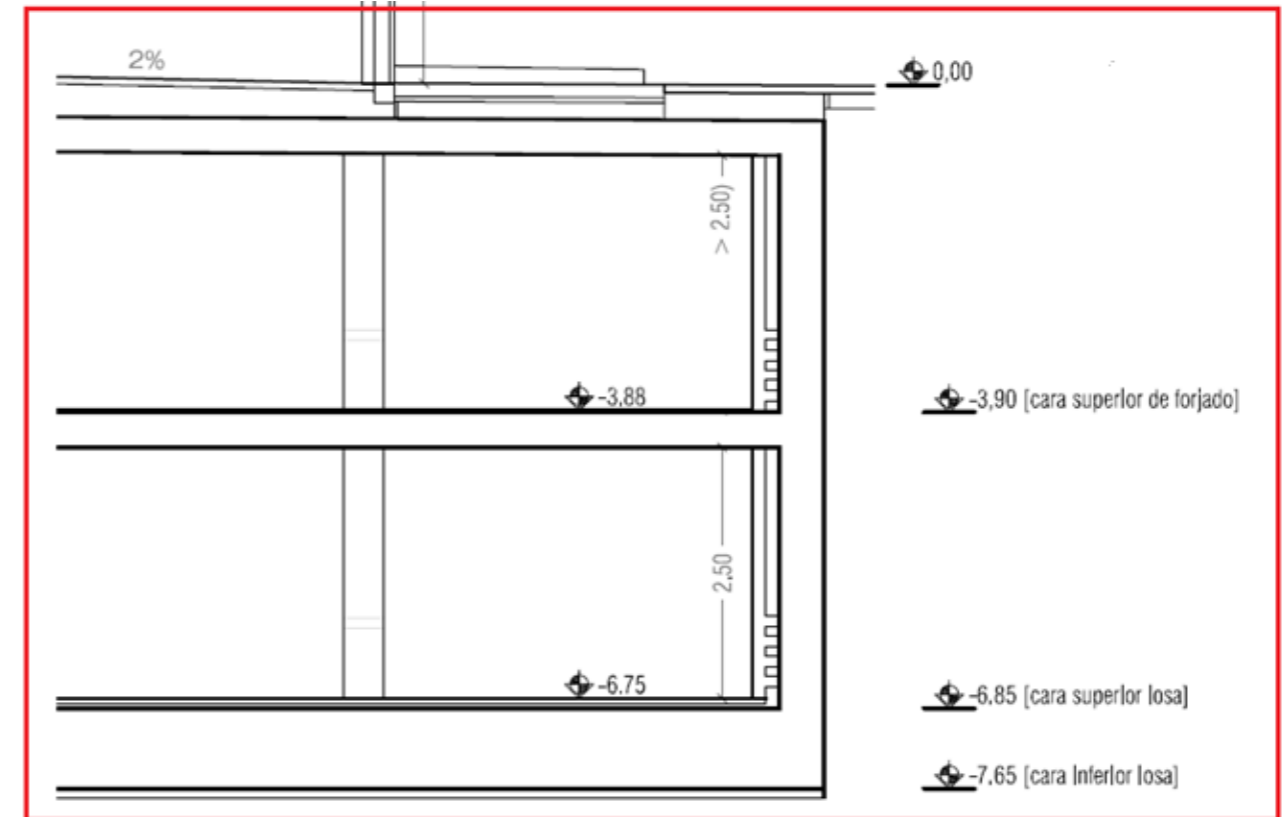
De la misma forma, para el muro de sótano también se colocará la armadura necesaria, el encofrado a una cara y el hormigonado contra la tablestaca hasta la cota -4,40 metros.



El paso siguiente será ejecutar el forjado inferior con un espesor de 35 cm, colocando los apeos, encofrado, armadura correspondiente y hormigonado hasta la cota -3,90 metros (Cota superior de losa).



A continuación, se deberían ejecutar los trabajos correspondientes hasta la cota -2,50 metros para cortar el anclaje y retirar los elementos como las placas de anclaje o las vigas de reparto HEB 240, que pueden reutilizarse, y poder finalizar el muro de sótano, sin ningún obstáculo, y finalizar la obra con el forjado superior hasta la cota 0,00 m.



En el caso de que entre los elementos ejecutados y la tablestaca quede un espacio, éste deberá rellenarse y compactarse para evitar el asiento de la parte exterior de la excavación.



**EXTRACCIÓN DEL TABLESTACADO Y FINALIZACIÓN DE OBRAS.**

Finalmente, se procederá a la extracción de las tablestacas utilizando un equipo distinto al de la hinca, es decir, consistirá en un equipo de vibración tipo MÜLLER MS-24 HFV o similar, con grupo hidráulico acoplado a grúa estacionada. Las características de la grúa, su potencia y tonelaje de forma genérica deberá contar con un mínimo de 22 a 25 t de tiro en punta, tomando la precaución de situar la grúa, el grupo y el acopio a una distancia considerable del borde de la excavación para evitar sobrecargar el borde de la misma o los elementos ejecutados.

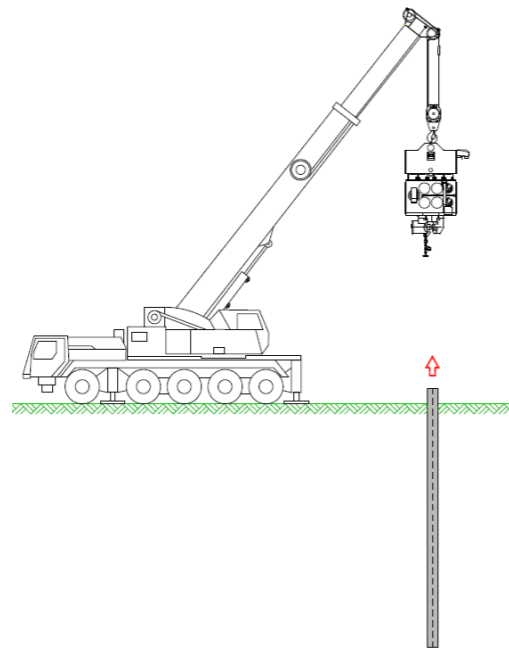


Ilustración 53: Extracción de las tablestacas. Fuente: Elaboración propia.

Se extraerán las tablestacas con esta maquinaria para evitar circunstancias de la obra peligrosas por temas de espacio, es decir, al estar ya construido el sótano y tener menor espacio hábil para que la maquinaria con brazo telescópico (MÄKLER) pueda extraer las tablestacas, será preferible que la extracción se realice mediante grúa (COLGADA).

*Comprobación de la flotación de la estructura*

Una vez explicado el procedimiento de construcción, y ejecutadas las dos plantas de sótano se comprueba en este apartado la flotación de la estructura.

La flotación de los sótanos y edificios dependerá de si la subpresión que genera el agua del nivel freático bajo la losa de cimentación es mayor que las cargas gravitatorias. La seguridad frente a la flotación se determina a partir de la siguiente expresión:

$$FS = \frac{W + F}{\gamma_w \cdot h \cdot A}$$

Donde,

$W$  es el peso de la estructura.

$F$  es el rozamiento lateral del terreno en contacto con las pantallas.

$\gamma_w$  es el peso específico del agua, se considerará de 10 kN/m<sup>3</sup>.

$h$  es la profundidad de rebaje del nivel freático.

$A$  es el área en planta de la estructura.

Para el presente estudio, los valores de estos parámetros serán:

$$W = (55 \cdot 48 \cdot 2,60 + 206 \cdot 7,75 \cdot 0,45) \cdot 25 = (6.864 + 1.197,37) \cdot 25 = 201.534,25 \text{ kN}$$

$$F = 0 \text{ Se considerará nulo, estando del lado de la seguridad.}$$

$$\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3; \quad h = 5,55 \text{ m}; \quad A = 2.640 \text{ m}^2$$

$W$ (kN)	$F$	$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	$h$ (m)	$A$ (m <sup>2</sup> )
201.534,25	0	10	5,55	2.640

Finalmente, el coeficiente FS resulta:

$$FS = 1,39$$

Esto significa que no se producirá la flotación una vez ejecutadas las dos plantas de sótano y dejado de bombear el agua. Además, en el cálculo del peso de la estructura no se ha contabilizado el rozamiento lateral, las estructuras interiores, la sobrecarga de uso...

Añadir que también se construirán edificaciones encima de las plantas de sótano, asegurando que la estructura no flotará debido a la subpresión del agua.



## 7. RESUMEN Y CONCLUSIÓN

En el presente Trabajo Final de Máster (TFM) se ha realizado el estudio de soluciones para la ejecución del recinto subterráneo de un aparcamiento en la calle Valencia, nº 30 de Sedaví (Valencia).

En primer lugar, se ha realizado una visita a la parcela objeto de este estudio y se ha comprobado la necesidad de plazas de aparcamiento que tiene esta zona de la población de Sedaví, observando la inexistencia de parking público y privado alrededor de la ubicación donde se desea construir el parking subterráneo.

Además, la parcela ubicada en la zona de actuación es utilizada como aparcamiento por el vecindario, confirmando la exigencia de la construcción de dos sótanos.

La primera fase del trabajo de gabinete ha consistido en analizar el estudio geotécnico realizado en la parcela. Se ha estudiado el tipo de terreno ubicado en la parcela y sus características y en base a los resultados de los ensayos ejecutados y distintas recomendaciones se han podido determinar los parámetros resistentes del suelo.

Una vez conocidos los materiales del subsuelo y sus parámetros geotécnicos resistentes, se ha comprobado la imposibilidad de realizar el vaciado de la parcela sin emplear un sistema de contención del terreno.

Se ha realizado una exhaustiva revisión de las distintas técnicas disponibles, observando en cada una de ellas sus ventajas e inconvenientes y su posibilidad de ejecutarlas en este caso concreto.

En cada una de las alternativas a estudiar se han explicado las metodologías utilizadas para su cálculo y posterior valoración.

En el cálculo de las pantallas para la contención del terreno se ha utilizado básicamente el programa DC-Pit basándose en las recomendaciones del **Eurocódigo 7** (EC-7), de la **EAU** Recommendations of the Committee for the Waterfront Structures-Harbours and Waterways y de la **EAB** Recommendations on Excavations (DGGT-German Geotechnical Society), además del Eurocódigo 3 para el cálculo seccional.

En una fase de preselección, se han desestimado las alternativas menos viables técnicamente por razones de espacio y de rendimientos. Una vez elegidas las posibles soluciones, se han analizado con mayor profundidad estas calculando sus necesidades de armado o anclajes. De tal forma que, estudiadas todas las opciones viables, se pueda comparar tanto económicamente como técnica y constructivamente.

A continuación, se ha realizado una valoración económica general de cada una de ellas, incluyendo el coste tanto de la maquinaria a utilizar como su procedimiento de construcción, evitando la valoración de partes comunes como sería, la excavación a realizar o el agotamiento del nivel freático.

Finalmente, comparando las soluciones estudiadas, se ha elegido como contención, la de realizar una pantalla formada por tablestacas machihembradas entre ellas y arriostradas mediante un nivel de anclajes.

Esta alternativa se ha desarrollado más ampliamente definiendo los sistemas empleados en esta, además de su procedimiento de ejecución y su valoración económica final.

El coste de la solución recomendada contabilizando la excavación y el rebaje del nivel freático resultaría un total de **646.478 €**.

En este punto se hace necesario remarcar las siguientes conclusiones a las que el alumno ha llegado tras la elaboración del presente documento.

En lo que se refiere a las soluciones manejadas, la comparación realizada durante el presente estudio de soluciones básicamente se ha centrado en las dos opciones más viables para la ejecución de la contención:

- Muro pantalla de hormigón armado vs. Tablestacas

Las dos alternativas tienen sus ventajas e inconvenientes y según las distintas condiciones geotécnicas y de obra puede resultar una más eficiente que la otra, pero analizando desde una visión general, se puede afirmar que:

- En los casos donde el nivel freático se encuentra muy cerca de la superficie, tanto el muro pantalla como el tablestacado ofrece una buena estanqueidad frente al paso del agua.
- En los casos donde el terreno sea rocoso o con materiales donde resultan ensayos SPT con golpes mayores a 50 durante grandes espesores y a profundidades grandes, sólo se puede ejecutar mediante muros pantalla de hormigón armado, eliminando directamente la alternativa del tablestacado.
- Con la alternativa del tablestacado se puede iniciar el vaciado del recinto mucho antes que con la alternativa de muros pantalla debido a que con este último se debe esperar a que el hormigón obtenga el 100 % de resistencia.
- Cuanto mayor sea la necesidad de empotramiento, mayor diferencia existirá en el coste entre la solución con tablestacas y la de muro pantalla, al necesitar menor cantidad de materiales en el muro de sótano.

- Arriostramiento metálico vs. Arriostramiento mediante anclajes al terreno.

De la misma forma, las dos opciones tienen sus ventajas e inconvenientes, pero analizando desde una visión general, se puede afirmar que:

- Para recintos con grandes dimensiones, el arriostramiento metálico mediante celosías es una alternativa que reduce mucho los rendimientos al obstaculizar la excavación, además de la dificultad de montaje que este implica.  
  
Los anclajes al terreno eliminan este problema aumentando de manera significativa los rendimientos de la obra, y sin necesidad de retirar el anclaje. Simplemente se cortan y se sigue con la ejecución de la obra.  
  
Evidentemente, aumentando el número y niveles de anclaje resultan menos económicos que el arriostramiento mediante celosías.
- Para recintos con dimensiones más reducidas con posibilidad de arriostar mediante perfiles simples soldados (HEB, HEM...) o mediante codales resulta mucho más económico que el anclaje.



Por otro lado, en el presente Trabajo Final de Máster (TFM) con el fin de contrastar los resultados obtenidos mediante las aplicaciones informáticas empleadas, es decir, el programa DC-Pit, y conocer el método que realiza en cada caso, se han ejecutado algunos cálculos manuales sencillos que han permitido concluir que se trata de un software que:

- Permite la aplicación de diversas normas y recomendaciones muy reconocidas a nivel internacional.
- Ofrece resultados del lado de la seguridad.
- Con el uso de este software se han podido comparar las distintas alternativas posibles utilizando distintos métodos para el predimensionamiento.

Con todo esto el alumno considera que se ha cumplido el doble fin de este trabajo, por un lado el objetivo académico de cumplir con el requisito necesario para obtener la titulación que defiende y, por otro lado, el técnico que consiste en solucionar el problema ingenieril dentro del ámbito profesional del Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Valencia, 5 de mayo de 2018

Fdo: José Muñoz Contell