

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA SOLICITUD DE UN ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO EN PLANTAS FOTOVOLTAICAS

Autores: Fernando Puell Marín¹, José Alberto López Chinarro²

¹ Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, ORBIS TERRARUM

² Ingeniero Geólogo y EuroGeólogo, ORBIS TERRARUM

Palabras clave: Plantas fotovoltaicas, Energías renovables, Geotecnia, Ensayos in situ, Tomografía eléctrica, Corrosividad, Pull Out Tests.

Resumen: Las plantas fotovoltaicas son instalaciones que normalmente ocupan una gran superficie de terreno. Esto puede dar lugar a que las condiciones geológicas y geotécnicas cambien dentro de la misma instalación. Por este motivo es necesario un correcto diseño de campaña geotécnica que reduzcan las incertidumbres geológicas. En este artículo se aportan recomendaciones basadas en la amplia experiencia de Orbis en estudios geotécnicos para plantas fotovoltaicas en numerosos países.

1 INTRODUCCIÓN

En este documento se dan recomendaciones para el diseño de una correcta campaña de investigación geológica y geotécnica para nuevas plantas solares fotovoltaicas, PV plants por sus siglas en inglés. Son recomendaciones basadas en la experiencia de ORBIS TERRARUM tras la investigación de más de 200 plantas solares en diversos países del mundo y más de 8.800 MW construidos.

La optimización de costes y plazos está presente en el tipo de investigaciones propuestas. Siempre es necesario un buen estudio geológico y geotécnico que acompañe al proyecto de una planta solar fotovoltaica para facilitar datos válidos para el diseño y para evitar riesgos y problemas a largo plazo durante la operación de la planta. No hay que olvidar, además, la necesidad formal o administrativa derivada de las garantías durante los procesos de financiación o compra-venta.

Entre los aspectos que, sin duda, debe recoger el estudio geotécnico se pueden mencionar:

- Zonificar los distintos tipos de terreno en función de la geología y acotar las zonas no válidas para la instalación de módulos.
- Definir la Viabilidad de la hinca para la sustentación de los módulos.
- Analizar el potencial de corrosión del suelo a los aceros y hormigones.
- Aportar datos de resistividad eléctrica para el diseño de la red de puesta a tierra.
- Aportar parámetros propios de la mecánica del suelo como la resistencia y la deformabilidad del terreno que se utilizarán en el diseño de las cimentaciones.
- Evaluar la excavabilidad del terreno y la maquinaria de excavación recomendada.
- Recomendar la inclinación de taludes que sean estables para las excavaciones.
- Proporcionar tensiones admisibles para cimentaciones superficiales.
- Evaluar la resistencia de cimentaciones profundas que serán confirmadas con ensayos del tipo pull-out.
- Detectar riesgos geológicos o del propio terreno como sismo, colapsabilidad, inundabilidad, zonas erosionables, deslizamientos de laderas preexistentes, karst, etc.
- Detectar rellenos antrópicos o posibles contaminaciones del terreno.
- Detectar la posición del nivel freático y definir los principales aspectos hidrogeológicos.

- Conocer la resistividad térmica del terreno natural con diferentes grados de humedad.

En los siguientes apartados se analizan los reconocimientos de campo, los ensayos de laboratorio y el contenido de los informes, aportando una medición que pueda servir a los promotores y desarrolladores de las plantas fotovoltaicas como primera aproximación a la hora de solicitar un presupuesto de estudio geotécnico.

En ocasiones estos estudios se deberán completar con estudios específicos de líneas de transmisión, subestaciones eléctricas o caminos de acceso hasta la planta, todos ellos generalmente sujetos a algún tipo de regulación local.

2 RECONOCIMIENTOS DE CAMPO

2.1 Levantamiento geológico y calicatas

Será necesario realizar un levantamiento geológico de la superficie, basado en la geología regional, y apoyándose en los afloramientos de los distintos tipos de terreno, en los reconocimientos directos, y en los resultados de otras técnicas indirectas de tipo geofísico como la tomografía eléctrica. En los afloramientos rocosos se realizarán estaciones geomecánicas para valorar el grado de meteorización, la fracturación y la estructura del macizo rocoso.

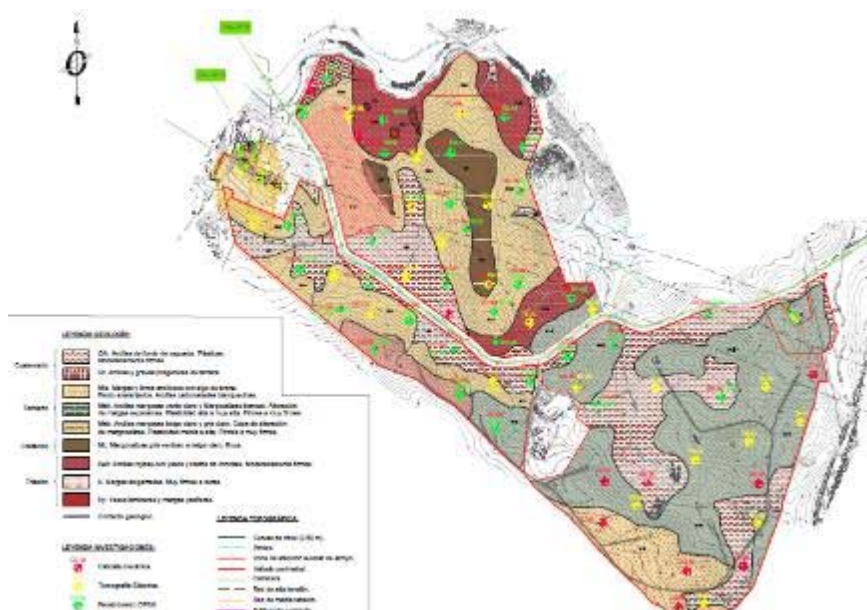


Fig. 1: Cartografía Geológica de detalle realizada por ORBIS TERRARUM.

Los reconocimientos directos suelen realizarse mediante calicatas mecánicas hasta 3,5 m de profundidad de forma que se supere la profundidad de hincado de los futuros perfiles metálicos que, en la práctica, sirven de sostenimiento a los paneles fotovoltaicos y que permitan conocer el terreno sobre el que se apoyarán otros elementos principales de las instalaciones como los inversores o pequeños edificios auxiliares. Durante la ejecución de las calicatas, el geólogo tomará muestras representativas

del terreno y registrará la geología y aspectos medioambientales como rellenos antrópicos o una eventual contaminación del terreno. En el caso de encontrar agua, se tomarán muestras de agua para ensayar la agresividad de las mismas.



Fig. 1: Detalle de calicata mecánica para inspección y toma de muestras del terreno

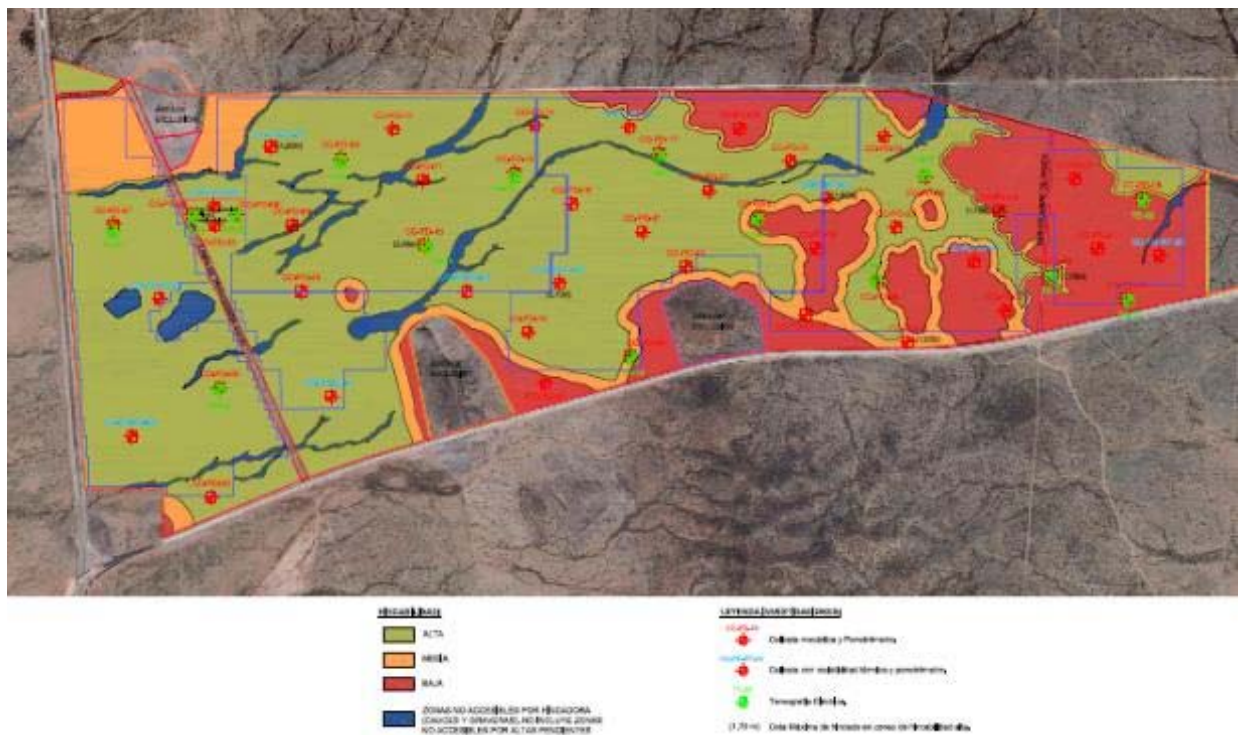


Fig. 2: Plano de viabilidad de hinca realizado por ORBIS TERRARUM

Aunque no es habitual, se pueden complementar las calicatas con sondeos profundos con recuperación de testigo, ensayos de infiltración en determinadas circunstancias, ensayos de sísmica de refracción y pasiva tipo ReMi para emplazamientos de alto riesgo sísmico, o incluso el empleo de georadar. Concretamente, Orbis ha empleado el georadar para la detección de restos arqueológicos y servicios enterrados.

Para prever la ubicación de los reconocimientos habrá que conocer los posibles servicios enterrados existentes, previo al inicio de los reconocimientos, y en el caso de las calicatas dejarlas adecuadamente tapadas a la finalización.

2.2 Resistencia del terreno a la penetración dinámica

Con el fin de investigar la posibilidad de hinca y zonificar el terreno a estudiar, el elemento más idóneo por economía y facilidad de ejecución es el penetrómetro dinámico, y entre ellos es muy habitual emplear penetrómetros ligeros tipo Panda2 por su correlación con el valor del ensayo SPT, especialmente en terrenos de difícil acceso, o los penetrómetros pesados tipo DPSH si no se dispone de la anterior herramienta.

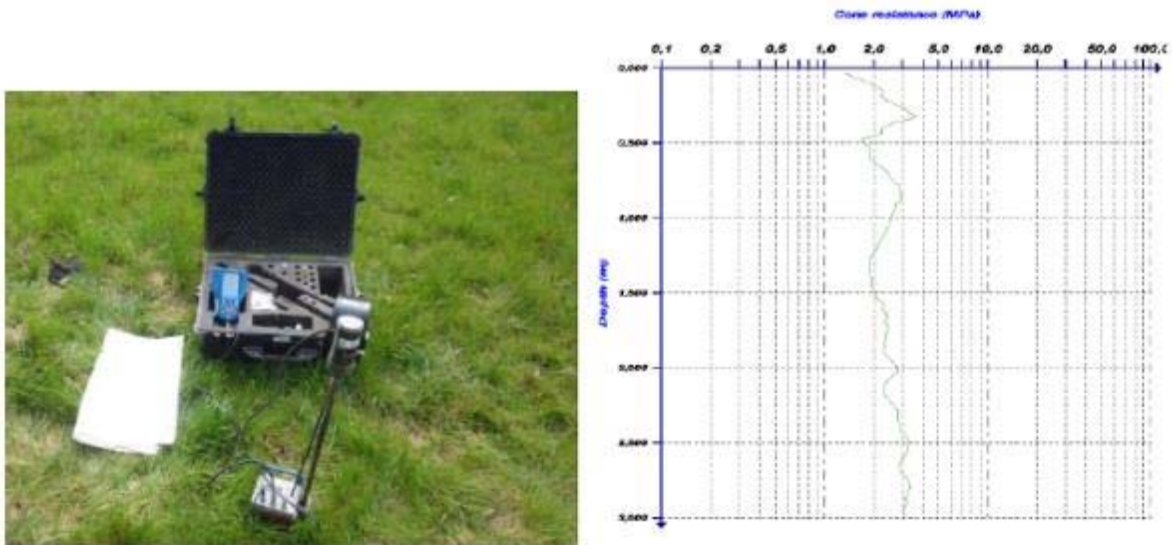


Fig. 3: Penetrómetro dinámico Panda2 y registro de penetración obtenido

Con el penetrómetro se puede conocer la resistencia a la penetración y aporta datos de la resistencia de los distintos niveles geológicos atravesados y observados en las calicatas. En este sentido es muy importante conocer el espesor de suelo vegetal ya que, aunque no se suele retirar, especialmente en parcelas llanas y horizontales, no se debe contar con su contribución al sostenimiento de los perfiles metálicos de cimentación y, por tanto, no se debe considerar esta profundidad del terreno como parte resistente.

2.3 Análisis de la Resistividad Eléctrica

La investigación más habitual y completa es la tomografía eléctrica con un dispositivo Wenner de 42 electrodos equidistantes. Este dispositivo permite, a lo largo de una alineación de la superficie donde se hace el ensayo, obtener datos para el diseño de la red de tierras y estimar la resistividad eléctrica de las distintas capas de terreno, que resulta ser un parámetro imprescindible para el conocimiento de la corrosión de los aceros. Adicionalmente, permite interpretar la geometría de los contactos geológicos y detecta la posición del nivel freático. Menos habitual son los ensayos S.E.V. porque tan solo aportan la distribución de la resistividad bajo un punto del terreno, si bien alcanzan mayor profundidad.



Fotografía 1: Ensayo geofísico de Tomografía Eléctrica

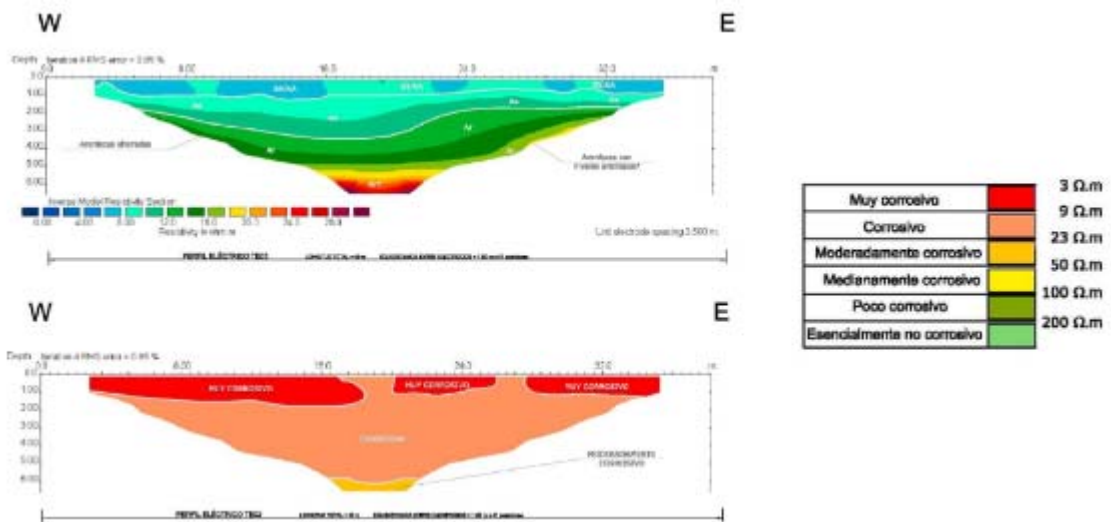


Fig. 4: Interpretación de perfil de Tomografía Eléctrica en términos geológicos y determinación del potencial de corrosividad catódica

Una alternativa de menor precisión consiste en determinar la resistividad eléctrica del terreno mediante un Sondeo Eléctrico Vertical mediante cuatripolo Wenner o Schlumberger.

La medida del valor de la resistividad eléctrica también puede ser establecida en laboratorio mediante el equipo de Soil-Box. En este caso la medida se realiza sobre muestras compactadas y posteriormente saturadas con agua destilada. Este parámetro es básico para la definición del potencial corrosivo según la metodología americana.



Fotografía 2: Detalle de medida de resistividad eléctrica en laboratorio mediante Soil-Box

2.4 Análisis de la Resistividad Térmica

Para el correcto diseño de las zanjas eléctricas de las instalaciones fotovoltaicas, es necesario determinar la resistividad (ρ) o conductividad (K) del terreno presente en la zona de estudio. Este valor debe ser determinado tanto en condiciones naturales como sobre muestras compactadas que formarán el relleno de dichas zanjas.

La determinación del valor de resistividad térmica, conductividad térmica y temperatura del terreno se realizará en campo en el interior de las calicatas. Dicha medida debe ir acompañada del valor de la humedad natural y la densidad del suelo, ya que estos valores condicionan enormemente las propiedades térmicas de los suelos.



Fotografía 3: Detalle de equipo para medidas de resistividad térmica

Este mismo parámetro se puede medir en laboratorio en muestras inalteradas o mediante la compactación de las muestras de suelo. En el último caso se compacta una muestra en un molde cilíndrico a la densidad máxima y humedad óptima de compactación, posteriormente se satura dicha muestra.

Una vez saturada se procede a realizar diversas medidas de la resistividad térmica a medida que la muestra pierde humedad para una misma densidad de compactación. Con el conjunto de los valores así obtenidos se determina la curva de resistividad térmica vs humedad (Thermal Resistivity Dry-Out Curve), la cual permite el correcto diseño de los materiales de rellenos de las zanjas eléctricas.

2.5 Caracterización Sísmica del Terreno en zonas de riesgo

En aquellos proyectos que se ubican en zonas con peligrosidad por sismicidad es necesario determinar, según la normativa sísmorresistente de cada país, los valores de cálculo correspondientes al terreno presente en la zona de estudio y las posibles implicaciones en las obras proyectadas.

El valor medio de la velocidad de propagación de las ondas S (V_s) para los 30 m más superficiales del terreno (V_{s30}) constituye un parámetro internacionalmente aceptado para la clasificación de suelos según las normas de la IBC (International Building Code) para la aplicación de coeficientes sísmorresistentes (Eurocódigo) o para análisis de licuefacción.



Fotografía 4: Perfil de sísmica pasiva

El método de la Sísmica Pasiva o ReMi (Refraction Microtremor) permite determinar de forma rápida y fiable los valores V_{s30} del terreno, además de obtener el modelo geológico y la distribución de rigidez en profundidad para poder caracterizar la respuesta del terreno frente a movimientos sísmicos o cíclicos.

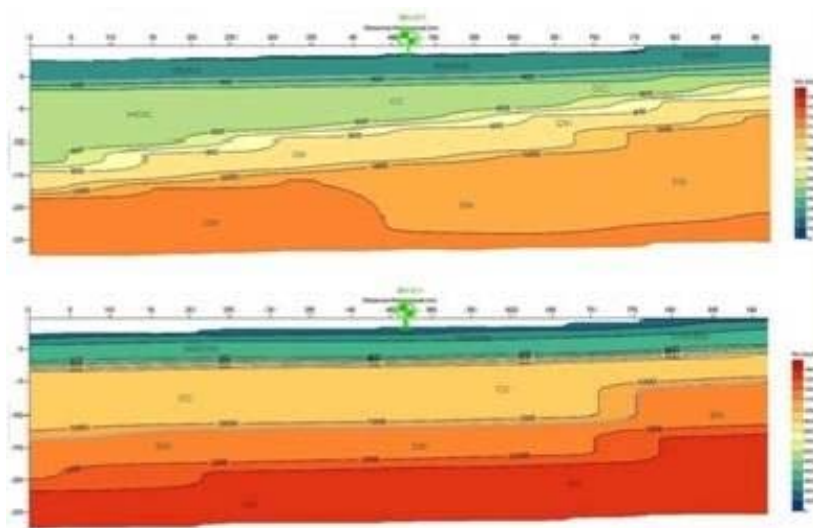


Fig. 5: Perfiles de rigidez y V_{s30} .

2.6 Análisis Deformabilidad del Terreno

Cuando se quiere conocer la categoría de la explanada de los caminos o investigar con mayor detalle la deformabilidad de cimentaciones superficiales se cuenta con herramientas como la placa dinámica

alemana, o el ensayo CBR in situ. Ambos permiten hacer varios ensayos de forma rápida y eficaz en un solo día, especialmente en el caso de terrenos no saturados.



Fig. 6: Detalle de ensayos de placa de carga dinámica Zorn y resultado gráfico

Si el terreno cercano a la superficie se encuentra saturado será necesario realizar ensayos de carga estática sobre placa, si bien son más lentos que los ensayos de placa dinámica, y necesitan disponer de un elemento de reacción como un camión. En el caso de terrenos arcillosos saturados y cargas superficiales que transmitan tensiones elevadas, circunstancia ésta que no se suele dar en este tipo de proyectos, habría que acudir, por ejemplo, a ensayos edométricos sobre muestras inalteradas para evaluar la consolidación con el tiempo.

2.7 Mediciones Recomendadas

En la siguiente tabla se aportan los reconocimientos mínimos que deben realizarse en función de la superficie, la cual se ha modificado ligeramente reduciéndose respecto anteriores versiones. Estos reconocimientos deberán incrementarse o disminuirse en función de la dificultad u homogeneidad geológica de cada parcela. Todos estos reconocimientos han de estar supervisados continuamente por un geólogo o ingeniero geólogo que conozca el fin buscado y los detalles del proyecto.

Tabla 1. Número de investigaciones recomendadas según el tamaño de la planta

SUPERFICIE (Ha)	CALICATAS	PENETRÓMETROS	RESISTIVIDA ELÉCTRICA	RESISTIVIDAD TÉRMICA
<2	3 – 5	3 – 5	1-2	1 - 2
2 - 5	5 – 7	5 – 7	2-3	2 - 3
5 - 10	7 – 12	7 – 12	3 - 5	3 - 5
10 - 30	12 - 22	12 - 22	5- 9	5 - 9
30 - 100	22 - 34	22 - 34	9 - 11	9 - 11
100 - 300	34 -55	34 - 55	11 - 14	11 -14
>300	> 55	> 55	> 14	> 14

Los reconocimientos propuestos por ORBIS TERRARUM son una base sobre la cual la empresa geotécnica puede proponer que sean complementados con otro tipo, como los sondeos con recuperación de testigo, ensayos de infiltración de agua, o ensayos sísmicos de refracción y/o de sísmica pasiva tipo ReMi en el caso de emplazamientos con alto riesgo sísmico.

3 ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ensayos de laboratorio se pueden dividir en varios grupos. El primer grupo corresponde con los de identificación y estado que nos permiten conocer el tipo de suelo. En el segundo grupo están los ensayos mecánicos para conocer la resistencia y deformabilidad de los materiales, sean suelos o rocas. Habría un grupo de aprovechamiento de materiales cuando esta partida sea singular en la futura obra. Finalmente, el cuartogrupo sería el de los ensayos químicos para evaluar la corrosividad del suelo y el agua a los aceros y los hormigones. La petición final de ensayos la debe realizar el geólogo encargado del estudio en función de la naturaleza de los materiales encontrados, especialmente si son o no cohesivos.

A modo orientativo, en la siguiente tabla, se establece una pauta de ensayos a realizar:

Tabla 2. Número de ensayos recomendados por cada 5 muestras

ENSAYO	POR CADA 5 MUESTRAS
<i>IDENTIFICACIÓN Y ESTADO</i>	
Granulometría por tamizado	5
Límites de Atterberg	5
Determinación de la humedad natural	5
Densidad seca y aparente	3
<i>RESISTENCIA</i>	
Ensayo de corte directo	0,50
<i>APROVECHAMIENTO DE MATERIALES</i>	
Densidad máxima Proctor Modificado	0,25
CBR	0,25
<i>EXPANSIVIDAD Y COLAPSO</i>	
Hinchamiento libre de un suelo	0,20
Índice de colapso	0,20
Presión máxima de hinchamiento	0,20
<i>ENSAYOS EN ROCAS</i>	
Densidad de una roca	0,75
Ensayo de carga puntual Franklin (PLT)	0,75
<i>QUÍMICOS</i>	
Contenido de sulfatos solubles	1
Acidez Baumann-Gully	1
Contenido de materia orgánica	1

ENSAYO	POR CADA 5 MUESTRAS
pH de un suelo	1
Determinación de la doble alcalinidad	1
Determinación del contenido de cloruros	1
Determinación del contenido de sulfuros (*)	1
Agresividad aguas al hormigón	1

A parte de los ensayos anteriormente descritos, se pueden realizar los s ensayos para determinar las propiedad eléctricas y térmicas de los suelos en laboratorio anteriormente descritas.

4 INFORMES

Los informes geológicos y geotécnicos se pueden dividir en informes de trabajos realizados, de factibilidad o viabilidad, e informes finales. Es habitual entregar un informe “factual” con los reconocimientos de campo realizados previamente a la entrega del informe geotécnico de viabilidad o final.

Los informes de viabilidad contendrán una parte de los reconocimientos, necesarios para definir la geología, las zonas óptimas y la viabilidad de la hinca. El global de datos de campo y laboratorio vendrá incluido en el informe final. En él se definirá la tipología y zonificación para la cimentación; en el caso de que no sea posible como primera opción la hinca de perfiles metálicos, se explorarán otras posibilidades como la ejecución de un preforo, el empleo de tornillos, o la cimentación directa. En el caso de terrenos rocosos se acudirá a micropilotes o cimentaciones directas.

En los informes finales, además, se realizarán tomografías eléctricas y ensayos de laboratorio que permitan evaluar la corrosión de los aceros y la agresividad a los hormigones, que definan los parámetros de resistencia y deformabilidad del terreno y que, en conjunto, permitan tener un modelo geológico y geotécnico completo.

Estos informes finales recogerán pormenorizadamente la formación del modelo geológico e hidrogeológico y los posibles riesgos geológicos, identificación de las unidades geomorfológicas, identificación de las unidades hidrogeológicas, análisis de sismicidad y parámetros de cálculo.

Se realizará una adecuada caracterización geotécnica de los terrenos encontrados con la asignación de sus parámetros resistentes y deformacionales en base a los datos de campo y los ensayos de laboratorio. Identificación de los niveles freáticos y posibles variaciones con el tiempo de estos. Agresividad de los terrenos a los hormigones y agresividad frente a la corrosión de los aceros acorde con las normas internacionales de amplio uso.

Tipología y cálculo de las cimentaciones superficiales para cabinas de inversores y elementos ligeros, y profundas para cimentación de las estructuras de los paneles fotovoltaicos. Parámetros para el diseño de los elementos de contención si los hubiera, los cálculos de estabilidad de los taludes y zanjas, excavabilidad de los materiales y maquinaria recomendada, parámetros de resistividad eléctrica del

terreno para la definición de la red de tierras y parámetros de la resistividad térmica del terreno para el diseño de las zanjas eléctricas.

Para el diseño de los viales, se proporcionarán los espesores mínimos de saneos de suelos superficiales (organic topsoil y/o suelos blandos) para la preparación del terreno para la formación de los viales tanto de acceso a la planta como los interiores para el tránsito de los vehículos pesados. Se definirá el tipo de compactación inicial, espesor y naturaleza de las capas granulares de formación de los viales y grado de compactación en base a los ensayos realizados.

Planos y perfiles

Es importante que el informe aporte perfiles geológicos con los aspectos más significativos y que incorpore todos los registros tanto de los reconocimientos de campo como de los ensayos de laboratorio.

De igual modo es importante proporcionar la cartografía geológica de detalle y un plano de hincabilidad del terreno que permita diseñar la posterior campaña de hinca y pull-out tests acorde con el terreno esperable, aunque dicho plano será modificado tras la campaña de hincabilidad.

Apéndices

Todas las investigaciones de campo se recogerán en los correspondientes apéndices a la memoria del Informe Geotécnico con la descripción detallada de cada una de las investigaciones (posición georeferenciada, maquinaria, fecha, descripción geológica-geotécnica por técnico especialista, muestras tomadas y demás observaciones) con un amplio reportaje fotográfico de las actividades y de las condiciones generales de la parcela.

Plazos

Los plazos habituales que se contemplan en este tipo de estudios, aunque es variable con el tamaño, son de 1 ó 2 semanas para los reconocimientos de campo en función de la magnitud del proyecto, 2 semanas para los ensayos de laboratorio y la interpretación de la geofísica con tomografía eléctrica, y de 1 semana más para la redacción del informe geológico - geotécnico final.