

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, Laboratorio, Ensayos in situ, Tomografía eléctrica, Corrosividad, Arcillas expansivas.

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 reduzca 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 (ver mapamundi en www.orbisterrarum.es).

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 620 plantas solares en diversos países del mundo y más de 50 GW 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 posteriores del tipo pull-out, los cuales aportarán también datos de la deformabilidad.
- 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 Cartografía geológica

Será necesario realizar un levantamiento geológico de la superficie. Esta cartografía se hace generalmente en base a las observaciones directas (investigaciones geotécnicas, materiales geológicos de la zona, afloramientos, geomorfología...), en información bibliográfica y en la interpretación de 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.

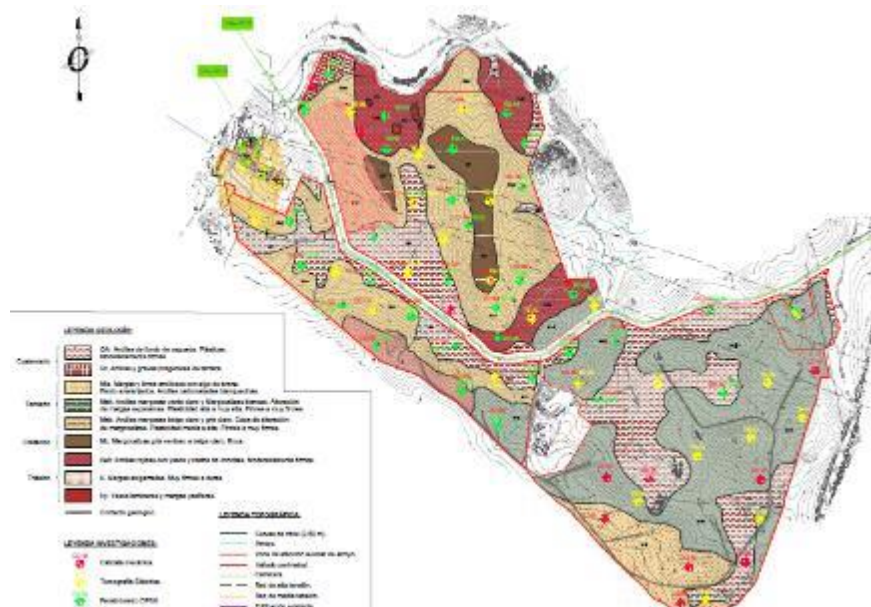


Fig. 1: Cartografía Geológica de detalle realizada por ORBIS TERRARUM

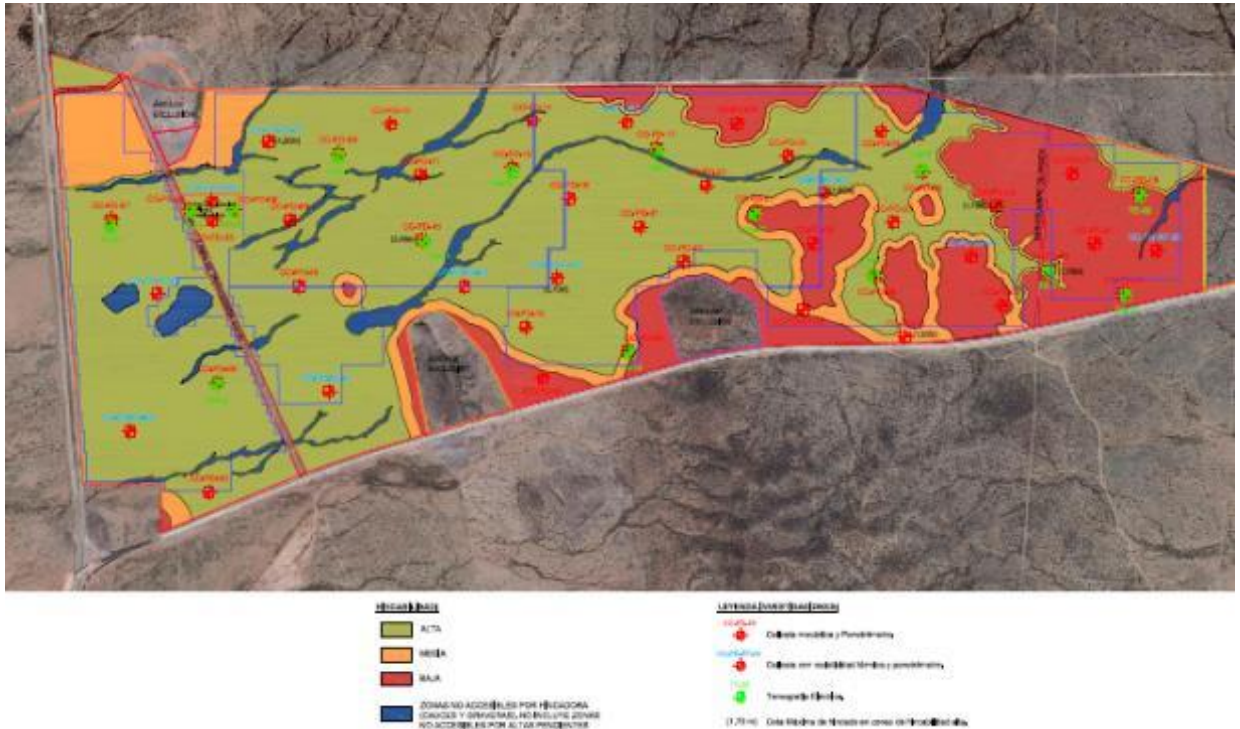


Fig. 2: Plano de viabilidad de hinca realizado por ORBIS TERRARUM

2.2 Calicatas

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. Además, estas investigaciones son útiles para estudiar el terreno bajo otras instalaciones (como inversores, edificios ligeros ...) de cara al diseño geotécnico de cimentaciones. Durante la excavación de las calicatas, un técnico especializado (geólogo o similar) realizará una descripción geológico-geotécnica de los diferentes estratos, recogiendo también muestras representativas (de suelo, roca y agua). También se indicará cualquier aspecto destacable como la presencia de rellenos artificiales o evidencias de contaminación. Una vez terminada una calicata, se cerrará rellenándola con el material excavado adecuadamente compactado para evitar cualquier peligro para las personas o el ganado.



Fig. 3: Detalle de calicata mecánica para inspección y toma de muestras del terreno

Aunque no es habitual, se pueden complementar las calicatas con sondeos geotécnicos con recuperación de testigo, ensayos de infiltración o permeabilidad, ensayos de sísmica de refracción y sísmica pasiva tipo ReMi para emplazamientos de alto riesgo sísmico, o incluso el empleo de georradar (GPR). Concretamente, el departamento de geofísica de Orbis emplea el georradar para la detección de restos arqueológicos y servicios enterrados.

Para establecer la ubicación de los reconocimientos habrá que conocer los posibles servicios enterrados existentes, previo al inicio de la campaña geotécnica.

2.3 Ensayos de penetración dinámica

El ensayo de penetración dinámica es el más adecuado para estimar la resistencia del terreno, la viabilidad de hincas de perfiles y para realizar una zonificación precisa, debido a su fácil uso, transporte y, por tanto, sus precios reducidos en comparación con otras técnicas. Es muy común utilizar penetrómetros ligeros tipo Panda2, especialmente en suelos blandos y en zonas de difícil acceso. Se utilizan habitualmente otros penetrómetros pesados como el tipo DPSH en terrenos más duros. Los resultados de ambos ensayos pueden correlacionarse con el valor del ensayo SPT (Standard Penetration Test).

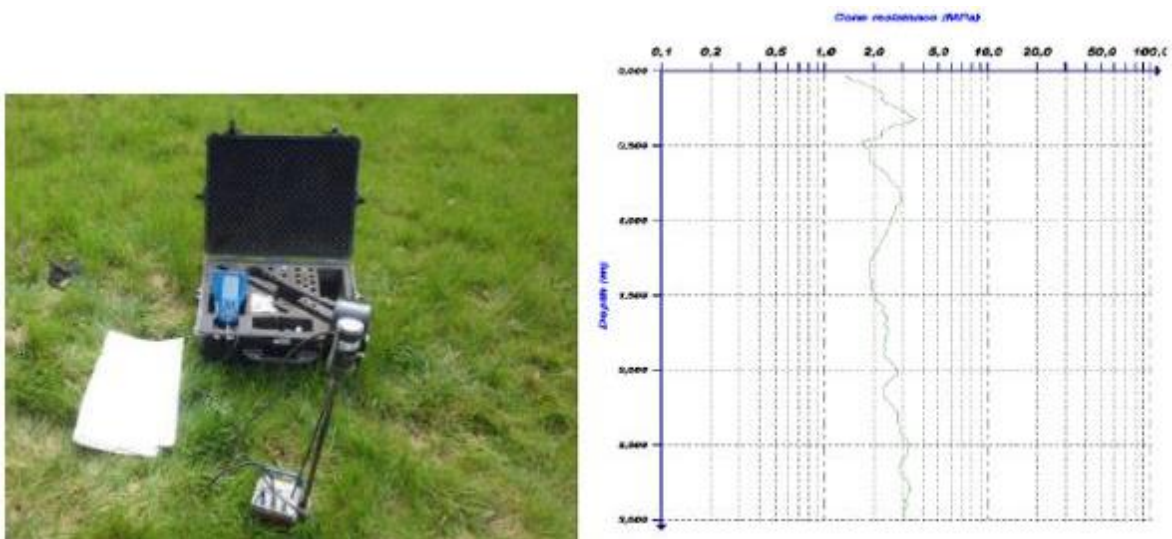


Fig. 4: Penetrómetro dinámico Panda2 y registro de penetración obtenido

Con los equipos de penetración dinámica se puede estimar la resistencia de las diferentes unidades geológicas observadas en las calicatas.

En países donde estos penetrómetros no son muy conocidos, es posible reemplazarlos por sondeos tipo SPT, realizando ensayos SPT de forma continua hasta la profundidad considerada (generalmente 3,0 o 4,0 m).

Relacionado con lo anterior, es muy importante determinar el espesor de la capa de tierra vegetal. La capa superficial del suelo generalmente tiene poca resistencia y un contenido variable de materia orgánica. Como este suelo rara vez se retira, especialmente en sitios horizontales y llanos, se recomienda no considerar su espesor y resistencia en el diseño de la longitud del perfil de cimentación.

2.4 Resistividad Eléctrica

La investigación más habitual y completa es la tomografía eléctrica utilizando un dispositivo Wenner de 21 o 42 electrodos equidistantes a lo largo de una línea. Con esta configuración se puede determinar la resistividad eléctrica del terreno a lo largo de la línea y también en profundidad. La interpretación de estos resultados permite realizar una representación de las diferentes unidades geológicas en un perfil longitudinal.

Alternativamente, se pueden realizar ensayos SEV (Sondeos Eléctricos Verticales), que determinan la resistividad eléctrica en un solo punto a diferentes profundidades. Esta técnica ha sido superada por la tomografía eléctrica ya que, como se indicó anteriormente, tiene la ventaja de poder realizar una interpretación geológica de una mayor superficie.

La determinación de la resistividad eléctrica es muy importante para estimar el potencial de corrosión de los suelos y también es muy útil para el diseño del sistema de puesta a tierra.



Fotografía 1: Ensayo geofísico de Tomografía Eléctrica

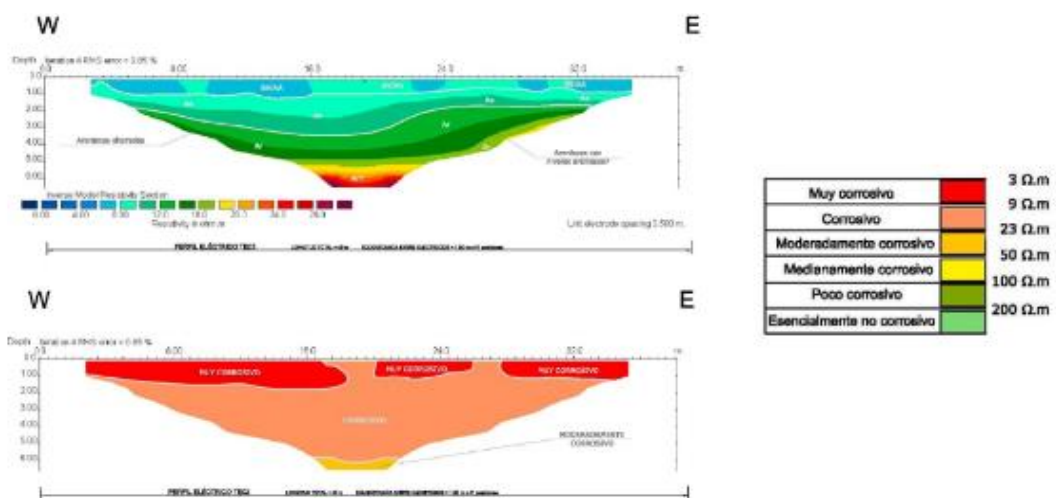
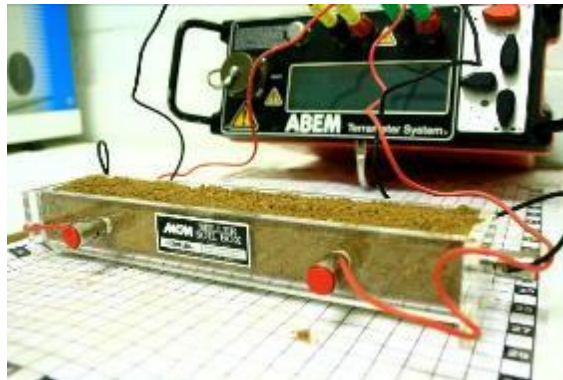


Fig. 5: Interpretación de perfil de Tomografía Eléctrica en términos geológicos y determinación del potencial de corrosividad catódica

La medición de la resistividad eléctrica también se puede realizar en el laboratorio utilizando el dispositivo Soil-Box. En este caso, la medición se realiza sobre muestras compactadas saturadas

posteriormente con agua destilada. Este método es el recomendado para la clasificación del potencial de corrosión según normativa estadounidense.



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

2.5 Resistividad Térmica

La resistividad térmica del suelo es la medida de la capacidad del suelo para conducir o disipar el calor de la fuente (generalmente, cables de alimentación o eléctricos). En el caso de las zanjas eléctricas, es importante determinar las propiedades térmicas del suelo natural, pero también las propiedades térmicas del material de relleno.

Los ensayos de resistividad térmica se realizan en el interior de zanjas abiertas u otras excavaciones. Esto permite realizar medidas de resistividad in situ a la profundidad deseada o a diferentes profundidades. También se puede realizar toma de muestras para su posterior análisis en laboratorio con un rango de contenidos de humedad (Dry-Out curve) o, incluso, con diferentes temperaturas.

Los resultados de resistividad térmica deben ir acompañados del valor de la densidad del suelo y el contenido de humedad de la muestra (o de su estado natural), ya que estos parámetros condicionan en gran medida las propiedades térmicas de los suelos.



Fotografía 3: Detalle de equipo para medidas de resistividad térmica

En el caso de material de relleno de zanja, se debe utilizar un grado de compactación (basado en el ensayo Proctor) y un contenido de humedad similar al utilizado durante los trabajos de relleno en obra. Estos ensayos se suelen posponer para la fase constructiva una vez se conoce con certeza el suelo con que se va a rellenar la zanja.

2.6 Caracterización Sísmica del Terreno

En aquellos proyectos ubicados en áreas con riesgo sísmico, es necesario determinar, de acuerdo con la normativa sísmica de cada país, los parámetros de cálculo correspondientes al terreno presente en el área de estudio y las posibles implicaciones en las estructuras proyectadas.

El parámetro V_{s30} , definido como la velocidad media de las ondas transversales (Ondas S) desde la superficie hasta una profundidad de 30 metros, constituye un parámetro aceptado internacionalmente para la clasificación del emplazamiento según el IBC (International Building Code), para la aplicación de coeficientes sismorresistentes (Eurocódigo) o para el 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.

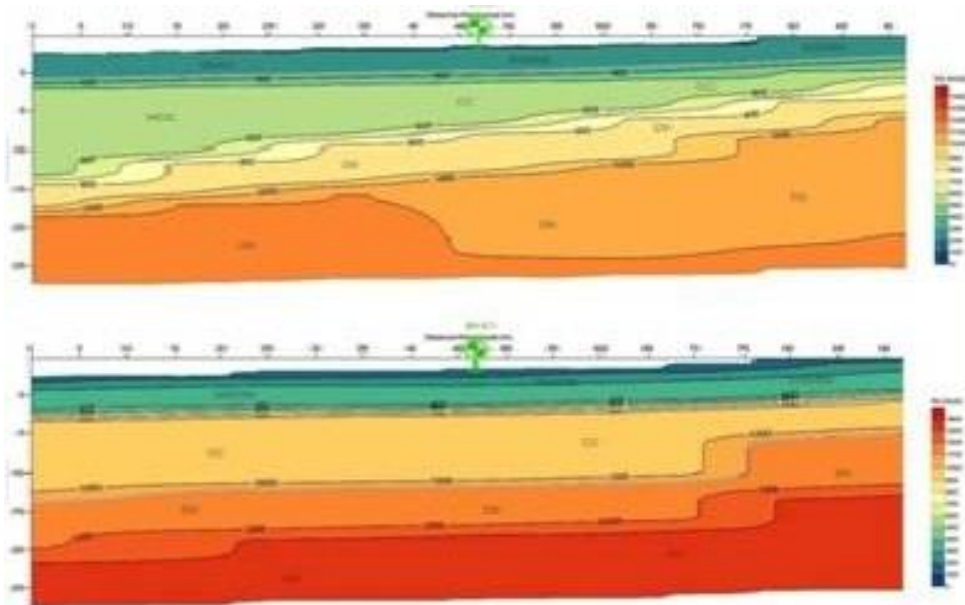


Fig. 6: Perfiles de rigidez y V_{s30}

En algunos países es preceptivo conocer la frecuencia y periodo fundamental de las vibraciones naturales del terreno para lo cual se suele emplear el ensayo HVSR.



Fotografía 5: Ensayo HVSR

2.7 Deformabilidad del terreno

Cuando se quiere conocer la categoría de la explanada o subbase para la construcción de caminos o carreteras o para determinar con detalle la deformabilidad vertical de cimentaciones poco profundas 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.

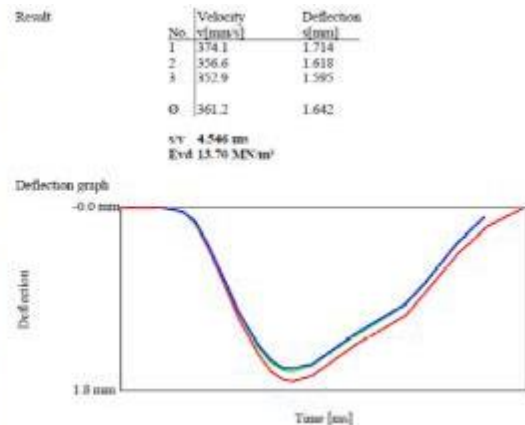


Fig. 7: Detalle de ensayos de placa de carga dinámica Zorn y resultado gráfico

Si el suelo cercano a la superficie está saturado, será necesario realizar pruebas de carga de placa estática, aunque su realización conlleva mucho más tiempo que las pruebas de placa dinámica. También necesitan tener un elemento de reacción, como un camión cargado de arena.

En el caso de suelos arcillosos saturados y altas cargas superficiales, (una situación poco común en proyectos fotovoltaicos), sería necesario realizar ensayos edométricos en muestras inalteradas para evaluar el asiento de consolidación a largo plazo.

2.8 Ensayos para los caminos

Los principales caminos dentro de la planta fotovoltaica tendrán una intensidad de circulación IMD muy pequeña pero que requerirá su dimensionamiento para asegurar la durabilidad, especialmente cuando se atraviesen suelos blandos o expansivos en los que haya que sanear, aislar o reforzar parte del suelo antes de construir el camino. Es necesario caracterizar la naturaleza y deformabilidad de la explanada natural durante la investigación geotécnica si se conoce su trazado. Para ello se puede emplear el ensayo CBR in situ, penetrómetros dinámicos y ensayos de carga en placa dinámica o estática. La capacidad portante de los materiales empleados en las distintas capas que conformarán el camino suele postponerse a una fase previa a la construcción, una vez se conozcan los materiales a emplear.

2.9 Arcillas expansivas y suelos colapsables

Es habitual encontrar arcillas susceptibles de retraer y agrietarse durante la época seca e hinchar durante la época húmeda. Esto será especialmente problemático en aquellas regiones secas y áridas. Una vez detectadas las arcillas potencialmente expansivas, por ejemplo, a partir de su alta plasticidad, deberá cuantificarse su potencial expansivo y su capacidad de agrietarse mediante ensayos de hinchamiento libre o alternativamente de presión de hinchamiento, con distintas humedades, y de retracción lineal. En función de la intensidad del potencial expansivo se tendrán que diseñar las medidas preventivas para minimizar el riesgo sobre las cimentaciones.

Si se dispone de tiempo, es interesante medir el espesor de la capa activa, evaluando la variación de la humedad a distintas profundidades a lo largo de un año completo. En caso contrario se tendrá que estimar a partir de la bibliografía y la climatología. El hinchamiento será mayor cerca de la superficie y prácticamente nulo en la parte inferior de la capa. Solo una parte de esta capa activa sufrirá grietas por retracción, su profundidad será visible durante la época del estío. Es muy recomendable medir las grietas en la pared de excavación.

Los suelos colapsables son algunos suelos finos sin plasticidad con o sin presencia de sulfatos que pueden colapsar ante cambios tensionales o de humedad. En presencia de estos suelos será necesario realizar ensayos específicos como el ensayo de colapso en célula edométrica.

2.10 Corrosión de los suelos

La posible corrosión inducida por la reacción química y electroquímica entre los suelos y los metales enterrados, generalmente aceros y aceros galvanizados, es de suma importancia en las plantas fotovoltaicas, donde las cimentaciones mediante perfiles hincados se emplean de forma intensiva.

La determinación del potencial corrosivo se evalúa mediante la Norma DIN 50929 parte 3 2023, a nuestro entender la más completa, que analiza distintos parámetros del terreno y la resistividad eléctrica, o si existen, mediante normativas locales.

La norma evalúa la bondad frente a la corrosión de los recubrimientos del acero mediante galvanizado en caliente. La norma no cuantifica el espesor de galvanizado necesario para el proyecto que deberá determinarse por un especialista o por las empresas de galvanización y no dentro de un estudio geotécnico.

Evidentemente está fuera del alcance de un estudio geotécnico la corrosión producida por agentes atmosféricos en la parte del perfil metálico que queda fuera del terreno.

3 GUÍA DE DISEÑO. MEDICIONES RECOMENDADAS

La siguiente tabla proporciona las investigaciones de campo mínimas que se deben realizar según el tamaño de la parcela. Los números de investigación deben incrementarse o reducirse dependiendo también de las dificultades de la parcela (forma, desniveles, geología local, accesos, instalaciones...). Toda investigación debe ser supervisada continuamente por un técnico especializado (Geólogo o similar) conocedor de las necesidades y detalles del proyecto.

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

SUPERFICIE (Ha)	CALICATAS	PENETRÓMETROS	RESISTIVIDAD 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 - 40	22 - 40	9 - 11	9 - 11
100 - 300	40 - 60	40 - 60	11 - 15	11 -15
>300	1 por cada 5 Ha	1 por cada 5 Ha	1 por cada 20 Ha	1 por cada 20 Ha

Las investigaciones propuestas por ORBIS TERRARUM son una base sobre la cual la empresa geotécnica puede complementar con otro tipo de investigación, como son los sondeos con recuperación de testigo, ensayos de infiltración/permeabilidad, ensayos de placa dinámica, o ensayos sísmicos de refracción/pasiva en el caso de emplazamientos con riesgo sísmico.

En el caso de la corrosión, estos proyectos se pueden completar con ensayos específicos de modelización de corrosión del suelo.

4 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, ya sean suelos o rocas, y aspectos como la expansividad potencial y el riesgo de colapso. Habría un tercer grupo referido a la reutilización de materiales cuando esta partida sea necesaria en el proyecto. Finalmente, el cuarto grupo sería el de los ensayos químicos para evaluar la agresividad del suelo y el agua al hormigón y al acero (corrosión). La petición de ensayos debe ser siempre realizada por el técnico responsable del estudio en función de la naturaleza de los materiales encontrados (suelo, roca, cohesivo, no cohesivo...).

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

ENSAYO	POR CADA 5 MUESTRAS
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
Índice de retracción	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 en agua y ácido	1
Acidez Baumann-Gully	1
Contenido de materia orgánica	1
pH de un suelo	1
Determinación de alcalinidad/acidez	1
Determinación del contenido de cloruros	1
Determinación del contenido de sulfuros	1
Agresividad aguas al hormigón	1

Además de los ensayos anteriormente descritos, se pueden realizar los ensayos para determinar las propiedades eléctricas y térmicas de los suelos en laboratorio anteriormente descritas.

5 INFORMES

Los informes geológico-geotécnicos están directamente relacionados con el alcance de la campaña geotécnica y se pueden dividir en:

- Informe de trabajos realizados
- Informe de viabilidad o preliminar
- Informe final o de diseño

Los diferentes tipos de informes se describen a continuación.

Informe de trabajos realizados. Este informe es un resumen de las investigaciones de campo. No se dan conclusiones ni recomendaciones.

Informe de viabilidad o preliminar. Este informe incluye los datos mínimos y necesarios para definir la geología del emplazamiento, los riesgos geológicos, la viabilidad de hinca y áreas óptimas y recomendaciones básicas que permitan el predimensionamiento y la estimación de costes asociados. En este caso, el número de investigaciones y ensayos de laboratorio es menor que en un estudio final ya que el alcance es solo el de dar recomendaciones generales al cliente para la elaboración de un proyecto básico o preliminar. Los resultados de este informe no se utilizan para el diseño de la planta. Es recomendable que este informe numere las investigaciones geotécnicas adicionales necesarias para completar los datos en el futuro para el estudio geotécnico de diseño.

Informe final. Este informe incluye toda la información relevante y los análisis realizados en base a los resultados de la campaña geotécnica y los ensayos de laboratorio. Los resultados de este informe se utilizan para el diseño de la planta. Este informe contiene, al menos:

- Información básica: descripción de las principales características del proyecto.
- Trabajos realizados: descripción de la información bibliográfica consultada, todos los trabajos de campo realizados y resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio.
- Geología: geología regional y local, hidrogeología, geomorfología...
- Análisis sísmico: caracterización sísmica del sitio basada en códigos nacionales o internacionales
- Riesgos geológicos y naturales: descripción de los principales riesgos y estimación de su peligrosidad
- Caracterización geotécnica: descripción de las unidades geotécnicas identificadas con resumen de sus parámetros geotécnicos recomendados.
- Agresividad al hormigón y al acero (corrosión).
- Resistividad térmica: propiedades térmicas de las diferentes unidades geotécnicas
- Excavabilidad y diseño de taludes: Recomendaciones de excavabilidad de las diferentes unidades geotécnicas y recomendaciones para taludes permanentes o temporales.
- Reutilización de materiales: Reutilización de las unidades geotécnicas que pueden ser excavadas durante la construcción de la planta.
- Diseño de cimentaciones de los módulos fotovoltaicos: se definirá la tipología y zonificación de las cimentaciones.
- En el caso de que el hincado de pilas metálicas no sea posible como primera opción, se explorarán otras posibilidades, como la ejecución de un pretaladro (predrilling), el uso de tornillos o cimentaciones directas. En el caso de terrenos rocosos se utilizarán micropilotes o cimentaciones directas.
- Diseño de cimentaciones superficiales: Tipología y cálculo de cimentaciones superficiales para cabinas de inversores y elementos ligeros.
- Datos de resistividad eléctrica para el diseño del sistema de puesta a tierra.

Es de buena práctica profesional realizar primero el estudio geotécnico de la parcela y posteriormente de forma separada el estudio de la resistencia y deformación de la cimentación con ensayos a escala real una vez que se conozca la sección e inercia de los perfiles metálicos y las cargas que habrán de soportar. Estos estudios se denominan ensayos de hincabilidad y de resistencia frente a cargas estáticas, o *ramming and pull out tests* por su denominación en inglés. El análisis pormenorizado de los resultados permitirá definir la longitud óptima de hincado y validar las deformaciones obtenidas.

Planos y perfiles

Es importante que el informe proporcione columnas geológicas representativas de las diferentes áreas identificadas.

Asimismo, es importante proporcionar una cartografía geológica de superficie detallada y un plano de viabilidad de hincado de perfiles que permita diseñar la campaña de ensayos de hinca y pull out tests de acuerdo con el terreno esperado, (aunque este plano puede necesitar ser modificado después de la campaña de pull-out).

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 georreferenciada, 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 del emplazamiento.

Plazos

Los plazos habituales que se contemplan en este tipo de estudios, aunque es variable con el tamaño, son de 1 o 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 o 2 semanas más para la redacción del informe geológico - geotécnico final.