

BASES PARA EL PROYECTO DE CIMENTACIONES DE PILOTES HINCADOS PARA ESTRUCTURAS DE APOYO DE PLACAS EN PARQUES SOLARES FOTOVOLTAICOS

Carlos R. Sánchez-Carratalá

*Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia*

Abstract

The development and consolidation of renewable energies as alternative reliable sources and in significant amount, represents a strategic commitment in energy policy of most developed countries. Of them, solar photovoltaics is one the most promising energies, with a great potential for improvement due to continuous technological advances in efficiency and durability of photovoltaic modules. The installation of solar panels is usually made on the roof of buildings or on the ground itself. For various reasons, such as availability of surface, orientation freedom or ease of maintenance, most of the installed and installable power is found in solar parks or farms located in rural areas, thus requiring the placement of a structure for supporting the solar panels. Among the foundation systems of these structures, one of the most used is that of driven piles. This paper presents the basis for the project of this type of foundations as part of a complete methodology for pile design, calculation, construction and testing, so as to assure the compliance with safety standards established by the applicable regulations.

Keywords: *solar photovoltaics; solar farms; support structure; deep foundation; driven piles; geotechnical design*

Resumen

El desarrollo y consolidación de las energías renovables como fuentes alternativas fiables y en cantidad apreciable, representa una apuesta estratégica dentro de la política energética de los países más desarrollados. De entre ellas, la energía solar fotovoltaica es una de las de mayor proyección, con un gran potencial de mejora gracias a los continuos avances tecnológicos en el rendimiento y durabilidad de los módulos fotovoltaicos. La instalación de las placas solares suele realizarse fundamentalmente sobre cubiertas de edificaciones o sobre el propio terreno. Por diversos motivos, tales como disponibilidad de superficie, libertad de orientación o facilidad de mantenimiento, la mayoría de la potencia instalada e instalable se encuentra en parques o huertos solares ubicados en zonas rurales, lo que exige la colocación de una estructura que sirva de soporte a las placas solares. Entre los sistemas de cimentación de estas estructuras, uno de los más utilizados es el de pilotes hincados. En esta ponencia se presentan las bases para el proyecto de este tipo de cimentaciones como parte de una metodología completa para el diseño, cálculo, construcción y prueba del pilotaje, de forma que quede garantizado el cumplimiento de los estándares de seguridad fijados por la normativa de aplicación.

Palabras clave: *energía solar fotovoltaica; parques solares; estructura de apoyo; cimentación profunda; pilotes hincados; proyecto geotécnico*

1. Introducción

El crecimiento de algunas energías renovables alternativas ha sido espectacular en las últimas décadas, aunque aún siguen representando un porcentaje escaso de la energía total consumida en la mayoría de los países. A dicho crecimiento vienen colaborando diversos factores, entre los cuales destaca el compromiso internacional para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, poniendo así coto al calentamiento global y, por ende, a su principal riesgo: el cambio climático. En concreto, la energía solar constituye, junto con la eólica, una de las fuentes de energía renovables de mayor proyección en todo el mundo. Esto es así, fundamentalmente, por dos motivos sinérgicos: en primer lugar, porque en muchos países desarrollados se ha apostado de forma decidida por las energías renovables alternativas más limpias, mediante subvenciones e incentivos a la instalación o producción, que pretenden cubrir la diferencia de coste que aún existe entre esas tecnologías y las fuentes de energía tradicionales (combustibles fósiles, energía nuclear, energía hidráulica, etc.); pero también por la existencia de un sector industrial en pleno desarrollo tecnológico, con una mejora continua del rendimiento y durabilidad de los equipos, así como con una progresiva reducción de los costes de producción.

Básicamente se pueden distinguir dos formas de aprovechar la energía del Sol que llega a la superficie de la Tierra: los sistemas fototérmicos y los sistemas fotovoltaicos. Los primeros convierten la radiación solar en energía calorífica que se transfiere a un fluido de trabajo mediante colectores térmicos; la energía así captada se aprovecha entonces para calefactar edificaciones, para obtener agua caliente doméstica o industrial, para secar, para producir flujos de aire o vapor de agua a presión con los que mover turbinas y generar energía eléctrica (centrales solares termoeléctricas), etc.; es habitual diferenciar entre colectores de baja temperatura, en los que el fluido es calentado por contacto con el propio colector, y colectores de media o alta temperatura, basados en espejos que calientan el fluido mediante la concentración de la radiación. Por su parte, los sistemas fotovoltaicos transforman la energía luminosa en energía eléctrica mediante la utilización de células fotovoltaicas, que aprovechan el llamado efecto fotoeléctrico presente en ciertos materiales semiconductores; la energía eléctrica producida se puede emplear localmente para usos aislados de lo más diverso, o inyectarla en la red general de distribución para su consumo en zonas alejadas de la de generación (centrales solares fotovoltaicas).

Las células fotovoltaicas se agrupan en paneles o módulos, también llamados placas solares, que constituyen la unidad básica de construcción de cualquier sistema fotovoltaico. Un panel fotovoltaico está formado por células interconectadas entre sí y selladas con un recubrimiento de vidrio y un respaldo impermeable. El conjunto se completa con un bastidor que le da resistencia y rigidez.

Los paneles solares suelen instalarse en las cubiertas de edificaciones o sobre el terreno; también existen aplicaciones en las que los paneles se integran en el diseño arquitectónico del edificio. No obstante, la mayoría de la potencia instalada e instalable se encuentra en parques o huertos solares ubicados en zonas rurales. Esto es así porque el coste del suelo rústico es mucho menor, lo que permite centrales solares de mayor extensión en superficie con las que se alcanzan potencias mucho mayores y economías de escala. Además, con las condiciones topográficas y de vegetación adecuadas, en campo abierto las placas pueden orientarse de forma óptima, sin las servidumbres derivadas de la configuración y orientación de un edificio o de las sombras que puedan proyectar otras construcciones próximas; también se facilita y abarata el mantenimiento, al poder planificar una ordenación en planta que permita un fácil acceso a los equipos y una mejor seguridad del recinto.

La disposición de las placas solares sobre el terreno exige la colocación de una estructura que les sirva de soporte, a la vez que asegura su correcta orientación. La potencia máxima se obtiene cuando los paneles son capaces de seguir los movimientos del Sol durante todo

Figura 1: Tipos de Entramado Usados en Estructuras de Soporte Fijas



el día y a lo largo de las estaciones del año, lo que se consigue con una estructura móvil, o seguidor. La alternativa es disponer las placas sobre una estructura fija, sin partes móviles, orientada de forma que se consiga la mayor producción posible a lo largo de todo el año, lo que depende del hemisferio y la latitud. La potencia en instalaciones con estructuras fijas es cada vez mayor, debido a los menores costes de construcción y mantenimiento, lo que compensa la menor producción de energía eléctrica (respecto a las instalaciones con seguidores), a lo largo de la vida útil de este tipo de centrales, que es de unos 20-25 años.

En estructuras fijas, las placas solares se agrupan formando mesas, normalmente de 2 a 5 paneles de ancho y de longitud variable según la forma de la parcela y la planta de distribución. Estas mesas están soportadas por unas pequeñas estructuras de acero o aluminio cuyo elemento básico es un entramado plano de barras en dirección transversal, normalmente con 1 o 2 pilares. En estructuras tipo pórtico, los entramados se arriostran entre sí mediante cruces de San Andrés cada cierto número de vanos y, como mínimo, en los extremos de la mesa. En la Figura 1 se muestran esquemáticamente varios tipos de entramado usados en estructuras de soporte fijas. Las cimentaciones de los entramados pueden ser superficiales—a base de zapatas de hormigón apoyadas o embebidas en el terreno—, o profundas—mediante pilotes de pequeña longitud introducidos en el terreno—. En muchos casos, la elección se decanta por el empleo de pilotes, ya sea por no tener buenas condiciones de apoyo en superficie o por una cuestión de economía; en algunos casos, también intervienen en la decisión consideraciones legales, dado que en algunos países o zonas no se permite el empleo de hormigón en zonas rústicas. Además, si se usan pilotes, al desmantelar el campo basta con desmocharlos o extraerlos, sin mayor alteración al entorno. Dada la pequeña entidad de las cargas transmitidas a la cimentación en este tipo de estructuras, tanto la sección transversal como la longitud de los pilotes a disponer suelen ser bastante reducidas, por lo que podríamos referirnos a ellos como micropilotes.

Según el método constructivo, los pilotes pueden ser perforados o hincados; en el caso de cargas pequeñas, se pueden utilizar también pilotes atornillados. Los más habituales en instalaciones con estructuras fijas son los hincados, si las condiciones del terreno (resistencia, deformabilidad, hincabilidad) así lo permiten, como ocurre con la mayor parte de los suelos presentes en las zonas de poca pendiente donde se suelen implantar las huertas solares (cuencas de sedimentación). El diseño y dimensionamiento de estos pilotes constituye una cuestión fundamental para la viabilidad y seguridad de las instalaciones, no siempre bien estudiada o resuelta en el proyecto de la instalación. A este respecto, debe tenerse en cuenta que normalmente se trata de pilotes muy cortos (en torno a 1,2-2,5 m), en comparación con los utilizados en otras aplicaciones de ingeniería civil, por lo que aspectos como la presencia de tierra vegetal, la meteorización superficial o la variabilidad espacial de las propiedades geotécnicas del terreno pueden resultar claves para el cálculo de la cimentación y la rentabilidad de la inversión. Precisamente, el hecho de tratarse de

elementos de comportamiento complejo, e incluso errático, ha llevado a que en bastantes casos se aborde su cálculo de forma empírica o estimada, sin el necesario rigor y sin atención a las propiedades del terreno o a las condiciones singulares del emplazamiento. De ahí la necesidad de contar con procedimientos de dimensionamiento y verificación contrastados, que permitan acotar las importantes incertidumbres propias de este tipo de cimentaciones.

En esta ponencia se presentan las bases para el proyecto de cimentaciones, a base de pilotes hincados, de estructuras soporte de placas solares, como parte de una metodología completa para el diseño, cálculo, construcción y prueba del pilotaje de un parque solar fotovoltaico, de forma que quede garantizado el cumplimiento de los estándares de seguridad fijados por la normativa de aplicación (e.g., EC3 para acero, EC9 para aluminio o EC7 para el terreno). En particular, se estudian los métodos de proyecto a aplicar y las situaciones de proyecto a considerar, así como los estados límite que normalmente deberán ser objeto de comprobación. Asimismo, se revisan los distintos métodos disponibles para introducir la seguridad en el cálculo, analizando en profundidad las diferentes alternativas existentes dentro del ámbito geotécnico, en el que tanto la incertidumbre de los parámetros resistentes como la fiabilidad de los métodos de cálculo deben ser incorporadas de forma explícita en el procedimiento de proyecto.

2. Métodos de Proyecto

El apartado 2.1(4) del Eurocódigo 7, Parte 1, sobre proyecto geotécnico (Comité Técnico AEN/CTN-140, 2004), al que nos referiremos como EC7-1, enumera los métodos de proyecto que pueden usarse en el proyecto geotécnico, a saber:

- Cálculos geotécnicos
- Medidas prescriptivas
- Modelos experimentales y pruebas de carga
- Método observacional

Estos métodos pueden emplearse de forma independiente o combinados. En la práctica, la experiencia suele indicar el estado límite más condicionante, por lo que bastará realizar para los demás una comprobación simplificada.

En nuestro caso, se propone el empleo sistemático de un método basado en cálculos geotécnicos a partir de una caracterización suficiente del terreno mediante ensayos *in situ* y en laboratorio. Los resultados así obtenidos podrán ser tomados como definitivos o, preferiblemente, servir de base para la realización de una campaña de pruebas de carga de arranque y de carga lateral con las que corroborar los resultados arrojados por las formulaciones analíticas y las de tipo empírico basadas en correlaciones. En su caso, las pruebas de carga servirían también para aquilatar las dimensiones de los pilotes, en cada tipo de terreno, deducidas con el método basado en cálculos geotécnicos.

En los casos en que ello resulte factible, se tendrán en cuenta las medidas prescriptivas disponibles, en concreto para asegurar la durabilidad. Durante la construcción se aplicará el método observacional, aprovechando las conclusiones sacadas de los cálculos geotécnicos y de las pruebas de carga; para ello se establecerán límites previsibles y admisibles de comportamiento durante las hincas. En este sentido, se preferirá en todo caso el empleo de maquinaria con la que sea posible realizar un control durante la hinca.

3. Situaciones de Proyecto

En el caso de una cimentación, las distintas situaciones de proyecto vienen definidas por el terreno (configuración y estratificación) y sus parámetros geotécnicos (resistencia,

deformabilidad e impermeabilidad), por la geometría de la cimentación, y por las acciones actuantes. Las acciones se suelen clasificar en persistentes, transitorias, accidentales sin sismo, y sísmicas. Pese a que la tendencia más reciente es a no considerar el sismo únicamente como acción accidental, sino también como acción variable a fin de incorporar en el cálculo el diseño basado en desempeño, lo cierto es que la mayor parte de la normativa sigue tratando al sismo como una acción accidental, aunque con una combinación de acciones diferenciada.

Para el estudio de los estados límite de tipo geotécnico se añaden las situaciones de corto plazo, que se asimilan, en cuanto a seguridad, a las transitorias. Las situaciones de corto plazo se dan cuando el terreno de cimentación está saturado y cuando, además, su permeabilidad es suficientemente baja. La forma más habitual de cálculo de las situaciones teóricas de corto plazo consiste en suponer que el conjunto del terreno y el agua de saturación se comporta como un material puramente cohesivo ($\phi_v=0$) y con una cohesión igual a la resistencia al corte sin drenaje ($c_v=s_u$). Esta última se evaluará para el momento correspondiente al inicio del proceso de carga.

Está claro que en los estados límite de tipo estructural (STR), la acción del viento, tomada como acción variable dominante, da lugar a situaciones persistentes una vez ejecutada la obra, salvo en casos especiales. Sin embargo, en estados límite de tipo geotécnico (GEO) esa misma acción puede ser considerada como de corto plazo, dado que su valor característico especificado en la normativa (probabilidad de excedencia anual del 2%) viene asociado a una duración efectiva suficientemente pequeña como para pensar que las presiones intersticiales en el terreno no varían significativamente o que, en cualquier caso, se pueden recuperar entre temporales de viento. Este extremo quedaría justificado también por el hecho de que la parte frecuente de la acción del viento es muy baja ($\psi_1=0,2$) y la parte cuasipermanente es nula ($\psi_2=0$), según el Eurocódigo 0, sobre bases de cálculo (Comité Técnico AEN/CTN-140, 2002), al que nos referiremos como EC0.

En nuestro caso, el valor característico adoptado para la acción del viento se considerará como de corto plazo al objeto de comprobar los estados límite últimos de tipo geotécnico.

4. Comprobaciones a Realizar

4.1 Estados Límite Últimos

Los estados límite de cimentaciones profundas capaces de producir la ruina de la estructura pueden ser relativos al terreno o al propio pilote. Entre los primeros se incluyen los siguientes modos de fallo:

- Estabilidad global: cuando el conjunto de la estructura y su cimiento pierden su estabilidad sin que se produzcan fallos locales en la estructura; hace referencia a las posibles líneas de rotura (superficies de deslizamiento) que engloban a toda la cimentación o a parte de ella. Sólo puede omitirse en terrenos llanos y firmes.
- Hundimiento: cuando las cargas verticales van hacia abajo y se agota la suma de la resistencia del terreno a compresión en la punta del pilote y de la resistencia por rozamiento del terreno a lo largo del fuste, produciéndose movimientos longitudinales inadmisibles.
- Arranque: cuando las cargas verticales van hacia arriba y se agota la resistencia por rozamiento del terreno a lo largo del fuste, produciéndose movimientos longitudinales inadmisibles.
- Rotura transversal del terreno: cuando los empujes transversales producen presiones en el terreno que agotan su capacidad portante, produciéndose movimientos transversales y/o giros inadmisibles.

Hay otras formas de fallo menos frecuentes, pero que deben considerarse cuando puedan producirse: pérdida de capacidad portante por erosión o socavación del terreno; pérdida de capacidad portante por ataque ambiental al material del pilote; expansividad, colapsabilidad o heladicidad del terreno; licuefacción del terreno; daños en estructuras próximas por la hincada de pilotes en suelos cohesivos blandos, etc.

En nuestro caso, los terrenos sobre los que se instalan los huertos solares tienen, en general, poca pendiente (inferior al 10%) y se entiende que se ha comprobado que se trata de terrenos que no han mostrado anteriormente ningún signo de inestabilidad. Además, las instalaciones de paneles fotovoltaicos transmiten al terreno en su conjunto unas cargas muy reducidas que difícilmente pueden dar lugar a problemas de estabilidad global, salvo en casos muy extremos. Por ello, dentro de los estados límite que hacen referencia al terreno, sólo se estudiarán normalmente los de hundimiento, arranque y rotura transversal.

Por otra parte, la acción dominante es la debida al viento, que al poder ser de presión o de succión puede producir compresiones o tracciones, respectivamente, en la cimentación. Al tratarse de pilotes de reducido diámetro equivalente e hincados a muy poca profundidad, la resistencia por punta será muy pequeña, salvo que el pilote apoye en roca. En general, la situación más limitante para el terreno no será la de hundimiento, sino la de arranque, dado que en esta última ya no se cuenta con la resistencia por punta y, además, el coeficiente de rozamiento es menor en pilotes a tracción que a compresión; no obstante lo anterior, puede haber casos en que, debido al ocultamiento de unas mesas sobre otras, la situación más desfavorable sea la de compresión sobre el pilotaje, por lo que también habrá de ser objeto de estudio. En todo caso, deberá considerarse el posible efecto de las cargas alternativas de compresión-tracción sobre la resistencia por fuste. Por otra parte, deberá tenerse en cuenta la componente horizontal de la reacción debida al viento, que puede dar lugar a la rotura transversal del terreno.

Cuando los pilotes soportan una estructura rígida, puede tenerse en cuenta la capacidad de la estructura para repartir la carga entre los distintos pilotes, por lo que el estado límite de hundimiento o arranque sólo se produciría si hay varios pilotes que fallan de forma conjunta. Sin embargo, si los pilotes soportan una estructura flexible, como es nuestro caso, el estado límite correspondiente estará controlado por la capacidad portante del pilote más débil.

Los estados límite a comprobar respecto al pilote son los relativos a su integridad estructural, por lo que dependerán fundamentalmente del material de que esté hecho el pilote. En general deberán comprobarse los siguientes modos de fallo:

- Agotamiento por solicitaciones normales
- Agotamiento por solicitaciones tangenciales
- Inestabilidad por efectos de segundo orden
- Fatiga por cargas cíclicas
- Fallo de conexión con la estructura

En nuestro caso, tratándose de estructuras de soporte planas, las solicitaciones normales serán las debidas al axil y al flector, mientras que las solicitaciones tangenciales serán las debidas al cortante. No se incluye aquí el fallo de conexión del pilote con la estructura, ya que forma parte de las comprobaciones realizadas en la propia estructura.

En general, las comprobaciones estructurales a realizar en el pilote son las de: compresión con flector, tracción con flector, y cortante; en caso necesario, se tendrá en cuenta la interacción del cortante con el flector según lo indicado en la normativa. Los efectos de segundo orden suelen ser despreciables; en caso necesario, se pueden tener en cuenta mediante un coeficiente de minoración empírico como se hace en micropilotes de hormigón in situ. Finalmente, el estado límite de fatiga se puede tener en cuenta de forma simplificada minorando la resistencia del acero.

4.2 Estados Límite de Servicio

En el caso de cimentaciones profundas no suelen ser relevantes algunos estados límite de servicio propios de las cimentaciones superficiales, como son, las roturas localizadas o las vibraciones excesivas. Por ello, suele ser suficiente con comprobar el siguiente estado límite de servicio:

- Movimientos excesivos de la cimentación: son causados por deformaciones del terreno y/o del pilote que impiden el correcto uso o funcionalidad de la estructura, o suponen un empeoramiento estético de la misma, pero sin implicar su ruina estructural.

Aparte del anterior, dependiendo de las circunstancias concretas de la obra, pueden ser necesarias otras comprobaciones en servicio como: agresividad del terreno o del agua; vibraciones causadas durante la hincada en otras construcciones, etc.

En nuestro caso, debe evitarse todo movimiento diferencial en los entramados o entre ellos que pueda dañar los paneles o sus sujeciones, o pueda dar lugar a una inclinación excesiva de la mesa, con la consiguiente reducción potencial de producción eléctrica. También deben evitarse movimientos absolutos que puedan afectar al aspecto de la instalación o producir faltas de contacto excesivas entre el pilote y el terreno cerca de la superficie.

5. Verificación de la Seguridad

5.1 Métodos para Introducir la Seguridad en el Cálculo

El proyecto estructural se realiza habitualmente mediante el método de los *coeficientes parciales de seguridad* (PSF, del inglés *partial safety factors*) que requiere la utilización de diversos coeficientes que, en términos generales, mayoran las acciones y minoran las resistencias. El proyecto geotécnico podría seguir también dicha vía, pero en la actualidad aún no existe experiencia suficiente acerca de los valores de los coeficientes parciales de seguridad que han de utilizarse en cada caso. Por tal motivo, aunque algunas normas ya empiezan a introducir el método PSF en el cálculo geotécnico, sigue siendo normal en los problemas de cimentaciones utilizar un proceso de comprobación de la seguridad que está basado en el concepto del *coeficiente global de seguridad* (GSF, del inglés *global safety factor*), en ocasiones llamado también método de tensiones admisibles; dicho método engloba en un solo número la imprecisión que ha de considerarse en las acciones, en las resistencias y en los modelos de cálculo, o la debida a cualquier otra causa de incertidumbre, excepto el error humano. Tanto el método PSF como el GSF forman parte de los métodos para introducir la seguridad en el cálculo denominados como de Nivel I (métodos de coeficientes de seguridad). Las otras alternativas son los métodos de Nivel II (métodos del índice de confianza) y los de Nivel III (métodos de la probabilidad de fallo).

Las normas o recomendaciones especifican las situaciones de proyecto y las correspondientes combinaciones de acciones con las que se debe comprobar cada modo de fallo. En estados límite de tipo estructural no se suele diferenciar entre métodos de cálculo a la hora de establecer los coeficientes de seguridad, pues se entiende que los métodos permitidos o recomendados por la normativa tienen una fiabilidad análoga. Sin embargo, en los estados límite de tipo geotécnico sí que se tiene en cuenta a veces el método de cálculo a la hora de fijar el coeficiente de seguridad, debido a que la fiabilidad de uno u otro método puede ser muy distinta (e.g., si el método es puramente analítico o si está basado en ensayos de distinto tipo). Esto afecta tanto al método PSF como al GSF. Así, en el caso de emplear el método GSF, dicho coeficiente de seguridad irá asociado a un modo de fallo (e.g., hundimiento), a una situación de proyecto concreta (e.g., situación persistente), a una

combinación de acciones determinada (e.g., combinación cuasipermanente) y a un método de cálculo específico (e.g., método analítico).

5.2 Tipos de Combinaciones de Acciones

En el método PSF, las normas vigentes en la actualidad (e.g., el EC0) especifican para los estados límite últimos (ULS, del inglés *ultimate limit states*) distintos tipos de situaciones de proyecto (situaciones persistentes o transitorias, accidentales sin sismo, y sísmicas) pero una sola combinación de acciones para cada una de ellas (combinación característica o fundamental—una por cada acción variable dominante—, accidental sin sismo—una por cada acción accidental y por cada acción variable dominante—, y sísmica—una para cada nivel de sismo—, respectivamente); en el ámbito geotécnico se utiliza además la combinación cuasipermanente en situaciones de proyecto persistentes o transitorias, debido a la conveniencia de mantener un aspecto típico del cálculo geotécnico clásico, como es que la situación de rotura esté muy alejada en los estados de carga de mayor duración. En cambio, para los estados límite de servicio (SLS, del inglés *serviceability limit states*) las normas prescriben un solo tipo de situaciones de proyecto (persistentes o transitorias), aunque con tres combinaciones distintas (combinación característica o poco probable—una por cada acción variable dominante—, frecuente—una por cada acción variable dominante—, y cuasipermanente). En las combinaciones últimas cuasipermanente y característica, los coeficientes parciales de seguridad de las acciones son, en general, mayores que la unidad, mientras que en las combinaciones últimas accidental sin sismo y sísmica los coeficientes parciales valen la unidad (se entiende que serían nulos para acciones variables favorables), al igual que ocurre en todas las combinaciones de servicio

En el método GSF utilizado en el cálculo geotécnico, las combinaciones de acciones son las mismas independientemente del estado límite considerado (no se diferencia entre ULS y SLS), y se corresponden con las ya expuestas para los ULS en el método PSF (i.e., cuasipermanente, característica o fundamental, accidental sin sismo, y sísmica), aunque los coeficientes parciales de seguridad de las acciones no aparecen, por lo que es como si fueran iguales a la unidad (se entiende que serían nulos para acciones variables favorables).

Como se puede ver, en la normativa se consideran de forma conjunta las situaciones persistentes y las transitorias, pero sin olvidar que las acciones pueden tener distinto valor en cada una de ellas (distinta probabilidad de excedencia). Los ULS se comprueban para todas las combinaciones posibles, pero los SLS sólo se suelen comprobar para una o dos de las combinaciones (que la normativa especifica en cada caso).

5.3 Coeficientes de Mayoración y Minoración

En rigor, el método PSF exige que las acciones (fuerzas, deformaciones impuestas, movimientos impuestos) o sus efectos (esfuerzos, movimientos) se mayoran mediante el correspondiente coeficiente parcial de seguridad, de igual manera que se hace al minorar los parámetros resistentes (e.g., tensión de agotamiento) o sus efectos (resistencias). Normalmente se ponderan las acciones, γ_f , (no sus efectos, γ_e), y los parámetros resistentes, γ_m , (no sus efectos, γ_r). En este caso, se habla de un método MFA (del inglés *material factor approach*), que es el habitualmente empleado en el cálculo de estados límite de tipo estructural. Si lo que se ponderan son los efectos de las acciones, γ_e , y los efectos de los parámetros resistentes, γ_r , se habla de un método RFA (del inglés *resistance factor approach*).

Aparte de los coeficientes de seguridad parciales anteriores, se pueden especificar otros que tengan en cuenta la incertidumbre en el modelo de la acción o de su efecto, así como las variaciones dimensionales, γ_{Ed} , y la incertidumbre en el modelo del material o de su resistencia, así como las variaciones dimensionales, γ_{Rd} . Normalmente se incorporan estos

coeficientes en los anteriores, dando lugar a otros representados como γ_F y γ_M (en lugar de γ_f y γ_m), y como γ_E y γ_R (en lugar de γ_e y γ_r). En el factor γ_M también se suele incluir el coeficiente de conversión η , que tiene en cuenta los efectos de volumen y escala, los efectos de la humedad y la temperatura, y cualquier otro efecto de relevancia sobre la resistencia del material. Los coeficientes de mayoración de las acciones así obtenidos, γ_F , se denotan de forma específica como γ_G , γ_Q o γ_A , cuando se refieren a acciones permanentes, variables o accidentales, respectivamente.

El método PSF-RFA está muy próximo al GSF. De hecho sería idéntico si los coeficientes de ponderación, γ_E y γ_R , fueran constantes para cualquier tipo de acción y para cualquier término resistente. En esa situación, la equivalencia conduciría a un coeficiente de seguridad global $F = \gamma_E \gamma_R$. También sería posible utilizar métodos mixtos en los, en primera instancia, se mayoran algo las acciones y/o se minoran algo los parámetros resistentes, para después mayorar algo los efectos de las acciones y/o minorar algo las resistencias.

Aunque algunas recomendaciones de tipo geotécnico ya empiezan a utilizar el método PSF en toda su extensión, en la mayoría de los casos se siguen especificando parámetros resistentes sin minorar, definidos por algo parecido a su valor medio con cierta prudencia (no estaría claro si se trata realmente de un valor característico en sentido estricto). El resultado es un método PSF mixto en el que se ponderan las acciones, pero no las resistencias, por lo que la ecuación de verificación no es la convencional del método PSF, $R_d/E_d \geq 1$, sino $R_d/E_d \geq F_m$. En el método GSF la comprobación es del tipo $R_k/E_k \geq F_m$, es decir con acciones y resistencias sin ponderar. Lógicamente los valores del coeficiente de seguridad F_m dependerán del tipo de método de Nivel I empleado (PSF mixto, o GSF), así como del modo de fallo, de la situación de proyecto y de la combinación de acciones considerada, y, en ocasiones, del método de cálculo empleado.

Una forma alternativa de entender el método GSF es, según se ha dicho, como un método de tensiones admisibles; este tipo de métodos eran habituales hace varias décadas en los cálculos de estructuras y aún siguen siendo empleados en el ámbito geotécnico. En este caso, la comprobación se expresaría como $R_{adm}/E_k \geq 1$, o, mejor aún, como $E_k \leq R_{adm}$, siendo $R_{adm} = R_k/F_m$ el valor admisible de la acción sobre el terreno.

A título de ejemplo, en la Guía de cimentaciones GCOC/04 (Ministerio de Fomento, 2004) se utiliza el método GSF, en las Recomendaciones geotécnicas ROM-0.5/05 (Ministerio de Fomento, 2005b) se propone el método PSF mixto, y en la Guía de micropilotes GMOC/05 (Ministerio de Fomento, 2005a) se aplica el método PSF. En el EC7-1 el método propuesto con carácter general es el PSF.

En nuestro caso, se propone emplear para la verificación de la seguridad un método de Nivel I, es decir, basado en coeficientes de seguridad. Para los estados límite de tipo estructural (fallo de la estructura o de un elemento estructural, STR) se empleará el método PSF, tal y como especifican las normativas de materiales (hormigón, acero, etc.). Sin embargo, para los estados límite de tipo geotécnico (fallo del terreno, GEO) se aplicará el método GSF, por ser hasta la fecha el de mayor utilización en ingeniería geotécnica y para el que se dispone de una mayor experiencia y fiabilidad en sus resultados. Se tiene así en cuenta que no todos los métodos de cálculo geotécnico han sido suficientemente evaluados como para poder ofrecer, en la actualidad, coeficientes parciales adecuados a cada uno de ellos. Este aspecto es crítico, pues de entre la normativa que apuesta por el método PSF, sólo la más especializada (e.g., la GMOC/05) prescribe coeficientes parciales detallados para cada estado límite y para cada método de cálculo considerado en ella.

Eventualmente, en los estados tipo GEO se podría utilizar el método PSF o su variante mixta, si la normativa de aplicación obligatoria en un país determinado así lo exigiera, o si la literatura especializada para un cierto modo de fallo sólo ofreciera esa posibilidad. En

cualquier caso, no supondría mayor dificultad emplear el método PSF si se dispone de los correspondientes coeficientes de seguridad. No obstante, de acuerdo con la recomendación dada en la GCOC/04, aunque el método PSF podría aplicarse a cualquier método de cálculo, la experiencia actual indica que aún no es conveniente hacerlo sin contrastar el resultado obtenido con el método GSF; en este caso, podrían reducirse algo los coeficientes globales F_m , aunque no más de un 5%.

5.4 Procedimiento de Proyecto Propuesto

Las expresiones para el cálculo de E_d y R_d difieren en la forma en que se distribuyen los coeficientes parciales de seguridad entre las acciones, sus efectos, los parámetros resistentes y las resistencias. Las diferentes combinaciones posibles entre dichas expresiones dan lugar a diferentes aproximaciones o *procedimientos de proyecto* (DA, del inglés *design approach*), que han sido reducidos a tres en el EC7-1 (DA1, DA2 y DA3). Tanto el procedimiento o procedimientos a seguir como los factores de seguridad aplicables en cada caso, son de determinación nacional.

El procedimiento propuesto en este estudio para verificar los estados límite de tipo GEO en las cimentaciones a base de pilotes, se puede representar, siguiendo la simbología incluida en el EC7-1, como sigue:

- Conjunto combinado: $A3+M1+F_m$

donde A3 es un conjunto de coeficientes parciales de las acciones iguales a la unidad, específicos del cálculo geotécnico, diferentes, por tanto, de los coeficientes dados para los conjuntos A1 y A2 en el EC7-1; M1 es un conjunto de coeficientes parciales de los parámetros resistentes iguales a la unidad, específicos del cálculo geotécnico, iguales, por tanto, a los coeficientes dados para el conjunto de igual denominación en el EC7-1; y F_m es el coeficiente global de seguridad—que depende del modo de fallo, de la situación de proyecto, de la combinación de acciones, y, en ocasiones, del método de cálculo empleado—, diferente, por tanto, de los coeficientes dados para los conjuntos R1, R2, R3 y R4 en el EC7-1.

Según se puede comprobar, esta forma de proceder no coincide exactamente con ninguna de las previstas en el EC7-1, pero tiene la ventaja, según lo expuesto con anterioridad, de contar con mucha experiencia en su aplicación y, por tanto, de una gran cantidad de información para fijar los coeficientes de seguridad. Aun así, coincide con el procedimiento DA2 cuando en este último se ponderan los efectos de las acciones. El DA2 es un procedimiento tipo RFA con ponderación de las acciones o sus efectos, en el que la comprobación se realiza con un solo conjunto combinado de coeficientes parciales para la estructura y para el terreno.

5.5 Coeficientes Globales de Seguridad

En el método PSF los coeficientes parciales de seguridad son diferentes, en general, para los ULS y para los SLS. Sin embargo, en el caso de utilizar el método GSF todos esos coeficientes no aparecen en la expresión de las combinaciones por lo que se utilizan las mismas combinaciones para estudiar cualquier estado límite, sea éste último o de servicio.

Según lo indicado en la Tabla 1, los coeficientes globales de seguridad exigibles en los ULS se denominarán: F_1 y F_2 para las combinaciones cuasipermanentes y características, respectivamente, en situaciones persistentes; y F_3 para las combinaciones accidentales (incluida la sísmica) en situaciones accidentales. En situaciones transitorias y de corto plazo, podría admitirse un coeficiente de seguridad $F_2 < F < F_1$ para las combinaciones cuasipermanentes, y $F_3 < F < F_2$ para las combinaciones características. La elección entre uno u otro valor en cada caso dependerá del valor adoptado para la acción durante la situación

Tabla 1: Coeficientes Globales de Seguridad para ULS a Aplicar en cada Situación de Proyecto y Combinación de Acciones

Situación de Proyecto	Combinación de Acciones	Coefficiente Global de Seguridad
Persistente	Cuasipermanente	F_1
	Característica	F_2
Transitoria o de corto plazo	Cuasipermanente	$F_2 < F < F_1$ (a)
	Característica	$F_3 < F < F_2$ (b)
Accidental	Accidental sin sismo	F_3 (c)
	Sísmica	F_3 (c)

(a) Si se utilizan para la situación transitoria o de corto plazo acciones variables de igual valor que en la situación persistente, se tomará $F=(F_1+F_2)/2$ (criterio propuesto)

(b) Si se utilizan para la situación transitoria o de corto plazo acciones variables de igual valor que en la situación persistente, se tomará $F=(F_2+F_3)/2$ (criterio propuesto)

(c) Si la acción accidental da lugar a una situación de corto plazo, puede reducirse el coeficiente de seguridad F_3 en torno a un 10% (criterio propuesto)

transitoria. Si el valor característico de la acción en la situación transitoria o de corto plazo se obtiene para un período de retorno reducido que dé lugar a la misma probabilidad de excedencia en la vida útil menor de la situación transitoria, se podrá ir a valores altos del coeficiente de seguridad exigible dentro del rango indicado. Si el valor característico de la acción en la situación transitoria o de corto plazo se toma igual al considerado en situaciones persistentes, se podrá ir a valores bajos del coeficiente de seguridad exigible dentro del rango indicado; en la Tabla 1 se propone un criterio para elegir el valor del coeficiente de seguridad en este caso.

Utilizando un argumento similar para el caso de que la acción sea accidental y produzca situaciones de corto plazo en el terreno, también podría aplicarse una ligera reducción del coeficiente de seguridad F_3 ; en la Tabla 1 se propone un criterio práctico para este caso, cuya aplicación deberá ser decidida por el proyectista en función de la fiabilidad de los datos geotécnicos disponibles y del método de cálculo utilizado.

Por sencillez y de forma conservadora, se propone en este estudio tomar como valor de la acción variable en la situación de corto plazo el mismo que en la situación persistente, adoptando para el coeficiente de seguridad exigible un valor promedio dentro del rango indicado. Asimismo, la situación accidental se considera de corto plazo en el caso de terrenos cohesivos, pues ya sea viento huracanado o sismo último, la acción es tan rápida que no da lugar al movimiento del agua intersticial.

A título de ejemplo, en un caso en que la relación entre las cargas permanentes y las cargas variables sea $G/Q=1/2$, los coeficientes recomendados en el procedimiento de proyecto DA2 del EC7-1 para el caso de un pilote hincado ($\gamma_G=1,35$, $\gamma_Q=1,50$, $\gamma_\phi=1,00$, $\gamma_c=1,00$, $\gamma_{su}=1,00$, $\gamma_{Rc}=1,10$, $\gamma_{Rt}=1,15$), serían equivalentes a un coeficiente global frente a arranque $F=(1,35 \cdot 1/3 + 1,50 \cdot 2/3) \cdot 1,15 = 1,67$. En el método propuesto, utilizando los coeficientes globales de seguridad dados en la GCOC/04 (Ministerio de Fomento, 2004) correspondientes a situación de proyecto de corto plazo, combinación de acciones característica y cálculo de la resistencia a arranque realizado usando un método basado en los resultados de un penetrómetro estático (CPT o CPTU)— $F_2=2,2$ y $F_3=1,8$ —, se tendría un coeficiente global frente a arranque $F=(2,2+1,8)/2=2,0$. En general, se puede afirmar que los coeficientes globales de seguridad propuestos para el método GSF en la literatura para los

distintos modos de fallo, cubren sobradamente el nivel de seguridad fijado en el EC7-1, según se comprueba en el ejemplo expuesto.

6. Conclusiones

En relación con el proyecto de las cimentaciones, a base de pilotes hincados, para las estructuras soporte de paneles solares empleadas en centrales solares fotovoltaicas en campo abierto, se propone la verificación de la seguridad mediante un método de Nivel I basado en coeficientes globales de seguridad, teniendo en cuenta que en la literatura técnica no se dispone aún de coeficientes parciales suficientemente contrastados para todos los métodos de cálculo geotécnico.

Se justifica la equivalencia entre el método GSF propuesto y el procedimiento de proyecto DA2 incluido en el EC7-1, cuando en este último se ponderan los efectos de las acciones en lugar de ponderar las acciones mismas, concluyendo que los coeficientes globales de seguridad habitualmente usados en el método GSF para los distintos modos de fallo cubren sobradamente el nivel de seguridad fijado por el EC7-1.

Se dan recomendaciones para la aplicación de tres valores distintos de los coeficientes globales de seguridad en ULS, dependiendo de la situación de proyecto y de la combinación de acciones consideradas, con especial atención a las situaciones de corto plazo que aparecen en las comprobaciones geotécnicas de suelos cohesivos.

Agradecimientos

Se agradece a la empresa MFV Manufacturing, S.A., dedicada al diseño, fabricación, distribución y montaje de estructuras soporte de paneles fotovoltaicos, el apoyo prestado para el desarrollo del trabajo objeto de la presente ponencia.

Referencias

- Comité Técnico AEN/CTN-140 (2002). *UNE-EN 1990:2003. Eurocódigos: Bases de cálculo de estructuras*, EC0. Madrid: AENOR.
- Comité Técnico AEN/CTN-140 (2004). *UNE-EN 1997-1:2010. Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales*, EC7-1. Madrid: AENOR.
- Ministerio de Fomento (2004). *Guía de cimentaciones en obras de carretera* (2ª ed.), GCOC/04. Madrid: Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento.
- Ministerio de Fomento (2005a). *Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera*, GMOC/05. Madrid: Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento.
- Ministerio de Fomento (2005b). *ROM-0.5:2005. Recomendaciones para obras marítimas: Recomendaciones geotécnicas para obras marítimas y portuarias*, ROM-0.5/05. Madrid: Puertos del Estado, Ministerio de Fomento.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Carlos R. Sánchez-Carratalá
Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia
Tfno.: +34 96 387 7000 - Ext. 76772
Correo-e: csanchez@mes.upv.es
URL: <http://www.upv.es>