

NORMATIVA, CÁLCULO Y SEGURIDAD EN LA GEOTECNIA (EL EUROCÓDIGO)

Sesión impartida por D. Juan Diego Bauzá Castelló en el I Curso de Geotecnia para Infraestructuras en Málaga (2003)

1.- EL PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA GEOTÉCNICO

La resolución de una cuestión constructiva que implique un problema geotécnico, ya sea en fase de diseño, construcción o explotación, podría considerarse en la mayoría de las ocasiones una especie de artesanía. Como tal requiere conjugar en las dosis adecuadas la aplicación de la experiencia, de unas técnicas más o menos aceptadas y, porque no decirlo, un algo de inspiración (que lo dan los dos elementos anteriores).

Casi ningún problema tiene la misma solución que el anterior e incluso, un mismo problema suele ser abordado por técnicos diferentes con soluciones diferentes. Pero ello no es óbice para que se marquen unas reglas y se identifiquen unos principios sobre los que se deba plantear cualquier problema si se quiere llegar a una solución técnicamente razonable.

El planteamiento para la resolución de un problema geotécnico, ya que no es posible estandarizar una mecánica general, debe soportarse de manera indudable sobre tres pilares o principios ineludibles:

- La **experiencia** previa del técnico que lo aborda, que es precisa para la identificación del medio geológico, para plantear las alternativas de fallo posibles, para proponer el estudio adecuado del terreno, seleccionar el método de cálculo adecuado e interpretar los resultados del mismo.
- La **calidad** en la realización de los trabajos a desarrollar, como son el alcance y objeto del reconocimiento, la obtención de parámetros, el ajuste del método y la puesta en obra de la solución adecuada.
- La **seguridad** proporcionada en dicha solución que garantice su eficacia, y que debe basarse más que en un simple coeficiente final, en un “aseguramiento” de todas y cada una de las fases de trabajo desarrolladas.

En esta sesión se desarrollarán estos principios en los aspectos especialmente no cubiertos por las anteriores en las que se detallarán:

- La normativa disponible en el ámbito de la geotecnia
- El diseño de las campañas de reconocimiento geotécnico
- El planteamiento genérico de los métodos de cálculo geotécnico
- La seguridad en ellos, aplicada por distintos métodos habituales y propuestos en la normativa vigente

Hay que comentar que para el desarrollo de parte de este tema se han seguido especialmente los criterios e indicaciones recogidas en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera* del Ministerio de Fomento, por su especial oportunidad y por la precisión y exhaustividad de sus contenidos en relación con el tema.

2.- LOS CONDICIONANTES DE LAS OBRAS DE INFRAESTRUCTURA

Cualquier técnico que desarrolle su actividad en el ámbito del proyecto y obra de infraestructuras, incluso en su explotación, sabe de la influencia que tiene el terreno sobre la viabilidad de sus actuaciones y sobre su coste. Asimismo conoce la desproporción que existe usualmente entre el ahorro (mal entendido) en la prevención geotécnica y el coste de reparación de los daños originados por eludirla.

Pero a pesar de ello, las actuaciones se caracterizan por estar frecuentemente sometidas a unos condicionantes que en ocasiones llevan a plantear, consciente o inconscientemente, que no se evalúen totalmente los riesgos geotécnicos.

Esto ocurre a veces por falta de medios, quizás en la mayoría de los casos. La no-disposición de presupuesto para reconocimientos, la falta de tiempo para realizarlos, las limitaciones de las propias obras, o incluso la necesidad de ejecutarlas en ciertas épocas hace que los planteamientos no suelen desarrollarse en las condiciones ideales de “calidad-seguridad” mencionadas, aunque dispongamos de la experiencia precisa.

Otras veces este factor de conocimiento es el escaso en las obras. En ocasiones no es posible contar con la persona adecuada, por tiempo o por plazo, y los técnicos de obra o gabinete se ven obligados abordar un problema para el que no están especialmente dotados, pero cuya solución es apremiante.

Por ello es muy importante que se dispongan herramientas que suplan la carencia de tiempo y medios para desarrollar de manera ideal los principios de “experiencia-calidad-seguridad” que deben avalar la actuación.

3.- MEDIDAS PARA ASEGURAR EL ÉXITO DE LA ACTUACIÓN

Como técnico de “a pie”, cualquier ingeniero que debe abordar un problema de índole geotécnica conforme a los principios expuestos, debería trazar su programa de actuación incluyendo ineludiblemente los siguientes puntos.

Para asegurar un planteamiento basado en la **experiencia** como primer pilar de la actuación, es preciso seguir las siguientes pautas:

- 1 En caso de no ser experto en el problema, la solución más directa y fácil sería el **recurso a un especialista** en la materia, lo que de todas formas no siempre es posible económicamente o por cuestiones de disponibilidad temporal o geográfica.
- 2 La manera de suplir parcialmente esta ausencia es recurrir a la experiencia previa vertida en **documentos y bibliografía existente**, como son:
 - a. Planos y mapas
 - b. Fotografías aéreas
 - c. Estudios previos de zonas cercanas

- d. Textos técnicos
- e. Artículos técnicos

No obstante, es bien conocido que la obtención de textos en geotecnia es compleja e incluso que su aplicación práctica en problemas difíciles se hace a veces inabordable a técnicos poco experimentados.

- 3 En este aspecto es fundamental la consulta de la **normativa vigente** por cuanto recoge la experiencia previa aceptada por las autoridades técnicas en el país y por cuanto asegura o cubre, al menos, parcialmente la responsabilidad de los técnicos.
- 4 Finalmente es muy importante incluir en el equipo de estudio a los **técnicos de otras especialidades** que sean necesarios en la actuación, en especial a los geólogos.

En orden a asegurar la **calidad** de los trabajos, que nunca hay que darla por supuesta, es preciso incluir las siguientes medidas:

- 5 Plantear una **campana de reconocimiento** adecuada al terreno existente y a la tipología de las obras a construir. Este diseño deberá calibrar en cada caso:
 - a. Los tipos de reconocimientos
 - b. Su alcance, número y magnitud
 - c. La selección entre ensayos in situ y ensayos entre laboratorio
 - d. Las condiciones de ejecución de cada reconocimiento y ensayo
- 6 Disponer de los **recursos adecuados** para ejecutar esta campaña sin limitación excesiva.
- 7 Acometer la campaña por **personal experimentado y empresas acreditadas**.
- 8 **Supervisar la campaña de campo** con personal a pie de obra especializado en estas tareas.
- 9 **Reajustar o complementar la campaña** inicial ante cualquier posible laguna de información que pudiera detectarse, así como ante incoherencias o dudas de los resultados inicialmente previstos y reformas en las tipologías de las obras proyectadas.

Finalmente, la **seguridad** en la solución se deberá basar, más allá de la mera definición del “coeficiente”, en cuestiones tan importantes como:

- 10 Asegurar la **representatividad de los resultados** obtenidos en campo o laboratorio.
- 11 Identificar los **valores característicos de las propiedades** de los materiales.

- 12 Seleccionar el **modelo de cálculo** adecuado.
- 13 Contrastar las hipótesis adoptadas en la fase de diseño con las observaciones **“a escala real” en la de ejecución.**
- 14 Contrastar los resultados esperados mediante un **seguimiento adecuado de las obras**, bien mediante instrumentación, bien mediante observación directa de las mismas.

A continuación se desarrollan algunas de las ideas fundamentales de este planteamiento que sirve para concebir de manera adecuada las soluciones de los problemas geotécnicos, más allá de los conceptos específicos de los temas de cálculo, tipología de reconocimientos o planteamientos de fallos más propios de otras sesiones.

4.- LA NORMATIVA DE APLICACIÓN EN AL ÁMBITO DE LA GEOTECNIA

En este punto cabría preguntarse de manera genérica si, para el desarrollo de una técnica como es la Geotecnia, es necesaria o útil la existencia de normativa, y la respuesta, evidentemente, es afirmativa.

Las normas, entendidas como documentos de referencia que aglutinan y recogen las experiencias de otros profesionales expertos son, evidentemente, una herramienta de incalculable valor. Independientemente de su alcance o de su nivel de exigencia, hay que reconocer que la existencia de estos documentos no sólo facilita el desempeño de la función de los técnicos, sino que incluso condiciona el éxito en sus actuaciones.

Las obligaciones o restricciones de las normas o instrucciones, el establecimiento de márgenes de seguridad, las reglas y prescripciones en cuanto al control, etc. deben ser así entendidas como fruto de la experiencia, y no como meros caprichos de los legisladores o técnicos que redactan y exigen su aplicación.

Hay que entender que hoy en día no todos los técnicos disponen de conocimientos ni capacidad suficiente para abordar en su plenitud la diversidad de problemas que se les plantea en el desempeño de sus actividades. Y no basta con pedir que se recurra a “quien sabe”. A veces esto no es fácil o asequible, especialmente en obras “pequeñas”.

4.1.- TIPOS DE NORMAS

En esta sesión vamos a tratar la “Normativa” como el conjunto general de documentos de referencia existente. Y así, no sólo nos referiremos a lo que usualmente titulamos “Normas”, sino que aludiremos a ellas en su acepción más amplia.

Por su mayor amplitud y aplicación nos referiremos especialmente al conjunto normativo existente en el ámbito de las carreteras, fácilmente extrapolable a o otros sectores de las infraestructuras. En el panorama actual del mundo de las carreteras podríamos clasificar las normas según su rango o tipología en:

- Normas o directivas de aplicación obligatoria, donde se incluyen las leyes y preceptos jurídicos ineludibles, usualmente con contenido genérico.

Podríamos aquí incluir la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas, algunas Leyes de Carreteras autonómicas, etc..

- Instrucciones, Circulares o Recomendaciones que de manera más o menos exigente regulan aspectos concretos de cada una de las actividades. *Sería el caso de las Instrucciones del Ministerio de Fomento (MOP, MOPT, ...), Pliegos generales, Órdenes Circulares, reglamentos, etc., así como los de las autonomías.*
- Pliego de Condiciones específicos para la ejecución de actuaciones diversas, usualmente recogidos en los contratos o licitaciones particulares de cada uno de ellos. *Son textos específicos diferenciados usualmente para cada Administración y contrato pero que, en su mayoría, toman de referencia los publicados por el Ministerio de Fomento.*
- Otros documentos técnicos de referencia, fruto de experiencias o estudios que pretenden ilustrar sobre posibilidades de técnicas diversas. *Podríamos aquí citar los numerosos textos publicados por el CEDEX a modo de monografías, así como las publicaciones temáticas del Ministerio de Fomento.*

4.2.- ALCANCE DE LAS NORMAS

También podríamos agrupar o clasificar la normativa, en este caso la que se refiere a geotecnia, según su alcance o contenido según se refiera a:

- Reconocimiento geotécnico:
 - Especificaciones de las campañas
 - Normas sobre ensayos y reconocimientos
 - Características de materiales:
 - Clasificación de materiales
 - Valores característicos de sus cualidades
- Diseño de obras:
 - Dimensionamiento de elementos
 - Cálculo de estructuras

4.3.- NORMATIVA VIGENTE EN EL ÁREA DE GEOTECNIA EN CARRETERAS

En el mundo de las carreteras, hay que reconocer que el área de la Geotecnia ha sido uno de los últimos en incorporarse a la tendencia normativa o reguladora que ha impregnado al sector de la construcción.

Hasta hace poco no se disponían de documentos que sirvieran como tales en el momento de tratar los problemas geotécnicos en las carreteras. Y ello pudiera ser debido quizás a la falta de tradición, quizás a la falta de valentía o, por qué no decirlo, a la falta de voluntad de los especialistas que deben aportar esa experiencia precisa para la redacción de textos normativos.

En todo caso, como al fin se va poniendo sobre la mesa, nunca es cierto que sea imposible regular este área, como cualquier otra. El hecho de que la geotecnia sea ciertamente un “traje a medida” en cualquier obra no debe hacer que no se establezcan reglas o especificaciones para su aplicación.

Afortunadamente, poco a poco van apareciendo textos que, en este sentido, sirven de ayuda a los técnicos para poder plantear, e incluso a veces resolver, los problemas que en este campo se le plantean.

A continuación se repasan algunos de los textos de referencia, “normas” en el sentido más amplio de reglas o recomendaciones, que existen en este subsector en la actualidad. Se aportan además algunos comentarios con respecto a cada uno de ellos sobre su idoneidad o particularidad.

No es evidentemente posible en esta sesión ni repasar el contenido pormenorizado de los textos que se citan ni enumerar de manera exhaustiva la relación de textos existentes. Tan sólo se van a repasar los documentos de uso más frecuente por los ingenieros que nos dedicamos a este campo, observando aspectos relevantes de cada uno de ellos.

4.3.1.- Ley de Contratos de las Administraciones Públicas

Dado que la mayoría de las actuaciones en infraestructuras son promovidas por las Administraciones Públicas, el Real Decreto Legislativo 2/2.000, de 16 de junio, por el que se aprueba el texto refundido de la **Ley de Contratos de las Administraciones Públicas** es un texto de referencia ineludible.

En él se fija la obligatoriedad de incluir en los proyectos un “estudio geotécnico de los terrenos sobre los que la obra se va a ejecutar” (artículo 124.3), si bien no se explicita ni su alcance ni su contenido. Tampoco se hace en el reglamento que lo desarrolla.

La verdad es que este hecho no supone exigencia novedosa alguna dado que entendemos que es tradicional que este estudio ya figure en los proyectos de infraestructuras desde hace muchos años. Pero quizás debería, si no la ley sí el reglamento, definir con algo más de detalle qué se entiende por un “estudio geotécnico”.

4.3.2.- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes (PG-3)

Este es un documento clásico y de referencia, no sólo en el mundo de las carreteras, sino en casi todo aquél que aborda la obra civil. Al citar el PG-3 se incluye en él la serie de órdenes circulares y ministeriales que, poco a poco han ido modificando su contenido de manera parcial y que deben considerarse parte integrante de su texto.

En el ámbito de la geotecnia hay que mencionar que el PG-3 sólo abordaba, hasta hace poco, la caracterización de materiales y unidades de obra que se podrían calificar como “de aportación”, sin afrontar el reto del tratamiento de los suelos o cimientos de las estructuras: El de los “terrenos sobre los que la obra se va a ejecutar” (L.C.A.P.).

La Orden Circular 326/00 del Ministerio de Fomento sobre **Geotecnia Vial en lo referente a materiales para la construcción de explanaciones y drenajes**, ya trasvasada al PG-3, ha modificado en parte este panorama y avanza en el estudio de materiales especiales pero frecuentes (como los suelos blandos, suelos con yesos, etc.), y en el de unidades de obra que muy usuales en el ámbito de la geotecnia (geotextiles, jet-grouting, anclajes, etc.).

No obstante, el PG-3 como documento de referencia básico para la ejecución de obras de carreteras, sigue ignorando gran parte de los problemas del subsuelo que se plantean a la hora de diseñar y proyectar carreteras. Puede que no sea su función, pero ciertamente para la mayoría de los técnicos que lo manejan como “enciclopedia” sería de gran utilidad que se incluyera esta idea.

Y así, a este nivel, aún no se dispone de ningún texto que ayude a estudiar el terreno subyacente, las cimentaciones de estructuras y terraplenes, los taludes, etc..

4.3.3.- Recomendaciones del Ministerio de Fomento

En esta falta de tratamiento de algunos de los aspectos geotécnicos de las obras de carreteras en que incurren las normas principales del mundo de las carreteras, brillan por su excepcionalidad una serie de documentos de referencia de muy alto nivel técnico y práctico.

Se trata de una serie de textos, la mayoría de ellos agrupados en las series de “Normativas”, “Monografías” o “Tecnología” de las publicaciones del Ministerio de Fomento, que abordan temas concretos y específicos como son los siguientes (se indica entre paréntesis el año de su primera publicación):

- **Recomendaciones para la redacción de los estudios de carreteras** (1.983): Que se limita tan sólo a establecer la necesidad del Anexo geotécnico y, someramente, su contenido;
- **Terraplenes y pedraplenes** (1.989): Que quizás es el texto que más claramente aborda lo que hasta ahora se ha citado como una carencia, es decir, el tratamiento de los cimientos de terraplenes;
- **Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera** (IAP -1.998), que aborda las solicitaciones del terreno sobre las estructuras, pero no las de éstas sobre el terreno, ni su interacción.
- Las monografías:
 - **Manual para el proyecto y ejecución de estructuras de suelo**



- **reforzado (1.994)**
- **Tipología de muros de carreteras (1.997)**
- **Interpretación de curvas de sondeos eléctricos verticales (1.987)**
- **Sistemas de estabilización y protección de taludes y laderas rocosas. Protección contra desprendimientos de rocas. Pantallas dinámicas (1.996)**
- **Recomendaciones para el diseño y construcción de muros de escollera en obras de carreteras (1.998)**
- **Manual para el control y diseño de voladuras en obras de carreteras (1.993)**
- **Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera (2.001)**
- **Guía de cimentaciones en obras de carreteras (2.003)**

- **Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas de transporte (IOS-98):** Que traza las líneas generales para el planteamiento del problema en túneles;

- Estudios previos del terreno (diversos)

No cabe hacer ninguna objeción a esta serie de documentos que afortunadamente están proliferando en los últimos años y que evidentemente suponen un apoyo de incuestionable validez en el planteamiento de los problemas geotécnicos.

4.3.4.- Instrucciones para el diseño de firmes

Desde el punto de vista de la parte de geotecnia vial destinada a dimensionar los firmes, el documento conocido como **Instrucción 6.1-I.C. y 6.2-I.C. Secciones de firme** (1.989) es otro de los clásicos en el mundo de las carreteras, y de los más manejados por cualquiera de los técnicos que trabajan en él.

Norma de referencia y documento de trabajo constante para sus creadores, son conocidas ampliamente sus versiones, adaptaciones y evolución. Desde el punto de vista geotécnico hay que mencionar que adolecía de uno de los fallos más importantes que ha motivado ruinas y patologías en las obras: ¡Olvidarse de lo que “hay” bajo el firme!. Evidentemente no es su función, pero no estaría de más que se incidiera en la necesidad de su consideración. No es esta una observación gratuita, aunque sea polémica. Y mucho menos desde el punto de vista de los que, además de hacer estudios geotécnicos, con frecuencia abordan temas de patologías en firmes.

Sin entrar en el debate de si una instrucción tipo “catálogo” es válida o la más adecuada, la verdad es que el planteamiento del problema ha llevado a múltiples errores de difícil subsanación: ¿Queda claro en este texto que la explanada no es “un plano”?; ¿cómo se debe incluir en el catálogo las características del terreno natural subyacente a ese plano?; ¿basta con el C.B.R. de los primeros centímetros?. Estas preguntas son obviedades, si no dudas ofensivas, para casi todos los que trabajan esta instrucción. Pero es posible asegurar que los errores que por ello se cometen siguen apareciendo y en proporciones alarmantes.

Con la publicación de la **Orden Circular 10/2002 sobre Secciones de Firmes y capas Estructurales de Firmes** de reciente publicación, parece que se plantea más estrictamente la cuestión, si bien sigue sin dar suficiente importancia a la necesidad de definir el estudio geotécnico apropiado para estos fines.

4.3.5.- Normas de ensayos de materiales

Se agrupan en este epígrafe, especialmente, las normas NLT, ASTM, así como las normas UNE que van regulando cada vez más los procesos para la obtención de valores sobre las características de los materiales y su expresión. También se pueden incluir en este apartado algunas órdenes del Ministerio de Fomento que, si bien pueden considerarse como anexos al PG-3, por su contenido encajan en este apartado o grupo de textos. Es el caso de las siguientes:

- Orden Circular nº 297/88 **Recomendaciones sobre estabilizaciones de suelos in situ y tratamientos superficiales con ligantes hidrocarbonados**
- **Instrucción para la recepción de cales en obras de estabilización de suelos (1.993)**
- Orden Ministerial de 27-12-1.999 por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes en lo relativo a conglomerantes hidráulicos y ligantes hidrocarbonados.
- Anexos a la **Orden Circular 10/2002 sobre Secciones de Firmes y capas Estructurales de Firmes** que regulan, entre otros aspectos, las estabilizaciones de suelos con cal.

Como uno de los comentarios que sugieren este tipo de textos, que últimamente van proliferando y actualizándose de manera permanente, quizás se podría apuntar una cierta inercia o resistencia a afrontar materiales no convencionales en los que las normas y sistemas tradicionales de caracterización no son totalmente aplicables y que, si bien no existe “suficiente experiencia”, hay que considerar que su empleo está creciendo recientemente.

4.3.6.- Pliegos de condiciones técnicas para la redacción de proyectos

A la hora de repasar los documentos de referencia, es imposible olvidarse de los “Pliegos de Condiciones” para la redacción de proyectos que se incluyen en sus contratos y licitaciones, y más especialmente el del Ministerio de Fomento, como documento de consulta para el resto de las Administraciones.

Usualmente este tipo de documentos regula en líneas generales las partes que deben constituir un proyecto y sus documentos, entre los que se describe el anejo geotécnico. Pero es posible afirmar que estos documentos pecan, en la mayoría de las ocasiones, de una discordancia o incoherencia en la forma de abordar los problemas o aspectos particulares. Así, frente a temas que se desarrollan en exceso en detalle, otros se describen de manera tan genérica que es imposible fijar su magnitud.

¿Por qué no se fijan, por ejemplo, el número de reconocimientos por unidad de longitud y sí el de ensayos por metro de sondeo?. Ejemplos como este son claros y variados.

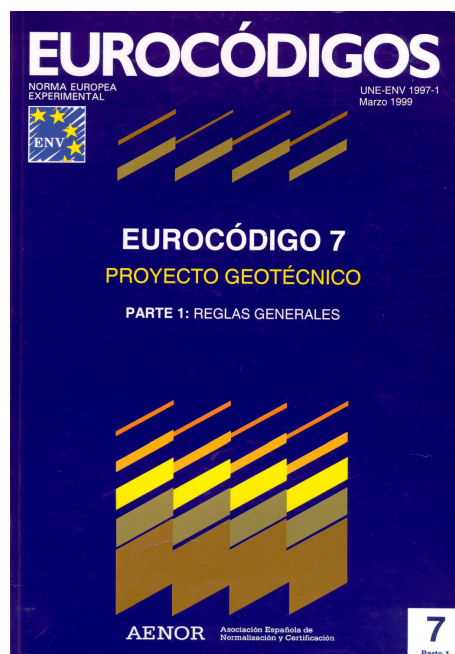
Otra segunda objeción a este tipo de documentos, quizás que la más importante, a este tipo de documentos es que son imposibles de aplicar en la práctica en la mayoría de las ocasiones. De nada sirve establecer una campaña geológica tan exhaustiva que su coste es superior al de la redacción del proyecto en ciertas obras, por ejemplo, en los acondicionamientos. De nada sirve así, por ejemplo, exigir “un sondeo por pila” si no sabemos que el coste de esa campaña es inabordable para un proyecto dado. Cualquier norma que sea difícil, cuando no imposible, de cumplir está condenada al olvido. Y puede que éste sea el destino de estos pliegos si no se adapta su contenido al tipo de obras a que se refieren y se hace más uniforme en ellos el nivel de exigencia o definición.

4.3.7.- Una nueva línea en la normativa geotécnica: el Eurocódigo

Como ya se ha citado anteriormente, a la hora de plantear la geotecnia, el mundo de las infraestructuras ha seguido, como en otros aspectos una cierta tendencia a la inercia en los planteamientos que, usualmente, hacen costoso cualquier cambio en los enfoques de los problemas.

No obstante, hay veces en que estas inercias se vencen y aparecen nuevas líneas, bien procedentes del propio sector, bien en su mayoría, de sectores externos.

En el caso de la geotecnia, podríamos decir que la llegada de la normativa europea, aún no implantada en su totalidad, promete ser uno de esos cambios tecnológicos que puede dar un vuelco al planteamiento que en la actualidad hacemos del problema.



En este sentido hay que mencionar el **Eurocódigo 7: Proyecto Geotécnico** como un texto que debe empezar a tomarse en consideración y en torno al cual deben articularse los nuevos métodos de cálculo en el área de la geotecnia.

Hay que destacar en él la nitidez con que se abordan conceptos como:

- Los estados límites;
- La clasificación de las categorías geotécnicas que, en función de la responsabilidad de la obra, establece campañas de reconocimientos y procesos de cálculo diferenciadas;
- Los coeficientes de seguridad parciales, tanto en acciones como en propiedades del terreno; y
- Las frecuencias de ensayos y reconocimientos precisos.

4.3.8.- Normativa de ámbito local

Afortunadamente, las publicaciones en esta área van floreciendo, y surgen guías, recomendaciones o instrucciones que están intentando plasmar la especificidad de la gestión de las diferentes infraestructuras locales, cada una en su ámbito. Estos esfuerzos están siendo generados fundamentalmente desde las Administraciones Autonómicas, y se plasman principalmente en textos para el diseño de carreteras o redacción de estudios geotécnicos.

Es posible citar como ejemplo las siguientes:

Recomendaciones Técnicas para la realización de Estudios Geológico-Geotécnicos Previos de la red Regional de Carreteras de la Junta de Castilla y León

Estas Recomendaciones que establecen una metodología para el estudio previo de los suelos que caracterizan la traza de una carretera, así como de los materiales disponibles para su empleo en la misma.

Hay que destacar de este texto como una de sus más importantes novedades la metodología que ofrece para la clasificación o tramificación de diversas zonas de una carretera o préstamo. Esto se hace mediante un análisis estadístico de los resultados de los ensayos que se obtienen de las diversas muestras que se analizan.

Instrucción para el Diseño de Firmes para la Red de Carreteras de Andalucía

Otro texto de referencia, fruto de la iniciativa de una comunidad autónoma, es la Instrucción andaluza, que contempla y aborda de una manera novedosa el tratamiento del terreno natural subyacente bajo el terraplén.

Introduce este texto, además, el cálculo analítico de secciones considerando éstas como “estructuras de tierra” y plantea las líneas generales para la resolución de carreteras sobre suelos compresibles, suelos muy plásticos, etc..

5.- EL DISEÑO DE LAS CAMPAÑAS DE RECONOCIMIENTO

Como se ha citado en otras sesiones, es evidente que el planteamiento correcto de una campaña de reconocimiento adecuada al problema geotécnico que se pretende resolver es una de las cuestiones fundamentales que aseguran el éxito de la misma.

Al tratar el tema de la normativa se ha mencionado cómo en diversos pliegos y textos se suelen incluir e incluso cuantificar campañas genéricas que casi nunca sirven de aplicación y, por tanto, son de dudosa utilidad.

Por otra parte y si bien es cierto que cada problema requiere su reconocimiento específico, también lo es que sería más que aconsejable establecer unos ciertos “protocolos” de reconocimiento normalizados para las cuestiones más habituales. Si así se hiciera se evitaría, por ejemplo, infradimensionar los estudios geotécnicos precisos en un proyecto de complejidad media y disponer de los recursos económicos que aseguran

su ejecución. O que, por falta de conocimiento específico se dejen de realizar ensayos en puntos críticos de unas obras.

Desde este punto de vista la *Guía de cimentaciones en obras de carretera* del Ministerio de Fomento tipifica las clases de reconocimiento del terreno y el número de los mismos para asegurar el conocimiento del medio en que se proyecta una obra dada. Esta normalización se regula según los siguientes criterios:

5.1.- CRITERIOS GENERALES

- Los reconocimientos del terreno deben ser suficientemente amplios como para conocer el terreno en las zonas de influencia de las cimentaciones.
- En especial en profundidad se debe sobrepasar la zona donde las cargas de cimentación pueden tener efecto.
- Las zonas amplias deben reconocerse mediante técnicas adecuadas (cartografía geológica, reconocimientos geofísicos, rozas y/o calicatas y algunos sondeos mecánicos y/o ensayos de penetración continuos) para alcanzar un conocimiento global.
- En el entorno de los cimientos, el conocimiento del terreno debe ser más detallado.
- Han de caracterizarse no sólo los suelos y/o rocas que aparezcan en el subsuelo sino todos los detalles relevantes, en particular los relativos a la situación del agua en el terreno.

5.2.- CALIFICACIÓN DEL TERRENO PARA DETERMINAR LA INTENSIDAD DEL RECONOCIMIENTO

La naturaleza del terreno puede clasificarse según:

- Su variabilidad, que los dividirá en homogéneos, normales y heterogéneos. Se considera que la variabilidad de un terreno es «normal» cuando las características geotécnicas en la vertical de un punto pueden predecirse con precisión adecuada al fin que se persigue, interpolándolas entre las obtenidas en sondeos espaciados aproximadamente unos 20 m entre sí.
- Su capacidad de soporte relativa a la ejecución de una determinada cimentación (condiciones de cimentación), en que pueden distinguirse situaciones favorables, normales o adversas:
 - Una situación «normal» es aquella que, conduciendo a una cimentación usual, relativamente fácil de ejecutar y sobre la que se tiene cierta experiencia previa, no resulta especialmente sensible a las variaciones de calidad esperables en el terreno de cimentación.
 - Condiciones de cimentación adversas (peores que lo normal) pueden darse en aquellos terrenos problemáticos que obliguen a utilizar procedimientos especiales de cimentación.

- Condiciones de cimentación favorables (mejores que lo normal) son aquellas en las que la solución aplicada es de buen comportamiento aunque las condiciones del terreno cambien dentro del rango esperado.

5.2.- CLASES DE RECONOCIMIENTOS DEL TERRENO

Atendiendo a estas clasificaciones, los reconocimientos necesarios pueden calificarse como intenso, normal y reducido, según la siguiente tabla:

TABLA 3.5. CLASES DE RECONOCIMIENTO

CONDICIONES DE CIMENTACIÓN \ VARIABILIDAD DEL TERRENO	HETEROGÉNEO	NORMAL	HOMOGENEO
	ADVERSAS	Especial	Intenso
NORMALES	Intenso	Normal	Reducido
FAVORABLES	Normal	Reducido	Esporádico

Antes de iniciar la realización de una campaña de reconocimiento geotécnico, se debe haber analizado previamente la situación correspondiente y haber identificado los objetivos de los reconocimientos, el número de puntos de reconocimiento y su situación basada en la geometría prevista de las obras a realizar y la información preexistente.

Adicionalmente, en función de que se observe que las condiciones son más o menos homogéneas o favorables que lo previsto convendrá replantear la situación y ampliar o reducir la intensidad de la campaña consecuentemente.

5.3.- RECONOCIMIENTO DE INTENSIDAD NORMAL

La intensidad de los puntos de reconocimiento para una campaña normal será la recogida en la siguiente tabla de la Guía:

TABLA 3.6. NÚMERO DE PUNTOS DE RECONOCIMIENTO RECOMENDADOS EN SITUACIONES NORMALES (VÉANSE NOTAS ACLARATORIAS EN EL TEXTO)

		N.º DE PERFILES TRANSVERSALES AL EJE DE LA OBRA		N.º DE PUNTOS POR PERFIL		ESQUEMA
Puentes de varios tramos	1 perfil por cada apoyo (cimentaciones superficiales o profundas)		$L \leq 10$ m	$L > 10$ m	2 uds	
	$L < 20$ m	1 ud	1 ud	1 ud		
Puentes de un tramo y pasos inferiores	$L < 20$ m		$B \leq 8$ m	$B > 8$ m	2 uds	
	1 + 1 perfil por cada 50 m o fracción, de longitud total de la obra de paso		1 ud	1 ud		
Muros	1 perfil por cada 20 m o fracción, de longitud total del muro		$H \leq 5$ m	$5 \text{ m} < H \leq 10$ m	$H > 10$ m	
	1 ud	2 uds	3 uds			
Apoyo de terrapienes	$L \geq 200$ m		$H_{\text{max}} \leq 10$ m	$H_{\text{max}} > 10$ m	3 uds	
	$L < 50$ m	1 ud	2 uds	3 uds		
Depositos de suelos blandos que se van a tratar	1 perfil por cada 50 m de longitud o fracción, según el eje del tratamiento		$B \leq 30$ m	$B > 30$ m	3 uds	
	2 uds	3 uds				

Como notas complementarias se deben tener en cuenta las siguientes:

- a) Normalmente, en cada punto de reconocimiento se realizará un sondeo mecánico. Éste podrá sustituirse por los siguientes reconocimientos:
- En suelos blandos, entre 1/3 y 2/3 de los puntos deben reconocerse mediante ensayos penetrométricos estáticos, piezocono preferiblemente.
 - En suelos de consistencia «media» o algo menor, hasta la mitad de los sondeos pueden sustituirse por ensayos penetrométricos dinámicos continuos.
 - En suelo firme o muy firme, hasta la mitad de los sondeos puede sustituirse por exploraciones mediante calicatas.
 - En situaciones de roca aflorante, hasta dos tercios de los puntos pueden reconocerse mediante estaciones geomecánicas con censado de litoclasas.
- b) Cimentación de puente en varios tramos: Es recomendable reconocer todos y cada uno de los apoyos de los puentes. Además, si el apoyo es de grandes dimensiones, será necesario reconocer al menos dos puntos por cada apoyo.

5.4.- RECONOCIMIENTOS INTENSOS

Desde el punto de vista del terreno, el reconocimiento geotécnico debe ser de mayor intensidad que el normal en casos como los siguientes:

- Zonas falladas de amplia repercusión superficial
- Zonas de alteración irregulares
- Cauces fluviales fósiles y paleovaguadas
- Zonas carstificadas
- Depósitos de suelos erráticos con cambios laterales importantes

Se debe dar por buena una determinada intensidad del reconocimiento cuando una nueva prospección conduce a un resultado predecible con la información precedente. En cuanto a la amplitud de los reconocimientos de suelos heterogéneos, hay que considerar la repercusión de las posibles heterogeneidades del terreno para cada tipo y dimensiones de la cimentación.

El estudio del terreno debe ser más intenso para aportar mayor confianza en los datos que hayan de utilizarse en el cálculo posterior. La investigación deberá dirigirse a los aspectos que confieran al terreno de cimentación el carácter de «condiciones desfavorables», hasta que de la misma se obtenga información que permita abordar con garantías el proyecto de la solución.

5.5.- RECONOCIMIENTOS ESPECIALES

Dada la diversidad de casos que pueden presentarse, no pueden darse recomendaciones específicas sobre el reconocimiento del terreno en este tipo de circunstancias especiales. Únicamente se advierte que la selección de la tipología de la cimentación, debe asegurar la menor sensibilidad posible a las heterogeneidades locales

con seguridad suficiente aunque exista cierta incertidumbre en el conocimiento del terreno.

5.6.- RECONOCIMIENTOS REDUCIDOS

En circunstancias que permitan el reconocimiento reducido, el número de puntos a investigar puede ser menor y, además, algunos de los sondeos de reconocimiento a realizar pueden ser sustituidos por reconocimientos más simples, tales como calicatas o ensayos penetrométricos continuos que confirmen no sólo la homogeneidad supuesta en el terreno sino también que las condiciones de cimentación son las previstas.

En este caso, el número de puntos de reconocimiento puede reducirse a la mitad del indicado para situaciones normales. En todo caso, se recomienda que el número de sondeos mecánicos mínimo sea el siguiente:

- Puentes: 3 sondeos (estribos y en la pila de mayor altura)
- Pasos inferiores: 1 sondeo
- Muros: 1 sondeo cada 50 m de longitud (mínimo 2 sondeos)
- Terraplenes: 2 sondeos en la sección de mayor altura, si ésta es mayor de 10 m

En el caso de apoyo de terraplenes sobre las formaciones de suelos blandos que puedan requerir tratamiento debe practicarse siempre un reconocimiento geotécnico normal o de mayor intensidad, según el caso.

5.7.- RECONOCIMIENTOS ESPORÁDICOS

Tan sólo cuando simultáneamente se cumpla que la cimentación en cuestión no sea sensible a la naturaleza y características del terreno dentro de los límites previstos de variación de las características de ambos (cimentación y terreno) y cuando simultáneamente el terreno sea claramente homogéneo, el número de puntos a reconocer puede reducirse notablemente.

5.8.- PROFUNDIDAD DE LAS PROSPECCIONES

Las profundidades a alcanzar con los distintos tipos de técnicas de prospección dependen de la tipología de éstas y de las obras a construir, con las siguientes indicaciones:

5.8.1.- Cimentación de terraplenes

La profundidad de reconocimiento necesaria para el proyecto de los cimientos de los terraplenes será generalmente la menor de las tres siguientes:

- a) El ancho de la zona de apoyo, cuando se trata de suelos blandos.
- b) Hasta un terreno de resistencia suficiente para garantizar la estabilidad global.
- c) Hasta roca sana

5.8.2.- Cimentaciones de estructuras

Se fijará según el tipo de cimentación que se piensa proyectar. En caso de dudas se supondrá que la cimentación será profunda.

5.8.2.1.- Cimentaciones superficiales

Se debe alcanzar una profundidad mínima bajo el futuro plano de apoyo dada por el valor siguiente:

- $z_{\min} \geq 1,5 B$.
- $z_{\min} \geq 10 \text{ m} + \sqrt{A}$, cuando puedan existir suelos blandos en profundidad.

Donde:

z_{\min} = Profundidad mínima del reconocimiento.

B = Ancho de la cimentación (dimensión menor en planta).

A = Área de apoyo de la cimentación, expresada en m^2 .

Siempre es además conveniente que en los puentes de varios vanos se realice al menos un sondeo claramente más profundo, para conocer la estructura general del terreno.

En el caso de apoyos a media ladera será necesario estudiar la estabilidad de la ladera natural antes y después de colocada la cimentación. Ello puede requerir sondeos más abundantes y profundos.

5.8.2.2.- Cimentaciones profundas

En el caso de las cimentaciones profundas, antes de decidir la profundidad del reconocimiento es conveniente estimar mediante predimensionamiento datos como el diámetro de los pilotes, D, y el ancho del grupo o conjunto de pilotes en un mismo apoyo, B. Los valores recomendados son los siguientes:

a) Pilotes por punta

Debe ser la mayor de entre las dos siguientes:

$$z_{\min} \geq z_0 + 10 D$$

$$z_{\min} \geq z_0 + 1,5 B$$

Donde:

z_0 = Profundidad del nivel donde se vayan a apoyar los pilotes.

D = Diámetro del pilote.

B = Ancho del grupo o conjunto de pilotes.

En todo caso, el reconocimiento del terreno no penetrará menos de 6 m bajo la punta de los pilotes, aunque en esa zona exista roca sana, competente y continua en profundidad.

b) Pilotes por fuste

La profundidad del reconocimiento, contada desde la cabeza de los pilotes, debe ser la mayor de entre las dos siguientes:

$$z_{\min} \geq L + 5 D$$
$$z_{\min} \geq 1,5 (L + B)$$

Donde:

z_{\min} = Profundidad mínima del reconocimiento.

L = Longitud del pilote.

D = Diámetro del pilote.

B = Ancho del grupo o conjunto de pilotes.

En los casos en que se sospeche que existen suelos especialmente blandos a mayores profundidades, será necesario profundizar más los reconocimientos.

c) Otros aspectos

En cualquier caso, siempre es recomendable disponer al menos un sondeo más profundo para confirmar la estructura general del terreno en profundidad. En el caso de cimentaciones en laderas que pudieran resultar inestables, la intensidad y profundidad de los reconocimientos pueden venir dictadas por ese motivo. El reconocimiento debe ser suficientemente amplio, intenso y profundo para comprobar con garantías la estabilidad de la ladera.

5.9.- NÚMERO DE MUESTRAS Y ENSAYOS

Al tiempo que se realizan los sondeos y se testifican los terrenos encontrados, deben prepararse perfiles geotécnicos diferenciando los distintos tipos de suelos y/o rocas que puedan encontrarse. Los criterios de muestreo se regirán por las siguientes reglas:

- Para cada tipo de terreno se exigirá disponer al menos de tres muestras representativas.
- En formaciones homogéneas de gran espesor no conviene espaciar la toma de muestras más de 5 m en ningún caso.
- En formaciones arenosas deben realizarse ensayos y tomas de muestras con la cuchara del SPT con espaciamientos regulares, preferiblemente cada 1 m de avance, y nunca más espaciados de 3 m.
- Deberán ensayarse todas las formaciones diferentes atravesadas por el sondeo, aunque su espesor sea inferior al recomendado entre cada dos ensayos o tomas de muestra consecutivas.
- Las muestras que se tomen en los sondeos deben ser inalteradas o con la mínima alteración posible cuando se destinen a la realización de ensayos de laboratorio diferentes de los de identificación.
- Las muestras deberán ser en todo caso representativas del terreno, lo que supone que se deben evitar las segregaciones parciales del material extraído.

Los ensayos de laboratorio deben programarse de acuerdo con los criterios siguientes:

- Todas las muestras deben ser sometidas a ensayos de identificación sencillos (granulometría, límites de Atterberg).
- Al menos dos muestras representativas de cada terreno deben someterse a ensayos de identificación más completos (mineralogía, pesos específicos, densidades extremas en arenas).
- Todas las muestras inalteradas deben ensayarse para determinar su densidad y su humedad natural.
- Cada terreno debe caracterizarse con, al menos, dos ensayos de resistencia y deformabilidad en laboratorio. Dependiendo del tipo de terreno estos ensayos serán triaxiales, de corte directo y/o edométricos.
- Cuando sea de interés para el caso en estudio, se realizarán ensayos de permeabilidad en célula triaxial, en permeámetro o en edómetro, dependiendo del tipo de terreno.
- El programa de ensayos de laboratorio debe ajustarse a medida que se van conociendo los resultados de los ensayos de identificación. Puede ser necesario ampliar el número de ensayos cuando la identificación de los terrenos indique que existen más grupos diferentes que los inicialmente previstos.

6.- MÉTODOS DE CÁLCULO EN LOS PROBLEMAS GEOTÉCNICOS

En el cálculo de cimentaciones y tratamientos del terreno es habitual plantear el problema de manera que se pueda asegurar que la solución proyectada no sólo soporta con seguridad suficiente las cargas impuestas, sino también que no sufre deformaciones que sobrepasen los límites admisibles por razones estéticas y de servicio.

No obstante, existe tal diversidad de procedimientos en este ámbito que es difícil agruparlos todos en torno a unas reglas mínimas de funcionamiento. La mayoría de los métodos se basan en planteamientos empíricos, reglas aproximadas o simulaciones estimativas cuyo tratamiento conjunto es complejo. No existe aún en este campo, como pudiera ser en el de las estructuras, un programa o sistema de cálculo genérico que, aplicado a cualquier problema, proporcione una solución “estándar”.

Sin embargo, en los últimos años, existen importantes y lógicas tendencias normativas que pretenden un intento de homogeneización en los proyectos geotécnicos, basado en establecer criterios generales.

Esta tendencia es más acusada en los problemas de cimentaciones, en que los inicios de esta normalización ya se encuentran bastante avanzados y, por ejemplo, se recogen en la *Guía de cimentaciones de obras de carretera* del Ministerio de Fomento conforme a las líneas que se apuntan a continuación.

Según ella, el procedimiento de comprobación se basará en cálculos justificativos que habrán de hacerse con la ayuda de un modelo de comportamiento de la cimentación a estudiar y que deben concluir con la comprobación de que los coeficientes de seguridad resultantes superan los valores mínimos establecidos.

6.1.- MÉTODO DE LOS ESTADOS LÍMITE

El procedimiento general para comprobar la seguridad de una cimentación es el basado en el concepto de los estados límite. En un «estado límite» la cimentación alcanzaría una situación no deseada que debe evitarse. Atendiendo a la gravedad de sus consecuencias, los estados límite se clasifican en dos grupos: Estados límite últimos (ELU) y estados límite de servicio (ELS). Estos últimos también se denominan estados límite de utilización.

6.1.1.- Estados límite últimos

Los estados límite últimos generales de tipo geotécnico, provocados principalmente por las características del terreno, son los siguientes:

- Socavación de cimientos.
- Inestabilidad global.
- Falta de capacidad de soporte del terreno.

Es posible identificar otros tipos de estados límite últimos correspondientes a obras de cimentación específicas.

6.1.2.- Estados límite de servicio

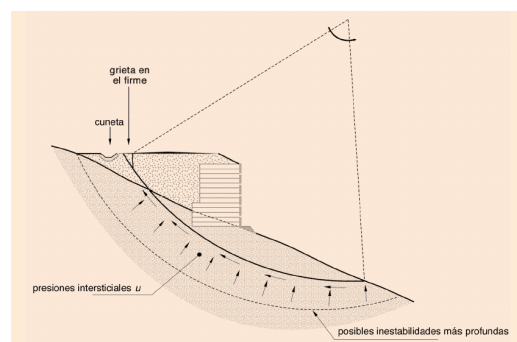
Los estados límite que interrumpen el servicio de las infraestructuras por razones de durabilidad o estéticas, son los siguientes:

- Movimientos excesivos.
- Plastificaciones localizadas.
- Vibraciones excesivas.

Existen otros estados límite de utilización menos frecuentes o que no son susceptibles de un cálculo específico.

6.2.- SITUACIONES DE PROYECTO

Una situación de proyecto es una representación simplificada de la realidad de la obra que sea susceptible de análisis. Para definir una situación de proyecto han de establecerse la geometría del cimiento y del terreno de apoyo, las características de éste y las acciones que pueden actuar sobre el cimiento.



Cada situación de proyecto debe llevar asociada una duración o período determinado de tiempo durante el cual se puede considerar que todos los factores que afectan a la seguridad no varían.

Las hipótesis simplificativas necesarias para definir situaciones de proyecto que representen la realidad de la obra durante su construcción y a lo largo de su vida útil, serán tanto mayores cuanto más simples sean los procedimientos de análisis.

Para cada situación de proyecto habrá que realizar cálculos de diversa índole. El propio método de cálculo puede requerir ciertas adaptaciones de la geometría, de las características del terreno o de las acciones. Como norma general se debe procurar que los cambios obligados por el procedimiento de cálculo sean los mínimos posibles y que además sean coherentes entre sí, guardando ciertas relaciones de compatibilidad básicas.

6.3.- CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA

Normalmente el elemento de cimentación se representa por formas de geometría sencilla y el terreno mediante secciones planas. Para establecer una situación de proyecto pueden requerirse varias secciones planas.

En cada sección se identifican los distintos tipos de terreno, separados generalmente mediante líneas rectas subhorizontales. Cuando esto no es posible, se suele recurrir a métodos de análisis y modelos numéricos más complejos que los habituales.

La descripción del estado del agua en el terreno suele centrarse usualmente en conocer la posición del nivel freático, aunque a veces es preciso conocer las oscilaciones del mismo, o la red de filtración correspondiente. Incluso puede que sea necesario diferenciar, por este solo hecho, varias situaciones de proyecto específicas.

6.4.- ACCIONES

Las acciones que han de considerarse para definir las diferentes situaciones de proyecto, serán esencialmente las reacciones en los apoyos de las estructuras correspondientes, así como los distintos pesos propios y presiones hidrostáticas en su caso.

Una singularidad de los cálculos geotécnicos habituales es que estas acciones no se mayoran dado que se suelen emplear procedimientos de análisis basados en “coeficientes de seguridad globales”.

6.4.1.- Clasificación de las acciones

Las acciones que actúan sobre los cimientos son de diverso tipo y pueden clasificarse, por su permanencia en el tiempo en:

Acciones permanentes:

- Pesos propios y cargas muertas.
- Empujes del terreno.
- Empujes y/o presiones y/o subpresiones del agua, de carácter casi permanente.

Acciones variables:

- Cargas de uso o explotación.
- Acciones climáticas (lluvia, viento, nieve, cambios térmicos, etc.).
- Aumentos transitorios del empuje, presión y/o subpresión del agua.

Acciones accidentales:

- Inundaciones o avenidas extraordinarias.
- Aumentos accidentales del empuje, presión y/o subpresión del agua.
- Choques o impactos.
- Sismos.

6.4.2.- Valor característico

Las acciones deben quedar cuantificadas por su valor característico, o principal valor representativo.

Si alguna acción no dispone de valor característico definido en la normativa vigente de aplicación al caso (IAP, EHE, etc.), el criterio a utilizar para definirlo puede ser el siguiente:

- La mejor estimación del valor medio en el caso de las acciones permanentes.
- El valor cuya probabilidad anual de ser excedido es del orden del 2%, en el caso de acciones variables.
- El valor cuya probabilidad anual de ser excedido es del orden del 0,2%, en el caso de acciones accidentales.
- En el caso de sismo, la acción que en su caso sea aplicable según la vigente Norma de Construcción Sismorresistente.

En ocasiones, las acciones variables, además del valor representativo principal o característico, tienen otros valores representativos, que se usan dependiendo del tipo de combinación de acciones. Estos son los valores representativos denominados «valor de combinación», «valor frecuente» y «valor casi permanente», que se obtendrán multiplicando el valor característico por un coeficiente reductor .

6.4.3.- Valor de cálculo

En los cálculos estructurales es habitual mayorar algunas acciones multiplicando sus valores representativos por ciertos coeficientes, obteniéndose así los valores de cálculo. Sin embargo, para el análisis de los problemas geotécnicos con los métodos habituales, los valores de cálculo de las acciones serán iguales que sus valores representativos. Únicamente en ciertos casos particulares, en los que las acciones variables puedan tener especial importancia en el estado límite en estudio, será recomendable mayorar alguna acción.

6.5.- COMBINACIÓN DE ACCIONES

En el cálculo estructural basado en el método de los coeficientes parciales de seguridad, se utilizan unas combinaciones de acciones para el estudio de estados límite

últimos y otras diferentes para el estudio de estados límite de servicio. Para el cálculo geotécnico, dado que no se mayoran las acciones, se utilizan las mismas combinaciones de acciones para analizar cualquier estado, sea éste último o de servicio.

Las combinaciones que normalmente interesan en el estudio de problemas geotécnicos según se recoge en la *Guía de cimentaciones de obras de carretera* se pueden clasificar en:

Combinación casi permanente:

- Acciones permanentes: valor característico
- Acciones variables concomitantes: valor casi permanente

Combinación característica:

- Acciones permanentes: valor característico
- Acción variable dominante: valor característico
- Otras acciones variables concomitantes: valor de combinación

Combinación accidental sin sismo:

- Acciones permanentes: valor característico
- Acción accidental: valor característico
- Acción variable dominante: valor frecuente
- Otras acciones variables concomitantes: valor casi permanente

Combinación sísmica:

- Acciones permanentes: valor característico
- Acción sísmica: valor característico
- Acciones variables: valor casi permanente

6.6.- CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO

Los parámetros geotécnicos que habitualmente describen el comportamiento del terreno pueden englobarse en cuatro clases:

- Identificación y estado (granulometría, mineralogía, límites de Atterberg, densidad, humedad, etc.)
- Resistencia.
- Deformabilidad.
- Permeabilidad.

Siempre es recomendable que los parámetros esenciales se determinen por varios procedimientos (ensayos «in situ» y en laboratorio, por ejemplo). De esa manera se podrá tener más confianza en el dato correspondiente.

Cualquier parámetro que caracterice al terreno debe tener un valor representativo que será una estimación prudente del valor medio que corresponde a la zona de interés en el problema que se analiza. No se suelen utilizar en los cálculos geotécnicos coeficientes parciales de seguridad para mayorar o minorar los valores representativos. Los valores de cálculo de los parámetros geotécnicos serán iguales que sus valores representativos.

6.7.- CLASIFICACIÓN DE LAS SITUACIONES DE PROYECTO

Atendiendo a la configuración geométrica, a las acciones, a las características del terreno y a su duración, las situaciones de proyecto se pueden clasificar en tres tipos, de los que dependerá el coeficiente de seguridad exigible.

6.7.1.- Situaciones persistentes

Una situación es persistente, cuando la geometría, la configuración del terreno y las características geotécnicas que las representan se mantienen durante un plazo similar al de la vida útil de la obra.

6.7.2.- Situaciones transitorias y de corto plazo

El carácter transitorio lo puede inducir el uso especial de la obra, las condiciones geométricas (fases de construcción) o incluso las características del terreno. Uno cualquiera de estos tres elementos puede motivar dicho carácter transitorio.

Un caso especialmente frecuente en geotecnia es examinar un tipo de situación específica denominada de «corto plazo» en la que se supone que el terreno tiene un exceso de presiones intersticiales que fue generado por las cargas aplicadas y que aún no se ha disipado. Normalmente, la duración de esa situación es corta cuando se compara con la vida útil de la obra y en consecuencia, a efectos de evaluar la seguridad, puede considerarse como una situación transitoria.

Para tener en cuenta estos hechos, a la hora de asignar los coeficientes de seguridad correspondientes, se plantean situaciones de corto plazo (terreno sin drenar) y de escasa duración (situaciones temporales durante la construcción o durante la vida útil) para que sean consideradas después en los análisis de seguridad que habrán de realizarse.

Las acciones variables que pueden considerarse actuantes en las situaciones de corto plazo deben ser definidas de acuerdo con la normativa vigente en cada caso o, a falta de información más específica, se pueden adoptar aquellos que tengan una probabilidad de ser sobrepasados del orden del 5% durante el período que dura la situación transitoria. En ese sentido no se considera necesario suponer la existencia de acciones accidentales durante las situaciones de corto plazo a las que se está aludiendo, pero sí de las cargas de uso y explotación que pudieran tener lugar durante ese período.

6.7.3.- Situaciones accidentales

A efectos de cálculo geotécnico se consideran situaciones de proyecto accidentales aquellas que están sometidas a combinaciones de acciones accidentales con o sin sismo, o aquellas que pudiesen cambiar por accidente su geometría o el estado del agua en el terreno (inundaciones accidentales) o aquellas que, accidentalmente, pudieran modificar las características del terreno.

6.8.- MÉTODOS DE CÁLCULO

Los métodos de cálculo geotécnicos, en general, consisten en desarrollos matemáticos que permiten discernir en cada caso concreto la frontera del fallo. Además, permiten la definición de un «coeficiente de seguridad». En ocasiones esa definición es implícita y de obtención difícil. Así ocurre en buen número de modelos numéricos.

Por otro lado, el uso de métodos de cálculo sencillos sólo permite explorar zonas o partes concretas de la frontera de fallo. Es lo que se conoce con el concepto de «modo de fallo» que se refiere a una forma o mecanismo de rotura concreto que tiene una ecuación suficientemente simple para que sea susceptible de análisis con procedimientos sencillos.

Así, el estado límite último de falta de capacidad de soporte del terreno de cimentación para cimentaciones superficiales se puede definir mediante los siguientes modos de fallo específicos:

- Hundimiento.
- Deslizamiento.
- Vuelco.

Con esos tres mecanismos quedará suficientemente explorada la frontera del fallo y puede emitirse un juicio relativo a la seguridad de la cimentación.

De igual manera, para las cimentaciones profundas se consideran los siguientes modos de fallo concretos para cubrir la problemática del posible agotamiento de la capacidad resistente del terreno:

- Hundimiento.
- Arranque.
- Rotura del terreno por empujes horizontales.
- Esfuerzos excesivos en los pilotes.

Los estados límite de servicio deben comprobarse normalmente para situaciones de proyecto persistentes con una combinación de acciones casi permanente.

6.9.- COEFICIENTE DE SEGURIDAD

El proyecto estructural habitual se realiza mediante el método de los coeficientes de seguridad parciales que requiere la utilización de coeficientes que mayoran las acciones y minoran las resistencias.

El proyecto geotécnico podría seguir también dicha vía pero en la actualidad no existe experiencia suficiente acerca de los valores de los coeficientes de seguridad parciales que han de utilizarse en cada caso.

Por ello es usual emplear un coeficiente de seguridad único, que engloba en un solo número la imprecisión que ha de considerarse tanto en las acciones como en las resistencias, en los modelos de cálculo o debida a cualquier otra causa de incertidumbre.

Como consecuencia de ello, el cálculo geotécnico se realiza de forma diferente al cálculo estructural. En el cálculo estructural basta con comprobar que, en cada situación de proyecto, un determinado estado límite no ocurre, una vez se han introducido los coeficientes parciales de seguridad. En el proyecto geotécnico, sin embargo, es preciso calcular, para cada situación de proyecto, el coeficiente de seguridad que resulta.

La seguridad será suficiente cuando dicho coeficiente supera el valor establecido. El coeficiente de seguridad así definido es una medida indirecta de la fiabilidad de la cimentación frente a un modo de fallo concreto y se calcula mediante un procedimiento específico que debe quedar definido sin ambigüedad.

El coeficiente de seguridad siempre debe ir asociado a un modo de fallo, a una situación de proyecto concreta, a un método de cálculo específico y a una combinación de acciones determinada.

Así, por ejemplo, la *Guía de cimentaciones en obras de carretera* del Ministerio de Fomento, para un caso particular de las cimentaciones profundas recoge una tabla que define los coeficientes de seguridad según sigue:

TABLA 5.7. ROTURA DEL TERRENO POR EMPUJES HORIZONTALES: COEFICIENTES DE SEGURIDAD MÍNIMOS PARA CIMENTACIONES PROFUNDAS

COMBINACIÓN DE ACCIONES	COEFICIENTE DE SEGURIDAD FRENTE ROTURA HORIZONTAL DEL TERRENO
Casi permanente (*)	$F_1 \geq 3,00$
Característica	$F_2 \geq 2,60$
Accidental	$F_3 \geq 2,20$

(*) Como valor del coeficiente de seguridad para la combinación de acciones casi permanente, en situaciones transitorias y de corto plazo, podrá adoptarse el coeficiente de seguridad F_2 (véase apartado 2.10).

Hay que comentar que la seguridad puede estimarse de forma indirecta en algunas ocasiones y de manera directa sólo en casos muy concretos.

La estimación indirecta de la seguridad puede realizarse por comparación empírica del caso en cuestión con otros casos similares donde se ha observado el comportamiento con detalle y se dispone de datos estadísticos fiables acerca de la frecuencia de los fallos habidos. Esa frecuencia de fallos sería una medida indirecta de la seguridad de la obra o del aspecto de la obra que se analiza.

La estimación directa de la seguridad puede hacerse por varias vías teóricas, suponiendo que la información relativa al problema en estudio puede representarse de forma numérica mediante variables aleatorias con una distribución matemática conocida. La «probabilidad de fallo» sería un índice de medida de la seguridad de la obra.

7.- EL MÉTODO DE LOS COEFICIENTES DE SEGURIDAD PARCIALES

Como se ha comentado, el procedimiento operativo habitual en el campo geotécnico trata la incertidumbre en el conocimiento de las acciones por una parte al definir sus valores representativos. En cuanto a la incertidumbre en los parámetros geotécnicos se suele abordar mediante una elección prudente del valor de cálculo. De igual manera ambos se controlan a través del coeficiente de seguridad global.

Por analogía con los cálculos estructurales es posible plantearse si la estimación de la seguridad puede realizarse de una manera más explícita utilizando coeficientes de seguridad parciales para definir los valores de cálculo de los parámetros. Este procedimiento de coeficientes de seguridad parciales sería una aproximación más lógica al problema de la incertidumbre. Pero requiere una experiencia, de la que en geotecnia aún no se dispone, para establecer los valores concretos de cada coeficiente de seguridad para cada tipo de situación.

Según la filosofía del método de los coeficientes de seguridad parciales, la seguridad debe ir considerándose allí donde aparezca alguna incertidumbre, por lo que a continuación se repasan cada uno de los conceptos analizados en cuanto al método de cálculo geotécnico para evaluar la posibilidad de aplicar el procedimiento de los coeficientes de seguridad parciales en comparación con el habitual de los globales.

7.1.- SITUACIONES DE PROYECTO

El concepto de «situación de proyecto», o configuración geométrica, del terreno con el agua incluida y de las acciones solicitantes no varía entre ambos métodos.

7.2.- DEFINICIÓN GEOMÉTRICA

La definición geométrica de las situaciones de proyecto será idéntica a la del método de los coeficientes de seguridad globales ya que ni en otros cálculos de referencia existen aún reglas concretas para definir valores característicos y de cálculo de los espesores de estratos, de variaciones estacionales del nivel freático, etc.. Si existiera una información fehaciente relativa a la variabilidad esperable de una dimensión geométrica, ésta podría tratarse de manera similar a la forma en que se tratan otros parámetros que definen la situación de proyecto.

7.3.- CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO

El punto crucial, donde más se marca la diferencia de métodos, es en el modo de tratar los datos relativos a las características del terreno.

En el método de los coeficientes parciales, se introduce un coeficiente de seguridad, γ_m , para obtener el valor de cálculo, X_d , a partir del valor característico X_k . Formalmente se establece:

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_m}$$

Donde:

X_d = Valor de cálculo del parámetro del terreno considerado.

X_k = Valor característico del parámetro del terreno considerado.

γ_m = Coeficiente de seguridad del parámetro del terreno considerado.

Normalmente, se minoran aquellos parámetros cuya intervención en la seguridad es favorable. Si el parámetro en cuestión resulta desfavorable, sería mayorado por ese mismo coeficiente.

Es claro ver que los únicos parámetros geotécnicos objeto de mayoración o minoración, son los que atañen a las propiedades resistentes del terreno (c , Φ , s_u , q_u , p_l , q_c), y que además ésta no siempre se efectúa.

En la filosofía de los Eurocódigos, se pretende que el valor de X_k tenga una definición objetiva (confianza del 95%) y para ello es necesario adquirir experiencia para obtener datos geotécnicos con ese grado de confianza.

Sería posible establecer la referida objetividad mediante una definición específica, según la cual el valor característico de un parámetro geotécnico es igual al valor medio, X_m , de un número "n" de determinaciones realizadas en la zona de interés, multiplicado o dividido por un coeficiente, ξ . El valor de este coeficiente depende del tipo de parámetro (posible dispersión), de la heterogeneidad del suelo y del número de determinaciones que se hayan realizado para obtener el valor medio.

En la tabla A-1.1 de la *Guía de cimentaciones en obras de carretera* del Ministerio de Fomento se indican posibles valores de ξ para algunos parámetros geotécnicos en terrenos de heterogeneidad media que pueden emplearse a falta de estudios específicos:

TABLA A-1.1. VALORES DEL COEFICIENTE ξ PARA OBTENER EL VALOR CARACTERÍSTICO DE UN PARÁMETRO GEOTÉCNICO A PARTIR DE SU VALOR MEDIO

PARÁMETRO	SÍMBOLO	NÚMERO DE DATOS UTILIZADOS PARA OBTENER EL VALOR MEDIO			
		n = 1	n = 2	n = 4	n = 9
Peso específico y densidad	γ	1,05	1,03	1,00	1,00
Tangente del ángulo de rozamiento efectivo	$\text{tg } \phi'$	1,15	1,10	1,05	1,00
Cohesión efectiva	c'	1,20	1,15	1,10	1,05
Resistencia al corte sin drenaje	s_u	1,25	1,18	1,12	1,07
Resistencia a compresión simple, suelos	q_u	1,30	1,20	1,15	1,10
Resistencia a compresión simple, rocas	R_c	1,60	1,40	1,30	1,20

NOTA: Para valores intermedios de n comprendidos entre los especificados, se puede interpolar linealmente.

7.4.- ACCIONES

Las acciones que deben considerarse en los cálculos geotécnicos son las mismas, independientemente de que se siga la metodología de los coeficientes de seguridad globales o parciales. No hay, por tanto, ninguna diferencia en este aspecto.

Únicamente se introduce una diferencia al definir el valor de cálculo a partir del valor representativo. En el método de los coeficientes de seguridad parciales, en algunas circunstancias, se incluye un coeficiente de mayoración de las acciones, γ_F , para definir el valor de cálculo F_d , partiendo del valor representativo ΨF_k :

$$F_d = \gamma_F * \Psi F_k$$

Donde:

F_d = Valor de cálculo de la acción.

γ_F = Coeficiente de mayoración de la acción.

ΨF_k = Valor representativo de la acción.

En el método de los coeficientes de seguridad globales, el valor de γ_F , es siempre la unidad, mientras que en el método de los coeficientes de seguridad parciales, ello no siempre es así. En ciertos cálculos, el valor de γ_F es mayor que la unidad. Los valores son, además, dependientes del tipo de acción. Suelen valer la unidad para las acciones accidentales, tienen un valor igual o mayor para las acciones permanentes, y aún mayor para las acciones variables.

7.5.- COMBINACIÓN DE ACCIONES

Las combinaciones de acciones que se utilizan en los cálculos con el método de los coeficientes de seguridad parciales, suelen ser diferentes a las del métodos de los coeficientes globales, si bien su filosofía de definición es similar.

Así, en el método de coeficientes globales, se suelen establecer combinaciones permanentes, características y accidentales, que pueden valer para el método de coeficientes parciales, difiriendo únicamente en los coeficientes de mayoración en el caso de las combinaciones características.

Además, en el caso de los coeficientes parciales, se pueden usar combinaciones diferentes para verificar cada tipo de estado límite, mientras que en el método de los coeficientes globales, se suelen realizar las comprobaciones se realizan con combinaciones comunes para todos los estados límite, ya sean últimos o de servicio.

La necesaria homogeneización se lleva a cabo, en el método global, exigiendo coeficientes de seguridad diferentes, según el tipo de situación y tipo de combinación de acciones, mientras que en el caso del método parcial, se consigue con los coeficientes de mayoración que son diferentes para cada tipo de acción y en cada tipo de combinación de acciones.

7.6.- TIPOS DE CÁLCULO

Los cálculos de comprobación de la seguridad frente a los estados límite últimos pueden agruparse, dependiendo del tipo de problema, en tres casos diferentes según el Eurocódigo relativo a acciones:

- **Caso A:** Pérdida de equilibrio estático: La resistencia del terreno o del material estructural es poco importante.
- **Caso B:** Fallo de la estructura o de un elemento estructural, incluyendo zapatas, encepados, pilotes (como elemento estructural), y muros (esfuerzos y armaduras). También se conoce a este caso como STR.
- **Caso C:** Fallo del terreno. También se conoce a este caso como GEO.

Desde el punto de vista de esta sesión sólo se consideran casos de tipo C. Para analizar casos de tipo A ó B, deben consultarse las normativas correspondientes (EHE, IAP y otras que pudieran ser de aplicación a cada caso concreto).

A su vez, los cálculos geotécnicos (caso C) pueden realizarse con varios propósitos. Entre ellos, los siguientes:

- 1 Comprobación de la estabilidad global (terreno + estructura).
- 2 Comprobación de la capacidad portante de una cimentación.
- 3 Otros modos de fallo específicos.

De nuevo, sólo afectan los cálculos indicados en primer y en segundo lugar, ya el caso 3 requiere usualmente procedimientos de cálculo que pueden no haber sido suficientemente evaluados para poder ofrecer, en este momento, coeficientes parciales adecuados.

Para los estados límite de servicio, no se mayoran las acciones ni se minoran los parámetros resistentes. En este sentido, los cálculos con coeficientes de seguridad parciales son iguales que los del método de los coeficientes globales.

7.7.- COEFICIENTES DE SEGURIDAD PARCIALES EN EL CÁLCULO GEOTÉCNICO

Con las definiciones vistas del valor característico de los parámetros geotécnicos, de los valores representativos de las acciones en el contexto del cálculo estructural y de sus combinaciones, los coeficientes de seguridad parciales cuyo uso se recomienda en los sucesivos borradores del Eurocódigo 7 son recogidos en la Tabla A-1.2 de la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*:

TABLA A-1.2. COEFICIENTES DE SEGURIDAD PARCIALES PARA EL CÁLCULO GEOTÉCNICO.
OPCIÓN 1 (PROPÓSITO DE CÁLCULO 1 Ó 2, DEFINIDOS EN A-1.8)

TIPO DE COEFICIENTE	COEFICIENTE DE SEGURIDAD PARCIAL	SITUACIONES	
		PERSISTENTES Y TRANSITORIAS	ACCIDENTALES Y SÍSMICA
Acciones, γ_F	Permanentes, γ_G	1,00	1,00
	Variables, γ_Q	1,30	1,00
Parámetros resistentes, γ_m	Tangente del ángulo de rozamiento efectivo, $\text{tg } \phi'$	1,25	1,00
	Cohesión efectiva, c'	1,25	1,00
	Resistencia al corte sin drenaje, s_u	1,40	1,00
	Resistencia a compresión simple en suelos, q_u	1,40	1,00
	Resistencia a compresión simple en rocas, R_c	2,00	1,00
	Presión límite en ensayos presiométricos, p_l	1,40	1,00
	Resistencia por punta en ensayos de penetración estática, q_c	1,40	1,00
	Resistencia, γ_R	Cimentaciones superficiales	1,00
	Cimentaciones profundas	1,10 a 1,15	1,00

NOTA: Las acciones variables favorables no se mayoran.

Hay que destacar que incluso el propio Eurocódigo reconoce que es posible utilizar otras listas de coeficientes de seguridad parciales. Así, por ejemplo plantea la alternativa de que el cálculo geotécnico se realice con coeficientes de mayoración de acciones y combinación de acciones idénticos a los del cálculo estructural.

En todo caso, si se decide el empleo del método de los coeficientes de seguridad a estas alturas del conocimiento de los mismos, siempre es recomendable, si no necesario que se realice en paralelo la comprobación de la seguridad mediante el procedimiento de los coeficientes globales.

En suma, y a modo de conclusión, puede afirmarse que los métodos de coeficientes de seguridad parciales se encuentran de momento poco contrastados en los cálculos geotécnicos. Pueden conducir a situaciones poco realistas, y por ello debe iniciarse su implantación con cierta prudencia, y siempre compararse con los resultados obtenidos a través de los métodos de coeficientes globales tradicionales.