

VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables
Palma de Mallorca, Junio 2013
E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (Eds.)
CIMNE, Barcelona, 2013

FACTORES DE SEGURIDAD EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES DE ACUERDO CON EL EUROCÓDIGO EC-7 Y EL ANEJO NACIONAL ESPAÑOL

Estaire José¹ y Olivenza, Gracia²

¹ Laboratorio de Geotecnia (CEDEX – Ministerio de Fomento)

² Laboratorio de Geotecnia (CEDEX – Ministerio de Fomento)

RESUMEN

Este artículo presenta primeramente las ideas básicas que definen el marco conceptual definido por el Eurocódigo EC-7 bajo el que se deben abordar los cálculos geotécnicos. Posteriormente describe las cláusulas que debe contener el Anejo Nacional del EC-7, prestando especial atención a los aspectos relativos a la estabilidad de taludes y terraplenes y a la estabilidad global de estructuras. A este respecto, el Anejo Nacional define el Enfoque de Proyecto elegido así como los valores de los coeficientes parciales de mayoración de acciones y de minoración de parámetros geotécnicos de los materiales. Por último, se recoge una reflexión sobre la forma de determinar, de acuerdo al EC-7, los valores característicos de los parámetros geotécnicos de los materiales que intervienen en el cálculo.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del programa de los Eurocódigos, el Eurocódigo 7 (EC-7 en adelante) es el documento de referencia para la realización del dimensionamiento de los aspectos geotécnicos de los proyectos de ingeniería civil y edificación. Este Eurocódigo 7, denominado en su versión inglesa “Geotechnical design”, tiene dos partes: la Parte 1, titulada “General rules”, fue aprobada por el Comité Europeo de Normalización (CEN) en Abril del año 2004 y la Parte 2, titulada “Ground investigation and testing”, fue aprobada en Enero del año 2007.

El organismo español de normalización (AENOR) emitió la versión en español de la Parte 1 del EC-7 como norma UNE, con la denominación UNE-EN-1997-1, en Octubre de 2010, mientras que la traducción de la parte 2 todavía no está finalizada. A pesar de haberse emitido como norma UNE, actualmente el EC-7 no tiene rango de obligado cumplimiento hasta que el órgano competente de la Administración Central lo incorpore

al ordenamiento jurídico español mediante su publicación en el BOE. Sin embargo, como requisito previo a dicha publicación, se debe haber finalizado la redacción del Anejo Nacional Español del EC-7, documento cuyo significado y alcance se analiza en un apartado posterior de este texto. Por otra parte, en el ámbito del cálculo de la estabilidad de taludes no existe un documento normativo español que haya unificado los criterios con los que se diseñan los taludes y los terraplenes en España por lo que la comparación con lo preconizado en el Eurocódigo no es inmediata.

Por último, hay que tener en cuenta que el estado límite último de estabilidad global de cimentaciones, tanto superficiales como profundas, y de estructuras de contención se aborda con las mismas herramientas de cálculo (los programas informáticos de equilibrio límite) que el cálculo de estabilidad de taludes por lo que en este texto se van analizar ambas actuaciones geotécnicas: la estabilidad de taludes y la estabilidad global de otras actuaciones geotécnicas.

2. EUROCÓDIGO EC-7

2.1. IDEAS BÁSICAS

El Eurocódigo EC-7 es el eurocódigo estructural dedicado a los aspectos geotécnicos de los proyectos de edificación o de ingeniería civil. El capítulo 2, denominado “*Bases del Proyecto Geotécnico*”, desarrolla el marco teórico con el que se debe proceder a realizar el análisis geotécnico. Este análisis geotécnico parte de la definición, para cada actuación geotécnica incluida en el proyecto (por ejemplo, una cimentación o una estructura de contención, etc.), de una serie de estados límite que no deben ser excedidos.

El marco teórico que utiliza el EC-7 con el que se aborda el proyecto geotécnico mediante cálculos está basado en tres aspectos fundamentales:

a.- Definición de los “Estados límite” a cumplir por las distintas actuaciones geotécnicas incluidas en los proyectos, que pueden ser de dos tipos: Estados Límite Últimos (ELU) enfocados a garantizar la seguridad frente a la rotura y Estados Límite de Servicio (ELS) que garantizan la funcionalidad de la estructura proyectada. Con objeto de sistematizar los cálculos, el EC-7 clasifica los diferentes estados límite en cinco tipos:

- Tipo EQU: implica la pérdida de equilibrio estático de la estructura, considerado como cuerpo rígido. En este tipo de estado límite la resistencia de los materiales estructurales y del terreno no colabora en el equilibrio. Un ejemplo de este tipo de ELU es el vuelco rígido de un muro.
- Tipo STR: implica la rotura interna o una excesiva deformación de la estructura o de alguno de sus elementos, incluyendo zapatas, pilotes o muros. Un ejemplo de este tipo de ELU es la rotura estructural de un elemento de cimentación.
- Tipo GEO: implica la rotura interna o una excesiva deformación del terreno. La resistencia del terreno tiene un papel preponderante. Un ejemplo de este tipo de ELU es el hundimiento de una cimentación superficial o profunda.
- Tipo UPL: implica la pérdida de equilibrio de la estructura debido a una elevación provocada por presiones de agua generalmente verticales, como puede ser el efecto de la subpresión sobre una losa.

- Tipo HYD: implica un fallo ocasionado por la filtración de agua en el terreno. Ejemplos de este tipo de ELU son la inestabilidad hidráulica por sifonamiento y la erosión interna por tubificación, provocadas por gradientes hidráulicos elevados.

b.- Adopción del método de cálculo basado en coeficientes parciales (γ) que afectan a:

- Acciones o efectos de las acciones: Los valores de los coeficientes parciales de mayoración de acciones (γ_F) o efectos de las acciones (γ_E) dependen del tipo de estado límite último que se esté considerando y del carácter permanente/variable y desfavorable/favorable de la acción, tal como se recoge en la Tabla 1.

Tipo de acción o efecto de acción		EQU	STR/GEO		UPL	HYD
			A1	A2		
Permanente	Desfavorable	1,10	1,35	1,00	1,00	1,35
	Favorable	0,90	1,00	1,00	0,90	0,90
Variable	Desfavorable	1,50	1,50	1,30	1,50	1,50
	Favorable	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 1. Valores de los coeficientes parciales de mayoración de las acciones (γ_F) o de los efectos de las acciones (γ_E) recomendados en el EC-7

- Materiales, referidos a los parámetros geotécnicos (γ_M): Cada parámetro geotécnico tiene su propio valor de coeficiente de minoración (γ_M). A este respecto sólo se distinguen los siguientes parámetros geotécnicos: ángulo de rozamiento, cohesión, resistencia al corte sin drenaje, resistencia a compresión simple y peso específico.
- Resistencias del terreno (γ_R): Los valores de los coeficientes de minoración de resistencias dependen de cada actuación geotécnica que se esté analizando. Así, por ejemplo, se puede hablar del estado límite último de hundimiento de una cimentación superficial o profunda o de deslizamiento de una estructura de contención.

Los valores concretos de estos factores parciales se recogen, de manera orientativa, en el Anexo A del EC-7, aunque pueden ser modificados por cada país en su Anejo Nacional.

c.- Determinación de diferentes “Enfoques de Proyecto” (*Design Approach*, en su denominación inglesa) que constituyen diferentes formas de cuantificar la incertidumbre en el cálculo de los estados límite mediante la distinta ponderación de los coeficientes parciales indicados anteriormente.

Con objeto de dar cabida a las diferentes maneras de abordar el dimensionamiento geotécnico existentes en los distintos países que han aceptado los Eurocódigos como marco de proyecto, el EC-7 define tres Enfoques de Proyecto distintos que se diferencian básicamente en los parámetros a los que se aplican simultáneamente los coeficientes parciales: acciones, materiales o resistencias, tal como se muestra simplificada en la Tabla 2.

Enfoque de Proyecto		Mayoración de acciones o efecto de las acciones	Minoración de parámetros geotécnicos	Minoración de resistencias
1	Combinación 1	X		
	Combinación 2		X	X
2		X		X
3		X	X	

Tabla 2. Combinación de los coeficientes parciales en los diferentes Enfoques de Proyecto

A la vista de lo dicho anteriormente, se puede afirmar que la gran diferencia del marco teórico del EC-7 con respecto a la práctica geotécnica tradicional en España es la adopción del método de cálculo basado en coeficientes parciales. Esta manera de cálculo es similar a la utilizada en el cálculo estructural, por lo que su adopción en el análisis de los aspectos geotécnicos hace que el proyecto de cualquier estructura pueda hacerse de manera integral y unificada.

2.2. COMPROBACIÓN DE LOS ESTADOS LÍMITE MEDIANTE CÁLCULOS

De acuerdo al EC-7, el cálculo de cualquier estado límite último implica la verificación de la siguiente expresión:

$$E_d < R_d \quad (1)$$

donde E_d es el valor de cálculo de los efectos de las acciones y R_d es el valor de cálculo de la resistencia del terreno frente a una acción.

El valor de cálculo de los efectos de las acciones (E_d) se determina a partir de los valores representativos de las acciones, afectados por el coeficiente de mayoración de acciones (γ_F), o a partir de los valores representativos de los efectos de las acciones, afectados por el coeficiente de mayoración de los efectos de acciones (γ_E). Por su parte, el valor de cálculo de la resistencia del terreno a una acción (R_d) se calcula a partir del valor representativo de dicha resistencia afectado por el coeficiente de minoración de las resistencias (γ_R). En ambas determinaciones, los valores de los parámetros geotécnicos de los materiales del terreno involucrados en el estado límite último se deben obtener de los valores característicos minorados por el coeficiente de minoración de los materiales (γ_M). El EC-7 indica que “*el valor característico de un parámetro geotécnico se debe seleccionar como una estimación prudente de dicho valor*” [Ap. 2.4.5.2.(2)].

3. EL ANEJO NACIONAL ESPAÑOL DEL EC-7 Y LA ESTABILIDAD DE TALUDES Y ESTABILIDAD GLOBAL DE ESTRUCTURAS

3.1. IDEAS BÁSICAS

El Anejo Nacional es un documento que define todos aquellos aspectos y valores que cada uno de los diferentes eurocódigos deja abiertos para ser fijados por los distintos países que aceptan el marco normativo de los Eurocódigos. En el texto del EC-7 hay 45 cláusulas abiertas para que el Anejo Nacional correspondiente indique la opción o los

valores elegidos por cada país que, desde un punto de vista conceptual, hacen referencia a dos aspectos básicos:

- Enfoque de Proyecto que se debe utilizar para el proyecto de cada actuación geotécnica.
- Valores de los coeficientes parciales que afectan a las acciones o a los efectos de las acciones, a los parámetros geotécnicos y a las resistencias.

El Anejo Nacional Español se está redactando actualmente por un comité formado básicamente por personal técnico del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, apoyado por personas de la comunidad geotécnica nacional, pertenecientes al mundo de la universidad y de las empresas consultoras y constructoras.

La determinación de los diferentes coeficientes parciales se ha hecho con la máxima de conseguir un nivel similar al que se tiene en la práctica geotécnica española habitual (Estaire, 2012). Esta máxima choca con el problema de la inexistencia de un procedimiento único que se pudiera denominar “español”, puesto que existen tres documentos de carácter geotécnico, con diferente rango normativo como son: la Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera, la ROM 0.5-05, y el Código Técnico de la Edificación, que presentan diferentes formulaciones que conducen en ocasiones a resultados dispares.

3.2. ENFOQUES DE PROYECTO

El análisis de los diferentes Enfoques de Proyecto existentes en el EC-7 ha hecho que el Anejo Nacional Español opte por el Enfoque de Proyecto 2 para todas las actuaciones geotécnicas, excepto para el cálculo de la estabilidad global y de taludes para el que se ha elegido el Enfoque de Proyecto 3.

Se ha elegido el Enfoque de Proyecto 2 porque, al no minorar los parámetros geotécnicos, es el más parecido a la práctica habitual en España, aspecto éste que se ha considerado primordial mantener sin cambios. Sin embargo, la gran diferencia con el procedimiento del EC-7 es el tratamiento de las acciones. En la práctica tradicional, los cálculos geotécnicos se han hecho con las acciones sin mayorar, mientras que el Enfoque de Proyecto elegido implica trabajar con las acciones mayoradas. Sin embargo, la mayoración de acciones en el caso de la estabilidad de taludes es problemática ya que las acciones permanentes debidas a las cargas gravitacionales y a la acción del agua son simultáneamente desfavorables (al producir un momento desestabilizador en una parte de la masa de suelo a analizar) y favorables (al producir un momento estabilizador en la otra parte). Dado que el límite entre ambas partes varía en función del punto donde se toman momentos (normalmente el centro del círculo de deslizamiento analizado) la asignación de los correspondientes valores de mayoración o minoración de acciones es muy difícil y prácticamente imposible en la práctica.

Con objeto de soslayar este problema, se ha elegido, junto con la mayoría de países europeos, el Enfoque de Proyecto 3 para el análisis de la estabilidad de taludes y la estabilidad global de las estructuras ya que los valores de los coeficientes parciales de

mayoración de las acciones evitan la necesidad de ponderar simultáneamente el peso del terreno de forma favorable y desfavorable. La otra característica de este enfoque es que opta por la minoración de parámetros geotécnicos en vez de por la de resistencias.

Las dos características anteriores son las que han hecho que el Anejo Nacional Español haya elegido el Enfoque de Proyecto 3, dado que, de esta manera, el método es intrínsecamente idéntico a la forma de abordar estos problemas en la práctica geotécnica habitual española. En ella se utilizan los métodos del equilibrio límite, en los que se determina el factor de seguridad reduciendo la resistencia al corte del terreno mediante la minoración simultánea de los valores de cohesión y ángulo de rozamiento de los materiales implicados en el deslizamiento en estudio.

3.3. VALORES DE LOS COEFICIENTES PARCIALES DE ACCIONES

Los valores de los coeficientes parciales, en el Enfoque de Proyecto 3, para los cálculos de estabilidad de taludes y estabilidad global de estructuras son los recogidos en la combinación A2 de la Tabla 1 tal como se indica en el apartado 2.4.7.3.4.4 del EC-7.

El análisis de los valores recogidos en dicha Tabla 1 permite realizar las siguientes consideraciones:

- Las acciones permanentes, tanto favorables como desfavorables, estructurales o geotécnicas, incluyendo las cargas gravitacionales debidas al peso del terreno o al agua no se mayoran ni minoran ya que el coeficiente parcial correspondiente vale 1.
- Únicamente se mayoran, con un coeficiente de valor 1,3, las acciones transitorias desfavorables como son, por ejemplo, las acciones situadas sobre el terreno, tales como las sobrecargas de tráfico o las debidas a las estructuras.
- Este sistema de mayoración de acciones facilita enormemente los cálculos al hacerlos muy parecidos a la práctica habitual española.

3.4. VALORES DE LOS COEFICIENTES PARCIALES DE MINORACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

La elección de los valores de los coeficientes parciales en el Anejo Nacional se ha realizado con el criterio general de mantener el mismo nivel de seguridad que se tiene actualmente con la práctica geotécnica habitual. Por esta razón es conveniente, en primer lugar, tener presentes los valores de los factores de seguridad preconizados en los diferentes documentos españoles de carácter geotécnico, tal como se hace en la Tabla 3.

Combinación de acciones	ROM 0.5-05	Guía Cimentaciones Obras de Carreteras	Código Técnico Edificación
Cuasi-permanente	1,4	1,5	1,8
Fundamental	1,3	1,3	(1)
Accidental o sísmica	1,1	1,1	1,2

Nota 1: El Código Técnico de la Edificación distingue únicamente entre situaciones persistentes o transitorias (FS = 1,8) y situaciones extraordinarias (FS = 1,2)

Tabla 3. Valores del factor de seguridad para el ELU de estabilidad global en diferentes documentos españoles de carácter geotécnico

Por otra parte, hay que tener en cuenta que el EC-7 únicamente permite establecer coeficientes parciales de minoración sobre los parámetros relacionados a continuación, con indicación del valor recomendado en el Anexo A: cohesión (1,25), ángulo de rozamiento (1,25), resistencia al corte sin drenaje (1,40), resistencia a compresión simple (1,40) y peso específico (1,00).

La comparación de la Tabla 3 y de la lista de parámetros relacionados anteriormente permite comprobar que los valores incluidos en ellas no corresponden a los mismos conceptos por lo que no se pueden equiparar fácilmente. Sin embargo, hay que tener en cuenta que se obtiene el mismo resultado minorando los parámetros geotécnicos por un determinado valor (por ejemplo: 1,5) y obligando a que el factor de seguridad mínimo sea superior a la unidad que no minorando los parámetros geotécnicos y obligando a que el factor de seguridad obtenido sea superior a ese mismo determinado valor (por ejemplo: 1,5).

En la Figura 1 puede verse un ejemplo de la afirmación anterior. El factor de seguridad obtenido para una cohesión de 20 kPa y un ángulo de rozamiento de 28° es de 1,61. Si se hace el cálculo con una cohesión y una tangente del ángulo de rozamiento dividido entre 1,61 (cohesión de 12,4 kPa y ángulo de rozamiento de $18,2^\circ$) se obtiene un factor de seguridad de 1,00, es decir, también el factor de seguridad se divide entre 1,61.

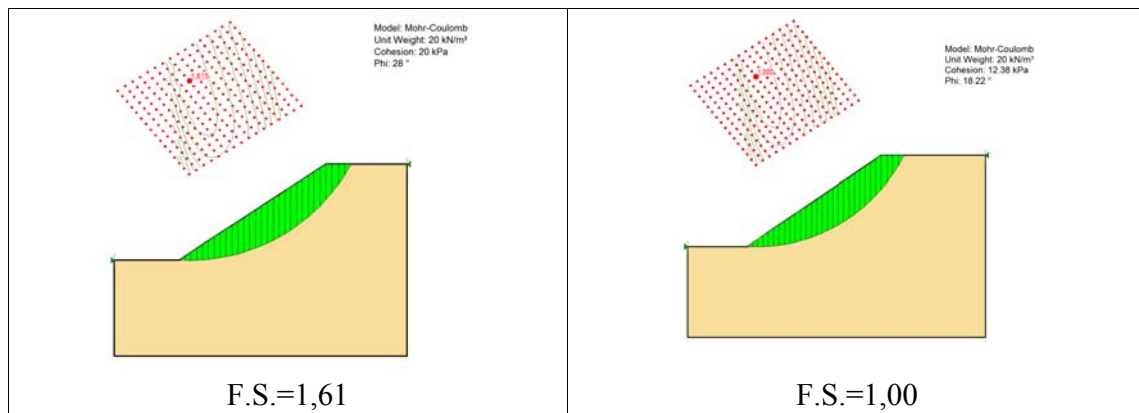


Figura 1: Comparación de resultados según la práctica habitual española y el EC-7, en relación con la minoración de parámetros y el factor de seguridad

Este hecho hace que los cálculos de estabilidad global de estructuras y de estabilidad de taludes y terraplenes se puedan seguir haciendo por el mismo procedimiento que habitualmente, es decir, sin minorar los parámetros resistentes y obligando a que el factor de seguridad que se obtiene de los cálculos de equilibrio límite realizados con un cualquier programa informático sea superior al valor del coeficiente parcial correspondiente.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, en la Tabla 4 se recogen los valores de los coeficientes parciales de minoración de parámetros geotécnicos propuestos en el Anejo Nacional para el caso de los cálculos de estabilidad global y de taludes, en función del caso en estudio y de la situación de proyecto que se esté considerando en el cálculo.

Comprobación	Situación de proyecto	γ_M			
		$c'^{(3)}$	$tg\phi'^{(3)}$	$c_u^{(3)}$	γ
⁽¹⁾ Caso general	Persistente	1,40	1,40	1,40	1,0
	Transitoria	1,25	1,25	1,25	1,0
	Accidental	1,10	1,10	1,10	1,0
⁽²⁾ Obra de fábrica o estructura de retención en infraestructura viaria	Persistente	1,50	1,50	1,50	1,0
	Transitoria	1,30	1,30	1,30	1,0
	Accidental	1,15	1,15	1,15	1,0
Obra de fábrica o estructura de retención en infraestructura marítima o portuaria	Persistente	1,40	1,40	1,40	1,0
	Transitoria	1,30	1,30	1,30	1,0
	Accidental	1,15	1,15	1,15	1,0
⁽²⁾ Estructura de edificación	Persistente	1,80	1,80	1,80	1,0
	Transitoria	1,50	1,50	1,50	1,0
	Accidental	1,30	1,30	1,30	1,0

Nota 1: Incluye, entre otros, los casos de talud de desmonte de nueva ejecución (sin estructura en coronación o talud), los rellenos compactados, tipo terraplén, pedraplén y todo-uno e infraestructuras hidráulicas de menor importancia, tipo balsas.

Nota 2: El equilibrio global de una obra o estructura situada sobre una ladera natural que tenga condiciones de estabilidad precaria debe considerarse una actuación de Categoría Geotécnica 3 por lo que estos valores pueden no ser de aplicación. [Cláusula 2.1.(21) de EC-7]

Nota 3: Los valores de los coeficientes parciales γ_M correspondientes a c' , $tg\phi'$ y c_u podrán reducirse hasta un 7%, cuando se considere que las repercusiones sociales, ambientales y económicas de la rotura sean reducidas.

Tabla 4. Valores de los coeficientes parciales de minoración de parámetros geotécnicos (γ_M) a utilizar en el análisis de la estabilidad global y de taludes

El análisis de los valores recogidos en la tabla anterior permite realizar los siguientes comentarios:

- Se puede comprobar que estos valores son prácticamente iguales a los recogidos en la Tabla 3, presentada anteriormente, en la que se muestran los factores de seguridad utilizados en la práctica habitual española. Este hecho hace que la utilización del EC-7 vaya a conducir a unos resultados muy parecidos a los obtenidos actualmente.
- La diferencia con los valores recogidos en los documentos geotécnicos existentes radica en las situaciones accidentales. En el caso del Anejo Nacional, los valores son superiores dado que, en el marco de cálculo del EC-7, la situación accidental no incluye la situación de sismo.
- Los valores indicados para el caso general se refieren a taludes de desmontes y a rellenos compactados por lo que suponen una novedad en el ámbito de la normativa geotécnica española.
- Los valores recogidos en la tabla hace sólo referencia a tres parámetros geotécnicos específicos (cohesión, ángulo de rozamiento y resistencia al corte sin drenaje). En el caso de que se pretenda utilizar otro criterio de rotura diferente al de Mohr-Coulomb, el coeficientes parcial debe entenderse que afecta directamente a la resistencia al corte movilizable (τ).
- Se ha optado por mantener el mismo valor del coeficiente parcial para los parámetros en la situación con drenaje ($c'-\phi'$) y sin drenaje (c_u) a diferencia de lo preconizado en

los Anejos Nacionales de otros países, como se puede apreciar en los valores mostrados en las Figuras 2 y 3. En esos países el coeficiente parcial para minorar la resistencia al corte sin drenaje es mayor que el correspondiente a la pareja ($c'-\phi'$) debido a la mayor incertidumbre en su determinación y su mayor influencia en los resultados de los cálculos. Sin embargo, como contrapartida a ese hecho, hay que tener en cuenta que la situación sin drenaje se debe considerar una situación transitoria por lo que se puede disminuir el coeficiente parcial.

Por otra parte, es importante resaltar que los cálculos retrospectivos de estabilidad se realizan, de acuerdo al EC-7, con una metodología diferente. Este aspecto está contemplado en la cláusula 11.5.1(8) en la que se indica que “*los coeficientes parciales utilizados normalmente para el análisis de estabilidad global pueden no ser apropiados en estos casos*”.

De acuerdo a la interpretación dada por Frank et. al (2004) a esta cláusula, en estos casos todos los coeficientes parciales (γ_F , γ_M y γ_R) deben tomar valor unidad ya que el objetivo es determinar los valores reales de resistencia al corte movilizada a lo largo de la superficie de rotura. Además, dado que el nivel de confianza en estos valores es superior al que se obtiene normalmente con las campañas de reconocimiento, los cálculos posteriores se pueden realizar con unos valores inferiores de los coeficientes parciales que, en este caso, quedan sujetos al criterio del proyectista.

Por último, con objeto de enmarcar los valores recogidos en el Anejo Nacional Español, en la Figura 2 a) y 2 b) se recogen los valores de los coeficientes parciales de minoración de los parámetros geotécnicos adoptados por otros países europeos para el caso de la estabilidad global [Bond (2010)].

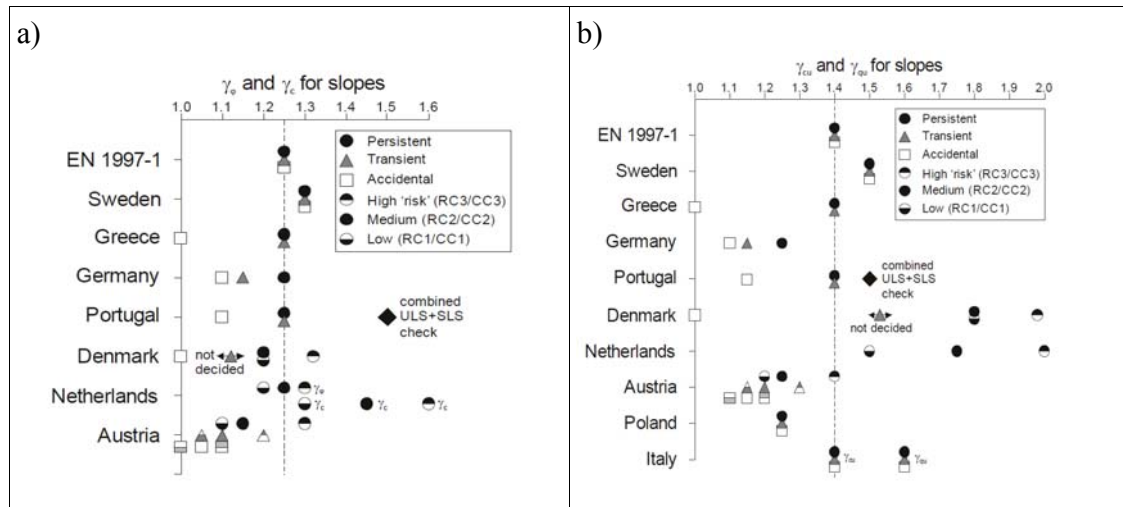


Figura 2: Coeficientes parciales de minoración del ángulo de rozamiento (γ_ϕ) y la cohesión (γ_c) efectivos (Figura 2 a) y de la resistencia al corte no drenada (γ_{cv}) (Figura 2 b) adoptados por diferentes anejos nacionales europeos. [Bond, 2010]

Se observa que en la mayoría de los países se adoptan valores semejantes a los recomendados por el EC-7: $\gamma_M = 1,25$, para los parámetros resistentes en condiciones drenadas, y $\gamma_M = 1,40$ para los parámetros resistentes en condiciones no drenadas. Se observa también que algunos países introducen variaciones en el valor de estos coeficientes en función de las situaciones de dimensionado: permanente, transitoria o accidental y también, en algún caso, en función del tipo de consecuencia que implica la rotura o del nivel de riesgo, tal como permite el EC-7 en la cláusula 2.4.7.1.

4. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE ESTABILIDAD DE ACUERDO AL EC-7

Teniendo en cuenta las especificaciones anteriores y el resultado de los cálculos recogidos en la Figura 1, el procedimiento de cálculo de la estabilidad global de estructuras y de estabilidad de taludes y rellenos de acuerdo al Enfoque de Proyecto 3 es el siguiente:

- a.- Los coeficientes parciales para todas las acciones permanentes, tanto favorables como desfavorables, estructurales o geotécnicas, incluyendo las cargas gravitacionales debidas al peso del terreno o al agua toman valor 1.
- b.- El coeficiente parcial para las acciones variables desfavorables (por ejemplo, las cargas de tráfico o las cargas sobre una estructura) toma un valor de 1,3.
- c.- Se realiza el cálculo de estabilidad mediante el método de equilibrio límite, con la ayuda de cualquier programa informático, del que se obtiene un factor de seguridad.
- d.- El criterio para considerar que el diseño es apropiado es que el factor de seguridad obtenido sea igual o superior al valor del coeficiente parcial de minoración de los parámetros geotécnicos correspondiente a la situación de cálculo, valores recogidos en la Tabla 4.

5. REFLEXIÓN SOBRE LOS VALORES CARACTERÍSTICOS DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Los valores de los parámetros geotécnicos con los que se deben hacer los cálculos de estabilidad son los valores denominados por el EC-7 como “valores de cálculo” (X_d). Estos valores de cálculo se obtienen aplicando los coeficientes parciales de minoración de materiales (γ_M), cuyos valores se recogen en la Tabla 4, a los denominados “valores característicos” (X_k), de acuerdo a la expresión siguiente:

$$X_d = X_k / \gamma_M \quad (2)$$

El EC- 7 define el valor característico de un parámetro geotécnico como “*a cautious estimate of the value affecting the occurrence of the limit state*” y establece que “*the selection of characteristic values for geotechnical parameters shall be based on results and derived values from laboratory and field tests, complemented by well-established experience*” [Cláusulas 2.4.5.2(2)P y 2.4.5.2.(1)P]. Cabe destacar el hecho de que pueden establecerse diferentes valores característicos en función del estado límite que se considere. Dichos valores característicos deben seleccionarse basándose en los resultados de los ensayos de laboratorio y campo y matizarse con la experiencia previa.

El concepto de valor característico aparece en la normativa española como “valor representativo”, a determinar como estimación prudente a partir de los ensayos de laboratorio o campo y teniendo en cuenta la experiencia previa. La diferencia entre ambos conceptos radica en que en la normativa española no se establece la necesidad de aplicar a dicho valor un coeficiente parcial de minoración de los parámetros geotécnicos.

La determinación de las propiedades del terreno, para su inclusión en los cálculos de carácter geotécnico, se enfrenta a dos problemas fundamentales: por una parte, los materiales geológicos presentan una variabilidad muy amplia, lo que hace difícil en la mayoría de las ocasiones, no sólo determinar su localización sino también sus propiedades mecánicas y, por otro, los problemas que existen en muchos casos para poder investigar el terreno in situ u obtener muestras representativas para ensayar en laboratorio hace que los datos disponibles sean insuficientes.

En caso de disponer de suficientes datos procedentes de ensayos de laboratorio o de campo, pueden emplearse métodos estadísticos para la obtención de los valores característicos, aunque cabe destacar que la utilización de métodos estadísticos se menciona en las cláusulas 2.4.5.2(10) y 2.4.5.2(11) del EC-7 solo como una posibilidad, no siendo por tanto su uso obligatorio. No obstante, dada la imprecisión que se asocia a la obtención de los parámetros característicos, los métodos estadísticos pueden servir de guía metodológica a fin de unificar criterios.

En general los métodos estadísticos consideran el valor característico (X_k) como el valor medio (m_x) menos una cantidad que puede conceptualizarse como un error, compuesto por el error aleatorio o desviación estándar (s_x) y un error de estimación (α):

$$X_k = m_x - \alpha s_x \quad (3)$$

La forma de cuantificar este error es lo que diferencia a unos métodos de otros como se verá a continuación.

a) Métodos estadísticos basados en los coeficientes de variación de los parámetros geotécnicos recogidos en la literatura: Este método se basa en la recopilación de coeficientes de variación realizada por Duncan (2000) en la que se recogen la mayoría de los parámetros geotécnicos. La expresión del valor característico dada anteriormente quedaría en función del coeficiente de variación (V) de la forma siguiente:

$$X_k = m_x - \alpha s_x = m_x - \alpha m_x V = m_x (1 - \alpha V) \quad (4)$$

Considerando que los datos presentan una distribución normal, el valor de α puede tomar diferentes valores en función del fractil al que se quiera equiparar el valor característico. Por ejemplo, si se considera que el valor característico corresponde a aquel cuya probabilidad de que aparezca un valor superior es del 95 %, o lo que es lo mismo, al fractil del 5 %, el valor de α vendría dado por el punto porcentual 0,95 de la distribución normal $N(0,1)$ cuantificado en 1,65. Si se considera que el valor del fractil del 5 % es muy conservador, pueden emplearse otros fractiles como el del 10 %, en cuyo caso α tomaría el valor de 1,28 o del fractil del 33 % que daría un error α de 0,41 y que proporcionaría un valor característico cuya probabilidad de ser superado sería el doble que la probabilidad de obtener un valor inferior. Algunos autores (Bond y Harris, 2008)

proponen que cuando se disponga de un número de datos pequeño, en torno a 10 – 15 (Schneider, 1997), el valor característico se calcule como el valor medio menos media desviación típica, lo que equivale a decir que el valor del error α sea de 0,5.

b) Métodos estadísticos basados en la determinación del error de estimación (k_n) dependiente del número de datos (n) (Bond y Harris, 2008): Estos autores proponen para el cálculo del valor característico la sustitución en la expresión (3) del término α por un parámetro estadístico más concreto que se obtiene a partir del valor de la distribución t de Student t_{n-1}^{95} para $n-1$ grados de libertad y con un nivel de confianza del 95 % de acuerdo a:

$$k_n = t_{n-1}^{95} \sqrt{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

El valor de k_n para una muestra de, por ejemplo, 10 datos tomaría el valor de 0,64. Para parámetros que varían con la profundidad pueden utilizarse otros métodos basados en un análisis multivariante (Bond y Harris, 2008) en los que el error tiene en cuenta la variabilidad asociada al parámetro geotécnico y el error asociado a la dispersión del mismo con la profundidad.

REFERENCIAS

- Bond, A. & Harris, A. (2008). *Decoding Eurocode 7*. Taylor & Francis, 2008.
- Bond, A. (2010). Results of the NDP Survey 2009/10. *2nd International Workshop on Evaluation of Eurocode 7*, Pavía, Italia, Abril 2010.
- Bond, A. & Harris, A. (2011) *A procedure for determining the characteristic value of a geotechnical parameter*. Proc. 3rd Int. Symp. on Geotechnical Safety and Risk, Munich, Germany, 2011.
- Bond, A. (2012) Presentation of Chairman. *27th meeting of CEN/TC250/SC7*, The Hague Netherlands, Marzo 2012
- Estaire, J., Pardo, F. y Perucho, A. (2012) Anejo Nacional Español del Eurocódigo 7. IX Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica. Sevilla, Octubre 2012
- Frank, R., Bauduin, C., Driscoll, R., Kavvas, M., Krebs, N., Orr, T. & Schuppener, B. (2004). *Designers' Guide to EN 1997-1*. Thomas Telford, 2004.
- Orr, T. (2005). *Proceedings of the International Workshop on the Evaluation of Eurocode 7*. Dublín, 2005.
- Schneider, H.R. (1997). *Definition and determination of characteristic soil properties*. 12th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Hamburg: Balkema.

AGRADECIMIENTOS

A Fernando Pardo de Santayana y Áurea Perucho que son copartícipes de que el Anejo Nacional Español vea por fin la luz a mediados de este año 2013. A María Santana por la realización de los cálculos de estabilidad que han servido para aclarar muchas dudas en el proceso de elección de los coeficientes parciales.