

DIMENSIONAMIENTO DE UNA ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN TIPO PANTALLA SEGÚN EL EUROCÓDIGO 7

José Estaire^{1*}, Gracia Olivenza²

1: Laboratorio de Geotecnia (CEDEX)
Alfonso XII, 3, 28014 Madrid.

e-mail: Jose.Estaire@cedex.es, web: <http://www.cedex.es>

2: Laboratorio de Geotecnia (CEDEX)
Alfonso XII, 3, 28914 Madrid

e-mail: Gracia.Olivenza@cedex.es - web: <http://www.cedex.es>

Palabras clave: Dimensionamiento, Pantallas, Eurocódigo

Resumen: *En este artículo se presenta en primer lugar el marco de referencia de cálculo correspondiente al Eurocódigo EC-7 basado fundamentalmente: en la definición de los “estados límite últimos y de servicio” a cumplir por las distintas actuaciones geotécnicas, en la adopción de un método de cálculo basado en coeficientes parciales que afectan a las acciones o efectos de las acciones, a los parámetros geotécnicos de los materiales y a las resistencias del terreno, y en la determinación de diferentes “enfoques de proyecto” que constituyen distintas formas de cuantificar la incertidumbre en el cálculo de los estados límite.*

Con objeto de explicar el cálculo de la estabilidad de pantallas de acuerdo a la metodología introducida por el EC-7 y de explicar las razones que han llevado a definir los valores de los coeficientes parciales a usar en España, se han analizado varias situaciones sencillas (pantalla en voladizo con y sin sobrecarga y con el nivel freático profundo y pantalla en voladizo sin carga con el nivel freático somero) comparando las expresiones utilizadas para los cálculos de acuerdo al EC-7 y a la práctica habitual española.

Por último, se describe el procedimiento operativo y el esquema de cálculo que se debe llevar a cabo para el análisis de la estabilidad global de una pantalla mediante la utilización de programas comerciales basados en el modelo de Winkler.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del programa de los Eurocódigos, el Eurocódigo 7 (EC-7 en adelante) es el documento de referencia para realizar el 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.

AENOR, como organismo español de normalización, 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. Esta incorporación debe realizarse conjuntamente con el Anejo Nacional Español del EC-7, documento cuyo significado y alcance se analiza en un apartado posterior de este texto.

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), 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 la estabilidad de una pantalla.
- 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 de seguridad (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 la acción		EQU	STR/GEO		UPL	HYD
			A1	A2 ⁽¹⁾		
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

Nota 1: coeficientes utilizados en el cálculo global de estructuras o de estabilidad de taludes

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: Cada parámetro geotécnico tiene su propio valor de coeficiente de minoración (γ_M). A este respecto en el EC-7 sólo se reseñan los siguientes parámetros geotécnicos: ángulo de rozamiento, cohesión, resistencia al corte sin drenaje, resistencia a compresión simple y peso específico.
- Resistencias del terreno: Los valores de los coeficientes de minoración de resistencias (γ_R) 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 todos 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. Uso de los factores 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 fundamentalmente 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 al conjunto de acciones actuantes.

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 frente a una acción (R_d) se calcula a partir del valor característico de dicha resistencia afectado por el coeficiente de minoración de resistencias (γ_R). En ambas determinaciones, los valores de cálculo de los parámetros geotécnicos de los materiales del terreno involucrados en el estado límite último se obtienen de los valores característicos minorados por el coeficiente de minoración de 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 EL CÁLCULO DE LA ESTABILIDAD DE PANTALLAS

3.1. El Anejo Nacional

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. Desde un punto de vista conceptual, dichas cláusulas 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 de los materiales 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 de seguridad similar al que se tiene en la práctica geotécnica española habitual (Estaire et al., 2012). Esta máxima choca con el problema de la inexistencia de un procedimiento único que se pudiera denominar “español”, puesto que actualmente coexisten tres documentos de carácter geotécnico, con diferente rango normativo como son: la Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera, las Recomendaciones de Obras Marítimas 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.

3.3. Valores de los coeficientes parciales de las acciones

Los valores de los coeficientes parciales, en el Enfoque de Proyecto 2, para los cálculos de la estabilidad de pantallas son los recogidos resumidamente en la combinación A1 de la Tabla 1, de acuerdo a lo indicado en el apartado 2.4.7.3.4.3 del EC-7. El análisis de los valores recogidos en dicha tabla permite realizar las siguientes consideraciones:

- Las acciones desfavorables se mayoran por un coeficiente 1,35, cuando las acciones son permanentes, y por 1,50, cuando son variables.
- Las acciones favorables no se mayoran ni minoran ya que el coeficiente parcial correspondiente vale 1,00, cuando son permanentes y no se consideran en el cálculo cuando son variables.

3.4. Valores de los coeficientes parciales de la resistencia del terreno

El Enfoque de Proyecto 2 contempla la minoración de la resistencia del terreno mediante la aplicación del coeficiente parcial γ_R . Cabe recordar que en este enfoque de proyecto los valores característicos y de cálculo de los parámetros geotécnicos son iguales ya que el coeficiente parcial de materiales (γ_M) toma valor igual a 1,0.

La elección de los valores de los diferentes coeficientes parciales de resistencia, a incluir 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 otra parte, en el cálculo de pantallas, el coeficiente parcial de resistencia que se debe utilizar es el aplicable a la minoración del empuje pasivo.

Teniendo en cuenta las dos ideas anteriores, para la elección de dicho coeficiente parcial y dado que se pueden resolver analíticamente con facilidad, se han analizado, primeramente y por separado, tres situaciones diferentes de una pantalla en voladizo: sin sobrecargas y con nivel freático profundo (Figura 1); con sobrecargas permanentes o variables y nivel freático profundo (Figura 2) y sin sobrecargas y con nivel freático somero (Figura 3).

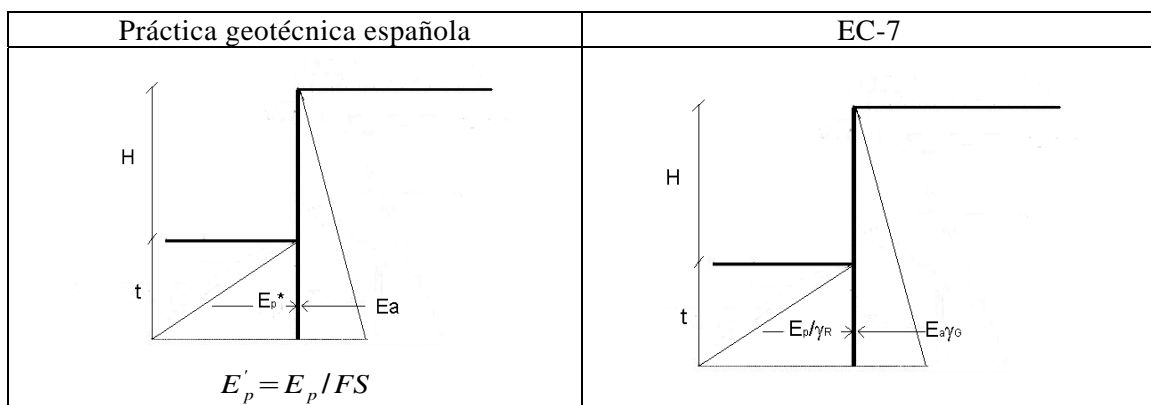
Como se verá a continuación el valor obtenido para el coeficiente parcial de resistencia (γ_R), aplicable al empuje pasivo, ha sido de 1,10.

En estos tres casos sencillos se determina analíticamente la longitud de la pantalla aplicando equilibrio de momentos respecto al pie teórico de cálculo de la pantalla. El resultado del cálculo, además de dicha longitud, es la ley de momentos flectores y esfuerzos cortantes con los que se debe dimensionar estructuralmente la pantalla. Hay que recordar que la longitud obtenida del cálculo se debe incrementar en un 20% para que se cumpla el equilibrio de fuerzas horizontales, aspecto éste que debe realizarse también en los cálculos basados en el modelo de cálculo del EC-7.

a.- Sin sobrecargas y con nivel freático profundo

En la Figura 1 se muestra el esquema de la situación de cálculo así como las ecuaciones correspondientes de acuerdo a la práctica geotécnica habitual española y al método del EC-7.

Cabe destacar que en la práctica geotécnica habitual española el concepto de seguridad difiere del empleado en el EC-7. En la normativa española la seguridad se incorpora en los cálculos minorando el empuje pasivo por un coeficiente generalmente de 1,50 que se constituye como el factor de seguridad del cálculo. Por su parte, el marco conceptual del EC-7 implica que hay que realizar una mayoración del empuje activo por un coeficiente (γ_G) de valor igual a 1,35, dado que se considera dicho empuje como una acción permanente desfavorable. Simultáneamente, se debe realizar una minoración del empuje pasivo por un coeficiente (γ_R) que se deja a elección en cada país para ser recogido en su Anejo Nacional y cuyo valor se deduce de las expresiones recogidas en la Figura 1.



Práctica geotécnica española	EC-7
$\frac{1}{2} \cdot k_a \cdot \gamma \frac{(H+t)^3}{3} = \frac{1}{2} \cdot k'_p \cdot \gamma \frac{t^3}{3}$ $k'_p = \frac{k_p}{FS}$ $(H+t)^3 \cdot k_a = k'_p \cdot t^3 = \frac{k_p}{FS} t^3$ $H+t = \sqrt[3]{\frac{k_p}{FS \cdot k_a}} \cdot t$ $t_{Esp} = \frac{H}{\sqrt[3]{\frac{k_p}{FS \cdot k_a}} - 1}$	$\frac{1}{2} \cdot k_a \cdot \gamma \frac{(H+t)^3}{3} \gamma_G = \frac{1}{2} \cdot k_p \cdot \gamma \frac{t^3}{3} \frac{1}{\gamma_R}$ $(H+t)^3 \cdot k_a \cdot \gamma_G = \frac{k_p}{\gamma_R} \cdot t^3$ $H+t = \sqrt[3]{\frac{k_p}{\gamma_R \cdot \gamma_G \cdot k_a}} \cdot t$ $t_{EC-7} = \frac{H}{\sqrt[3]{\frac{k_p}{\gamma_R \cdot \gamma_G \cdot k_a}} - 1}$
$t_{Esp} = t_{EC-7} ; FS = \gamma_R \cdot \gamma_F$	
$1,50 = \gamma_R \cdot 1,35$	
$\gamma_R = \frac{1,50}{1,35} = 1,10$	

Figura 1. Expresiones de cálculo de la estabilidad de una pantalla en voladizo sin sobrecarga y con el nivel freático profundo según la práctica geotécnica habitual española y según el método del EC-7

Como puede apreciarse, al igualar las profundidades teóricas de la pantalla de acuerdo a la práctica geotécnica española y al EC-7, se obtiene que el valor del coeficiente parcial de resistencia, aplicable al empuje pasivo, toma el valor de 1,10.

b.- Con sobrecargas permanentes o variables y nivel freático profundo

En la Figura 2 se muestra un esquema de la situación de cálculo junto con las ecuaciones correspondientes a aplicar de acuerdo a la práctica geotécnica habitual española y al marco conceptual del EC-7.

La diferencia con el caso anterior radica en la existencia adicional de un empuje activo debido a las sobrecargas que se tiene que tener en cuenta en el cálculo. En el caso del EC-7, el empuje debido a la sobrecarga debe mayorarse, al ser una acción desfavorable, por un coeficiente parcial de acciones que toma el valor de 1,35 ó 1,50 en función del carácter permanente o variable, respectivamente, de dicha sobrecarga.

Como puede apreciarse en la Figura 2, en el caso de una sobrecarga permanente, el coeficiente parcial de resistencia que se deduce de las expresiones toma el valor de 1,10.

Sin embargo, en el caso de una sobrecarga variable, la comparación de las expresiones recogidas en la figura indica que existe una relación entre el valor que debe adoptar dicho

coeficiente parcial y el valor de la sobrecarga, de tal manera que se puede deducir que cuanto mayor es el valor de la sobrecarga q , más pequeño debería ser el valor del coeficiente parcial para que los cálculos efectuados por ambas metodologías (española y EC-7) den lugar a los mismos resultados.

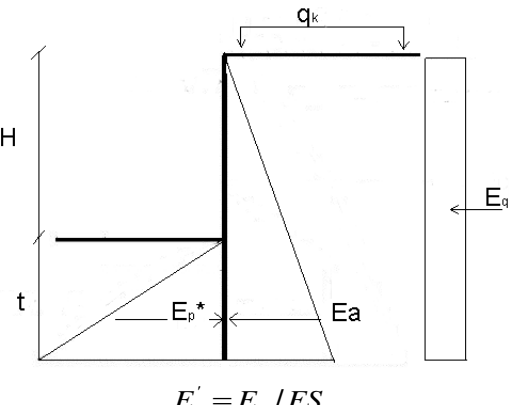
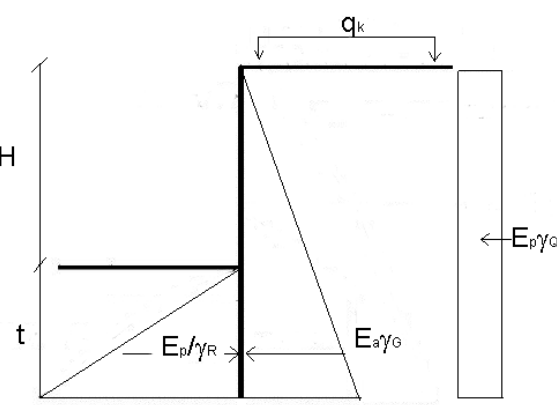
Práctica geotécnica española	EC-7
 <p style="text-align: center;">$E'_p = E_p / FS$</p>	
Sobrecarga permanente	
$\frac{1}{6} \cdot k_a (H+t)^3 \cdot \gamma + q \cdot k_a \frac{(H+t)^2}{2} = \frac{1}{6} \cdot k'_p \cdot t^3 \cdot \gamma$	$\gamma_G \frac{1}{6} \cdot k_a (H+t)^3 \cdot \gamma + \gamma_Q \cdot q \cdot k_a \frac{(H+t)^2}{2} = \frac{1}{6} \frac{k_p}{\gamma_R} \cdot t^3 \cdot \gamma$ $\frac{1}{6} \cdot k_a (H+t)^3 \cdot \gamma + q \cdot k_a \frac{(H+t)^2}{2} = \frac{1}{6} \frac{k_p}{\gamma_R \cdot \gamma_G} \cdot t^3 \cdot \gamma$
$FS = \gamma_R \cdot \gamma_G ; \gamma_R = \frac{1,50}{1,35} = 1,10$	
Sobrecarga variable	
$\frac{1}{6} \cdot k_a (H+t)^3 \cdot \gamma + q \cdot k_a \frac{(H+t)^2}{2} = \frac{1}{6} \cdot k'_p \cdot t^3 \cdot \gamma$	$\gamma_G \frac{1}{6} \cdot k_a (H+t)^3 \cdot \gamma + \gamma_Q \cdot q \cdot k_a \frac{(H+t)^2}{2} = \frac{1}{6} \frac{k_p}{\gamma_R} \cdot t^3 \cdot \gamma$ $\frac{1}{6} \cdot k_a (H+t)^3 \cdot \gamma + \frac{\gamma_Q}{\gamma_G} q \cdot k_a \frac{(H+t)^2}{2} = \frac{1}{6} \frac{k_p}{\gamma_R \cdot \gamma_G} \cdot t^3 \cdot \gamma$

Figura 2. Expresiones de cálculo de la estabilidad de una pantalla en voladizo con sobrecarga y con el nivel freático profundo según la práctica geotécnica habitual española y según el método del EC-7

Una serie de cálculos realizados por los autores permite afirmar que el considerar un coeficiente parcial de resistencia de valor 1,10 en los casos de sobrecarga variable conduce a longitudes de pantalla alrededor de un 5% superior, en el caso de los cálculos de EC7, para una pantalla de 5 m de voladizo y sobrecargas de hasta 250 kPa.

c.- Sin sobrecargas y con nivel freático somero

En la Figura 3 se muestra un esquema de la situación de cálculo junto con las ecuaciones a utilizar de acuerdo a la práctica geotécnica habitual española y al método del EC-7.

El aspecto más destacable de este caso es la forma de ponderar los empujes debido al agua, tanto en el trasdós como en el intradós de la pantalla. Esta ponderación debe hacerse de acuerdo al principio denominado “single-source-principle” (Ap. 2.4.2.9 del EC-7) que establece que a todas las acciones que tengan un mismo origen debe aplicarse el mismo coeficiente parcial, independientemente de si son favorables o desfavorables. Por tanto, de acuerdo a dicho principio, como el empuje del agua en el trasdós y en el intradós tienen el mismo origen, deben ponderarse de igual manera por lo que, dado su carácter global desfavorable y permanente, ambos se ponderan por el mismo coeficiente de mayoración de acciones (γ_G), tal y como aparece en el esquema de cálculo.

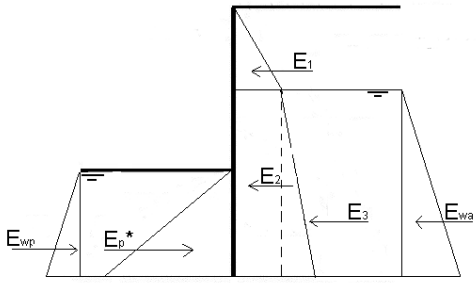
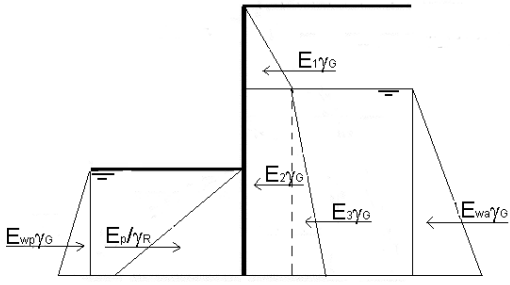
Práctica geotécnica española	EC-7
 $E'_p = E_p / FS$	
$E_1 \cdot d_1 + E_2 \cdot d_2 + E_3 \cdot d_3 + E_{wa} \cdot d_{wa} = E'_p \cdot d_p + E_{wp} \cdot d_{wp}$ $(E_1 \cdot d_1 + E_2 \cdot d_2 + E_3 \cdot d_3) + (E_{wa} \cdot d_{wa} - E_{wp} \cdot d_{wp}) =$ $E'_p \cdot d_p = \frac{E_p \cdot d_p}{FS}$ <p>d: Brazo de los empujes respecto al pie de la pantalla</p>	$(E_1 \cdot d_1 + E_2 \cdot d_2 + E_3 \cdot d_3) \cdot \gamma_G + E_{wa} \cdot d_{wa} \cdot \gamma_G =$ $\frac{E'_p \cdot d_p}{\gamma_R} + E_{wp} \cdot d_{wp} \cdot \gamma_G$ $(E_1 \cdot d_1 + E_2 \cdot d_2 + E_3 \cdot d_3) \cdot \gamma_G +$ $(E_{wa} \cdot d_{wa} - E_{wp} \cdot d_{wp}) \cdot \gamma_G = \frac{E'_p \cdot d_p}{\gamma_R}$ $(E_1 \cdot d_1 + E_2 \cdot d_2 + E_3 \cdot d_3) +$ $(E_{wa} \cdot d_{wa} - E_{wp} \cdot d_{wp}) = \frac{E'_p \cdot d_p}{\gamma_R \cdot \gamma_G}$
$FS = \gamma_R \cdot \gamma_G ; \quad \gamma_R = \frac{1,50}{1,35} = 1,10$	

Figura 3. Expresiones de cálculo de la estabilidad de una pantalla en voladizo, sin sobrecarga y con el nivel freático somero según la práctica geotécnica habitual española y según el método del EC-7.

Como resumen de los esquemas anteriores se puede establecer que, para que los cálculos realizados según la metodología de coeficientes parciales propuesta por el EC-7 proporcionen los mismos resultados que los cálculos de acuerdo a la práctica geotécnica habitual española, el coeficiente parcial para la resistencia (γ_R), referente al empuje pasivo, a utilizar en los cálculos de pantalla, debe tomar valor de 1,10, a pesar de la pequeña diferencia que se ha constatado en el caso de existencia de una sobrecarga variable situada en coronación de la pantalla.

4. PROCEDIMIENTO OPERATIVO PARA EL CÁLCULO DE LA ESTABILIDAD DE PANTALLAS

Una vez determinado analíticamente que el valor del coeficiente parcial de resistencia (γ_R), referida al empuje pasivo, debe ser de 1,10, en este apartado se desarrolla el procedimiento operativo para el cálculo de la estabilidad de pantallas mediante el modelo de Winkler, utilizando programas comerciales de cálculo.

Este tipo de cálculos está basado fundamentalmente en una comprobación consistente en que, con una geometría determinada de pantalla y con unas fuerzas aplicables en los apoyos definidas, tanto el empuje pasivo movilizado como los movimientos deben ser menores que unos valores máximos permitidos. El cálculo proporciona además las leyes de momentos flectores y esfuerzo cortantes con las que se debe dimensionar estructuralmente la pantalla. Un cálculo adicional a realizar es el dimensionamiento del apoyo, tanto si se materializa con un anclaje como con un puntal de hormigón armado o metálico.

En principio, el cálculo de estabilidad de una pantalla en el caso más general (con un apoyo, con el terreno afectado por el nivel freático y con sobrecargas en coronación) de acuerdo al marco conceptual del EC-7 se debe realizar mediante la ponderación de los empujes indicada en el esquema de la Figura 4.

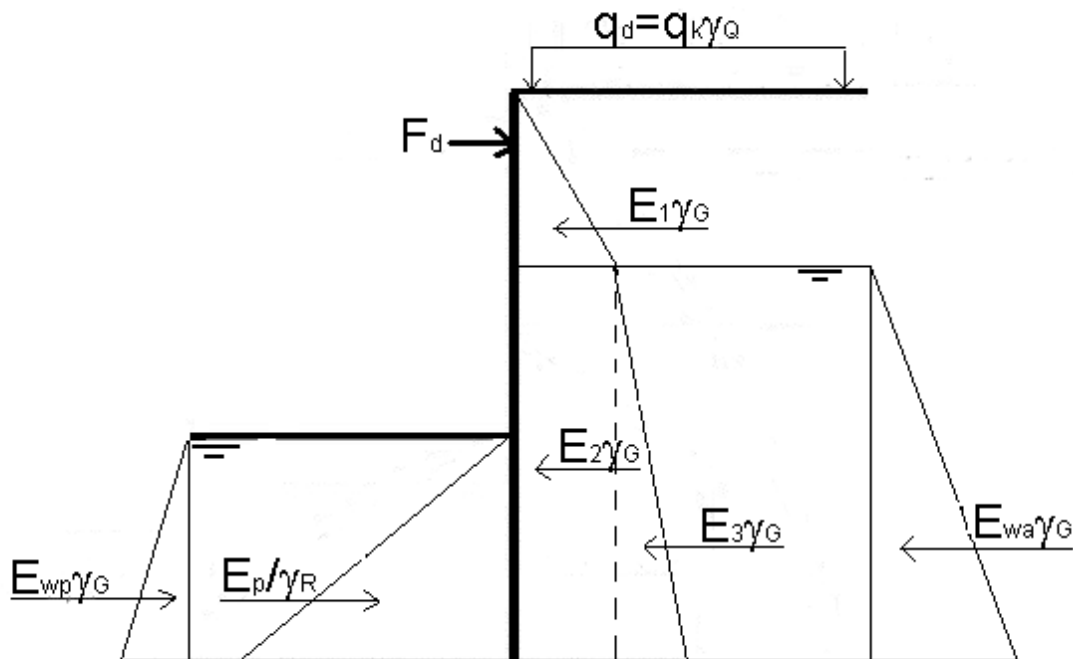


Figura 4. Esquema de ponderación de los empujes de acuerdo al marco conceptual del EC-7

En la figura se puede apreciar la diferente ponderación de las acciones que aparecen en el cálculo:

- El valor de cálculo del empuje activo debido a las tierras se obtiene multiplicando su valor característico por el coeficiente parcial de acciones (γ_G), que al ser permanente desfavorable toma valor de 1,35.
- El valor de cálculo del empuje pasivo debido a las tierras situadas en la zona de intradós empotrado se obtiene dividiendo su valor característico por el factor parcial de resistencia (γ_R) que como se estableció anteriormente, para los cálculos en España, toma valor de 1,10.
- El valor de cálculo del empuje activo debido a las sobrecargas se obtiene multiplicando su valor característico por el coeficiente parcial de acciones (γ_Q), que al ser variable desfavorable toma valor de 1,50.
- El valor de cálculo de los empujes debidos al agua, tanto en la zona de trasdós como de intradós, se obtiene multiplicando su valor característico por el coeficiente parcial de acciones (γ_G), que al ser globalmente permanente desfavorable toma valor de 1,35. Esta ponderación se hace de esta manera basándose en el principio “single-source-principle”, indicado anteriormente. Esta

forma de cálculo es semejante a mayorar únicamente el empuje neto del agua, entendido como la diferencia entre el empuje del agua en la zona activa y pasiva.

- El valor de cálculo de la fuerza del apoyo coincide con su valor característico dado que, en este caso, el coeficiente parcial de acciones toma valor 1,00 al ser una acción permanente favorable.

Sin embargo, la ponderación de empujes indicada en la figura anterior no es posible introducirla directamente en los cálculos dado que no se conocen a priori las zonas de la pantalla en las que aparecen los empujes activos o pasivos. A este respecto, en la Figura 5 puede apreciarse como en la zona empotrada aparecen empujes tanto activos como pasivos, cuya posición depende de los movimientos que se generen en la pantalla que, a su vez, dependen, entre otros factores, del empotramiento y rigidez de la pantalla y del valor de la fuerza del apoyo y de las posibles sobrecargas de uso.

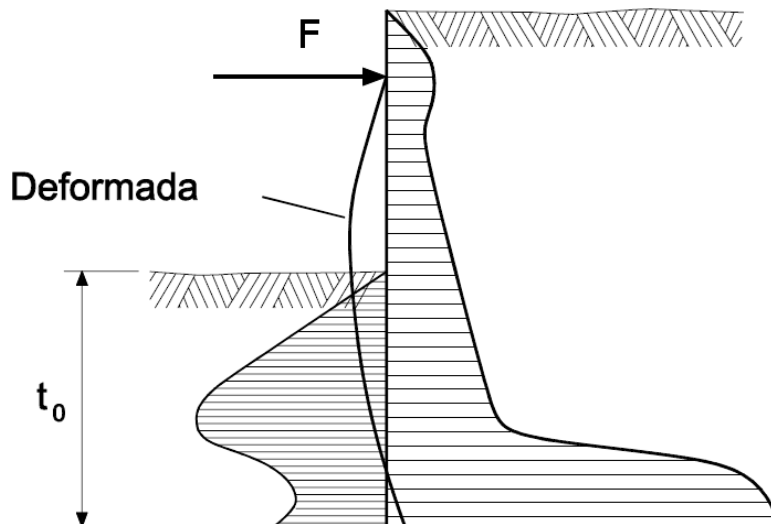


Figura 5. Leyes de empujes y movimientos de una pantalla con un punto de sujeción y base empotrada (Tomada del Código Técnico de la Edificación)

Para obviar este problema, el esquema de cálculo pasa a ser el que se muestra en la Figura 6 que básicamente consiste en dividir todas las acciones por el coeficiente parcial de acciones permanentes desfavorables (γ_G), de valor 1,35, y una vez realizado el cálculo multiplicar los resultados por dicho valor (Frank et al., 2004 y Bond & Harris, 2008). Este esquema de ponderación está recogido bajo los principios de lo que se ha denominado “Enfoque de Proyecto 2*” que asume implícitamente el hecho de que el resultado final en este tipo de cálculos no lineales depende del momento en que se introducen los coeficientes parciales, permitiendo que esta ponderación se haga al final del cálculo.

Una vez realizada dicha división, el esquema resultante puede implementarse fácilmente en los programas de cálculo comerciales. Además debe constatarse que dicho esquema es muy parecido al que actualmente se utiliza en la práctica geotécnica española, con la única diferencia del coeficiente γ_Q/γ_G por el que se afecta el valor característico de la sobrecarga.

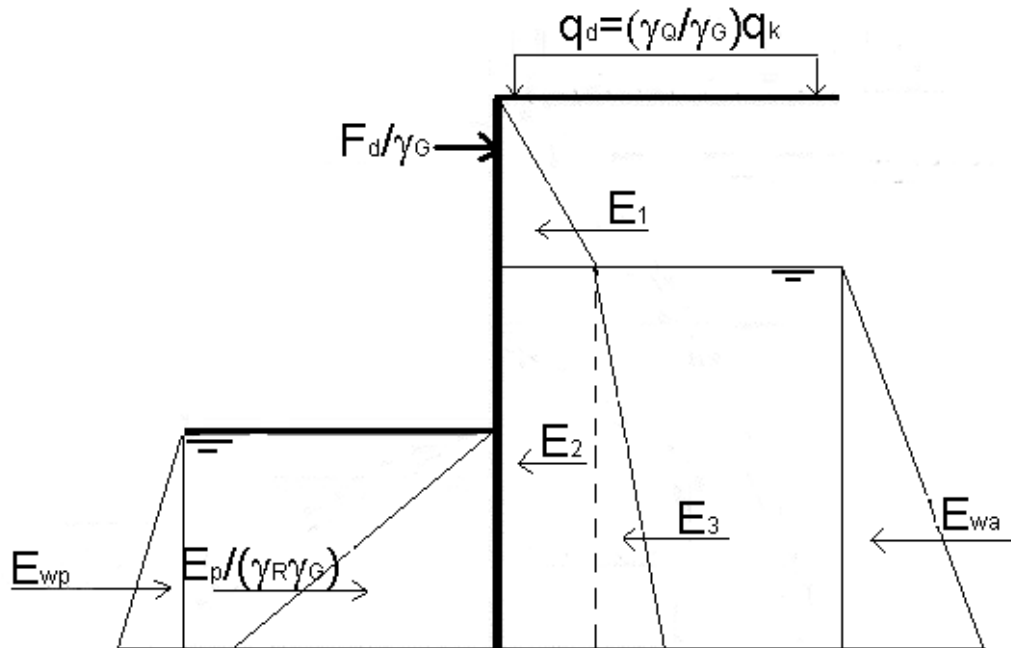


Figura 6. Adaptación del esquema de ponderación de empujes de acuerdo al marco conceptual del EC-7 para su utilización con programas comerciales basados en el modelo de Winkler

El cálculo se puede dar por validado, desde el punto de vista del Estado Límite Último de estabilidad, cuando el empuje pasivo movilizado no supere al empuje pasivo máximo dividido entre el producto $(\gamma_R \cdot \gamma_G)$. De acuerdo al Anejo Nacional español, dicho producto $(\gamma_R \cdot \gamma_G)$ es equivalente al 66% del pasivo total, dado que $\gamma_R = 1,10$ y $\gamma_G = 1,35$. También se deberá comprobar, para satisfacer el Estado Límite Servicio, que los movimientos calculados sean inferiores a los máximos permitidos en el proyecto.

De este cálculo se deriva la longitud total de la pantalla y los valores característicos de las leyes de momentos flectores y esfuerzos cortantes y de la fuerza necesaria en el apoyo (a materializar mediante anclaje o puntal). Los valores de cálculo de estos parámetros se obtienen multiplicando los valores característicos obtenidos por el coeficiente parcial de acciones γ_G de valor 1,35, por el que se dividieron anteriormente todos los empujes para realizar el esquema de cálculo.

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se derivan del contenido de este texto son las siguientes:

a.- El valor coeficiente parcial de resistencia (γ_R), referente al empuje pasivo, a utilizar en los cálculos de estabilidad de pantallas, debe tomar un valor de 1,10, para que los cálculos realizados según la metodología de coeficientes parciales propuesta por el EC-7 proporcionen los mismos resultados que los cálculos de acuerdo a la práctica geotécnica habitual española.

b.- Se ha establecido el procedimiento operativo para el cálculo de estabilidad de pantallas mediante el modelo de Winkler, utilizando programas comerciales de cálculo. Dicho procedimiento se resume básicamente en la utilización del esquema de ponderación de empujes recogido en la Figura 6.

c.- La utilización de dicho esquema de ponderación de empujes en los cálculos basados en los modelos de Winkler permite determinar la longitud total de la pantalla y los valores característicos de las leyes de momentos flectores y esfuerzos cortantes y de la fuerza necesaria en el apoyo (a materializar mediante anclaje o puntal).

d.- Los valores de cálculo de estos parámetros se obtienen multiplicando los valores característicos obtenidos por el coeficiente parcial de acciones γ_G de valor 1,35.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bond, A. & Harris, A. (2008). *Decoding Eurocode 7*. Taylor & Francis, 2008.
- 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., Kavvadas, M., Krebs, N., Orr, T. & Schuppener, B. (2004). *Designers' Guide to EN 1997-1*. Thomas Telford, 2004.