

NUEVOS CRITERIOS PARA EL CÁLCULO DE MUROS ACORDE CON EL EUROCÓDIGO 7

Miguel ORTEGA CORNEJO

Ingeniero de Caminos Canales y Puertos
IDEAM S.A.

Director de Ingeniería

miguel.ortega@ideam.es

Marta FERNANDEZ ESTRADÉ

Ingeniero de Caminos Canales y Puerto
IDEAM S.A.

Ingeniero proyectista

marta.fernandez@ideam.es

Francisco MILLANES MATO

Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puerto
IDEAM S.A.

Presidente

general@ideam.es

RESUMEN

El Eurocódigo 7 dedicado al proyecto geotécnico, supone un importante cambio en la forma de afrontar el proyecto de un muro, frente a la tradición española.

En este artículo se describen con detalle las nuevas verificaciones de los Estados Límite Últimos habituales en muros, acorde con el Eurocódigo 7, incidiendo sobre todo en los que condicionan en general su dimensionamiento, como son el Estado Límite Último GEO de fallo por deslizamiento de la base del muro y el Estado Límite Último GEO de fallo por hundimiento de la cimentación.

Sin embargo, siempre que la cimentación del muro cumpla con el ELU-GEO de hundimiento, y la resultante de la reacción vertical en la base de la cimentación respete un criterio de seguridad frente al borde del extremo de la cimentación, el Estado Límite Último EQU de pérdida de equilibrio por vuelco rígido se cumplirá siempre de forma indirecta. Por este motivo, este estado límite apenas se trata en el Eurocódigo 7, dado que nunca es condicionante.

PALABRAS CLAVE: Eurocódigo 7, muros, Estados Límite, deslizamiento, vuelco.

1. Introducción

Acorde con el Eurocódigo 7 parte 1 [1] (UNE-EN 1997-1, en adelante EC 7-1), para llevar a cabo el cálculo de una estructura de contención se deben considerar los Estados Límite Últimos que se resumen a continuación, descritos con más detalle en las referencias [2] y [3]:

- Estado Límite Último GEO de pérdida de estabilidad global: Este fallo se debe a la formación de una superficie de deslizamiento profunda, de forma aproximadamente circular, discurriendo preferentemente por las capas de terreno menos resistente que puedan existir.
- Estado Límite Último GEO de fallo por hundimiento del terreno de la cimentación del muro. La explicación detallada de la resistencia al hundimiento de una cimentación directa se realiza en la ref. [2] acorde con el EC 7-1.
- Estado Límite Último GEO de fallo por deslizamiento de la base del muro: En muros de gravedad o muros ménsula suele condicionar el dimensionamiento de la cimentación, y en general será la primera comprobación a realizar.

En la figura 1 se representan, para muros de gravedad y muros en ménsula, los fallos GEO por hundimiento de la cimentación (en las figuras de la izquierda) y de fallo GEO por deslizamiento de la base del muro (figuras de la derecha).

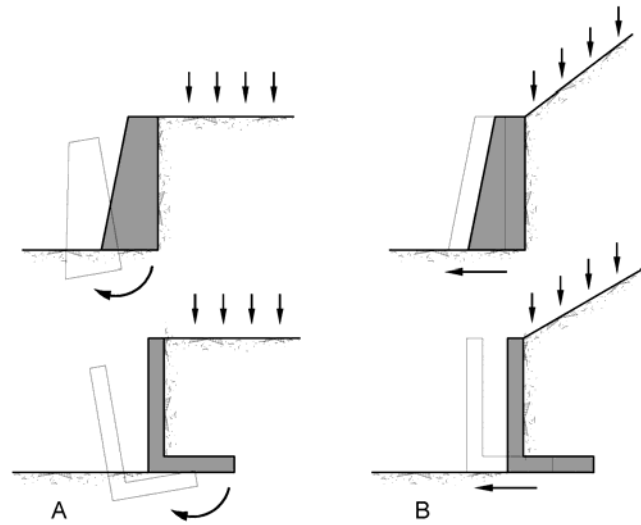


Figura 1. Ejemplos de modos límite para roturas GEO de la cimentación en muros de gravedad. A: Hundimiento (izquierda). B: Deslizamiento (derecha)

- Estado Límite Último EQU de pérdida del equilibrio por vuelco como sólido rígido del muro, considerando tanto la estructura como el terreno indeformables y, por consiguiente, en ningún caso puede producirse el fallo ni de la estructura ni del terreno. En este estado límite sólo se considera por tanto la pérdida del equilibrio (ver fig. 2).

En realidad este estado límite último, en general, no condicionará nunca, como se verá más adelante, si se cumple el Estado Límite Último GEO de hundimiento de la cimentación, y la excentricidad de la reacción en la base de la cimentación está controlada, acorde con el criterio establecido en el apdo. 6.5.4 del EC 7-1 [1].

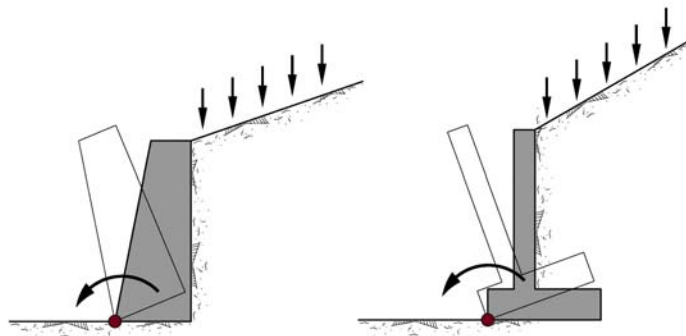


Figura 2. Vuelco del muro, considerado el muro y el terreno como sólido rígido (EQU)

- Estado Límite Último STR de fallo de elementos estructurales como el alzado o la cimentación del muro, anclajes, codales, puntales y sus conexiones. El fallo de un anclaje incluye tanto fallo estructural (STR) como fallo por extracción del mismo del terreno (GEO).
- Estado Límite Último HYD de fallo por levantamiento hidráulico, erosión interna o tubificación, filtraciones inaceptables de agua o transporte de partículas sólidas a través o bajo el muro, todo ello causado por un gradiente hidráulico excesivo.

2. Pasos a seguir para el dimensionamiento de muros de gravedad con el EC 7-1

En un proyecto de una estructura de contención existen algunas características fijas y otras que deben definirse para que el muro cumpla con la funcionalidad que se le ha atribuido.

Serán características fijas las propiedades del suelo de cimentación, cuyos parámetros geotécnicos determinan tanto la capacidad portante de dicho terreno como su resistencia al deslizamiento, la profundidad mínima de cimentación y, en muchos casos, la cota de coronación del muro y por lo tanto su altura.

Una vez conocidas esas características fijas, se procede a la definición de las acciones actuantes sobre la estructura. La acción predominante en los muros de gravedad suele ser el empuje de tierras y contra esa acción ha de proyectarse el muro de manera que satisfaga todos los requisitos de seguridad frente a los modos de fallo de los diferentes estados límite.

Por lo tanto las características variables que han de obtenerse son las dimensiones del muro, las características resistentes de sus materiales y, en algunos casos, el material de relleno del trasdós (cuando éste sea artificial).

El proceso de proyecto comienza por tanto con una estimación previa o el predimensionamiento de las dimensiones del muro. Partiendo de una geometría definida básica se realizan, en orden, las verificaciones correspondientes a los estados límite último siguientes (ver ref. [2]):

1. Verificación de la estabilidad global de la ladera (ELU GEO) aplicando el enfoque de proyecto 3 (en inglés "Design Approach" o de forma reducida DA-3) (ver refs. [2] y [3]).
2. Verificación del estado límite último GEO de resistencia al deslizamiento aplicando el enfoque de proyecto 2 (DA-2). Este suele ser el estado límite que condiciona, en general, la dimensión de la cimentación del muro.
3. Verificación del estado límite último GEO de resistencia al hundimiento de la cimentación aplicando el enfoque de proyecto 2 (DA-2).
4. Comprobación de la excentricidad de la resultante en la base de la cimentación en ELU GEO aplicando el enfoque de proyecto 2 (DA-2), acorde con el apdo. 6.5.4 del EC 7-1 [1].
5. Una vez que se cumplan los pasos 3 y 4, se cumplirá siempre la verificación del estado límite último EQU de pérdida del equilibrio por vuelco rígido.
6. Verificación de los diferentes estados límite últimos del tipo STR, dimensionando el armado del muro.

Dimensionado el muro, y en el caso que sea necesario, se verificaría el cumplimiento de los estados límite de servicio asociados con determinados requisitos impuestos a sus deformaciones, por razones estéticas y de servicio (ver la ref. [2]).

Si se da el caso de que alguno de los estados límite no se satisface, el muro se debe redimensionar, repitiendo las etapas necesarias hasta conseguir que cumpla cada estado límite.

En el siguiente diagrama de flujo se presentan de forma esquemática los pasos a seguir para el dimensionamiento de muros de gravedad.

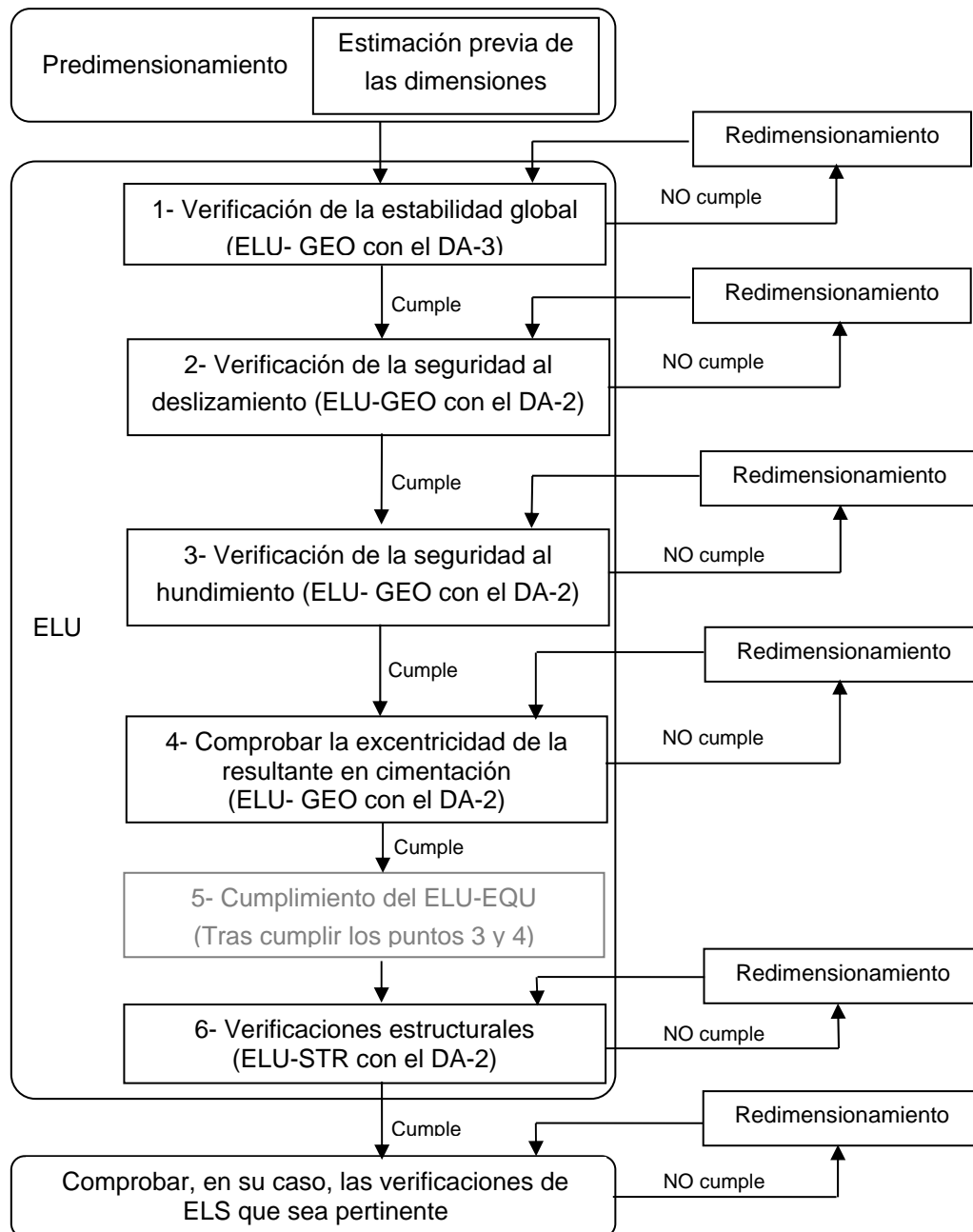


Figura 3. Diagrama de flujo para el dimensionamiento de muros de gravedad

3. Verificaciones en Estado Límite Último

3.1. Verificación del ELU GEO de deslizamiento

Se debe verificar acorde con el apdo. 6.5.3 del EC 7-1 [1], que se cumple en ELU GEO aplicando el DA-2 (ver refs. [2] y [3]) que la acción horizontal de cálculo solicitante en la base de la cimentación (H_{Ed}) es menor o igual que la resistencia total de cálculo al deslizamiento (H_{Rd}), la cual se obtiene como la suma de la resistencia del terreno de cálculo al deslizamiento bajo la zapata (R_d), más la resistencia pasiva de cálculo del intradós (R_{pd}), en caso de que exista y pueda considerarse.

$$H_{Ed} \leq H_{Rd} \quad (1)$$

Donde

$$H_{Rd} = R_d + R_{pd} \quad (2)$$

Y por lo tanto:

$$H_{Ed} \leq R_d + R_{pd} \quad (\text{ec. 6.2 del EC 7-1 [1]}) \quad (3)$$

En general este será el ELU que condicione el dimensionamiento de la cimentación del muro.

3.2. Verificación del ELU GEO de hundimiento

Comprobada la seguridad frente al deslizamiento (ELU GEO), se debe verificar la resistencia última de la cimentación frente a un eventual fallo por hundimiento.

La ref. [2] describe con detalle los criterios y verificaciones que es necesario realizar para controlar este estado límite último del tipo GEO, acorde con el capítulo 6 de Cimentaciones superficiales del EC 7-1 [1].

En este estado límite último se debe verificar que la resultante de cálculo vertical (V_d), que actúa en la base de la cimentación del muro, considerando su excentricidad e inclinación de la carga, sea menor o igual que la resistencia al hundimiento del terreno (R_d) situado bajo él:

$$V_d \leq R_d \quad (\text{ec. 6.1 del EC 7-1 [1]}) \quad (4)$$

La principal diferencia entre las cimentaciones de las estructuras de contención con las cimentaciones superficiales de elementos individuales como son las pilas de un puente es la presencia en el primer caso de empujes del terreno, cuestión que en general, no suele ser una acción significativa en las segundas. Además las cimentaciones de los muros suelen ser corridas, con una dimensión mucho mayor que otra ($B \ll L$).

La inecuación 4 puede expresarse también en términos de presión (en lugar de reacciones) en función de la presión de cálculo (efectiva) y la presión de cálculo de hundimiento:

$$q_{Ed} \leq q_{Rd} \quad (5)$$

Donde:

$$q_{Rd} = \frac{q_k}{\gamma_{Rv}} \quad (6)$$

siendo:

$$q_k = \frac{R_k}{A'} \quad (7)$$

Con q_k la presión de hundimiento característica obtenida de acuerdo con la formulación del Anejo D del EC 7-1 [1], A' el área eficaz comprimida de la zapata y γ_{Rv} el coeficiente parcial de capacidad frente al hundimiento definido en el Anejo Nacional [4] del EC 7-1[1].

3.3. Verificación de la resistencia última frente a la pérdida del equilibrio estático. Vuelco rígido. Estado Límite Último tipo EQU.

La comprobación última de pérdida de equilibrio (o vuelco rígido) de la estructura o del terreno considerados como sólido rígido, en el que las resistencias de los materiales y el terreno proporcionan una resistencia despreciable, debe realizarse utilizando los valores de cálculo de las acciones actuantes, distinguiendo entre acciones estabilizadoras y acciones desestabilizadoras.

En esta verificación se aplicarían los coeficientes parciales:

- A los valores característicos de las acciones, para acciones no geotécnicas (como por ejemplo el peso de las tierras o el peso propio del muro):

$$F_d = \gamma_F \cdot F_k \quad (8)$$

- A los valores de las acciones obtenidas a partir de los valores de cálculo de los parámetros del terreno para acciones geotécnicas (como por ejemplo los empujes de tierras):

$$F_d = \gamma_F \cdot F(X_d) = \gamma_F \cdot F(X_k / \gamma_M) \quad (9)$$

Hay que llamar la atención que para la verificación del estado límite EQU no es de aplicación ningún enfoque de proyecto, como lo era para los estados límite GEO y STR. Los valores de los coeficientes parciales para la verificación EQU son los definidos en el Anejo Nacional [4] del EC 7-1[1] para las tablas A.1 (coeficientes γ_F), y en la tabla A.2 (coeficientes γ_M).

La verificación del estado límite último EQU requiere que el momento desestabilizador de cálculo actuando sobre el extremo de la puntera de la cimentación del muro sea menor o igual que el momento de cálculo estabilizador actuando en el mismo punto.

La ecuación de equilibrio estático general es la siguiente:

$$E_{dst,d} \leq E_{stb,d} + (T_d) \quad (\text{ec. 2.4 del EC 7-1[1]}) \quad (10)$$

Donde T_d sería una posible resistencia a cortante, que en general debería ser de valor reducido.

La ecuación 10 particularizada para el caso del vuelco rígido, tomando momentos en el punto de vuelco rígido quedaría como sigue:

$$M_{dst,d} \leq M_{stb,d} \quad (11)$$

En la ref. [2] se describe con más detalle los criterios para obtener los momentos estabilizadores y los momentos desestabilizadores (o también denominados coloquialmente como volcadores).

4. ¿Por qué no condiciona nunca el estado límite último EQU con el EC 7-1?

Los coeficientes parciales que se deben aplicar a las acciones en las verificaciones de los Estados Límite Últimos del tipo GEO (y STR), son exactamente iguales que los aplicables en el Estado Límite Último EQU de pérdida de equilibrio, salvo en el caso de las acciones permanentes de valor constante (G) debidas al peso propio y las cargas muertas. La tabla siguiente muestra las diferencias en dichos coeficientes parciales acordes con la referencia [5].

Acción		ELU GEO (y STR)		ELU EQU	
		Efecto Favorable	Efecto Desfavorable	Efecto Estabilizador	Efecto Desestabilizador
Permanente de valor constante (G) γ_G	Peso propio	$\gamma_{G,fav}=1,0$	$\gamma_{G,desf}=1,35$	$\gamma_{G,stb}=0,9$	$\gamma_{G,dst}=1,10$
	Carga muerta	$\gamma_{G,fav}=1,0$	$\gamma_{G,desf}=1,35$	$\gamma_{G,stb}=0,9$	$\gamma_{G,dst}=1,10$

Tabla 1. Coeficientes parciales de las acciones permanentes en ELU GEO (y STR) comparadas con los de ELU EQU

Como se puede apreciar de la tabla anterior, la única diferencia son los coeficientes parciales de las acciones permanentes de pesos propios y cargas muertas, que son las acciones que producen el esfuerzo axial de compresión en la base de la cimentación, y que en general son las principales acciones estabilizadoras en ELU EQU.

Así para la verificación ELU GEO del hundimiento de la cimentación de un muro habrá que verificar en general dos hipótesis de cálculo ya que, a priori, no se sabe cuál será más condicionante:

- Hip 1: Axil mínimo (N_{\min}) y momento M máximo con fuerza horizontal concomitante máxima: en esta hipótesis el axil será el mínimo pero la excentricidad será máxima.
- Hip 2: Axil máximo N_{\max} y momento M máximo con máxima fuerza horizontal concomitante: en esta hipótesis aunque la carga vertical sea mayor, tendrá menos excentricidad.

En ambos casos se debe limitar además el valor de la excentricidad máxima de la reacción vertical en la base de la cimentación ($e_{ED}=M_{ED}/N_{ED}$) a un valor límite “razonable”. El apartado 6.5.4 del EC 7-1[1] recomienda no superar una excentricidad de 1/3 de la anchura de la base de la zapata en ELU GEO. En el caso de que se supere se deben tomar precauciones especiales.

Dado que los empujes de tierras y eventuales empujes del agua del lado del trasdós se afectarían por un coeficiente parcial desfavorable (en ELU GEO) o desestabilizador (en ELU EQU), y que en ambos casos este coeficiente parcial serían de valor $\gamma_Q=1,5$, y suponiendo que se limita la excentricidad de la reacción vertical en ELU GEO al máximo recomendado por el EC 7-1[1], se obtendría un máximo de excentricidad en ELS de:

- Si $e_{Ed \max} < B/3$ y dado que $e_{Ed \max} = 1,5 e_k$, se obtendría que $(1,5 \cdot e_k) < B/3$, o lo que es lo mismo, que la excentricidad en ELS no supere el valor $e_k < B/4,5$ (el 22,22% del ancho de la cimentación B), que es un valor límite en ELS bastante razonable.

Para la verificación del ELU EQU se debe comprobar que los momentos desestabilizadores sean máximos, y que los estabilizadores sean mínimos, o sea, que se minimicen los axiles de compresión en la cimentación que son estabilizadores, y se maximicen los empujes que son desestabilizadores. Esta hipótesis coincide con la hipótesis de control del ELU GEO de hundimiento de axil mínimo (N_{\min}).

La única diferencia entre estos dos estados límite es el coeficiente parcial a aplicar al axil. En la hipótesis ELU EQU se multiplicaría la carga vertical por $\gamma_{G, dst}=0,9$, al ser estabilizadora, mientras que en la hipótesis de axil mínimo en la verificación ELU GEO de hundimiento se multiplicaría por $\gamma_{G, fav}=1,0$. Esta mínima diferencia entre las acciones ponderadas en el estado límite EQU y el GEO de hundimiento implicaría una ligera disminución del axil de cálculo o, lo que es lo mismo, un ligero aumento de la excentricidad ($e_{Ed}=M_{Ed}/N_{Ed}$) de aplicación de dicho axil (al ser igual M_{Ed} y sólo variar N_{Ed}), en la relación $1,0/0,9=1,111$, o sea un aumento de la excentricidad de un 11,11% en ELU EQU frente a la excentricidad en la hipótesis de axil mínimo en ELU GEO (ver figura 4).

Este aumento de excentricidad de apenas un 11,11% es muy pequeño, e insuficiente para poder llegar a producir un problema en ELU EQU, y por lo tanto, siempre que se limite en ELU GEO la excentricidad máxima de cálculo al máximo propuesto en el apdo. 6.5.4 del EC 7-1[1]: $e_{Ed \max} < B/3$, se cumplirá por defecto el estado límite último EQU, ya que sólo aumentará en un 11,11% la excentricidad de la resultante vertical de cálculo, pero dicha resultante siempre permanecerá dentro de la cimentación, y por lo tanto se verificará siempre el cumplimiento de la inecuación 11:

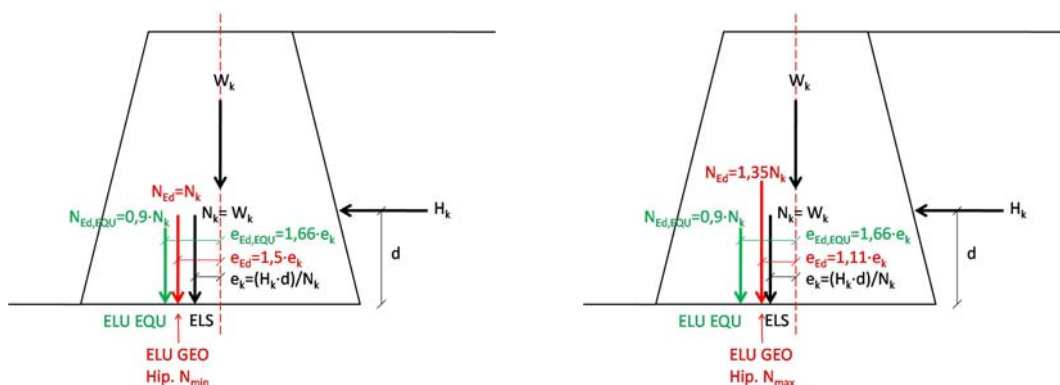
- En EQU $e_{Ed} < (1,11 \cdot B/3 = B/2,7)$, lo cual implica que la resultante vertical quedará siempre dentro de la cimentación, y por lo tanto que nunca puede producirse el vuelco

rígido. Es decir, si se cumple el ELU GEO de hundimiento, se cumplirá siempre automáticamente la verificación del Estado Límite Último EQU.

Sólo en el caso de que la excentricidad en la hipótesis ELU GEO de hundimiento, en la hipótesis de axil mínimo, fuera $e_{Ed} > (0,45 \cdot B = B/2,222)$, incumpliendo además la recomendación del EC 7-1[1] (apdo. 6.5.4), o lo que es lo mismo que hubiera una excentricidad de la carga en ELS de $e_k > (0,3 \cdot B = B/3,333)$, podría llegar a producirse el incumplimiento del vuelvo rígido EQU.

Esta hipótesis parece a todas luces excesiva y desproporcionada, y casi con toda seguridad no podría llegar a darse nunca, ya que en ese caso apenas habría en ELU GEO un 10% de la zapata comprimida, lo cual llevaría al colapso previo por hundimiento (GEO) de la cimentación con toda probabilidad.

Las figuras esquemáticas siguientes (Figs. 4 y 5) aclaran esta descripción. La figura 4 compara la combinación de ELS, con la hipótesis de axil mínimo (N_{min}) en ELU GEO con la hipótesis ELU EQU, mientras que la figura 5 lo hace con la combinación de ELS, la hipótesis de axil máximo (N_{max}) en ELU GEO con la hipótesis ELU EQU.



Figuras 4 y 5. Comparación de reacciones en la base de un muro, en ELS, en ELU EQU (en verde), con la hipótesis ELU GEO N_{min} (en color rojo) (Figura 4) ó ELU GEO N_{max} (Figura 5).

5. ¿Por qué el EC 7-1 no contempla el concepto del vuelco plástico?

5.1. El concepto de vuelco plástico según la antigua tradición española

Para estudiar el Estado Límite Último de vuelco la *ROM 0.5* [6] y la *Guía de Cimentaciones de obras de carretera* [7] proponen considerar dos modos de fallo diferentes a los que denominan “vuelco rígido” y “vuelco plástico”.

La *ROM 0.5* [6] clasifica al “vuelco rígido” como un estado límite último de equilibrio tipo EQU, pues corresponde a una pérdida de equilibrio, en el que no interviene las propiedades del terreno ni de la estructura, de forma análoga al EC 7-1 [1], mientras que el “vuelco plástico” lo clasifica como una especie de Estado Límite Último tipo GEO, con la denominación del EC 7-1, pues el modo de fallo está condicionado por las características del terreno.

Aunque este último modo de fallo, que mezcla el ELU EQU con el ELU GEO, no lo contempla el EC 7-1, y por lo tanto estaría fuera de su ámbito de aplicación, se va a explicar para demostrar que no condicionaría nunca.

El fallo debido a vuelco plástico, acorde con [6], tiene lugar cuando la resultante de las acciones sobre el terreno se acerca al borde de la zapata del muro produciendo una concentración de tensiones que produciría la plastificación de dicha zona extrema.

La condición de rotura se alcanza por lo tanto cuando el valor medio de la componente vertical de la presión que actúa en la zona comprimida, se iguala a la presión que produce la plastificación del terreno, siendo esta la presión vertical de hundimiento, que se puede calcular, en general, con la formulación general de Brinch-Hansen.

La ROM 0.5 [6] ha convenido definir el coeficiente de seguridad al vuelco plástico como “el número F por el que se deben multiplicar todas las fuerzas volcadoras (aumentando las fuerzas horizontales y los momentos volcadores al ser estos producto de las fuerzas por la altura de aplicación), conservando su línea de acción, para que se alcance la condición de rotura en el terreno de apoyo”, sin aumentar la carga vertical.

La ROM establece que dicho coeficiente de seguridad F debe ser de 1,3 para la hipótesis fundamental. La hipótesis que la ROM denomina como fundamental es la combinación característica en ELS, con lo cual no se debería considerar con propiedad un Estado Límite Último, acorde con los Eurocódigos. Si obviamos esta incongruencia formal, y analizamos qué implica ese coeficiente de seguridad tendremos que: se mantiene la carga vertical característica (sin ponderar), se mayoran por 1,30 las fuerzas horizontales y los momentos en la base de la zapata, y con estas acciones se verifica el ELU GEO de hundimiento.

5.2. Motivos por los cuales el vuelco plástico nunca puede condicionar frente a la verificación ELU GEO del EC 7-1.

Tal y como se ha explicado anteriormente, acorde con el EC 7-1 [1], la verificación ELU GEO de hundimiento se debería realizar para las dos hipótesis de N_{max} y de N_{min} .

La hipótesis de N_{min} del EC 7-1 [1] en el estado límite último GEO de hundimiento es siempre mucho más penalizante que la del vuelco plástico de [6] y [7], por los motivos siguientes:

- Según el EC 7-1 [1] en la hipótesis de N_{min} el peso propio del muro se ponderará por $\gamma_{G, fav}=1,00$, mientras que los empujes del terreno, las sobrecargas, o el agua se ponderarán por $\gamma_{Q, desj}=1,50$. Por lo tanto el momento de cálculo en la base de la cimentación será: $1,5 \cdot M_k$ y por lo tanto la excentricidad de cálculo en ELU GEO será: $e_{Ed}=(1,5 \cdot M_k)/(1,0 \cdot N_k)=1,5 \cdot e_k$
- Según la ROM [6] y la Guía [7] en la hipótesis de rotura por vuelco plástico, se deben multiplicar los empujes horizontales característicos por 1,3, es decir, se obtendrá un valor representativo de $1,3 \cdot H_k$ mientras que el peso propio del muro tendrá su valor característico.

Por tanto el momento de cálculo será $1,3 \cdot M_k$ y la excentricidad será $e=(1,3 \cdot M_k)/N_k=1,3 \cdot e_k$.

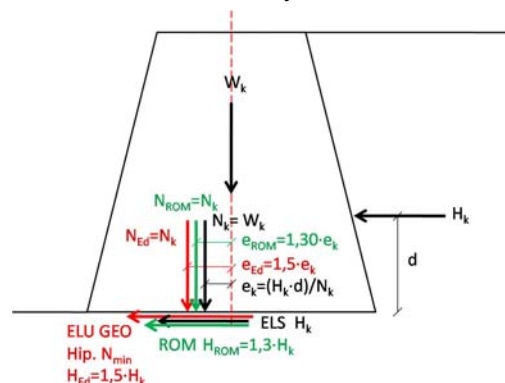


Figura 6. Comparación de reacciones en la base del muro según la ROM en la hipótesis de vuelco plástico, con las hipótesis de ELS y la hipótesis ELU GEO N_{min} del EC 7-1 [1].

Queda claro entonces que el Estado Límite Último GEO de hundimiento en la hipótesis de axil mínimo, acorde con el EC 7-1 [1], al tener el mismo axil que la hipótesis del vuelco plástico de la ROM (y la Guía), y tener siempre mayores fuerzas horizontales, mayores momentos y mayor excentricidad de la carga, será siempre condicionante frente a estas últimas, y por lo tanto el vuelco plástico de [6] y [7] nunca condicionaría.

Esfuerzo en base de cimentación	ROM 0.5 [6] y Guía [7] Vuelco plástico	EC 7-1 [1] ELU GEO (hipótesis N_{min})
Axil N	$1,00 \cdot N_k$	$1,00 \cdot N_k$
Fuerza horizontal H	$1,30 \cdot H_k$	$1,50 \cdot H_k$
Momento M	$1,30 \cdot M_k$	$1,50 \cdot M_k$
Excentricidad de la carga e	$e = 1,30 \cdot M_k / N_k = 1,30 \cdot e_k$	$e = 1,50 \cdot M_k / N_k = 1,50 \cdot e_k$

Tabla 2. Comparación del vuelco plástico de [6] y [7] con LEU GEO del EC 7-1 [1]

Es más, no sólo el EC 7-1 [1] será condicionante, sino que además lo será con mucho margen, ya que en el ELU GEO de hundimiento (con axil mínimo), se exige un coeficiente parcial de la resistencia γ_R de valor 1,85 (ó 1,6) acorde con [4], mientras que la verificación del vuelco plástico sólo exige un coeficiente de seguridad de 1,00 una vez que si se multiplican H_k y M_k por 1,30.

6. Conclusiones

Acorde con el EC 7-1 [1], si se cumple el estado límite último GEO de hundimiento de la cimentación del muro, y se adoptan unas mínimas precauciones de no permitir excentricidades de cargas excesivas, cumpliendo las recomendaciones del apdo. 6.5.4 del EC 7-1 [1] que limitan la excentricidad máxima en ELU GEO, se puede concluir que el vuelco rígido (ELU EQU), no condicionará nunca, y por eso el EC 7-1 [1] apenas lo trata.

El vuelco plástico, tradicionalmente contemplado en las recomendaciones españolas [6] y [7], mezclaba conceptos de equilibrio, con conceptos de resistencia del terreno, y por lo tanto queda fuera del marco normativo del EC 7-1 [1].

De cualquier manera, el vuelco plástico, tal y como se entiende en [6] y [7], nunca condicionaría frente al Estado Límite Último GEO de hundimiento establecido en el EC 7-1 [1], ya que siempre condicionará este último con mucho margen frente al primero.

7. Referencias

- [1] AENOR AEN/CTN 140 (2010): *Eurocódigo 7: "Proyecto geotécnico". Parte 1: "Reglas generales"*. UNE-EN 1997-1+AC.
- [2] *"Manual de aplicación del Eurocódigo 7 (UNE-EN 1997) para el proyecto de cimentaciones de obras de carretera"*. Ministerio de Fomento. (Pendiente de publicación)
- [3] PARRILLA A.; CRESPO P.; ESTAIRE J.; ORTEGA, M.; PÉREZ A. "Bases de cálculo del Eurocódigo 7. Un cambio en la metodología para el proyecto de cimentaciones". *Hormigón y Acero*. ACHE. Madrid. (Pendiente de publicación)
- [4] *Anejo Nacional AN/UNE-EN 1997-1:2004 Eurocódigo 7. Proyecto geotécnico Parte 1: "Reglas generales"*.
- [5] *Anejo Nacional para el proyecto de puentes. AN/UNE-EN 1990. AN/UNE-EN 1990/A1(Anejo A2) Eurocódigos: Bases de cálculo de estructuras. Anejo A2: Aplicación a puentes*.
- [6] *"ROM 0.5-05. Recomendaciones geotécnicas para el proyecto de obras marítimas y portuarias"*. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente- Puertos del Estado (2005).
"Guía de cimentaciones en obras de carreteras". Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (2003).