

El riesgo geotécnico en la conservación de obras viarias



Geotechnical Risk in the Maintenance of Roadworks

Carlos Oteo Mazo

Profesor Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Resumen

En el presente trabajo, fruto de una conferencia impartida en la ATC, se analiza el concepto general de “riesgo” y de su adaptación al concepto de “riesgo geotécnico”. Se analizan los posibles factores de riesgo que pueden afectar a infraestructuras viarias, así como los posibles sistemas de análisis. Se entra en detalle en la comparación entre “riesgo” y “seguridad” y se incluye algún ejemplo de cuantificación estadística del riesgo geotécnico. El trabajo incluye un listado de “amenazas” en obras viarias, así como la forma de elaborar mapas de riesgo y el análisis de riesgos geotécnicos en concesiones de infraestructuras.

PALABRAS CLAVES: riesgo geotécnico, prevención, problemas geotécnicos en carreteras, estabilidad de taludes, daños en carreteras.

Abstract

In this paper, the result of a lecture at the ATC, the general concept of “risk” and its adaptation to the concept of “geotechnical risk” are analyzed. Potential risk factors that may affect road infrastructure, as well as potential systems analysis are analyzed. It goes into detail on the comparison between “risk” and “safety” and an example of statistical quantification of geotechnical risk is included. This work includes a list of “hazards” in road works and how to develop risk maps and analysis of geotechnical risk in infrastructure concessions.

KEY WORDS: geotechnical risk, prevention, road geotechnical problems, slope stability, road damages.

1. Introducción

La palabra “riesgo” es, según algunos diccionarios, de origen incierto y puede provenir de “*risco*”, que, a su vez, proviene del latín “*resecare*” (cortar, peñasco alto cortado, etc.). Puede, gramaticalmente, interpretarse como la contingencia o proximidad de un daño y, desde otro punto de vista, puede significar “cada una de las contingencias que pueden ser objeto de un contrato de seguros”. Y, a su vez, “contingencia” (del latín, *contingencia*) viene a ser “posibilidad de que una cosa suceda o no suceda”. El concepto “riesgo” puede, así oponerse a “necesidad”. Todo ello puede tener una doble apreciación:

- Posibilidad de que algo suceda.
- Probabilidad de que suceda una cosa.

El primer caso implica algo subjetivo, en que el observador, con su experiencia y, quizás, con datos exteriores, puede apreciar que un suceso negativo se pueda presentar poco o muy frecuentemente (y ahí es donde entra el término objetivo).

La segunda apreciación ya puede tener una definición matemática, expresable con una integral aplicada a un cierto volumen de sucesos o datos, a fin de establecer la probabilidad de encontrar en ese volumen un determinado suceso:

$$\int_{vol} (\psi)^n dx$$

Si es un sistema simple de un acontecimiento y se desea saber cuál es la probabilidad de que exista uno de cierta clase (que ya ha aparecido un número m de veces en n casos), la probabilidad sería:

$$p = \frac{m}{n}$$

Lo que sería medible numéricamente.

Esto es lo que se hace en diversos campos de la ingeniería:

- Tomar datos de sucesos (con magnitudes diferentes) a lo largo del tiempo.

- Estudiar su distribución respecto a magnitudes y tiempo de repetición.
- Extrapolar a períodos en que no se tiene medida.
- Establecer leyes de probabilidad de que se superen ciertas magnitudes en función del período de recurrencia o, establecido ese período, cuál es la magnitud máxima que cabe esperar.

Se hace así en diversos casos:

- **Inundaciones:** a partir de los datos pluviométricos se establecen caudales máximos en función de períodos de recurrencia. Es decir, se parte de series temporales de datos y se extrapola (con las funciones que mejor ajusten a los datos disponibles) a períodos mayores de tiempo (100 y 500 años). En España la primera estación de este tipo se instaló en la Isla de San Fernando (Cádiz), a principios del Siglo XIX.
- **Terremotos:** también se van registrando, o definiendo con datos históricos, los sismos que se producen y su intensidad y/o magnitud (estimando energía liberada y/o tipo de daños producidos). A partir de datos históricos (archivos municipales), descripciones de literatos y científicos (como los de Darwin, a bordo del “Beagle”, al llegar a Valparaíso, un día después del maremoto de mitad del siglo XIX), se añaden terremotos importantes en una escala temporal hacia atrás. Con ello se puede establecer también la probabilidad de que, a lo largo de un cierto período de tiempo, se produzca un terremoto de determinada intensidad.

- **Tsunamis:** lo mismo pero aplicado a terremotos generados en alta mar.
- **Accidentes:** en que los datos de partida se basan en las denuncias, descripciones de daños, causas de los mismos, etc., con lo que pueden determinarse zonas de peligro en carretera, daños ocasionados por dichos accidentes a lo largo de determinados períodos de tiempo, probabilidad de daños ocasionados por viento, rotura de cristales, etc.

El Comité C-12 de la AIPCR indica (2004) que el gasto de reparaciones geotécnicas (principalmente basados en tratamiento de taludes) fue, en la década de los 90 del siglo pasado, de 4.400 millones de dólares por año en Japón, de 2.000 en Estados Unidos y de unos 220 en España (aunque aquí sólo gastos directos). Hay que señalar que las reparaciones de los años 97-99 sólo en Andalucía fueron de 20 veces mayores.

En la Tabla 1 se reproducen datos del Consorcio de Compensación de seguros (correspondiente al decenio 1987-1997), sobre las cuantías pagadas por catástrofes naturales en España.

Como puede verse el riesgo por terremotos puede decirse que es bajo, aunque ello es relativo, ya que en la última década el terremoto de Lorca ha cambiado esta cifra, aunque solo la ha aumentado unas 10 veces. Sin embargo, las indemnizaciones por inundaciones siguen alcanzando en la última década valores similares o incluso superiores (según donde se incluyan los daños por lluvias en Andalucía entre finales de 1996 y 1998).

En estos casos de catástrofes naturales (inundaciones y terremotos) las series históricas existentes permiten evaluar (de mejor a peor manera)

Tabla 1. Indemnizaciones por catástrofes naturales en España, (1987-1997). Fuente : Consorcio de Compensación de Seguros.

Causa	Cuantías pagadas aproximadas (millones de euros)
Inundación	686,00
Terremoto	3,26
Tempestad ciclónica atípica	3,14
Caída de cuerpos siderales y aerolitos	0,04

las intensidades del fenómeno, según diferentes períodos de recurrencia. Entonces basta fijar el período que se decida, con cierta lógica, para diseñar las obras correspondientes. Por ejemplo, en el momento presente se está elaborando una nueva normativa de drenaje superficial por parte de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento. En ella se va a fijar, posiblemente, que el caudal de diseño de cunetas sea el de período de recurrencia de 10 años para cauces secundarios y de 50 años para cauces primarios.

Sin embargo, hay que tener en cuenta, como indican otros autores, que el riesgo es, en realidad, la suma o confluencia de una "amenaza" (probabilidad de un evento con cierta magnitud) y de una "vulnerabilidad" (grado de destrucción, que es una función de la magnitud del evento y del tipo de elemento bajo riesgo), tal como indica Van Westen (2007) [22].

El riesgo, según dicho autor, es un problema espacial multidisciplinario, para cuyo estudio hay que:

- Evaluar la amenaza (según él, a realizar por hidrólogos, sismólogos, etc.).
- Definir los elementos bajo riesgo (realizado por geógrafos, ingenieros civiles, planificadores urbanos, etc.).
- Hacer una estimación de costos (realizado por economistas).
- Estudiar la vulnerabilidad (realizado por ingenieros civiles).
- Evaluar el riesgo (ejecutados por expertos en Sistemas de Información geográfica).

Se determinan así mapas de amenazas, mapas de elementos bajo riesgo, mapas de vulnerabilidad y mapas de riesgos.

Está claro que estas recomendaciones corresponden a temas como los de daños por inundaciones, sismos o por inestabilidad de laderas naturales, pero parecen de difícil aplicación (salvo cierta información general) para analizar el riesgo de cimentaciones concretas de edificios, cimentaciones de puentes, etc.

Muchos de estos conceptos se aplican a los que se viene en llamar "riesgos geológicos" y/o "catástrofes naturales":

- Inundaciones.
- Terremotos.
- Tsunamis.
- Vulcanismo.
- Movimientos de laderas naturales.
- Hinchamiento y colapso de formaciones naturales.
- Efectos del oleaje en ámbitos costeros y portuarios, etc.

A ello se le ha prestado atención especial en nuestro país: desde la creación de una comisión especial sobre la prevención y asistencia en situaciones de catástrofe (1997, con jornadas parlamentarias sobre prevención de riesgos relacionados con el agua, 2002),

hasta diversas jornadas organizadas por el Consorcio de Compensación de Seguros (1999, 2001, etc.). En estos casos el agua y las acciones sísmicas han sido los protagonistas. Existen diversos mapas de tipo hidrogeológico, sísmico Figura 1, etc., hoy implementados sobre el sistema GIS. El ITGE ha elaborado también mapas de riesgo por expansividad de arcillas (en colaboración con el CEDEX), el riesgo por carst, etc.

Sin embargo, por razones de espacio y tiempo se prestará poca atención al tema de las inundaciones (por salirse del campo geotécnico, aunque se tendrá en cuenta la influencia del agua en el terreno y el tema del drenaje se trata en otras clases) y al tema de terremotos.

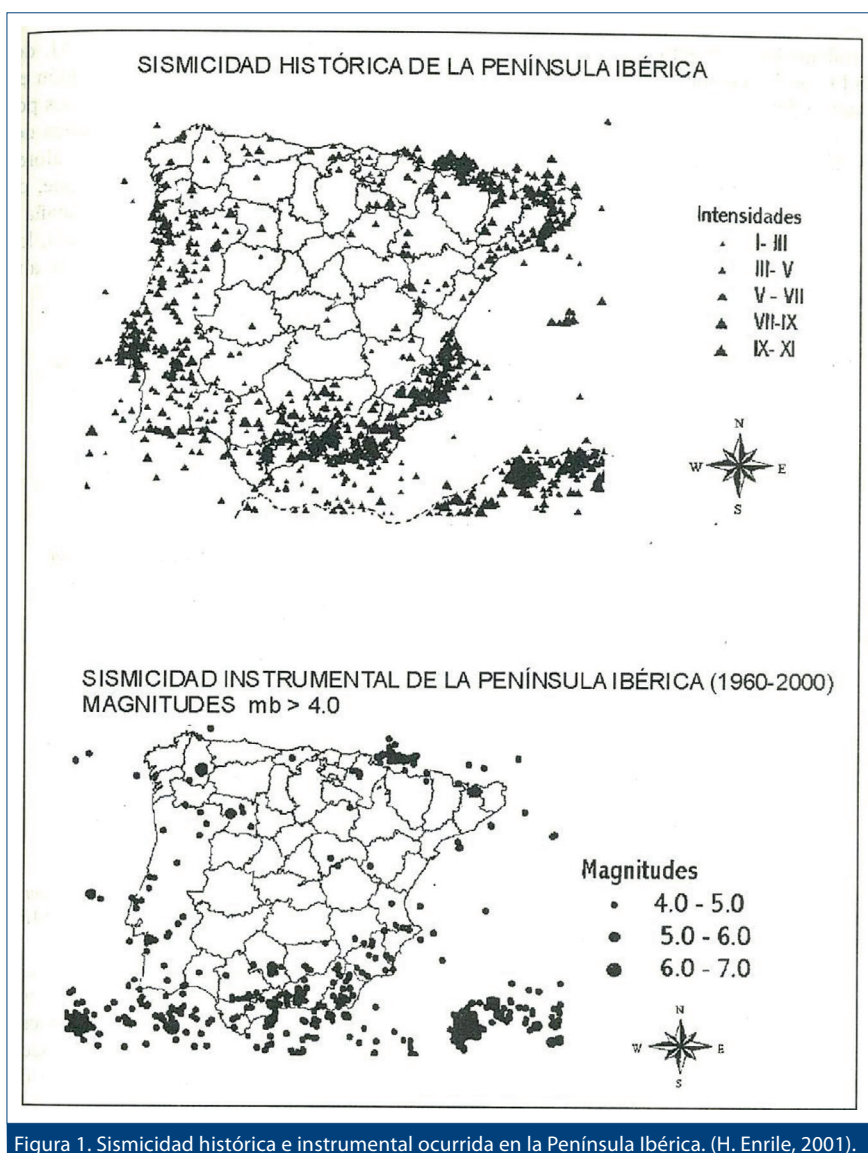


Figura 1. Sismicidad histórica e instrumental ocurrida en la Península Ibérica. (H. Enrile, 2001).

2. Posibles sistemas de análisis

Estos sistemas de análisis han de contar con un número importante de datos, unas leyes que puedan ajustarse a esos datos y con una extrapolación verosímil en el tiempo, que, a pesar de todo, no siempre se cumple. Ya hemos visto, en más de una ocasión, que la avenida de quinientos años viene dos-tres veces en menos de cincuenta.

En el caso geotécnico también podría establecerse, con técnicas estadísticas adecuadas, la probabilidad de fallo de una zapata, por ejemplo. Para ello se necesita:

- Un modelo de fallo de la zapata. Si consideramos que es un suelo puramente coherente, este modelo podría ser la fórmula clásica de Prandtl (suponiendo la zapata corrida):

$$P_h = C_u N_c + q \cdot N_q$$

en que:

P_h = carga de hundimiento de la zapata.

C_u = cohesión sin drenaje.

q = sobrecarga alrededor del terreno.

γ_h = densidad aparente del terreno.

h = profundidad de apoyo de la zapata.

N_c y N_q = factores de capacidad de carga (5,14 y 1,0 respectivamente).

- Ya que en esa fórmula solo influyen los parámetros geotécnicos C_u y γ_h , necesitaríamos determinar la distribución estadística de sus valores (en el espacio y tiempo, aunque, de forma simple, al menos en el espacio). Eso obligaría a tomar una serie importante de muestras (por encima y debajo de la zapata) para determinar esa variación de C_u y γ_h .
- Definida estas distribuciones y suponiendo una determinada dimensión, B , del ancho de la zapata, la carga exterior de fallo, P , a aplicar sería: $P = B \times P_n$, por unidad de longitud de la zapata. Si se desea aplicar una carga dada P_{ext} :

$$(C_u N_c + \gamma_h) B / F \geq P_{ext}$$

F = coeficiente de seguridad

- Fijado un valor mínimo aceptable para F , podría comprobarse cuáles son los valores C_u y γ_h que cumplen y compararlos con su distribución, lo que permitiría hablar de probabilidad de alcanzar un valor de la carga exterior que sea mayor que la dada.
- Si suponemos γ_h fija (su variación es pequeña, generalmente), sólo habría que estudiar el efecto de variación de C_u .

De esta forma puede llegar a deducirse que, si se elige bien el valor de B y P_{ext} , la probabilidad de fallo de una zapata será pequeña. Pero si también se introduce B y P_{ext} como variable

en el tiempo, la probabilidad de fallo puede aumentar.

Supongamos que tenemos una variación de C_u como la definida en la Figura 2. Si se diseña con el valor medio de C_u ($C_{u,med}$) y se considera un coeficiente de seguridad del orden de 3 para F , el resultado normalmente es aceptable. Si se considerase, sin embargo, que en una zona de ese terreno el valor de C_u es C_{u1} , concretamente, el coeficiente de seguridad medio, F_{med} , y puntual, F_1 , serían:

$$F_{med} = 3 = \frac{C_{u,med} \times N_c + \gamma_h}{P_{ext} / B \times 1}$$

$$F_1 = \frac{C_{u1} \times N_c + \gamma_h}{P_{ext} / B \times 1}$$

Si, simplificando, $h=0$, resultaría:

$$\frac{F_{med}}{F_1} = \frac{C_{u,med}}{C_{u1}}$$

para, una carga exterior, P_{ext} dada.

Es decir, el coeficiente de seguridad, según esto, sería lineal con el valor de C_u considerado. Si considerásemos que C_{u1} es el valor que lleva a un coeficiente de seguridad 1 (o sea, al fallo), cualquier valor de $C_u < C_{u1}$ produciría el hundimiento de la zapata. La probabilidad de que esto suceda (Figura 2) puede tomarse como la relación del área entre la curva de distribución y el eje de abscisas hasta C_{u1} y el área total, lo que podría llevar a una probabilidad de rotura para ese valor del orden del 4-5%. ¿Este valor sería admisible? Dependería de cómo esté determinada la distribución de la Figura 2: ¿Está determinada con valores a la misma profundidad? ¿Se puede definir claramente la situación de las muestras con C_u más bajo? ¿Podemos, en esa posible zona blanda aumentar B ?, etc.

En la práctica, lo que es habitual es utilizar valores medios del parámetro resistente eliminando extremos altos (lo que equivale a modificar la distribución de la Figura 2, achatándola y corréndola hacia la izquierda) o, siendo conservador, eligiendo el 70 % de los valores inferiores y viendo lo que pasa con la media y extremos inferiores.

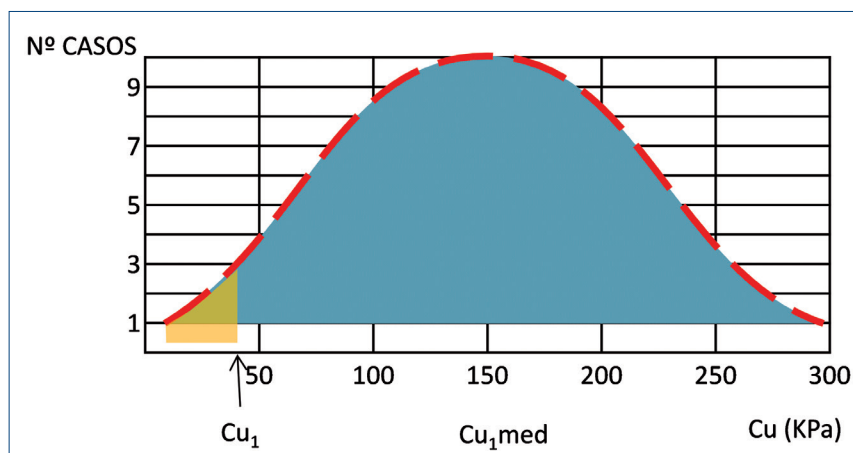


Figura 2. Ejemplo de distribución de la resistencia al corte sin drenaje.

Pero eso no siempre se hace, ni se dispone de series de muchas muestras que permitan hacer juegos estadísticos. Puede elegirse un “valor característico” como hace la Guía de Cimentaciones de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento [14], como se describe más adelante. A veces eliminamos tanto valores altos como bajos porque pensamos que no son representativos: a) Algunas muestran están mal tomadas. b) Las muestras tienen “manejos” en laboratorio que las hacen poco representativas (las pueden comprimir y mejorar o las pueden destruir “la estructura” y debilitar), etc.

En la práctica suele decirse que la probabilidad de fallo de una zapata es del orden de uno a mil e, incluso, uno a diez mil. O sea, más baja de lo que antes hemos obtenido, probablemente porque los valores B se unifican en un edificio y suelen ser, también, conservadores, porque no se tiene en cuenta γ_h (término γ_h) ni la resistencia del terreno por encima de la zapata, etc.

Este valor (un hundimiento de la zapata cada mil a diez mil casos) también resulta deducible en los casos reales, aunque no se disponga de una base concreta de datos, siempre que se introduzcan las distribuciones de P_{ext} , B , γ_h , etc.

También se puede estudiar la probabilidad de rotura de un talud, por desprendimiento de un bloque tetraédrico de roca. Aquí hay que introducir la distribución de presencia de la familia de diaclasas, la del rozamiento entre labios de diaclasa, la de cohesión aparente en esos labios, la del peso del terreno, etc. Esto ya lo hicieron los Profesores Alcibiades Serrano y Enrique Castillo hacia el año 1975. Sin embargo, quizás por su complejidad y problemas con los datos, esta vía de análisis estadístico ha tenido poca continuidad, a nivel internacional.

Sin embargo el problema es que el ingeniero civil está muy acostumbrado a hablar de coeficientes de seguridad (globales o, como es ahora la tendencia, parciales) y no de pro-

babilidad. Incluso los jueces que han de juzgar siniestros entienden mejor el concepto de coeficiente de seguridad que el de probabilidad. Si hay una probabilidad de nula a uno por mil de que una zapata se hunda, ¿por qué no se ha evitado y se ha disminuido a uno a un millón? Esto puede suponer aumentar mucho las dimensiones de una zapata, lo cuál no sería lógico, ni económico.

3. Seguridad y riesgo

Con el tema del coeficiente de seguridad también hay que tener cuidado. Recordamos cómo, hace bastantes años, en ámbito portuario, algunos proyectistas y administradores tomaban coeficientes de seguridad muy bajos (1,1-1,2), “ya que los geotécnicos se habían encargado, antes, de ser conservadores y habrían recomendado cohesiones (c) y rozamientos internos (ϕ) más bajos de los reales”.

No es lo mismo hablar de coeficientes de seguridad durante un pro-

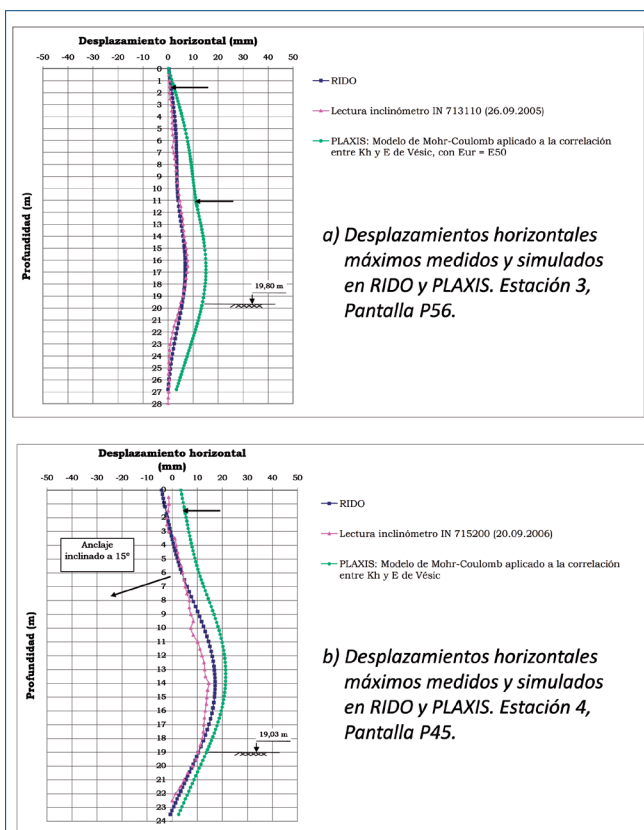


Figura 3. Resultados teóricos comparados con medidas en Metronorte, Madrid (Sanhueza, 2008).

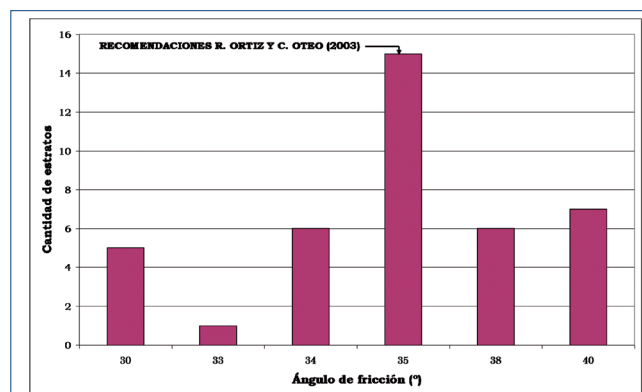


Figura 4. Estudio del valor del ángulo de fricción en la arena de mica (Sanhueza, 2008).

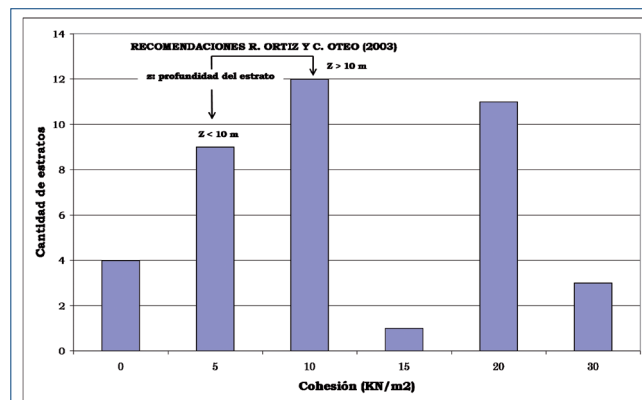


Figura 5. Estudio del valor de la cohesión en la arena de mica.

Tabla 2. Asignación de parámetros geotécnicos para los proyectos del Metro Sur (5-11-1999).

Causa	PESO ESPECÍFICO APARENTE γ (t/m ³)	COHESIÓN c' (t/m ²)	ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO Φ' (°)	MÓDULO DE DEFORMACIÓN (Subsid.) E (t/m ²)	COEFICIENTE DE POISSON ν	COEFICIENTE DE BALASTO K (t/m ³)
Rellenos antrópicos	1,80	0,0	28,0	800-1.000	0,35	2.000
Rellenos seleccionados, compactados	2,10	2,0	34,0	10.000	0,28	8.000
Aluviales	2,00	0,0	32,0	1.000-1.500	0,32	5.000
Depósitos arenosos de rampa	2,00	0,0-0,5	34,0	3.000-6.000	0,30	8.000
Arenas de miga	2,00	0,5-1,0	35,0	5.500-7.500	0,30	12.000-20.000
Arenas tosquitas	2,05	1,0-1,5	33,0	8.000-10.000	0,30	15.000-20.000
Toscos arenosos	2,08	2,0-2,5	32,5	13.000	0,30	25.000-35.000
Toscos	2,10	3,0-4,0	30,0	15.000-18.000	0,30	30.000-40.000
Toscos de alta plasticidad	2,06	4,0-8,0	28,0	20.000	0,28	40.000
Peñuelas verdes y grises	2,00	5,0-6,0	28,0	20.000	0,28	35.000-50.000
Peñuelas verdes o grises con yesos	2,10	5,0-8,0	30,0	25.000	0,27	40.000-55.000
Peñuelas reblandecidas con yesos o redepositadas)	2,00	0,0-1,0	28,0	1.000	0,35	5.000
Arenas micáceas en Mioceno	2,10	0,5-1,0	34,0	5.000	0,30	10.000
Sepiolitas	1,60	2,0	28,0	30.000-50.000	0,28	20.000
Caliches, niveles litificados	2,20	15,0	32,0	60.000	0,25	80.000-100.000
Yesos	2,30	7,0-10,0	28,0	40.000	0,26	60.000

NOTAS.- Cuando aparecen dos valores, el superior es para niveles profundos (> 10 m) o más consolidados o cementados. Estos valores deben considerarse orientativos, pudiendo ser modificados si lo justifican los resultados de ensayo obtenidos en cada caso.

yecto (1,5-1,6 puede ser suficiente para tener en cuenta el vuelco de un muro o la estabilidad de un talud de excavación) que cuando vamos a reparar algo que ya ha fallado (y que, por lo tanto, ha llegado a $F=1$), en este último caso pueden aceptarse valores más bajos, del orden de 1,25 pero que se calculan después de un retroanálisis y que, por lo tanto, parten de valores de la resistencia intrínseca (c y ϕ) determinados en unas condiciones de verosimilitud y no a partir de recomendaciones, cuadros, fórmulas indirectas, ensayos con muestras poco representativas, etc.

Por eso es muy común que en el ámbito geotécnico el técnico se haya encaminado más hacia temas deterministas y menos estadísticos, quizás por falta de datos acumulados y por los problemas de definición de probabilidad admisible. Nuestro problema no está tanto en las acciones (aunque sí hay que tenerlas en cuenta) como en la respuesta del terreno. Es muy difícil establecer parámetros a partir de pocos datos y puede ser muy difícil cuando se dispone de un gran número

de ellos (si son poco homogéneos). Y cuando se dispone de estos, hay que analizar su procedencia (empresa que ha tomado las muestras, organización que ha realizado los ensayos, etc.), la calidad del muestreo (tomamuestras de pared delgada, testigo parafinado, tomamuestras de tubo triple, etc.), situación de la muestra (zona más descargada o decomprimida por la erosión, con menor afección por su profundidad, etc.), homogeneidad de las muestras ensayadas (que las tres muestras usadas, por ejemplo, en un triaxial tengan humedades y densidades similares), etc.

Hace más de veinticinco años se hizo un esfuerzo en el entorno madrileño para analizar un gran número de datos de sondeos y ensayos (GEOMADRID), pero las dificultades de análisis fueron tales que los resultados no pudieron utilizarse apenas. Sin embargo, hace unos quince años, a raíz de la ampliación del Metro de Madrid, junto con el Profesor Rodríguez Ortiz, establecimos unos valores tipo (análisis determinista) para la cohesión, el rozamiento interno, el peso específico

aparente y la deformabilidad horizontal de los diversos terrenos de Madrid, para ser usados en el diseño de pantallas continuas, con unos determinados programas de cálculo (Tabla 2). La comprobación de los desplazamientos de un gran número de pantallas instrumentadas ha permitido comprobar que los valores recomendados son razonablemente representativos, incluso estadísticamente, como ha mostrado la tesis doctoral de la Ingeniera Civil Carola Sanhueza, dirigida por el autor de este artículo (Figura 3 a la Figura 6). Para su elaboración se ha partido de:

- Experiencias locales de ingenieros.
- Experiencias personales de los autores de las recomendaciones y la confianza que la Administración depositó en ellos.
- La posibilidad de ir comprobando el resultado con la instrumentación de las obras.

De esa manera no parecía que se iba a correr un "riesgo inadmisible".

Ello ha permitido diseñar casi 8 millones de metros cuadrados de pantalla en Madrid, con un "riesgo" aceptable (ninguna ha fallado) y con

unos movimientos similares a los de diseño (Figura 3 a la Figura 7). Y también ha permitido, cuando corresponde, ajustar mejor los parámetros de deformabilidad, incluso considerando las zonas de Madrid, lo que permite establecer figuras, como las 4 y 5 para estimar los parámetros de resistencia al corte que cabe esperar para diseñar pantallas continuas en Madrid. En conjunto, la comparación de resultados de campo y calculados han tenido una dispersión del orden del $\pm 20\%$ en desplazamientos máximos (Figura 6 y Figura 7). Gracias a estos valores medidos puede distinguirse el Sur y el Norte de Madrid (Figura 8), al estar más cementada una zona que otra. Pero incluso en una figura como la 7 hay dispersiones de un $\pm 20\%$ (si bien es cierto que, en general, en plan conservador) que es algo que siempre cabe esperar en el ámbito geotécnico, por muy buenas que sean las predicciones (las malas llevan, generalmente a dispersiones del 100-300 %). En los parámetros resistentes, las dispersiones van en "plan" conservador (valores deducidos generalmente mayores que los recomendados, (Figura 9)).

Estas recomendaciones son totalmente deterministas pero, por un lado encierran un cierto carácter de valores característicos (los ensayos de laboratorio que dan magnitudes más bajas vienen a ser del orden de un 10-15 %) y por otro, una constatación de que los resultados obtenidos son suficientemente correctos (medidas en deformaciones). Con esto queremos decir que los coeficientes de seguridad son aceptables (los empujes se calculan con los parámetros C y ϕ de la Tabla 2 sin ser afectados por ningún coeficiente de seguridad). Este se aplica a los esfuerzos deducidos, momentos flectores y cortantes obtenidos al calcular las pantallas.

Puede hablarse de una posible relación entre coeficientes de seguridad clásicos, aplicados a problemas geotécnicos (globales y parciales) y las probabilidades de fallo. En la Tabla 3 puede verse una posible relación, que no ha de tomarse como algo fijo, sino sólo basado en algunos estudios estadísticos o estadísticas de empresas de seguros.

Tabla 3. Posible relación entre Coeficientes de Seguridad y Probabilidad de Fallo.

Problema	Coeficiente de Seguridad habitual (Determinista)	Probabilidad de Fallo
Cimentaciones superficiales	2,70-3,00 (global)	0,001-0,0001
	2,00	0,005-0,001
	1,50	0,010
Cimentaciones profundas	3,00 (global)	0,001-0,0001
	1,50-2,00 fuste 3,50-4,00 punta	0,0001
	2,00 (global)	0,005
Taludes	1,50 largo plazo	0,005 (*)
	1,30 provisional	0,05 (*)
	1,10-1,50 sismo	0,01
	1,20 reparación	0,005
Muros	1,50-1,75 (vuelco y deslizamiento)	0,005 (*)
	1,30 provisional	0,05 (*)

(*) Generalmente, con lluvias.

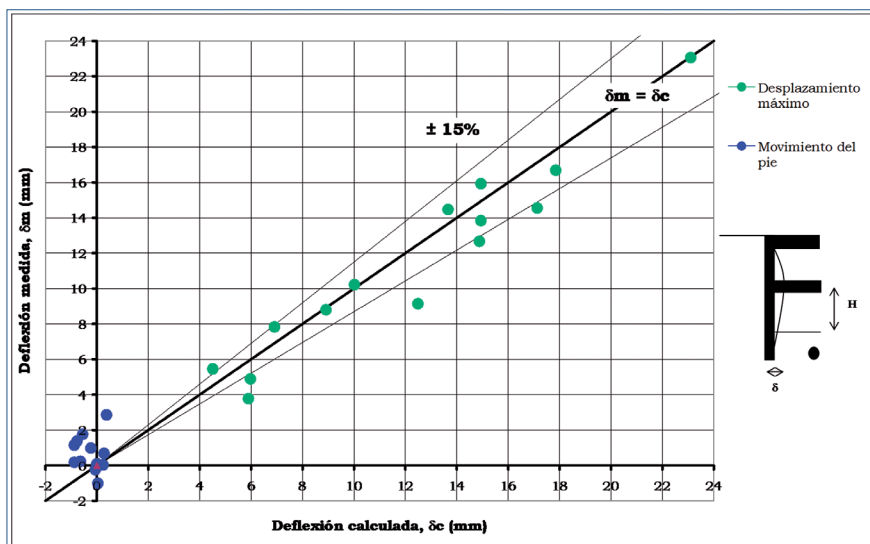


Figura 6. Comparación de resultados medidos en campo y calculados en RIDO para la tercera fase de excavación (vaciado losa contrabóveda) en varias estaciones de Metro Norte (Sanhuesa, 2008).

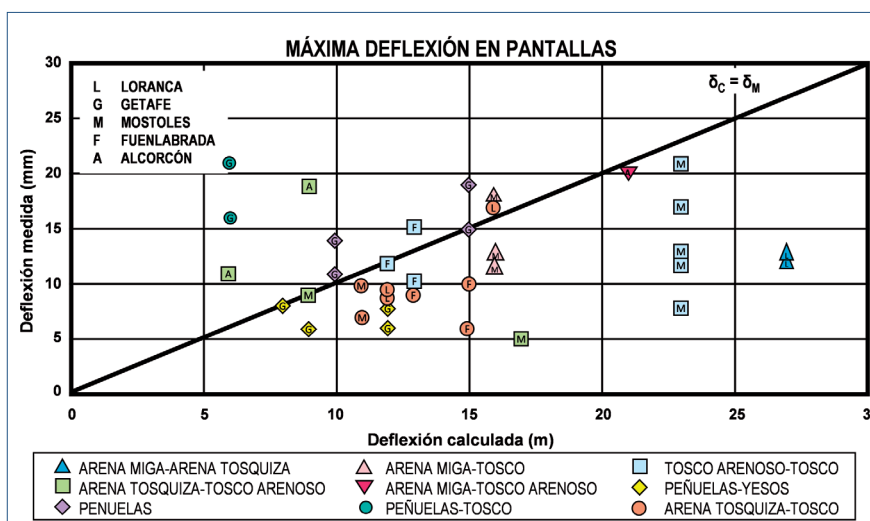


Figura 7. Comparación entre las flechas máximas medidas y calculadas en varias obras de Metro-sur (Oteo y otros, 2003).

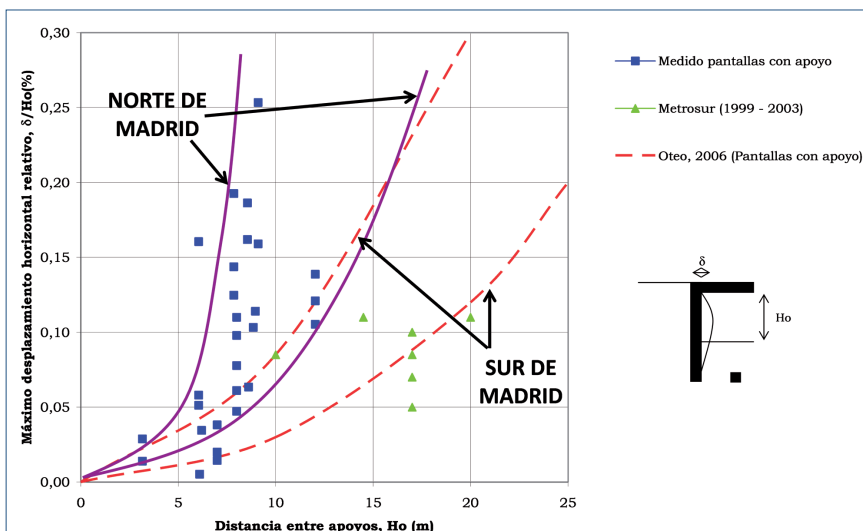


Figura 8. Distribución del desplazamiento horizontal máximo relativo en función de la distancia entre apoyos (Sanhueza, 2008).

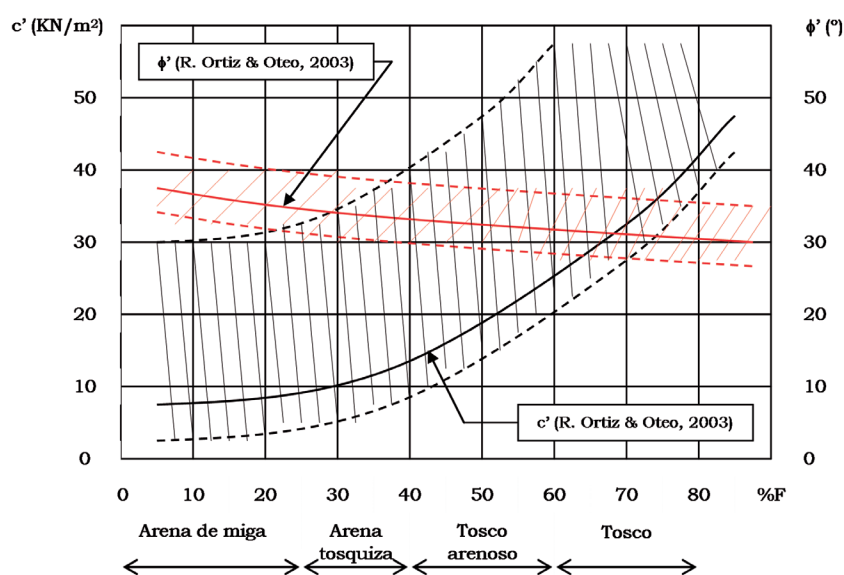


Figura 9. Rango de variación de c' y ϕ' empleado en las modelaciones.

4. Ejemplo de cuantificación estadística de riesgo geotécnico

4.1. Metodología

Hace veinticinco años el ITGE y el CEDEX se unieron para hacer un mapa de presión de riesgos por expansividad de arcillas en España, a escala 1:1.000.000. En él se aplicó una metodología que se basa en los siguientes conceptos.

La capacidad expansiva de los suelos está condicionada por numerosas variables. En último término depende de características intrínsecas de los mismos, de las condiciones en que se encuentran y, más especialmente, de las modificaciones que se introduzcan a su estado natural, lo que determina que esa capacidad pueda o no desarrollarse. Cualquier intento de valoración de la expansividad de un suelo debe, pues, recoger esas alternativas.

La Figura 10 resume los criterios seguidos para llevar a cabo la clasificación de suelos expansivos de España (Ayala y otros, 1987), que comprende dos líneas concurrentes de actuación:

- Definición de unidades cronolito-lógicas y vinculación al clima.
- Revisión sectorial de ensayos de expansividad, contrastados con eventuales problemas derivados de la misma, y adscripción a las diferentes unidades cronolíticas.

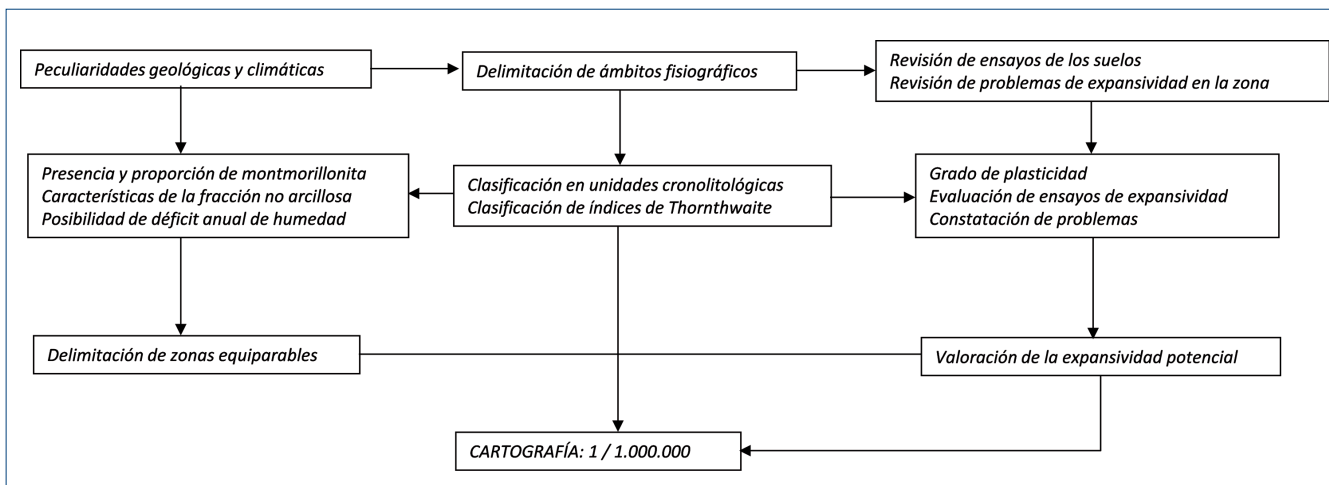


Figura 10. Metodología para la clasificación de arcillas expansivas en España.

La primera línea de actuación tiende a asegurar una clasificación de suelos donde coexistan unas características mineralógicas, texturales y estructurales equiparables (facies e historia geológica equivalentes). Esto conlleva una capacidad expansiva específica de la formación sedimentaria, que, a nivel global, permite ser relacionada con otras similares. Esa capacidad expansiva específica se matizaría después de acuerdo con el índice climático de la zona en que se localizaba.

Al mismo tiempo, se llevó a cabo la adscripción de los resultados de ensayos de expansividad, completados eventualmente con otros de plasticidad para disponer de un mayor número de datos, permitió valorar las alternativas expansivas inherentes a cada formación sedimentaria y, consecuentemente, evaluarlas. En el caso de existir referencias a problemas constructivos concretados a un tipo de suelo, la formación se definió obviamente como el máximo riesgo de expansividad.

Estos criterios han facilitado la posterior integración de todos los datos disponibles, tanto de naturaleza geológica del suelo como de su expansividad, evitando en lo posible los errores de correlación a formaciones litológicas de las que no se disponía de datos geotécnicos.

Finalmente, hay que señalar que, como base de partida y para facilitar una mejor integración de datos, se juzgó útil referirlos a ámbitos territoriales con unas características relacionables. Para ello se clasificó el territorio en estudio en zonas de actuación que compartieran unas ciertas generalidades geológicas, morfológicas y climáticas (peculiaridades en parte coincidentes con cuencas hidrográficas).

4.2. Clasificación de arcillas por riesgo de expansividad.

En la Figura 11 aparece, reducido, el Mapa Previsor de Riesgos de Expansividad en España, que, a escala 1:1.000.000, ha sido realizado por el ITGE y el CEDEX y publicado por el primero de estos organismos (1987).

Tabla 4. Distribución porcentual de los suelos expansivos en España.

ÁMBITOS TERRITORIALES	RIESGO DE EXPANSIVIDAD DEL SUSTRATO ARCILLOSO (% DEL TOTAL)			
	NULO A BAJO	BAJO A MODERADO	MODERADO A ALTO	ALTO A MUY ALTO
CORNISA CANTÁBRICA	15,1	84,9	0,0	0,0
CUENCA DEL EBRO	8,4	61,9	29,7	0,0
FRANJA EXTREMEÑA	1,0	62,6	36,4	0,0
MESETA NORTE	6,5	73,9	19,6	0,0
MESETA SUR	12,3	66,5	15,7	5,5
FRANJA LEVANTINA	5,5	80,0	10,9	3,6
FRANJA ANDALUZA	5,1	39,3	24,5	31,1
TOTAL DEL TERRITORIO	7,4	64,2	21,3	7,1

A pesar de los años que han pasado, consideramos válido este trabajo y cada vez que hemos estudiado algún problema de expansividad de arcillas, los resultados del estudio han coincidido con lo indicado en el mapa.

La Tabla 4 muestra la distribución porcentual de los suelos expansivos en España.

Los grados de expansividad establecidos en el mapa son los siguientes:

- I. Potencialidad expansiva del suelo nula a baja.
- II. Potencialidad expansiva del suelo baja a moderada.
- III. Potencialidad expansiva del suelo moderada a alta.
- IV. Potencialidad expansiva del suelo alta a muy alta.

La estimación del grado de expansividad de los suelos de una misma procedencia se realizó, básicamente, de acuerdo con la máxima capacidad expansiva encontrada, la frecuencia con que se ha manifestado y sus alternativas.

Por otra parte, como esa capacidad expansiva está relacionada con las características del suelo (definidas por su composición, textura y estructura), el grado de expansividad puede ser globalizado para formaciones arcillosas de características similares.

Complementariamente, la evaluación del riesgo de expansividad debería tener en cuenta las alternativas climáticas, puesto que si la unidad cronolitológica se encuentra emplazada

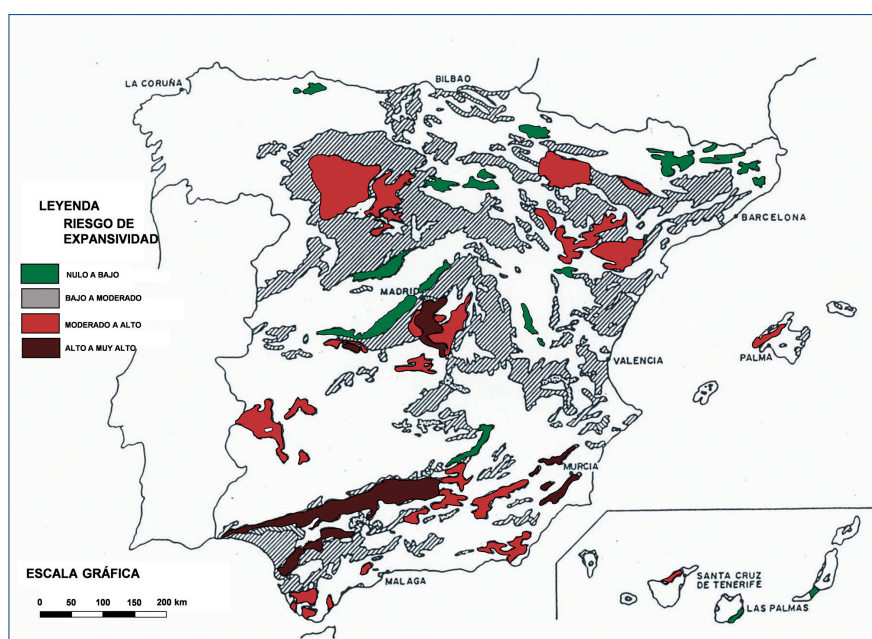


Figura 11. Versión simplificada del Mapa de Prevención de Riesgos por Expansividad en España.

en una zona climática deficitaria en humedad, su potencial expansivo podrá desarrollarse más fácilmente que si ese déficit no se produce. Estas alternativas se han clasificado mediante el índice de Thornthwaite, que establece si una zona es climatológicamente deficitaria en humedad.

La conjunción de todos estos criterios condujo a la siguiente clasificación de la capacidad expansiva de los suelos arcillosos, de acuerdo con las cuatro categorías anteriormente establecidas:

- I. Arcillas no expansivas o diseminadas en matriz no arcillosa.
- II. Arcillas expansivas subordinadas o emplazadas en zonas climáticas sin déficit anual de humedad.
- III. Arcillas expansivas localmente predominantes y emplazadas en zonas climáticas con déficit anual de humedad.
- IV. Arcillas expansivas zonalmente predominantes o emplazadas en puntos con problemas derivados de la expansividad.

Estas son las cuatro categorías de riesgo que se indican en la Tabla 4. Un resultado adicional de este trabajo, condujo a uno de sus autores a elaborar un nuevo criterio de expansividad (Oteo, 1986).

4.3. Comentarios sobre el trabajo estadístico.

El utilizar valores medios puede entrañar serios inconvenientes. Las clasificaciones de casi todos los autores suponen que el grado de peligrosidad se refiere a un intervalo de los valores del límite líquido o de cualquier otro parámetro. Pero en la realidad, las variaciones locales (alterabilidad superficial, drenaje, etc.) pueden hacer variar el resultado de aplicar uno de estos criterios.

En la Figura 12 se han representado diversos casos de valores del límite líquido relacionado con el hinchamiento libre, para determinadas franjas del contenido de humedad, distinguiendo su ubicación en la Península Ibérica. Todos estos datos fueron obtenidos

utilizando los archivos de ITGE y del CEDEX, así como los derivados de una encuesta a nivel nacional. En esa figura pueden verse varias cosas:

- En la Cuenca del Ebro (en que las arcillas se mezclan con yeso dihidratado y hemihidratado o anhidrita), se ve que la humedad natural es muy baja (clima semiárido a árido pero en que pueden alcanzarse hinchamientos libres altos (4-6 %) con plasticidad baja.
- En las Franjas Andaluza y Meseta Sur, con humedades más altas (23-33 %), la mayor parte de las veces se tienen hinchamientos libres inferiores al 1 %, incluso con límites líquidos de hasta 80.
- Sin embargo, en estas mismas zonas, con esas humedades y plasticidad. Pueden obtenerse hinchamientos libres del 3 al 8 % (aunque sólo sea en un 20 % de los casos). Precisamente por eso, estos materiales suelen considerarse con riesgo de expansividad alto, habitualmente, aunque sólo existan

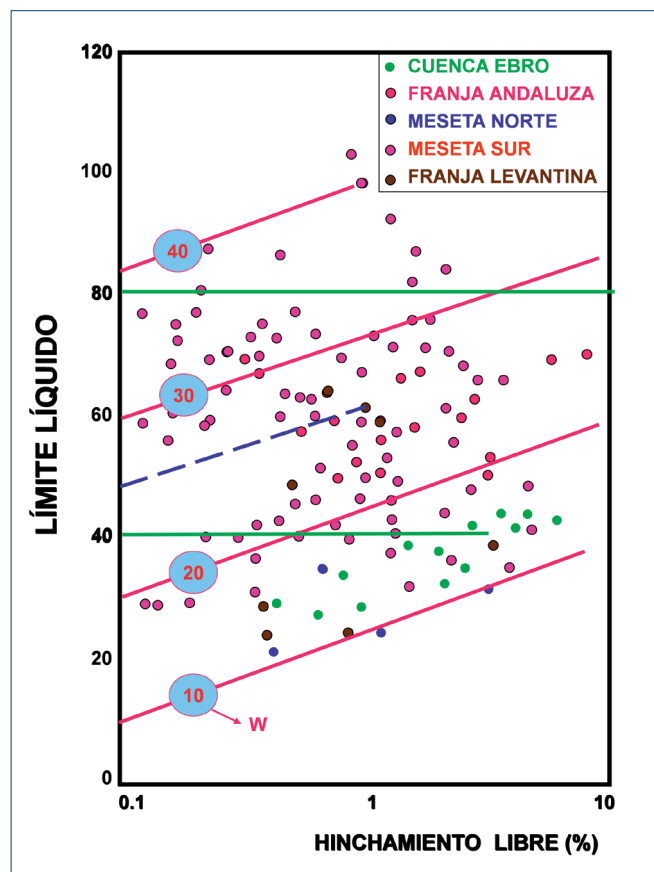


Figura 12. Variación del hinchamiento libre en algunos suelos especiales.

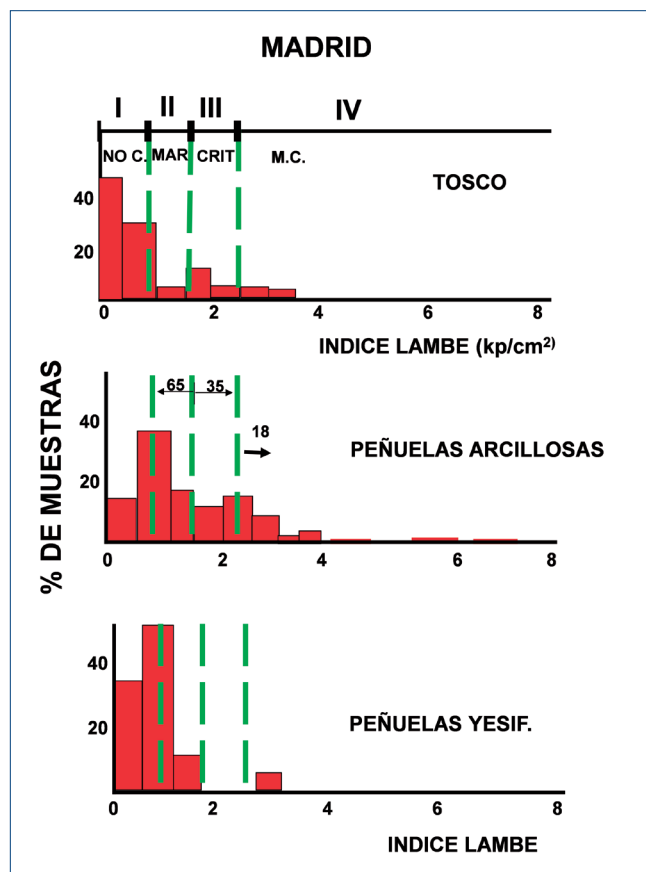


Figura 13. Variación del Índice Lambe en los suelos de Madrid.

datos claros de laboratorio en un porcentaje bajo de ensayos.

- Muchas veces esto puede explicarse por el hecho de que las muestras que se ensayan no son muy profundas y que la "alteración" y "degeneración" de las arcillas miocenas llegando sólo a los 3-4 m de profundidad, sino hasta los 8-9 m, con lo que esas zonas ya han sido saturadas y han expandido hace siglos, con lo que han sufrido expansiones y retracciones en múltiples ocasiones, alterándose su estructura.

En la Figura 13 se ha representado la distribución de los valores del índice Lambe en una serie de muestras ensayadas de los suelos de Madrid, indicándose en ella los intervalos de peligrosidad que, habitualmente, se usan con los resultados de los ensayos Lambe (no crítico, marginal, crítico y muy crítico). En esa Figura 13 puede verse que en el "tosco" (arcilla rígida, generalmente no expansiva) prácticamente todos los valores están en la zona de "no crítico". En las "peñuelas arcillosas" (consideradas por los técnicos como con riesgo alto de expansividad) el 65 % de las muestras están en "marginal" y "no crítico", con lo cual parecería que el riesgo sólo es ocasional. Sin embargo, la experiencia muestra que hay que tener cuidado con esa formación. También este ensayo da poco riesgo en las "peñuelas" yesíferas y, sin embargo, hemos tenido problemas en esta formación.

Es decir, según los resultados de la Figura 13, en las "peñuelas arcillosas" sería necesario hacer un importante número de ensayos en cada caso para tener la idea de que puede haber expansividad. Parecido resultado se obtiene si se emplean datos de hinchamiento libre, aunque el número de muestras utilizada es inferior que en el caso del ensayo de Lambe (unos 120).

Es decir, los valores medios son criticables y hay que pasar (como se hizo) a que si el 35-40 % de los valores son "peligrosos", la formación lo es y se le considera un riesgo "alto" o "muy alto", lo que es criticable.

5. El riesgo en sí

Como indica Romana (2010):

- Algún nivel de riesgo es aceptable (normalmente, el riesgo remanente cuando se cumplen por completo todas las reglas).
- Hay que insistir más en las personas que en las cosas (máquinas, materiales).
- Las personas que intervienen en los proyectos y obras necesitan formación y experiencia.
- Habrá una cultura de la seguridad, con un nivel alto de seguridad.
- El riesgo es responsabilidad conjunta de todos: empleados, empleadores, sociedad.
- ¿Somos capaces de imaginar todos los fallos posibles y de eliminar todas sus causas?
- ¿Aprendemos de los incidentes o sólo de los desastres?
- El futuro ¿quizá basado en resultados?

Tener en cuenta todos estos aspectos va más allá del nuevo concepto de coeficiente de seguridad, pasando a otro en que se cataloguen todos los riesgos (humanos, económicos y de plazo).

Existen ya catálogos de riesgos o de "amenazas" en algunos campos concretos de la técnica, que han sido elaborados por dos grandes motivos:

- El haberse producido accidentes importantes, con pérdidas humanas, (el fuego en túneles, por ejemplo).
- Haber tenido estos accidentes importantes repercusiones económicas.

Por eso, las compañías aseguradoras están, a veces, interviniendo en estos temas, como es el caso de riesgos en túneles, lo que les ha llevado a preparar un "Código de práctica profesional, para la gestión de riesgos de obras de túneles", elaborado por el Grupo Internacional de Seguros en Túneles (ITIG, 2006), en el que han participado las empresas de seguros más importantes.

En dicho documento se indica que debe establecerse una "Gerencia de riesgo", que debe:

- Identificar los perfiles y riesgos asociados.

- Cuantificar riesgos.
- Identificar acciones proactivas planificadas para elaborar o mitigar riesgos.
- Identificar métodos para el control de riesgo.
- Asignar riesgo a las diversas partes del contrato de asesoramiento.

Este Código define "riesgo" como la combinación de la consecuencia de un "peligro" y su probabilidad. Un "peligro" se define como un evento que tiene el potencial de afectar a materias relacionadas con un proyecto y que podría dar lugar a consecuencias asociadas con la seguridad y salud, el diseño y su planificación (así como su coste), el programa de construcción y sus costes asociados, servicios, etc. En el fondo, lo que indica el documento es que debe de establecerse un catálogo de situaciones de "riesgo", ya sea en el diseño, en la construcción o en la obra, a fin de tenerlas en cuenta.

Así, se puede hacer una serie de entregas por el uso de los aseguradores. Por ejemplo, en la fase del contrato de construcción, deberían prepararse los documentos indicados en la Tabla 5.

Lo que no se indica es cómo llevar a cabo, con detalle, estos trabajos. Es decir que pueden elaborarse criterios de riesgo como el de la Figura 14 en que lo que se trata es de estar en la zona de "ALARP RISK" (riesgos tan bajos como realmente sea posible), lo que equivale nuevamente a estudiar las situaciones de riesgo, aunque no totalmente de forma estadística, pero sí de forma racional.

Es decir que el sistema de elaborar un catálogo de riesgos o amenazas parece, en la práctica, razonable y actuar en cada caso como parezca lógico. Para ello habrá que:

- Definir la fase de la construcción: reconocimiento geotécnico, diseño, construcción y mantenimiento.
- Enumerar, en cada fase, un catálogo de posibles riesgos. Por ejemplo, en el caso del reconocimiento geotécnico la posibilidad de que existan fallas importantes no detectadas (túneles interurbanos) o

vaguadas con rellenos antrópicos (túneles urbanos). Con el adecuado espaciado de sondeos, la cartografía geológica de superficie o la cartografía histórica de la ciudad puede acotarse el riesgo de problemas de magnitud máxima. Ello puede obligar a "cerrar" la malla de prospecciones (a 250 m por ejemplo, en túneles urbanos), lo cual puede aumentar el coste de la campaña, pero disminuir el coste de posibles incidentes. ¿Hasta dónde se debe de llegar?

- Evaluar económicamente el coste de las medidas de seguridad geotécnicas (paraguas, inyecciones, pilotajes, etc.) que se pueden ejecutar en función de algunos de los posibles riesgos detectados previamente y comparar ese coste con el de las posibles repercusiones.
- Asumir un cierto nivel de riesgo en cada operación, pero que sea justificable con los estudios y medidas de seguimiento y control adoptados. Ello puede ir acompañado de la instrumentación y observación adecuadas, así como de posibles instrucciones (en el proyecto inicial o en el proyecto de ejecución) para realizar instrucciones en el momento que se superen los márgenes de seguridad que se consideran adecuados. En el caso del hundimiento en el Barrio del Carmelo (Barcelona) hay que denotar que se registraron

movimientos apreciables durante varios meses previos al hundimiento, pero que no había previsiones de magnitudes límites; tipo *ALARP*, ni de previsión, al parecer, de actuaciones, con los correspondientes costes económicos, cuando esas magnitudes se aproximaban a los niveles de alarma.

Vemos, pues, que el camino es múltiple:

- En aquellos fenómenos repetitivos (inundaciones, terremotos, accidentes de tráfico), la toma de datos a lo largo de años permite estimar los problemas que en el futuro cabe esperar, a través de extrapolaciones estadísticas.
- En el caso geotécnico más puro (cimentaciones, túneles, etc.) no pueden existir series largas de datos (ni, a veces, cortas).
- Las acciones que actúan sobre cimientos deben definirse (tal como hace la Guía de Cimentaciones o las Recomendaciones para Obras Marítimas) y seguir su incidencia y ocasionalidad. Así se suelen distinguir las acciones permanentes (pesos propios, cargas muertas, empujes del terreno y subpresiones del agua), las variables (que pueden actuar o no y cuya intensidad o ubicación varía a lo largo del tiempo, como acciones climáticas, cargas de uso, aumentos transitorios de empujes por subida

ocasional del nivel freático, etc.) y las accidentales (que tienen escasa probabilidad de ocurrencia, como choques, sismos, avenidas extraordinarias, etc.). Para estimar estas acciones debe acudir a su "valor característico" (principal valor representativo de una acción), que puede ser: a) La mejor estimación del valor medio (cargas permanentes). b) El valor cuya probabilidad anual de su excedido es del 2 % (acciones variables) o del 0,2 % (acciones accidentales). c) Definidas por alguna normativa.

- Además ha de tenerse en cuenta que los parámetros que caractericen el terreno deben tener un valor representativo que sea una estimación prudente del valor medio que corresponde a la zona de interés en el problema que se analiza (Guía de Cimentaciones) y, a ser posible, deben determinarse por varios procedimientos ("in situ" y "laboratorio", por ejemplo). Debe analizarse cada parámetro geotécnico para estimar su variación, entendiéndose como valor X_k a aquel valor tal que solo hay un 5 % de probabilidades que las magnitudes medidas sean menores. Puede hablarse de un valor característico superior ($X_{k\sup} = X_m \cdot \xi$) y otro inferior ($X_{k\inf} = X_m / \xi$), siendo X_m el valor medio. Según las Recomen-

Tabla 5. Documentos a preparar en el contrato de construcción.

ENTREGA	PREPARADO POR	ALCANCE Y PROPÓSITO
Documentación del contrato	Cliente	Para evaluar el nivel de información proporcionado a los licitadores incluyendo la identificación de peligros y de riesgos asociados durante la fase de desarrollo del proyecto.
Las condiciones de referencia del suelo	Cliente o licitadores	Para evaluar el sitio y los peligros del suelo establecidos por las investigaciones.
Declaraciones de métodos	Licitadores	Para evaluar los métodos de la construcción, materiales y maquinaria identificada por los licitadores.
Apreciación de riesgo	Licitadores	Para evaluar las percepciones y disposiciones de los licitadores frente al riesgo.
Registro de riesgo del licitador	Licitadores	Demuestra como la oferta proporciona adecuadamente y apropiadamente riesgos identificativos para asignar al contratista.

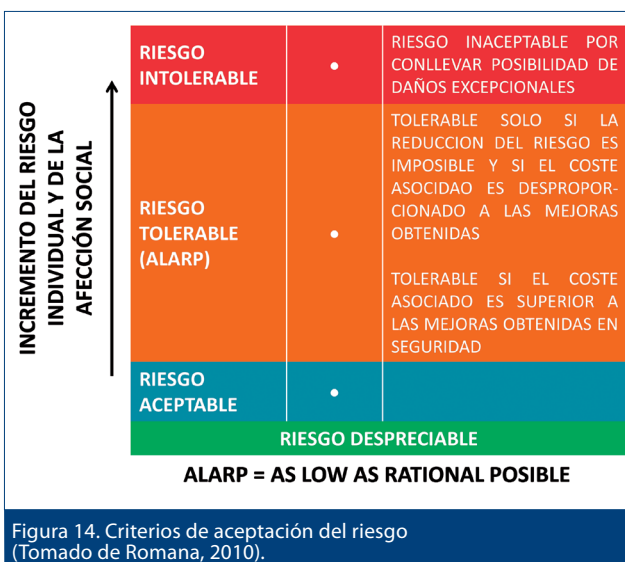


Figura 14. Criterios de aceptación del riesgo (Tomado de Romana, 2010).

daciones para Obras Marítimas, el factor ξ puede variar, según el número de datos de que se dispone y del parámetro geotécnico de que se trate, desde 1,05 (peso específico con muchos datos) a 50 (coeficiente de permeabilidad con pocos datos). El valor del parámetro de diseño X_d (si éstos son de resistencia del terreno) sería igual a: $X_d = X_{kmin} / \gamma_m$, siendo γ_m un coeficiente de minoración que vale 1,25 para la tangente del ángulo de rozamiento, 1,60 para la cohesión efectiva y 1,40 para la resistencia al corte sin drenaje y la compresión simple. Así puede introducirse un cierto carácter estadístico, práctico en la selección de los parámetros geotécnicos.

- Ha de elaborarse un catálogo de “riesgos”, o de situaciones de amenazas, los cuales deben

examinarse con criterios medibles (mediante cálculos matizados con los valores característicos y mínimo) y con criterios subjetivos (posibilidad de zonas blandas, por ejemplo).

- Ese catálogo de amenazas es, a veces, bastante subjetivo, por lo que no siempre es suficientemente representativo y debe incluir las repercusiones.
- Con el criterio de la Figura 14, el riesgo puede ser “aceptable”, “tolerable” e “inadmisible”. Ello depende de las consecuencias de esos riesgos. Si el tomar medidas económicas puede llegar a costar tanto como las consecuencias de un incidente (sin que haya riesgo de víctimas humanas) puede llegar a asumirse el riesgo como “tolerable”.

6. Ejemplo de listado de amenazas y de sistemas de elaboración de mapas de riesgo

A continuación incluimos, a manera de ejercicio académico, cómo se elaboraría el catálogo de “amenazas” en un caso concreto: El diseño y construcción de una infraestructura viaria en trinchera.

En este caso debemos contemplar riesgos en:

- Los taludes de desmontes (inestabilidad, arrastres, etc.).
- En la propia plataforma viaria.

Puede hacerse el catálogo que se incluye en la Tabla 6, el cual, puede, aún detallarse más. Con esas ideas pueden tenerse en cuenta muchos de los problemas geotécnicos que pueden ser predecibles. Estas “amenazas” están pensadas para sucesos en

Tabla 6. Análisis de riesgos en servicio de una obra viaria en trinchera.

Nº	Riesgo	Consecuencia	Probabilidad	Acciones preventivas
1	Taludes inestables (en masa) (Figura 15)	Corte tráfico	Media	Investigar mediante geología superficial y sondeos. Diseño adecuado (Figura 15). Dejar cuneta y bermas amplias (Figura 16) y otros refuerzos (Figura 17).
2	Caída de bloques de roca de los taludes (Figura 18)	Corte tráfico Daño personas	Baja	Investigar mediante geología superficial y estaciones geomecánicas. Cunetones amplios. Barreras dinámicas en el talud. Barrera rígida al pie. Mallas ancladas al talud. Bulonados y gunitados. Muros de gaviones o escolleras.
3	Erosión en los taludes	Corte tráfico Atasco carreteras	Baja-Media	Cunetas amplias. “Mantas y mallas protectoras”. Muros de gaviones.
4	Reblandecimiento de la plataforma por acumulación de agua (sobre todo en arcillas)	Irregularidades en el firme	Baja-Media	Zanjas drenantes al pie de taludes y/o cerca de arcones. Impermeabilización mediana (incluso con dren) (Figura 19).
5	Hinchamiento en plataforma (arcillas expansivas y anhidrita)	Daños en el firme (circulación incómoda)	Baja-Media	Reconocimiento geotécnico adecuado. Zanjas drenantes junto a arcones e impermeabilización, mediante: tratamiento con cal de 0,75 m del fondo de excavación (Figura 20).
6	Asientos en plataforma por fondo de desmonte en roca muy alterada	Daños en el firme (circulación incómoda)	Media-Alta	Sustitución del terreno natural por terraplén o pedraplén compactado. Zanjas drenantes. Posible adición de cal.
7	Presencia de cavidades bajo plataforma (carst yesífero) (Figuras 21 y 22)	Daños en el firme y hundimiento brusco	Media-Alta	Investigación geotécnica con detalle. Tomografía eléctrica. Refuerzo del firme con geotextiles o capa de hormigón con mallazo.
8	Presencia de cavidades bajo plataforma (carst calizo) (Figura 21)	Daños en el firme y hundimiento brusco	Media-Alta	Investigación geotécnica con detalle. Tomografía sísmica y eléctrica. Sobreexcavación. Refuerzo del firme con capa de hormigón con mallazo. Perforaciones sistemáticas para relleno de huecos.
9	Acción de lluvias directas excepcionales	Reblandecimiento terreno e inestabilidad de taludes (corte tráfico)	Baja-Media	Estudio pluviometría. Drenaje. Reexcavación. (Figuras 15, 16 y 17).

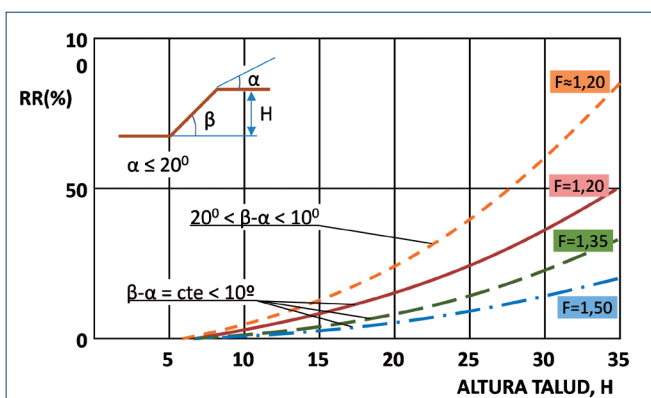
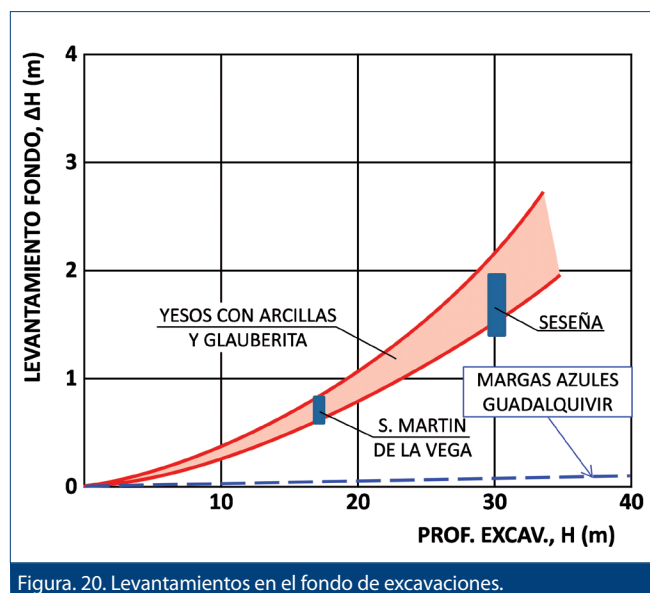
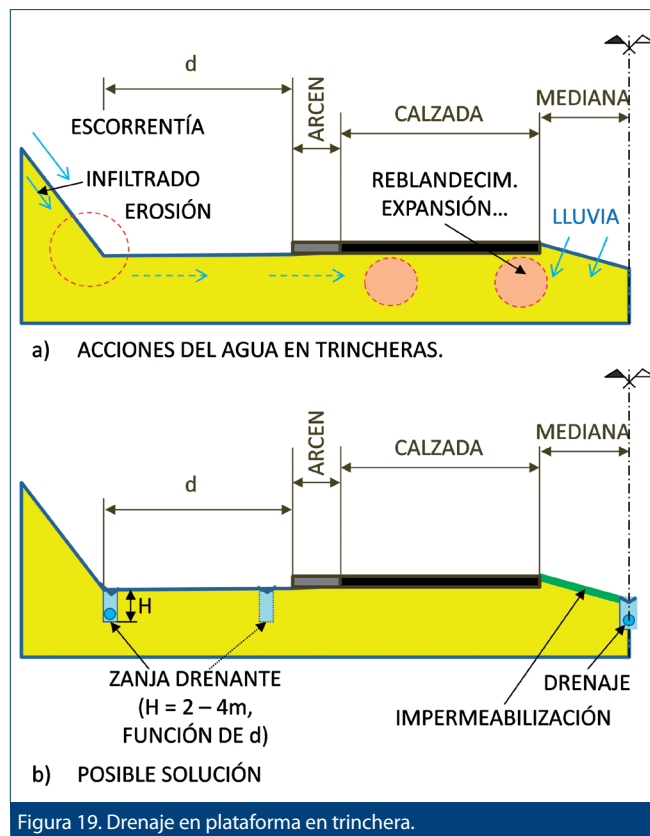
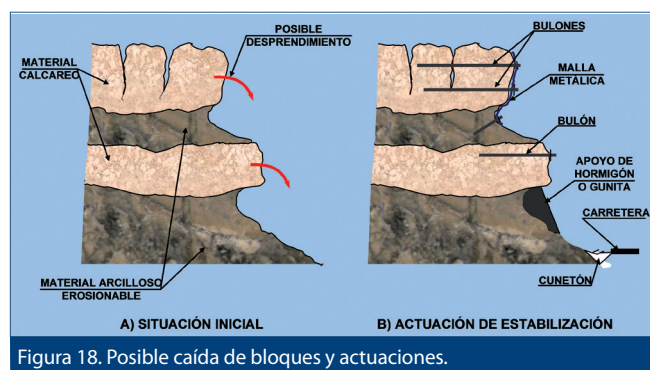
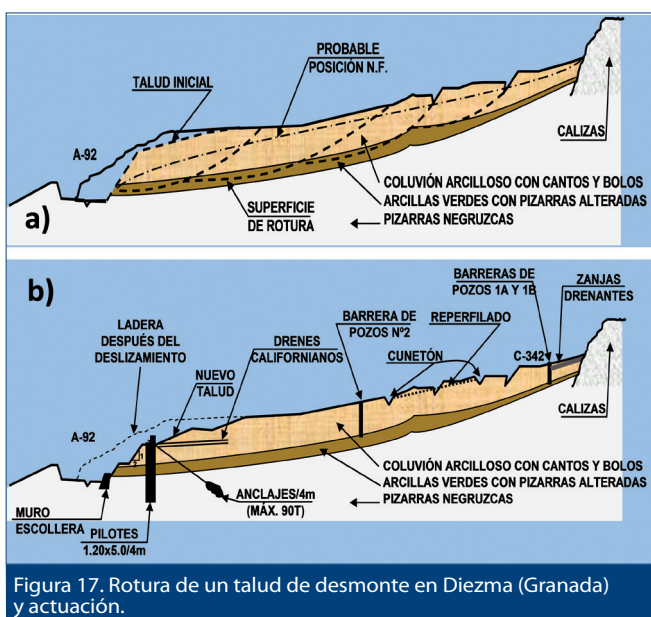
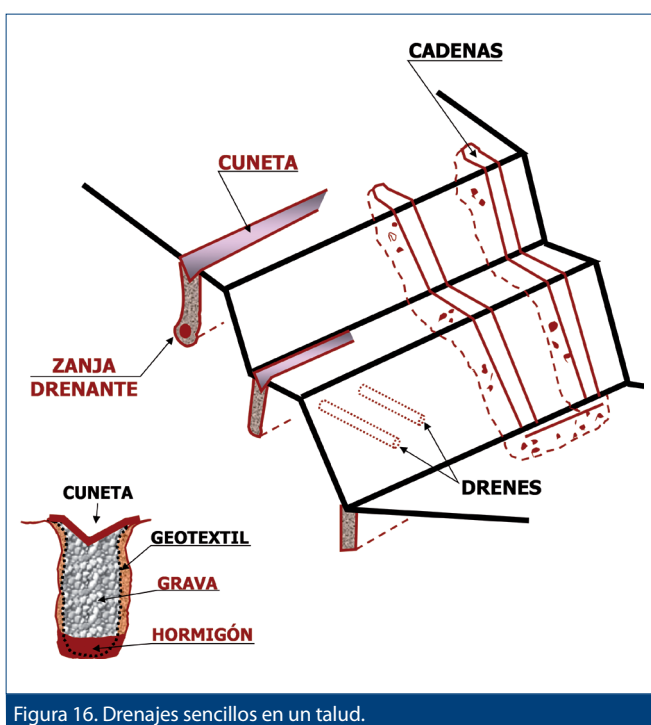


Figura 15. Posible variación del riesgo en taludes de desmonte en función del coeficiente de seguridad y la inclinación del talud y de la ladera natural.



servicio de la obra, a cubrir por la organización que lleve su mantenimiento.

Ahora bien, si se quiere analizar el tema de inestabilidad de un desmonte, puede profundizarse extraordinariamente. Cabe distinguir como posibles factores:

- Tipo de roca o depósitos superficiales (materiales).
- Pendientes del talud.
- Rugosidad y curvatura del talud.
- Espesor de roca alterada.
- Rasgos estructurales (diaclasas, fallas, etc.).
- Vegetación.
- Factores climáticos:
 - Intensidad de lluvia absoluta y relativa.
 - Horas de exposición al sol (orientación).

- Cambios técnicos a lo largo del año.

- Cambios de humedad a lo largo del año.

- Cambios del uso del suelo.
- Actividades de los movimientos de la ladera.
- Proximidad a fondos de barrancos y embalses.
- Área de la cuenca hidrológica en que se inscribe el talud, así como su longitud.
- Pendiente media de la cuenca hidrológica, etc.

Analizando estos factores (lo que suele hacerse con un soporte tipo SIG, para asignar en cada cuadrícula los valores absolutos o relativos de los mismos), pueden establecerse índices de riesgo o de peligrosi-

dad (Hervas y Barredo, 2001). Este último, I_p , puede definirse con la expresión:

$$I_p = \sum_{j=1}^n W_j X_{ij}$$

en que W_j es el peso que se le asigna al factor j y X_{ij} es el peso de la clase i del factor j , es decir cruzando de dos en dos los factores. Esto suele realizarse con una "matriz de riesgos". Por ejemplo si se trata de un problema de riesgo de inestabilidad de taludes, podría considerarse (de forma simplificada) cinco factores:

- Pendiente (A).
- Materiales (B).
- Horas de insolación (C).
- Vegetación (D).
- Pluviometría (E).

Y entonces puede hacerse una matriz de influencia de dos en dos de estos factores (Tabla 7):

Tabla 7. Ejemplo de una matriz de riesgos.

	A	B	C	D	E
A	1,0				
B	1,5	1,0			
C	1,2	1,2	1,0		
D	1,1	1,4	1,5	1,0	
E	2,0	1,2	1,3	2,0	1,0

Evidentemente en las casillas se introduce el peso que se considera conveniente, por lo que, nuevamente nos encontramos con criterios subjetivos, a los que después se pueden aplicar sistemas matemáticos. En este sentido cabe señalar que se pueden utilizar procedimientos distintos como el estadístico multivariante y como el de las jerarquías analíticas, que da mayor preponderancia al peso establecido en los criterios sobre valores asignados a las alternativas en el proceso de toma de decisiones (Hervas y Barredo, 2011). Pero siempre hay una estimación subjetiva de la adjudicación de pesos o de influencias, lo cual puede variar las escalas de peligrosidad obtenidas. Como estos trabajos suelen hacerse sobre zonas en que ya se han puesto de

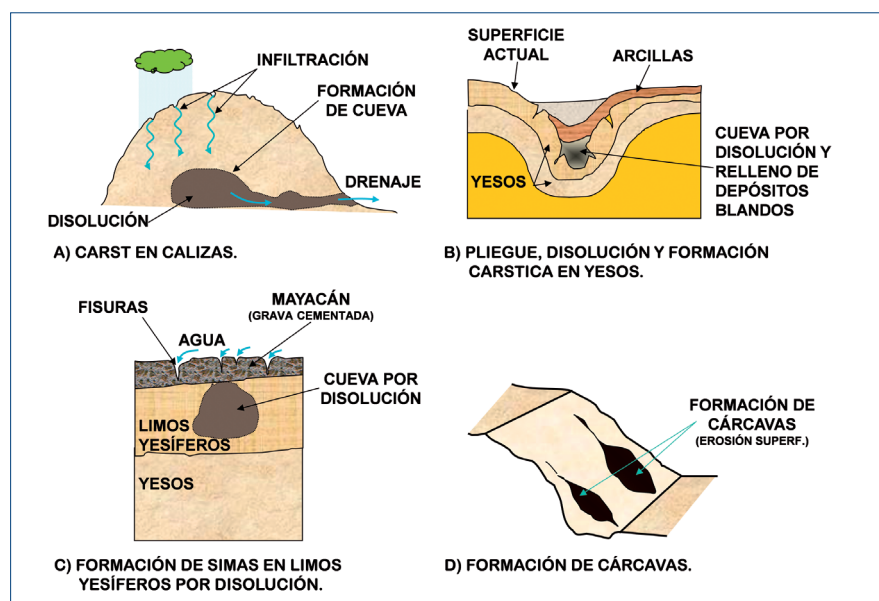


Figura 21. Formación de simas en zonas cársticas.



Figura 22. Simas en yesos cercanas a Zaragoza, después de ser limpiadas y antes de rellenarlas con mortero.

manifiesto los problemas (los riesgos ya no son una incertidumbre), a veces resultan mapas de peligrosidad que están muy guiados por la realidad. El problema es su aplicación a otras zonas, más pobres de datos de peligro.

En este tipo de mapas destacan los trabajos de la Universidad de Granada (dirigidos por el Prof. Chacón), los de la Universidad Politécnica de Catalunya (Prof. Corominas y su equipo), los de la Universidad de Las Palmas (Prof. Lomowchitz), de la Universidad de Salamanca (Prof. Blanco) los del ITGE (F. Ayala y la Profesora Ferrer), etc.

También se puede aplicar el sistema propuesto por Romana García (2010) para analizar el riesgo de caída de bloques rocosos, a fin de disponer medidas de protección de taludes. Se define el riesgo de desperfectos del talud, R, como la suma de cuatro factores:

- Agresividad del clima (F).
- La geometría del talud (altura, pendiente, bermas) (G).
- El tamaño del bloque que puede caer (H).
- La existencia de materiales con diferente resistencia a la erosión (heterogeneidad) (I).

Así:

$$R = F + G + H + I$$

La resistencia del talud, R', frente a la erosión o desperfecto del talud depende de:

- La resistencia del material.
- La presencia de cunetones o protecciones de la calzada.
- La presencia de pantallas dinámicas.
- La existencia de bermas superiores.

Con ayuda de la Figura 23, en la que se relaciona la resistencia (o puntos de resistencia, o sea R') con los puntos de riesgo (ó R), se puede establecer en cada zona de estudio (fijándose en la inclinación de diaclasas, estado del talud y los datos de R) el nivel de riesgo.

Evidentemente todas estas consideraciones en estos sistemas de cartografía de riesgos y vulnerabilidades, bajo el disfraz de medios informáticos y matemáticos abundantes (GIS, matrices de riesgo, etc.) llevan a una carga

subjetiva importante: la definición de los pesos de influencia o del riesgo de cada factor. Por eso, muchas veces son aplicables a situaciones ya en marcha, por ejemplo a la deducción del riesgo de caída de bloques en una nueva autopista o inestabilidad de taludes de una obra similar, dirigida a labores de mantenimiento. En otras, se parte de la situación de una zona en que se conocen bastante bien los riesgos (por ejemplo en la bajada de Granada a Madrid, en que ya los problemas estaban mencionados en el primer número de la Revista de Obras Públicas, hacia 1860). Lo difícil es aplicarle estos sistemas a obras nuevas en que existe poca experiencia y, sin embargo, son de gran envergadura (ampliaciones de Metro, ampliaciones portuarias, etc.)

Una aportación interesante de mapas de riesgo de deslizamientos en España la hizo, hace años, el ITGE, con el mapa reproducido en la Figura 24.

En la Figura 25 hemos dibujado el riesgo relativo frente a la inestabilidad de taludes y frente a la de cimentaciones sencillas (Riesgo = nº fallo / nº sucesos (en %)). Como se ve es mucho más probable que falle un talud de carretera que una cimentación. Sin embargo, el daño puede ser mayor en el caso de fallo de cimentaciones (mayor riesgo de daños en vidas humanas, mayor reper-

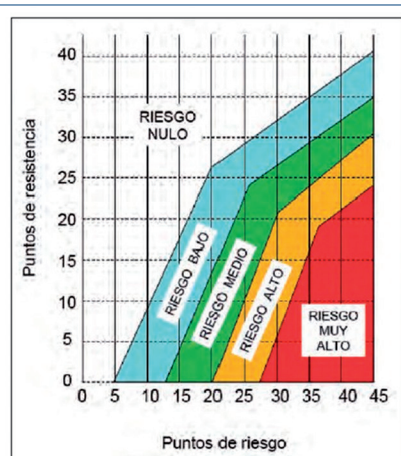


Figura 23. Diagrama de valoración de riesgos (Romana García, 2010).

cusión económica). Todavía nos falta mucho por estudiar y por aprender.

El tener en cuenta las repercusiones de un riesgo es muy importante, es decir, la vulnerabilidad del sistema debe de tenerse en cuenta de forma evidente.

Según el Comité C-12 de la AIPCR (Asociación Mundial de la Carretera), en su documento de 2004 sobre el riesgo de taludes de carretera, distingue:

- **Probabilidad:** posibilidad de que ocurra el suceso o evento en un período definido. O sea que se produzca una amenaza o la pérdida de una oportunidad.
- **Impacto** (equivalente a vulnerabilidad: efecto de un evento sobre uno o más objetivos, cuando realmente sucede. Puede medirse

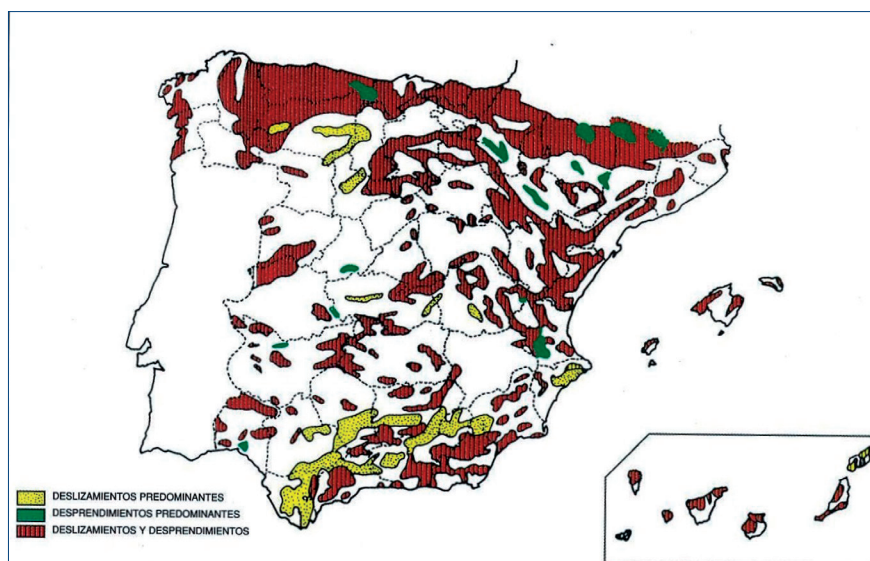


Figura 24. El mapa muestra las zonas de mayor frecuencia de deslizamientos y desprendimientos en España, que corresponden en general a las zonas montañosas y a las grandes depresiones terciarias: 1: Deslizamientos predominantes. 2: Desprendimientos predominantes. 3: Deslizamientos y desprendimientos (Mapa por M. Ferrer).

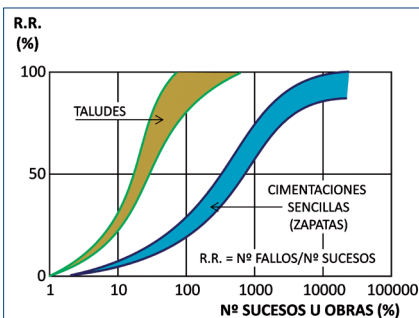


Figura 25. Posible variación de riesgo de rotura en taludes y cimentaciones sencillas.

el número de accidentes, repercusión económica, retraso de una obra en semanas, etc.

- **Riesgo:** ocurrencia potencial de una amenaza, que puede tener un impacto (positivo o negativo) sobre los objetivos del proyecto en cuestión. Este riesgo equivale a: $\text{Riesgo} = \text{Impacto} \times \text{Probabilidad}$. Por consecuencia, un impacto importante con una probabilidad baja dan como resultado un riesgo bajo.

La calificación del impacto puede establecerse, según el citado comité, con la Tabla 8, en las cinco categorías: coste, tiempo, reputación y relaciones comerciales, salud y seguridad e impacto ambiental. En cuanto a la probabilidad aparece en la Tabla 9, también con cinco grados.

Según este comité, en obras de carretera, el valor “de los elementos geotécnicos de su activo” constituye el 30-50 % del valor total.

Recientemente, el Estado de Missouri (U.S.A.) ha desarrollado un sistema de evaluación de caída de bloques rocosos en carreteras ya existentes, utilizando panoramas vídeo de los taludes rocosos de carreteras, desde vehículos móviles, que se envían por GPS a un sistema GIS (Youssef y Maerz, 2012).

Se aprende en cada gran incidente. Por ejemplo, a raíz del reciente

terremoto japonés que levantó oleadas de comentarios (por su afición a una central nuclear), la Sociedad Geotécnica japonesa han elaborado las Figuras 26, 27 y 28, en las que se recomienda la aplicación de diversas tecnologías geotécnicas, para prevenir y reducir geo-desastres. Estas recomendaciones son buenas, pero para llevarlas a cabo antes del próximo terremoto. Si se hubieran propuesto antes, posiblemente se habría hablado de “lo caras que son”, “no parecen del todo necesarios”, “ustedes son muy conservadores”, etc.

Por eso el camino de la definición previa de “amenazas” es muy útil, aunque, por ser muy ingenieril, supone un “riesgo y peligro” para los coautores de los proyectos, las disecciones de obra y los ejecutores de las mismas. Pero... ¡qué le vamos a hacer! Esto ya nos lo avisaron cuando estudiamos y conseguimos el título profesional.

Tabla 8. Impacto sobre taludes de carreteras (C-12 AIPCR).

			Cust	Time	Reputation and business rel.	Health and Safety	Environment
1	Very low	Not significant	Not significant	Effect not significant on the process	Not significant	Not significant	Not significant
2	Low	Important	>1% of budget	Effect on the process >5%	Slight effect on the local vision of the firm/trading relations affected	Minor injuries	Minor impact on environment
3	Medium	Serious	>5% of budget	Effect on the process >10%	Local exposition to the media/trading relations affected	Mayor injuries	Environmental impact necessitating a management
4	High	Black spot for future works and client relations	>10% of budget	Effect on the process >25%	National exposition to the media/trading relations largely affected	Fatalities	Environmental impact leading to complaint or legal proceedings
5	Very high	Problem for the survival and credibility of the firm	>50% of budget	Effect on the process >50%	Permanent national effect on the image of the firm/major impact on trading relations	Many fatalities	Major environmental impacts with irreversible effects and threatening public health and protected natural resources

Tabla 9. Probabilidad de riesgo en taludes de carretera (C-12 AIPCR).

		Likelihood	Probability
1	Very low	Negligible / improbable	<1%
2	Low	Unlikely / remote	>1%
3	Medium	Likely / possible	10>5%
4	High	Probable	>50%
5	Very high	very likely / almost certain	>90%

7. Riesgos geotécnicos en concesiones de infraestructuras

Los riesgos geotécnicos (o geológicos, como muchas veces se denominan, a nuestro juicio no de forma totalmente correcta) existen, como ya hemos visto. Pero el problema es saber quién tiene que asumirlos.

A continuación reproducimos un texto, preparado por nuestro colaborador Carlos Oteo Escobar, sobre el tema:

- **Objeto:** delimitar quién asume el riesgo geotécnico en las distintas fases de una concesión de infraestructuras. En dicha concesión se identifican los siguientes actores: Administración (parte que licita la concesión), concesionario (empresa adjudicataria de la concesión) y contratista (empresa que se encarga de la redacción del proyecto definitivo de construcción y que ejecuta dicha construcción).
- **Resolución:** para una mejor comprensión de quién asume el riesgo geotécnico, se establecen dos opciones:

Opción 1: El PCAP (Pliego de Condiciones Administrativas Particulares) establece de forma expresa que el riesgo geotécnico se transmite al concesionario durante todas las fases de la concesión.

Este es el caso más habitual durante las últimas concesiones licitadas por las Administraciones en España. Debido a la crisis económica (que ha afectado enormemente a los resultados de las empresas constructoras y concesionarias), la Administración establece en los pliegos de licitación que el concesionario adjudicatario asume casi la totalidad de los riesgos asociados a la concesión, especificándose claramente que uno de esos riesgos es el geotécnico.

En este caso, queda muy claro que el riesgo geotécnico es asumido de forma voluntaria por el concesionario durante todas las fases de

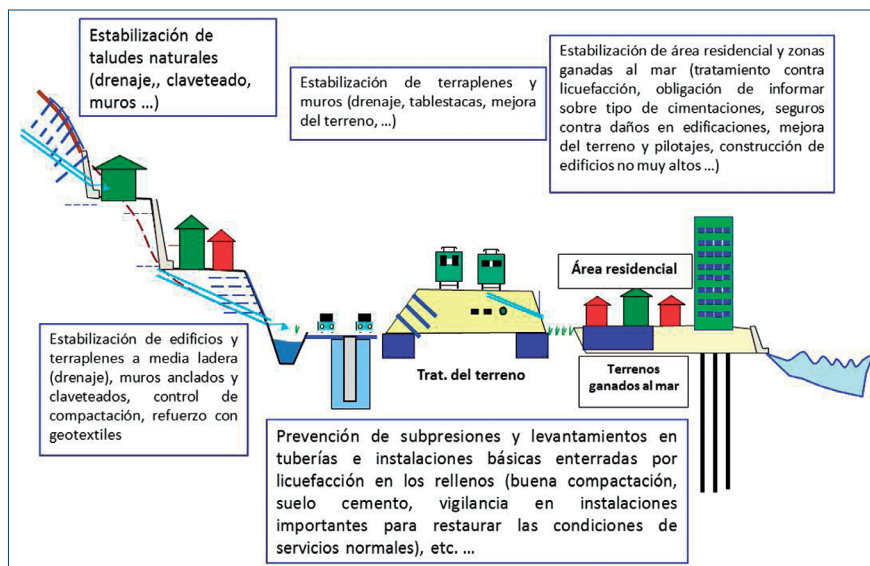


Figura 26. Recomendaciones de la Sociedad Geotécnica Japonesa para reducir geo-desastres (I).

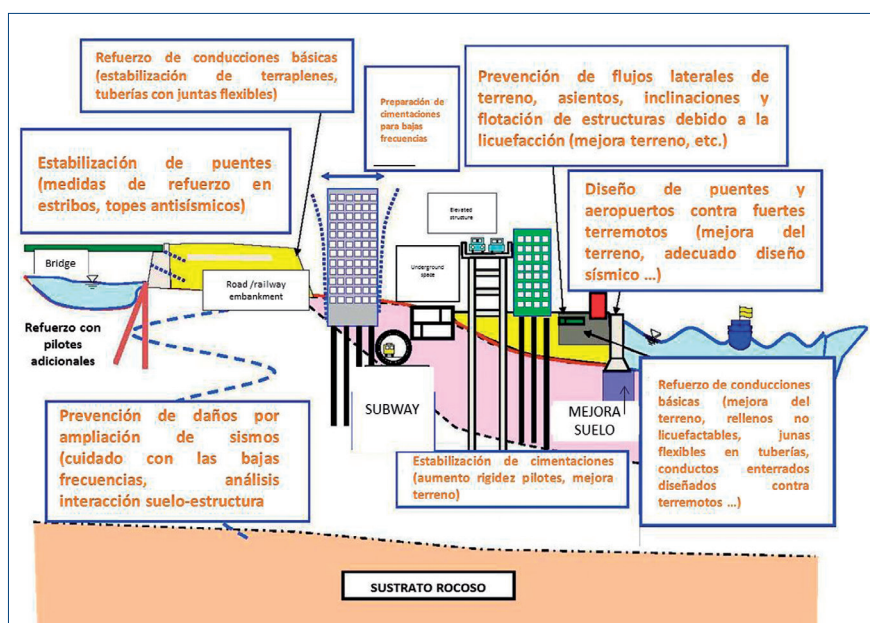


Figura 27. Recomendaciones de la Sociedad Geotécnica Japonesa para reducir geo-desastres (II).

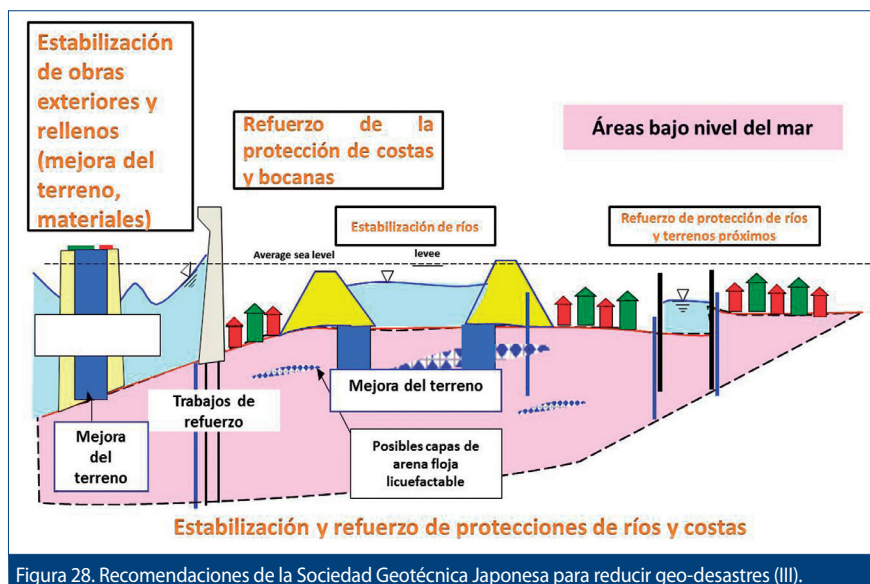


Figura 28. Recomendaciones de la Sociedad Geotécnica Japonesa para reducir geo-desastres (III).

la concesión (construcción, explotación y mantenimiento). Esto se cumplirá en todos los casos excepto los denominados de "fuerza mayor" (artículo 214 de la Ley 30/2007, de 30 de octubre, de Contratos del Sector Público). En dicho artículo se establece que los casos de fuerza mayor serán los siguientes:

- Incendios causados por la electricidad atmosférica.
- Fenómenos naturales de efectos catastróficos, como maremotos, terremotos, erupciones volcánicas, movimientos del terreno, temporales marítimos, inundaciones u otros semejantes.

- Destrozos ocasionados violentamente en tiempo de guerra, robos tumultuosos o alteraciones graves del orden público.

Es habitual, de igual forma, que el concesionario transmita al contratista dicho riesgo (estableciéndolo en el contrato de vinculación entre ambas partes). El problema surge cuando el contratista pertenece al mismo grupo empresarial que el concesionario, porque entonces, aunque el coste sea asumido por grupo empresarial (Grupo Ferrovial, por ejemplo), se establecerá una disputa interna por ver quién asume el riesgo en el caso de existir problemas geotécnicos.

En países anglosajones (Australia, Canadá, Reino Unido), donde el modelo concesional está profundamente implantado, se suelen negociar el reparto de riesgos con la Administración, previo a la adjudicación, de forma que no existen dudas de quién asume cada riesgo. En la Tabla 10 puede verse un cuadro de reparto de riesgos habitual de las concesiones australianas.

Opción 2: Los Pliegos de Licitación de la concesión no hacen referencia explícita a la transmisión del riesgo geotécnico al concesionario

Lo primero que hay que indicar es que, si el pliego no deja claro quién asume el riesgo geotécnico, la Ley que se aplica a las concesiones (Ley 30/2007, de 30 de octubre, de Contratos del Sector Público) tampoco lo clarifica en ninguno de sus artículos. Sin embargo, el artículo 199 de dicha Ley establece que *"la ejecución del contrato se realizará a riesgo y ventura del contratista, sin perjuicio de los establecido para el de obras en el artículo 214 (fuerza mayor)"*.

Por lo tanto, en el caso de que se produzca algún tipo de problema geotécnico durante las fases de la concesión, la Administración apela siempre a dicho artículo 199 para trasladar el riesgo al concesionario.

Sin embargo, la estrategia habitual de los concesionarios, en estos casos en los que existen problemas geotécnicos, es intentar demostrar que dichos problemas han sido producidos por un "riesgo impredecible y sobrevenido", en un intento por trasladar dicho riesgo de vuelta a la Administración. Estas situaciones suelen acabar en los juzgados o en arbitrajes pactados, donde el concesionario intenta demostrar (mediante un procedimiento contencioso-administrativo) que, efectivamente, no existía forma de predecir los actos ocurridos.

Tabla 10. Cuadro de reparto de riesgos. Fuente: Department of Treasury Finance (2002).

Categoría	Riesgo	Posible asignación
Legislativo	Cambio de ley	Gobierno
	Cambio de regulación	Gobierno
Diseño, construcción	Diseño y construcción	Privado
Patrocinador	Impacto social	Gobierno
	Propiedad	Gobierno
	Política	Gobierno
	Legalidad	Gobierno
	Proceso	Gobierno
	Propiedad	Gobierno
Activo propiedad	Defecto del proveedor	Gobierno
	Propiedad intelectual	Privado
	Valor residual	Caso por caso
	Obsolescencia tecnológica	Privado
Mercado	Demanda	Privado
	Mercado	Privado
Operativo	Diseño	Privado
	Mantenimiento	Privado
	Operacional	Privado
	Cambio de organización	Privado
	Rendimiento	Privado
	Riesgo público	Privado
	Seguridad	Privado
	Actualización	Privado
Sitio	Medioambiente	Privado
	Título	Gobierno
	Proyecto	Caso por caso
Financiación	Fianzas	Caso por caso
	Inversión	Privado
Causas de fuerza mayor	Causas de fuerza mayor	Compartido
Relaciones Industriales	Relaciones industriales	Privado
Impuestos	Cambios de estatus	Privado



En lo que respecta las relaciones entre concesionaria y constructora, la clave se encuentra en el contrato que une a ambos. Es ahí donde ha de aparecer trasladado al constructor. Si no es así, se reproduce el mismo problema de antes, pero ahora entre concesionario y constructor (con la salvedad de que el constructor, a su vez, puede decir que el riesgo es del promotor, es decir, de la Administración).

8. La gestión de obras de alto riesgo

Con el título de este capítulo, el Ingeniero de Caminos Bofill de la Cierva ha escrito un artículo sobre un posible sistema de gestión a aplicar en obras de alto riesgo que, a su juicio, suele presentarse en casi todas las obras de construcción, tanto para edificación como para obras públicas, dado que cada vez se llevan a cabo con plazos de ejecución cada vez más reducidos. Así, se han abordado cada día soluciones más arriesgadas y en lugares más comprometidos. Ello hace que, en muchas ocasiones, estas obras puedan considerarse como "de alto riesgo", lo que lleva a que *"todos los agentes implicados deban hacer todos los esfuerzos necesarios para reducir la probabilidad del error grave al mínimo factible en su parcela de responsabilidad"*.

Los accidentes no sólo se producen por defecto de ejecución. La distribución de patologías en la construcción se divide así:

- 42,0 % atribuible al proyecto.
- 28,5 % atribuible a la ejecución.
- 14,6 % atribuible a los materiales.
- 14,9 % atribuible a la utilización y varios.

Por ello, si la empresa constructora intenta rebajar sensiblemente el riesgo de accidentes en sus obras ha de revisar (o hacer que se revise) el proyecto, desde el punto de vista de seguridad.

La empresa constructora a la que pertenecía el Sr. Bofill ha desarrollado desde 2005, un programa en este

sentido (Programa especial de tratamiento de riesgo de accidentes o PETRA), que constituye una serie de medidas adicionales a las incluidas en el Sistema de Gestión que se aplican en todas las obras, sobre todo en las urbanas subterráneas, edificios con medianera de riesgo, edificios con gran concurrencia de público, rehabilitación de edificios, grandes puentes, grandes presas, etc.

En dicho programa, las partes esenciales son:

- Selección del personal de obra (más cualificado y con experiencia).
- Comprobación del proyecto (por parte de los Servicios Técnicos o ingenieros de prestigio).
- Especial selección de subcontratistas.
- Establecimiento de un plan de auscultación cuando la ejecución pueda afectar a edificios o estructuras próximos.
- Auditoría mensual de la obra por parte de la Dirección de Calidad.

Cuando hemos leído estas bases del programa nos hemos dado cuenta que llevamos intentando establecer este Programa PETRA desde hace muchos años y que esas gestiones cristalizaron, por ejemplo durante la ejecución de las obras del Metro de Sevilla (en los años 80, a través de la intervención del CEDEX con GEOCISA y el propio contratista) y, sobre todo, en las obras del Metro de Madrid (a través de la Dirección de la Obra de MINTRA y su Unidad de Seguimiento, Auscultación y Control), ampliada después a otras obras como el túnel ferroviario de Guadarrama o el soterramiento del ferrocarril en Cádiz.

9. Conclusiones sobre la gestión de riesgos geotécnicos

Las obras de infraestructura, desde la fase de proyecto hasta la de construcción y mantenimiento, son "arriesgadas" por su propia natura-

leza, al asentarse sobre un terreno en el que nunca se puede decir que se conoce perfectamente sus condicionantes geológicos y geotécnicos. Además existe riesgo en el diseño adecuado de estructuras, elaboración de especificaciones sobre materiales, en la planificación de montajes y su supervisión, etc.

Ello genera la necesidad de una gestión adecuada del riesgo que implica cada obra, en la que hay que tener en cuenta las diferentes "amenazas" que puedan presentarse. En nuestro caso, problemas derivados de asumir estratigrafías no suficientemente representativas, adopción de taludes poco estables (definidos con cálculos muy genéricos que no tienen en cuenta el comportamiento real de materiales pizarrosos, granitos alterados, suelos algo cementados, etc.), definición de sistemas constructivos poco seguros (como en el caso de túneles interurbanos, en zonas con fallas, emboquilles, etc. o en los urbanos próximos a edificios antiguos, vaguadas rellenas de vertidos flojos, etc.), con poco control etc.

Los mapas oficiales de "riesgos" ayudan. Son información a tener en cuenta, pero no leyes inmutables. Llevan dentro unos criterios subjetivos (bajo una aparente seriedad informática y una temática), cuya calidad depende de la experiencia de los autores. Además, su escala suele ser de poco detalle.

Muchas veces las dificultades provienen de que ni en el proyecto ni en la construcción, se tiene una idea clara del "riesgo" (o de las "amenazas") y su gestión y administración es prácticamente nula: se trata sólo de cumplir el proyecto "caiga quien caiga", ya que ello define las condiciones contractuales. En realidad debería hacerse una evaluación del riesgo aunque no sea más que con una definición del "catálogo" de amenazas, con su correspondiente valoración. Este riesgo no sólo se presenta a corto plazo, durante la

construcción, sino también a largo plazo (mantenimiento).

Como indican diversos autores y resume Rodríguez Fernández (2007), la práctica internacional en concesiones al sector privado se ha inclinado por el traspaso del riesgo a un tercero (el Contratista). Las partes del contrato que rige la obra deberían trasladar los riesgos según la capacidad de las mismas para administrar y soportar el riesgo (que suele controlar de mejor forma las circunstancias que pueden resaltar en la pérdida de obra). Se mejoraría así la vigilancia y prevención del riesgo en cuestión. A su vez, el Contratista, de alguna manera, lo traslada al explotador, si la "amenaza" no se ha puesto de manifiesto durante la construcción.

Es relativamente habitual (incluso así se indica en algunos documentos internacionales, como el Libro Rojo de la FIDIC (Asociación Internacional de Profesionales de la Ingeniería), que se imponga la obligación al Contratista de soportar la gran mayoría de riesgo inherentes al proyecto, sin considerar la capacidad que este puede tener para enfrentar tales riesgos. Esto sucede también en diversas concesiones que la Administración ha dado al sector privado, con un "anteproyecto" en que el reconocimiento geológico-geotécnico no puede considerarse como maravilloso, en que las solucio-

nes para realizar excavaciones subterráneas no están bien planteadas (es- casos recubrimientos sobre bóveda y constituidos por terrenos ganados al mar), en que los sondeos son cortos para cimentaciones de puentes (sin alcanzar el sustrato competente), en que no se ha tenido en cuenta el posible problema de carstificación (con presencia de cavernas de importantes dimensiones), etc. Las condiciones actuales de escasez de obras llevan a los contratistas a aceptar todos los riesgos en contrato. Después, si hay causas mayores, se intenta reclamar a la Administración; incluso con arbitrajes.

Una vez que el riesgo pasa a ser una realidad, sus costes deberían ser transferidos a las partes (Administración, Concesionario, Proyectista, Contratista, etc.) de una manera lógica. Debería seguirse la secuencia: Riesgo-Responsabilidad-Indemnidad-Seguros. Pero los seguros no puede (ni deben) pagar mejoras de diseño, sino (en general) compensar fallos o errores de ejecución, aunque también pueden asegurarse fallos de proyecto. Estos es un problema muy complejo. Por ejemplo, durante la construcción de la L.A.V. Madrid-Zaragoza, se produjeron seis hundimientos de túneles en un breve período de tiempo. Se produjo una discusión entre contratista y la única empresa aseguradora.

Para el pago final se aumentaron claramente las cuotas y empezó a pensarse que las empresas aseguradoras intervinieran (como supervisoras) en los proyectos, sometién- doles a algún tipo de auditoría, lo que no cuajó. Algo similar ocurrió en Barcelona, a raíz del accidente del Barrio del Carmel.

Se ha escrito mucho, en los últimos diez años, sobre riesgos en obras de infraestructuras y bastante sobre riesgos geotécnicos, aunque, en general, son trabajos sobre "pe- ligros" y "amenazas", sin que la pala- bra "riesgo" se utilice en el sentido de probabilidad o de posibilidad. No existen suficientes estadísticas para hablar de "probabilidad", salvo en casos de obra ya hecha, en que puede haber una previsión y un se- guimiento (conservación de taludes, por ejemplo). Se puede hablar, así, de un "riesgo" en proyecto y ejecu- ción ("amenazas" o "peligros") y de un "riesgo" en explotación, más com- probable (al ver ya el terreno). A ve- ces existen datos estadísticos, como los que figuran en la Tabla 11, debida a Baynes (2010). En ella se resumen datos de cuatro autores, más los suyos propios, en que se analiza lo que ha pasado en diversos casos con pro- blemas. Según esta tabla, la elección de modelo analítico del terreno no razonable ha dado problemas entre

Tabla 11. Tipos de riesgos geotécnicos en obras. Ocurrencia en % (Baynes, 2010).

FUENTE	McMAHON (1985) 47 casos con problemas	STAPLEDOS (1983) 13 roturas de trabajos hidráulicos	DUCAN (1988) 13 lecciones personales	Fookes et al (2000) 31 casos	BAYNES (2010) 22 casos con problemas
PROYECTO					
a) Mala gestión del proceso de ingeniería geotécnica	25	38	-	-	95
b) Mala gestión del reconocimiento de campo	n.i.	46	-	-	73
c) Elección de modelo analítico no razonable	22	62	46	-	64
d) Elección de parámetros geotécnicos	58	15	46	6	32
CONDICIONES REALES DEL TERRENO					
a) Detalles imprevisibles sobre las condiciones del terreno	n.i.	-	-	-	59
b) Peligros inherentes a las condiciones del terreno	n.i.	7	-	68	73
c) Condiciones del terreno imprevistas	33	-	8	29	73
n.i.: Mc Mahon no contempla esta causa					



22 % y 64 % de los casos, mientras que las condiciones reales de terreno imprevistas ha dado problemas entre un 8 % y un 73 %, lo cual no nos lleva a conclusiones claras. Además, sólo hay referencia a obras con problemas y no sin ellos.

En resumen, puede decirse que los riesgos geotécnicos proceden de:

A) Reconocimientos geotécnicos deficientes.

B) Elección de modelos de cálculo y parámetros inadecuados.

C) Condiciones reales del terreno imprevistas (por reconocimiento incompleto, detalles difíciles de definir, etc.).

D) Falta de financiación adecuada y/o soporte técnico en estudios previos, proyectos o supervisión en ejecución.

E) Evolución temporal del terreno afectado por las obras.

De momento los análisis de riesgos pueden llevarse a cabo con las listas de "amenazas" y con las medidas que se juzguen oportunas para disminuir los posibles efectos de que los riesgos se conviertan en realidad. En el resultado de esta forma de trabajar influye mucho la experiencia de sus autores y la confianza que tenga la Administración y/o Contratista en sus consejos.

10. Referencias

- [1] (2008) "Manual sobre riesgos en la construcción, daños a la obra y pérdida de beneficios anticipados (ALOP)". Tomado de Google.
- [2] AYALA, F.; FERRER, M.; OTEO, C. y SALINAS, J. L. (1987). "El Mapa previsión de riesgos por IGME-CEDEX expansividad de arcillas en España a escala 1:1.000.000" Serie Geológica ambiental. Madrid.
- [3] BAYNES, F. J. (2010). "Sources of geotechnical risk" Quaterly Journal of Engineering Geology and Hydrology. 43, 321-331.
- [4] BOFFIL DE LA CIERVA, J. E. (2007). "La Gestión de obras de alto riesgo". Reproducida por INTERNET.
- [5] COMITÉ C-12 AIPCR (2004). "Recommendations sur les risques associés aux pentes pour les routes". AICPRC. 2, 12-13 B. 92055. La Defense. Cedex-France.
- [6] CONSORCIO COMPENSACIÓN SEGUROS (1999). "Las características naturales y su cobertura aseguradora. Un estudio comparativo". Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid.
- [7] CONSORCIO COMPENSACIÓN SEGUROS (2001). "El riesgo sísmico, Prevención y Seguro". Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid.
- [8] FERRER, M. (1995). "Los movimientos de ladera en España "Reducción de Riesgos geológicos. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- [9] HERVAS, J. y BARREDO, J. I. (2001). "Evaluación de peligrosidad de deslizamientos mediante el uso conjunto de SIG, teledetección y métodos de evaluación multicriterio. Aplicación al Barranco de Tirajama". V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Vol. I, pp. 315-318.
- [10] I.T.I.G. (2006). "A code of practice for Risk Management of tunnel Works". Tomado de Google.
- [11] ISSMGE (2001). Bulletin. Vol. 5. Issue 6 págs. 24 y 25.
- [12] MARTÍNEZ-MONTES, G; DEL CERRO, J.; ALEGRE, J. Y ORDOÑEZ, J. (2007). "Análisis y evaluación de riesgo de túneles, carreteras en explotación". Revista Ingeniería de Construcción. Vol. 22. nº 2, pp. 101-110.
- [13] MINISTERIO DE FOMENTO – PUERTOS DEL ESTADO (2005). "Recomendaciones geotécnicas para el proyecto de obras marítimas y portuarias". R.O.M. o.5-a.5
- [14] MINISTERIO DE FOMENTO (2004). "Guía de cimentaciones en obras de carretera". Dirección General de Carreteras. Serie Monografías.
- [15] OTEO, C. (1986). "Las arcillas expansivas en España. Distribución y propiedades". Curso sobre cimentaciones en terrenos metaestables, colapsables y expansivos. Vol. II. Fundación Agustín de Betancourt. Madrid.
- [16] OTEO, C. (2010). "Propiedades y problemas de arcillas expansivas y suelos colapsables: Origen y problemas geotécnicos". 1ª Jornada sobre Ingeniería del Terreno. Problemas geotécnicos de suelos metaestables. Universidad de Jaén. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Jaén. Marzo.
- [17] OTEO, C.; RODRÍGUEZ ORTIZ, J. M. y MENDAÑA, F. (2003). "Sobre los sistemas y parámetros geotécnicos de diseño en la ampliación del Metro de Madrid". Revista de Obras Públicas nº 3.429, pp. 49-67.
- [18] RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, M. (2007). "La problemática del riesgo en los proyectos de construcción de infraestructuras y en los contratos internacionales de construcción". Revista Mercatoria. Vol. 6, nº 1, pp 1-29.
- [19] ROMANA GARCÍA, M. (2010). "Sistema de toma de decisiones asociados a operaciones de conservación de taludes en suelos y rocas". Ingeniería del Terreno, Ingeoter 13, cap. 6, pp. 159-77.
- [20] ROMANA, M. (2010). "Introducción. El concepto de riesgo geológico". Curso teórico-práctico sobre riesgos geológicos en túneles. 2ª Edición. STMR. (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puerto. Madrid).
- [21] SANHUEZA, C. (2008). "Criterios y parámetros de diseño para pantallas continuas en Madrid". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos).
- [22] VAN WESTEN, C. (2007). "Introducción a los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo". UNESCO RAPCA. Sacado de Google.
- [23] YOUSSEF, A. M. y MAERZ, N. H. (2012). "Development, justification and verification of a rock fall hazard rating system". Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Vol. 71. Nº 1 febrero, pp. 171-186. ❖