

Comprobación de secciones de sostenimiento y cuantificación de la incertidumbre en cálculos de elementos finitos por medio del método de estimación puntual



Juan Luis Hita María

Ph.D. MSc Mining Engineer. Departamento de Geotecnia y Túneles. SENER



Juan Herrera Herbert

Universidad Politécnica de Madrid

Resumen

Es un hecho conocido que un mismo factor de seguridad puede corresponder a varias probabilidades de fallo diferentes. De este modo, para evitar la existencia de diseños aparentemente seguros pero que esconden una gran incertidumbre, se hace necesario cuantificar la variabilidad de los resultados de los cálculos de comprobación de sostenimientos. En el presente artículo se propone una metodología sencilla basada en la aplicación del método de estimación puntual al cálculo de elementos finitos y al análisis pormenorizado de sus resultados.

Palabras clave

Cálculo, sostenimientos, estimación puntual

Abstract

It is a well-known fact that the same safety factor may correspond to several different failure possibilities. In this way and in order to avoid the presence of apparently safe designs that may harbour great uncertainties, it is necessary to quantify the variability of the results of support verification calculations. The present article proposes a simple method based on the application of the point estimation method to finite element calculation and the detailed analysis of the results.

Keywords

Calculation, support, point estimation

1. Introducción

En la geotecnia en general –y en las obras subterráneas en particular–, la incertidumbre juega un papel fundamental. Este factor de desconocimiento tanto del medio donde se debe desarrollar la obra como de otros factores intrínsecos a la misma, induce riesgos asociados tanto al diseño inicial como a la toma de decisiones durante la construcción.

Por ello, este desconocimiento obligará al geotécnico a tener en cuenta las diferentes problemáticas que puedan presentarse así como las posibles consecuencias de cada una de ellas en el diseño ingenieril, siempre partiendo de los datos disponibles provenientes de la investigación geotécnica realizada y de los condicionantes impuestos al diseño.

Según proponen Baecher (1972) y Einstein (1994), las principales fuentes de incertidumbre son las siguientes:

- Incertidumbres debidas a la variabilidad espacial, que resultan inherentes al terreno.
- Incertidumbres debidas a los errores de medida (en campo, laboratorio, errores sistemáticos, errores humanos, etc.).
- Incertidumbres debidas al modelo de cálculo (modelización del comportamiento de los materiales, etc.).

De esta manera, durante el desarrollo del proceso de diseño, tanto geólogos como ingenieros se verán obligados a lidiar con todas estas fuentes de incertidumbre, gestionándolas de la mejor manera posible al ser estas las causantes de las posibles variaciones del diseño y, por lo tanto, del cumplimiento de plazos y del coste final. De este modo, estos factores deben ser reducidos en lo posible y gestionados con el máximo cuidado desde el comienzo de los estudios de cualquier proyecto.

2. Objetivo y alcance del artículo

En el presente artículo se tratará la fase de diseño y comprobación de sostenimientos por medio del uso de metodologías de cálculo que permiten la gestión de la incertidumbre a partir del método de estimación puntual aplicado al cálculo de elementos finitos.

Los métodos de comprobación por medio del método de elementos finitos –M.E.F. en adelante– corresponden a métodos completamente extendidos y que pueden ser revisados en publicaciones como ‘The Kersten Lecture’ (Hoek, 2008), siendo ampliamente usados en la ingeniería de túneles y obras subterráneas.

Partiendo de esta metodología, el objetivo de este artículo será la aplicación de diversos métodos que permiten la gestión de la incertidumbre. Estos métodos se han desarrollado tomando como base el uso del Método de estimación Puntual –P.E.M., en su acrónimo en inglés– propuesto por Rosenblueth (1975), que es ampliamente conocido y usado en diversos ámbitos.

De este modo, en el presente artículo se propondrán metodologías de integración del mismo en los cálculos habituales del M.E.F., así como métodos de gestión de sus resultados orientados a la un mejor conocimiento de los resultados obtenidos de os cálculos en vistas de la optimización del diseño.

3. Algunas proposiciones de gestión de la incertidumbre por medio del uso del método de estimación puntual

3.1 ¿Qué es el método de estimación puntual?

El método de estimación puntual, propuesto por Rosenblueth (1975), permite la estimación de los dos primeros momentos estadísticos de la función de desempeño $g(X)$ a partir de una función generadora de momentos. Este método constituye una alternativa muy interesante en tiempo-coste del cálculo frente a otros métodos mucho más costosos como el de Montecarlo.

Como explican Christian y Baecher (1999), el problema principal es aquel establecido por una variable aleatoria X con una función de probabilidad $f_x(x)$ y por otra variable Y , proveniente de una función determinista tal que $X, Y = g(X)$.

En el caso de la geotecnia, la variable aleatoria X podría representar, entre otros:

- Parámetros resistentes y/o deformacionales del terreno, juntas, etc.
- Cargas o estados tensionales.
- Efectos sísmicos, etc.

La variable Y representaría el output, es decir: desplazamientos, tensiones, esfuerzos, etc.

De esta manera, el problema consiste en establecer los momentos de orden bajo (media y desviación típica) de la función de probabilidad de $Y, f_y(y)$ usando los momentos de orden bajo de la función $f_x(x)$ y la función $f_x(x)$.

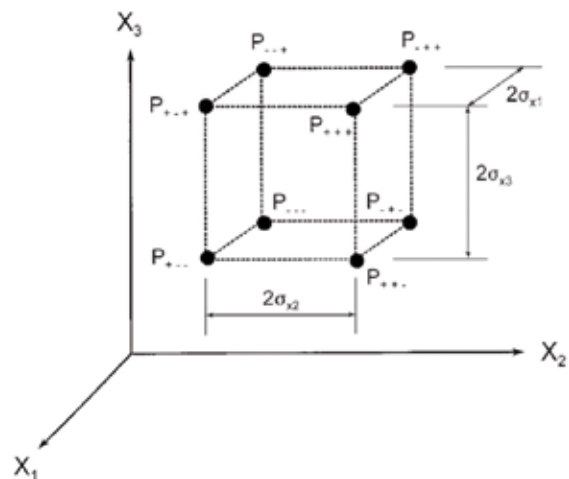


Fig. 1. Puntos de Rosenblueth (1975) para 3 variables, correlacionadas o no (Extraído de Chistian y Baecher (1999)).

Rosenblueth (1975) resuelve este problema por medio de la sustitución de la variable aleatoria continua X por una variable aleatoria discreta cuya función de probabilidad de masa $p_x(x)$ tiene los mismos momentos de orden m que tiene $f_x(x)$. De este modo, transforma la función $p_x(x)$ por medio de la función $g(x)$ para obtener una función $p_y(y)$, usándola para calcular los momentos de Y en el caso continuo.

Generalmente se usa la siguiente notación:

$$E[Y^m] \approx P_+ y_+^m + P_- y_-^m \quad [1]$$

Donde:

- Y es una función determinista de X , tal que $Y = g(x)$.
- $E[Y^m]$: Esperanza de Y elevada a la potencia m .
- y_+ : valor de Y evaluado en el punto x , que es mayor que la media.
- y_- : valor de Y evaluado en el punto x , que es menor que la media.
- P_+ y P_- : con los coeficientes de ponderación o pesos.

De esta manera, el problema es hallar valores apropiados para los puntos x_+ y x_- así como para P_+ y P_- .

En el caso más sencillo, donde no existe correlación entre variables, se puede reducir a la siguiente expresión:

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^{2^n} P_i y_i [2]$$

En este caso se seleccionarán unos coeficientes de ponderación igual a $1/2^n$. El número de casos necesarios para el cálculo será 2^n , siendo n el número de variables aleatorias en ambos casos. Es decir, se realizarán 2^n cálculos, tomando como parámetros de cálculo la combinación de los valores y_+ e y_- . Estas expresiones se suelen abreviar como '+' y '-' y toman los siguientes valores:

- Caso '+': corresponde a la suma de la desviación típica a la media del parámetro.
- Caso '-': corresponde a la resta de la desviación típica a la media del parámetro.

De este modo, para una combinación de 3 parámetros se necesitarían 2^3 , obteniéndose los siguientes 8 casos:

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
RCS	+	+	-	-	+	+	-	-
E	+	-	+	-	+	-	+	-
GSI	+	+	+	+	-	-	-	-

Tabla 1. Casos de cálculo para 3 variables aleatorias

Por lo tanto, para obtener la media de un parámetro, se debe aplicar la ecuación [2] introduciendo los resultados de cada uno de los casos calculados –que, para el caso presentado, no sería más que calcular la media aritmética–.

3.2 Métodos de gestión de la incertidumbre propuestos

Los métodos de gestión de la incertidumbre que se proponen tomarán como base el establecimiento de intervalos de confianza sobre los resultados obtenidos del cálculo de P.E.M.

Para el establecimiento de estos intervalos de confianza es necesario extraer los siguientes parámetros de dicho cálculo:

- Distribución estadística.
- Estadísticos principales –media y desviación típica–.

Por lo tanto, el método propuesto, más allá de la selección de un valor medio o característico de cálculo, propone la selección de un intervalo de confianza. Para ello se propone el uso de la fórmula de cálculo del valor característico de propuesta por Schneider (1997), que garantiza unos valores conservadores.

De este modo, cada límite del intervalo se denominará de la siguiente manera:

- $V(-) = \mu_{medio} - 0,5 \cdot \sigma$ [3] para el límite inferior.
- $V(+) = \mu_{medio} + 0,5 \cdot \sigma$ [4] para el límite superior.

Este método es aplicable a todos los resultados del cálculo y , como se mostrará a continuación, se aplicará a lo largo de las diferentes fases de cálculo.

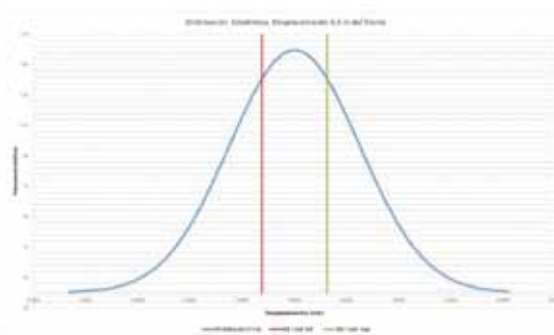


Fig. 2. Aplicación de las fórmulas propuestas al cálculo del desplazamiento a una distancia determinada del frente

Asimismo, este método permite la estimación de la incertidumbre del cálculo realizado de una manera muy gráfica y sencilla: a mayor separación de los límites superior e inferior, mayor incertidumbre –mayor desviación típica asociada–. Permitiendo en casos como los esfuerzos, una estimación inicial de la variación del coeficiente de seguridad.

Este hecho permite desde el establecimiento de rangos de descompresión para una sección de excavación y una determinada distancia al frente hasta la detección de elementos de sostenimiento más propensos al fallo (Hita, 2015).



Fig. 3. Aplicación de las fórmulas propuestas a la comprobación de esfuerzos

Por lo tanto, este método permite cuantificar la incertidumbre existente en los resultados obtenidos por medio de la interpretación de los datos provenientes del cálculo del P.E.M., hecho que no sucede en cuando se toman valores característicos tanto para el cálculo como para representar resultados.

4. Comprobación del sostenimiento. Aplicación de los métodos propuestos

4.1. Fases de la comprobación de un sostenimiento. Integración del P.E.M.

El proceso de comprobación de una sección de excavación y sostenimiento puede dividirse en 4 fases:

- Establecimiento de los parámetros que rigen el comportamiento del terreno.
- Cálculo del desplazamiento en el punto de colocación del sostenimiento.

- Modelo de excavación inicial: cálculo de las líneas características de la sección y de la descompresión del terreno.
- Comprobación de la sección de excavación y sostenimiento.

El presente artículo se centrará en las fases concernientes al cálculo por medio del M.E.F., es decir, de la segunda a la cuarta fase.

4.1.1. Cálculo del desplazamiento en el punto de colocación del sostenimiento

En este punto se debe establecer un modelo axilsimétrico de área equivalente a la sección real como base para el cálculo de la línea desplazamiento-distancia al frente. En dicho modelo, se debe modelizar la sección y el pase de avance.

Un ejemplo de modelización axilsimétrica y de evolución de los desplazamientos es el siguiente:

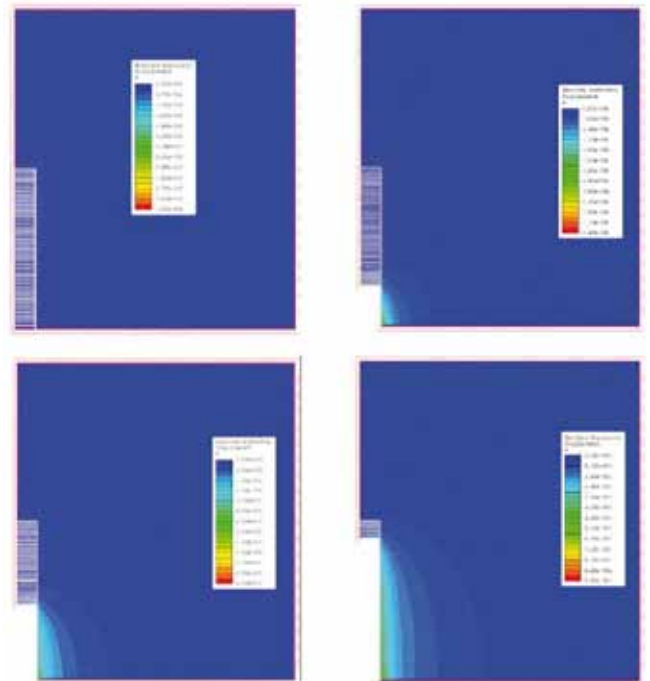


Fig. 4. Simulación del avance del túnel por medio de un modelo axilsimétrico

A partir de este modelo es posible establecer el desplazamiento a diferentes distancias del frente.

Distancia del frente (m)	Media (m)	Desv. típica (m)
D(0)	0,0039	0,002
S(1)	0,0063	0,003
D(1,5)	0,0079	0,0038
D(2)	0,0079	0,004

Tabla 2. Ejemplo resultados de cálculo axilsimétrico

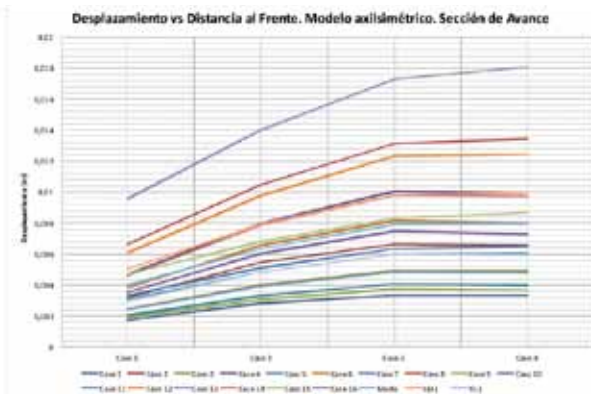
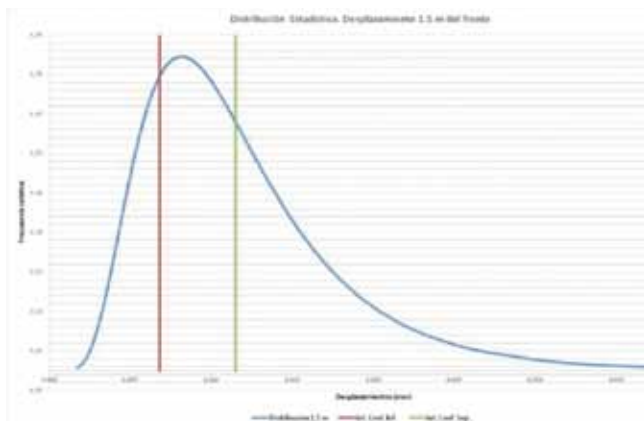


Fig. 5. Ejemplo de aplicación del P.E.M. Desplazamientos vs. distancia al frente para 16 casos de cálculo

Del mismo modo, gracias al cálculo por medio del P.E.M. es posible establecer tanto la distribución como los estadísticos principales de estos desplazamientos. Una vez conocidos, la aplicación de las fórmulas [3] y [4] para el establecimiento del intervalo de confianza de desplazamientos es directa.

De este modo, se puede obtener representaciones como la siguiente:



Función de distribución del desplazamiento a 1,5 m del frente con el intervalo de confianza calculado para el mismo

4.1.2. Modelo de sección de excavación: cálculo de las líneas características de la sección y de la descompresión del terreno

El objetivo de esta fase comprende la determinación de la descompresión que ha sufrido el terreno para la distancia al frente calculada en la fase anterior.

Al igual que en la fase anterior, se aplicará el P.E.M., obteniéndose 2^ª líneas características. En este caso, resulta recomendable la realización de dos baterías de cálculos, tanto para los parámetros resistentes y deformacionales como para las tensiones naturales. De esta manera puede determinarse en cada caso qué afección resulta más desfavorable al diseño propuesto (M. Cai, 2011).

A continuación, se adjunta un ejemplo donde se muestran las líneas características resultantes de este estudio:

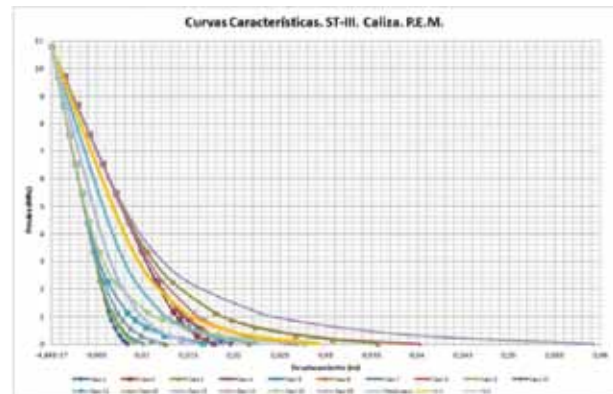


Fig. 6. Ejemplo de aplicación del P.E.M. Líneas características resultantes y casos medio, V(+) y V(-)

A partir de las líneas característica y del intervalo de desplazamientos anteriormente calculado en el modelo axilsimétrico, se podrá calcular fácilmente la descompresión que tendrá lugar a la hora de colocar el sostenimiento y que, por tanto, debe ser aplicada para la comprobación del mismo.

Al usarse el intervalo de valores calculado en el modelo axilsimétrico, como resultado se establecerán una serie de intervalos de valores en cada caso de cálculo.

Estos intervalos de valores pueden determinarse de dos maneras:

- Sobre los 2^ª casos de líneas características calculadas, calculando su media.

- Sobre los casos medio, $V(+)$ y $V(-)$ extraídos del cálculo de líneas características.

Este segundo caso resulta más eficiente en tiempo cuando los casos calculados son elevados –a partir de 4 variables de cálculo–.

Una serie de ejemplos basados casos reales se muestra a continuación:

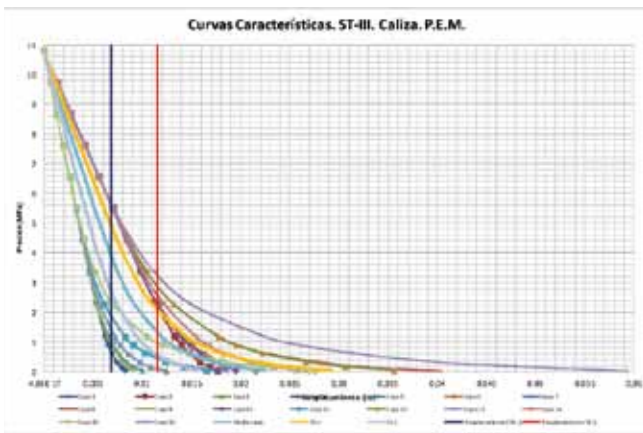


Fig. 7. Ejemplo de aplicación del P.E.M. Cálculo de la descompresión del terreno

Distancia al frente (m)	Rango de descompresión (%)							
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
1	60-70	70-80	75-85	65-75	85-95	70-80	80-90	60-70

Distancia al frente (m)	Rango de descompresión (%)							
	Caso 9	Caso 10	Caso 11	Caso 12	Caso 13	Caso 14	Caso 15	Caso 16
1	70-80	60-70	80-90	60-70	75-85	60-70	85-95	65-75

Tabla 3. Ejemplo resultados cálculo de descompresión

	Rango de descompresión	
	Min.	Max.
$V(+)$	55	65
Media	70	80
$V(-)$	75	90

Tabla 4. Ejemplo resultados cálculo de descompresión para la media, caso $V(+)$ y caso $V(-)$

Generalmente, las diferencias entre los rangos esperables calculados por medio de los casos de P.E.M. y los casos medio, $V(+)$ y $V(-)$ son muy similares.

Asimismo, sobre los cálculos realizados se podrá extraer la distribución estadística del radio de plastificación obtenido. De esta manera, a partir de ella se podrá estimar la longitud de bulones adecuada en esta primera fase de la excavación (M. Cai, 2011).

Esta longitud se establece a partir de la distribución estadística del radio de plastificación. A partir de ella es posible establecer un intervalo de confianza que marcará las longitudes máximas y mínimas recomendables para los bulones.

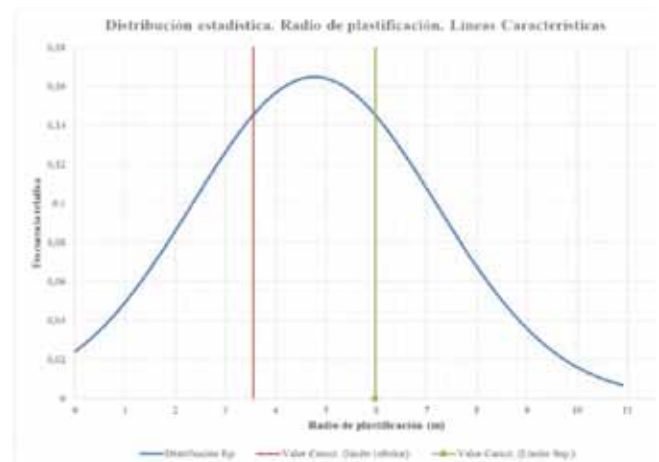


Fig. 8. Ejemplo de aplicación del P.E.M. Estimación de la longitud de bulones necesaria

Este punto resulta muy útil para la estimación de la longitud de bulón en excavaciones en avance o en excavaciones de grandes dimensiones como cavernas.

4.1.3. Comprobación de la sección de excavación y sostenimiento

Una vez establecida la descompresión del terreno, se realizará el cálculo de comprobación de la sección de excavación y sostenimiento por medio de la aplicación del P.E.M. Como en casos anteriores, se plantearán 2ⁿ casos de cálculo, siendo n el número de variables implicadas en el cálculo.

En el caso de que se espere una gran plastificación, Langford (2013), recomienda la realización de 2ⁿ+3 cálculos. De esta manera se añadirán dos casos extremos pero creíbles y un cálculo con valores medios a los que propone el método de P.E.M. clásico.

Una vez realizados los cálculos, se deben seleccionar las fases donde se desea realizar el cálculo y que se estiman como críticas.

Establecidas dichas fases, se extraerán los siguientes estadísticos y distribuciones estadísticas:

- Media y desviación típica de todos los casos calculados para los de esfuerzos y momentos para cada elemento de sostenimiento en cada punto donde el programa los registre (Axil, Cortante y Momento flector).
- Distribución y estadísticos del radio del radio de plastificación en cada fase de cálculo.
- Distribución y estadísticos de los desplazamientos en cada fase de cálculo.

4.1.3.1 Análisis de esfuerzos y momentos

Para el análisis de esfuerzos y momentos, se establecerán unos intervalos de confianza de la media con tres tipos de valores por medio de la fórmula de Schneider (1997) por medio de las ecuaciones [3] y [4]. Estos intervalos de confianza se representarán para cada elementos del sostenimiento por separado (hormigón y cerchas, generalmente) en los diagramas de interacción típicos M-N y Q-N junto con los valores medios extraídos del cálculo. De este modo se obtendrá:

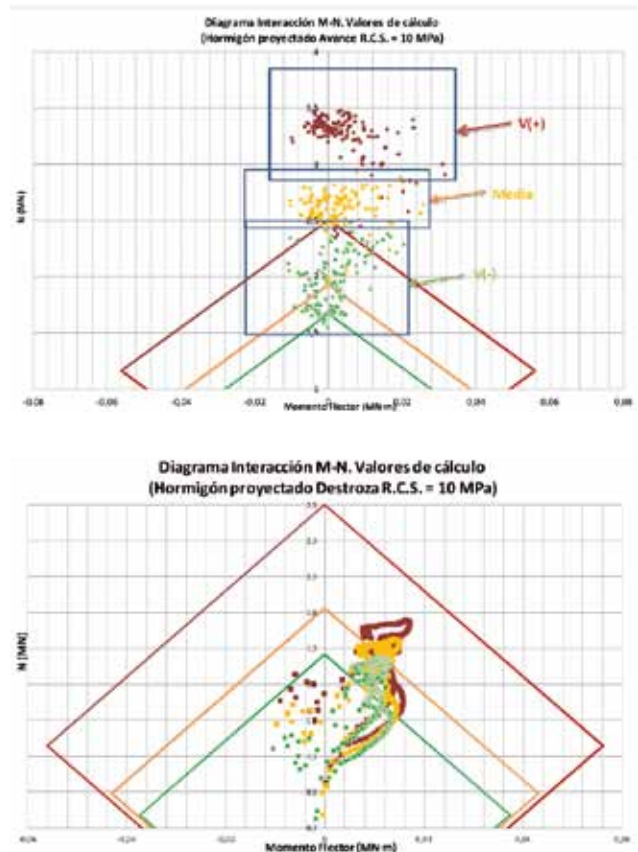


Fig. 9. Ejemplo de aplicación del P.E.M. Comprobación de esfuerzos y estimación de la incertidumbre en los resultados. Casos Medio, V(+) y V(-)

En amarillo se representan los valores medios, en rojo el valor de los casos V(+) y en verde los casos correspondientes a V(-). Como se observa, por medio de la separación que se produce entre los casos V(+) y V(-) es posible estimar visualmente la incertidumbre del cálculo.

Este hecho es claramente observable en los dos casos anteriores; en el primer caso no sólo el coeficiente de seguridad es muy bajo, sino que la incertidumbre es muy alta, como muestra la separación entre los casos V(+) y V(-); por el contrario, en el segundo, la separación entre las nubes de puntos de esfuerzos es mucho menor, por lo que no sólo el coeficiente de seguridad es mayor, sino que la incertidumbre del cálculo es menor.

Asimismo, por medio de esta representación se pueden localizar elementos críticos del sostenimiento. Este hecho puede realizarse no sólo a través del factor de seguridad

sino por la incertidumbre asociada a sus resultados. Es decir, un elemento con un coeficiente de seguridad medio aceptable puede resultar crítico si sus valores $V(+)$ y $V(-)$ resultan muy diferenciados, pudiendo no resultar aceptable su diseño aunque el factor de seguridad sí lo sea.

Estos valores se establecerán para cada elemento de sostenimiento (cerchas y hormigón proyectado, generalmente) en todos los puntos donde se registren dichos valores de esfuerzos y momentos para cada una de las fases de críticas y zonas en las que se diferencie el sostenimiento.

Un ejemplo de fase crítica de avance donde se representan los valores medios en amarillo, los $V(+)$ en rojo y los $V(-)$ en verde, es el siguiente:

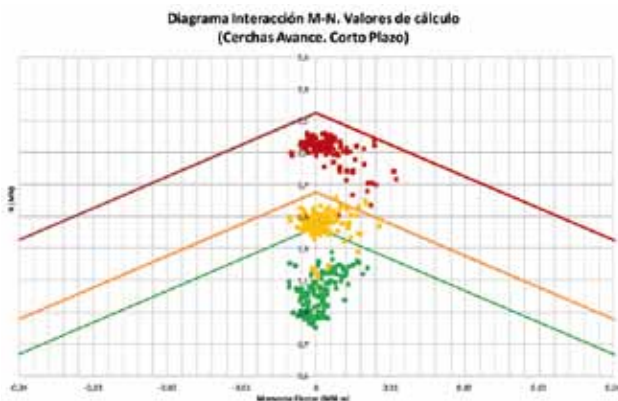


Fig. 10. Ejemplo en fase de avance con resultados “dudosos”

Como se observa, el F.S. de seguridad puede resultar correcto a corto plazo, pero la incertidumbre presente puede hacerlo variar hasta un valor cercano a 1 o menor, incluso.

Esta fase y este elemento de sostenimiento resultarían críticos.

De este modo, estos esfuerzos serán representados en los diagramas de interacción M-N y Q-N, pudiendo registrar: fases realmente críticas y elementos de sostenimiento críticos.

Una vez localizados tanto la/s fase/s como el/los elemento/s críticos, se procederá a su análisis en profundidad, establecerá el denominado “margen de seguridad”.

El establecimiento de esta probabilidad de fallo se realizará por medio del cálculo del margen de seguridad medio

en cada punto del sostenimiento analizado. Generalmente se puede suponer una distribución normal para su cálculo.

Por lo tanto, se obtendrá un diseño correcto cuando tanto factor de seguridad, margen de seguridad, probabilidad de fallo e incertidumbre se consideren aceptables.

4.1.3.2. Análisis de la corona de plastificación y del bulonado

De igual modo, en el caso del radio de plastificación, según propone M. Cai (2011), es posible establecer una longitud con una probabilidad pequeña de ser excedida. De este modo, se debe establecer la distribución del radio de plastificación en la última fase de excavación, donde se localizará la mayor dimensión del mismo, generalmente en la clave.

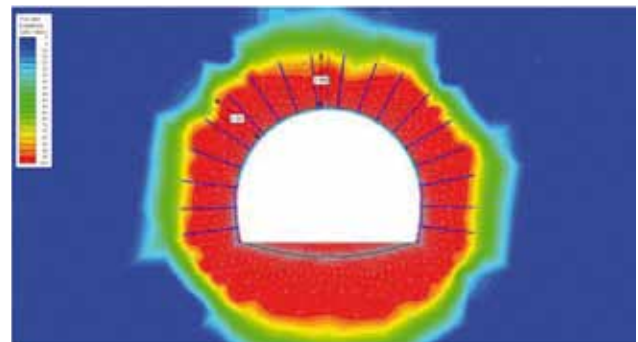


Fig. 11. Estimación de la corona de plastificación en un caso de cálculo

En estos casos también es recomendable establecer intervalos de confianza para el valor de la media calculado por medio de las ecuaciones [3] y [4]. Un ejemplo se muestra a continuación:



Fig. 12. Distribución estadística del radio de plastificación. Estimación inicial de longitud de bulones

En este caso, cabe comentar, que la longitud se refiere a una estimación que debe ser tomada como una referencia en muchos casos, dadas las limitaciones del método de elementos finitos, que representa terrenos discontinuos a modo de equivalente continuo. A pesar de ello, se considera muy útil la propuesta de M. Cai (2011) a este respecto.

4.1.3.3. Análisis de convergencias

Al igual que sucede con el radio de plastificación, por medio de la distribución de convergencias es posible hallar la probabilidad de que las convergencias que se midan estén comprendidas entre unos determinados valores para un momento determinado –como puede ser la excavación de la destroza, por ejemplo-.

4.1.3.4. Optimización de resultados

Una vez presentado este método, es posible, como sucede en el caso de las líneas características, el realizar diferentes representaciones según la probabilidad de fallo, variabilidad, del índice de fiabilidad, factor de seguridad, etc. para cada elemento, zona del sostenimiento y para cada fase analizada.

De igual manera, según se proponía, una vez realizado el cálculo, puede usarse la información obtenida para optimizar el mismo por medio de, por ejemplo, estudios de sensibilidad paramétrica de valores como la descompresión aplicada en el cálculo.

De esta manera, se puede percibir el impacto de la variación de diferentes parámetros en las distribuciones de esfuerzos, pudiendo rediseñar en consecuencia.

5. Caso práctico

5.1. Hipótesis, modelo y metodología de cálculo

Por medio del siguiente caso práctico se pretende desarrollar las ideas vertidas anteriormente sobre gestión de incertidumbres en cálculo de M.E.F.

Los cálculos se realizarán sobre un túnel de sección tipo típica de túnel de L.A.V. que deberá ser excavado bajo una montera de 400 m. En este caso, y como variables aleatorias de cálculo, se usarán 4 parámetros:

- Resistencia a Compresión Simple
- Módulo de Deformación del Macizo

- G.S.I.
- Parámetro m_i

Tomándose el resto de parámetros como constantes. De este modo:

Parámetros de cálculo. Comparativa Caso práctico M.E.F.			
Parám.	Distr.	Media	Desv. Típica
R.C.S. (MPa)	LogN	49,14	19,46
m_i	Norm.	7	1,4
GSI	Norm.	40	5
E (MPa)	Norm.	11114	4059
D		0	-
R (m)		(según cálculo)	-
H (m)	Cte	400	-
γ (kN/m ³)		0,027	-
ν		0,27	-

Tabla 5. Caso práctico: parámetros de cálculo

Se toma como válida la hipótesis de Heim, por lo que se aplicará un $k_o=1$.

En principio, al tomar 4 parámetros de cálculo como variables aleatorias, se realizarán, en principio 16 casos de cálculo. Cada uno de estos casos corresponde a una combinación de parámetros de cálculo definida por los siguientes estados:

Estado	Parámetro de cálculo
+	Media + desviación típica
-	Media - desviación típica

Tabla 6. Caso práctico: tipos de caso de cálculo

De este modo, las combinaciones iniciales de cálculo a realizar serán:

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9	Caso 10	Caso 11	Caso 12	Caso 13	Caso 14	Caso 15	Caso 16
RCS	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-
E	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
GSI	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-
m_i	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 7. Caso práctico: casos de cálculo

Por último, se estudiará el sostenimiento tipo ST-IV, propuesto para roca de calidad media a mala (GSI comprendido entre 35-45), cuyos elementos principales son los siguientes:

- 25 cm de Hormigón proyectado (HM-30), con fibras de acero en una dotación de 40 kg/m³.
- Cerchas HEB-140 cada 1,5 m.
- Bulones Swellex sistemáticos espaciados 1,5 m en sentido transversal al avance y otros 1,5 m en sentido longitudinal.

La excavación en el terreno se realizará en dos fases, avance y destroza. El pase de avance será de 1,5 m y el de destroza de 3,0 m. El avance y la destroza se proponen excavados en una sola fase.

5.2. Modelo axilimétrico. Determinación de la curva de desplazamiento-distancia al frente

El modelo axilimétrico representará la fase de avance del túnel. Esto es debido a que al ser está la primera fase a sostener en la excavación propuesta, es crítico determinar la descompresión del macizo que tiene lugar antes de la colocación del sostenimiento, simulando de este modo el efecto entibador del frente.

El modelo axilimétrico representa una sección circular, de manera que es necesario establecer un radio equivalente, que es este caso será 4,1 m². El modelo es el siguiente:



Fig. 13. Caso práctico: modelo de cálculo axilimétrico

En los modelos axilimétricos un factor crítico lo constituye el paso de avance; en este caso se establece un paso de 1 m, ya que se considera suficientemente pequeño para modelizar fielmente el comportamiento del terreno en las distancias al frente donde se piensa medir los desplazamientos. Estas distancias serán 0,5; 1; 1,5 y 2 m. Un ejemplo gráfico de los resultados de cálculo se muestra a continuación:

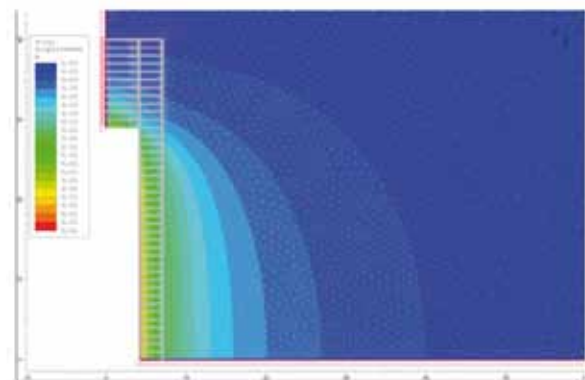


Fig. 14. Caso práctico: desplazamientos obtenidos en un caso de cálculo axilimétrico.

Los resultados de los 16 casos se muestran gráficamente en la siguiente gráfica:

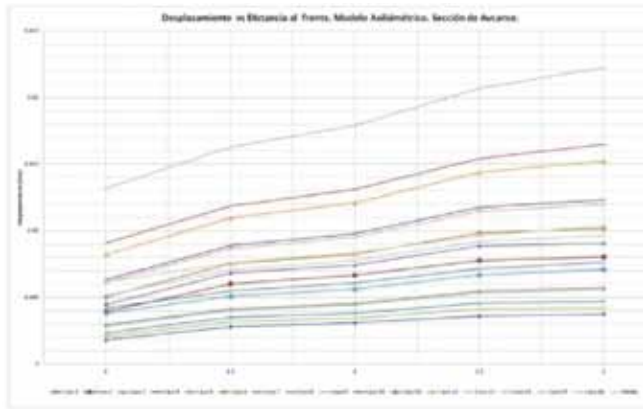


Fig. 15. Caso práctico: desplazamientos obtenidos entre 0 y 2 m de distancia al frente en todos los casos de cálculo axilsimétrico

De este modo, se registran los siguientes desplazamientos medios y desviaciones típicas a dichas distancias de los 16 casos calculados:

Distancia del frente (m)	Media (m)	Desv. Típica (m)
D(0)	0,0044	0,0023
D(0,5)	0,0062	0,0030
D(1)	0,0069	0,0033
D(1.5)	0,0081	0,0039
D(2)	0,0086	0,0042

Tabla 8. Caso práctico: resultados cálculo axilsimétrico

Al proponerse en el diseño inicial un pase igual a 1,5 m, se hallado las distribuciones estadísticas de desplazamientos para esa distancia. Asimismo, se ha calculado el intervalo de confianza para el desplazamiento medio calculado por medio de la fórmula de Schneider (1997). Estas se muestran en las siguientes gráficas:

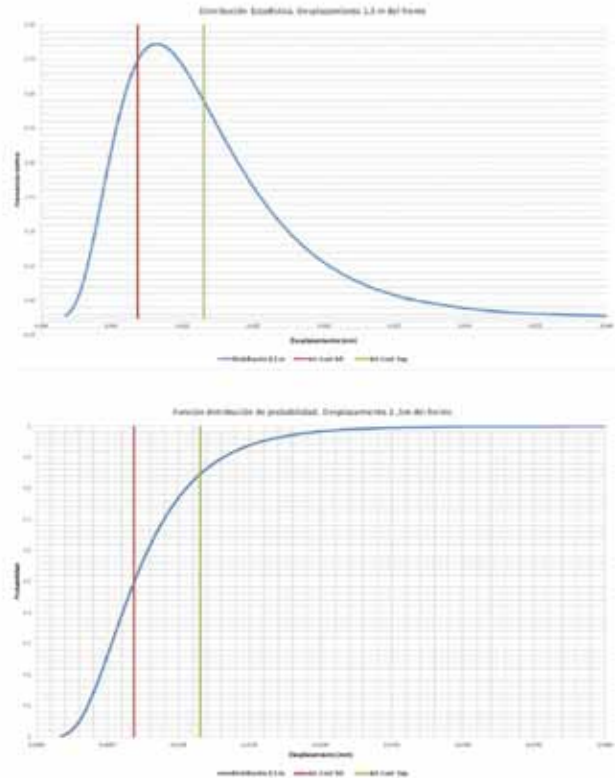


Fig. 16. Caso práctico: distribución estadística e intervalo de confianza de los desplazamientos

De este modo, el intervalo de desplazamientos calculado por medio de la fórmula de Schneider (1997) para 1,5 m de distancia al frente será:

Desplaz. 1,5 m del frente. Intervalo de confianza	
	Despl. (mm)
Límite Inferior	6,83
Límite Superior	11,52

Tabla 9. Caso práctico: intervalo de confianza para los desplazamientos a 1,5 m del frente

5.3. Modelo de sección de avance

El modelo de sección de avance en una fase intermedia de cálculo será el siguiente:

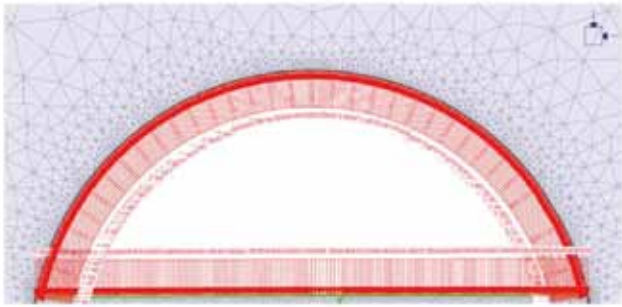


Fig. 17. Caso práctico: modelo de cálculo de L.C. en avance

En este caso, se evaluarán los 16 casos de cálculo mostrados en el punto anterior, resultando las siguientes líneas características, que han sido medidas en la clave de la sección de avance:

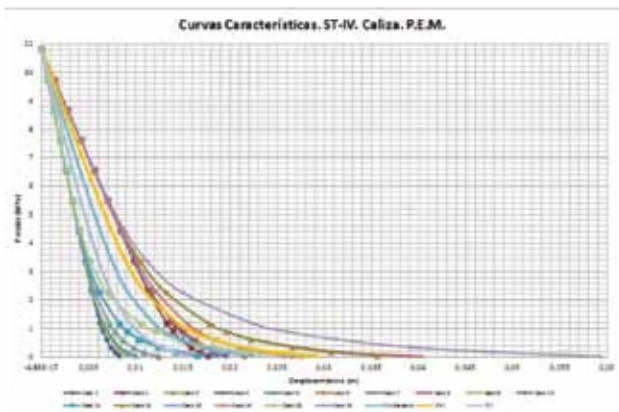


Fig. 18. Caso práctico: líneas características de los 16 casos de cálculo junto con línea media, caso (V+) y V(-)

Una vez establecidas las líneas características, y junto con los valores de desplazamiento a ciertas distancias del frente calculados en el punto anterior, es posible estimar las descompresiones para cada caso.

Como se mostraba en el punto anterior, se ha establecido un rango de desplazamientos para cada distancia al frente construyendo un intervalo de confianza de la media del desplazamiento. De este modo, al aplicar los valores extremos de dicho rango sobre la línea característica, se obtiene un rango de descompresión para cada caso.

Por lo tanto, cabe la posibilidad establecer un rango de valores para el cálculo de la sección de sostenimiento, pudiendo estudiar la influencia de los mismos en ella. En

el presente estudio se tomará el valor central del rango como valor medio.

Aplicando lo anteriormente descrito, al estudiar cada línea característica bajo estos valores se obtienen los siguientes rangos de descompresión para 1,5 m de distancia:

Distancia al frente (m)	Rango de descompresión (%)							
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
1,5	85-95	60-70	85-95	60-70	85-95	60-70	80-90	60-70

Distancia al frente (m)	Rango de descompresión (%)							
	Caso 9	Caso 10	Caso 11	Caso 12	Caso 13	Caso 14	Caso 15	Caso 16
1,5	85-95	60-70	80-90	60-70	85-95	60-70	80-90	60-70

Tabla 10. Caso práctico: descompresión calculada para los casos del P.E.M.

Registrándose para la media de los casos una descompresión de entre 75 %-85 % para una distancia de 1,5 m.

Si se realiza este cálculo para los casos de la media y los casos V(+) y V(-), se obtiene

	Rango de descompresión	
	Min.	Max.
V(+)	50	80
Media	65	75
V(-)	70	95

Tabla 11. Caso práctico: descompresión calculada para la media del P.E.M., caso V(+) y V(-)

Si se realiza la media de cada caso, el rango de descompresión será similar, aunque con un valor inferior más bajo: 65 %-85 %.

De este modo, se propone el valor medio del rango hallado en primer lugar, 80 %, al resultar un valor razonable para el caso estudiado. Si se deseara realizar un estudio de sensibilidad se podrían usar los valores de V(+) y V(-) para evaluar la respuesta del sostenimiento ante dichas variaciones.

En la siguiente figura se representa el intervalo de descompresiones calculado junto con las líneas características resultantes del cálculo:

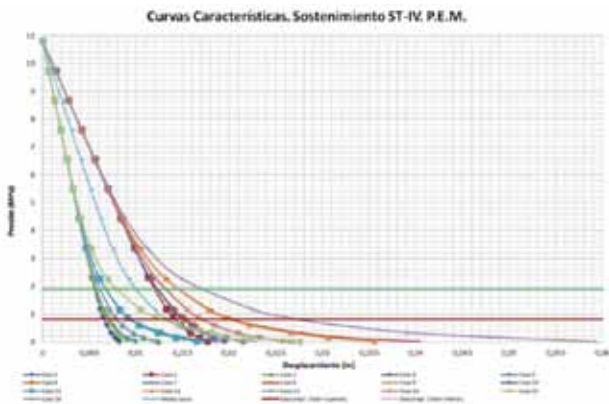


Fig. 19. Caso práctico: descompresión media estimada

Por otro lado, cabe comentar que, se ha detectado que la influencia del módulo de deformación de la roca es baja en los resultados.

Este hecho se detecta puesto que, para los casos donde menor descompresión se registra, el módulo de deformación usado corresponde al rango inferior, es decir, al Caso '-'; por el contrario en los casos donde mayor descompresión se detecta, el módulo es el correspondiente al Caso '+', por lo que se obtiene una correlación negativa, que hace que este parámetro no influya en exceso.

En la siguiente tabla se muestra lo comentado anteriormente; para descompresiones bajas el módulo de deformación es el correspondiente al Caso "-":

1,5 m	Caso 2	Caso 4	Caso 6	Caso 8	Caso 10	Caso 12	Caso 14	Caso 16
	+	-	+	-	+	-	+	-
60-70	-	-	-	-	-	-	-	-
	+	+	-	-	+	+	-	-
	+	+	+	+	-	-	-	-

Tabla 12. Caso práctico: estudio de influencia del módulo de deformación

De este modo, en la comprobación del sostenimiento sólo se tendrán en cuenta los parámetros de Resistencia a Compresión Simple, G.S.I y m_i , que sí se muestran más influyentes en el caso objeto de estudio.

Por último, el estudio de la corona de plastificación reporta unos resultados que se adaptan fielmente a una distribución normal, de esta manera se obtendrá:

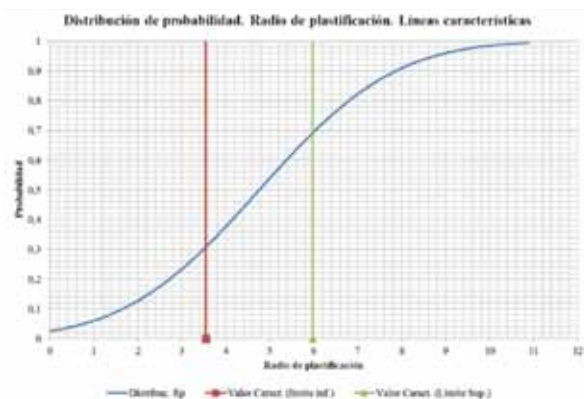
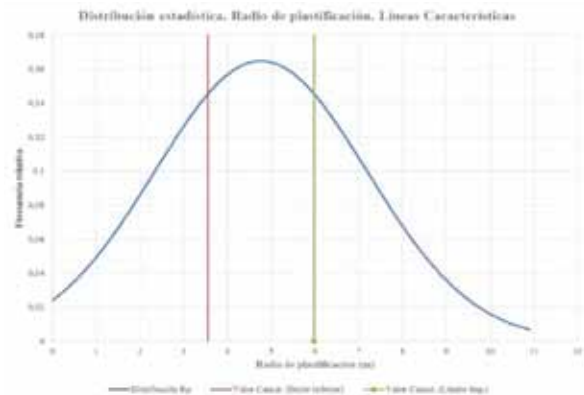


Fig. 20. Caso práctico: estimación de la longitud de bulones necesaria

Ascendiendo la media de los resultados obtenidos a 4,76 m. Este hecho indica que en gran parte de los casos los bulones de 4 m propuestos en el sostenimiento serían aceptables aunque su diseño sería demasiado ajustado; de igual modo lo hace el límite inferior del valor característico, que asciende a 3,5 m.

Atendiendo al cuadro anteriormente presentado, pueden clasificarse dos casos:

- Casos hasta 4,5 m de radio de plastificación.
- Casos con un radio mayor a 4,5 m.

Si se analizan los casos, se obtiene que en el primer caso los valores concernientes a la resistencia o calidad del macizo rocoso (R.C.S, G.S.I. y m_i) para casos menores a 4,5 m de radio siempre obtienen dos parámetros con Caso '+' y uno con caso '-'; para el segundo caso ocurre al revés, al menos dos parámetros obtienen Caso '-'.

De este modo, se puede extraer que, para los casos del límite inferior el rango de calidad del macizo adoptado (G.S.I.=35) y calidad de la roca mala, podrá ser necesario el cambio de sostenimiento a uno más pesado dotado de paraguas de sostenimiento en avance o a un refuerzo del sostenimiento planteado con empujados y cerchas más cercanas.

5.4. Cálculo de la sección de sostenimiento
El modelo de cálculo será el siguiente:

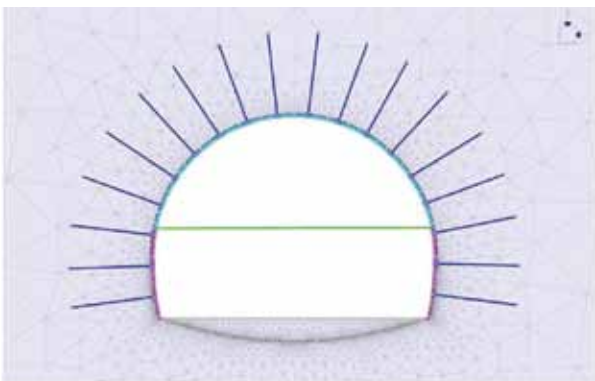


Fig. 21. Caso práctico: Modelo de comprobación del sostenimiento

Como se observa, tanto el sostenimiento como la excavación se dividirán en dos fases:

- Fase de avance
- Fase de destroza

Debido a los cálculos mostrados en el punto anterior, se suprime el módulo de deformación del grupo de parámetros que son tomados como variables aleatorias. De ese modo se tendrán los siguientes casos de cálculo:

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
RCS	+	-	+	-	+	-	+	-
GSI	+	+	-	-	+	+	-	-
m_i	+	+	+	+	-	-	-	-

Tabla 13. Caso práctico: casos de cálculo para la comprobación del sostenimiento

5.4.1. Estimación de las fases y de los elementos de sostenimiento críticos

Para la estimación de los elementos críticos del sostenimiento, se deberán extraer los esfuerzos en cada elemento en cada fase que se desee estudiar. De este modo, en el caso objeto de estudio se estudiarán las fases de colocación del sostenimiento tanto en avance como en destroza.

De este modo, se comprobarán por medio de los diagramas de interacción M-N y Q-S tanto en el caso de las cerchas como en el caso del hormigón. En ellos se representarán los siguientes elementos:

- Diagrama de interacción:
 - Verde para un F.S.= 1,5
 - Amarillo para un F.S.=1,3
 - Rojo para un F.S.=1
- Pares esfuerzos y/o esfuerzos momentos:
 - Verde para el caso de V(-) o rango superior del intervalo de confianza.
 - Amarillo para la media
 - Rojo para el caso del V(+) o rango superior del intervalo de confianza

De esta manera se han obtenido los siguientes diagramas:

SOSTENIMIENTO DE AVANCE

Hormigón proyectado:

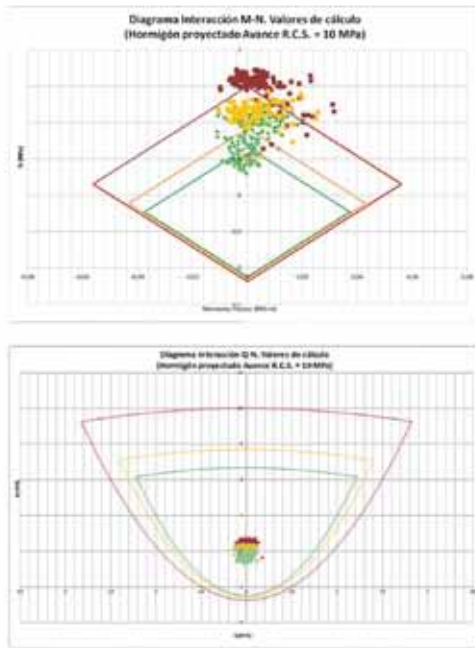


Figura 22 Caso práctico: Hormigón sección de avance, diagramas M-N y Q-N Fase de avance

Cerchas:

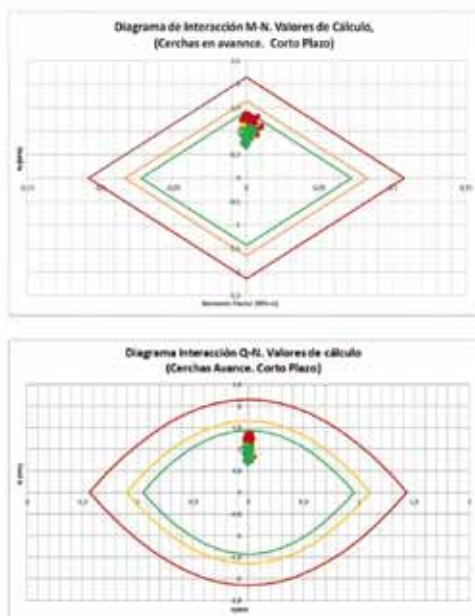


Figura 23 Caso práctico: cerchas sección de avance, diagramas M-N y Q-N Fase de avance

SOSTENIMIENTO DE DESTROZA

Hormigón proyectado del avance:

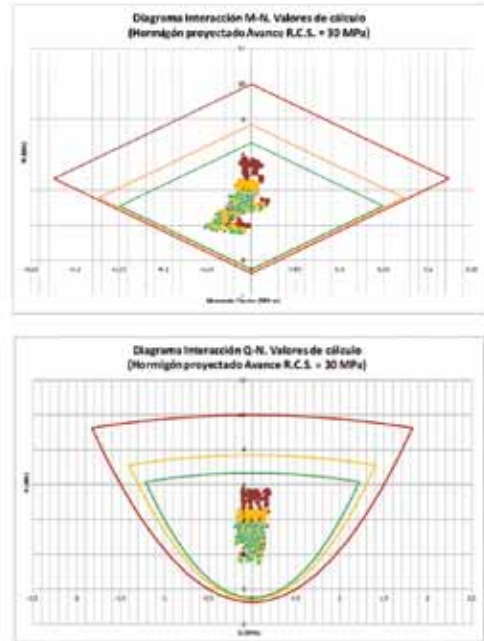


Figura 24 Caso práctico: hormigón sección de avance, diagramas M-N y Q-N Fase de destroza

Cerchas de Avance:

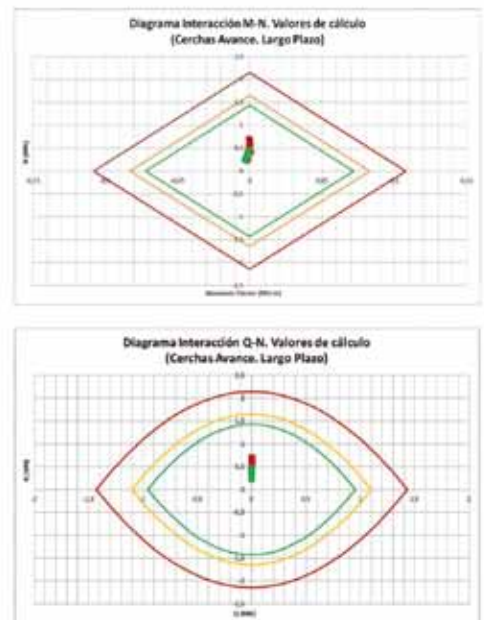


Figura 25 Caso práctico: cerchas sección de avance, diagramas M-N y Q-N Fase de destroza

Hormigón proyectado destroza:

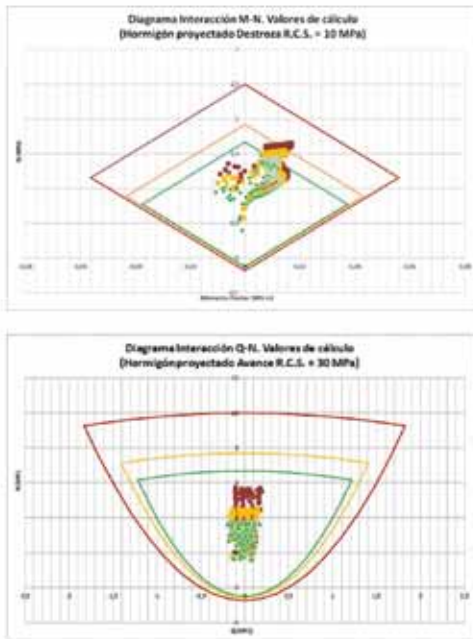


Figura 26 Caso práctico: hormigón sección destroza, diagramas M-N y Q-N Fase de destroza

Cerchas destroza

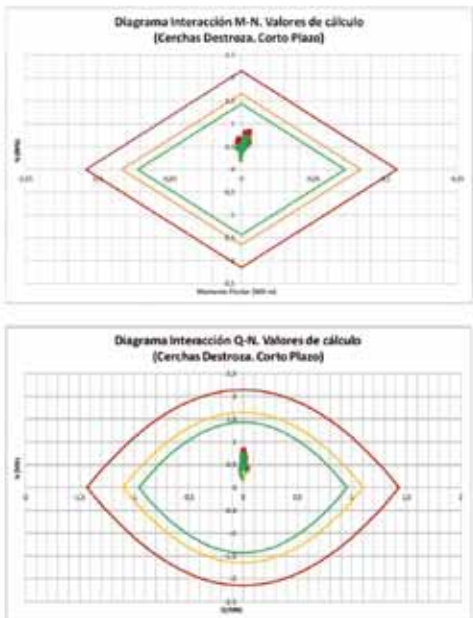


Figura 27 Caso práctico: cerchas sección destroza, diagramas M-N y Q-N Fase de destroza

Como se observa fácilmente, el elemento donde se detecta no sólo una mayor cantidad de pares de esfuerzos-momentos más cercanos a la rotura –o sobrepasándola– junto con una notable dispersión de los resultados es el hormigón proyectado en la fase de avance.

Este será el elemento crítico en el cálculo realizado.

5.4.2. Estudio de las fases y elementos críticos detectados en el cálculo

Una vez detectada la fase y el elemento crítico de sostenimiento, el siguiente paso es estudiar en profundidad las causas de por qué constituyen un elemento crítico y sobre qué factores hacen que esto sea así.

Como es fácilmente observable en el diagrama de interacción, el principal problema en el hormigón lo constituye el elevado esfuerzo axial que actúa sobre el mismo, que hace que la nube de puntos correspondientes al límite superior del intervalo de confianza (V(+)) se encuentre fuera del diagrama en su mayor parte. Igualmente, la nube de puntos correspondiente a la media se encuentra por encima del factor de seguridad de 1,3 e incluso por encima de 1 en algún caso.

Asimismo, se revela una gran variabilidad en los casos de cálculo, que queda representada en la amplitud del intervalo de confianza. Como se observa la nube de puntos correspondiente al límite inferior se encuentra muy separada –según el eje x, eje de axil– de la correspondiente al límite superior, lo cual denota una gran variabilidad en los resultados de los 8 casos realizados.

Generalmente, el problema del axil podría provenir de la combinación de varios factores:

- Elevado estado tensional.
- Descompresión escasa.
- Reducida resistencia a compresión del hormigón en fases tempranas.

Por lo tanto, las soluciones en ese sentido estarían muy claras; sin embargo, es interesante realizar un estudio según el margen de seguridad para establecer la probabilidad de fallo.

De esta manera, se aplicará el margen de seguridad, de manera que para su cálculo se establecerá dicho margen en cada punto donde se hayan medido los esfuerzos de la siguiente manera:

$$M = R.C.S. - \left(\frac{N}{A} + \frac{M}{2 \cdot I} \right) [5]$$

Siendo:

- R.C.S.: resistencia a compresión en esta fase, 10 MPa
- N: esfuerzo axial en el punto de cálculo
- M: momento flector en el punto de cálculo
- A: área de la sección de hormigón (espesor [e] x espaciado de cerchas [S])
- I: momento de inercia de la sección de hormigón (e x S)

De esta manera, para cada uno de los 8 casos analizados se obtendrá el siguiente gráfico:

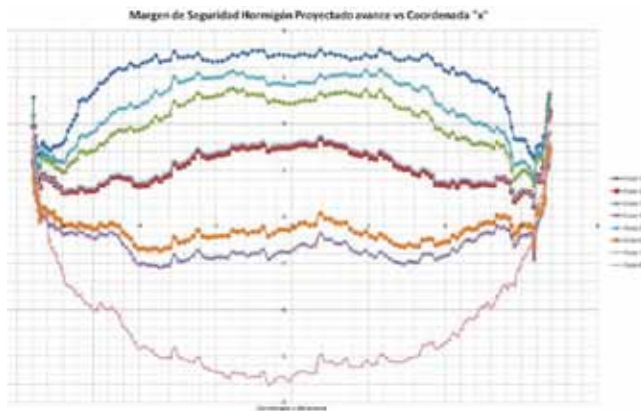


Fig. 28. Caso práctico: comparativa margen de seguridad vs coordenada x en los 8 casos calculados

Como se observa, existen 3 casos donde el margen de seguridad es claramente menor que 0; siendo estos los casos 4, 6 y 8.

A este respecto, si se atiende a la tabla de casos del P.E.M. mostrada al principio de este punto se puede observar que estos tres casos contienen al menos dos casos “negativos” del P.E.M, siendo siempre uno de ellos la R.C.S. y el G.S.I en dos de ellos:

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
RCS	+	-	+	-	+	-	+	-
GSI	+	+	-	-	+	+	-	-
m_i	+	+	+	+	-	-	-	-

Tabla 14. Caso práctico: estudio de la influencia de los parámetros

Asimismo, se observa cómo en los tres casos, la plastificación alcanzada es la máxima con respecto a todos los casos, con radios comprendidos entre 4,5 y 6,7 m sobre el avance.

Este hecho está directamente correlacionado con el hecho de encontrar las peores condiciones en el terreno, lo cual implica que los bulones propuestos serán insuficientes desde la primera fase en casos extremos como los planteados.

Por otro lado, y en relación con lo anterior, existe una correlación directa entre el radio de la corona de plastificación sobre la clave y el margen de seguridad en este caso.

Por lo tanto, y en base a lo anterior se puede concluir que, para la profundidad del túnel, en los casos extremos será necesario el uso de empujados o paraguas de sostenimiento, así como el refuerzo del sostenimiento en la fase de avance en zonas con G.S.I=35.

Basándose en el margen de seguridad se analiza la probabilidad de fallo, se obtiene la siguiente gráfica para $p(M < 0)$ asumiendo una distribución normal:



Fig. 29. Caso práctico: probabilidad de fallo vs coordenada x

Como se observa, se alcanza una probabilidad de fallo cercana al 35 % en casi todo el sostenimiento, incrementándose ésta en los puntos singulares cercanos al contacto solerahastial (donde el flector suele sobreestimarse por ser cambios de sección bruscos).

Igualmente, resulta interesante la comparativa entre la probabilidad de fallo hallada por medio del margen de seguridad y métodos como el clásico del factor de seguridad o un método básico frecuentista que calcula la probabilidad según la siguiente ecuación:

$$p(M < 0) = \frac{\text{Caso } M_{media} < 0}{\text{Casos totales}} \quad [6]$$

Este último método se acerca sensiblemente a la probabilidad de fallo calculada por medio del margen de seguridad, siendo esta cercana al 38 %.

En el caso del factor de seguridad, la probabilidad es sensiblemente inferior, por lo que se entiende que, como se ha comentado anteriormente, no resulta recomendable para el cálculo de la probabilidad de fallo, como se muestra en este caso.

Por último, si se hallan las distribuciones de convergencia y del radio de plastificación en esta fase. Las distribuciones de convergencia serán las siguientes: figura 30.

Pudiendo comprobar que, con el sostenimiento y las hipótesis planteadas, la convergencia se espera que sea menor a 0,4 % con un 70 % de probabilidad.

Del mismo modo, para el radio de plastificación se obtendrá: figura 31.

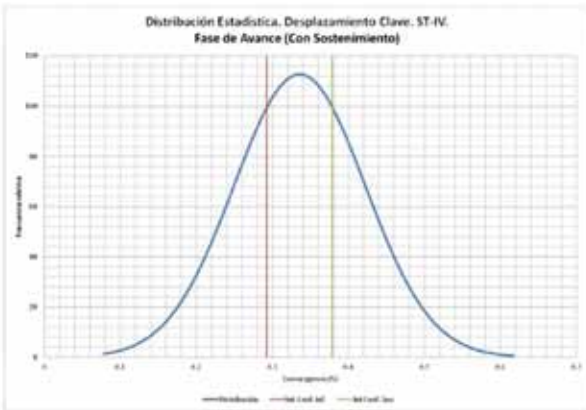


Fig. 30. Caso práctico: distribución estadística de convergencias finales e intervalo de confianza

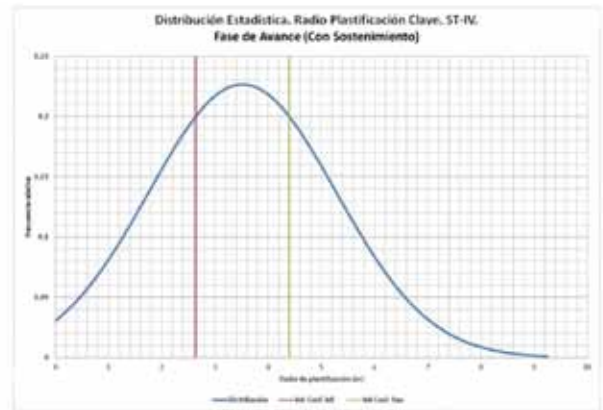


Fig. 31. Caso práctico: distribución estadística resultante para el radio de plastificación final. Estimación de longitud de bulones

Y, como se observa, el radio de plastificación no se espera que exceda los 4,3 m con un 70 % de probabilidad. De esta forma, como se viene comentando, en los casos extremos se deberá sustituir los bulones por empquetados o paraguas de sostenimiento.

6. Comparativa del método propuesto con los métodos usuales de cálculo

En este punto se compararán los resultados de las diferentes partes de la metodología propuesta con los resultados obtenidos en el mismo modelo de cálculo por medio de cálculos deterministas que tomarán como parámetros de partida los estimados a partir de las siguientes metodologías:

- Estimación del valor característico por medio de la metodología propuesta por Bond & Harris (2008).
- Estimación del valor característico por medio de la metodología propuesta por Schneider (1997).
- Estimación del valor característico por medio de intervalos de confianza clásicos.
- Uso de los valores medios de la muestra.

De este modo, siendo la roca la misma propuesta en el caso práctico, los parámetros de cálculo para los cálculos deterministas serán los siguientes:

Parámetro de cálculo. Comparativa Caso práctico M.E.F.			
Parámetro	Schneider	Bond & Harris	Int. Confianza
RCS (MPa)	39,41	49,14	44,26
m_i	6,3	6,3	6,3
GSI	37,5	38,81	38,61
E (MPa)	9.084,88	9.050,95	8.817,82

Tabla 15. Caso práctico: parámetros de cálculo para la comparativa

Permaneciendo como constantes los datos que se consideraban constantes anteriormente.

6.1. Cálculo de líneas características y de la descomposición del terreno

La aplicación del método propuesto reporta resultados óptimos al poder establecer por medio de la aplicación de las fórmulas [3] y [4] basadas en la fórmula de Schneider (1997) un intervalo de confianza tanto para las líneas características calculadas como para los desplazamientos obtenidos del cálculo axilsimétrico.

Como se observa, dicho intervalo de confianza abarca desde los resultados menos conservadores, obtenidos para la media, hasta los resultados más conservadores obtenidos para el valor característico calculado por medio de la fórmula de Schneider (1997) presentando la media del P.E.M. como una buena referencia central.

De este modo, el método propuesto se muestra efectivo al abarcar las variaciones en los resultados debidas a la aplicación de diferentes formulaciones de cálculo del valor característico y provee de un intervalo suficientemente amplio para poder estimar la incertidumbre del cálculo debida a las mismas.

Asimismo, esta incertidumbre puede cuantificarse estimando la diferencia entre $V(+)$ y $V(-)$ y la distancia de las mismas a la media de los cálculos de P.E.M.

Este hecho se observa en los siguientes gráficos:

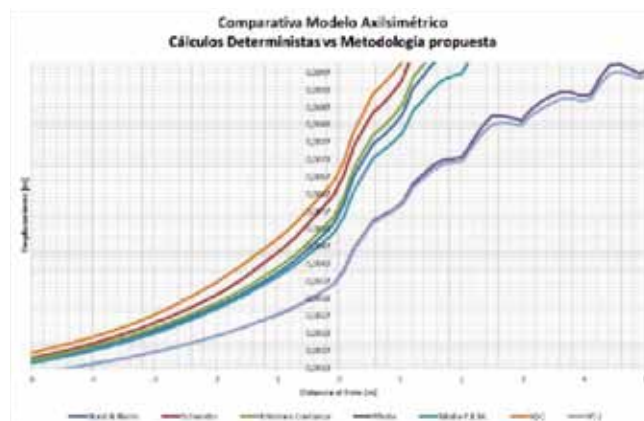


Fig. 32. Comparativa: resultados modelo axilsimétrico

para el dimensionamiento del sostenimiento provee de un rango de resultados ajustado a los resultados que se obtendrían por medio de cálculos deterministas con diferentes parámetros, proveyendo del mismo modo de una cuantificación de la incertidumbre inherente al cálculo.

7. Conclusiones

Se ha comprobado la eficacia del uso del P.E.M. para el establecimiento de las distribuciones de esfuerzos en el sostenimiento, así como de sus estadísticos, que permiten determinar no sólo un valor medio sino la incertidumbre presente en cada sección, elemento y tipo de esfuerzo.

De igual modo, se ha presentado una metodología de uso de la fórmula de Schneider (1997) para el cálculo de intervalos de confianza en dichos esfuerzos y detección de fases críticas por medio de la dispersión de dichos intervalos, comprobándose como muy eficaz en la detección de las secciones críticas por medio del uso de intervalos de confianza de los esfuerzos.

Se han propuesto diferentes representaciones gráficas espaciales de la variabilidad de los esfuerzos, probándose su utilidad en medida de la incertidumbre de los mismos.

Asimismo, se ha comprobado la idoneidad del cálculo del margen de seguridad en función de los resultados medios obtenidos de la aplicación del P.E.M. para la estimación de los esfuerzos en el sostenimiento.

Se ha comprobado la idoneidad del uso del P.E.M. para el estudio de la corona de plastificación y, con ello, de la longitud de los bulones necesaria tomando como base la propuesta de M. Cai (2011).

En cuanto al coste temporal, aunque éste puede parecer alto, la metodología se puede implementar fácilmente por medio de hojas de cálculo que recojan los valores resultantes de los cálculos. En vistas a un futuro sería muy interesante el estudio de su implementación directa en programas de M.E.F., lo cual reduciría su coste temporal drásticamente.

Por último, cabe comentar que esta metodología se propone para un caso en 2D, aunque es igualmente aplicable para casos 3D y para otros tipos de cálculos diferentes al propuesto. **ROP**



Referencias

- Baecher. G. (1972). "Site Exploration: a Probabilistic Approach". Tesis M.I.T.
- Baecher. G, Chistian. John T. (2003). "Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering" . Ed. Wiley.
- Bond, A.J. (2008) A procedure for determining the characteristic value of a geotechnical parameter
- Bond A.J. and Harris, A.J. (2008) Decoding Eurocode 7. Taylor and Francis. London
- Cai, M. (2011) "Rock Mass Characterization and Rock Property Variability Considerations for Tunnel and Cavern Design". Rock Mech Rock Eng (2011) 44:379–399
- Carranza- Torres, C., and Diederichs, M. 2009. "Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets". Tunnelling and Underground Space Technology 24, 506 532.
- Chistian, J.T. y Baecher G.(1999) "Point estimate method as a numerical quadrature" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering. Pp 779 – 786 Septiembre 1999
- Einstein H.H. (2003) Uncertainty in Rock Mechanics and Rock Engineering—Then and Now ISRM 2003— Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003
- Einstein, H.H.; Karam, K. (2001): "Risk assessment and uncertainties". Proc. International Conference on Landslides - Causes, Impacts and Countermeasures, Davos. 2001
- Hita María, Juan Luis (2015), "Aplicación de métodos estadísticos a la ingeniería de túneles y obras subterráneas" Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Diederichs, M.S. and Corkum, B. (2008). Kersten lecture: Integration of geotechnical and structural design in tunnelling. Proceedings University of Minnesota 56th Annual Geotechnical Engineering Conference. Minneapolis, 29 February 2008, 1-53
- Kalamaras G.S, Xu S, Russo G. , Grasso P., (1999). "Estimating the reliability of the primary support for a given tunnel section". Proc.of 37th U.S. Rock Mech. Symposium. Vail (Colorado, U.S.).
- Langford, J.C.(2013) "Application of reliability methods to the design of underground structures" Tesis Doctoral Universidad de Kingston, Ontario (Canada)
- Orr, Trevor L.L. (1997) Selection of characteristic values and partial factors in geotechnical designs to Eurocode 7 Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, Trinity College, University of Dublin, Dublin, Ireland
- Phoon, K. K., "Towards Reliability-based Design for Geotechnical Engineering", Special Lecture at Korean Geotechnical Society, 9 July 2004, Seoul.
- Pohl, C. Determination of characteristic soil values by statistical methods (2011). Ponencia en el I.S.G.S.R.
- Rosenbleuth. E. (1975). Point estimates for probability moments. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Mexico 20, D.F., Mexico
- Schneider, H.R. (1997). "Definition and determination of characteristic soil properties." 12th Int.Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Hamburg: Balkema.