

El valor umbral óptimo del RQD sobre redes fractales de fracturas

Carlos Paredes*, Santiago de Vicente*, Jesús Pedro de Vicente, Alberto Herrera, María López, Ismael Osuna, Juan Sordo, Ricardo Laín**.

* *Departamento de Matemática Aplicada y Métodos Informáticos*

** *Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas*

Este trabajo constituye la aportación realizada en la asignatura "Complejidad, Caos y Fractales" por cinco de sus alumnos matriculados. Su contenido aborda la determinación apropiada del RQD (Rock Quality Designation, Deere et al. 1967) como parámetro discriminante entre macizos según su grado de fracturación a tenor del comportamiento anisótropo de éste; un problema frecuente que surge en la realización de estudios geotécnicos de los medios fracturados. El resultado obtenido ofrece una solución "óptima", descartando la alternativa "tradicional" (de acuerdo con la definición de RQD se toma un espaciado mínimo de 0.1m entre discontinuidades), para cada macizo fracturado y según sea la caracterización fractal de los espaciados entre las fracturas.

Introducción

La utilización del RQD en los trabajos de ingeniería geotécnica es una práctica muy común, ya que se trata de un parámetro que permite caracterizar y categorizar geomecánicamente los macizos rocosos. Al menos dos razones lo fundamentan: a) resulta ser una medida de obtención relativamente simple, de la misma forma que se hace sobre sondeos puede hacerse sobre afloramientos rocosos; y b) la definición del RQD se encuentra universalmente reconocida, determinada con el mismo procedimiento, lo que permite efectuar comparaciones entre diferentes ubicaciones rocosas y su clasificación.

Para el cálculo del RQD, ya sea sobre sondeos o itinerarios lineales de longitud L entre dos discontinuidades, se evalúa el cociente entre el total de sumar las longitudes de tramos no fracturados mayores que un umbral (t) entre L . Es decir, el RQD está definido en términos del porcentaje de tramos de roca intacta (espaciados entre discontinuidades) mayores que t . De esta forma se facilita una cuantificación porcentual del grado de roca intacta -no fracturada- respecto al valor mínimo considerado t .

Sin embargo, con el fin de progresar y mejorar la aplicación y comprensión del comportamiento del RQD es preciso considerar algunos de los inconvenientes asociados a su uso. En la práctica, resulta que los valores del RQD entre 40% - 60% se encuentran mucho menos frecuentemente que los valores extremos superiores al 80% o inferiores al 10%. Si se supone que no hay una razón física que justifique que puede encontrarse una geometría específica de las discontinuidades a favor de otra (y por lo tanto de los espaciados entre estas), entonces la menor frecuencia de algunos valores del RQD puede deberse a cómo ha sido definido éste.

Además, se sabe que, a partir de un único conjunto de espaciados, es posible obtener un rango de valores posibles del RQD cambiando el valor de t y/o de L . Si bien, frente al aumento de L el RQD posee un comportamiento asintótico hacia el valor real. En los estudios geomecánicos se ha establecido $t=0.1m$ como valor umbral universal, si bien se trata de un valor elegido arbitrariamente. Por ello, dado que el cambio en el valor tomado para t tiene efectos notables sobre el RQD, se hace necesario estudiar un procedimiento que permita establecer el valor más apropiado para el umbral a utilizar basándose en las características de los espaciados entre las discontinuidades que se encuentran en el macizo en vez de usar un valor típico.

Las discontinuidades existentes en la masa rocosa le confieren a ésta características de heterogeneidad y anisotropía, ambas de vital importancia ya que afectan, por ejemplo, al comportamiento de un almacenamiento de CO_2 , de residuos sólidos urbanos o radiactivos, un acuífero subterráneo, un yacimiento de hidrocarburos, etc. que pudiera encontrarse en su interior. Esta variabilidad espacio-direccional en la geometría de la red de discontinuidades es la que se utiliza en este trabajo para seleccionar el valor apropiado de t para calcular el RQD. Aunque la heterogeneidad es probablemente uno de los aspectos más importantes en la caracterización de los macizos rocosos, se ha tomado la anisotropía como primera característica a considerar en la definición de t , al ser ésta una cualidad intrínseca a las discontinuidades.

Se presenta una técnica para la determinación del umbral RQD apropiado para macizos rocosos en los que las discontinuidades se ubican espacialmente de forma invariante al cambio de escala, lo que da lugar a que los espaciados se distribuyan mediante una ley de potencia. Es frecuente encontrar este tipo de distribuciones habida cuenta de que los espaciados son el resultado de un proceso de fragmentación repetitivo y autoorganizado de los bloques litosféricos sobre un amplio rango de escalas. Una evidencia experimental de este fenómeno es la ley de Gutenberg-Richter. Además se muestra cómo el uso del valor óptimo calculado mejora la utilidad del RQD ya que lo convierte en una medida mucho más discriminadora que considera no sólo la heterogeneidad del macizo, en cuanto a la densidad de la fracturación, sino también la anisotropía.

Variación del RQD en los macizos rocosos

Los macizos rocosos se encuentran y se han encontrado, desde los tiempos de su formación, sometidos a una serie de esfuerzos que, en su mayoría, son de

origen tectónico. Superada la capacidad competente de la roca, su efecto produce la ruptura, dando lugar a fracturas y fallas. Comúnmente, cada discontinuidad tiene un aspecto de superficie tridimensional alabeada casi plana y suele agruparse en familias pseudoparalelas con aquellas que son singenéticas para un campo de esfuerzos particular. Cuando se analiza el conjunto de familias de fracturas sobre un transecto (camino unidimensional que se traza sobre el macizo: itinerario, sondeo, calicata, galería, etc.) la importancia de la fracturación se cuantifica mediante la frecuencia de fracturación (λ en m^{-1}), valor que se encuentra relacionado con el número de discontinuidades de cada familia que se encuentran en el (λ_i , para la familia i -ésima). En 1983, los profesores J. A. Priest y J. A. Hudson mostraron que, para una masa rocosa con n conjuntos de discontinuidades planas y persistentemente pseudo paralelas, la frecuencia de fracturación global λ a lo largo de un transecto es:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i |\cos \theta_i| \quad (1)$$

donde θ_i es el ángulo agudo que forma la dirección del transecto con la normal a la familia i -ésima.

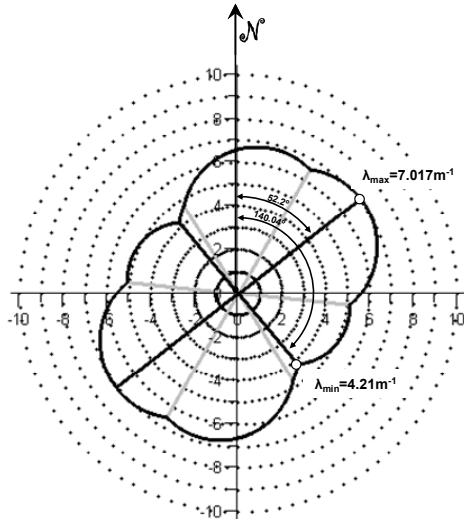


Figura 1. Representación en coordenadas polares de la frecuencia de (1) para las 4 familias de fracturas de la Tabla 1, para direcciones de muestreo en el plano horizontal. Los segmentos en gris denotan las direcciones de las frecuencias mínimas locales.

Familia	Dirección (°) dir.buz./buz.	Frecuencia (m^{-1})
1	58 / 25	1.96
2	186 / 81	2.87
3	50 / 72	3.61
4	120 / 68	2.44

Tabla 1. Parámetros de las familias utilizadas para representar la Figura 1.

Esta expresión muestra cómo, para una situación general en la que cada familia de discontinuidades posee un valor de su frecuencia de fracturación diferente del resto, la frecuencia de fracturación global del macizo (Figura 1) tiene un comportamiento anisótropo (según la dirección de muestreo). La anisotropía de λ en función de la dirección del transecto posee una serie de mínimos locales

asociados a las direcciones medias (Tabla 1) que han sido establecidas para cada familia a partir de datos de campo estructurales.

Dado que el RQD depende de la longitud total de espaciados mayores que un valor umbral, para una longitud de muestreo y umbral fijos, a medida que aumenta el número de fracturas en el transecto, su frecuencia de fracturación aumenta, la longitud de tramos no fracturados disminuye y de la misma forma lo hace el RQD. Si los espaciados entre fracturas (tramos de roca intacta) se distribuyen según una función de densidad de probabilidad $f(x)$, la probabilidad de encontrar un espaciado aleatoriamente elegido se encuentre entre x y $x+dx$ es $f(x)dx$. Si sobre un transecto de longitud L la frecuencia de discontinuidades es λ , se encontrarán un total de λL discontinuidades o espaciados. Entonces, el número de espaciados entre x y $x+dx$ es $\lambda L f(x)$, cubriendo una longitud de $\lambda L f(x) dx$. Lo que permite definir un valor teórico del RQD mediante el % de longitud, frente al total L , de la suma de todas las longitudes $\lambda L f(x) dx$. Esta suma se efectúa para todos los espaciados x comprendidos entre el valor umbral admisible t y la longitud máxima posible L :

$$RQD(\lambda, t, L) = 100 \lambda \int_t^L x f(x) dx \quad (2)$$

Normalmente $t \gg L$ ($t=0.1m$ y $L \propto 10^2m$), por lo que en la práctica el valor teórico del RQD se determina a partir de $RQD(\lambda, t, \infty)$. Esta clara dependencia del RQD con λ provoca su comportamiento anisótropo. Sin embargo, la obtención de los valores del RQD a partir de datos reales presenta leves variaciones frente a la dirección de muestreo. Sus valores son normalmente próximos al 80%, por lo que su representación polar sería prácticamente isotrópica. Este hecho, lejos de la realidad anisótropa del medio fracturado, sugiere que el RQD debiera corregirse para reflejar la anisotropía del medio analizado y tomar un rango de valores más amplio (entre 0% y 100%) y discriminatorio (no sólo el 20% de los posibles) de lo que ocurre para cada dirección. Como solución a esta situación se propone examinar en (2) si una elección apropiada de t pudiera maximizar el rango de valores que toma el RQD para cada λ que se encuentre entre los valores extremos de la frecuencia de fracturación λ_{max} y λ_{min} . La búsqueda del valor de t apropiado (que se denotará por t^*) se efectuará analíticamente mediante la maximización de:

$$\Delta RQD(\lambda_{min}, \lambda_{max}, t, \infty) = RQD(\lambda_{min}, t, \infty) - RQD(\lambda_{max}, t, \infty) \quad (3)$$

es decir, determinando el t^* que verifica:

$$\frac{d}{dt} \Delta RQD(\lambda_{min}, \lambda_{max}, t^*, \infty) = 0 \quad (4)$$

Sustituyendo (2) en (3), derivando para obtener la ecuación (4), y teniendo en cuenta la regla de Leibnitz para las integrales definidas se llega a la ecuación general:

$$\lambda_{min} \left[-t^* f_{min}(t^*) + \int_{t^*}^{\infty} \frac{\partial}{\partial t} x f_{min}(x) dx \right] - \lambda_{max} \left[-t^* f_{max}(t^*) + \int_{t^*}^{\infty} \frac{\partial}{\partial t} x f_{max}(x) dx \right] = 0 \quad (5)$$

que es válida para aquellas funciones de distribución de espaciados definidas en t^* y siendo $f_{min}(x)$ y $f_{max}(x)$ aquellas asociadas a las direcciones en las que se encuentran λ_{min} y λ_{max} , respectivamente.

Pareto como distribución de espaciados en el RQD

Aunque para la modelización estadística de los espaciados entre discontinuidades rocosas se han aplicado muchas funciones de distribución distintas, entre las más frecuentemente utilizadas (exponencial negativa, gamma, Weibull, log normal), una de las más simples y cuya aplicación tiene un fundamento teórico inspirado en el proceso físico de fracturación, es la distribución de Pareto. El material rocoso puede fragmentarse por muy diversas causas: por meteorización o ataque directo de los elementos atmosféricos, por explosión o variaciones súbitas de la presión por impacto de una onda de choque, o por exceso de los límites de resistencia del material a la acción de fuerzas tectónicas. En cualquiera de estos casos, el macizo rompe con mayor frecuencia a través de ciertos planos de debilidad, diaclasas, juntas, fracturas o fallas que a través de la roca sana. Una gran variedad de estos procesos de fragmentación puede interpretarse en términos de dimensión fractal de probabilidad o grado de fracturación α .

Según este comportamiento, el número de fragmentos $N(x)$ cuyo tamaño es mayor que x es proporcional a $x^{-\alpha}$ (habitualmente $2 < \alpha < 3$). Un sencillo modelo sintético, que utiliza la información de estos planos persistentes en el medio, y la invarianza al cambio de escala del proceso de fragmentación, permite generar una distribución de tamaños de bloques (Figura 2) que se rige por una ley de potencia $x^{-\alpha}$. El proceso, a cada escala, mantiene sin romper un número de bloques n . El resto, rompe según un patrón de fracturas ortogonales. Sobre estos segundos se repite el proceso a una escala b veces inferior, manteniendo n bloques sin romper y fracturando el resto.

Si, por ejemplo, como se muestra también en la Figura 2, los cuatro primeros bloques se reubican secuencialmente, y se muestrease según un transecto lineal, el conjunto de espaciados entre fracturas también se distribuirá de la misma forma que el tamaño de bloques. Para el modelo bidimensional, puede demostrarse que, en general:

$$\alpha = \frac{\log(b^2 - n)}{\log b}$$

Una variable aleatoria se distribuye según una ley de Pareto si la probabilidad es inversamente proporcional a una potencia del valor de la variable:

$$\Pr[X > x] = Cx^{-\alpha}; \forall x > \gamma \quad (6)$$

siendo α el parámetro de la distribución. A partir de (6) se determina la función de densidad de probabilidad:

$$f(x) = C\alpha x^{1-\alpha}; \forall x > \gamma \quad (7)$$

y, teniendo en cuenta la condición de normalización en $f(x)$ (como $\int_{\gamma}^{\infty} f(x)dx = 1$), la constante de proporcionalidad

$C = \gamma^{\alpha} > 0$. Una vez establecida $f(x)$, puede utilizarse ésta en (2) para determinar (5). Sin embargo, interesa expresar $f(x)$ incorporando λ antes de operar, para reducir el número de parámetros en $RQD(\lambda, t, \infty)$. Para ello, si se tiene en cuenta que el espaciado medio $\langle x \rangle$ es el inverso de la frecuencia de fracturación λ , entonces:

$$\langle x \rangle = \int_{\gamma}^{\infty} x \gamma^{\alpha} \alpha x^{1-\alpha} dx = \frac{\gamma^{\alpha}}{\alpha - 1} = \lambda^{-1} \quad (8)$$

donde se deduce para que $\langle x \rangle > 0$ ha de ser $\alpha > 1$. Esta relación permite reescribir (7) como:

$$f(x) = \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha \lambda x} \right)^{\alpha} \frac{\alpha}{x}; \forall x > \gamma \quad (9)$$

y sustituyendo (9) en (2) e integrando cuando $L \rightarrow \infty$:

$$RQD(\lambda, t, \infty) = \begin{cases} 100 \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha \lambda t} \right)^{\alpha - 1}; \forall t \geq \gamma; \forall \alpha > 1 \\ 100; \forall t < \gamma \end{cases} \quad (10)$$

La incorporación de una distribución de espaciados de tipo fractal crea un comportamiento de tipo ley de potencia en el RQD.

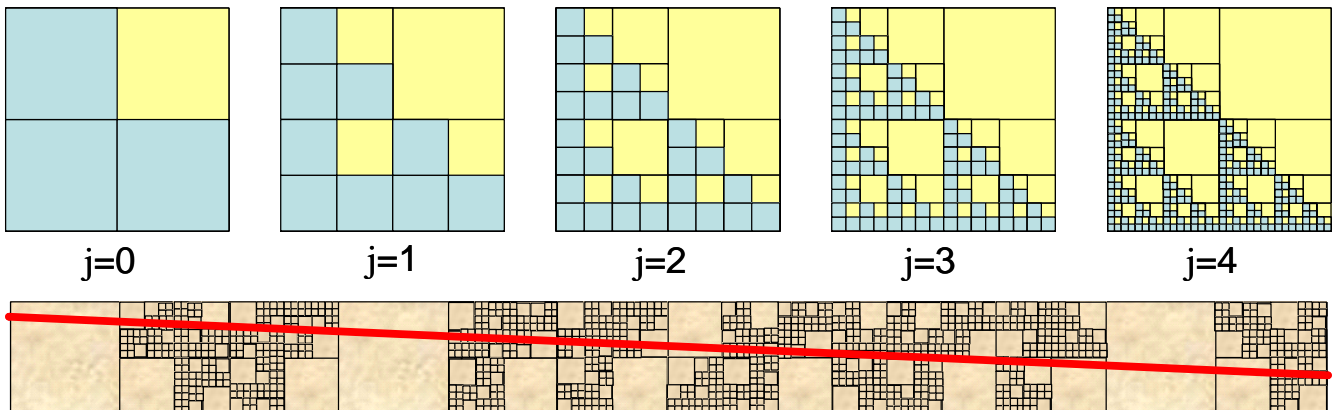


Figura 2. (arriba) Ilustración del modelo de fragmentación 2D hasta $j=4$ que genera una distribución de bloques de tipo fractal ($\alpha=1.58$) con $n=1$ y $b=2$. (abajo) Modelo simple de medio fracturado creado mediante redistribución aleatoria de los bloques generados para $j=5$ y colocación lineal (hipotética traza de muestreo en rojo).

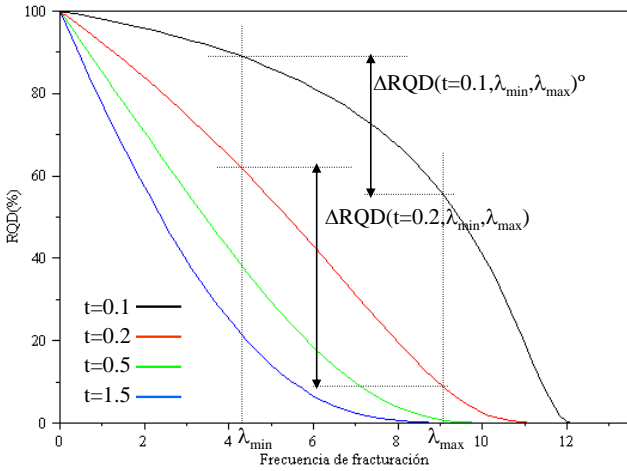


Figura 3. Dependencia del RQD teórico (10) con la frecuencia de fracturación para diferentes valores del umbral de muestreo $t > \gamma = 0.08m$. El valor de $\lambda \in [0, \gamma^{-1}]$ considerando que $\alpha > 1$ y (8).

Dado que las frecuencias para un medio fracturado: $0 < \lambda_{\min} < \lambda_{\max} < \gamma^{-1}$, las diferentes curvas trazadas en la *Figura 3*, tomando diferentes valores de t en (10), permiten confirmar que el rango abarcado por los valores del RQD entre los extremos de las frecuencias varía con t . Para el ejemplo de esta figura, el rango es mayor para $t=0.2m$ que para $t=0.1m$; por lo que, para la estimación del RQD, el segundo valor de t sería una mejor elección que el primero. De esta forma, para cada pareja de valores $(\lambda_{\max}, \lambda_{\min})$, el comportamiento del rango para cada valor de t , (*Figura 4*) posee un valor de $t=t^*$ para el que el rango es máximo. Ciertamente éste no es el 100% porque también depende de los valores λ_{\max} y λ_{\min} que se hayan obtenido con (1), con lo que el máximo es para una configuración particular de discontinuidades.

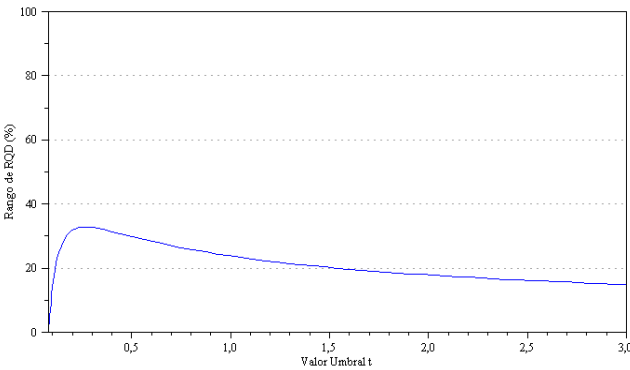


Figura 4. Dependencia del rango teórico (3), utilizando el RQD (10), con los valores del umbral de muestreo $t > \gamma = 0.08m$, para $\lambda_{\max} = 7.017m^{-1}$ y $\lambda_{\min} = 4.21m^{-1}$, de la *Fig. 1*.

La determinación analítica valor umbral $t=t^*$ para el que se localiza el valor máximo del rango (3), suponiéndose (9) como distribución de espaciados, se ha realizado tomando la fórmula de Leibnitz (5) en la que:

$$\frac{\partial}{\partial t} x f(x) = 0$$

con lo que la ecuación algebraica no lineal a resolver es:

$$\lambda_{\max} t^* f_{\max}(t^*) - \lambda_{\min} t^* f_{\min}(t^*) = 0 \quad (11)$$

Si en ésta se sustituye directamente la expresión (9), tras la correspondiente manipulación aritmética, se tiene una ecuación en t^* :

$$\frac{\lambda_{\max} \alpha_{\max}}{t^* \alpha_{\max}} \left(\frac{\alpha_{\max} - 1}{\lambda_{\max} \alpha_{\max}} \right)^{\alpha_{\max}} - \frac{\lambda_{\min} \alpha_{\min}}{t^* \alpha_{\min}} \left(\frac{\alpha_{\min} - 1}{\lambda_{\min} \alpha_{\min}} \right)^{\alpha_{\min}} = 0 \quad (12)$$

cuya solución, teniendo en cuenta (8), puede obtenerse en función de los extremos de la frecuencia de fracturación:

$$t^* = \gamma \left(\frac{\lambda_{\max} (\gamma \lambda_{\min} - 1)}{\lambda_{\min} (\gamma \lambda_{\max} - 1)} \right)^{\varphi} \quad (13)$$

siendo:

$$\varphi = \frac{(\gamma \lambda_{\max} - 1)(\gamma \lambda_{\min} - 1)}{\gamma (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})}$$

Dado que estos extremos se encuentran relacionados con el valor de los exponentes de la distribución de Pareto, la solución puede ponerse en función de los mismos:

$$t^* = \gamma \left(\frac{\alpha_{\max} - 1}{\alpha_{\min} - 1} \right)^{\frac{1}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}} \quad (14)$$

De esta forma, se obtiene un valor óptimo del umbral que se encuentra explícitamente definido en términos de los valores extremos de la frecuencia de fracturación (13) o de los exponentes de Pareto en las mismas direcciones observadas en el macizo rocoso. Para su determinación, será necesario llevar a cabo los oportunos estudios de campo geológico-estructurales que permitan obtener con fiabilidad el comportamiento anisótropo de la frecuencia de fracturación global λ según (1), del que se extraerán λ_{\max} y λ_{\min} . Sobre la dirección que corresponda a cada uno se estimarán α_{\max} y α_{\min} , respectivamente, así como γ (supuesto isotrópico) sobre un conjunto de espaciados tomados en ambas direcciones. Si, para una de ellas, la muestra de espaciados medida es $\{x_i\}_{i=1,m}$ (tras ser ordenados de mayor a menor: $x_i \geq x_j, 1 \leq i < j \leq m$), puede utilizarse el estimador de máxima verosimilitud de Hill:

$$\hat{\alpha} = \left[r^{-1} \sum_{i=1}^r (\log x_i - \log x_{r+1}) \right]^{-1}$$

$$\hat{C} = \hat{\gamma}^{-1} = (r/m) x_{r+1}^{\hat{\alpha}}$$

para la distribución de Pareto (6), si tras su representación gráfica bilogarítmica se encuentra un ajuste lineal a partir de $x = x_{r+1}$. Para la aplicación práctica del resultado obtenido al ejemplo de la *Tabla 1*, los valores extremos de las frecuencias han de ser extraídos de la *Figura 1*: $\lambda_{\max} = 7.017m^{-1}$ y $\lambda_{\min} = 4.21m^{-1}$, a los que corresponden $\alpha_{\max} = 2.279$ y $\alpha_{\min} = 1.507$, según (8), respectivamente. El valor óptimo de $t^* = 0.264m$ a partir de (13) ó (14), el cual proporciona los valores extremos del RQD de 54.3% y 21.6%, es decir, un rango útil del 32%. Comparando este valor con el rango del 14%, obtenido al utilizar el valor tradicional de $t=0.1m$, como se aprecia en la *Figura 4*, se entiende cómo, en este ejemplo, el uso de t^* ha incrementado el rango al menos duplicándolo. En la *Figura 5* se ha representado la variación direccional del RQD,

para el conjunto de familias de la Tabla 1, calculado con el valor de t^* , el valor de t tradicional y un valor umbral de $t=1.0m$, para la misma orientación horizontal de la *Figura 1*. Puede observarse cómo el uso de t^* incrementa no solo el rango sino el grado de su anisotropía. Esto demuestra cómo el uso de t^* hace que la función $RQD(\lambda, t^*, \infty)$ sea mucho más discriminadora que con cualquier otro valor del umbral.

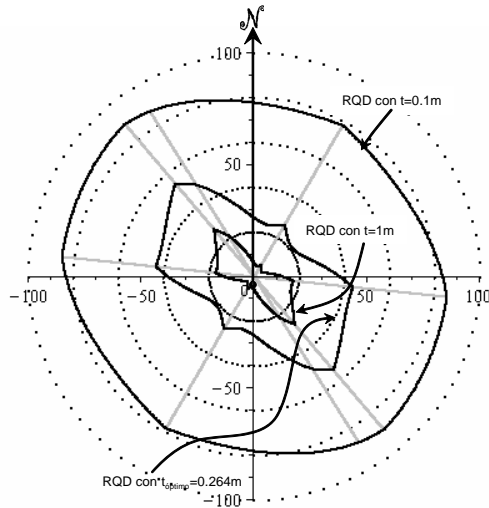


Figura 5. Diagramas polares del RQD para diferentes umbrales.

Dado que, según la expresión (14), el valor de t^* para espaciados distribuidos según Pareto depende fundamentalmente de los valores extremos de la frecuencia global, puede ser interesante examinar cómo t^* varía con éstos. Según la *Figura 6* puede observarse cómo para valores de las frecuencias que son usuales en la práctica de campo (normalmente inferiores a $10m^{-1}$) los valores de t^* son muy superiores a $0.1m$. La aplicación de éste valor popular requeriría trabajar con rocas extremadamente fracturadas, con valores extremos altos (superiores a $10m^{-1}$).

Aplicación a la variación del RQD en 3D

Los análisis presentados anteriormente se encuentran todos referidos a una sección plana horizontal de muestreo. Sin embargo, a través de la testificación sobre sondeos, el muestreo de las estructuras del macizo rocoso fracturado puede hacerse en cualquier dirección del espacio, desde un punto. Así, los principios de cálculo aplicados en 2D pueden extenderse a 3D mediante el uso de los valores apropiados de frecuencias extremas (máxima y mínima) de fracturación extraídos de la frecuencia global en 3D.

La identificación de estos valores extremos ha de hacerse sobre la representación de la densidad sobre una proyección semiesférica equiangular como la de la *Figura 7*. Para el ejemplo tratado en este trabajo se han obtenido los valores de $\lambda_{max}=7.82m^{-1}$ (N234°E, 25.2°) y $\lambda_{min}=1.72m^{-1}$ (N108°E, 59.4°) a los que corresponden $\alpha_{max}=2.279$ y $\alpha_{min}=1.507$, según (8), respectivamente. El umbral óptimo es $t^*=0.378m$, si $\gamma=0.08m$, calculado mediante las expresiones (13) o (14).

El resultado del cálculo en 3D para el RQD proporciona unos valores máximo del 78% y mínimo del 7.5% lo cual permite afirmar que el análisis extendido a

todas las direcciones posibles utilizando el umbral óptimo amplía el rango de variación a más del 70%, valor muy superior al 27.5% que se obtiene utilizando el valor umbral tradicional.

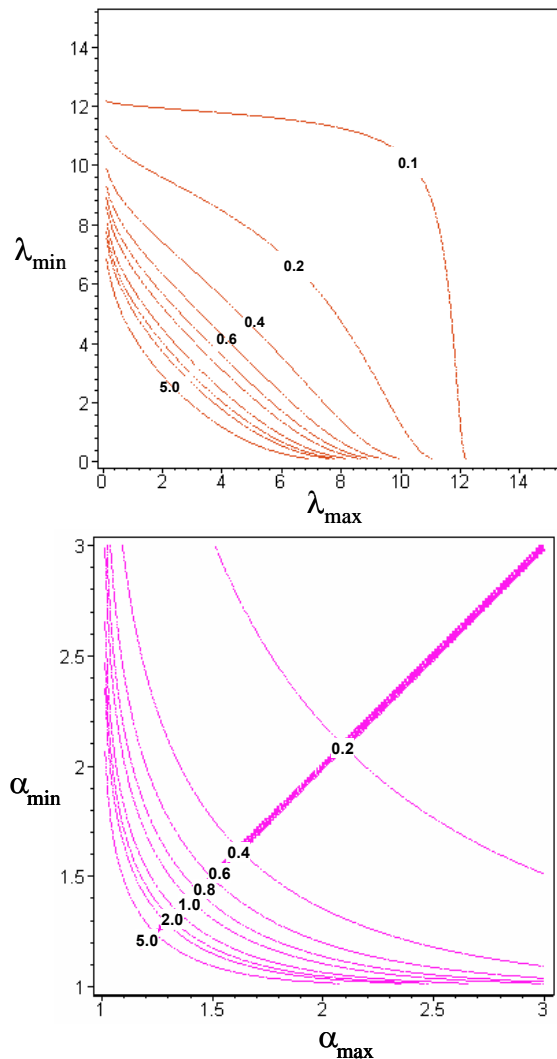


Figura 6. Valores del umbral óptimo t^* (m) de RQD, según las frecuencias de fracturación (izda.) y según los exponentes de la función de distribución de Pareto ($\gamma=0.08m$) en las mismas direcciones que las frecuencias extremas.

Es muy frecuente considerar que los espaciados se comporten siguiendo las funciones de distribución exponencial negativa, Gamma o Weibull. Algunos trabajos publicados presentan un valor de t^* para la primera distribución que depende solamente de λ_{max} y λ_{min} . Para Gamma y Weibull, el resultado en t^* es el mismo que para la exponencial negativa:

$$t^* = \frac{2}{\lambda_{max} - \lambda_{min}} \ln \left(\frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}} \right)$$

si se supone que el parámetro de escala que aparece en éstas es la unidad.

La comparación de estos valores (representados en la *Figura 8* drcha) con los que se han obtenido con la ecuación (14) muestra cómo los valores de t^* son (*Figura 8* izda.) mucho mayores para la distribución de Pareto que

para la exponencial cuando las frecuencias de fracturación son muy bajas ($<4\text{m}^{-1}$) y contrariamente cuando estas frecuencias son elevadas ($>8\text{m}^{-1}$). Para el ejemplo utilizado en este trabajo, $t^*=0.49\text{m}$ si los espaciados se comportan según una exponencial negativa. Este valor es ligeramente superior al obtenido por Pareto. Esto implicaría que, en la determinación práctica del RQD (2), si se considera la distribución de Pareto, entren a formar parte tramos más cortos que si se aplica la distribución exponencial. En consecuencia se modifican los extremos del RQD: 79.6% y 9.6%, y el rango de valores abarcado 70%. Así pues, para una correcta aplicación práctica del procedimiento es requisito indispensable un calibrado correcto de la función de distribución de los espaciados.

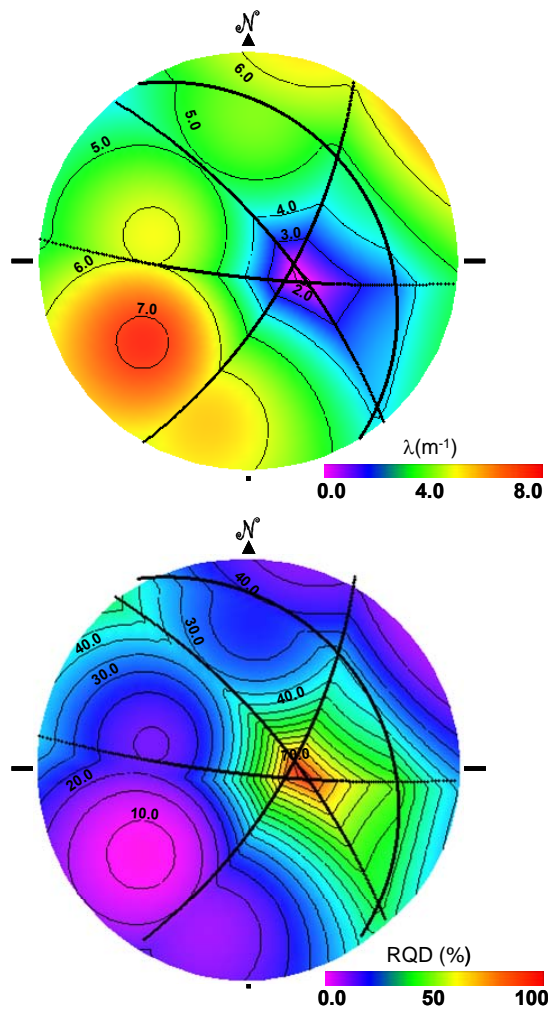


Figura 7. Gráficos de la proyección semiesférica equiangular de la frecuencia global 3D de discontinuidades (izda.) y del RQD obtenido con un umbral óptimo de 0.37m (drcha.), para las familias de discontinuidades de la Tabla 1, (trazadas según sus círculos mayores) y de las que se supone tienen un $\gamma=0.08\text{m}$ isótropo.

Conclusiones

Se ha demostrado que la utilización de un valor óptimo t^* frente al “tradicionalmente” recomendado como longitud umbral en la determinación del RQD permite hacer más rigurosa y discriminante la clasificación geomecánica de un macizo fracturado. El valor t^* es, para el caso en que

las discontinuidades que atraviesan la masa rocosa sigan una distribución de Pareto, dependiente de: (a) las frecuencias máxima y mínima de fracturación (λ_{max} y λ_{min}); (b) los parámetros de la distribución de Pareto: espaciado mínimo (γ) y exponentes en las direcciones de los extremos estas las frecuencias (α_{max} y α_{min}).

Mediante su análisis gráfico anisótropo se han establecido las direcciones en las que se dan los valores extremos del RQD, coincidiendo el máximo RQD con la dirección de menor frecuencia de fracturación y el mínimo RQD con la de máxima frecuencia. La técnica aquí presentada para espaciados anisótropos que se distribuyen según Pareto es también apropiada para macizos rocosos no homogéneos, simplemente estudiando cómo se distribuye espacialmente la frecuencia global, localizando sus extremos, y utilizando estos valores para el cálculo de t^* . En este procedimiento se han obtenido dos expresiones en las que t^* es proporcional a γ , una dependiente de (λ_{max} y λ_{min}) y la otra de (α_{max} y α_{min}), suponiendo que los espaciados poseen un γ isótropo.

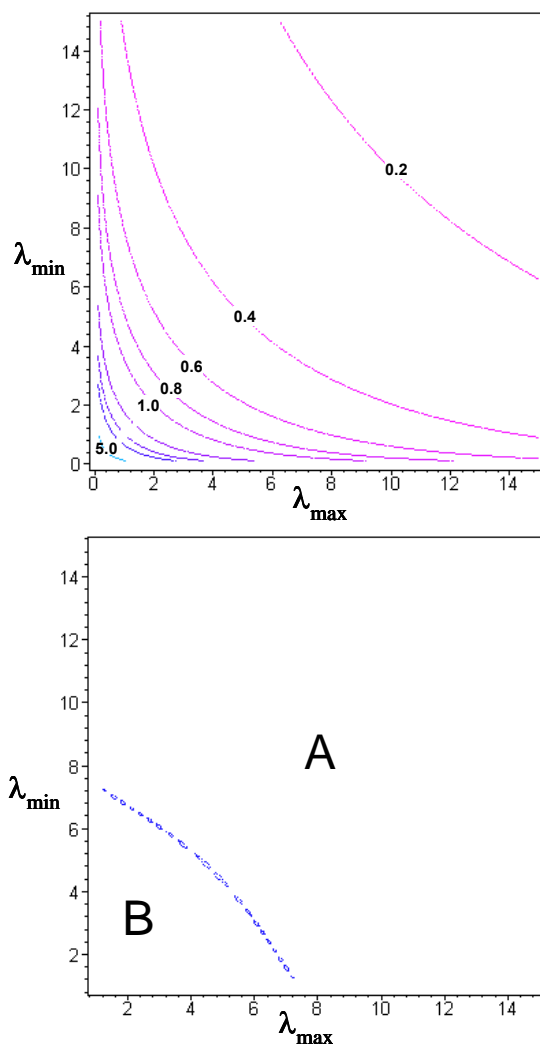


Figura 8. Valores del umbral óptimo t^* (m) de RQD, según las frecuencias de fracturación, para la función de distribución exponencial negativa (drcha.); Zonificación de t^* frente a las funciones de distribución analizadas, A: $t^*_{\text{expon}} > t^*_{\text{Pareto}}$, B: $t^*_{\text{expon}} < t^*_{\text{Pareto}}$.

La correcta caracterización de γ resulta ser crítica en el tratamiento anteriormente expuesto y determinación de

t^* . El valor de γ es la cota inferior del umbral calculado. La estimación de γ depende de la eficacia, calidad y detalle de los estudios efectuados en campo y de la población muestreada de espaciados. Por ello se recomienda no solo asignar un valor estimado de γ , sino también conocer la incertidumbre asociada a éste y, por ende, al RQD.

Además, considerando el criterio establecido para el cálculo del umbral óptimo, el rango de valores comprendido entre el máximo y mínimo RQD es el mayor que se puede obtener, lo cual amplía la diversidad de valores en la clasificación y, por ende, su naturaleza discriminatoria.

Referencias

- Aban, I. B., Meerschaert, M. M., Panorska, A. K. 2006. Parameter estimation of the truncated Pareto distribution. *J. Am. Stat. Ass.*, 101,473, 270-277(8).
- Choi, S. Y., Park, H. D. 2004. Variation of rock quality designation (RQD) with scanline orientation and length : a case study in Korea. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, 207-221.
- Bodau, F. K., Long, L. T. 1994. The fractal character of fracture spacing and RQD. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 31, 2, 127-134.
- Deere, D. U. Hendron, A. J., Patton, F. D., Cording, E. J. 1967. Design of surface and near surface rock construction in rock. In *Failure and breakage of rock*, proc. 8th U. S. symp. rock mech., (ed. C. Fairhurst), 237-302, New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Pet. Engrs.
- Harrison, J. P. 1999. Selection of the threshold value in RQD assessments. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Technical Note*, 36, 673-685.
- Hill, B. 1975. A simple general approach to inference about the tail of a distribution. *Ann. Statist.* 3, 5, 1163-1173.
- Newman, M. E. J. 2005. Power laws, Pareto distributions and Zip's law. *Contemporary Physics*, 46, 323-351.
- Priest, S. D. 1993. *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman Hall. London. 473 p.