Informes de la Construcción Vol. 69, 547, e205 julio-septiembre 2017 ISSN-L: 0020-0883 doi: http://dx.doi.org/10.3989/id54459

Correlación entre el índice *RMR* de Bieniawski y el índice *Q* de Barton en formaciones sedimentarias de grano fino

Correlation between Bieniawski's RMR index and Barton's Q index in fine-grained sedimentary rock formations

J. D. Fernández-Gutiérrez (*), H. Pérez-Acebo (***), D. Mulone-Andere (***)

RESUMEN

Desde el siglo XX se han propuesto varios sistemas de clasificación del macizo rocoso. Entre ellos destacan el sistema RMR de Bieniawski y el sistema Q de Barton, que son las clasificaciones más empleadas en todo el mundo. Se han propuesto numerosas relaciones entre ambos índices, que normalmente tienen gran dispersión de datos. Sin embargo, se ha observado que las correlaciones establecidas para litologías específicas son más precisas. El objetivo de este artículo es proponer una correlación entre el índice RMR y Q para formaciones sedimentarias de grano fino, habituales en la zona de Bilbao (España), mediante los datos recopilados in situ durante la excavación del túnel Etxebarri-Casco Viejo de la línea g0 del Ferrocarril Metropolitano de Bilbao. La ecuación obtenida muestra un alto grado de correlación y se ha propuesto una relación única entre los dos sistemas de clasificación, que no depende de la variable independiente escogida.

Palabras clave: índice *RMR*; índice *Q*; clasificación del macizo rocoso; excavación de túneles; geomecánica; roca sedimentaria.

ABSTRACT

From the XX century, various rock mass classification systems have been proposed. Among them, the Bieniawski's RMR system and Barton's Q system have emerged as the most used rock mass classification worldwide. Correlations between both indices have been proposed, usually with a wide scattering of the data used in deriving the equations. However, it has been observed that correlations established for a specific geological unit fit better. The aim of this paper is to propose a correlation between RMR and Q indices for fine-grained sedimentary rock formations, normally found in the area of Bilbao (Spain), by means of the collected data during the excavation of the tunnel Etxebarri-Casco Viejo of the line 3 of the Metropolitan Railway of Bilbao. Obtained equation shows a high correlation coefficient and a unique relationship between the two classification systems has been proposed, not depending on the choice of the independent variable.

Keywords: RMR index; Q index; rock mass classification; tunnelling; geomechanics; sedimentary rock.

(*) Geoconsult Ingenieros Consultores, Bilbao (España).

(**) Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Bilbao (España).

(***) Eusko Trenbide Sarea/Red Ferroviaria Vasca ETS/RFV, Bilbao (España).

<u>Persona de contacto/Corresponding author:</u> heriberto.perez@ehu.eus (H. Pérez-Acebo)

<u>ORCID:</u> http://orcid.org/0000-0003-3814-837X (J. D. Fernández-Gutiérrez); http://orcid.org/0000-0003-0577-9597 (H. Pérez-Acebo); http://orcid.org/0000-0003-4904-4779 (D. Mulone-Andere)

Cómo citar este artículo/*Citation:* Fernández-Gutiérrez, J. D., Pérez-Acebo, H., Mulone-Andere. D. (2017). Correlación entre el índice *RMR* de Bieniawski y el índice *Q* de Barton en formaciones sedimentarias de grano fino. *Informes de la Construcción*, 69(547): e205, doi: http://dx.doi.org/10.3989/id54459.

Copyright: © 2017 CSIC. Licencia / License: Salvo indicación contraria, todos los contenidos de la edición electrónica de Informes de la Construcción se distribuyen bajo una licencia de uso y distribución Creative Commons Attribution License (CC BY) Spain 3.0.

Recibido/Received: 20/12/2016 Aceptado/Accepted: 28/03/2017 Publicado on-line/Published on-line: 27/09/2017

1. INTRODUCCIÓN

Al contrario que otros materiales empleados habitualmente en ingeniería, como el hormigón o el acero, que poseen características controladas, la roca in situ es uno de los materiales más complejos a los que se enfrentan los ingenieros civiles, geólogo-geotécnicos o de minas. El macizo rocoso puede ser definido como el material no homogéneo formado por fragmentos y bloques de roca de distinto tamaño, intacta o alterada, con sus defectos, separados por una serie de discontinuidades, como juntas, fallas, planos estratificación, etc., que además varía su composición en el espacio y en el tiempo (1) (2) (3). En consecuencia, es necesario considerar las propiedades ingenieriles de la roca intacta y del macizo rocoso. Además, excepto en el caso de que existan alternativas para el proyecto, lo cual es muy poco frecuente, los ingenieros responsables deben hacer frente a este material variable, con un comportamiento complejo, que depende de las condiciones de carga.

Por consiguiente, las clasificaciones del macizo rocoso han sido necesarias para la comunicación del conocimiento y experiencia adquirida por los ingenieros y geólogos en lugares con diversas condiciones geológicas y con diferentes soluciones de sostenimiento y, de esta manera, poder ser útil en nuevos proyectos (4).

Mientras que únicamente un sistema de clasificación de suelos, propuesto por Casagrande, es empleado ampliamente en la actualidad para los suelos; numerosos sistemas de clasificación cualitativa y cuantitativa del macizo rocoso han aparecido desde el inicio del siglo XX. La Tabla 1 muestra un resumen de los sistemas más empleados a lo largo del mundo, indicándose el autor, cuándo fue desarrollado y el campo de aplicación del sistema propuesto.

Los sistemas de clasificación del macizo rocoso se basan principalmente en un enfoque empírico y fueron desarrollados como una herramienta de diseño sistemática en la ingeniería civil y minera. Tienen por objetivo ordenar y sistematizar los procedimientos de las investigaciones en campo. Sin embar-

go, no deberían ser utilizadas como sustitutos de los estudios analíticos, las observaciones y mediciones en campo o aportaciones de expertos, sino en conjunción con otras técnicas.

Por otra parte, los métodos numéricos en ingeniería de rocas permiten el cálculo tenso-deformacional del macizo rocoso (22), así como la interacción entre el macizo y sus diferentes estados y estructura. El punto débil de la metodología numérica es la complejidad de la idónea calibración de los diferentes métodos o modelos de cálculo. Es frecuente que la estimación de los parámetros del macizo rocoso con lo que se realizan los cálculos numéricos sea en origen la clasificación geomecánica (RMR, Q, GSI) del macizo a estudiar. Las ventajas que presentan los métodos empíricos estriban en un uso muy extendido, con sencillez de aplicación, tanto en fase de proyecto como en fase de ejecución. Además, normalizan el sostenimiento a emplear en rangos definidos de acuerdo a la calidad/clase del macizo rocoso. Aun así, es necesario conocer las limitaciones de las clasificaciones del macizo rocoso (23) y que su uso no puede reemplazar algunos de los procesos de diseño más elaborados. En resumen, las clasificaciones del macizo rocoso no son la solución final a los problemas de diseño, sino un medio para ese objetivo (1) y debido a su simplicidad los ingenieros suelen preferir este enfoque empírico a los diseños teóricos o numéricos (24).

La mayoría de estos sistemas clasifican las condiciones geomecánicas en varios grupos diferentes que representan diferentes capacidades portantes de la roca. Dado que ninguna clasificación ha sido adecuadamente verificada por medidas de presión en el sostenimiento real del túnel, ninguna de ellas se ha convertido en un sistema estándar general (24). Actualmente existen metodologías de medición del estado de tensiones del macizo rocoso in situ con métodos directos, como son CSIR Doorstooper (célula biaxial), USBM Deformation gage (célula biaxial), LNEC Triaxial Solid Inclusion Cell (célula triaxial), CSIRO Triaxial Hollow Inclusion Cell (célula triaxial), flat jack o gato plano, fractura hidráulica o Rigid Inclusion-stressmeter. Estas metodologías que aportan una magnitud del campo de tensiones in situ, aunque son factibles en la actualidad, no son de empleo normalizado, como es el caso del túnel estu-

Tabla 1. Sistemas de clasificación del macizo rocoso propuestos por distintos autores para uso en obras subterráneas.

Denominación del sistema de clasificación	Autor, año	País de origen	Aplicación
Protodyakonov	Protodyakonov, 1907 (5)	Países del Este	Túneles
Carga en rocas	Terzaghi, 1946 (6)	Estados Unidos	Túneles con sostenimiento de acero
Tiempo de auto estabilidad	Lauffer, 1958 (7)	Austria	Túneles
Rock Quality Designation (RQD)	Deere et al., 1967 (8) y Deere, 1968 (9)	Estados Unidos	Túneles
Rock Structure Rating (RSR)	Wickham et al., 1972 (10)	Estados Unidos	Túneles
Rock Mass Rating (RMR)	Bieniawski, 1973 (11). (Bieniawski, 1989) ^a (1)	Sudáfrica	Túneles, minas, taludes y cimentaciones
Sistema Q	Barton <i>et al.</i> , 1974 (12), (Barton and Grimstad, 1994) ^a (13)	Noruega	Túneles, cavernas
Geological Strength Index (GSI)	Hoek et al., 1995 (14)	Canadá	No aplicable a cálculos de sostenimiento. Caracterización de macizos rocosos (15)
Rock Mass index (RMi)	Palmström, 1995 (3) (16)	Noruega	Ingeniería de rocas
Rock Condition Rating (RCR) o RMRmod	Sheorey, 1993 (17), Goel <i>et al.</i> 1996 (18), Kumar <i>et al.</i> , 2004 (19)	India	Variante de <i>RMR</i>
N (o índice <i>Qmod</i>)	Sheorey, 1993 (17), Goel <i>et al.</i> 1996 (18), Kumar <i>et al.</i> , 2004 (19)	India	Variante del sistema Q cuando $SRF = 1$.
Rock Mass Fabric Indices (F)	Tzamos and Sofianos, 2007 (20)	Grecia	Diagramas para obtener de manera simplificada los parámetros de los sistemas <i>RMR</i> , <i>Q</i> , <i>GSI</i> y <i>RMi</i>
Rock Mass Quality Index	Aydan et al., 2014 (21)	Japón - Turquía	Estimación de propiedades del macizo rocoso

^a Última versión.

diado en este artículo. Además, no clasifican el material, sino que permiten determinar el campo de tensiones *in situ* para su empleo en cálculos numéricos. Otras razones para no poderse haber creado una clasificación universal son la gran cantidad de parámetros que deben ser considerados, la imposibilidad de cuantificar todos esos parámetros y la dependencia del comportamiento del macizo rocoso de la estructura desarrollada (túnel, cimentaciones, taludes, etc.), lo cual limita el campo de aplicación del sistema (25). No obstante, esto no debe ser observado como un fracaso, puesto que el empleo de más de una clasificación es recomendado habitualmente (1) (26).

Además, a pesar de que la intención original de los valores de los sistemas geomecánicos era que sirvieran para asistir al diseño empírico y de sostenimiento del túnel, los valores finales y/o parciales empleados en las diversas clasificaciones se han utilizado para predecir y extrapolar datos de otras propiedades de la roca. Por ejemplo, la Q de Barton y otros parámetros parciales se han relacionado con la velocidad sísmica de las ondas P, el módulo elástico de deformación, la presión sobre el sostenimiento, deformación del túnel, etc. (27); el RQD se ha usado para el cálculo del módulo deformación o la resistencia a compresión no confinada (28) o incluso el sistema GSI se ha relacionado con algún parámetro parcial del RMi (29).

Las clasificaciones geomecánicas también se han utilizado para calcular la estabilidad del macizo rocoso en taludes, bien directamente mediante los modelos propuestos por los autores originalmente o mediante variaciones propuestas por otros autores. Pantelidis (30) realiza una revisión de los sistemas existentes para valorar la estabilidad de taludes a través de los sistemas de clasificación del macizo rocoso.

Por último, los índices de los sistemas de clasificación también se han correlacionado con el rendimiento obtenidos por tuneladoras (*Tunnelling Boring Machine, TBM*), como, por ejemplo, el *RMR* (31) (32) (33), el *RSR* (34), el *RQD* (35) y el sistema Q (36).

El sistema *RMR*, desarrollado por South African Council of Scientifical and Industrial Research, y el sistema *Q*, desarrollado por Norwegian Geotechnical Institute, se han consolidado como los métodos de clasificación del macizo rocoso más empleados en todo el mundo (26) (37) (38) (39). Dado que ambos sistemas de clasificación dividen el macizo rocoso en distintas clases de similares características que pueden ser fácilmente evaluables mediante observaciones visuales o simples, se puede esperar que exista una correlación entre ambas. Desde la primera correlación presentada por Bieniawski en 1976 (40), numerosos autores han presentado diferentes correlaciones basadas en análisis de regresión de datos de *RMR* y *Q* obtenidos de proyectos de túneles y minas en distintas partes del mundo.

El objetivo de este artículo es proporcionar una útil correlación entre los sistemas RMR de Bieniawski y Q de Barton en formaciones sedimentarias de grano fino dentro del grupo de lutitas (concretamente, limolita y marga calcárea), habituales en el entorno de Bilbao, obtenida a través de los datos recogidos en el túnel de 3.880 m excavado en este tipo de material en el tramo Etxebarri-Casco Viejo de la línea 3 del Ferrocarril Metropolitano de Bilbao (FMB). De esta forma los ingenieros y geólogos puedan inmediatamente obtener los valores de una segunda clasificación después de haber calculado una de ellos y contar con más técnicas en el proceso de diseño de la excavación subterránea.

2. SISTEMA RMR DE BIENIAWSKI Y SISTEMA Q DE BARTON Y CORRELACIONES

2.1. Sistema RMR

El sistema *Rock Mass Rating*, *RMR*, propuesto inicialmente por Bieniawski en 1973 (11), ha sido revisado posteriormente en 1974 (41), 1975 (42), 1976 (40), 1979 (43) y 1989 (1). Se trata de un índice que evalúa la competencia del macizo rocoso basándose en 6 parámetros:

- Resistencia de la roca intacta.
- Rock quality designation (RQD).
- Espaciado entre juntas o discontinuidades (Js).
- Estado de las juntas (*Jc*).
- · Agua subterránea.
- Corrección por la orientación de las discontinuidades.

Para cada uno de los 6 parámetros se presentan 5 valores en función de las condiciones de esos parámetros. El valor de *RMR* se obtiene como suma de los valores asignados a los parámetros señalados, oscilando el valor linealmente entre o y 100, siendo mayor cuanto mejor es la roca. Desde 1973 hasta 1989 los valores asignados a los parámetros y los propios parámetros han variado según lo indicado en la Tabla 2.

Inicialmente, en 1973 se empleaban 8 parámetros y desde 1974 se redujeron a 6, tras la agrupación en el parámetro de estado de las discontinuidades (Jc). En las versiones de 1973 y 1974 se otorgaba una valoración positiva a la orientación de las discontinuidades, pero desde 1975 este parámetro tiene una valoración negativa, desde o para el caso más favorable hasta -12 para el más desfavorable. Entre 1975 y 1976 solamente se modificaron los límites para la elección del sostenimiento. En la versión de 1989 las valoraciones no cambiaron, pero la evaluación de las discontinuidades subhorizontales fue modificada. Una última revisión de este índice ha sido propuesta de manera experimental coincidiendo con los 25 de la última versión, RMR_{14} (44).

El valor de *RMR* obtenido está relacionado con 5 clases de macizo rocoso, para la cual se establecen medidas de sostenimiento y construcción.

2.2. Sistema *Q*

El *Tunnelling Quality Index*, o sistema *Q*, fue desarrollado por Barton y sus colaboradores en 1974 (12) y en años posteriores (45) (46) (47), y también utiliza 6 parámetros para estimar el comportamiento del macizo rocoso:

- Rock Quality Design (RQD).
- Número de familia de juntas o discontinuidades (Jn).
- Rugosidad de las juntas (Jr).
- Grado de alteración de las juntas (*Ja*).
- Presencia de agua (Jw)
- Estado tensional de la roca, Stress Reduction Factor (SRF).

El sistema especifica la valoración de cada uno de los parámetros y el valor *Q* es calculado mediante la ecuación [1]:

$$Q = (RQD / Jn) \cdot (Jr / Ja) \cdot (Jw / SRF)$$
 [1]

El valor de Q oscila entre 0,001 para terrenos malos y 1.000 para terrenos muy buenos. Una vez obtenido Q, el sistema

	1					
Parámetro	1973	1974	1975	1976	1979	1989
Resistencia de la roca intacta	0 - 10	0 - 10	0 – 15	0 – 15	0 – 15	0 – 15
Rock Quality Designation (RQD)	3 – 16	3 – 20	3 – 20	3 – 20	3 – 20	3 – 20
Espaciado entre juntas (Js)	5 – 30	5 – 30	5 – 30	5 – 30	5 – 20	5 – 20
Separación de juntas	1 – 5					
Continuidad de juntas	0-5					
Acciones climáticas	1 – 9					
Estados de las juntas (Jc)	-	0 – 15	0 – 25	0 – 25	0 – 30	0 – 30
Agua subterránea	2 - 10	2 - 10	0 – 10	0 - 10	0 – 15	0 – 15
Corrección por orientación de discontinuidades	3 - 15	3 – 15	0 - (-12)	0 - (-12)	0 - (-12)	0 - (-12)

Tabla 2. Valoración de los parámetros del sistema RMR en las distintas versiones.

propone el sostenimiento a emplear a partir de un parámetro dependiente de las dimensiones del túnel, denominado Dimensión equivalente. Se obtiene como cociente entre el vano o altura o diámetro del túnel (el mayor de estos valores) y un factor denominado Excavation Support Ratio (ESR), que se obtiene en función de la excavación realizada.

Durante casi 20 años el sistema no se ha modificado, manteniéndose las 38 categorías de sostenimiento propuestas en 1974 (12). En 1993 (48) y 1994 (13) el sistema fue revisado y actualizado para incorporar la experiencia y los avances tecnológicos. Únicamente varían los valores de SRF para incorporar fenómenos de resquebrajamientos y/o deslizamientos y de estallidos de roca. El diagrama revisado ha simplificado el proceso de selección del sostenimiento, desde las 38 categorías de 1974 hasta las 9 de 1994.

Algunos autores señalan que el índice Q es apropiado para la clasificación de la estabilidad y del tipo de sostenimiento a emplear en túneles y cavernas en roca fracturada, teniendo un mejor uso durante la planificación y siendo menos útil durante el proceso constructivo (23).

Para evitar un mal uso de las clasificaciones descritas, los propios autores, Bieniawsky y Barton, han publicado unas recomendaciones para su correcta aplicación (49).

2.3. Correlaciones propuestas

La primera correlación entre los dos sistemas de clasificación, ecuación [2], fue propuesta por Bieniawski en 1976 (40) mediante una regresión lineal de 111 conjunto de datos de RMR y Q provenientes de 62 casos de Escandinavia, 28 de Sudáfrica, y 21 de Norteamérica, Europa y Australia, con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.59$ (R = 0.77).

$$RMR = 9 \cdot \ln Q + 44$$
 [2]

Adicionalmente se incluye la ecuación [3], que aporta los límites de un 90 % de confianza, que contiene el 90 % de los datos utilizados.

$$RMR = 9 \cdot \ln Q + 44 \pm 18$$
 [3]

Este amplio rango representado por los límites de 90 % de confianza cubre prácticamente 2 clases de roca enteras, siendo de pequeña utilidad para algunos autores (37). Posteriormente, los datos provenientes de los casos de la India de Jethwa et al. (50) complementaron la base de datos de la ecuación [2] (1). A partir de esta fórmula se han ido sucediendo diferentes correlaciones entre las dos clasificaciones, indicándose en la Tabla 3 algunas de las más relevantes.

Tabla 3. Principales correlaciones establecidas entre el sistema RMR y Q.

Autor, año	Proveniencia de los datos	Correlación	R/R^2	Ecuación
Rutledge and Preston, 1978 (51)	9 túneles en Nueva Zelanda	$RMR = 5.9 \cdot \ln Q + 43$	R = 0.81 $R^2 = 0.66$	[4]
Cameron-Clarke and Budavari, 1981 (52) ^a	Túneles en Sudáfrica	$RMR = 5 \cdot \ln Q + 60.8$	Mucha dispersión	[5]
Moreno Tallón, 1982 (53)	4 túneles en España	$RMR = 5,4 \cdot \ln Q + 55,2$	R = 0.55 $R^2 = 0.30$	[6]
Celada Tamames, 1983 (54)	España	$RMR = 43,89 - 9,19 \cdot \ln Q$		[7]
Abad <i>et al.</i> , 1983 (55)	Minas de carbón	$RMR = 10.5 \cdot \ln Q + 41.8$	R = 0,66 R2 = 0,44	[8]
Kaiser et al., 1986 (25)	Túnel de Wolverine West	$RMR = 6.3 \cdot \ln Q + 41.6$		[9]
Sunwo and Hwang, 2001 (56)	Distintas litologías en Corea del Sur	$RMR = 5,97 \cdot \ln Q + 49,5$	R = 0.89 $R^2 = 0.79$	[10]
Castro-Fresno et al., 2010 (38)	Túneles en suelos de baja calidad	$RMR = 6,63 \cdot \ln Q + 35,53$	R =0,70 R ² =0,49	[11]
Alkorta-Lertxundi and Bernardo-Sanchez, 2010 (57)	Túneles de la VSM (Vizcaya, España)	$RMR = 5.9 \cdot \ln Q + 43$	R = 0.89 $R^2 = 0.79$	[12]
Alkorta-Lertxundi et al., 2014 (58)	Proyecto de túnel en Vizcaya, España	$RMR = 6.7 \cdot \ln Q + 45.4$	R = 0.94 $R^2 = 0.884$	[13]
Sayeed and Khanna, 2015 (59)	India	$RMR = 4,52 \cdot \ln Q + 43,6$	R = 0.86 $R^2 = 0.736$	[14]

^a De datos de campo.

Ranasooriya and Nikraz (37) alertan sobre la gran dispersión de los datos utilizados por los distintos autores que han propuesto correlaciones, indicando que relacionar los dos sistemas mediante una única fórmula y la conversión entre las valores obtenidos entre ellos puede conducir a significativos errores. Además, añaden que en la mayoría de las fórmulas propuestas por los autores de la Tabla 3 no se especifica qué versión del sistema se está utilizando. Así, para la ecuación [2] se utilizó la versión de *RMR* anterior a 1976, pero para correlaciones propuestas posteriormente se han debido utilizar otras versiones, que no siempre son indicadas por los autores. Por tanto, es totalmente necesario especificar qué versión del sistema *RMR* y de *Q* se ha utilizado a la hora de proponer una correlación entre ambos.

Para evitar la gran disparidad de los resultados y obtener mejores correlaciones, algunos autores han utilizado versiones truncadas de los índices RMR y Q. Sheorey (17), Goel et al. (18) y Kumar et al. (19) definieron RMR_{mod} (también denominado RCR, Rock Condition Rating) como el índice RMR sin tener en cuenta la resistencia de la roca intacta y la corrección por la orientación de las discontinuidades y el índice Q_{mod} (o índice N), como el índice Q cuando SRF = 1. De esta manera, Sheorey, Goel et al. y Kumar et al. obtuvieron las correlaciones definidas por las ecuaciones [15], [16], [17] respectivamente:

$$RCR = 9.5 \cdot \ln N + 31$$
 [15]

$$RCR = 8.0 \cdot \ln N + 30$$
 [16]

$$RCR = 8.0 \cdot \ln N + 42.7$$
 [17]

A pesar de los altos coeficientes de correlación que obtuvieron ($R^2 = 0.87$, 0.92 y 0.88, respectivamente), las representaciones gráficas de las nubes de puntos siguen mostrando una gran dispersión de valores alrededor de las tres líneas de regresión.

Por otro lado, en los análisis de regresión lineal de mínimos cuadrados de *RMR* y Q, la variable independiente utilizada ha sido Q, por lo que distintos autores han señalado que existen diferencias entre los valores obtenidos según la variable independiente utilizada (18) (25). Kaiser *et al.* (25) estableció 2 fórmulas de los datos del túnel de Wolverine West, utilizando Q como variable independiente, ecuación [9] y *RMR* como variable independiente, ecuación [18]:

$$RMR = 6.3 \cdot \ln Q + 41.6$$
 [9]

$$\ln Q = 0.087 \cdot RMR - 2.28$$
 [18]

Tomando, por ejemplo, Q = 0.8 se predice un valor de 40 para RMR, mientras que para un valor de RMR de 40 se predice un valor de Q de 3,35. Para evitar este problema asumieron que las distribuciones de los valores de RMR y de $\ln Q$ eran normales y que, por tanto, satisfacían el teorema central del límite, y de esta manera, poder obtener una única relación entre las dos variables.

Finalmente, otros autores (38) (56) (57) (58) han demostrado que las correlaciones propuestas para unidades litológicas similares presentan coeficientes de correlación más altos que las que abarcan distintos tipos de roca. Cuando han pretendido agrupar los datos de distintas litologías, la correlación obtenida no ha sido tan exacta. Por lo tanto, parece lógico que se deba proponer una correlación para cada tipo de roca, en vez de conseguir una fórmula universal válida para los distintos tipos de rocas, que como se ha observado conduce a grandes dispersiones y a bajos coeficientes de correlación.

3. DESCRIPCIÓN DEL TÚNEL

La línea 3 del Ferrocarril Metropolitano de Bilbao (FMB) consiste en una nueva línea de metro urbano que va desde el municipio de Etxebarri hasta el barrio de Matiko en Bilbao, a través de un trazado de 6.300 m, de los cuales 5.255 m discurren en túnel en mina, divididos en 2 tramos con un tramo central al descubierto, en la zona de Casco Viejo (Bilbao). El trazado consta de 7 nuevas estaciones, de las cuales las dos extremas, Etxebarri y Matiko, y la de Casco Viejo (remodelación de una estación anterior al aire libre de una línea de Euskotren) son en superficie la primera y soterradas las dos siguientes, y las otras cuatro restantes (Otxarkoaga, Txurdinaga, Zurbaranbarri y Urribarri) son subterráneas siguiendo el diseño de estación en caverna proyectado por el equipo de Norman Foster en las líneas 1 y 2 (60) (61). Los emboquilles de la línea se encuentran en los extremos de la misma, así como dos emboquilles en el entorno de Casco Viejo, aprovechando trazados de una línea anterior, y otro más intermedio, en la zona de Txurdinaga.

3.1. Descripción geológica

El trazado de la línea 3 del FMB se encuentra emplazado principalmente en materiales sedimentarios de la Cuenca Vasco Cantábrica, en el dominio estructural del Arco Vasco quedando enclavado en el Sinclinorio de Bilbao. Este accidente de tipología dúctil se generó durante la orogenia Alpina dentro de la Unidad de Oiz, del Sector Durango, que limita al Norte con la falla de Durango y al Sur con la falla de Bilbao-Altsasua.

La unidad de Oiz (Oiz) abarca materiales pertenecientes a los complejos Urgoniano y Supraurgoniano, de edades entre Aptiense medio y Albiense terminal (Cenomanense basal).

Sobre el substrato rocoso de edad Aptiense-Albiense (Complejo Urgoniano) se encuentran una serie de rellenos, que varían de aluviales, aluvio-coluviales a origen antrópico y de espesores variables. El substrato rocoso de Edad Cretácica inferior (Albiense Medio-Inferior) se conforma de material carbonatado tipo *flysch* calcáreo de tonalidades oscuras. Los materiales que conforman estos depósitos se definen como limolitas calcáreas, margocalizas y parabrechas calcáreas (compuestas de bloques heterométricos angulosos de naturaleza caliza dispersas en una matriz margosa), en esta formación también se identifican zonas de arenisca en pequeños bancos intercalados o bien como pasadas areniscosas. La formación «La Tejera» engloba este tipo de materiales de origen sedimentario.

En el trazado de la línea 3 del FMB entre Etxebarri y Casco Viejo, de longitud 4.850 m y 3.880 m en túnel en mina, correspondiente a la zona de estudio, los materiales excavados se corresponden principalmente con litologías del complejo Urgoniano detrítico, predominando las limolitas calcáreas, que en zonas pasan a ser margas calcáreas. En zonas concretas se atraviesan parabrechas calcáreas y de forma esporádica también pequeños bancos decimétricos de areniscas de grano

fino interestratificadas con respecto a las limolitas. De forma testimonial, no representativa de la geología del trazado analizado, en las inmediaciones del Casco Viejo se atraviesa un potente dique de diabasa.

3.2. Descripción geotécnica

Los materiales cuaternarios suprayacentes al macizo rocoso excavado para la construcción de la línea 3 del FMB corresponden principalmente a limos arcillo-arenosos de naturaleza aluvio-coluvial y eluvial de alteración en la zona de contacto con el macizo rocoso. Los suelos de alteración presentes en zonas del macizo rocoso, como litoclasas y fallas, son arcillo-arenosos, manteniendo en algunos casos la fábrica de la roca (GM > IV). Estos materiales de tipo suelo se localizan en las zonas de debilidad o fractura del macizo rocoso (fallas) y emboquilles, cañones de acceso y pasos con baja cobertera. El 95 % del túnel se desarrolla sobre macizo rocoso con grados de alteraciones menores a 4 (GM < IV).

En algunas zonas del trazado del tramo Etxebarri-Casco Viejo la componente calcárea incrementa y el tamaño de grano desciende pasando de ser limolita calcárea a marga calcárea. En el primer tercio del trazado, en el área de la estación de Txurdinaga, se han atravesado zonas de depósitos coluviales litificados que se denominan parabrechas calcáreas, las cuales están formadas por bloques heterométricos de calizas inmersas en una matriz eminentemente margosa (Figura 1). Para el objeto del presente artículo las litologías que se han empleado en los cálculos de la correlación corresponden a formaciones sedimentarias de grano fino, que son los materiales atravesados en la ejecución del túnel, en especial las limolitas y margas, ambas de componente calcárea. Los materiales que no se corresponden con las litologías definidas como materiales detríticos de grano fino, tal y como son areniscas e intrusiones de diabasa, de presencia testimonial en el trazado, no se incluyen en la recopilación de datos con la que se obtiene la correlación. Este tipo de rocas y similares ha sido identificado en otros tramos del FMB (62) (63) y en otras infraestructuras subterráneas en el entorno del Bilbao Metropolitano (57) (58).

3.3. Sección y sistema de excavación

La sección tipo de excavación del túnel de la línea 3 del FMB presenta un radio de 4,45 m y un área de 58 m² (Figura 2a), mientras que la sección tipo de las cavernas de estación tienen varios radios y área de 188 m² (Figura 2b).

El método elegido para la excavación del trazado del túnel de línea y la caverna de estaciones es el denominado NATM (*New Austrian Tunneling Method*, Nuevo método Austriaco de construcción de túneles) (64). El túnel de línea se ha realizado en dos fases, avance y destroza más contrabóveda (Figura 2a), mientras que las cavernas excavadas de estación se ejecutan en 6 fases (Figura 2b). El avance o calota se realiza en dos fases,

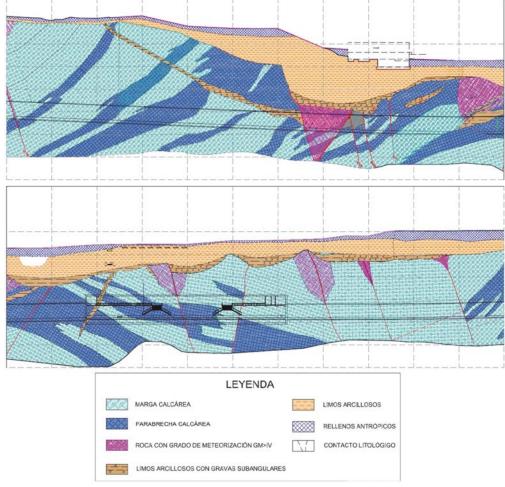


Figura 1. Perfil geológico del tramo Etxebarri-Casco Viejo de la línea 3 del FMB en las inmediaciones de la estación de Txurdinaga.

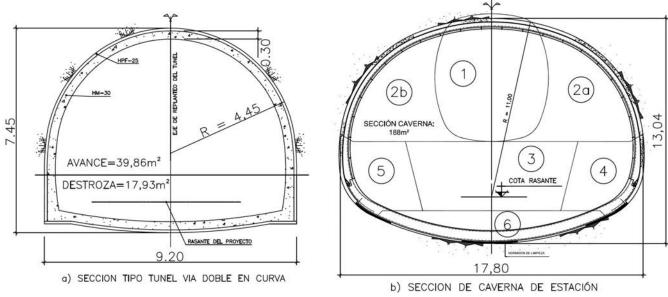


Figura 2. Secciones de excavación de la línea 3 de FMB, a) túnel de línea, b) caverna de estación.

primero se realiza la excavación y sostenimiento provisional de la galería piloto (Fase 1) y se completa la fase de avance con el ensanche de la sección hasta la definitiva, primero un margen (Fase 2a) y a continuación el opuesto (Fase 2b). La destroza se divide en 2 partes. En primer lugar se realiza una zanja central (Fase 3) de aproximadamente un tercio del ancho de la sección, para que *a posteriori* se realiza la excavación decalada de los machones laterales (Fases 4 y 5), de tal forma que nunca se encuentre el túnel excavado en destroza en el mismo punto en ambos hastiales. La contrabóveda de la Sección tipo de las Estaciones del FMB se excava como fase independiente (Fase 6) dentro del método constructivo.

El tramo analizado, Etxebarri-Casco Viejo, al igual que el resto de la línea 3, ha sido excavado con medios mecánicos en su totalidad, de manera similar a las líneas 1 y 2 del FMB (61) (65). Para ello, la maquinaria principal que se ha empleado son rozadoras o minadores de ataque puntual. Se han utilizado diferentes rozadoras, tanto con metodología de trabajo *Ripping*, como *Milling*, que ripan o escarifican el frente de excavación de forma frontal o lateral, respectivamente (39) (65). Esta metodología es menos agresiva frente a la descompresión del frente y afección al radio de plastificación del macizo rocoso en el entorno del túnel, como sería el caso contrario de la perforación y voladura.

Todas las fases de excavación, tanto en cavernas como en túnel de línea, conllevan el sostenimiento del túnel dentro de la misma fase constructiva, tanto de carácter provisional (galería piloto y taludes resultantes de la zanja central de destroza) como definitivo, que es el determinado principalmente por la calidad del macizo rocoso presente, así como por la singularidad de la excavación en cada punto. Para la determinación del sostenimiento se ha empleado la definición de la calidad del macizo rocoso mediante el sistema clasificación de *RMR* de Bieniawski (1), mediante la cual se asigna la tipología de sostenimiento predefinida en el proyecto. Además, en el tramo estudiado se ha calculado la *Q* de Barton, para corroborar la idoneidad de los sostenimientos asignados según proyecto.

4. METODOLOGÍA APLICADA

Para la obtención de las correlaciones entre el índice RMR de Bieniawaski y Q de Barton se han utilizado los datos ob-

tenidos en 231 levantamientos de frente realizados en el túnel de la línea 3 de FMB, en el tramo Etxebarri-Casco Viejo, de 3.880 m de longitud. Estos datos se obtuvieron mediante levantamientos de frente realizados por el geólogo de la asistencia técnica de las obras, donde se obtuvieron simultáneamente los valores de *RMR* y *Q* en cada uno de esos frentes. Los datos obtenidos en estos levantamientos están registrados en fichas similares a las mostradas en la Figura 3. La Figura 4 muestra un ejemplo del frente donde se han obtenido los valores de las clasificaciones.

Las versiones de los sistemas de clasificación empleadas son las siguientes:

- Sistema RMR, versión de 1989 (1), que incluye la corrección por la orientación de las discontinuidades. Este índice se denomina RMR_{80} .
- Sistema Q, versión de 1994 (13), que incluye las últimas actualizaciones sobre SRF para incorporar fenómenos de resquebrajamiento y/o deslizamiento y de estallidos de roca. Se denomina Q_{94} .

Algunos ingenieros y geólogos, para valores que quedan entre los rangos propuestos en los sistemas de clasificación, interpolan la valoración que se otorga a esos rangos. En la obtención de los datos del presente artículo se han utilizado los valores otorgados a cada uno de los rangos de cada parámetro utilizado en los sistemas de clasificación del macizo rocoso. Por tanto, no se han interpolado valores intermedios.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De manera similar a las fórmulas propuestas, la mejor correlación entre los valores de los sistemas de clasificación RMR_{89} y Q_{94} se obtiene mediante una relación logarítmica. La ecuación [19] utiliza $\ln\!Q_{94}$ como variable independiente, mientras que la ecuación [20] utiliza el RMR_{80} .

$$RMR_{89} = 7,86 \cdot \ln Q_{94} + 45,72$$
 [19]

$$ln Q_{94} = 0.116 * RMR_{89} - 5.25$$
 [20]

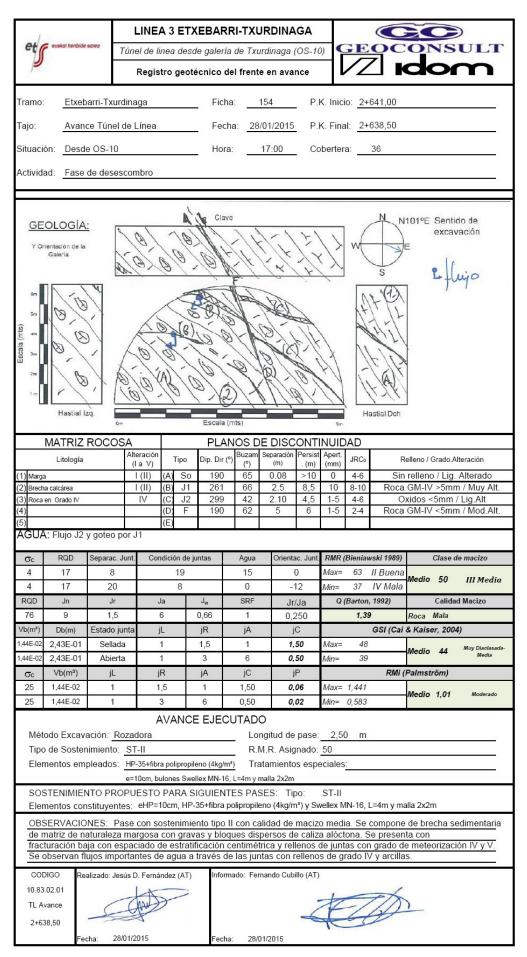


Figura 3. Ejemplo de ficha de levantamiento de frente empleada en la línea 3 del FMB.

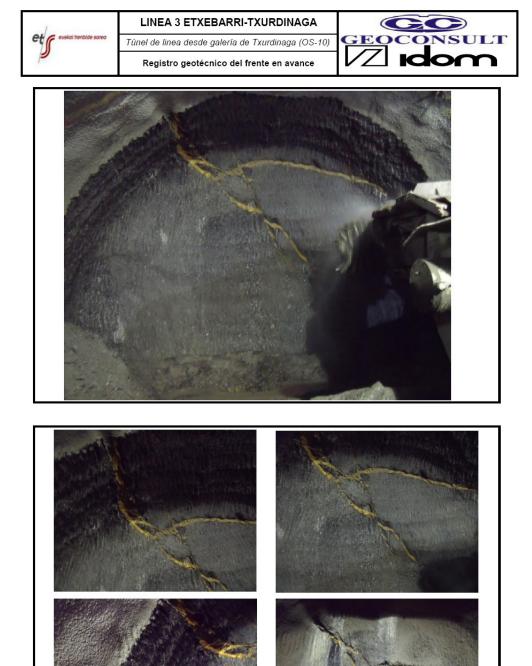


Figura 4. Ejemplo de frente caracterizado en el tramo Etxebarri-Casco Viejo.

Ambas ecuaciones, con las variables señaladas, tienen un coeficiente de correlación de Pearson $R^2 = 0.915$, valor bastante elevado, que indica que el 91,5 % de la variación de los valores está explicada por el modelo propuesto (Figura 5).

De manera similar a lo indicado por Kaiser *et al.* (25), no se obtiene una relación única entre las dos variables. Si se toma un valor de $Q_{94}=4$ en la ecuación [19], se obtiene un valor de $RMR_{89}=56,62$. Si introducimos este valor de $RMR_{89}=56,62$ en la ecuación [20], se obtiene un valor de $Q_{94}=3,80$. La dife-

rencia entre los valores predichos no es tan importante como la señalada por Kaiser $et\ al.\ (25)$, debido al alto grado de correlación entre ambas variables ($R^2=0.915$). Aun así, se ha preferido establecer una única ecuación que relacione los dos sistemas de manera única para esta litología en concreto. Para verificar la normalidad en las distribuciones de los datos de ambos sistemas, se ha realizado el contraste de Kolmogorov-Smirnov. Este contraste ha indicado que los datos encajan razonablemente bien con una distribución normal, es decir, no hay una diferencia significativa entre los datos obtenidos

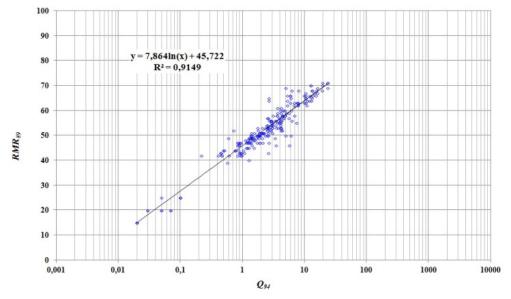


Figura 5. Datos de RMR y Q obtenidos en el tramo Etxebarri-Casco Viejo de la línea 3 del FMB para limolitas y margas calcáreas y correlación entre ambos.

y unos datos distribuidos normalmente. Una vez verificada la normalidad de los datos, se utiliza el enfoque probabilístico propuesto por Kasier *et al.* (25), mediante la ecuación [21]:

$$RMR = \left(S_{_{RMR}} \big/ S_{_{\ln Q}}\right) \cdot \ln Q + \overline{RMR} \cdot \left[1 - \left(V_{_{RMR}} \big/ V_{_{\ln Q}}\right)\right] \quad \text{[21]}$$

Donde:

RMR es el promedio de los valores de RMR

 $S_{_{RMR}}$ y $S_{_{\ln Q}}$ son las desviaciones estándar de RMR y $\ln Q,$ respectivamente

 $V_{\rm \it RMR}$ y $V_{\rm ln\it Q}$ es el coeficiente de variación de $\it RMR$ y $\rm ln\it Q$, respectivamente, el cual se calcula mediante la ecuación [22]:

$$V_{X} = \frac{S_{X}}{|X|}$$
 [22]

Donde \overline{x} y S_x es la media y la desviación estándar de los valores analizados, respectivamente. Aplicando la ecuación [21] se obtiene la correlación única entre RMR y Q:

$$RMR_{89} = 8.2 \cdot \ln Q_{94} + 45.4$$
 [23]

La ecuación propuesta mantiene un R^2 de 0,915. En la Figura 6 se puede observar como la ecuación [23] se sitúa entre las ecuaciones [19] y [20].

En la Figura 7 se representa la ecuación [23], propuesta para formaciones sedimentarias de grano fino, con las propues-

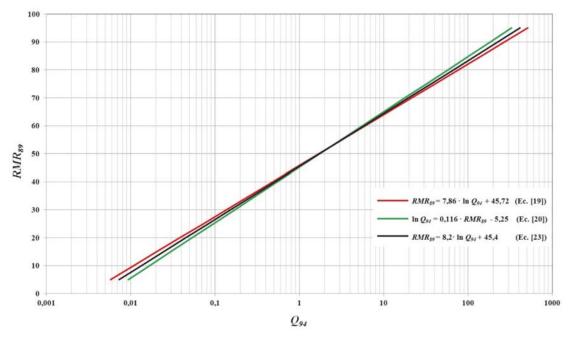


Figura 6. Representación de las ecuaciones [19], [20] y [23].

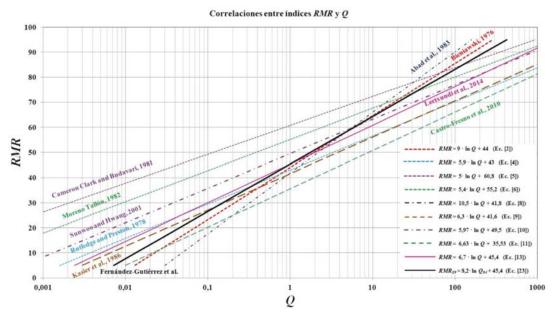


Figura 7. Comparación de la ecuación [23] obtenida para formaciones sedimentarias de grano fino con otras correlaciones propuestas entre índice RMR y Q.

tas por otros autores de la Tabla 3. Se observa que se sitúa en la parte central de la dispersión que trazan las distintas propuestas. Se debe recordar que no todas las relaciones representadas utilizan la misma versión de los sistemas RMR y/o Q. Por otra parte, aunque la ecuación propuesta no establezca una correlación tan precisa en los extremos de los sistemas RMR y Q, esto no resulta importante, porque, como se observa en la Figura 5, la mayoría de los valores de RMR se concentran entre 40 y 70, valores habituales en esta litología analizada, y algunos valores en el entorno de 15-25, mientras que en sistema Q la práctica mayoría de los valores se sitúa en el rango 0.5-20.

6. CONCLUSIONES

Los sistemas de clasificación del macizo rocoso surgieron como medio de transmisión del conocimiento adquirido por los ingenieros y geólogos proyectistas en distintas partes del mundo y con diversas geologías. Estos sirven como un método sistemático de caracterización del macizo rocoso y permiten conocer un sostenimiento recomendado a emplear. Sin embargo, no deben constituir una sustitución de los cálculos analíticos, de las observaciones en campo o del conocimiento de expertos. Ninguna clasificación se ha impuesto sobre las otras, y habitualmente se recomienda el empleo de más de una en el mismo proyecto. Los dos sistemas que más se utilizan en todo el mundo son el sistema *RMR* propuesto por Bieniawski (1) (11) y el sistema *Q* propuesto por Barton *et al.* (12) (13).

Desde la primera correlación de Bieniawski entre estos 2 sistemas en 1976, distintos autores han propuesto distintas ecuaciones para relacionar ambos sistemas, con mayor o menor grado de correlación. La forma habitual de estas ecuaciones ha sido de la forma: $RMR = a \cdot \ln Q + b$. Entre las variantes propuestas por los autores se observa que para grupos de datos provenientes de litologías similares la correlación es mayor, y que esta disminuye al agruparse bajo la misma propuesta varias litologías. En este artículo se ha propuesto una fórmula que relacione los valores obtenidos con la versión del sistema RMR de 1989 (1) y la versión de 1994 del sistema Q

(13), últimas revisiones propuestas por sus autores, para formaciones sedimentarias de grano fino, predominando las limolitas y margas calcáreas. Se trata de la geología habitual en la zona del Bilbao metropolitano, y que ha estado presente en la mayoría de los trazados subterráneos del Ferrocarril Metropolitano de Bilbao y de otras infraestructuras subterráneas.

Para la correlación propuesta se han utilizado 231 levantamientos de frente con estimación de los índices RMR y Q provenientes del túnel de la excavación del túnel Etxebarri-Casco Viejo, de 3.880 m de longitud perteneciente a la línea 3 del Ferrocarril Metropolitano de Bilbao. La litología encontrada pertenece a la formación de «La Tejera», compuesta principalmente por las señaladas limolitas y margas calcáreas. La relación obtenida tiene un R^2 de 0,915. Debido a que se obtienen distintas fórmulas según la variable independiente escogida, RMR o lnQ, tras verificarse por medio de un test de correlación de Kolmogorov-Smirnov la distribución normal de los datos de ambas variables, se ha establecido una única relación entre ambas, ecuación [23]:

$$RMR_{89} = 8.2 \cdot \ln Q_{94} + 45.4$$
 [23]

Dada la gran dispersión apuntada por muchos autores, como resultado de que los dos sistemas utilizan distintos parámetros, resulta más conveniente establecer las relaciones para litologías similares. De esta manera se propone esta correlación que puede ser aplicada en futuros proyectos que se realizan en la misma litología en el área del Bilbao metropolitano, donde están previstas futuras infraestructuras subterráneas, y en áreas de similares características.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a Eusko Trenbide Sarea/Red Ferroviaria Vasca (ETS/RFV) y la Diputación Foral de Bizkaia/Bizkaiko Foru Aldundia (DFB/BFA) la posibilidad de poder utilizar los datos obtenidos en la ejecución de la línea 3 del Ferrocarril Metropolitano de Bilbao para la elaboración de este artículo.

REFERENCIAS

- (1) Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications. New York: John Wiley & Sons.
- (2) Potvin, Y., Dight, P. M., Wesseloo, J. (2012). Some pitfalls and misuses of rock mass classification systems for mine design. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(8): 1-6.
- (3) Palmstrom, A. (1996). Characterizing rock masses by the RMi for use in practical rock engineering. Part 1: The development of the Rock Mass index (RMi). *Tunnelling and Undergroung Space Technology*, 11(2): 175-188, doi: http://dx.doi.org/10.1016/0886-7798(96)00015-6.
- (4) Hoek, E., Brown, E. T. (1980). Underground Excavations in Rock. London: The Institution of Mining and Metallurgy.
- (5) Protodyakonov, M. M. (1907). Rock pressure on mine support (theory of mine support), pp. 23-45. Yekaterinoslav: Tipografiya Gubernskogo Zemstva.
- (6) Terzaghi, K. (1946). Rock defects and loads on tunnel supports. En Proctor, R. V., White, T. L. (Eds.), *Rock tunnelling with steel supports* (pp. 17-99). Youngstown, Ohio: Commercial Shearing and Stamping Company.
- (7) Lauffer, H. (1958). Classification for tunnel construction. Geologie und Bauwesen, 24(1): 46-51.
- (8) Deere, D. U., Hendron, A. J., Patton, F. D., Cording, E. J. (1967). Design of surface and near-surface construction in rock. En Fairhurst (Ed.), *Failure and breakage of rock, proceedings 8th US symposium on rock mechanics* (pp. 237-302). New York: Society of Mining Engineers, AIME.
- (9) Deere, D. U. (1968). Geological Considerations. En Stagg, K., Zienkiewicz, W. (Eds.), *Rock mechanics in engineering practice* (pp. 1-20). New York: Wiley.
- (10) Wickham, G. E., Tiedemann, H. R., Skinner, E. H. (1972, 5 de junio). Support determinations based on geologic predictions. En *North American rapid excavation and tunnelling conference* (pp. 43-64). Chicago: Society of Mining Engineers, AIME.
- (11) Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. South African Institute of Civil Engineers, 15(12): 333-343.
- (12) Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of rock support. *Rock Mechanics*. 6(4): 189-236, doi: http://dx.doi.org/10.1007/BF01239496.
- (13) Barton, N., Grimstad, E. (1994). Rock mass conditions dictate choice between NMT and NATM. *Tunnels & Tunnelling International*, 26(10): 39-42.
- (14) Hoek, E., Kasier, P. K., Bawden, W. F. (1995). Support of Underground Excavations in Hard Rock. Rotterdam: A. A. Balkema.
- (15) Marinos, V., Marinos, P., Hoek, E. (2005). The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(1): 55-65, doi: http://dx.doi.org/10.1007/s10064-004-0270-5.
- (16) Palmstrom, A. (1996). Characterizing rock masses by the RMi for use in practical rock engineering, Part 2: Some practical applications of the Rock Mass index (RMi). *Tunnelling and Undergroung Space Technology*, 11(3): 287-303, doi: http://dx.doi.org/10.1016/0886-7798(96)00028-4.
- (17) Sheorey, P. R. (1993). Experience with the application of modern rock classifications in coal mine roadways. En Hudson, J. A. (Ed.), *Comprehensive Rock Engineering, Principles, Practice and Projects*, 5 (pp. 411-431). Oxford: Pergamon.
- (18) Goel, R. K., Jethwa, J. L., Paithankar, A. G. (1996). Correlation between Barton's Q and Bieniawski's RMR—A new approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 33(2): 179-181, doi: http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(95)00057-7.
- (19) Kumar, N., Samadhiya, N. K., Anbalagan, R. (2004). Application of rock mass classification systems for tunnelling in Himalaya, India. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(1): 852-857, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.03.147.
- (20) Tzamos, S. Sofianos, A. I. (2007). A correlation of four rock mass classification systems through their fabric indices. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(4): 477-495, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.08.003.
- (21) Aydan, Ö., Ulusay, R., Tokashiki, N. (2014). A new rock mass quality rating system: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and its applications to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(4): 1255-1276, doi: http://dx.doi.org/10.1007/s00603-013-0462-z.
- (22) Jing, L., Hudson, J. A. (2002). Numerical methods in rock mechanics. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(4): 409-427, doi: http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00065-5.
- (23) Palmstron, A., Broch, E. (2006). Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(6): 575-593, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j. tust.2005.10.005.
- (24) Goel, R. K., Jethwa, J. L., Paithankar, A. G. (1995). Indian experiences with Q and RMR systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 10(1): 97-109, doi: http://dx.doi.org/10.1016/0886-7798(94)00069-W.
- (25) Kaiser, P. K., MacKay, C., Gale, A. D. (1986). Evaluation of rock classification at B. C. Rail Tumbler Ridge Tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 19(4): 205-234, doi: http://dx.doi.org/10.1007/BF01039996.
- (26) Palmström, A. (2009). Combining the RMR, Q, and RMi classification systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(4): 491-492, http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2008.12.002.
- (27) Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 39(2): 185-216, doi: http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00011-4.
- (28) Zhang, L. (2016). Determination and applications of Rock Quality Designation (RQD). *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(3): 389-397, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.008.

- (29) Russo, G. (2009). A new rational method for calculating the GSI. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(1): 103-111, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2008.03.002.
- (30) Pantelidis, L. (2009). Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(2): 315-325, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.06.003.
- (31) Ribacchi, R., Lembo-Fazio, A. (2005). Influence of rock mass parameters on the performance of a TBM in a gneissic formation (Varzo Tunnel). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38(2): 105-127, doi: http://dx.doi.org/10.1007/s00603-004-0032-5.
- (32) Hassanpour, J., Rostami, J., Khamehchiyan, M., Bruland, A., Tavakoli, H. R. (2009). TBM performance analysis in pyroclastic rocks: a case history of Karaj water conveyance tunnel. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(4): 427-445, doi: http://dx.doi.org/10.1007/s00603-009-0060-2.
- (33) Hamidi, J. K., Shahriar, K., Rezai, B., Rostami, J. (2010). Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4): 333-345, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2010.01.008.
- (34) Innaurato, N., Mancini, A., Rondena, E., Zaninetti, A. (1991, 16 de septiembre). Forecasting and effective TBM performances in a rapid excavation of a tunnel in Italy. En *7th International Congress ISRM* (pp. 1009-1014). Aachen.
- (35) Hassanpour, J., Rostami, J., Khamehchiyan, M., Bruland, A. (2009). Developing new equations for TBM performance prediction in carbonate-argillaceous rocks: a case history of Nowsood water conveyance tunnel. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 4(4): 287-297, doi: http://dx.doi.org/10.1080/17486020903174303.
- (36) Barton, N. (2000). TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock. Rotterdam: Balkema.
- (37) Ranasooriya, J., Nikraz, H. (2009). Reliability of the linear correlation of Rock Mass Rating (RMR) and Tunnelling Quality Index (Q). *Australian Geomechanics*, 44(2): 47-54.
- (38) Castro-Fresno, D., Diego-Carrera, R., Ballester-Muñoz, F., Alvarez-Garcia, J. J. (2010). Correlation between Bieniawski's RMR and Barton's Q index in low-quality soils. *Revista de la Construcción*, 9(1): 107-119.
- (39) Gallo-Laya, J., Pérez-Acebo, H., García-Bragado, D. (2016). Excavación, sostenimiento y técnicas de corrección de túneles, obras subterráneas y labores mineras. Bilbao: Universidad del País Vasco UPV/EHU.
- (40) Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. En Bieniawski, Z. T. (Ed.), *Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering* (pp. 97-106). Johannesburg: A. A. Balkema.
- (41) Bieniawski, Z. T. (1974, 1 de septiembre). Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling. En *3rd International Congress on Rock Mechanics* (pp. 27-32). Denver: International Society for Rock Mechanics (ISRM).
- (42) Bieniawski, Z. T. (1975, 21 de julio). Case Studies: Prediction of rock mass behaviour by the geomechanics classification. En *2nd Australia-New Zealand Conference on Geomechanics* (pp. 36-41). Brisbane: Institution of Engineers, Australia.
- (43) Bieniawski, Z. T. (1979, 2 de septiembre). The geomechanics classification in rock engineering applications. En *4th ISRM Congress* (pp. 41-48). Montreux (Switzerland): International Society for Rock Mechanics (ISRM).
- (44) Celada, B., Tardáguila, I., Varona, P., Rodríguez, A., Bieniawski, Z. T. (2014, 9 de mayo). Innovating tunnel design by an improved experience-based RMR system. En *World Tunnel Congress*. Iguassu Falls, Brazil: ITA-AITES.
- (45) Barton, N. (1976). Recent experience with the Q System in tunnel support design. En Bieniawski, Z. T. (Ed.), *Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering* (pp. 107-115). Johannesburg: A. A. Balkema.
- (46) Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1977). Estimation of support requirements for underground excavations. En Fairhurst, C., Crouch, S. L. (Eds.), *16th Symposium on Design Methods in Rock Mechanics* (pp. 163-177). New York: American Society of Civil Engineers.
- (47) Barton, N., Loset, R., Lien, R., Lunde, J. (1980). Application of Q-system in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations. En Begman, M. (Ed.), *Subsurface Space*, 2 (pp. 553-561). New York: Pergamon.
- (48) Grimstad, E., Barton, N. (1993). Updating the Q-system for NMT. En Jompen, Opsahl, Berg (Eds.), *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support* (pp. 46-66). Oslo: Norwegian Concrete Association.
- (49) Bieniawski, Z. T., Barton, N. (2009). RMR and Q: Setting the record straight. *Tunnels and Tunnelling International*, February 2009: 26-29.
- (50) Jethwa, J. L., Dube, A. K., Singh, B., Mithal, R. S. (1982). Evaluation of methods for tunnel support design in squeezing rock conditions. En 4th International Congress of International, 5 (pp. 125-134). Delhi: Association of Engineering Geology.
- (51) Rutledge, J. C., Preston, R. L. (1978, 29 de mayo). Experience with engineering classifications of rock. En *International Tunnelling Symposium* (pp. A3.1-A3.7). Tokyo, Japan Tunnelling Association.
- (52) Cameron-Clarke, I. S., Budavari, S. (1981). Correlation of rock mass classification parameters obtained from borecore and in-situ observations. *Engineering Geology*, 17(1-2): 19-53, doi: http://dx.doi.org/10.1016/0013-7952(81)90019-3.
- (53) Moreno Tallon, E. (1982, 7 de junio). Comparison and application of geomechanics classification schemes in tunnel construction. En *Tunnelling 82, 3rd International Symposium* (pp. 241-246). Brighton: The Institute of Mining and Metalurgy.
- (54) Celada Tamames, B. (1983). Fourteen years of experience on rock bolting in Spain. En Stephansson, O. (Ed.), *Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting*, (pp. 295-311). Rotterdam: A.A. Bankelma.
- (55) Abad, J., Celada, B., Chacon, E., Gutierrez, V., Hidalgo, E. (1983, 10 de mayo). Application of geomechanical classification to predict the convergence of coal mine galleries and to design their supports. En *5th International Congress of Rock Mechanics* (pp. 15-19). Melbourne: International Society for Rock Mechanics (ISRM).
- (56) Sunwoo, C., Hwang, S. (2001, 11 de septiembre). Correlation of rock mass classification methods in Korean rock mass. En *2nd Asian Rock Mechanics Symposium* (pp. 631-633). Beijing: A. A. Balkema.

- (57) Alkorta-Lertxundi, A., Bernardo-Sánchez, A. (2010, 18 de mayo). Comparación de la aplicación de las clasificaciones geotécnicas RMR, Q y GSI en la ejecución de los túneles de la Variante Sur Metropolitana de Bilbao. En *Jornadas de Ingeniería Geológica y Geotecnia de Túneles*. Madrid: Ilustre Colegio Oficial de Geólogos.
- (58) Lertxundi, A. A., Bernal, R. M., Ruiz, G. M., Sánchez-Rodríguez, S. (2014). Geotechnical characterization and correlations obtained in Flysch units. En Alejano, R., Perucho, A., Olalla, C., Jiménez, R. (Eds.), *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses* (pp. 439-444). London: Taylor & Francis Group.
- (59) Sayeed, I., Khanna, R. (2015, 27 de octubre). Empirical correlation between RMR and Q systems of rock mass classification derived from Lesser Himalayan and Central crystalline rocks. En *International Conference on "Engineering Geology in New Millenium"*. New Delhi: Journal Engineering of Geology.
- (60) Madinaveitia, J. R. (1999, 31 de mayo). Station cavern: The heart of the Bilbao Metro. En *Challenges for the 21st Century: Proceedings of the World Tunnel Congress*' 99 (pp. 261-265). Oslo: Taylor & Francis.
- (61) IMEBISA (1998). Metro Bilbao Ingeniería y Arquitectura / Ingeniearitzako eta Arkitekturak. Bilbao: IMEBISA.
- (62) Gullón, A. A., Pacios, P. (2010, 14 de mayo). Experience in Construction in Strong Rock with Roadheader in the Ariz-Basauri section of the Bilbao Metro. En ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC 2010. Vancouver: International Tunnelling Association.
- (63) Pérez-Acebo, H., Marcano-Ceballos, R. (2015, 17 de junio). Excavación del túnel del tramo Ariz-Basauri del Metro de Bilbao en terrenos de caliza altamente karstificada y en zonas de rellenos coluviales sin presencia de roca bajo zona densamente poblada. En *Spain Minergy, I Congreso Internacional de Minería, Energía y Metalurgia* (pp. 207-216). Gijón: Universidad de Oviedo.
- (64) Rabcewicz, L. V. (1964). The new Austrian tunnelling method. Water Power, 16(11): 453-457.
- (65) Ferrero, P. P., Mota, E. (2008). Excavación de túneles con rozadora: aplicación en el tramo Aritz-Basauri en la línea 2 del Metro de Bilbao. *Ingeopres*, 176: 44-54.

* * *