

Procedimiento para el control de filtraciones en excavaciones subterráneas. Caso de estudio túnel Serones – Salida Guaro

Armando Cuesta Recio¹ acuesta@ismm.edu.cu
Roberto Watson Quesada¹ rwatson@ismm.edu.cu
Aristides A. Legrá Lobaina¹ alegra@ismm.edu.cu

Resumen

En las excavaciones subterráneas el agua que circula por el macizo rocoso se infiltra al conjunto macizo-excavación subterránea. Los túneles del trasvase este-oeste que se construyen en la parte oriental de Cuba, son afectados por estas filtraciones, debido a que generalmente son laboreados al nivel del acuífero o por debajo de éste en un macizo constituido principalmente por rocas básicas y ultrabásicas con agrietamiento variable y algunas fallas. La selección de las técnicas para el control del agua dentro de la excavación no siempre resulta adecuada al no tomar en consideración variables que inciden de manera determinante en el fenómeno de infiltración. El artículo expone un procedimiento para elegir la técnica más adecuada a las condiciones particulares de cada obra; el mismo basa la elección en la relación directa que existe entre la permeabilidad y la calidad de los macizos rocosos fuertes, agrietados y poco porosos, comprobada de forma experimental y analíticamente. La aplicación del procedimiento al túnel Serones-Salida Guaro del trasvase arrojó correspondencia entre la calidad de macizo, la magnitud de las filtraciones, y las técnicas de control de estas últimas que mejor se adecuan a las condiciones concretas de cada sector del túnel.

Palabras clave

Excavaciones subterráneas, control de filtraciones, túneles, permeabilidad, macizo rocoso, agua.

Procedure to filtration control in underground excavations. Study case of tunnel Serones–Salida Guaro

Abstract

The water running through rocky massifs seeps into massif-excavation bodies. The decanting tunnels being built from east to west in the east of Cuba have damaged due to water seepage. This is mainly due to the fact that these tunnels are generally constructed at or below the level of the aquifer in rocky massifs formed fundamentally by basic and ultra basic rocks with variable cracking and faults. Generally, the techniques applied to resolve the damages are not appropriate as determining factors involved in the process of seepage are not considered. This article describes a procedure to select the most suitable techniques required in each construction work based on its peculiarities. This selection is based on a direct relation between the permeability and the quality of strong cracked and less porous massifs; which was proven analytically and experimentally. The implementation of this procedure on the tunnel Serones-Salida Guaro indicated proportionality between the massif quality, seepage level and control practices which are most suitable according to the specific conditions of each tunnel section.

Key words

Underground excavation, seepage, tunnel, water inflow, permeability, rock mass

INTRODUCCIÓN

Las excavaciones subterráneas, de manera general, son afectadas en mayor o menor medida por filtraciones inherentes a la circulación del agua en el macizo rocoso laboreado; sin embargo, a este aspecto no siempre se le da la importancia que merece en los proyectos de construcción de obras subterráneas. Aunque se conocen algunos métodos de control de las filtraciones, su implementación no siempre responde a un estudio previo de las características del macizo ni a un procedimiento basado en un análisis de variantes que permita aplicar la más racional en cada caso específico, aspecto que incide en la calidad y efectividad de las soluciones que se adoptan para controlar las filtraciones.

Harris y Pollard (1986) proponen un procedimiento general por el cual, conociendo la calidad del macizo rocoso y parámetros hidrogeológicos, seleccionan una variante de tres posibles: bombeo (cuando la filtración es baja), inyecciones cementantes (cuando la calidad del macizo es mala y la permeabilidad es alta) y congelación; incluyen además la posibilidad de aplicación de una variante combinada. La técnica de electroósmosis y las condiciones de su aplicación son referidas también por estos autores.

En el trasvase este-oeste que se construye en Mayarí (Cuba), la mayoría de los túneles se laborean al nivel del acuífero o por debajo de éste, en un macizo constituido principalmente por rocas básicas y ultrabásicas, específicamente gabros, harzburgitas y peridotitas (también aparecen intercalaciones de rocas de formaciones calcáreas) donde el agrietamiento es variable y existen algunas fallas. La combinación de estas características da lugar a la existencia de zonas de elevada permeabilidad, donde se producen derrumbes como resultado de la pérdida de resistencia de las rocas en algunos casos, y en otros, por el lavado del relleno de las grietas. Otra afectación ocasionada por las filtraciones en los túneles del trasvase es la ocurrencia de inundaciones parciales.

La aplicación del método de Harris y Pollard a los túneles referidos no se adecua completamente. En primer lugar, el bombeo no es viable económicamente, además de que el drenaje en el túnel transcurre de manera natural por gravedad. Por otra parte, el gradiente geotérmico en la zona tropical no permite el empleo de la congelación. La electroósmosis es una técnica costosa y su aplicación está restringida a zonas de baja permeabilidad (formaciones arcillosas). Esto implica que, exceptuando las variantes posibles para las condiciones específicas de pequeños tramos afectados, la única variante general aplicable sería la inyección de sustancias cementantes en todas las secciones afectadas por filtración, sin tomar en consideración otras variantes posibles, en función de las condiciones específicas de los tramos afectados.

Este artículo describe un procedimiento para definir la técnica de control de las filtraciones de agua en túneles construidos en rocas fuertes, poco porosas y agrietadas, a partir de considerar las características orográficas, hidrográficas, hidrogeológicas y geoestructurales que inciden en el proceso de infiltración del agua y en su control. Se muestran los resultados de su aplicación en el túnel Serones-Salida Guaro del trasvase.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para seleccionar la técnica de control de filtración más adecuada en los túneles del trasvase, se propuso un procedimiento que toma en consideración las características orográficas, hidrográficas, hidrogeológicas y geoestructurales del macizo rocoso que inciden en el proceso de infiltración del agua y en su control.

Para contrastar los resultados del procedimiento se seleccionó el túnel Serones-Salida Guaro del trasvase este-oeste. El túnel, con dirección suroeste-noreste, se ejecuta en gabros con variado grado de alteración; se ubica entre las vaguadas del arroyo Serones y el río Guaro, tiene una longitud de 750 m, la forma de la sección transversal es ovoidal, la altura proyectada

es de 5,90 m y el ancho de 6,30 m; el arranque de la roca se realiza por perforación y voladura. Atendiendo a las características litoestructurales y a la presencia de agua, el túnel se dividió en diecisiete tramos, de éstos se estudiaron ocho, distribuidos en una longitud de 315 m, lo que representa el 47,05 % del total (Figura 1).

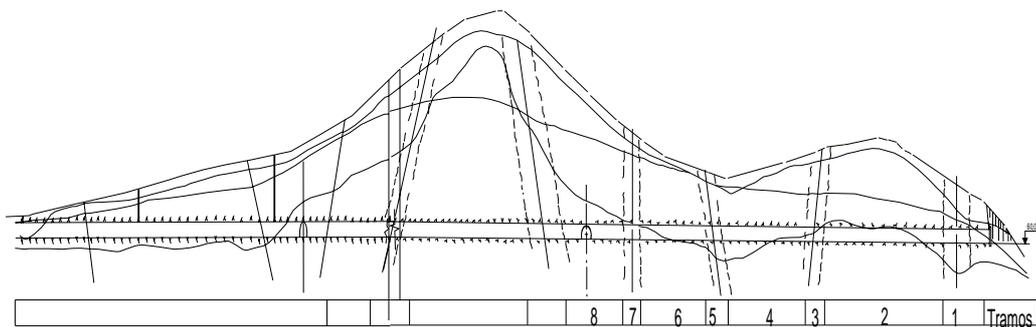


Figura 1. Perfil del túnel Serones Salida – Guaro

Procedimiento de selección de la técnica adecuada para el tratamiento de las filtraciones

El procedimiento, estructurado en tres etapas, tiene como propósito seleccionar la técnica más adecuada para controlar el agua que afecta el conjunto macizo-excavación. La primera etapa consiste en identificar y caracterizar los factores que favorecen las filtraciones (Tabla 1).

En la segunda etapa se selecciona la técnica, o la combinación de éstas, mediante la aplicación de un algoritmo lógico que considera varios factores incidentes y distintas técnicas para el tratamiento de las filtraciones (Figura 2).

La tercera etapa permite, a partir de la aplicación de cuatro grupos de criterios (técnicos, tecnológicos, socio-económicos y ambientales), elegir entre las técnicas seleccionadas en la segunda etapa, la más adecuada a la situación específica.

Descripción del algoritmo

El algoritmo está estructurado en cuatro bloques y diecinueve pasos, tal y como se muestra en la Figura 2.

Paso 1 (condicional)

Se analiza si la obra requiere o no tratamiento especial para el agua. Cuando en la excavación subterránea es necesario controlar las filtraciones de agua se desarrollan los Bloques II, III y IV del algoritmo, en caso contrario, se desarrolla el Bloque I.

Tabla 1. Aspectos que inciden en las afectaciones que con mayor frecuencia ocurren en las excavaciones subterráneas y guardan relación con la presencia de agua.

Afectaciones más frecuentes que guardan relación con el agua en las excavaciones subterráneas			
	<i>Inundación parcial o total de obras subterráneas</i>	<i>Perdida de estabilidad</i>	<i>Aumento de la humedad</i>
Aspectos que guardan relación con las afectaciones que se producen en las excavaciones subterráneas	Disminución de la cota del nivel de acuífero. Infiltración de las aguas meteóricas y aluviales, depende de: <ul style="list-style-type: none"> • Régimen de lluvia. • Coeficiente de filtración • Características naturales y antrópicas de la superficie. • Profundidad de ubicación del túnel. • Presencia de ríos o arroyos cercanos. 	Lavado de las grietas. Disminución de las propiedades de resistencia del macizo rocoso y la roca. Disolución de determinados minerales formadores de las rocas por el agua. Variación del estado tensional de macizo rocoso. Variación de las propiedades másicas.	Aplicación de revestimiento inadecuado. Empleo de técnicas no idóneas para el control del agua, o la ausencia de esta.

Bloque I

Si el tipo de excavación y la presencia del agua no requieren tratamiento especial, se desarrolla el paso 2.

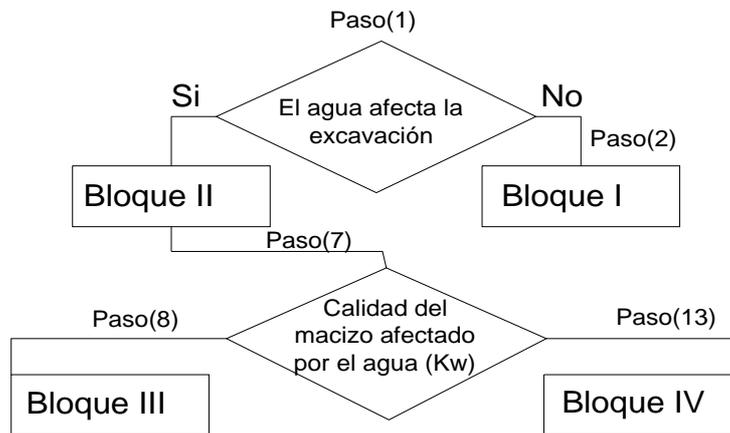


Figura 2. Algoritmo general simplificado para seleccionar la técnica adecuada de control de las filtraciones.

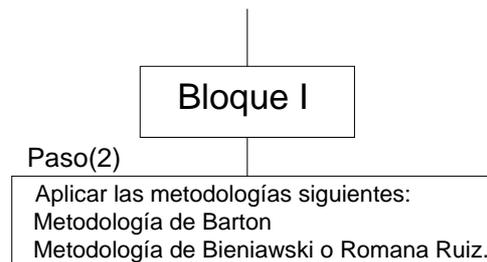


Figura 2a. Algoritmo de selección. Detalle del bloque I.

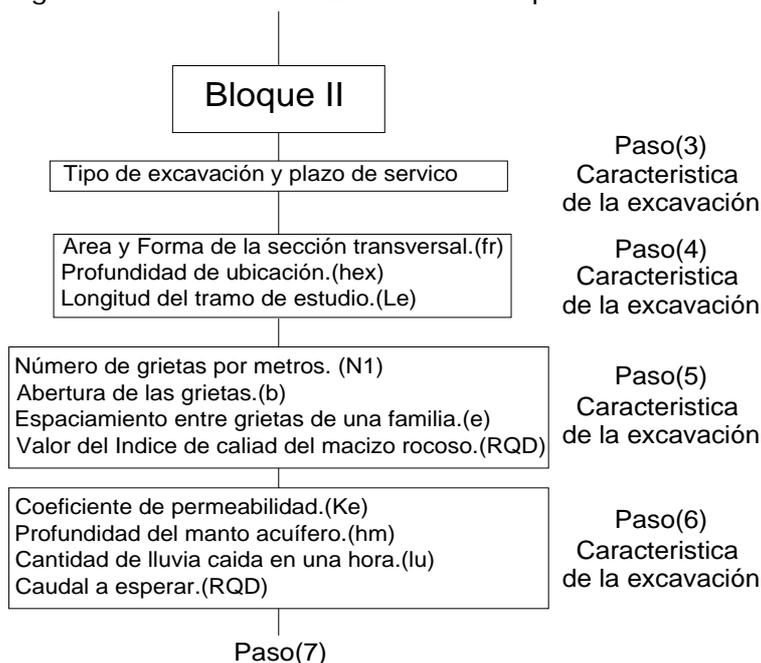


Figura 2b. Algoritmo de selección. Detalle del bloque II.

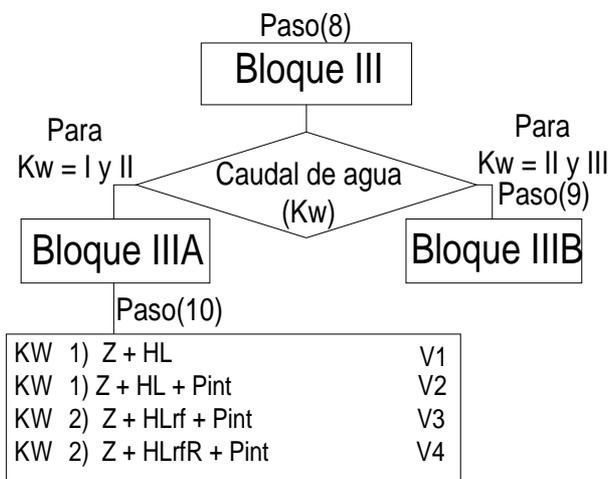


Figura 2c. Algoritmo de selección. Detalle del bloque III.

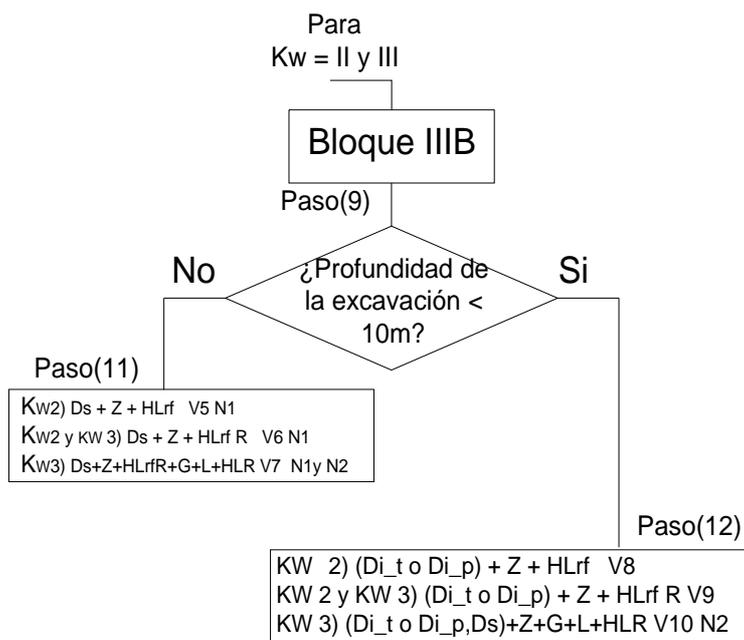


Figura 2d. Algoritmo de selección. Detalle del bloque IIIB.

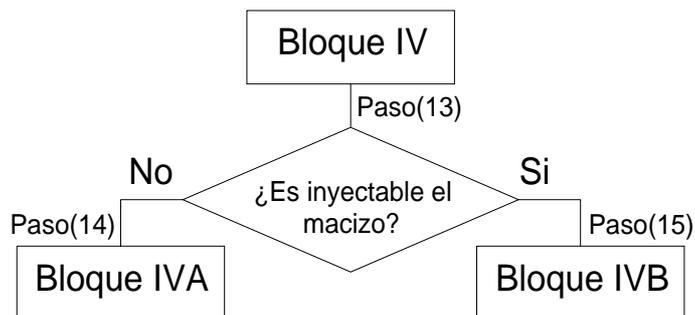


Figura 2e. Algoritmo de selección. Detalle del bloque IV.

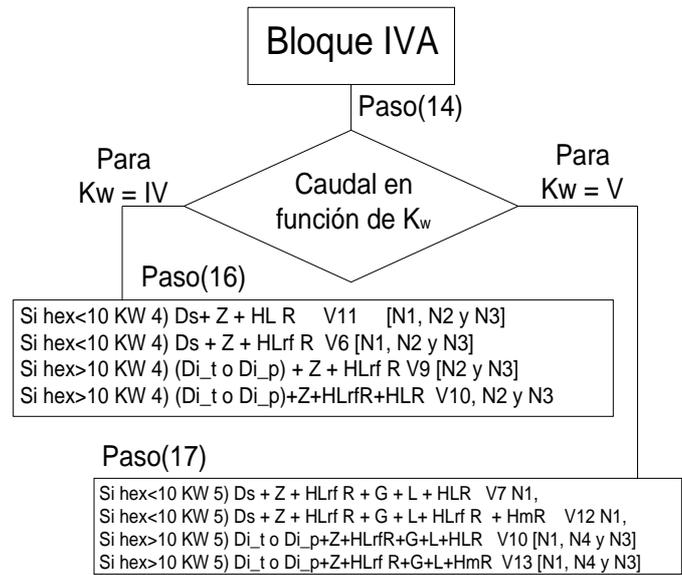


Figura 2f. Algoritmo de selección. Detalle del bloque IVA.

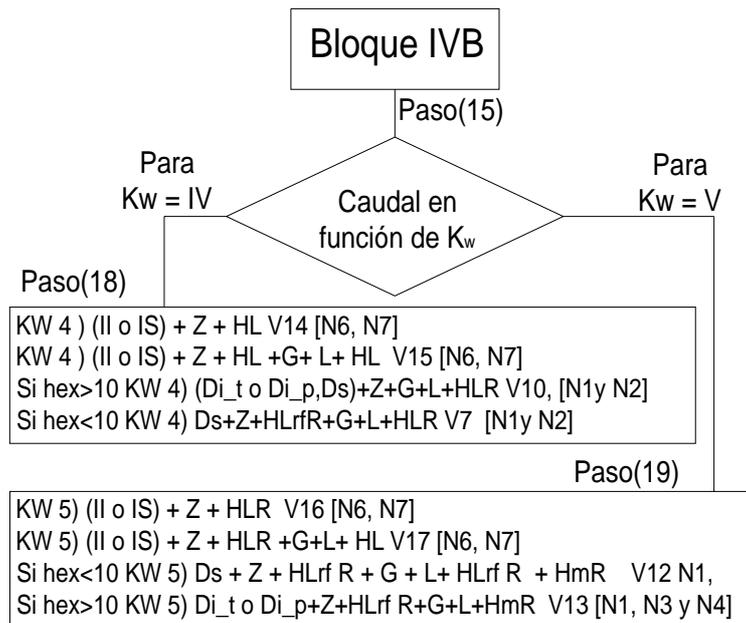


Figura 2g. Algoritmo de selección. Detalle del bloque IVB.

Paso 2

Se evalúa el conjunto macizo-excavación a través de las clasificaciones geomecánicas y como resultado se propone un tipo de sostenimiento o revestimiento adecuado, según las metodologías Barton, Bieniawski o Romana Ruiz (Bieniawski, 1974; Bieniawski & Alber, 1995, Barton & Grimstad, 2000; Barton, 2002; Ruiz, 2000, 2002).

Bloque II

En el bloque formado por los pasos 3, 4, 5 y 6, se caracteriza la obra afectada tomando en consideración los principales factores que inciden en los procesos de filtración y control del agua en la excavación.

Paso 3. Destino y plazo de vida de la excavación (entrada)

Se evalúa este aspecto debido a su proporcionalidad con los costos y durabilidad de la técnica de control de las filtraciones. La entrada se realiza seleccionando una de las tres categorías establecidas en la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de las excavaciones subterráneas en función del destino y plazo de servicio

Categoría	I	II	III
Plazo de servicio	< 5 años	Entre 5 y 10 años	Más de 10 años
Tipo o destino de excavación	Galerías preparatorias y galerías de minas.	Excavaciones temporales, para el acceso a cuerpo minero, o de otro tipo	Viaductos. Túneles hidráulicos y salas para máquinas. Obras para la defensa y estratégicas. Algunas excavaciones mineras destinadas a depósitos y almacenes.

Paso 4. Características de la excavación subterránea (entrada)

Este dato permite excluir técnicas de control y advertir sobre la efectividad de éstas en función de la forma y dimensiones de la sección transversal, la profundidad de ubicación y la longitud de los tramos de estudio. Ejemplo: Para sección transversal rectangular no se aconseja utilizar hormigón lanzado, debido a

su dificultad para adherirse en la unión del techo con las paredes y a la alta concentración de tensiones que se produce.

Paso 5. Características del agrietamiento (entrada)

Aquí se introducen valores cualitativos necesarios para determinar la permeabilidad o el RQD (si estos no se conocen); estos valores se utilizarán en el séptimo paso. La permeabilidad se determina a partir del espaciamiento (e) y la abertura media entre grietas (b), según ecuación propuesta por Bear y otros (1993).

El RQD se puede introducir directamente o inferirlo a partir del índice J_v , propuesto por Palmström (1982, 2005), que depende del número de grietas en una familia (N_1) y una constante K_1 que considera la distribución lineal de las grietas en un metro.

Paso 6. Características hidrogeológicas (entrada)

Cuando la permeabilidad (K_e) por tramos es conocida se introduce en este paso, además se asignan los valores del caudal (Q_w) que se filtra a la excavación subterránea y el nivel de acuífero (h_m); el valor del caudal se puede calcular conociendo la permeabilidad (introducida en el paso 5) y las características de la excavación (paso 4).

Paso 7. Condición

En este paso se selecciona la calidad del macizo afectado por el agua (K_ω) según sus categorías (I, II, III o IV y V), donde se relacionan la permeabilidad y el RQD, tal y como se muestra en la Tabla 3.

Los tramos de excavación que pertenezcan a las categorías I, II y III se desarrollaran en el bloque III, donde la permeabilidad es igual o inferior a 10 m/día, mientras aquellos donde la permeabilidad sea mayor de 10 m/día, serán tratados en el bloque IV, que comprende desde el paso 13 hasta el 19.

Tabla 3. Relación entre el coeficiente de permeabilidad del macizo y el índice de calidad propuesto por Deere (RQD), expresado a través de $K\omega$

Categorías ($K\omega$)	I	II	III	IV	V
Ke m/día	5	4	3	2	1
	0,001-0,1	0,1 – 1,0	1-10	11-100	100-1000 o más
Deere	E	D	C	B	A
	90 < RQD < 100	75 < RQD < 90	50 < RQD < 75	25 < RQD < 50	0 < RQD < 25

En ambos bloques se analiza si el caudal esperado es alto o bajo (pasos 8, 14 y 15), si la profundidad de ubicación de la excavación es superior a los 10 m (pasos 9 y del 16 al 19); la inyectabilidad se evalúa en el bloque IV (paso 13), donde se tratan los macizos de calidad mala y muy mala (categorías $K\omega$ IV y $K\omega$ V).

En el bloque III las técnicas sugeridas son el hormigón lanzado, el drenaje desde el interior y desde la superficie, y las láminas impermeables combinadas con geotextiles, mientras que en el bloque IV, se propone la utilización de las inyecciones con doble propósito, fortalecimiento y control del agua. La nomenclatura empleada en el algoritmo para denominar las técnicas de control de las filtraciones se describen en la Tabla 4.

Tabla 4. Denominación de las técnicas utilizadas

Nomenclatura	Denominación
Ds	Drenaje desde la superficie bajo la que yace la excavación
Di_t	Drenaje desde el interior para uso temporal
Di_p	Drenaje desde el interior para uso permanente
G	Geotextiles
hex	Profundidad de ubicación de la excavación respecto a la superficie
HL	Hormigón lanzado ordinario
HLrf	Hormigón lanzado con aditivo de rápido fraguado
HLrf R	Hormigón lanzado con aditivo de rápido fraguado y forzado
HmR	Hormigón monolítico reforzado
II	Inyección desde el interior
Is	Inyección desde la superficie
Pint	Pintura impermeabilizadora
V ₁	Variante
N ₁	Notas o consideraciones de la variante a aplicar
$K\omega$	Categoría según la permeabilidad y la calidad del macizo determinado a partir de la correlación entre ambos aspectos
Notas (N _i)	
N ₁	Cuando se presenta una situación similar en excavaciones horizontales con salida directa a la superficie (socavones), resulta más racional drenar el manto desde el interior de la excavación, posibilidad que siempre se debe analizar
N ₂	Si se cuenta con la técnica para aplicar hormigón in situ con paneles deslizantes se puede sustituir el hormigón lanzado reforzado, con lo que se disminuye la productividad pero se aumenta la densidad del hormigón, se humaniza el trabajo, y aumenta la calidad de la terminación
N ₃	La utilización del drenaje desde la superficie debe ser temporal, no se excluye la posibilidad del empleo del drenaje desde el interior de la excavación siempre que no afecta la calidad del trabajo. Con la utilización del drenaje desde el interior, la afectación al medio ambiente es menor
N ₄	Analizar la posibilidad de implementar el método Oberhasli o similar
N ₅	
N ₆	Las inyecciones que se realizan con el doble propósito deben ser comprobadas
N ₇	Después de realizar las inyecciones, se debe aplicar una capa de hormigón lanzado para proteger la superficie desnuda, evitar su deterioro, y disminuir la resistencia del interior de la excavación

Utilización de los criterios para elegir la técnica más adecuada

Como resultado de la segunda etapa y de la aplicación del algoritmo se obtienen dos o más variantes para el control del agua, sin embargo, solo una será aplicada en cada tramo afectado.

Para elegir la variante más adecuada se definieron 4 grupos de criterios de elección (Tabla 5). El valor de cada grupo de criterios (C_i) se obtiene al sumar la evaluación asignada a cada elemento que lo conforma. Se elige como técnica más adecuada aquella que tenga el mayor valor de C_{el} .

El valor final del criterio de elección (C_{el}) se obtiene al aplicar la expresión siguiente:

$$C_{el} = \sum_{i=1}^{i=4} C_i$$

Tabla 5. Criterios para elegir la técnica más adecuada (en negrilla) y elementos que los conforman (texto normal).

Criterios técnicos. (C₁)			
Grado de impermeabilidad que se logra con la técnica.	Inferior = 1	Superior = 2	Óptimo = 3
Criterios tecnológicos (C₂) = C_{tg1} + C_{tg2} + C_{tg3}			
Disponibilidad de la técnica e insumos. C _{tg1}	Poca = 1	Media = 2	Alta = 3
Nivel de especialización requerido C _{tg2}	Alto = 1	Medio = 2	Bajo = 3
Durabilidad de la técnica. C _{tg3}	Poca = 1	Media = 2	Alta = 3
Criterios económicos (C₃) = C_{e1} + C_{e2}			
Costo de la técnica e insumos. C _{e1}	Alto = 1	Medio = 2	Bajo = 3
Productividad de la técnica. C _{e2}	Baja = 1	Media = 2	Alta = 3
Criterios ambientales (C₄) = C_{a1} + C_{a2} + C_{a3} + C_{a4}			
Efectos sobre la flora y fauna. C _{a1}	Alto = 1	Medio = 2	Bajo = 3
Efectos sobre las aguas subterráneas. C _{a2}	Alto = 1	Medio = 2	Bajo = 3
Efectos sobre las aguas superficiales. C _{a3}	Alto = 1	Medio = 2	Bajo = 3
Efectos sobre el macizo. C _{a4}	Alto = 1	Medio = 2	Bajo = 3

Implementación del procedimiento propuesto para la selección de la técnica de control del agua en las excavaciones subterráneas

Se realizan los pasos siguientes:

1. Se analiza la ubicación de las bocas de la excavación con respecto a las pendientes del relieve y las escorrentías superficiales, además de las zonas de vaguadas y otros accidentes topográficos que puedan acumular agua en el área bajo la cual yace la excavación.
2. Se obtiene una relación funcional entre la calidad del macizo y su permeabilidad, de forma tal que se pueda estimar la calidad del macizo cuando se conozca la permeabilidad. Se seleccionó el Modelo de Weibull $y = a - b e^{-c.x^d}$ debido a su flexibilidad de ajuste a los variados comportamientos que pueden esperarse de ambas variables. Se determinan las características del agrietamiento y la porosidad por su incidencia en la permeabilidad.
3. Se determina la profundidad del acuífero y el coeficiente de permeabilidad de las rocas.
4. Se divide la obra en tramos litoestructuralmente similares a partir de la clasificación de Nicholson y Hencher, la cual permite agrupar los tramos según el grado de afectación por el agua.
5. Se definen las características de la excavación, aspecto que incide en la elección de la técnica más adecuada para el tratamiento de las filtraciones de agua que afectan la excavación subterránea.
6. Se seleccionan las posibles técnicas para el control de agua que afecta la excavación, mediante la aplicación del algoritmo.
7. Se elige la combinación más adecuada de técnicas para el tratamiento de las filtraciones de agua, en cada tramo, mediante la utilización de los criterios de elección y el valor obtenido de C_{el} .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aplicación del procedimiento al túnel Serones-Salida Guaro

1) *Ubicación de la boca del túnel, con respecto a las pendientes del relieve y las escorrentías superficiales*

En la Figura 3 se muestra la coincidencia en la dirección este-oeste de la excavación y las escorrentías superficiales, lo cual se agrava por el sentido de las últimas: en la boca B1 *Oeste-Este* y en la boca B2 el sentido es *Este –Oeste*. Se debe prestar especial atención a la vaguada de la cota 85, en la cual se retiene el agua y facilita su infiltración a la excavación.

Según la Dirección de Cuencas Hidrográficas & Servicio Hidrológico Nacional (2006), los acumulados de lluvia tienden al aumento a partir del año 2005 obteniéndose un acumulado máximo 505,5 mm para el mes de noviembre del 2006, por tal razón los volúmenes de agua hacia las bocas de la obra aumentan y se debe prestar especial atención a este aspecto.

2) *Análisis de la correlación entre la calidad del macizo y la permeabilidad.*

En las figuras 4 y 5 se observa, según el comportamiento de la permeabilidad y la calidad del macizo, que existe correlación entre ambas características del macizo rocoso.

Las funciones obtenidas por el Método de los Mínimos Cuadrados ajustando el Modelo de Weibull $y = a - b e^{-c x^d}$ son las siguientes:

- Para el caso del macizo formado por serpentinas se tiene que $a=72,182957$; $b=26,64317$; $c=2,5692191$ y $d=0,13190244$. El coeficiente de correlación obtenido es $r=0,844$, para todo el modelo la Prueba F de Fisher arrojó un resultado positivo con nivel de confianza de 0,95.

- Para el macizo formado por gabros se tiene que $a=45,691102$; $b=57,426521$; $c=0.64939953$ y $d=-0,61489753$. El coeficiente de correlación obtenido es $r=0,857$, para todo el modelo la Prueba F de Fisher arrojó un resultado positivo con nivel de confianza de 0,95.

Nótese que ambos modelos garantizan un buen pronóstico de la calidad del macizo cuando se conoce la permeabilidad.

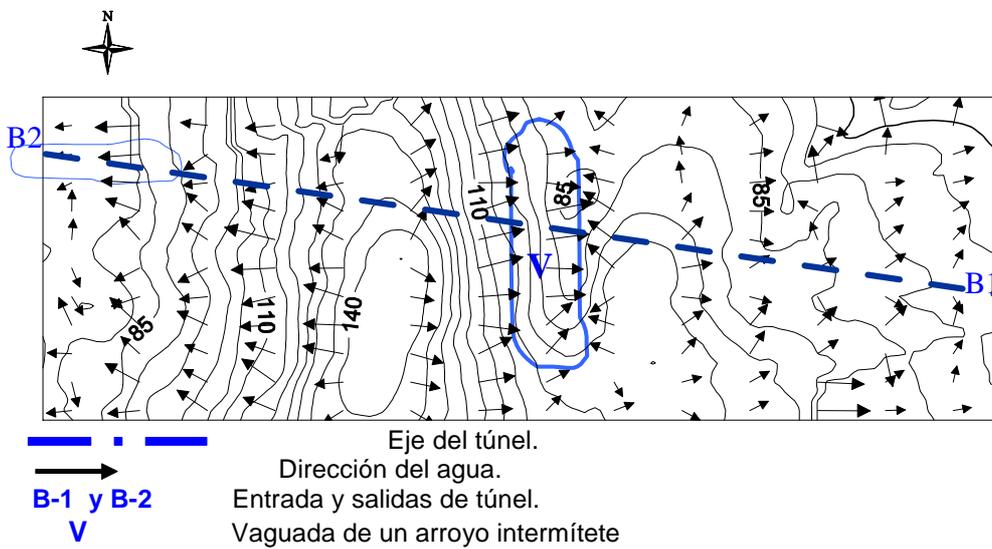


Figura 3. Comportamiento de las direcciones del agua en la superficie sobre el túnel Serones - Salida Guaró.

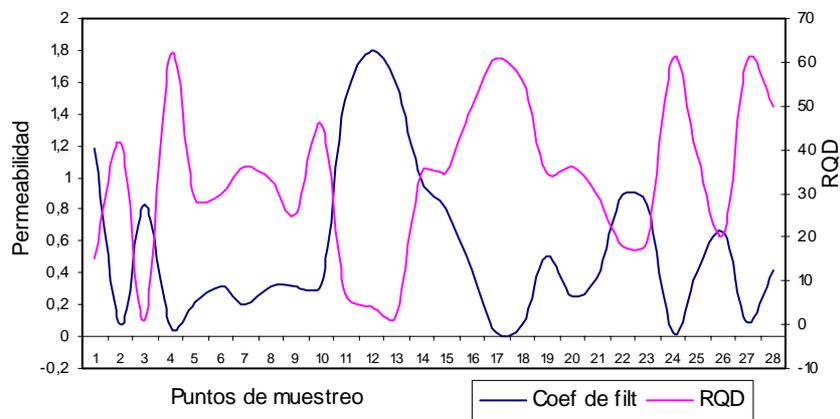


Figura 4. Comportamiento de la permeabilidad y la calidad del macizo (RQD) formado por gabros.

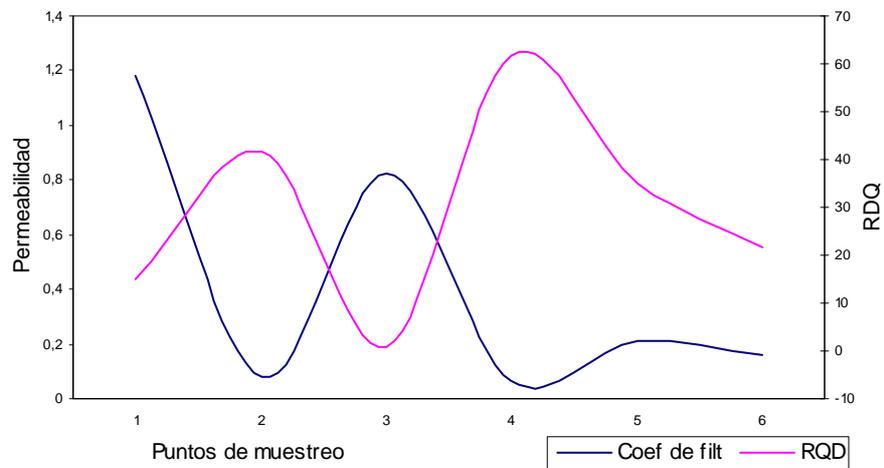


Figura 5. Comportamiento de la permeabilidad y la calidad del macizo (RQD) en macizo formado por serpentinitas.

3) Estudio del agrietamiento y la porosidad

Agrietamiento

- El espaciamiento clasifica como moderado (200-600 mm) y espaciado (600-2000 mm), solamente en zonas de fallas el espaciamiento es menor.
- La abertura (b) entre caras de las grietas se clasifica como grietas abiertas a grietas muy abiertas ($b > 0,50$ mm).
- El relleno predominante entre caras de grietas es carbonato de calcio, arcilla y detritos de rocas en zonas de fallas.

Porosidad

No se determinó por su poca influencia en la permeabilidad de las rocas fuertes, poco porosas y agrietadas.

4) Evaluación de las características hidrogeológicas

El coeficiente de filtración se determinó a través de ensayos a presión y de forma analítica entre perforaciones, empleando la expresión de Bear, Tsang & Marsily, (1993) y se obtuvo que el mismo varía desde 0,06 hasta 14,40 m/día (Tabla 6).

La profundidad de ubicación de la excavación y los tramos de estudio con respecto a la superficie, además de la magnitud de la columna de agua sobre la excavación se recoge en la Tabla 7 y Figura 1.

Tabla 6. Permeabilidad del macizo rocoso por tramos de estudio

Tramo	Características del agrietamiento		Permeabilidad
	Abertura, mm	Espaciamiento, mm	K m/día
I	0,05	20,0	0,09
II	0,25	16,7	8,64
III	1	6,7	12,96
IV	0,2	25,0	5,76
V	0,2	10,0	14,40
VI	0,05	33,3	0,06
VII	0,2	12,5	11,52
VIII	0,25	25,0	5,04

5) *División de la obra según las características litoestructurales y el grado de afectación por las filtraciones de agua.*

El túnel Serones-Salida Guaro atraviesa 9 fallas, 4 de ellas se ubican en el sector estudiado, formando ángulos superiores a los 60 grados con respecto al eje del túnel. En la Figura 1 se constata que los tramos 3, 5 y 7, afectados por fallas, se encuentran en la zona de una vaguada por la que fluye un arroyo que favorece la penetración del agua, aun cuando el arroyo no posea escurrimiento superficial.

Tabla 7. Ubicación del acuífero y la excavación con respecto a la superficie

Tramo	Profundidad de ubicación media (metros)	
	Excavación	Acuífero
I	8,03	12,00
II	25,94	9,66
III	29,86	12,4
IV	23,55	6,21
V	20,26	4,715
VI	27,21	5,47
VII	36,11	9,34
VIII	49,46	17,44

Como roca predomina el gabro, el cual tiene diferentes grados de alteración, aparecen además zonas de brechas en las proximidades de las fallas; al aplicar la clasificación litoestructural propuesta por Nicholson y Hencher en 1997, tomado de Suárez-Díaz (1998) y ajustada a los túneles, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 8, donde se agrupan los tramos litoestructuralmente similares.

El grado de influencia del agua sobre las rocas en los diferentes tramos fue evaluada a través del coeficiente de reblandecimiento, cuyos resultados aparecen en la Tabla 9.

Tabla 8. Características litoestructurales presentes en el túnel Serones – Salida Guaro

Grupo	Grupos Lito-estructurales	Características y Tipo de roca	Tramos de túnel
1	Rocas fuertes masivas	Gabros fuertes afectados por dos o tres familias de grietas puede ocurrir desintegración alrededor de las discontinuidades, produciéndose caídas de bloques.	Tramo I, II, IV, VI, VIII
4	Rocas debilitadas tectónicamente.	Gabros altamente fragmentados susceptibles a colapso por el techo desmoronamientos por los lados o caídas de bloques de tamaño considerable.	Tramo III, V, VII

Tabla 9 Variación de la resistencia a compresión bajo un régimen de saturación total y el coeficiente de reblandecimiento (Kr)

Tramos	No. Ensayos	Rc (kgf/cm)	7 días	14 días	21 días	28 días	35 días	45 días	Kr
1	18	234,62	229,44	224,38	219,44	214,63	209,93	205,35	0,88
2	24	305,74	304,32	299,43	294,63	289,92	285,28	282,42	0,92
3	24	182,31	178,79	172,03	165,54	159,31	153,32	147,57	0,81
4	24	284,10	282,87	278,21	273,64	269,18	264,81	260,53	0,92
5	24	174,39	172,93	168,00	163,23	158,61	154,12	149,78	0,86
6	18	217,90	217,08	212,69	208,40	204,20	200,10	196,08	0,90
7	24	196,33	193,13	189,26	185,47	181,76	178,12	174,55	0,89
8	18	413,71	413,17	407,05	401,03	395,09	389,25	383,50	0,92

6) Determinación de las características de la excavación

Forma y dimensiones de la sección transversal

La forma ovoidal de la sección transversal seleccionada por el proyectista del túnel facilita la utilización de técnicas como el hormigón lanzado, las geomembranas y geotextiles.

Destino y plazo de servicio

La obra destinada a la conducción de agua tiene un plazo de servicio superior a 15 años por lo que la técnica de control de la filtración debe garantizar un mínimo de reparaciones y un máximo de durabilidad para que el proyecto tenga utilidades sin un aumento del costo por reparación y mantenimiento.

Método de excavación

El arranque de la roca se realizará mediante la utilización de explosivos, por lo que se recomienda utilizar voladuras de contorno, con el propósito de afectar lo menos posible las rocas en el perímetro de la excavación y evitar un incremento del agrietamiento y con ello el aumento de las filtraciones, lo cual se agudiza en las zonas de fallas.

Tipo de sostenimiento y/o fortificación propuesto

La selección del sostenimiento empleado, una combinación de anclas con hormigón lanzado reforzado con fibras metálicas, se obtuvo a partir de la clasificación geomecánica propuesta por Barton. El hormigón lanzado utilizado como revestimiento puede ser utilizado además con el propósito de controlar las filtraciones mediante la utilización de aditivos sin afectar el objetivo principal.

7) Técnicas obtenidas al aplicar el algoritmo

Empleando los datos recopilados en las etapas anteriores se obtuvo un resumen de las variables necesarias para ejecutar el algoritmo propuesto (Figura 2), tal y como se muestra en la Tabla 10

Como resultado (Tabla 11) se obtuvo las siguientes combinaciones de variantes, incluido el valor del criterio de elección ($C_{el} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$).

8) Elección de la variante más adecuada para el tratamiento de las filtraciones de agua en cada tramo de túnel, mediante la utilización de los criterios de elección y el valor obtenido de C_{el} .

Finalmente, el método a utilizar en cada tramo se eligió tomando la variante con mayor valor de C_{el} (Tabla 11), estos fueron:

- Tramos I y VI; variante 3 [Z + HLR]: combinación de zanja de desagüe y hormigón lanzado reforzado. Valor del criterio de elección $C_{el} = 30$.
- Tramos II, IV y VIII Variante 9 [(Di_t o Di_p) + Z + HLrf R]: combinación de drenaje desde el interior de la excavación, zanja del desagüe longitudinal, hormigón lanzado de rápido fraguado y reforzado con fibras metálicas preferentemente. Valor del criterio de elección $C_{el} = 26$.
- Tramos III, V y VII. Variante 14 [(II o IS) ± Z ± HL]: Inyección para fortalecer y disminuir la permeabilidad de la roca (fortalecimiento e impermeabilización) desde el interior o superficie del terreno, zanja de desagüe y hormigón lanzado. Valor del criterio de elección $C_{el} = 30$.

En el proyecto de ejecución del túnel Serones-Salida Guaro, el sostenimiento propuesto por proyecto (hormigón lanzado) no fue concebido para controlar las filtraciones de agua, sin embargo en los tramos I y IV, donde el caudal que se filtra no es alto, coincidió con la variante propuesta por el algoritmo del procedimiento para el control de las filtraciones. En el resto de los tramos, el sostenimiento no contrarrestó las afectaciones que ocasiona el agua, pues las rocas presentan un mayor deterioro, y un mayor agrietamiento, más afluencia de agua y un coeficiente de reblandecimiento menor; este último parámetro decrece en el tiempo (Tabla 9), lo que provoca una disminución apreciable de la estabilidad del conjunto macizo-excavación, y reduce la vida útil del túnel prevista en el proyecto inicial y aumentando los costos de reparación y mantenimiento. Esto pone de manifiesto la necesidad de implementar el procedimiento para elegir la mejor variante de control de las filtraciones desde la etapa de proyecto de la excavación.

Tabla 10. Resumen de los aspectos principales que recoge la metodología e inciden en el proceso de elección de la técnica para el control de las filtraciones de agua al Túnel Serones-Salida Guaro

Nro	Tramos y longitud (m)	Plazo de servicio y tipo de obra Categoría	Características del agrietamiento			Permeabilidad K m/día	Calidad del macizo (RQD)	Ubicación espacial de la excavación (m)
			Abertura (mm)	Espaciamiento (m)	Grietas por metros			
I	TM(1-2) 32,86	III	Parcialmente Abiertas y Abiertas	Moderado	20,0	0,09	90< RQD <100	18,07
II	TM(2-3) 89,21	III	Abierta a moderadamente abierta	Cerrado a moderado	16,7	8,64	50< RQD <75	28,715
III	TM(3-4) 13,85	III	Abierta y moderadamente abierta	Cerrado	6,7	12,96	25< RQD <50	29,13
IV	TM (4-6) 55,52	III	Abierta a moderadamente abierta	Moderado a espaciado	25,0	5,76	50< RQD <75	23,175
V	TM(6-7) 13,85	III	Abierta a moderadamente abierta	Cerrado	10,0	14,40	25< RQD <50	20,115
VI	TM (7-9) 19,65	III	Abierta a moderadamente abierta	Moderado	33,3	0,06	90< RQD <100	27,155
VII	TM(9-10) 14,66	III	Abierta a moderadamente abierta	Cerrado	12,5	11,52	25< RQD <50	35,95
VIII	TM(10-11) 41,6	III	moderadamente abierta	Cerrado a moderado	25,0	5,04	50< RQD <75	49,135

Tabla 11. Resultados de los valores asignados a cada criterio para seleccionar la variante adecuada en cada tramo.

Criterios de elección	Variantes seleccionadas por tramos								
	Tramos I y VI				Tramos II, IV y VIII		Tramos III, V y VII.		
	V1	V2	V3	V4	V9	V10	V14	V15	V10
C1	Z + HL	Z + HL + Pint	Z + HLR	Z + HLrfR + Pint	(Di_t o Di_p) + Z + HLrf R	(Di_t o Di_p) + Z + G + L + H mR	(II o IS) + Z + HL	(II o IS) + Z + HL + G + L + HmR	(Di_t o Di_p, Ds) + Z + G + L + HmR
C _{tg1}	3	3	3	3	3	2	3	2	2
C _{tg2}	3	2	3	2	3	1	3	1	2
C _{tg3}	3	3	3	3	3	2	3	2	2
C _{e1}	3	2	3	1	3	2	3	1	3
C _{e2}	2	2	3	2	3	2	3	3	2
C _{a1}	3	3	3	3	2	2	3	3	1
C _{a2}	3	3	3	3	2	2	3	3	2
C _{a3}	3	3	3	3	2	2	3	3	3
C _{a4}	3	3	3	3	2	2	3	3	3
C _{el}	29	26	30	25	26	19	30	22	22

CONCLUSIÓN

El procedimiento descrito permite elegir la variante que más se adecua a las condiciones de la excavación subterránea afectada por las filtraciones de agua a partir de caracterizar los principales elementos que inciden los procesos de infiltración y control del agua. Es aplicable en excavaciones subterráneas laboreadas en rocas fuertes, poco porosas y agrietadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barton, N. 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanical & Mining Sciences*, 39 (2) :185 - 216.
- Barton, N., & Grimstad, E. 2000. El sistema Q para la selección del Sosténimiento en el método noruego de Excavación de túneles. En: López-Jimeno, M. 2000. *Ingeotúneles*. Madrid. Entorno Grafico, S.L p. 1-41 .
- Bear, J., Tsang, C. & Marsily, G. 1993. *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*. Unpublished manuscript, San Diego.
- Bieniawski, Z. T. 1974. Engineering classification of jointed rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, 11(12) :244-244.
- Bieniawski, Z. T. & Alber, M. 1995. Improving effectiveness of rock mass classifications by systematic engineering design process. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32(7) :328A-328A.
- Dirección_De_Cuencas_Hidrográficas & Servicio_Hidrológico_Nacional. 2006. Análisis de lluvia, embalses y acuíferos (nov06). *Boletín Hidrogeológico* 22/03/07, 2007 <http://www2.hidro.cu:80/documentos/boletines/Bolnov06.pdf>
- Harris, J. S. & Pollard, C. A. 1986. *Some aspects of groundwater control by ground freezing and ground grouting methods*. Paper presented at the Groundwater in Engineering Geology., London.
- Palmström, A. 1982. *The volumetric joint count - a useful and simple measure of degree of rock mass jointing*. Paper presented at the IV Congress International Association Of Engineering Geology, New Delhi.

- Palmström, A. 2005. Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD) *Tunneling and Underground Space Technology*, 20 :362- 377.
- Ruiz, M.R. 2000. Recomendaciones de sostenimiento para túneles, 10/2002, www.stmr.es/recursos/downloads/STMR_Art_Recomendaciones.pdf
- Ruiz, M.R. 2002. Nuevas recomendaciones de excavación y sostenimiento para túneles y boquillas. Retrieved 10/06/2005, www.stmr.es/recursos/downloads/STMR_Art_NuevasRecomendaciones.pdf
- Suárez_Díaz, J. 1998. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*): Universidad Industrial de Santander, UIS. 548 p.