

## RESUMEN

**NICOLÁS ANDRÉS CASTAÑO MIRANDA**

[nicolas.castano@mail.escuelaing.edu.co](mailto:nicolas.castano@mail.escuelaing.edu.co)

**DIRECTOR DEL TRABAJO DIRIGIDO:**

**ING. JOSE VICENTE AMORTEGUI**

Profesor Asociado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

[jamorteg@gmail.com](mailto:jamorteg@gmail.com)

**TITULO:** TRABAJO DIRIGIDO: CARTILLA DE ANÁLISIS DE ARCOS METÁLICOS EN TÚNELES Y ÁBACOS DE DISEÑO.

**Palabras claves:** Diseño, arcos metálicos, ábacos, variables, SAP 2000.

El trabajo dirigido, denominado “Cartilla de análisis de arcos metálicos en túneles y ábacos de diseño”; consiste en el diseño de una herramienta con la cual a través de la conjugación de variables evaluadas por medio de modelaciones con el software de elementos finitos SAP 2000, facilite, agilice el proceso de diseño de arcos metálicos en túneles y constituya un método para el diseño de arcos metálicos intermedio entre un diseño empírico y uno de detalle a partir de la implementación de programas de elementos finitos .

Aunque conmutaciones de las variables como la relación de Poisson o el módulo de elasticidad del macizo no fueron tenidas en cuenta, con el objeto de limitar la cantidad de modelaciones, se procuró crear los ábacos a partir de las condiciones más relevantes, para así obtener una herramienta práctica y confiable.

Para comprobar la funcionalidad de los ábacos se tuvieron como referencia casos prácticos colombianos, que presentan arcos metálicos de especificaciones menores comparados con los que sugieren algunos de los métodos empíricos, y que han funcionado satisfactoriamente.

Pudiendo establecerse que los ábacos son aplicables y funcionan satisfactoriamente al ofrecer resultados menos conservadores, respecto a los empíricos y por ende más eficientes.

## 1. INTRODUCCION

La necesidad de acortar distancias y optimizar el transporte de carga y pasajeros ha generado que la implementación de túneles viales sea una alternativa que despierta mayor interés en Colombia, para lo cual el desarrollo de técnicas y herramientas que faciliten el diseño de túneles en cada uno de sus aspectos, como es el caso los arcos metálicos, representa un aporte relevante para la ingeniería en el país.

Aunque los métodos empíricos para determinar el arco metálico a implementar en un túnel se presentan como una opción sencilla; traen como consecuencia el desarrollo y puesta en marcha de diseños robustos y por ende costosos, para lo cual la inclusión de programas de elementos finitos, con los que se pueden formular ábacos con diversidad de variables basados en casos reales con resultados satisfactorios, constituyen la oportunidad de contar con un mecanismo sencillo para estimar el arco metálico óptimo en un tiempo corto, no solo con mayor precisión sino con la posibilidad de optimizar costos.

Por lo tanto, con el desarrollo del presente trabajo se pretende hacer un aporte encaminado a facilitar el proceso de diseño de los túneles a través de una herramienta sencilla, práctica y efectiva.

## 2. ÁBACOS Y GUÍA DE EMPLEO

A continuación se presentan dos variaciones de los ábacos de diseño de arcos metálicos en túneles. En la primera se exponen los ábacos de manera gráfica y en la segunda se presenta la alternativa de los ábacos en medio digital por medio de un práctico programa creado en Excel.

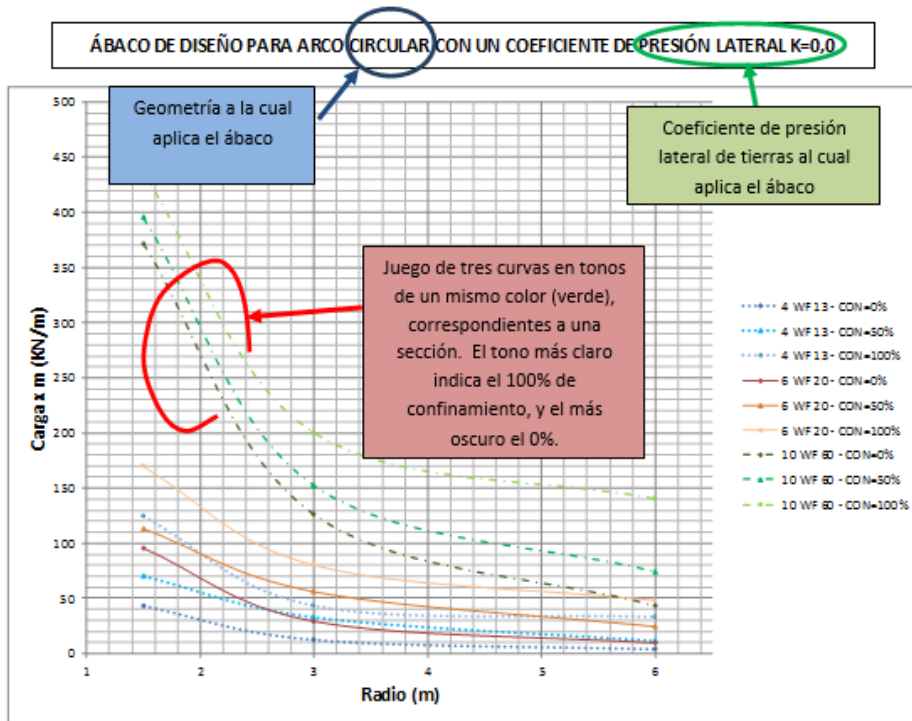
### 2.1 ÁBACOS EN FIGURAS

El método presenta nueve (9) juegos de ábacos, cada uno con un título que identifica el tipo de geometría para el cual es útil, y el coeficiente de presión lateral de tierras para el cual fue formulado. Para cada geometría se disponen tres (3) ábacos de diseño; cada uno con un coeficiente de presión lateral de tierras diferente. Adicionalmente cada ábaco tiene en el eje vertical la variación de las cargas por metro lineal que puede soportar cada arco dependiendo de su geometría y sección de acero, y en el eje horizontal un rango de radios de 1.5 a 6.0 m.

Además en cada ábaco muestran nueve (9) curvas, tres (3) en tonos azules que corresponden al perfil 4WF13, tres (3) en tonos rojizos que conciernen al perfil 6WF20 y tres (3) en tonos verdes que pertenecen al perfil 10WF60. El tono más oscuro de cada uno de los juegos de 3 curvas corresponde a un confinamiento del arco del 0%, el tono intermedio al 50% y el tono más claro al 100% de confinamiento.

A continuación en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran las características de los ábacos descritas.

**Figura 1 Convenciones empleadas en cada uno de los ábacos**



Fuente: Elaboración propia.

### **DATOS DE ENTRADA NECESARIOS PARA EL USO DE LOS ÁBACOS**

Se requiere contar con la siguiente información de entrada para hacer uso de los ábacos:

- Radio en metros del arco.
- Geometría del túnel.
- Coeficiente de presión lateral de tierras al que estará sometido el arco;  $K=0,0$ ,  $0,5$  o  $1,0$ .
- Grado de confinamiento esperado.
- Carga por metro lineal al que estará sometido el arco en KN/m.

### **CÁLCULO DE LA CARGA VERTICAL SOBRE EL ARCO**

Se proponen tres metodologías para el cálculo de la carga a la cual estará sometido el arco; la metodología de Terzaghi, Biron et al y de convergencia confinamiento.

### **DATOS DE ENTRADA PARA EL USO DE LOS ÁBACOS**

- Carga por metro lineal,  $q_t$  (KN/m).
- Radio del túnel,  $r$  (m).
- Tipo de sección de acero (4 WF 13, 6 WF 20 o 10 WF 60).

- Geometría del arco metálico (Circular, herraduras paredes rectas o herraduras paredes curvas).
- Grado de confinamiento de 0.0%, 50.0% o 100.0%.
- Coeficiente de presión lateral de tierras, K (0.0, 0.5 o 1.0).

### 2.1.1 Ejemplo de uso de los ábacos

Para mostrar el modo de empleo de los ábacos, se ha propuesto el diseño de un arco que va a ser excavado en las siguientes condiciones:

**Tabla 1 Datos de entrada del ejemplo**

<b>Carga por metro lineal</b>	qt	250.00	KN/m
<b>Radio del túnel</b>	r	4.00	m
<b>Tipo de sección de acero</b>	10 WF 60		
<b>Geometría del arco metálico</b>	CIRCULAR		
<b>Coeficiente de presión lateral de tierras</b>	K	1.00	
<b>Grado de confinamiento</b>	100.00%		

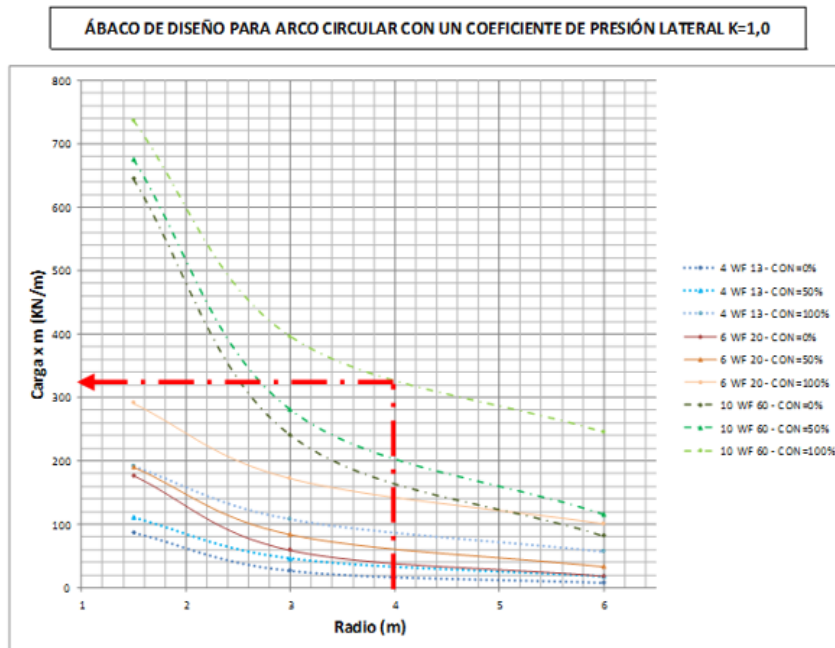
*Fuente: Elaboración propia.*

Teniendo disponibles todos los datos de entrada necesarios, se selecciona el ábaco de diseño que contenga la geometría y coeficiente de presión lateral de tierras que se desee analizar.

Seguidamente, en el ábaco escogido, se traza una línea desde el valor del radio del túnel en el eje horizontal, hasta cortar la curva correspondiente a la sección que se desea emplear y el grado de confinamiento esperado; para leer en el eje vertical la carga máxima por metro lineal que puede soportar el arco. Si el valor sacado de la gráfica es inferior a la carga estimada por metro lineal; indica que el arco soporta las cargas ejercidas por el terreno, y puede emplearse sin ningún inconveniente. De lo contrario, quiere decir que se requiere un perfil más robusto o, en el cálculo de la carga se debe considerar un espaciamiento menor entre los perfiles.

Es decir, que para el ejemplo planteado, el ábaco muestra que el arco soporta una carga máxima de 320 KN/m con un FS de 1.5. Por lo tanto, es menor a la carga de 250 KN/m a la cual estaría sometido el perfil; por tal motivo podría ampliarse la separación entre arcos para que la carga vertical sea mayor, y el sistema sea más eficiente.

**Figura 2 Ejemplo de empleo de los ábacos**



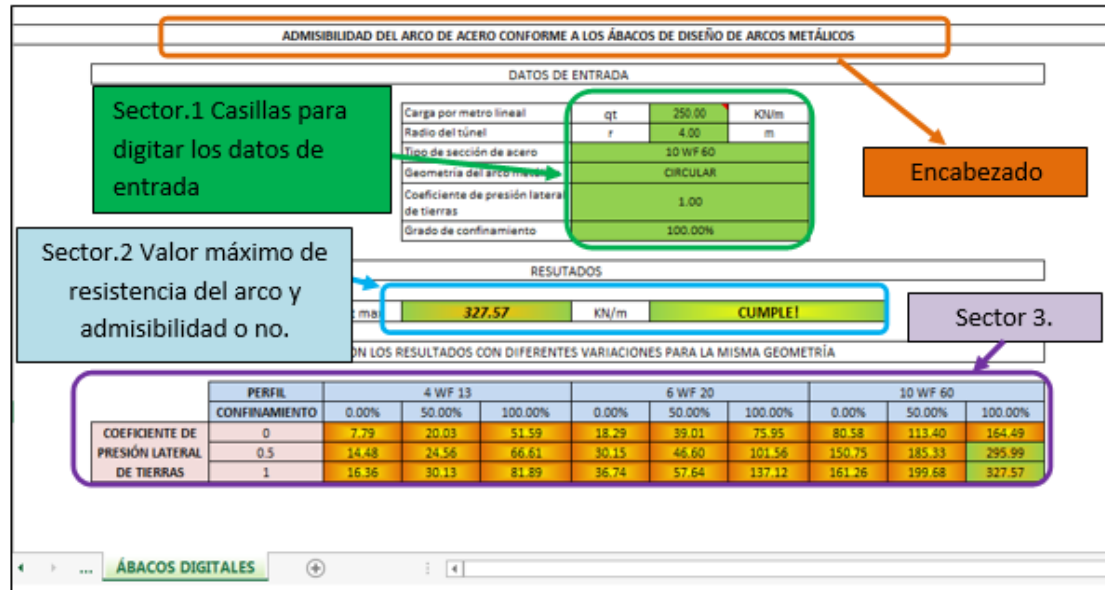
Fuente: Elaboración propia.

## 2.2 ÁBACOS DIGITALES

La cartilla en su modo digital (en Excel) tiene la misma funcionalidad de los ábacos en figuras y presenta las siguientes características:

- i. Un encabezado, que menciona la función de la pestaña de la hoja de cálculo.
- ii. Casillas en color verde (de una sola tonalidad), en las cuales se debe digitar la información de entrada.
- iii. Casillas en color azul, para las pestañas de color amarillo, en donde se puede observar el resultado de los cálculos que están programados.
- iv. Un primer sector destinado para el ingreso de los datos de entrada, un segundo sector que muestra el valor máximo que resiste un arco dependiendo de los datos de entrada que se hallan empleado e indica en tonalidades verdes si el arco resiste la carga aplicada o en tonalidades naranjas de lo contrario. En un tercer sector se encuentra una tabla con variaciones en el coeficiente lateral de presión de tierras, tipo de sección del arco y grado de confinamiento; en la cual se torna de colores en tonalidades verdes las configuraciones que cumplen y en tonalidades naranjas las que no. Esto para tener una idea si un perfil más esbelto o más robusto es la mejor alternativa. Ver Figura 3.

**Figura 3 Características del ábaco digital en la pestaña de cálculo de admisibilidad de un arco metálico.**



Fuente: Elaboración propia.

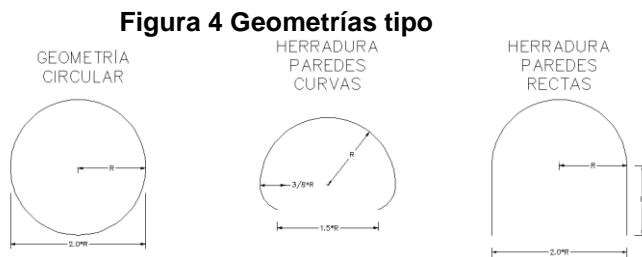
### 2.3 VARIABLES Y LIMITACIONES

Específicamente para las modelaciones se consideraron las siguientes variables y limitaciones:

- No se tuvo en cuenta la influencia del nivel freático.
- El ábaco no incluye la admisibilidad por capacidad portante de la cimentación de los arcos; por lo tanto, esta debe ser chequeada por aparte.
- En cuanto al confinamiento; los ábacos presentan resultados al considerar un contacto uniforme de la roca en el arco.
- Los ábacos solo presentan un valor del módulo de elasticidad de la roca, con una magnitud conservadora de 0.1 Gpa o 100000KN/m<sup>2</sup>. Debido a que los arcos se emplean solo en rocas de propiedades pobres.
- Los ábacos están efectuados con un FS de 1.5 con respecto al límite de fluencia del acero del tipo A36. Este factor de seguridad se recomienda en literatura europea referente al diseño de túneles.
- Los ábacos solo consideran el aporte al soporte del túnel ofrecido por los arcos metálicos; por lo tanto no tiene en cuenta las contribuciones de otros elementos de soporte como concreto lanzado, pernos, mallas, etc.
- La estimación de la carga que realmente llega a los arcos metálicos requiere el empleo de uno de los métodos planteados a lo largo de la historia de la geotecnia para este tipo de proyectos; y su adecuado cálculo juega un papel crucial en el funcionamiento adecuado de

los ábacos. Para ello se deben determinar de forma precisa los parámetros geotécnicos de la roca presente.

- h) La elección de un grado de confinamiento o una presión lateral debe ser acorde a las particularidades de cada proyecto.
- i) Los ábacos consideran cargas completamente verticales y horizontales; con variaciones del coeficiente de presión lateral de tierras "K" de 0.0, 0.5 y 1.0.
- j) Los ábacos fueron creados a para 3 tipos de geometrías: circular, herradura paredes rectas y herradura paredes curvas con las configuraciones geométricas mostradas en la siguiente figura:

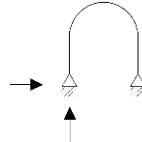


*Fuente: Elaboración propia.*

Su implementación con una geometría diferente debe ser de manera conservadora.

- k) Se considera para las modelaciones un apoyo simple debido a que restringe el movimiento lateral y vertical en los apoyos.

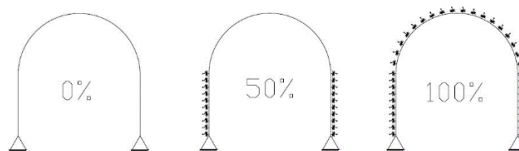
**Figura 5 Apoyo simple**



*Fuente: Elaboración propia.*

- l) Los ábacos comprenden la variación en el grado de confinamiento ocasionado por la roca de 0.0, 50.0 y 100.0% distribuidos gráficamente de la siguiente manera:

**Figura 6 Grados de confinamiento**



*Fuente: Elaboración propia.*

- m) Los ábacos comprenden un rango de radios de 1.5 a 6.0 m.

- n) Las modelaciones efectuadas con SAP 2000, consideraron un acero para los arcos metálicos del tipo A36 (ASTM); el cual es el más frecuente para este tipo de estructuras. El límite elástico para este acero es de 254930 KN/m<sup>2</sup>; y con un FS de 1.5 es de 169950 KN/m<sup>2</sup>.
- o) Se consideraron solo 3 secciones tipo, de proveniencia americana presentadas a continuación:

**Tabla 2 Secciones tipo**

PERFIL		ESPECIFICACIONES TECNICAS - PERFILES AMERICANOS TIPO WF										
		DIMENSIONES					AREA cm <sup>2</sup>	PESO Kg/m	MOMENTO DE INERCIA		MODULO DE SECCION	
		h	b	s	t	r			I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>
WF	4"x13	102	100	6.5	9.4	6	24.5	19.3	438	158	86.2	31.5
WF	6"x20	157	153	6.6	9.3	6	37.9	29.7	1723	553	219	72.3
WF	10"x60	260	256	10.7	17.3	13	114	89.4	43	4835	1093	378

Fuente: Elaboración propia.

- p) Los ábacos presentan una limitante con respecto al radio mínimo de curvatura de cada uno de los perfiles propuestos, definido por la siguiente ecuación:

$$\text{Radio mínimo de curvatura} = 11.5 * \text{Altura del perfil}$$

Por lo tanto, para los arcos circulares, de herradura de paredes rectas (HPR) y herradura de paredes curvas (HPC), los ábacos son aplicables a partir de los radios mostrados en la Tabla 3.

**Tabla 3 Radios mínimos de curvatura para los arcos circulares, HPR y HPC.**

GEOMETRÍA	PERFIL	ALTURA DEL PERFIL	RADIO MÍNIMO DE CURVATURA	RADIO MÍNIMO DE CURVATURA	OBSERVACIONES
		(mm)	(mm)	(m)	
CIRCULAR y HPR	4 WF 13	102,00	1173,00	1,17	Los ábacos son útiles con radios superiores o iguales a los presentados en la columna anterior
	6 WF 20	157,00	1805,50	1,81	
	10 WF 60	280,00	3220,00	3,22	
HPC	4 WF 13	102,00	3128,00	3,13	Los ábacos son útiles con radios superiores o iguales a los presentados en la columna anterior, teniendo en cuenta que el radio crítico de esta geometría corresponde a 3/8 del radio principal.
	6 WF 20	157,00	4813,00	4,81	
	10 WF 60	280,00	8586,00	8,59	

Fuente: Elaboración propia.

- q) Los ábacos, acorde a las cargas máximas aplicables según las variables definidas, presentan convergencias inferiores al 5%, lo que los enmarca en un rango admisible según los criterios de aceptación definidos en el libro "Manual de túneles y obras subterráneas" de Carlos López Jimeno, en el cual la convergencia admisible para túneles mineros es del 20% y para galerías en general del 5%.



### 3. CONCLUSIONES

1. Con la ejecución de la modelación de los casos prácticos considerando las condiciones particulares de estos, se muestra que el método con las modelaciones de SAP 2000 es aplicable y funciona satisfactoriamente; ofreciendo resultados menos conservadores a los estimados con métodos empíricos y más eficientes (pues permite encontrar el arco óptimo a emplear en un túnel; para lo cual los ábacos creados a partir de la implementación del programa de elementos finitos presentan resultados coherentes).
2. Los ábacos permiten estimar el arco metálico que funcione adecuadamente de manera rápida y de menores especificaciones a las sugeridas por métodos semi - empíricos como el de Biron et. al, con la limitante de estar concebidos sin tener en cuenta factores como la influencia del nivel freático y demás mencionados.
3. Se deben tener presentes las limitaciones de los ábacos al momento de usarlos para el diseño de arcos metálicos, de forma tal que esto permita una adecuada elección de las variables y en consecuencia se elija el arco indicado.
4. Los métodos como el de Biron y similares empleados para el diseño de arcos metálicos no tienen en cuenta factores como el confinamiento y los esfuerzos laterales por lo cual generan arcos robustos y por ende costosos.
5. El desarrollo de este proyecto de grado tuvo como cimiento el diseño de una propuesta metodológica racional, al implementar un programa de elementos finitos para analizar diferentes geometrías, grados de confinamiento, perfiles, dimensiones del túnel y esfuerzos laterales.
6. La implementación de nuevas variables que modifiquen las limitaciones establecidas para la creación de los ábacos en este proyecto de grado, puede implementarse con el propósito de afinar el método y otorgarle mayor precisión.

#### 4. BIBLIOGRAFÍA

HOEK, E y BROWN, T. (1980), "Underground Excavations in Rock", Institution of Mining and Metallurgy, England.

E. HOEK, P.K. KAISER, AND W.F. BAWDEN. Support of underground Excavations in hard rock, (2000).

CEMAL BIRÓN, ERGIN ARIOGLÚ, "Diseño de ademes en minas", LIMUSA SA de CV.

PROCTOR, R. V. And WHITE, T. L. "Rock Tunneling With Steel Supports". The Commercial Shearing & Stamping Company, Youngstown, Ohio. 1957.

Department of the Army. U.S. Army Corps of Engineers. "Tunnels and Shafts in Rock", Washington. May 1997. 236 Páginas.

LÓPEZ JIMENO CARLOS. "Ingeotúneles". Tomos 1 al 5. 1999.

LÓPEZ JIMENO CARLOS "Túneles y obras subterráneas". Tomos 1 al 5. 1999.

PIERPAOLO ORESTE, A probabilistic design approach for tunnel supports Journal of Computers and Geotechnics, Volumen 32, 2005.

PROFE, DR. TECHN. L. V. RABCEWICZ. The New Austrian Tunnelling Method. Geoconsult. Diciembre de 1964-Enero de 1965.

BARTON, N. AND E. GRIMSTAD. 1994. The Q system following twenty years of application in NMT support selection. Österreichische Gessellschaft für Geomechanic - Felsbau. 12 (6): 428-436

OTERO, Diego Fernando y SAAVEDRA, Luis Felipe. "Metodología de diseño de soportes con arcos para túneles aplicado a Colombia", Bogotá, 2006. 155 p. Tesis de grado. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería civil. Programa de geotécnia.

GUTIÉRREZ RAMIRO, Ing. Civil- Egresado de la Univ. Javeriana. Esp. Gerencia de Construcciones, Esp. Geotecnia vial y pavimentos "Presentaciones de mecánica de rocas de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito".

C. CARRANZA-TORRES AND PROF. J. Labuz, Rock and Soil Mechanics and Tunneling Notes. University of Minnesota. Department of Civil Engineering. June 2006.

HOEK, E. (2006), "Practical Rock Engineering", Institution of Mining and Metallurgy, England.

ERZIN YUSUF and EROL ORHAN (2004), "Correlations for Quick Prediction of Swell Pressures", [www.ejge.com](http://www.ejge.com).

TRUJILLO JOHANNA, "Evaluación de recomendaciones de diseño para túneles excavados en materiales volcánicos y suelos residuales" Bogotá, 2011. 76 p. Tesis de grado. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería civil. Programa de geotécnia.

POTVIN YVES and HADJIGEORGIOU JOHN, "Ground support strategies to control large Deformations in mining excavations", 6th International Symposium on Ground Support in Mining and Civil Engineering Construction, Cape Town, 2008.

BARLA GIOVANNI, "Tunnelling under squeezing rock conditions", Department of structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino.

BIENIAWSKI A, T. "Tunnel design by rock mass classifications", Pennsylvania State University, department of mineral engineering, 1990.

Universidad Politécnica de Madrid, "Ingeniería Geológica. Excavaciones Subterráneas".

GONZALEZ DE VALLEJO LUIS, FERRER MERCEDES, ORTUNO LUIS, OTEO CARLOS. "Ingeniería geológica", Pearson educación, Madrid, 2002

ILLIDGE EDGAR, "Aplicación de un modelo viscoplastico para analizar el comportamiento mecánico de las rocas en un pozo utilizando el software de simulación Ansys" Bucaramanga, 2008. 253p. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería civil.

HOEK, E., "Big tunnels in bad rock 2000 Terzaghi lecture", ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Vol. 127, No. 9. September 2001, pages 726-740.

ROBLES NEIRO, "Excavación y sostenimiento de túneles en roca", CONCYTEC, Lima, 1994.

TEDESA. Técnicas en entibación S.A. Arcos del tipo TH. [www. dfdurofelguera.com](http://www.dfdurofelguera.com)

DSI, Dywidag-Systems International, Arcos de acero para túneles, [www.dsiunderground.com](http://www.dsiunderground.com).