

Diseño de portales para evitar o reducir el corte en rocas

Portal design to prevent or mitigate rock shear

MARIO A. ARIAS E.¹ - RICARDO SALAZAR FERRO²

1. Maestría en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

mario.arias@mail.escuelaing.edu.co - ricardo.salazar@escuelaing.edu.co

Recibido: 28/08/2017 Aceptado: 12/09/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

Las restricciones en materia de topografía conducen a diseños de portales que no se intersectan necesariamente con el eje de la vía en un ángulo recto. La falta de guías apropiadas en el diseño para portales y un vago entendimiento sobre el comportamiento del macizo rocoso traen como consecuencia el diseño de portales muy conservadores (soporte pesado o rígido), generando adicionalmente procedimientos de construcción complejos, tiempos de construcción más largos y un mayor impacto ambiental. Este artículo apunta hacia un nuevo enfoque para el diseño de portales de forma sesgada, fundados en una comprensión completa del comportamiento del macizo rocoso y sus mecanismos de falla. El enfoque se basa en modelos numéricos 2D, complementados con modelos 3D, para la comparación y la optimización de la metodología del diseño de portales.

Palabras claves: diseño de portales, túneles, emboquilles, portales sesgados, portales oblicuos y portales con poca cobertura.

Abstract

Geometrical alignment conditions as well as topography restrictions lead to portal designs, which do not necessarily intersect the ground in a desired perpendicular angle. Lack of portal design guidelines and a vague understanding on the rock mass yield, therefore, to conservative (heavy/stiff support) portal designs, complex construction procedures, longer construction times, and a higher environmental impact. The present work proposes a new approach for skewed portal design based on a complete understanding of the rock mass behavior and its failure mechanisms. The approach is based on 2D numerical models and complemented with 3D models for comparison and optimization. A case in the Andes mountain range is presented, where conventional and skewed portals have been constructed.

Keywords: design portals, tunnels, skewed portals, oblique portals, low overburden portals.

INTRODUCCIÓN

Las incertidumbres inherentes al terreno son un hecho conocido para la ingeniería de túneles. En el caso específico de diseño de portales, los ingenieros no tienen directrices que ofrezcan enfoques apropiados para el diseño. Una “regla empírica” se ha aplicado en el diseño de portales, la cual indica que la cobertura del terreno alrededor del túnel debe estar en un mínimo entre una y dos veces el diámetro del túnel, dependiendo de las propiedades de resistencia del suelo y los criterios de ingeniería del diseñador. La anterior regla se conoce como el enfoque estándar para el diseño de portales.

La metodología de diseño convencional busca inicialmente la información base (geología, topografía, etc.). Después se obtienen los parámetros de entrada y se sigue con un análisis de estabilidad para los taludes del portal. Finalmente, para el túnel se selecciona el soporte según las recomendaciones de la metodología RMR (Bieniawski, 1989).

La metodología convencional de diseño de portales considera el portal sesgado como un problema en 3D a uno en 2D, situación que es incapaz de representar correctamente el comportamiento. Por esto, hay que generar una metodología de diseño 2D que tome todas las consideraciones necesarias para el diseño de un portal sesgado.

NECESIDAD DE UN NUEVO ENFOQUE EN EL DISEÑO DE PORTALES

El problema del enfoque estándar se ve reflejado en el caso de estudio del portal de entrada túnel 11, del tramo 4 Cisneros-Loboguerrero. Ruta 40 Buga-Buenaventura.



Figura 1. Localización del portal de entrada túnel 11. Ruta 40 Cisneros - Loboguerrero.

El portal presenta una pendiente escarpada, la cual dificulta aplicar el enfoque estándar. Al tratar de posicionar el portal de tal manera que el corte generado quede perpendicular al eje de la vía, se crean a su vez cortes extremadamente elevados, los que son muy difíciles de estabilizar y construir.

Ante esta situación, el diseñador concibe un portal de forma sesgada, el cual obliga a hacer cortes en la ladera. En este caso, el diseño siguió la metodología de diseño de portales convencionales, por lo que se diseñó con técnicas de equilibrio límite para el cálculo de bloques potencialmente inestables.

El análisis de equilibrio límite de bloques deslizantes no contempla bloques de roca por encima del ecuador (figura 2, área roja). Sólo se analizan bloques por debajo del ecuador (figura 2, área verde).

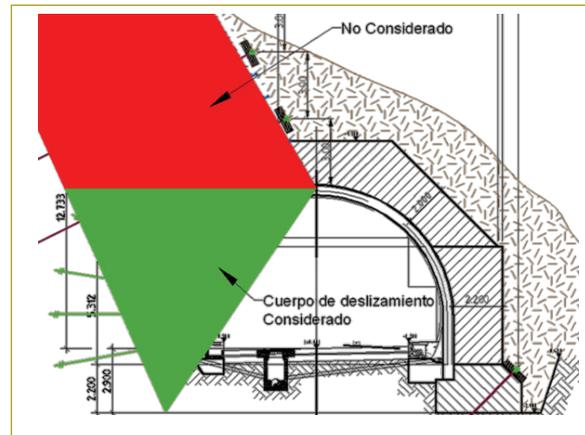


Figura 2. Cuerpo deslizante considerado.

Una vez realizado el análisis de bloque deslizante, el diseñador recomienda el siguiente tratamiento de estabilización: dos filas de anclajes activos de 250 kN de tensión de trabajo, concreto neumático de 10 cm de espesor para la protección del talud y un túnel falso de 2 m de espesor para contención del talud.

Justo cuando se había terminado de construir el portal y antes de iniciar la excavación a sección completa del túnel, el diseñador presenta un informe en el que el portal tiene un factor de seguridad muy cercano a la unidad y no se puede construir (“Un análisis numérico adicional (realizado en Linz, Austria) indica que estamos con un factor de seguridad muy cerca de la unidad (FS = 1,0), cuando se considera la generación de la cuña más desfavorable”). Por lo anterior, el diseñador sugiere instalar mayor número de anclajes y construir el túnel falso de 2 m de espesor antes de realizar cualquier obra subterránea.

Mientras se discute por qué falla el modelo numérico, la construcción del portal avanza y finaliza sin ningún tipo de inconveniente. Entonces el constructor decide recurrir a otro diseñador, el cual solicita nuevos ensayos



Figura 3. Avance de construcción a la llegada de las nuevas recomendaciones del diseñador.

de laboratorio y comprueba, mediante modelos 2D, que el modelo es inestable. Debido a que el portal no presenta ningún tipo de movimiento, el nuevo diseñador decide realizar un modelo 3D, donde finalmente se comprueba que es estable (muy por encima de lo habitual). Ese modelo tardó más de dos meses en su ejecución (el portal estaba construido y el diseño no contaba con el aval completo de la interventoría). Es aquí donde se presenta el cuestionamiento de por qué el modelo 2D es inestable y el modelo 3D es estable. Claramente, es porque falta una metodología de diseño 2D definida para los portales sesgados.

BÚSQUEDA DE LA METODOLOGÍA DE PORTALES SESGADO EN 2D

El desarrollo de la metodología de diseño en 2D se basó en las modelaciones 3D, comparado con las simulaciones en 2D.

Se inició con la investigación con modelaciones en 3D en la que se combinan diversos grados de inclinación del talud, para determinar el grado máximo de sesgo que puede soportar cada tipo de terreno.

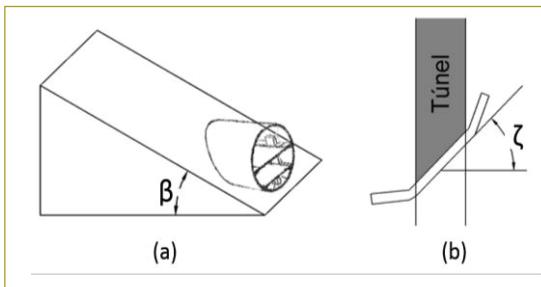


Figura 4 (a) β ángulo de inclinación del talud respecto a la horizontal. (b) ζ ángulo de sesgo respecto a la perpendicular del eje de la vía.

Para los parámetros de resistencia de las cinco clases de terreno consideradas, así como para el soporte recomendado para el túnel, se sigue la metodología de clasificación y soporte de túneles RMR (Bieniawski, 1989).

Tabla 1

Combinaciones contempladas en los modelos en 3D

Tipo de terreno	Inclinación talud β [°]	Ángulo de sesgo ζ [°]
I	30	20
II	45	35
III	55	50
IV	65	65
V	80	80

Se hizo el análisis en 3D para tres escenarios. El primero es el cálculo de la ladera sin intervenir, en el segundo se analiza el portal en forma sesgado y en el tercero se analiza la construcción de un portal convencional.

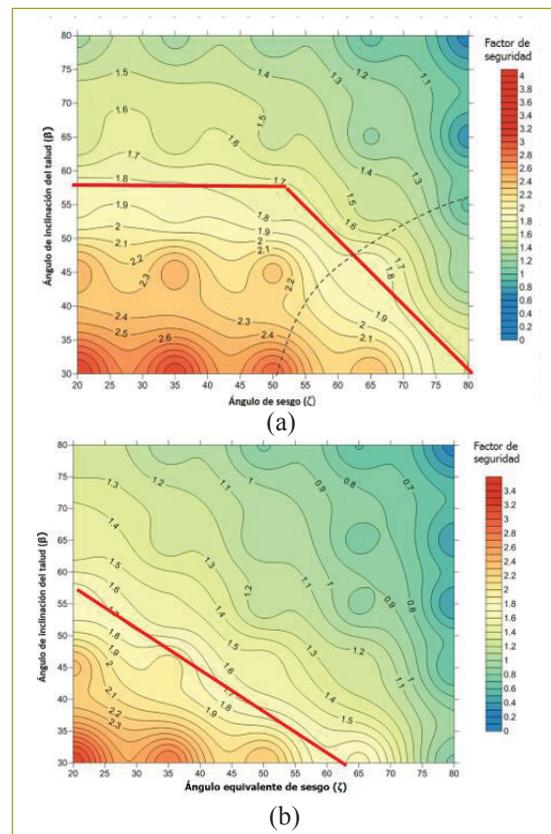


Figura 5. Compilación de todos los factores de seguridad de la modelación en 3D. (a) Portal sesgado y (b) portal convencional.

En cada escenario se realizaron los siguientes análisis. Primero, se analiza la carga geostática versus la resistencia de los materiales. Segundo: se encuentra el factor de seguridad reduciendo los parámetros de resistencia del material hasta que se genere una falla del talud.

En (a) el comportamiento del factor de seguridad respecto al ángulo de sesgo (ζ) tiene la tendencia a ser relativamente horizontal entre los 20° y 45° de sesgo. Luego se tiene una pendiente uniforme hacia el eje horizontal, como se puede ver en la línea roja.

En (b) la tendencia del factor de seguridad es un tanto diferente respecto al ángulo equivalente de sesgo, ya que sólo presenta una pendiente relativamente uniforme en descenso al eje horizontal.

Para representar los datos en una sola curva por clase de terreno, se recurre a normalizarlos con el factor de seguridad de la ladera natural.

$$Rsf = \frac{FS_{portal}}{FS_{natural}}$$

Donde:

Rsf: valor normalizado del factor de seguridad.

FS_{portal} : valor del factor de seguridad del portal sesgado o convencional.

$FS_{natural}$: valor del talud natural sin intervención.

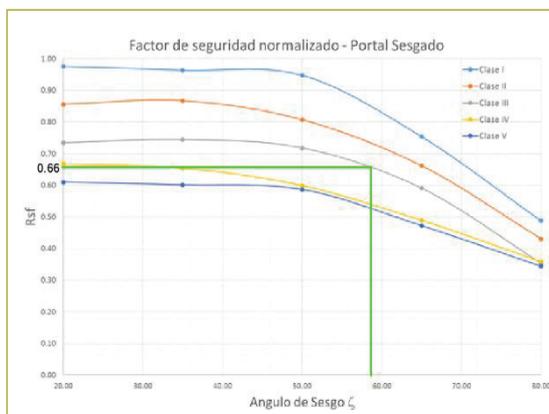


Figura 6. Factores de seguridad normalizados para portal sesgado en función del ángulo de sesgo (ζ) y según cada clase de terreno.

Por ejemplo, en un terreno con ladera natural que tiene un $FS=1,30$ para un terreno clase III, al implementar un portal sesgado de $\zeta=60^\circ$, se tendrá un factor de seguridad normalizado de 0,66. Este valor, si se multi-

plica con el factor de seguridad natural de 1,30, arroja un factor de seguridad del sesgo de $(1,30 \times 0,66) = 0,85$.

El valor de 0,85 sería el factor de seguridad del portal sesgado sin sistema de estabilización. Para elevar este valor al mínimo recomendado de 1,5 sería necesario un sistema de estabilización pesado (anclajes y pernos). Por lo anterior, la aplicabilidad de un portal sesgado se debe evaluar para cada caso particular. El anterior ejemplo se constituye en una base para la metodología de prediseño de portales sesgados.

¿Cómo simular un comportamiento en 3D en un modelo 2D?

El desarrollo de la metodología de diseño en 2D se basó en las modelaciones 3D en comparación con las simulaciones en 2D. En el diseño en 2D para el túnel se siguió la metodología de predicción de desplazamiento de túneles (Pilgerstorfer, 2010), metodología que ayuda a calcular cuál es el auto soporte de la roca en un túnel modelado en 2D. Generalmente, se denomina pseudo-3D.

El problema que se suscitó es cómo generar un diseño pseudo-3D para los taludes de los portales, ya que este tema tiene poco desarrollo. A continuación se presentan las opciones evaluadas para determinar la pseudo-3D de los taludes:

Alternativa 1: Modificación del espesor del elemento finito. Esta es la alternativa más adecuada para el diseño de taludes en pseudo-3D. Sin embargo, en el programa Plaxis® fue imposible su aplicación debido a las limitaciones de este programa, por lo que se propuso la siguiente alternativa.

Alternativa 2: Modificación con parámetros equivalentes para simular el efecto 3D en un modelo 2D. El procedimiento modifica (incrementa o reduce) los parámetros de resistencia del material según el espesor que debería tener el elemento finito.

El primer cuestionamiento es como modificar los parámetros, por lo que se analizan diferentes hipótesis para transformar los parámetros, como se ve a continuación (figura 7).

En los primeros análisis se concluye que la tendencia bilineal 2 es la que se ajusta a un error de $\pm 10\%$ respecto a los valores obtenidos en el análisis en 3D.

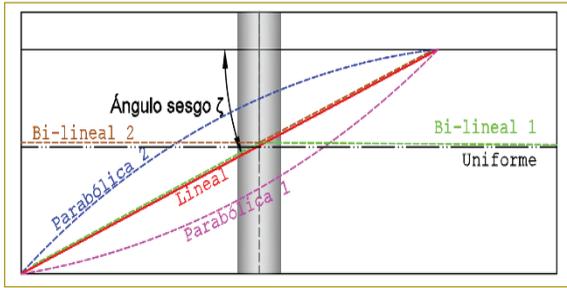


Figura 7. Tendencias analizadas.

El segundo cuestionamiento es si la cobertura del túnel tiene influencia en el cálculo de la pseudo-3D. Por ende, se analiza la tendencia bilineal 2 para diferentes longitudes de cobertura del túnel, cuyos resultados se resumen en el siguiente gráfico (figura 8):

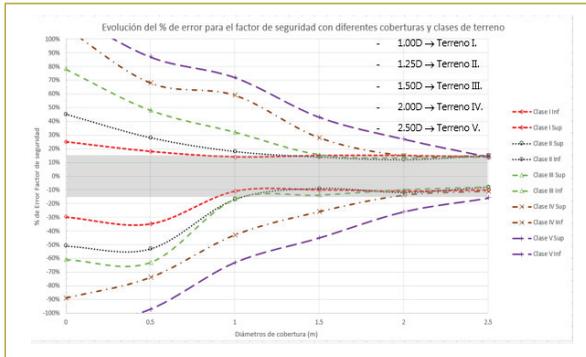


Figura 8. Evolución del porcentaje de error para el factor de seguridad con diferentes coberturas.

Se concluye que la cobertura influye directamente en el cálculo de la pseudo-3D de los taludes, por lo cual se plantea el siguiente procedimiento para modificar los parámetros de un portal sesgado para su diseño en 2D.

1. Dibujar en planta el portal sesgado, en el que se grafique el ángulo de sesgo (ζ) y se localice la proyección en planta del túnel.

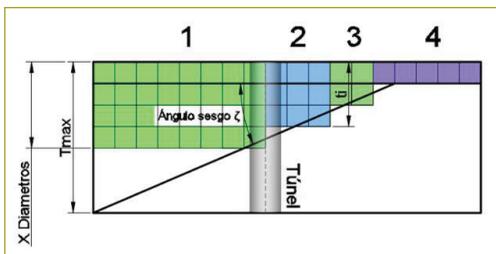


Figura 9. Esquema de modificación de parámetros.

2. Calcular los parámetros equivalentes en relación con cada columna. Se presume que en la columna uno (1) tiene los parámetros originales ($T_{Entrada}$), y con el espesor de las restantes columnas (t_i) se calcula el factor de modificación.

Los parámetros modificados son el producto de los parámetros de entrada por un factor multiplicador, el cual por cada columna se obtiene así:

$$f_i = \frac{t_i}{T_{entrada}}$$

El factor multiplicador se aplica a todos los parámetros de resistencia del material y se asignan al modelo matemático en 2D, como en el siguiente ejemplo:

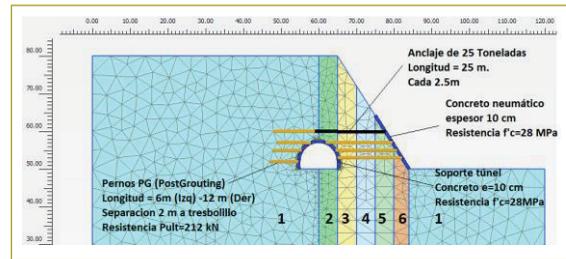


Figura 10. Asignación de parámetros modificados en un modelo en 2D.

COMPARACIÓN ENTRE UN PORTAL SESGADO Y UNO CONVENCIONAL

Para poder verificar la efectividad de la metodología de diseño de portales sesgados en 2D, se realiza el cálculo del portal de entrada del túnel 11, como si fuera convencional y sesgado con la metodología desarrollada. Además, como punto de comparación, están los factores de seguridad en 2D, siguiendo el enfoque estándar.

Tabla 2

Resumen de los factores de seguridad para diferentes opciones de diseño del portal

Tipo de solidación	PORTAL ENTRADA TÚNEL 11		
	CONVENCIONAL	SESGADO Sin metodología 2D	SESGADO Con metodología 3D
Factor de seguridad estático	1.59	1.25	1.65
Factor de seguridad estático	1.12	-	1.16
%U Concreto neumático	40%	-	74%
%U Pernos	39%	-	80%

Tabla 3
Análisis de costos para los tres tipos de alternativas de portal

PORTAL ENTRADA TÚNEL 11		
Tipo de solicitud	CONVENCIONAL	
Área de tratamiento (m ²)	617.00	Precio (Pesos)
Volumen de excavación (m ³)	2345.00	\$ 454,461,000.00
Concreto neumático F'c 28 MPa (m ³)	247.70	\$ 326,716,300.00
Mala Electrosoldada No 6 (Kg)	5952.86	\$ 37,205,350.00
Pernos PG (m)	7431.00	\$ 731,953,500.00
Anclajes de 25 Toneladas (m)	0.00	\$ -
Arcos metálicos HEB 100 (Kg)	43588.35	\$ 958,943,700.00
Total (Pesos)		\$ 2,509,279,850.00

Tipo de solicitud	SESGADO Sin metodología 2D	
Área de tratamiento (m ²)	300.00	Precio (Pesos)
Volumen de excavación (m ³)	145.00	\$ 28,101,000.00
Concreto neumático F'c 28 MPa (m ³)	216.00	\$ 284,904,000.00
Mala Electrosoldada No 6 (Kg)	4733.04	\$ 29,581,500.00
Pernos PG (m)	5580.00	\$ 244,280,000.00
Anclajes de 25 Toneladas (m)	750.00	\$ 241,200,000.00
Arcos metálicos HEB 100 (Kg)	43588.35	\$ 958,943,700.00
Total (Pesos)		\$ 1,787,010,200.00

Tipo de solicitud	SESGADO Con metodología 3D	
Área de tratamiento (m ²)	300.00	Precio (Pesos)
Volumen de excavación (m ³)	145.00	\$ 17,994,500.00
Concreto neumático F'c 28 MPa (m ³)	107.50	\$ 141,792,500.00
Mala Electrosoldada No 6 (Kg)	4733.04	\$ 29,581,500.00
Pernos PG (m)	1395.00	\$ 137,407,500.00
Anclajes de 25 Toneladas (m)	300.00	\$ 96,480,000.00
Arcos metálicos HEB 100 (Kg)	14529.45	\$ 319,647,900.00
Total (Pesos)		\$ 742,903,900.00

De la tabla anterior se puede observar que el portal sesgado, analizado con la metodología objeto de esta investigación, ofrece el menor costo (la tercera parte menos que el convencional) y con similares o mejores factores de seguridad en los taludes que las otras alternativas planteadas.

El portal sesgado diseñado sin seguir una metodología clara aporta un ahorro de una quinta parte con respecto al convencional. Sin embargo, al no tener una metodología clara, no se pueden representar los resultados claramente (sólo cuenta con un factor de seguridad de 1,25 que no cumple con la normativa colombiana NSR-10).

CONCLUSIONES

La metodología de diseño de portales sesgados, producto de esta investigación, parte del límite de las

condiciones expresadas en el presente artículo. Antes de aplicar la metodología, se debe verificar la similitud con las condiciones anteriormente expresadas. De no ser similares, se debe abstener de aplicar la metodología de diseño resultado de esta investigación.

Para el desarrollo de la metodología de diseño de portales sesgados, la investigación se basó en la clasificación de terrenos rocosos de RMR (Rock Mass Rating) (Bieniawski, 1989). No obstante, los parámetros de resistencia se basaron en correlaciones entre el valor de RMR y los parámetros de resistencia del criterio de falla de Morh-Coulomb, por lo que el uso de cualquier criterio de falla que se pueda transformar a Morh-Coulomb es permitido.

La metodología de diseño reduce los requerimientos de soporte para la segura estabilización del túnel y del talud, comparado con otro tipo de diseños (convencionales o sesgados, sin metodología de diseño).

La metodología puede aplicarse a cualquier tipo de roca que pueda representarse con la clasificación RMR (Bieniawski, 1989). Sin embargo, para materiales que no se puedan clasificar con el RMR, el uso de la metodología queda restringido.

Para cualquier tipo de obra geotécnica, se recomienda el uso del método observacional (Peck, 1969). El método observacional se basa en los datos obtenidos por la instrumentación y el monitoreo, para efectuar modificaciones y optimizaciones del diseño durante la etapa de construcción; adicionalmente, ayuda a prevenir desprendimientos que hagan colapsar el portal.

El empleo de portales sesgados es el más adecuado cuando se presentan problemas prediales, de estabilidad de taludes, afectaciones ambientales, etc. Además, ofrece menores costos comparado con otro tipo de soluciones.

REFERENCIAS

Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering Rock Mass Classification. En *A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. s.l.: Wiley-Interscience, pp. 40-47.
 Department of the Army, U.S. (mayo de 2007). Army Corp of Engineers. Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rocks. En Washinton DC: s.n., pp. 9-3 y 9-4.
 Peck, R. B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. En *Géotechnique*. Londres: s.n., pp. 171-187.
 Pilgerstorfer, T. (2010). *Prediction of displacement development using closed-form solutions*. s.l.: Institut für Felsmechanik und

Tunnelbau, Technische Universität Graz ed. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller.
Plaxis (2015). *Plaxis 3-s Anniversary Edition*. Delft, Países Bajos: www.plaxis.nl.

Ramírez, P. & Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Rocscience (2008). Pseudo-3D in Tunnelling Tutorial. En *Manual de uso Rocscience Phase2 V.8*. Toronto: s.n., p. 14.