

Evaluación numérica del comportamiento geotécnico y estructural de túneles con diferentes tipos de secciones transversales analizados bajo condiciones de esfuerzos geoestáticos similares.

David Fernando Bernal Acosta

Ingeniero Civil, M.SC en Geotécnica

Estudiante Especialización de Vías y Aeropistas ESING, Colombia, daferbernal@gmail.com

Daniel Alberto Zuluaga Astudillo

Ingeniero Civil, M.SC en Ingeniería Civil

Profesor Escuela de Ingenieros Militares ESING, Colombia, jwinnorth@gmail.com

RESUMEN: Los túneles carreteros son muchas veces la solución geotécnica más viable y segura para sobrepasar diferentes puntos críticos a lo largo de un corredor vial, sin embargo, la complejidad de este tipo de obras radica en el análisis correcto del comportamiento geomecánico del macizo y su interacción con la estructura. Dicho lo anterior, el presente artículo presenta una evaluación numérica del comportamiento geotécnico y estructural de túneles carreteros comparando los resultados obtenidos al simular la excavación con diferentes tipos de secciones transversales bajo condiciones geoestáticas idénticas. Los resultados demuestran como los sobreesfuerzos producto de una incorrecta distribución de tensiones en el contorno del túnel pueden afectar la estabilidad global de la estructura y como la correcta elección de una sección transversal permite disminuir los impactos producto de la concentración de esfuerzos.

PALABRAS CLAVE: Túneles Carreteros, Obras Subterráneas, Secciones Transversales, Comportamiento Suelo-Estructura.

1 INTRODUCCIÓN

Los túneles como obras civiles son concebidos como una alternativa constructiva al interior de un corredor vial para salvar algún obstáculo que dificulte el empalme entre dos puntos, generalmente y en nuestra región andina (Colombia), son empleados para sobrepasar montañas que en la mayoría de las veces presentan problemas geotécnicos de ladera que imposibilitan y/o dificultan la rápida ejecución de una vía a cielo abierto. Por tanto, los túneles deben considerarse como una solución y para ello se requiere un trato especial desde su fase conceptual pasando por el diseño hasta llegar a su excavación y soporte tomando en consideración diversos aspectos que permitan aumentar el potencial de este tipo de obras, optimizando recursos sin poner en riesgo la

estructura ni los usuarios que gozaran de ella.

Toda excavación subterránea se encuentra sometida a dos tipos de esfuerzos, unos de tipo geoestático que dependen principalmente de la profundidad a la cual se ejecutara la obra y otros esfuerzos inducidos producto de la redistribución de tensiones en el contorno del túnel los cuales dependen de la sección geométrica transversal escogida para la excavación.

El propósito de este artículo es orientar la evaluación objetiva de las secciones transversales con que habitualmente se diseñan los túneles carreteros hacia la optimización de recursos en el sistema de soporte para macizos con comportamiento geotécnico Regular y Malo.

2 SECCION TRANSVERSAL

No existe una única forma geométrica de definir un túnel, esta dependerá del uso y propósito que deberá cumplir. Existe una tipología para túneles carreteros en la que se encuentran las formas en herradura, túneles circulares y los creados por arcos de diferentes radios.

Se debe tomar en consideración que cada túnel es único por su condicionamiento geomecánico y por los requerimientos de tráfico bajo los cuales deberá entrar en servicio el proyecto.

La geometría de las secciones transversales de los túneles debe de ser un parámetro particular de cada proyecto, siendo indispensable considerar los diferentes condiciones y/o limitantes de la obra. Resulta indispensable poder clasificar el túnel de acuerdo a algunos aspectos enumerados a continuación:

- Longitud del túnel;
- Densidad de tráfico proyectada;
- Sentido del flujo vehicular (unidireccional o bidireccional);

Tomando estas premisas se puede determinar una sección de transito libre, las áreas requeridas para implementar sistemas de ventilación, corredores peatonales (Andenes), y áreas para sistemas electromecánicos que sean requeridos dentro del proyecto.

Adicional a lo anterior, la geometría y tamaño de la sección transversal serán definidos en función de la interacción suelo – estructura, por lo cual resulta indispensable evaluar el terreno donde se efectuara la excavación a fin de prever un comportamiento partiendo del condicionamiento geológico - geotécnico de la zona.

Resulta conveniente destacar que la forma circular (empleada principalmente por tuneladoras TBM) presentan el mejor comportamiento estructural en obras subterráneas, ya que esta geometría permite obtener una adecuada armonía entre la excavación y el terreno circundante potencializando el efecto arco del mismo lo cual

considera una correcta redistribución de tensiones en el contorno.

2.1 Sección De Transito Libre

La sección de transito libre definida como un perfil al interior del túnel deberá estar bien delimitada desde la fase conceptual del proyecto, esta región deberá ser establecida de tal manera que la sección de excavación contemple tolerancias por deformaciones del macizo e imperfecciones en el proceso constructivo. En ningún caso el terreno deberá encontrarse al interior de la sección de tránsito libre.

Esta sección definida para cada proyecto dependerá del tipo de vehículo para el cual está pensado el túnel, el sentido de flujo (bidireccional o unidireccional) será de vital importancia para contemplar el ancho de calzada cuyas dimensiones deberán ser iguales a las proyectadas en la vía a cielo abierto para evitar sobresaltos en la percepción de seguridad al interior del túnel.

Al interior del túnel se presenta modificación al ancho de berma, este componente del carril de una vía deja de cumplir la función como zona de parqueo temporal ya que al interior del túnel existen nichos de parqueo que suplen este requerimiento, la modificación al interior incluye la inclusión de andenes al lado y lado de la calzada cuando el sentido del tráfico es bidireccional.

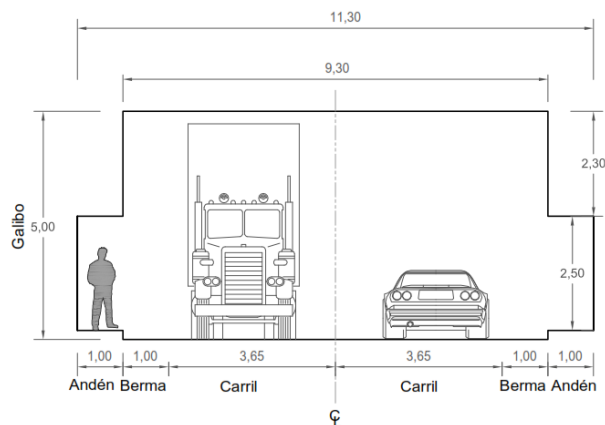


Figura 1 Sección de transito libre, túnel bidireccional, (Modificado Welte *et al*).

2.2 Zona De Ventilación

La ventilación forma parte fundamental dentro de los componentes de seguridad al interior del túnel, este sistema deberá tener un diseño que tome en consideración las particularidades de cada proyecto con los cuales se obtiene un área destinada a suplir los requerimientos del sistema cuando la ventilación no sea de tipo natural.

El área destinada al sistema de ventilación deberá garantizar el correcto desempeño de los equipos encargados de extraer el aire viciado e introducir aire fresco libre de material particulado; para lo cual se requiere un área libre destinada a la ubicación de equipos y circulación de aire.

Entre los sistemas de ventilación más comunes se encuentran:

- Ventilación longitudinal
- Ventilación semi transversal
- Ventilación transversal

La implantación de alguno de estos sistemas dependerá de la complejidad del proyecto visto desde la cantidad de aire que se requiera inyectar al túnel en horas pico de servicio y en casos de emergencia, para este último se recurre al caso más crítico que se encuentra definido como un incendio al interior de la estructura, dicho incendio deberá estar proyectado en función del tipo de vehículos y transporte de sustancias que van a recorrer el túnel.

Comúnmente se destina un espacio entre la parte superior de la zona de tránsito libre y la bóveda del túnel a fin de satisfacer el tamaño proyectado en los estudios de riesgo, aunque esto no implique que existan diseños con inyección de aire lateral o incluso desde el fondo con rejillas instaladas cerca de andenes o hastiales del túnel.

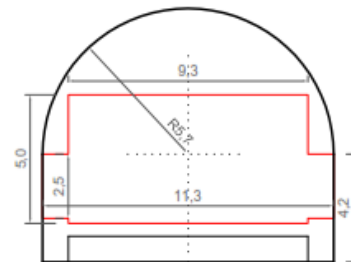
2.3 Geometría

Luego de definir la sección transversal tomando en consideración las áreas definidas por el área de tránsito libre y por el sistema de ventilación deberá evaluarse la necesidad de ejecutar solera curva (contra bóveda) que

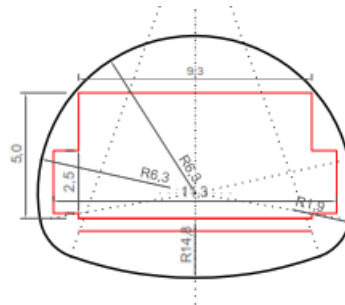
permitirá una mejor redistribución de tensiones en el contorno de excavación, este requerimiento de diseño es contemplando principalmente para macizos rocosos de regular y mal comportamiento geotécnico.

A continuación se presentan las secciones empleadas en el presente estudio, las cuales han sido consideradas para el mismo puesto que son secciones comúnmente empleadas en la ingeniería de obras subterráneas.

(a)



(b)



(c)

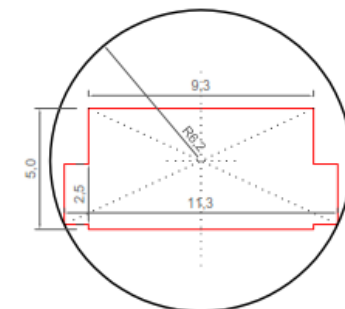


Figura 2 Secciones transversales. (a) Herradura, (b) Arcos Concéntricos con Solera, (c) Circular tipo TBM, (d) De paredes planas rectas.

3 METODOLOGIA

Definidos los parámetros que van orientar el diseño geométrico de la sección transversal de un túnel carretero se procede a estudiar la estabilidad de la excavación a realizar. Existen diversos métodos analíticos que permiten la validación del sistema de soporte entre los que se destaca el método de convergencia y confinamiento, el cual se basa en encontrar un punto de equilibrio entre la curva de reacción del macizo CMR y la curva de esfuerzo - deformación de los arcos de soporte.

Actualmente la modelación numérica a través de software especializado permite mediante elementos finitos obtener un estudio detallado en 2D y 3D del estado tensional y de deformación de un macizo convirtiéndose en una eficaz herramienta para el estudio y análisis del comportamiento de obras subterráneas.

3.1 Parámetros de materiales

Los parámetros de resistencia de roca empleados en los diferentes análisis de diseño aplicados en el presente trabajo:

- Resistencia a la compresión simple (q_u): dato estimado de bases de datos de proyectos en Colombia.
- Ángulo de fricción interna promedio (f') y cohesión (c'): criterio de falla de Hoek-Brown (2002), a través del software RocLab 1.0 (Rocscience Inc.).

El criterio generalizado de Hoek-Brown se expresa a través de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + q_u \left(m_b \frac{\sigma'_3}{q_u} + s \right)^a$$

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right)$$

Dónde:

σ'_1 y σ'_3 : esfuerzo efectivo principal mayor y menor, respectivamente.

q_u : resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.

m_b , s y a : parámetros de resistencia del macizo rocoso.

D : factor que depende del grado de alteración del macizo rocoso por voladura o relajación de la roca.

GSI : Índice de resistencia geológica establecido como clasificación geomecánica de macizos.

Los parámetros de Mohr-Coulomb (c' y φ') equivalentes se estiman a través de las siguientes ecuaciones:

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$

$$c' = \frac{q_u [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{\frac{1 + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}}$$

A continuación se presentan los parámetros adoptados para implementar los modelos, para una misma litología con tres grados de clasificación RMR.

Tabla 1 Parametros de Terreno

Litología	GSI	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	Φ (°)	E (MPa)
Areniscas III	50	25	236	55.3	1689.5
Areniscas IV	30	23	111	44.8	223.8
Areniscas V	20	23	64	35.7	60

Estos tres tipos de materiales fueron tomados en cuenta al considerarse que son representativos de las zonas de portales, las cuales son las que generalmente más problemas de estabilidad.

Con los parámetros definidos se procede a efectuar un análisis mediante elementos finitos contemplando una profundidad de eje de túnel igual para las diferentes secciones transversales

analizadas. Para el presente estudio se consideró una profundidad de 5 veces el diámetro de la sección circular.

4 RESULTADOS

Luego del análisis mediante elementos finitos se obtuvieron datos contundentes evaluados en los diferentes comportamientos obtenidos del macizo bajo condiciones de esfuerzos inducidos por la geometría de las diferentes secciones transversales.

El aumento del esfuerzo Sigma 1, fue evaluado para las Areniscas Tipo III. Los resultados muestran un aumento significativo en el estado tensional del macizo.

Tabla 2 Aumento de Sigma 1 al pasar de la condición inicial a condición con excavación

Seccion	Boveda	H. Der	Solera	H. Izq
S1	107.00%	183.00%	-37.00%	197.00%
S2	90.00%	66.00%	4.00%	65.00%
S3	103.00%	90.00%	70.00%	89.00%

Los datos presentados en la Tabla 2 son mejor representados en la siguiente figura.

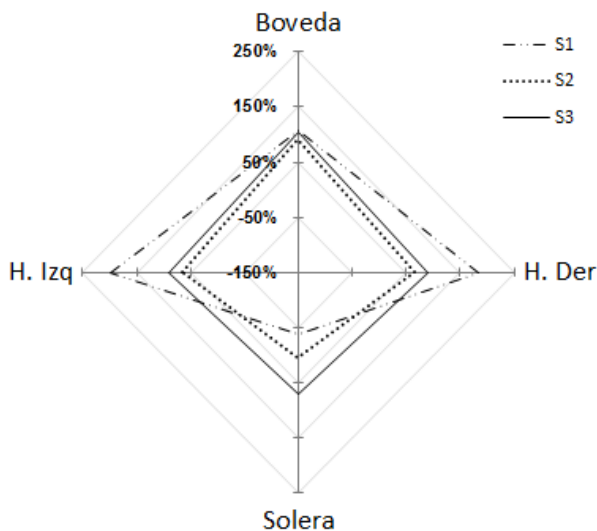


Figura 3 Aumento en Sigma 1 para las diferentes secciones de excavación.

La Figura 3 representa el comportamiento creciente de esfuerzos sobre el contorno de excavación. La sección 1 (herradura) tiene un aumento mayor en sigma 1 sobre los hastiales al

ser comparado este análisis con las otras dos secciones evaluadas; este comportamiento se explica por la concentración de esfuerzos que acontece en la secciones con tramos y ángulos rectos.

El comportamiento en la bóveda para las tres secciones evaluadas es similar, con un valor que representa un aumento del 100% de sigma 1 sobre el túnel. Se puede inferir que la sección con una distribución de esfuerzos más homogénea es la sección 3 (circular).

La evaluación de aumento de esfuerzos en terrenos tipo IV y V no es posible de realizar sobre el contorno. El radio plástico se propaga ampliamente sobre estas zonas lo que produce una caída súbita de esfuerzos sobre estas regiones tal como se presenta a continuación.

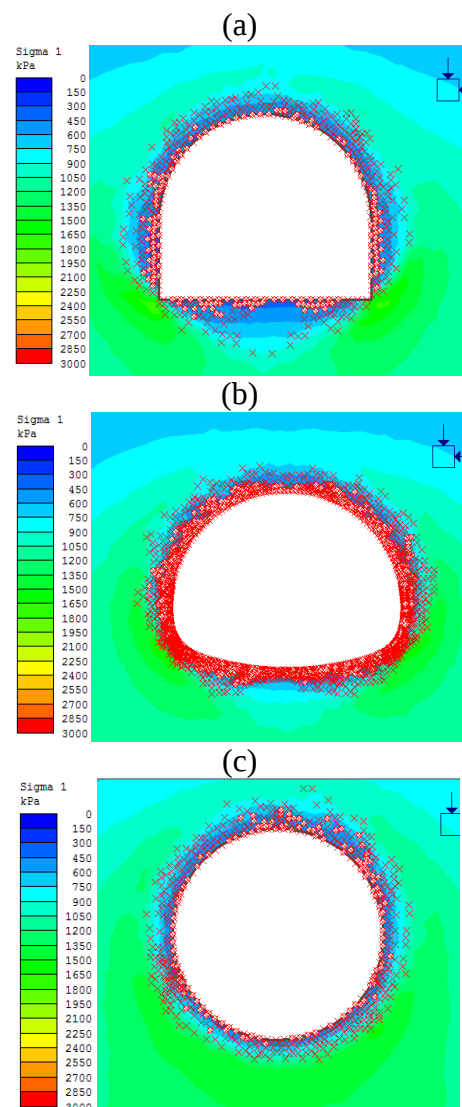


Figura 4 Representación Gráfica zonas de plastificación en Areniscas tipo IV, (a) Sección 1; (b) Sección 2; (c) Sección 3.

Se ha realizado un análisis de deformaciones sobre el contorno de las secciones para los diferentes tipos de terreno. A continuación se presentan los resultados obtenidos en valores de deformación que ocurre en el perímetro de la excavación del túnel bajo condiciones geostáticas similares. En los tres casos se evaluó una profundidad de 3D. Los resultados presentados se dividen en 4 regiones.

1. Hastial Izquierdo
2. Boveda
3. Hastial Derecho
4. Solera

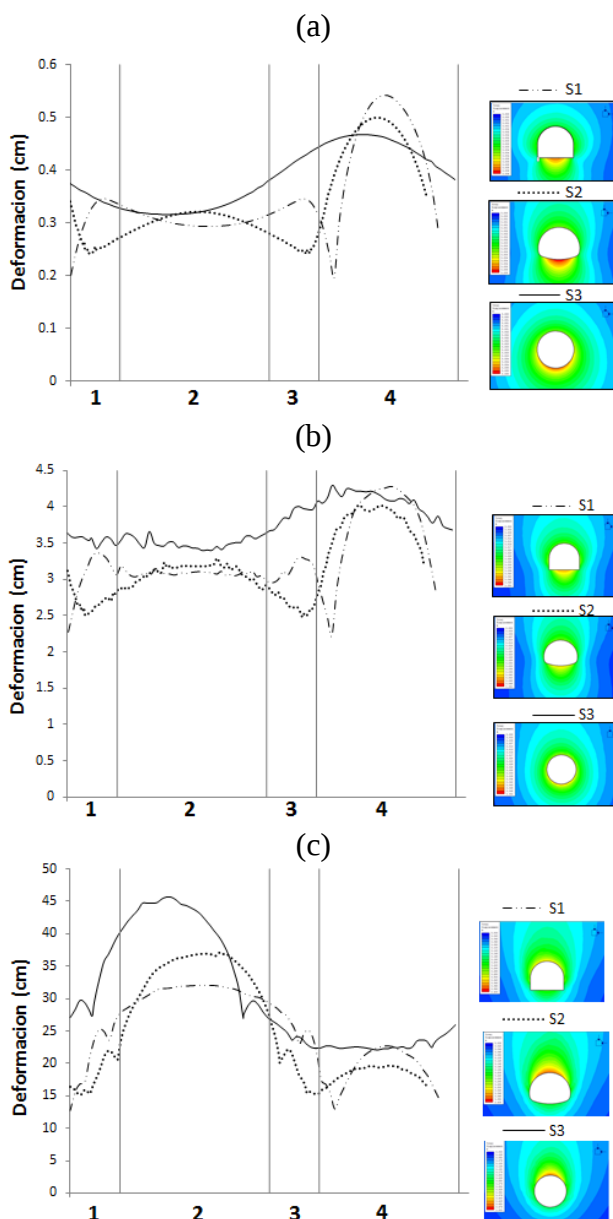


Figura 5 Análisis de deformaciones, (a) Arenisca Tipo III, (b) Arenisca Tipo IV, (c) Arenisca Tipo V.

La Figura 5 (a) que presenta las deformaciones sobre el perímetro de las diferentes secciones transversales en Areniscas tipo III, permite observar como las deformaciones en la bóveda aumenta en la sección S2, mientras que disminuye en la sección S1 y S3; por su parte las tres secciones presentan su mayor deformación sobre la solera.

La Figura 5 (b) tiene una tendencia similar a la figura (a), no obstante su trazado es menos tenue, muestra de un macizo con mayor alteración y menor comportamiento homogéneo. El aumento en las deformaciones es notable, se pasa de unas deformaciones máximas de 0.5 cm a unas mayores a 4 cm en solera.

La Figura 5 (c) representa el terreno con las parámetros de resistencia más bajos, resulta interesante ver como la tendencia que mantenían las dos figuras iniciales se ven invertidas en esta, en la cual, las máximas deformaciones acontecen sobre la bóveda del túnel.

Adicional a los análisis presentados, se ha efectuado una valoración de comportamiento en función del soporte requerido para garantizar la estabilidad; para ello se ha seguido las recomendaciones propuestas por Bieniawski (1989) según el tipo de terreno donde se pretende efectuar la excavación.

Para la valoración fue seleccionado terreno tipo IV por ser la transición entre un terreno V y un terreno III. Adicional a ello se siguieron las recomendaciones sugeridas por Vlachopoulos (2009) en el análisis de relajación de módulos en el frente de excavación.

El soporte propuesto y analizado comprende:

- Vigas HEB 100, c./ 1.0 m
- Concreto 28 MPa, e = 0.2 m

Dentro del diseño convencional y las prácticas constructivas es frecuente el empleo de fibras sintéticas o metálicas para aumentar la resistencia del concreto. Adicional a ello, se requiere la instalación sistemática de pernos en la bóveda de la excavación.

A continuación se presentan las gráficas de resistencia obtenidas para la valoración de las vigas HEB 100 y el concreto.

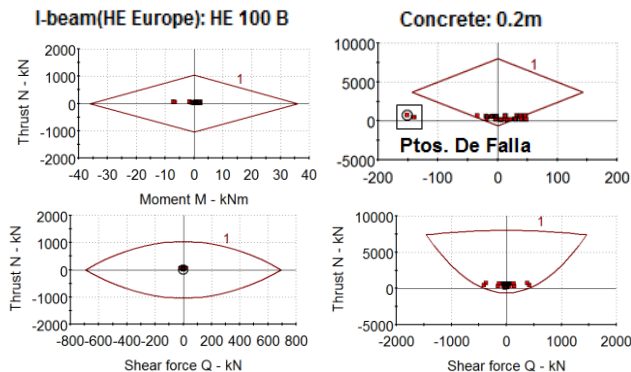


Figura 6 Análisis Estructural Sección S1, Areniscas tipo IV.

Se puede observar como en la Figura 6 existe una amplia dispersión de los diferentes puntos, especialmente en el concreto donde existe una zona por fuera del límite de seguridad $FS = 1,0$, lo cual indica una zona de falla. Estos puntos que se presentan en la intersección entre la solera y los hastiales indican una concentración de esfuerzos a causa de los tramos rectos que no distribuyen los esfuerzos en esta región los cuales no son capaces de ser contenidos con el soporte propuesto.

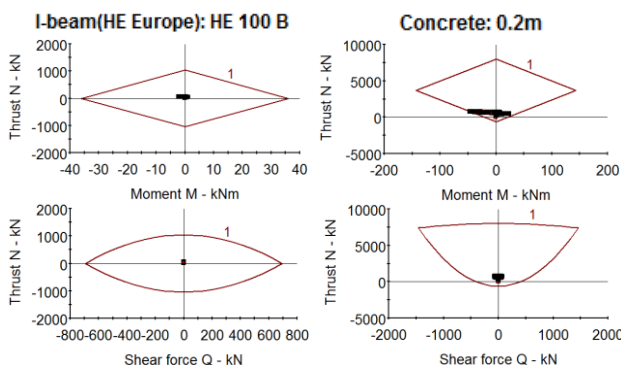


Figura 7 Análisis Estructural Sección S2, Areniscas tipo IV.

La Figura 7 presenta un mejor comportamiento del material de refuerzo sobre el contorno de la excavación. En las vigas HEB100 y el concreto no presenta zonas de fallas estando todos los puntos dentro del factor de seguridad de 1,0.

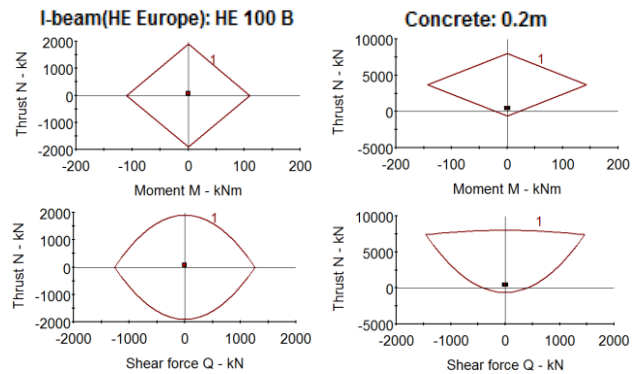


Figura 8 Análisis Estructural Sección S3, Areniscas tipo IV.

La Figura 8 que representa el comportamiento estructural de la sección S3 (circular) presenta un comportamiento bastante estable, con una redistribución uniforme y concéntrica que indica una correcta disposición del soporte.

5 CONCLUSIONES

El trabajo presentado en el presente artículo refleja una parte importante dentro del estudio de túneles carreteros a llevar a cabo en la definición geométrica de la sección a implementar dentro del trazado, la cual juega un papel definitivo en el comportamiento geotécnico y estructural; la correcta definición de todos los parámetros que la conforman permiten garantizar la optimización estructural.

Luego del análisis cuantitativo realizado entre las diferentes secciones transversales se concluye a partir de los resultados obtenidos lo siguiente:

- La sección transversal que representa el mayor aumento de esfuerzos inducidos en el contorno producto de la excavación es la S1 (Herradura) por las paredes planas presentes en los hastiales y el ángulo recto presente en la solera del túnel al empalmar con los hastiales.
- La sección S2 (Arcos Concéntricos) presenta una notable disminución de esfuerzos actuantes en la solera, como resultado de la distribución sobre el arco invertido implementado.

La sección transversal circular S3 se presenta como la más estable y regular de las otras dos secciones evaluadas.

- En cuanto a las deformaciones presentes, es importante destacar el comportamiento de las secciones S2 y S3 que frente a los mismos esfuerzos geostáticos provocan menores deformaciones en las areniscas tipo III y tipo IV. Caso contrario ocurre en el terreno tipo V, donde las deformaciones se trasladan de la solera hacia la bóveda siendo ahí su punto más crítico. Es por esta razón que en sitios con presencia de rocas muy alteradas se requiere el uso de sombrillas de micropilotes o enfilajes que permitan garantizar el correcto soporte y avance constructivo sobre este tipo de terrenos inestables.
- El comportamiento de los tres macizos rocosos fue evaluado implementando el mismo tipo de soporte sugerido por Bieniawski en terrenos tipo IV según el cual una colocación de arcos ligeros con espesor de concreto de 0.2 m e instalación sistemática de pernos deberían de ser suficientes para garantizar la estabilidad de este tipo de terrenos. No obstante la comprobación realizada demuestra que existen puntos de fallas al evaluar dicho soporte en túneles con sección transversal S1 (Herradura).

El presente artículo presenta un análisis comparativo y particular de túneles excavados con tres diferentes secciones transversales en rocas sedimentarias tipo areniscas con comportamiento Regular, Malo y Muy Malo, definidos así según la clasificación RMR y los valores GSI asumidos como hipótesis. Los resultados aquí presentados corresponden a un análisis académico, no obstante la práctica constructiva ha corroborado mucho de los análisis aquí presentados.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento al Ing. Daniel Zuluaga por el interés y acompañamiento así como también, un agradecimiento especial a la ESCUELA DE

INGENIEROS MILITARES, ESING por el apoyo en el desarrollo de la investigación y el financiamiento para presentar este trabajo.

REFERENCIAS

- Beniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. A Wiley-Interscience publication, USA, 251 p.
- França, P. (2006). Estudio do comportamento de túneis: análise numérica tridimensional com modelos elasto-plásticos, Dissertação de Mestrado, Departamento de engenharia de estruturas e geotécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 185 p.
- Hoek, E., Carranza-Torres C. and Corkum B. (2002). Hoek-Brown failure criterion 2002 edition, Mining Innovation and Technology, Toronto, USA, p. 267-273.
- Vlachopoulos, N. and Diederichs, M. (2009). Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 42, p. 131-146.
- Welte, U. Technical Committee on Road tunnel Operation. (2004). Cross Section Design for Bi-Directional Road Tunnels, PIARC, ISBN 2-84060-164-8, Vol. 1, 76 p.