

Sistemas de prerrefuerzo en frentes de excavación de túneles en suelo y roca

Pre-reinforcement systems in excavation fronts for soil and rock tunnels

DAMARIS CONTRERAS CARRILLO¹ - RAMIRO GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ²

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

2. Director del Departamento de Túneles de Ingetec S.A.

damaris.contreras@mail.escuelaing.edu.co - ramiro.gutierrez@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/01/2019 Aceptado: 01/02/2019

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

<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Esta investigación tuvo como finalidad desarrollar una metodología práctica para diseñar los elementos de prerrefuerzo o presostenimiento utilizados para la estabilización temporal del frente de excavación de un túnel. El objetivo es brindar una herramienta práctica que facilite a los ingenieros el cálculo o estimación del sistema de presostenimiento, usando enfilajes y pernos en fibra de vidrio como sistema de estabilización del frente en túneles excavados en materiales de suelo con baja cohesión y relativamente superficiales.

Para esto se tomó como base el método analítico de Tamez [12], quien lo desarrolló a partir de varias experiencias de túneles excavados en Ciudad de México para el metro. Con dicho método se aplican las ecuaciones planteadas por ese autor mediante análisis de sensibilidad de los parámetros de resistencia del suelo, el diámetro de excavación del túnel y la longitud de avance, y con ello se prepararon varios ábacos que simplifican el proceso de diseño. De igual manera, para explicar el procedimiento de la metodología analítica y el uso de los ábacos de diseño se realizó un ejemplo típico que se complementó con la modelación numérica mediante el *software* RS2 o Phases 2D (V9). De los resultados obtenidos se pudo establecer que el uso de elementos de prerrefuerzo antes de la excavación mejora considerablemente las condiciones de estabilidad del frente de excavación, limitando la zona de falla, las deformaciones y los desplazamientos en el frente y la clave, eliminando consecuentemente posibles fallas en chimenea.

En la metodología propuesta no se considera el diseño para garantizar la estabilidad a largo plazo o permanente del túnel, sino tan sólo la estabilidad temporal del frente de excavación.

Palabras claves: túnel, prerrefuerzo o presostenimiento, deformaciones, zona de falla, enfilajes, pernos en fibra de vidrio, frente de excavación.

Abstract

The purpose of this research was to develop a practical methodology for the design of the pre-reinforcement or pre-support used in the excavation front as temporary stabilization. The objective is to afford a practical tool that eases calculation and estimation of pre-reinforcement systems, using forepoling and fiberglass bolt as front stabilization.

The analytic Tamez methodology was used as its basis and through sensibility analysis of the ground's resistance parameters, the tunnel's excavation parameters, and the feed length, abacuses were obtained to simplify the design. Similarly, to explain the analytics methodology procedure and the abacus use in design, a typical example was made, complemented with numerical software models like R2 and Phases 2D (V9). Due to the results achieved, the benefits of pre-reinforcement were established, the stability conditions were substantially improved in the excavation front, limiting the failure zone, distortions, front displacements, and crown tunnel, and, consequently, chimney failures are avoided.

The proposal does not consider the design to ensure long term or permanent stability; it just considers the temporal stability in the excavation front.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de la infraestructura vial en Colombia, a raíz de los acuerdos comerciales firmados con otras naciones y de la necesidad de ser más competitivos, ha impulsado al país a invertir en el mejoramiento de la malla vial existente y en la construcción de nueva infraestructura, incluyendo la urbana. Por otro lado, una geología compleja y la topografía tan variada del territorio colombiano, así como la necesidad de reducir tiempos y distancias de recorrido, han llevado a los ingenieros a implementar el diseño y la construcción de una cantidad importante de túneles viales, para lo cual se ha requerido la utilización de técnicas y herramientas que faciliten el diseño y la construcción de dichos túneles. No obstante, en la geología colombiana existen muchos materiales con fallas o condiciones difíciles que afectan la excavación de los túneles, lo que consecuentemente lleva a utilizar sistemas de presoporte para garantizar la estabilidad del frente de excavación.

Existen metodologías empíricas o analíticas que permiten diseñar elementos de presostenimiento, pero éstas no ofrecen herramientas prácticas para el diseño y no consideran el diseño de un sistema de presoporte combinado. Adicionalmente, para emplear metodologías numéricas se requieren *softwares* especializados, de altos costos, que implican largas horas de modelación y pericia en su manejo. Ante tal necesidad, se propuso hacer este trabajo para desarrollar una metodología práctica para el diseño de un sistema de prerrefuerzo en el frente de excavación, utilizando como elementos de sostenimiento enfilajes y pernos en fibra de vidrio, en materiales deleznales o de muy baja cohesión.

La metodología propuesta se desarrolla en función de un método analítico que evalúa el factor de seguridad en el frente de excavación de un túnel. El análisis se hace para dos escenarios o condiciones: sin considerar soporte y considerando soporte con enfilajes y pernos en fibra de vidrio, para diferentes parámetros de resistencia de suelo, longitud de avance y diámetro de excavación. Finalmente, se plantean unos ábacos de diseño y se realiza un ejemplo típico del método analítico, que luego se complementa con modelación numérica en 2D, mediante el *software* RS2 de Rocscience. Con esto se evalúa el comportamiento del frente de excavación del túnel (extrusión y convergencia).

El propósito de este trabajo es dejar una guía y una serie de ábacos de diseño que les permitan a los ingenieros facilitar el cálculo o la estimación de los elementos de presostenimiento en un frente de excavación de un túnel.

MÉTODOS PARA LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES

Entre los métodos utilizados para la excavación de túneles se destacan los métodos convencionales, el método NATM (nuevo método austriaco) y el método Adeco (método de control de las deformaciones).

Métodos convencionales

Estos métodos, los primeros utilizados para la excavación de túneles, consisten en la excavación de pequeñas secciones de área que se van entibando a medida que avanza la excavación. Tales métodos dieron paso al nuevo método austriaco. En la figura siguiente se puede observar un método convencional con secciones parcializadas (figura 1).

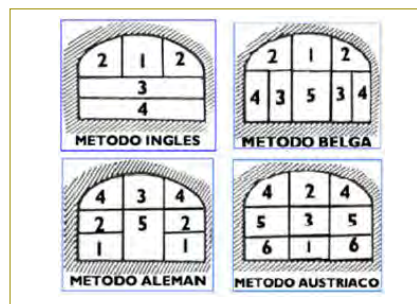


Figura 1. Métodos convencionales.

Fuente: López Jimeno, 1997.

Método NATM (nuevo método austriaco)

Se basa principalmente en dejar relajar el estado de esfuerzos alrededor de la excavación, permitiendo deformaciones controladas de la sección hasta el punto de que el sostenimiento flexible controle dicha deformación. La filosofía de diseño del método NATM integra el terreno que rodea la excavación y el anillo estructural de soporte formado en el entorno a la cavidad.

Este método está enfocado principalmente en el análisis de excavaciones de túneles en roca y en el diseño del sistema de soporte (figura 2), mas no hace énfasis en el diseño del presoporte (referencia [5]).

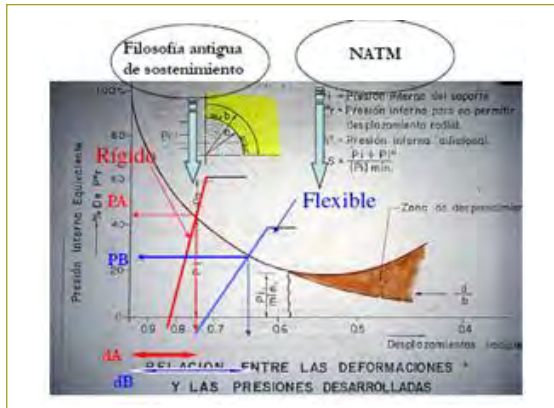


Figura 2. Filosofía del método NATM.
Fuente: Ingetec, 2015.

Sistema Adeco (análisis de la deformación controlada en rocas y suelos)

Se introdujo por primera vez en Italia, gracias al profesor Lunardi [8].

En esta metodología se considera importante analizar la causa que genera la deformación del túnel y no sólo la respuesta de deformación del medio. Es decir, se plantea que el éxito para el control del comportamiento tensodeformacional de un túnel está en actuar primero en la rigidez de la zona de avance, controlando la extrusión y la convergencia (figura 3). En otras palabras, esto se logra utilizando un presostenimiento. Con este método se introdujo el concepto de presoporte o presostenimiento para la excavación de túneles.

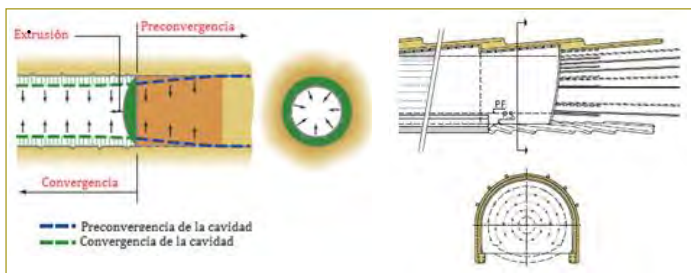


Figura 3. Control de extrusión y convergencia.
Fuente: Lunardi, 2008.

DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE PRERREFUERZO

El prerrefuerzo es un conjunto de elementos que se instalan en el terreno para proporcionar la estabilidad temporal del frente de avance durante la excavación y mejorarla. Se usan en portales, en suelos deleznable con baja cohesión o en macizos rocosos de muy mala calidad geotécnica.

Entre los elementos de prerrefuerzo utilizados se encuentran los enfilajes, los pernos en fibra de vidrio y las inyecciones.

Para el desarrollo de este trabajo no se tuvo en cuenta el efecto de mejoramiento del terreno mediante inyecciones, y sólo se consideró el mejoramiento causado por el efecto mecánico de los sistemas de presostenimiento con enfilajes y pernos en fibra de vidrio.

Enfilajes

Tienen como función soportar y transmitir las cargas concentradas sobre la clave del túnel, reduciendo el esfuerzo principal mayor (σ_1) en el frente de excavación (figura 4).

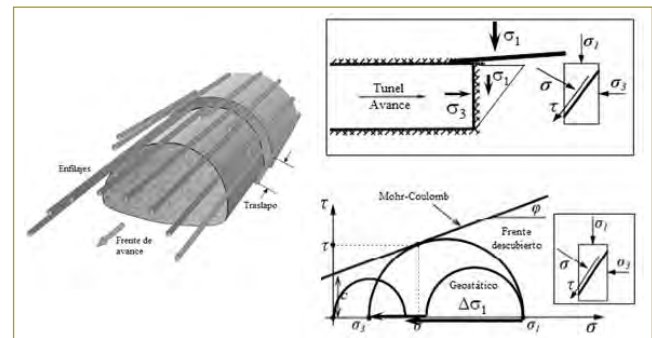


Figura 4. Sistema prerrefuerzo con enfilajes.
Fuente: Kavvadas, 2005.

Pernos en fibra de vidrio

Su función es restringir las deformaciones en el frente de avance (extrusión), incrementando el esfuerzo horizontal (σ_3) y brindando confinamiento constante (figura 5).

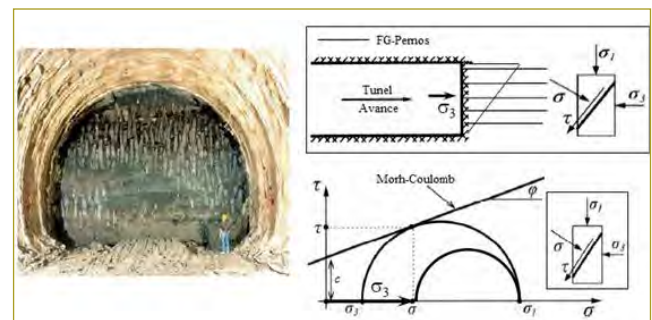


Figura 5. Sistema de prerrefuerzo con pernos en fibra de vidrio.
Fuente: Kavvadas, 2005.

PLANTEAMIENTO DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE PRERREFUERZO

Para el desarrollo de la metodología de diseño se tomó como referencia el método simplificado de análisis de estabilidad de un túnel, propuesto por Enrique Tamez (1997). Tamez, mediante observación y estudio del mecanismo de falla ocurrido durante la construcción de túneles en suelos, planteó la siguiente ecuación general de estabilidad:

$$FSg = \frac{S_{m2}Z_d D(a+L) + 2S_{m2}Z_d L(a+\frac{L}{2}) + S_{m2}Z_d a^2 + (2,7c\sqrt{k_p} + p_j k_p)LD(a+\frac{L}{2})}{\frac{1}{2}\gamma ALD(a+\frac{L}{2}) + \gamma LDH(a+\frac{L}{2}) + \frac{1}{2}(\gamma H - p_o)Da^2 + \frac{1}{2}q_c D(a+L)^2 - \frac{1}{2}p_j DA^2}$$

Diseño de enfilajes

Con base en la ecuación general de estabilidad de Tamez, se plantea la ecuación para el cálculo de la carga que aporta el sistema de enfilajes, de la siguiente manera (figura 6):

$$P \text{ en } f = q_{enf} N(a+L)x$$

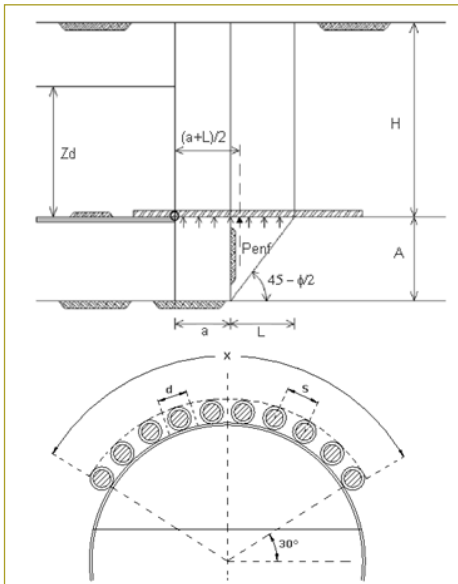


Figura 6. Distribución de carga de los enfilajes.

Fuente: Elaboración propia.

$$FSg = \frac{S_{m2}Z_d D(a+L) + 2S_{m2}Z_d L(a+\frac{L}{2}) + S_{m2}Z_d a^2 + (2,7c\sqrt{k_p} + p_j k_p)LD(a+\frac{L}{2})}{\frac{1}{2}\gamma ALD(a+\frac{L}{2}) + \gamma LDH(a+\frac{L}{2}) + \frac{1}{2}(\gamma H - p_o)Da^2 + \frac{1}{2}q_c D(a+L)^2 - \frac{1}{2}p_j DA^2 - q_{enf} N(a+\frac{L}{2})x}$$

$$q_{enf} N = \frac{2FSg(\frac{1}{2}\gamma ALD(a+\frac{L}{2}) + \gamma LDH(a+\frac{L}{2}) + \frac{1}{2}(\gamma H - p_o)Da^2 + \frac{1}{2}q_c D(a+L)^2 - \frac{1}{2}p_j DA^2)}{FSg(a+L)^2 x}$$

$$q_{enf} N = \frac{2(S_{m2}Z_d D(a+L) + 2S_{m2}Z_d L(a+\frac{L}{2}) + S_{m2}Z_d a^2 + (2,7c\sqrt{k_p} + p_j k_p)LD(a+\frac{L}{2}))}{FSg(a+L)^2 x}$$

Para el diseño estructural de los elementos se adopta la metodología del Ministerio de Fomento (2005) [9], que considera el diseño estructural como una viga con apoyo intermedio entre una viga simplemente apoyada y una viga doblemente empotrada. A partir de ahí, se realiza la verificación a flexión y cortante para el sistema de enfilaje.

Diseño de los pernos en fibra de vidrio

Para determinar la presión de confinamiento p_f se consideran los planteamientos de Tamez (1997), para un túnel profundo o un túnel somero.

Túnel profundo ($H/D > 1,7$ y $Zd/D = 1,7$)

$$p_f = \frac{\gamma(H + \frac{D}{3})FS - \gamma(H - 1,2D)N_2 - cN_1}{k_p FS}$$

Túnel somero ($H/D < 1,7$ y $Zd = H$)

$$p_f = \frac{\gamma(H + \frac{D}{3})FS - 0,5\gamma DN_2 - cN_1}{k_p FS}$$

Para el cálculo de la cantidad de elementos requeridos se consideran el área de la sección transversal del túnel, la presión de confinamiento y la resistencia a la tracción del elemento:

$$\# \text{ de pernos} = \frac{p_f A}{\text{Carga unitaria de cada elemento } (T; T_{v-c}; T_{c-t})}$$

Consideraciones

Para el desarrollo de la metodología se adoptaron las siguientes consideraciones, basadas en recomendaciones dadas en la bibliografía consultada y en el criterio propio de los ingenieros de esta investigación:

Parámetros de resistencia en función de la cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ). Para los cálculos se adoptaron valores de cohesión de 10, 20, 40, 60 y 80 kPa, y valores de ángulo de fricción de 20, 25, 30, 35 y 40°.

Peso unitario del terreno de 18 kN/m³.

Cobertura del terreno de 50 m.

Longitud de avance de 0,50 m y 1,0 m, considerando un terreno de baja resistencia que limita longitudes de avance mayores.

Diámetros de túnel de 3,0 a 12,0 m.

Y para los enfilajes se adoptaron diámetros de tubería entre 50 y 140 mm, espesor de 3 a 8 mm y separación entre elementos hasta de 60 cm, según lo que sea más frecuente encontrar en obra.

DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO

El desarrollo de la metodología consiste en aprovechar un conjunto de ábacos cuya finalidad fue facilitar el diseño de los elementos de sostenimiento antes de la excavación. En total, se desarrollaron 28 ábacos, como se explica a continuación:

1. Se analizó el comportamiento del túnel sin soporte, variando los parámetros de resistencia del suelo, el diámetro del túnel y la longitud de avance, en términos del factor de seguridad general en el frente. A partir de este análisis se desarrollaron los primeros ábacos de diseño FS vs. Diámetro, para longitudes de avance de 0,5 y 1,0 m. A renglón seguido se muestra un ejemplo:

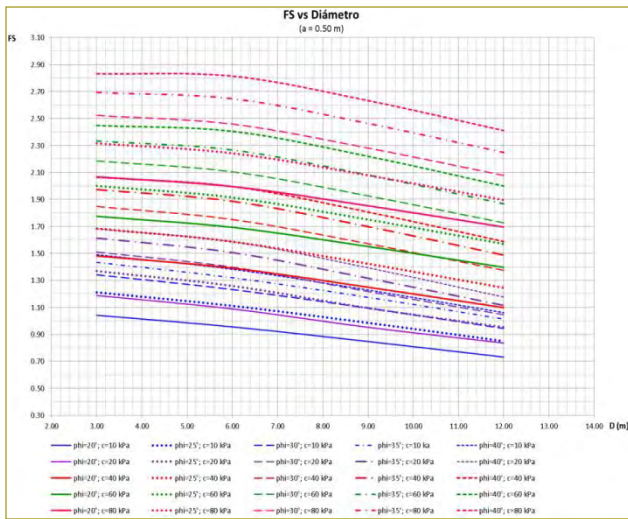


Figura 7. Ábaco de diseño FS vs. Diámetro, para longitud de avance de 0,50 m.

Fuente: Elaboración propia.

2. Se realizó el análisis considerando soporte. Primero con enfilajes. Se adoptaron FS= 2, 3 y 4, para determinar la carga que debe soportar el sistema de enfilajes, variando los parámetros de resistencia del suelo, el diámetro del túnel y la longitud de avance. Mediante este análisis se

obtuvieron los ábacos de diseño Cargas de enfilajes vs Diámetro, para FS=2, 3 y 4, y longitud de avance de 0,5 y 1,0 m. Seguidamente, se muestra un ejemplo.

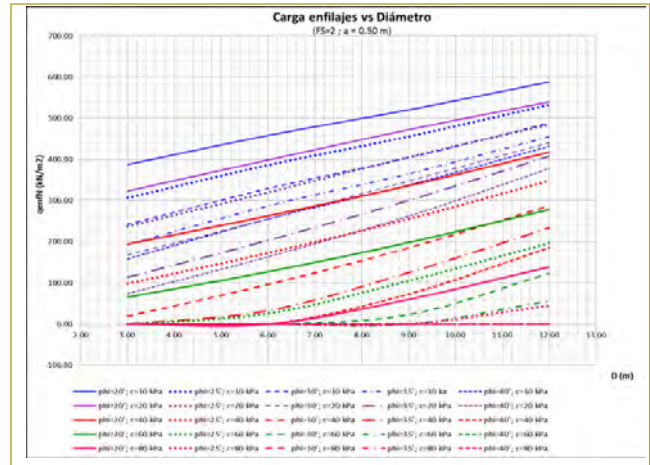


Figura 8. Ábaco de diseño Carga de enfilajes vs. Diámetro, para longitud de avance de 0,50 m y FS=2.

Fuente: Elaboración propia.

3. Se determinó el número de enfilajes que se requieren, considerando en los análisis el chequeo a flexión y cortante de los elementos que conforman los enfilajes. A continuación se muestra el ábaco de diseño desarrollado.

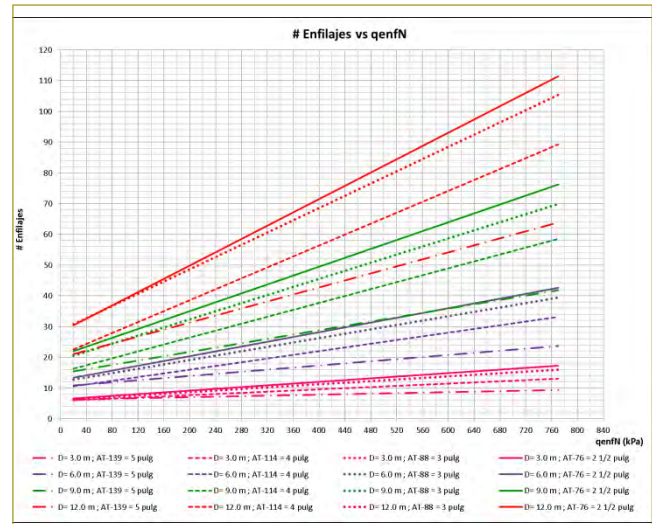


Figura 9. Ábaco de diseño #enfilajes vs. qenfN.

Fuente: Elaboración propia.

4. Se realizó el análisis considerando soporte con un sistema combinado: enfilajes y pernos en fibra de vidrio. Para la simplificación de los cálculos se asumió como valor fijo la carga que aportan los pernos en fibra de vidrio, es decir, se asumieron valores de presión

de confinamiento de $p_f = 50 \text{ kPa}$, 100 kPa y 150 kPa . A partir de ello se determinó la carga adicional que deben soportar los enfilajes, variando los parámetros de resistencia del suelo, el diámetro del túnel y la longitud de avance. De los análisis se obtuvieron los ábacos de diseño Cargas de enfilajes vs. Diámetro, para longitudes de avance de $0,5$ y $1,0$ m, $FS = 2, 3$ y 4 , y los valores de p_f . A continuación se muestra un ejemplo:

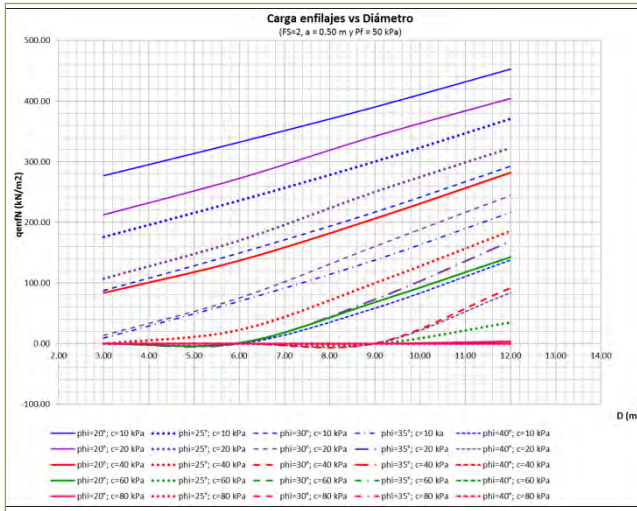


Figura 10. Ábaco Carga de enfilajes vs. Diámetro, para $a = 0,5$ m, $F = 2$ y $p_f = 50 \text{ kPa}$.

Fuente: Elaboración propia.

5. Se determinó la cantidad de pernos en fibra de vidrio que se requieren para diferentes valores de resistencia, tomada de los catálogos (Sireg, dywidag). Mediante el análisis se obtuvo el ábaco de diseño Cantidad de pernos vs. p_f , como se muestra a continuación:

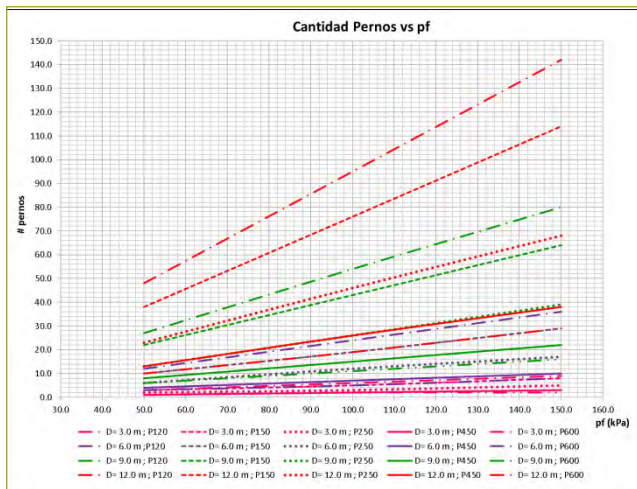


Figura 11. Ábaco Cantidad de pernos vs. p_f .

Fuente: Elaboración propia.

PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE LOS ELEMENTOS Y EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con el propósito de entender mejor la metodología del diseño de los elementos de presostenimiento propuesta en este trabajo, se plantea el desarrollo de un ejemplo hipotético de un túnel relativamente superficial, con las siguientes características y parámetros:

Diámetro de excavación de $9,0$ m, cohesión $c = 60 \text{ kPa}$ y $\phi = 25^\circ$, longitud de avance de la excavación de $1,0$ m y presión suministrada por los pernos en fibra de vidrio de $p_f = 100 \text{ kPa}$.

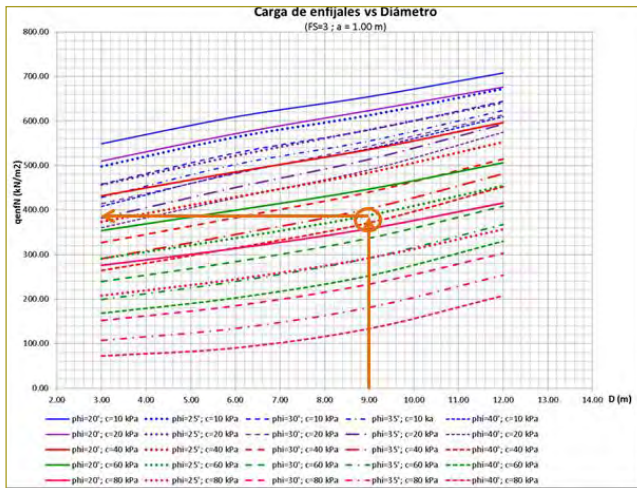
Ejemplo de aplicación mediante el uso de ábacos

1. Para las características y parámetros dados se determina el FS_g sin soporte. Para el ejemplo se utiliza el siguiente ábaco de diseño:



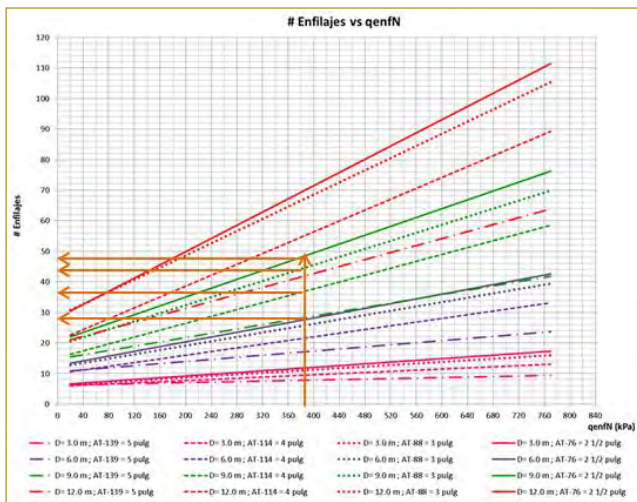
Como se puede leer en la ordenada, el FS_g sin soporte es igual a $1,7$. Dado que este valor es inferior a 2 , que corresponde al mínimo aceptado, indica que se requiere utilizar presoste antes del avance.

2. Se determina la carga de soporte del sistema de enfilajes, para un prerreferzo sólo con enfilajes. Para efectos del ejemplo, se adoptó un FS deseado igual a 3 . A continuación se muestra el ábaco de diseño aplicable para las características y parámetros dados en el ejemplo:



Como se puede leer en la ordenada, para obtener un FS= 3 se requiere una carga de soporte de los enfilajes de 393 kPa.

3. Determinación de la cantidad de elementos.



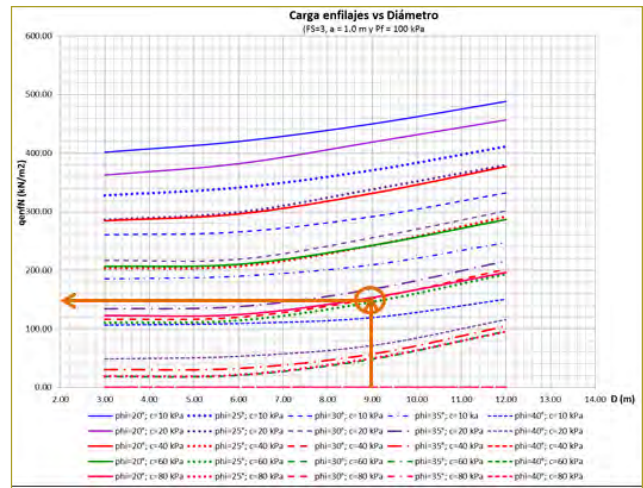
Para satisfacer la carga de soporte de 393 kPa, se requieren las siguientes cantidades:

Diámetro de enfilaje y cantidad:

- 5" ; 28 enfilajes
- 4" ; 36 enfilajes
- 3" ; 44 enfilajes
- 2 1/2" ; 48 enfilajes

4. Prerrefuerzo con un sistema combinado: enfilajes y pernos.

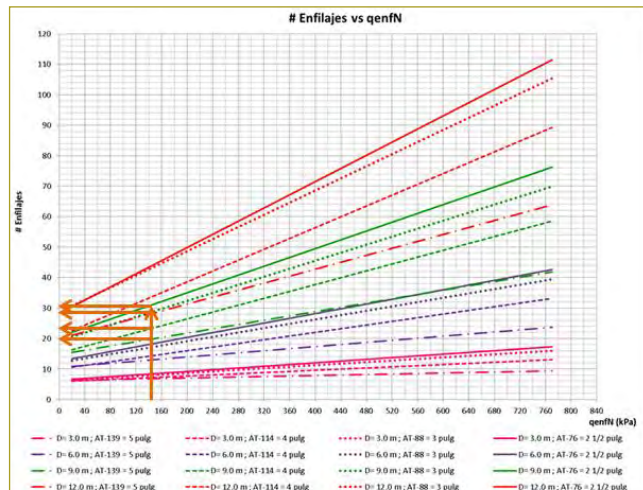
Determinación de la carga de soporte de los enfilajes, para un valor de $pf = 100$ kPa.



Como se puede leer en la ordenada, para satisfacer un FS= 3 y con una carga de confinamiento de $pf=100$ kPa, se requiere una carga de soporte adicional por los enfilajes de 147 kPa.

Al comparar la carga de soporte requerida para el sistema de sólo enfilajes, respecto al sistema combinado, se puede observar que la carga requerida por los enfilajes se reduce en un 62 %.

5. Determinación de la cantidad de enfilajes requeridos para el sistema combinado.

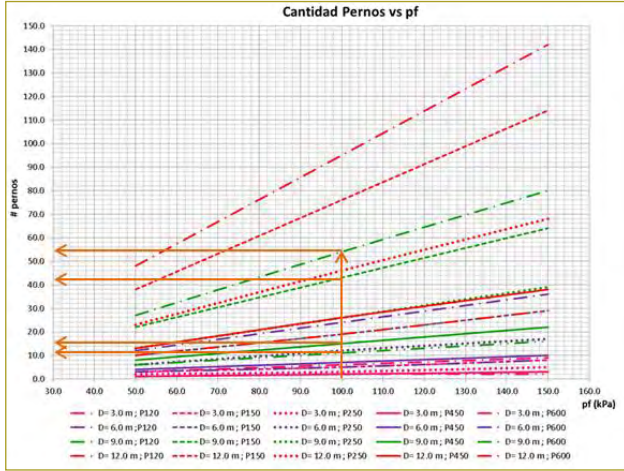


Como puede verse, para satisfacer la carga de soporte de 147 kPa se requieren las siguientes cantidades:

Diámetro enfilaje y cantidad:

- 5" ; 20 enfilajes
- 4" ; 24 enfilajes
- 3" ; 29 enfilajes
- 2 1/2" ; 31 enfilajes

6. Determinación de la cantidad de pernos en fibra de vidrio.
Se determina la cantidad de pernos en fibra de vidrio que se requieren para satisfacer una carga de confinamiento de 100 kPa.



Para los valores de resistencia de los pernos, se requieren las siguientes cantidades:

- Resistencia y cantidad:
120 kN; 54 pernos
150 kN; 42 pernos
450 kN; 16 pernos
600 kN; 12 pernos

Ejemplo de aplicación mediante el uso de las ecuaciones

Para el mismo ejemplo planteado en el uso de los ábacos, a continuación se presenta el procedimiento mediante el uso de las ecuaciones:

1. Se determina el FSg sin considerar soporte, mediante la ecuación de Tamez.

$$FSg = \frac{S_{m2}Z_d D(a+L) + 2S_{m2}Z_d L(a + \frac{L}{2}) + S_{m2}Z_d a^2 + (2,7c\sqrt{k_p} + p_j k_p)LD(a + \frac{L}{2})}{\frac{1}{2}\gamma ALD(a + \frac{L}{2}) + \gamma LDH(a + \frac{L}{2}) + \frac{1}{2}(\gamma H - p_a)Da^2 + \frac{1}{2}q_z D(a+L)^2 - \frac{1}{2}p_j DA^2} = 1,68$$

Como el FSg < 2, se requiere presoporte.

2. Determinación de la carga del sistema de enfilajes, considerando presoporte sólo con enfilajes.

$$q_{enf} N = \frac{2FSg(\frac{1}{2}\gamma ALD(a + \frac{L}{2}) + \gamma LDH(a + \frac{L}{2}) + \frac{1}{2}(\gamma H - P_a)Da^2 + \frac{1}{2}q_z D(a+L)^2 - \frac{1}{2}p_j DA^2)}{FSg(a+L)^2 x}$$

$$q_{enf} N = \frac{2(S_{m2}Z_d D(a+L) + 2S_{m2}Z_d L(a + \frac{L}{2}) + S_{m3}Z_d a^2 + (2,7c\sqrt{k_p} + p_j k_p)LD(a + \frac{L}{2}))}{FSg(a+L)^2 x}$$

$q_{enf} N = 393,3 \text{ kPa}$

3. Determinación de la carga de soporte por enfilaje.
Para el cálculo se asume inicialmente una cantidad de enfilajes y se procede a realizar los chequeos a flexión y cortante. Para el ejercicio con N= 36 y diámetro de 4", la carga por enfilaje es:

$$q_{enf} = \frac{\left(\frac{2(FS_g \Sigma MA - \Sigma MR)}{FS_g (a+L)^2 x} \right)}{N} d = 2,95 \text{ kN / m}$$

4. Chequeo o verificación a flexión y cortante

- Chequeo a flexión:

$$M_{ult} = \frac{q_{enf} L^2}{10} = 11,45 \text{ kN.m}$$

$$M_R = w^p \frac{f_y}{\gamma_s} F_u = 11,52 \text{ kN.m}$$

$$M_{ult} \leq M_R \text{ Ok!}$$

- Chequeo a cortante:

$$V_{ult} = \frac{q_{enf} L}{2} = 9,19 \text{ kN}$$

$$V_R = \frac{2A_s f_y}{\sqrt{3\pi} \gamma_s} = 1415,5 \text{ kN}$$

$$V_{ult} \leq V_R \text{ Ok!}$$

5. Determinación de la carga de soporte del sistema de enfilajes, considerando un sistema de prerrefuerzo combinado: enfilajes y pernos en fibra de vidrio.
Para $pf = 100 \text{ kPa}$, se tiene que la carga adicional que deben aportar los enfilajes es:

$$q_{enf} N = \frac{2FSg(\frac{1}{2}\gamma ALD(a + \frac{L}{2}) + \gamma LDH(a + \frac{L}{2}) + \frac{1}{2}(\gamma H - P_a)Da^2 + \frac{1}{2}q_z D(a+L)^2 - \frac{1}{2}p_j DA^2)}{FSg(a+L)^2 x}$$

$$q_{enf} N = \frac{2(S_{m2}Z_d D(a+L) + 2S_{m2}Z_d L(a + \frac{L}{2}) + S_{m3}Z_d a^2 + (2,7c\sqrt{k_p} + p_j k_p)LD(a + \frac{L}{2}))}{FSg(a+L)^2 x}$$

$q_{enf} N = 145,94 \text{ kPa}$

6. Determinación de la carga de soporte por enfilaje, para el sistema combinado.

$$q_{enf} = \frac{\left(\frac{2(FS_g \Sigma MA - \Sigma MR)}{FS_g (a+L)^2 x} \right)}{N} d = 2,77 \text{ kN / m}$$

7. Chequeo o verificación a flexión y cortante, para los enfilajes en el sistema de presoporte combinado:
- Chequeo a flexión:

$$M_{ult} = \frac{q_{enf} L^2}{10} = 10,78 \text{ kN.m}$$

$$M_R = w^p \frac{f_y}{\gamma_s} F_u = 11,52 \text{ kN.m}$$

$$M_{ult} \leq M_R \text{ Ok!}$$

- Chequeo a cortante:

$$V_{ult} = \frac{q_{enf} L}{2} = 8,65 \text{ kN}$$

$$V_R = \frac{2A_s f_y}{\sqrt{3\pi} \gamma_s} = 1415,5 \text{ kN}$$

$$V_{ult} \leq V_R \text{ Ok!}$$

8. Determinación de cantidad de pernos en fibra de vidrio.

Para un valor de $p_f = 100$ kPa y una resistencia a la tensión de 120 kN, se requiere la siguiente cantidad de pernos en fibra de vidrio:

$$\# \text{ de pernos} = \frac{p_f A}{\text{Carga unitaria de cada elemento (T; } T_{v-c}; T_{c-r})} = 54 \text{ Unid}$$

Como se puede observar, ambos procedimientos para el diseño de los elementos son completamente válidos, con valores iguales o muy similares de factores de seguridad, presiones de soporte y cantidad de elementos. No obstante, el uso de los ábacos facilita la estimación de los elementos de sostenimiento, puesto que simplifica mediante el análisis de sensibilidad los cálculos que hay que realizar, como por ejemplo la determinación de la cantidad de elementos que cumplan individualmente los chequeos estructurales a flexión y cortante.

ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

Como complemento a la metodología planteada mediante el método analítico, se realizó la modelación numérica del ejemplo utilizado en el capítulo anterior.

El objetivo fue evaluar las deformaciones y la zona de falla en la sección de avance de excavación del túnel, al igual que la efectividad del uso de los elementos de prerrefuerzo, con dos condiciones: sin considerar soporte y considerando sistema de prerrefuerzo.

La modelación se realizó mediante el *software* Phase 2D o RS2, utilizando dos tipos de modelos:

- Modelación de la sección transversal del túnel con un análisis de tipo Plain Strain y elementos finitos (FEM): Permite analizar las deformaciones en la clave del túnel.
- Modelación de la sección longitudinal del túnel: Permite, en forma gruesa o aproximada, analizar efectos de daño y deformaciones relativas en el frente de la excavación.

Si bien la modelación de la sección longitudinal es restringida puesto que no es un túnel infinito en el análisis tipo Plain Strain, se requiere experticia en su aplicación e implementación, donde es claro que se obtienen valores de deformación posiblemente más altos de los que se podrían obtener en la práctica. No obstante, este tipo de modelos facilita observar un orden aproximado de los fenómenos que se desarrollan durante la excavación en el frente, por ejemplo, formación de fallas de tipo chimenea o cavernas, así como zona plástica o de daño alrededor de la excavación.

Para la modelación se tomó el mismo ejercicio planteado con el método analítico, considerando las siguientes características y parámetros:

Diámetro de excavación de 9,0 m, cohesión $c = 60$ kPa y $\phi = 25^\circ$, longitud de avance de la excavación de 1,0 m, módulo de deformación = 80 MPa y presión suministrada por los pernos en fibra de vidrio de $p_f = 100$ kPa.

Los enfilajes se consideran como una capa de material mejorado por encima de la clave del túnel, y los pernos en fibra de vidrio se modelan como una carga distribuida aplicada en el frente de la sección longitudinal. La metodología empleada puede consultarse en el paper N.º 3, “Numerical modelling for shallow tunnels in weak rock”, de Hoek (2004) [2].

Resultados de la modelación de la sección transversal del túnel

Para la realización del modelo se consideró como presoporte el sistema de enfilajes, y como soporte, concreto

y arcos metálicos, tal como se describe a continuación (figura 12):

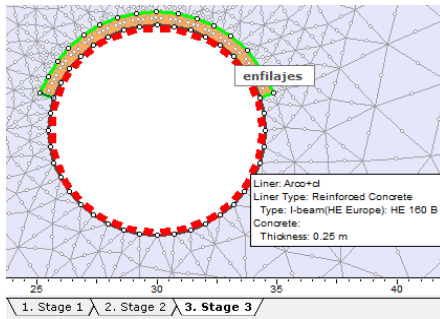
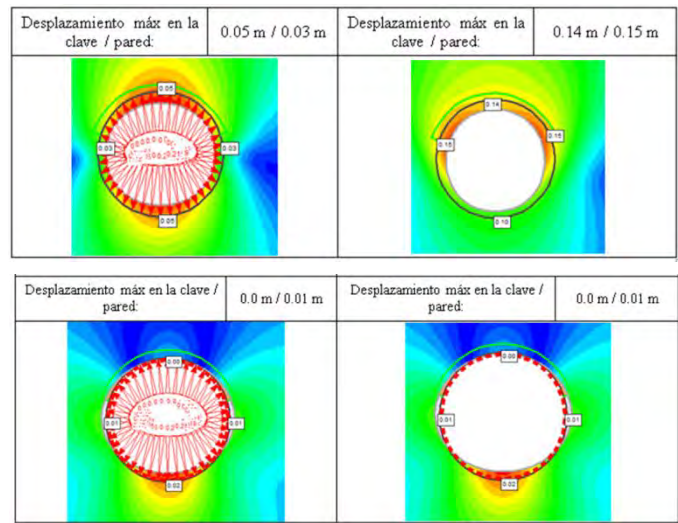


Figura 12. Modelo sección transversal del túnel.

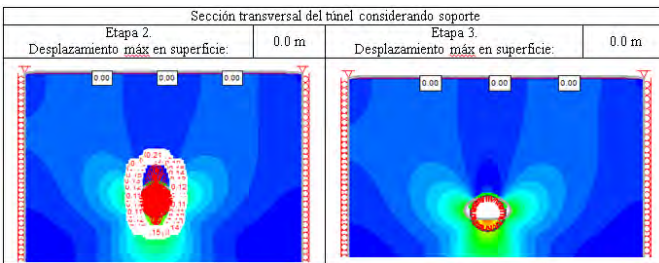
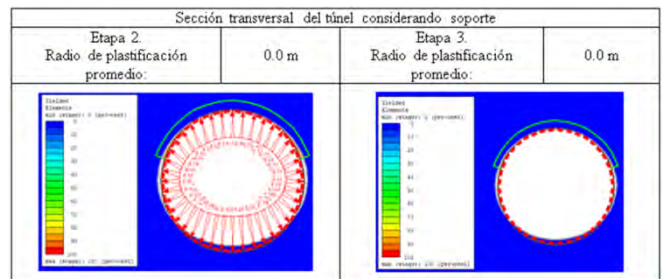
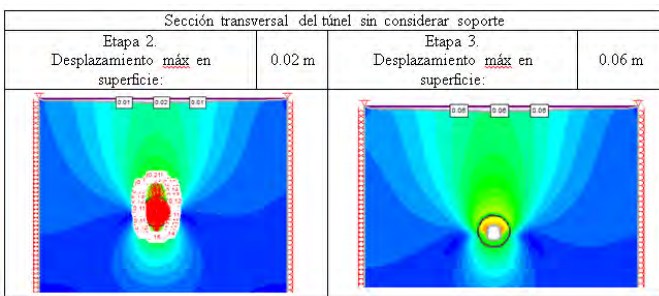
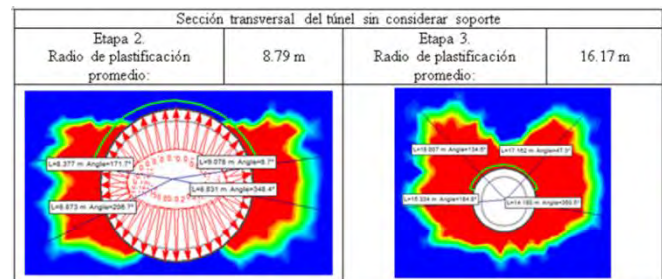
Fuente: Elaboración propia.

- Se estimó un concreto con resistencia a la compresión de $f'c = 30$ MPa, reforzado con fibra metálica de 35 kg/m^3 . Para contabilizar la fibra se hace una equivalencia y se incrementa el espesor del concreto en 5 cm, para un espesor total de 25 cm.
- Arcos metálicos tipo HEB 160, espaciados cada 50 cm.
- Deformaciones en superficie. Sin soporte y con soporte, y considerando una relajación de esfuerzos alrededor de la excavación del 30 % (figura izquierda) y 100 % (figura derecha).

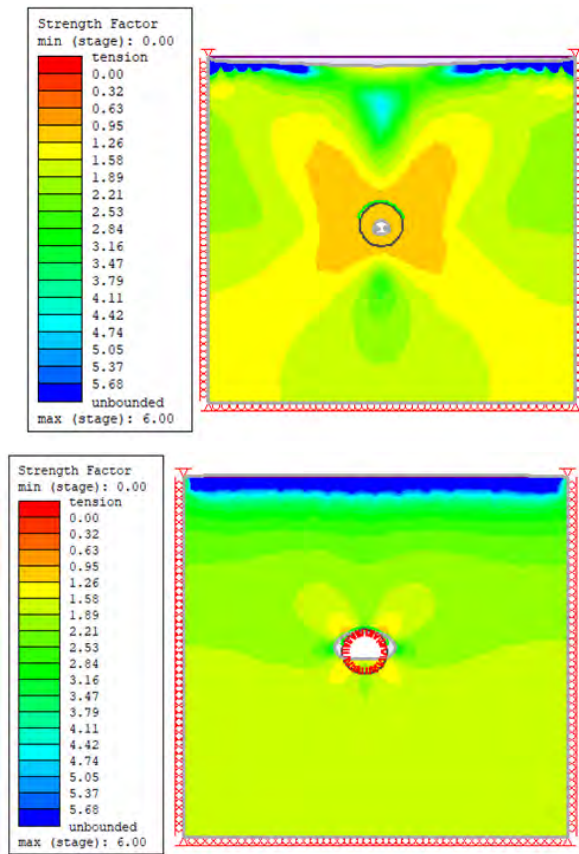
- Deformaciones alrededor de la sección del túnel.



- Zona de falla y plastificación:



- Factor de resistencia



De los resultados anteriores se concluye lo siguiente:

La utilización de un sistema de presoporte con enfilajes mejora considerablemente la estabilidad del frente de excavación. Con el ejemplo planteado se puede establecer que el efecto de los enfilajes reduce las deformaciones a valores despreciables. Cuando no se tiene un sistema de enfilajes, el material circundante a la excavación se desplaza hacia la cavidad del túnel, generando deformaciones que en el caso del ejemplo fueron del orden de 15 cm, lo que es inadmisibles para un túnel excavado en suelo.

De igual manera, se observa que la zona fallada en el caso sin soporte corresponde a un radio de plastificación del orden de 16 m, lo cual indica que el material que puede desprenderse con la excavación del túnel compromete la estabilidad total de éste, mientras que con la instalación de un sistema de presoporte no se presenta daño. La zona fallada se restringe principalmente en la bóveda, en la cual se observa un alivio total de la carga y la tendencia es a fallar hacia las paredes del

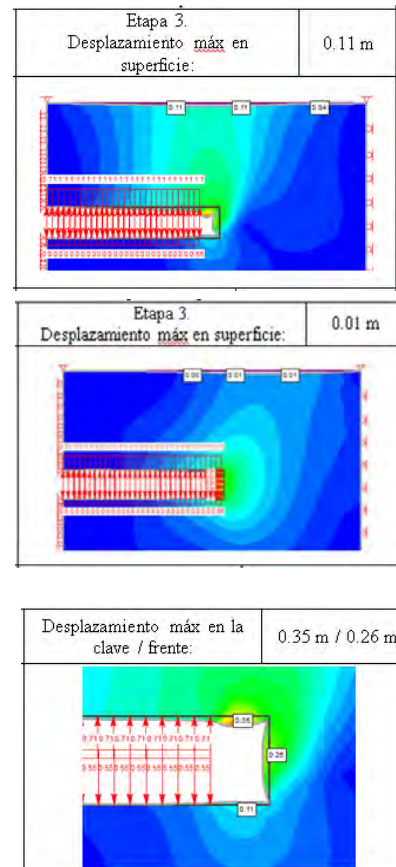
túnel. Sin embargo, para este ejemplo presentan valores de deformación relativamente despreciables.

Por otro lado, el factor de resistencia en la clave para una excavación con enfilajes se incrementa en un 50 % con respecto a la excavación sin soporte.

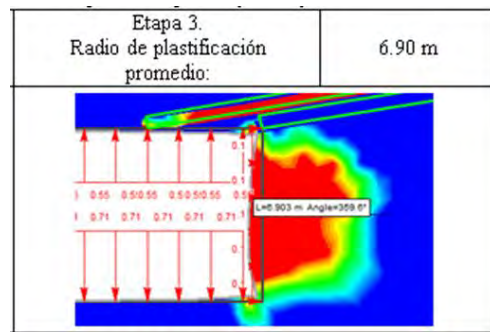
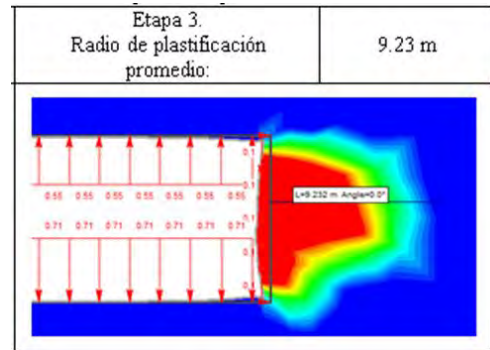
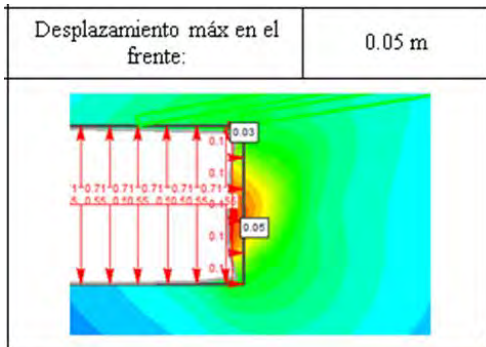
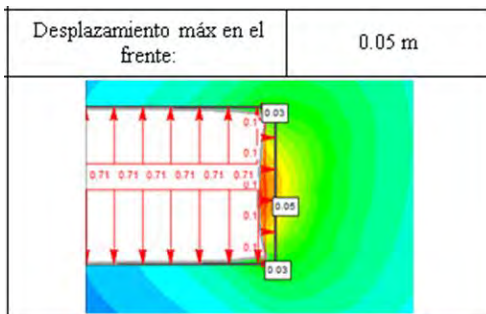
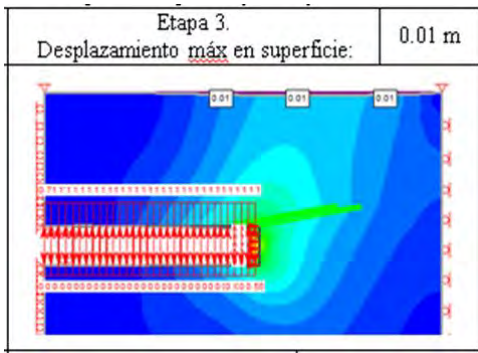
Resultados de la modelación de la sección longitudinal del túnel

Si bien esta metodología no es precisa, pues se separa de un verdadero análisis tipo Plain Strain, ya que el programa supone que el túnel es infinito, si aporta algunas conclusiones que ayudan a observar el efecto benéfico de los sistemas de presoporte. Para la modelación de la sección longitudinal se consideró inicialmente la excavación de la zona de avance sin soporte, y luego con un soporte mediante pernos en fibra de vidrio aplicados en la cara libre del frente de excavación. También se realizó un análisis con soporte con enfilajes y pernos al mismo tiempo.

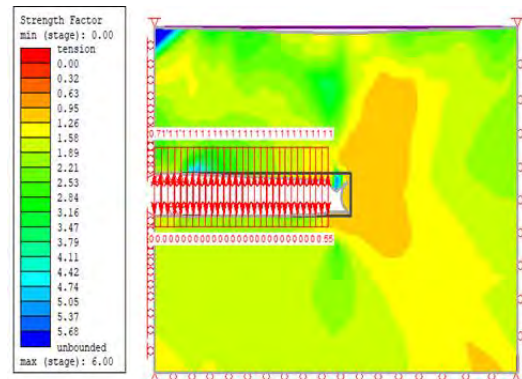
- Deformaciones o desplazamientos en superficie:



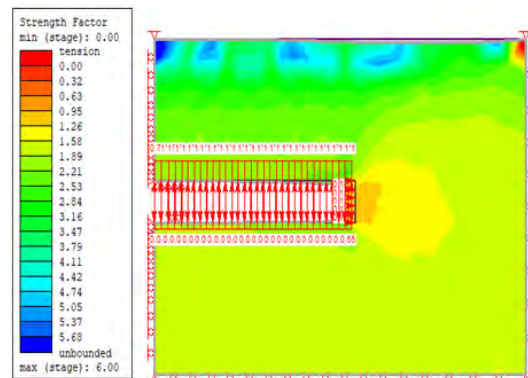
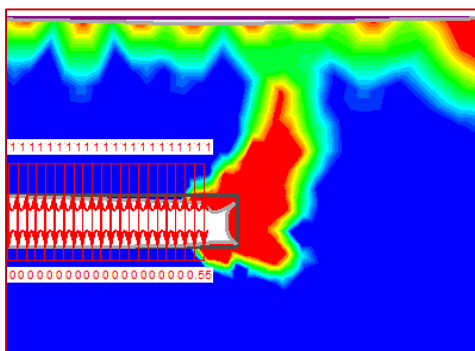
- Desplazamientos alrededor de la zona de avance

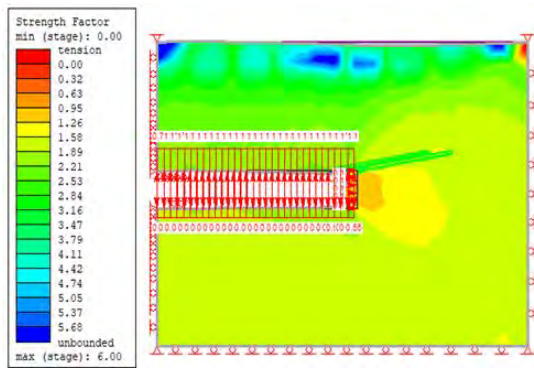


- Factor de resistencia



- Zona de falla y plastificación





De los resultados anteriores se concluye lo siguiente:

La utilización de un sistema de presoporte con enfilajes y pernos en fibra de vidrio mejora considerablemente la estabilidad del frente de la excavación, reduciendo las deformaciones en la clave y en el frente a valores despreciables o admisibles. Con el ejemplo realizado se observa que en el caso donde no se considera un sistema de presoporte, la zona de falla o de plastificación alcanza la superficie, formando una falla de tipo chimenea. Cuanto mayor es la longitud de avance sin soporte, mayor será el daño en el frente de excavación por extrusión. Por otro lado, se observa que al utilizar el sistema de presoporte combinado, la zona de falla se restringe principalmente en la clave del túnel donde se presenta un alivio de cargas, y los efectos de los elementos de presoporte en el frente de excavación limitan la expansión de la plastificación por encima de la cara del túnel. También se observó que el efecto chimenea desaparece, generando una zona de falla o plastificación local concentrada únicamente por delante del frente de excavación que luego se excava con el avance.

En cuanto a los desplazamientos, se observó que para la excavación sin soporte la perturbación del medio genera desplazamientos (asentamientos) en superficie que pueden llegar a ser importantes. En el caso modelado fueron del orden de 11 cm y en la clave y frente de 35 y 26 cm, respectivamente, cuyos desplazamientos se consideran inadmisibles para un túnel en suelo o roca blanda. Para el caso de la excavación utilizando el sistema de presoporte con pernos y enfilajes, se observa que los desplazamientos se reducen en un 80 y 90 % con respecto a los valores estimados con el modelo sin soporte.

CONCLUSIONES

Generales

- La excavación de túneles es un arte que requiere conocimiento, práctica y buen juicio ingenieril. Los materiales de suelo o roca muy descompuesta, con poca cohesión, o deleznable, presentan tendencia a generar grandes desplazamientos del frente de excavación y, consecuentemente, la posibilidad de falla de tipo chimenea o la formación de cavernas delante del frente, poniendo en peligro el avance de los túneles.
- Existen mecanismos previos al avance de excavación que ayudan a la estabilidad del terreno, como el caso del uso de enfilajes, pernos en fibra de vidrio e inyecciones.
- Los sistemas de prerrefuerzo son útiles en suelos de baja resistencia o roca muy descompuesta.

De las metodologías consultadas se puede concluir lo siguiente:

- Los métodos empíricos y analíticos existentes no permiten completar el diseño de los elementos de presoporte. Adicionalmente, éstos no consideran el diseño de un sistema de presostenimiento combinado.

Metodología planteada

- Con el ejercicio de aplicación de la metodología mediante el uso de ábacos y el uso de ecuaciones, se pudo establecer que ambos procedimientos para el diseño de los elementos son completamente válidos, con valores iguales o muy similares de factores de seguridad, presiones de soporte y cantidad de elementos. No obstante, la utilización de los ábacos de diseño facilita la estimación de los elementos de sostenimiento, puesto que simplifica los cálculos que hay que hacer mediante el análisis de sensibilidad, como por ejemplo la determinación de la cantidad de elementos necesarios para cumplir individualmente los chequeos estructurales a flexión y cortante.
- El uso de un sistema de presostenimiento en el frente de excavación incrementa el factor de seguridad del frente, garantizando la estabilidad temporal de la zona de avance. Así mismo, el uso de un sistema de prerrefuerzo combinado es más eficiente que un

sistema con sólo enfilajes, ya que permite optimizar la cantidad de enfilajes requeridos.

Modelación mediante elementos finitos

Modelación de la sección transversal

- Se observa que se mejora considerablemente la estabilidad del frente, reduciendo las deformaciones a valores admisibles y restringiendo la zona de falla, sobre todo en la bóveda.

Modelación de la sección longitudinal

- Se observa que al utilizar sistema de presoposte se restringe la zona de falla y se limita la expansión de la plastificación por encima de la cara del túnel, desapareciendo el efecto chimenea.
- Se genera una zona de falla o plastificación local, concentrada únicamente por delante del frente de excavación que luego se excava en la siguiente fase.

De los tipos de elementos utilizados para el presostenimiento, se puede concluir lo siguiente:

Enfilajes

- Soportan mediante flexión parte de la sobrecarga que reposa sobre la clave del túnel.
- Limitan la expansión de la plastificación por encima de la cara.
- Contribuyen a la protección del túnel contra la evolución de la falla tipo chimenea, común en suelos no cohesivos o rocas muy fracturadas.

Pernos en fibra de vidrio

- Proporcionan en el frente de avance un refuerzo constante de compresión o de confinamiento que reduce la extrusión en la cara del túnel.

Sistema combinado

- Limitan las deformaciones y las zonas de daño, y permiten optimizar en el diseño de los elementos, especialmente en los enfilajes.

RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES

- Existen algunos métodos de tipo semiempírico no presentados en esta investigación, que sólo pueden utilizarse a niveles de prefactibilidad de los proyec-

tos. En etapas de diseño de mayor detalle se deben realizar análisis complementarios con métodos más sofisticados, por ejemplo analíticos o numéricos, como lo que se ha planteado en esta investigación. En un diseño de ingeniería de detalle se deben hacer comprobaciones con métodos numéricos en 2D o 3D para revisar; desplazamientos o asentamientos, factores de seguridad del túnel, como de los elementos de sostenimiento, diagramas de capacidad estructural del sostenimiento, entre otros, y la integración de éstos con el revestimiento en concreto final para garantizar la estabilidad a largo plazo.

- La metodología propuesta no consideró el diseño del revestimiento para garantizar la estabilidad a largo plazo o permanente del túnel, puesto que el presoposte y el soporte dentro de la sección se encargan de estabilizar la obra. Se presume luego que vendrá un revestimiento en concreto para atender requerimientos propios de la operación de dichas obras y de esa manera se garantiza la estabilidad a largo plazo.

REFERENCIAS

- [1] Dywidag-Systems International (s.f.). dywidag-systems.com. Obtenido de <https://www.dywidag-systems.com/es.html>.
- [2] Hoek, E. (2004). *Numerical modelling for shallow tunnels in weak rock*.
- [3] Jiménez López, A. N. (2016). *Sistemas de presostenimiento para túneles en terrenos difíciles*. México.
- [4] Kavvas, M. (2005). *Numerical analysis in the design of urban tunnels*. Torino.
- [5] Karakus, M., & Fowell, R. (2004). An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM). Sivas, Turkiye.
- [6] Gutiérrez, R. (Ingetec) (2015, noviembre). Ingeniería de rocas: túneles - elementos de sostenimiento. Presentado en Cursos de maestría.
- [7] López Jimeno, C. (1997). *Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid: Entorno Gráfico, s.l.
- [8] Lunardi, P. (2008). *Design and construction of tunnels - Analysis of controlled deformation in rocks and soils (Adeco-RS)*. Italia: Springer.
- [9] Ministerio de Fomento (2005). Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera. España.
- [10] Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2016). Manual de diseño y construcción de túneles en carretera. México.
- [11] Sireg (s.f.). sireg.it. Obtenido de <http://www.sireg.it/es>.
- [12] Tamez González, E., Rangel Núñez, J., & Holguín, E. (1997). *Diseño geotécnico de túneles*. México: TGC Geotecnia.