



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

***“COMPARACIÓN NUMÉRICA DE MÉTODOS TRADICIONALES DE  
EXCAVACIÓN PARA TÚNELES EN DOS TIPOS DE SUELO”***

**TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

**P. C. I. ALEXIS MARCELINO CORNEJO RODRÍGUEZ**

**ASESOR: DRA. LUISA N. EQUIHUA ANGUIANO**

Morelia, Michoacán. Noviembre del 2019.

## RESUMEN

La elección del método de excavación de un túnel depende de varios factores dentro de los que destacan el tipo de terreno a excavar y su longitud, esto por mencionar algunos, realmente en campo se presentan muchas más situaciones que debemos de tener en cuenta a la hora de realizar la excavación, como bien se sabe el suelo es cambiante de un tramo a otro y es por eso que un método numérico únicamente nos ayuda a entender un poco el comportamiento del suelo. Hasta ahora la construcción de túneles carreteros en México se ha realizado con los métodos de excavación convencional con perforación y voladura utilizando explosivos y la excavación mecánica mediante máquinas de ataque puntual como rozadoras, martillos hidráulicos, etc. Otro método de excavación de túneles corresponde con la utilización de máquinas tuneladoras TBM (Tunnel Boring Machine), a la fecha en México no se ha construido ningún túnel carretero con este método. Es importante mencionar que cada método de excavación tiene ventajas y desventajas por lo que se deberá hacer un análisis y una evaluación de cada proyecto en particular, para determinar el más conveniente.

Una excavación de dimensiones pequeñas presenta menos problemas en cuanto a estabilidad del terreno que otro de mayor tamaño. Por lo tanto, si se excava una primera fase de dimensiones reducidas pero suficientes para que entren los equipos o bien pueda trabajar el personal para el caso de los métodos tradicionales, los problemas que puede dar el material serán menores y más fáciles de solucionar. Además al excavar las fases restantes, se habrán mapeado las zonas de mala calidad del macizo rocoso o del suelo, por lo que se podrán implementar el tipo de sostenimiento adecuado para cada caso (revestimiento).

La calidad del revestimiento debe de ser la adecuada para soportar la presión del suelo ejercida alrededor de toda la periferia del túnel, teniendo una buena caracterización del suelo se podrá lograr una buena interacción suelo-revestimiento.

## **ABSTRACT**

The choice of the method of excavation of a tunnel depends on several factors that include the type of land to be excavated and its length, to name a few, really in the field there are many more situations that we must take into account when to carry out the excavation, as the soil is well known, it is changing from one section to another and that is why a numerical method only helps us to understand the behavior of the soil a bit. Until now, the construction of highway tunnels in Mexico has been carried out with conventional excavation methods with drilling and blasting using explosives and mechanical excavation by means of point attack machines such as graders, hydraulic hammers, etc. Another tunnel excavation method corresponds to the use of TBM tunnel tunneling machines (Tunnel Boring Machine), to date in Mexico no road tunnel has been built with this method. It is important to mention that each excavation method has advantages and disadvantages, so an analysis and evaluation of each particular project should be done to determine the most convenient one.

An excavation of small dimensions presents less problems in terms of stability of the land than another one of greater size. Therefore, if a first phase of small dimensions is excavated but sufficient for the equipment to enter or the staff can work in the case of traditional methods, the problems that the material can give will be minor and easier to solve. In addition to digging the remaining phases, the poor quality areas of the rock massif or soil will have been mapped, so that the appropriate type of support for each case (coating) can be implemented.

The quality of the coating must be adequate to withstand the pressure of the soil exerted around the entire periphery of the tunnel, having a good characterization of the soil a good soil-coating interaction can be achieved.

## **PALABRAS CLAVE**

Túneles

Modelos numéricos

Mohr-Coulomb

Métodos de excavación

Mecánica de suelos

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco infinitamente el apoyo de mis padres, mis dos ejemplos a seguir, sin ellos esto no fuera posible, gracias por su apoyo condicional y constante, por todos los consejos y regaños que realmente valieron mucho la pena, mil gracias a mis hermanos: Fabi, Carlos e Iván que siempre estuvieron cuando lo necesite, a mi novia Rubí por su comprensión y apoyo.

Agradezco especialmente a la Doctora Luisa Nicté Equihua Anguiano de haber hecho posible este trabajo, su apoyo sin condición alguna en todos los sentidos, es una experiencia muy grata haber realizado mi trabajo de tesis con una persona que comparte con gusto un poco del vasto conocimiento que posee.

## ÍNDICE

OBJETIVOS .....	1
OBJETIVO GENERAL:.....	1
OBJETIVOS PARTICULARES: .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	2
2. TÚNELES: GENERALIDADES Y MÉTODOS DE EXCAVACIÓN .....	4
2.1. ANTECEDENTES DE LOS TÚNELES CARRETEROS EN MÉXICO .....	4
2.2. GENERALIDADES DE LOS TÚNELES .....	6
2.3. PROYECTO Y DISEÑO DE TÚNELES .....	8
2.4. PARÁMETROS DE DISEÑO DE TÚNELES.....	9
2.4.1. SUELOS .....	10
2.4.2. FACTORES PARA LA ELECCIÓN DEL REVESTIMIENTO DEL TÚNEL .....	12
2.4.3. DE ACUERDO A LA FUNCIONALIDAD DE LA OBRA: .....	12
3. METODOLOGÍA.....	14
3.1. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF) .....	14
3.2. MODELO DE RESISTENCIA MOHR-COULOMB .....	16
3.3. CURVA CARACTERÍSTICA .....	18
3.4. MÉTODOS DE EXCAVACIÓN TRADICIONALES PARA TÚNELES .....	20
3.4.1. Método Inglés .....	20
3.4.2. Método de la Galería de Clave o Método Belga .....	21
3.4.3. Método de las dos galerías o Método Austriaco .....	24
3.4.4. Método de las tres galerías o Método Alemán.....	26
3.4.5. Método Italiano.....	27
4. MODELOS ANALIZADOS .....	29
4.1. SELECCIÓN DEL TÚNEL DE ESTUDIO.....	29
4.2. TÚNEL DE LONGITUD MENOR A 500 M .....	31
4.3. PARÁMETROS DEL SUELO Y CONCRETO USADOS EN ESTE TRABAJO .....	33
4.4. CONDICIONES DE FRONTERA, MALLAS EN ELEMENTOS FINITOS Y PRESIÓN INTERNA....	35
5. RESULTADOS .....	38
5.1. OBTENCIÓN DE LA CURVAS CARACTERÍSTICAS EN ESTUDIO .....	38
5.2. METODO INGLES CON UN MÓDULO ELÁSTICO DE $E=20\ 000\ \text{kPa}$ .....	39

5.2.1.	MÉTODO INGLÉS SIN REVESTIMIENTO .....	39
5.2.2.	MÉTODO INGLÉS CON REVESTIMIENTO.....	44
5.3.	METODO BELGA CON UN MÓDULO ELÁSTICO DE 20000 kPa .....	52
5.3.1.	METODO BELGA PARA TERRENO POCO COMPETENTE CON UN MÓDULO ELÁSTICO DE 20000 kPa.....	57
5.3.2.	METODO BELGA PARA TERRENO POCO COMPETENTE (VARIABLE) CON UN MÓDULO ELÁSTICO DE 20000 kPa. ....	61
5.4.	METODO AUSTRIACO CON UN MÓDULO ELÁSTICO DE 20000 kPa. ....	66
5.5.	METODO ALEMÁN CON UN MÓDULO ELÁSTICO DE 20000 kPa.....	72
6.	CONCLUSIONES .....	78
	BIBLIOGRAFÍA.....	81

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL:**

Comparar los métodos tradicionales de excavación de túneles aplicados a un túnel carretero de México en dos tipos de suelo, usando modelaciones numéricas con elemento Finito (MEF).

### **OBJETIVOS PARTICULARES:**

- Estudiar los métodos tradicionales de excavación de túneles, para llevar a cabo un estudio de éstos.
- Modelar numéricamente los diferentes métodos típicos de excavación para túneles encontrados en la práctica, considerando dos tipos de suelo y una sección típica de un túnel carretero en México.
- Comparar y estudiar los resultados obtenidos en términos de la deformación, para determinar los efectos generados para cada método de excavación.
- Describir las ventajas y desventajas de cada modelo en función de los resultados numéricos.

## 1. INTRODUCCIÓN

La minería va de la mano con la construcción de los primeros túneles en el mundo, la mina que se conoce con más antigüedad data del año 40,000 a.C. y está ubicada en el cerro de Bomvu en Swazilandia (Africa). [1]. De esta mina se extraían hematitas, las que también son conocidas como piedra de sangre y eran la única herramienta del hombre de Neandertal. La técnica del fuego fue el primer método de excavación de minas, este método consiste en atacar el frente de excavación con fuego, para posteriormente arrojarle agua y así con un cambio brusco de temperatura, agrietar la roca para su posterior desgajamiento [1].

Posteriormente, la primera obra especificada como un túnel, data del año 2,200 a.C. y comunicaba el Palacio y el templo de Beloscon en Babilonia. Cabe mencionar que el inicio de los túneles realizados por un ingeniero y al que tenemos que hacer especial referencia es el de la Isla de Samos y que presenta un kilómetro de longitud de excavación, la que para la época era un logro monumental. El constructor al que se le atribuye esta obra es Opalinus de Megara, hijo de Naustrifo, y data del 530 a.C. Este túnel servía para abastecer de agua a la capital de la isla, funcionando durante mil años y fue considerada como una de las tres maravillas de mundo heleno [1].

Sin duda alguna la evolución de las técnicas de excavación ha ido mejorando conforme pasa el tiempo, y podemos clasificarlas desde los métodos tradicionales como lo es el Método Inglés, el Método Belga y el Método Austriaco por mencionar algunos, hasta los nuevos métodos de excavación basados en explosivos, o las famosas tuneladoras, que hoy en día son las más empleadas en la realización de la mayoría de los túneles debido a las longitudes y complejidad que estas obras han alcanzado a través del tiempo y de acuerdo al uso que a estas se les da. Antes de emplear cualquier método de excavación o utilizar cierta maquinaria, debemos de tener un conocimiento previo de todas las variantes que impactan a la obra. La principal y la que no debemos pasar por alto es el estudio geológico del terreno mediante el mapa geológico del material a excavar (suelo y/o roca), el que comprende, su estado físico, su consistencia y su grado de humedad (contenido

de agua), observando cómo se reparte a lo largo de todo el trazo, así como determinar su comportamiento antes y después de la excavación debido a que de ello depende el éxito y la disminución de los riesgos durante la construcción. Entre otras muchas variables que debemos determinar cómo es el proceso para la colocación del revestimiento y de la velocidad en el avance de la obra, se puede decir que los estudios geotécnicos son la clave para el diseño y la construcción de túneles. En general los métodos de diseño que rigen a los túneles están basados en procesos empíricos (p. ej [14] y [15]) y actualmente los métodos numéricos están siendo utilizados para tener un mejor diseño (p. ej [16] y [17]).

Con base a lo anterior, se llevó a cabo este trabajo de tesis, utilizando el programa RS2® [9], para que mediante el análisis usando los elementos finitos (MEF), se conozca con mayor precisión el comportamiento de diferentes tipos de suelo ante la excavación de un túnel típico carretero en México. Este estudio permitirá determinar los métodos más adecuados que se pueden utilizar en dos tipos de suelos con diferentes rigideces, de tal forma que nos agilice la toma de decisiones para el método adecuado en función del análisis de las deformaciones que se presentan en el terreno, permitiéndonos además prevenir las posibles fallas que se presentarán en función de los métodos de excavación estudiados en este trabajo. Se analizan las deformaciones usando ademe y sin ademe, con la finalidad de distinguir las zonas críticas durante las etapas de excavación propuesta por los métodos Inglés, Belga en todas sus variedades, Alemán y Austriaco. La importancia de este estudio se presenta debido a la relevancia de las vías terrestres para el desarrollo económico de nuestro país.

## **2. TÚNELES: GENERALIDADES Y MÉTODOS DE EXCAVACIÓN**

### **2.1. ANTECEDENTES DE LOS TÚNELES CARRETEROS EN MÉXICO**

Los primeros túneles de carretera que se construyeron en México fueron: el ubicado en la antigua carretera federal de México-Acapulco, que se encuentra en el Cañón del Zopilote y data de alrededor de 1930; un pequeño túnel en la carretera de Xilitla, San Luis Potosí, que unía esta población con el camino nacional México-Laredo y que fue inaugurado en 1936. Otro túnel que es muy corto es reconocido en la carretera de Cuetzalan, Puebla, el que fue destruido a finales de los años cincuenta y el mítico túnel de Ogarrio, inaugurado en 1901, el que funcionó inicialmente con tranvía hasta 1908 y luego con carretones tirados por bestias hasta 1950, hasta que dió paso a los primeros vehículos motorizados para conectar a la ciudad de Real de Catorce. Más recientemente se tiene registrada la construcción del túnel de acceso a la hidroeléctrica de Chicoasén (1979), con unos 600 m de longitud, el que fue excavado en roca caliza sin revestir [2].

A principios de los años 80's se construyó el túnel carretero del libramiento de la ciudad de Puerto Vallarta, el que cuenta con unos 450 m de longitud aproximadamente. Poco después se realizaron las primeras obras subterráneas de carretera realmente importantes de México; el verdadero inicio de la era de los Túneles Carreteros en nuestro país, puede datarse en esta misma década, con los túneles de la Autopista México-Toluca, aunque dicho inicio haya sido muy incipiente. Aquellas obras estuvieron ligadas a la construcción de las modernas autopistas de cuota que requirieron especificaciones rigurosas de trazo y en su construcción ya se aplicaron técnicas modernas de excavación, soporte, mediciones y análisis numéricos [2].

En años recientes, en un periodo de 6 años se planeó, proyectó y realizó la construcción de 69 túneles con una longitud total de 26.4 km, destacando las autopistas Durango-Mazatlán y México-Tuxpan [2]. Con lo que podemos

argumentar la importancia de entender adecuadamente los procesos constructivos de estas obras complejas y de gran importancia.

A partir de la construcción de la autopista Durango-Mazatlán, el cual era un proyecto carretero técnicamente complejo de la historia reciente de México, con sus 61 túneles, entre los diferentes retos, El Sinaloense de más de 2 kilómetros el único que cuenta con una galería de emergencia con salidas de conexión y equipado con todos los sistemas de seguridad, entendemos la evolución de estas obras en México y a su prioridad en las obras civiles. Esta obra, supuso un reto para la ingeniería mexicana, debido a las formaciones geológicas de la Sierra Madre Occidental en la que se ubica, al igual que por lo que significó en su momento la integración de técnicas de diseño, secciones geométricas y procedimientos constructivos.

Al tener en claro que, para llevar a cabo una buena construcción de túneles, se deben de tener en cuenta principalmente las condiciones del terreno (geotecnia) para poder hacer los estudios pertinentes del mismo, se fueron efectuaron adecuaciones y mejoras a los proyectos. A través del conocimiento de las condiciones geotécnicas del terreno es posible determinar cuál es el método o técnica adecuada, y seleccionarla de las distintas técnicas constructivas y de la maquinaria a emplear por las múltiples empresas contratistas involucradas. En ese sentido, los estudios previos del terreno son la clave de una buena construcción y no solo en México, si no en el mundo, ya que cada día con forme avanzamos en el tiempo se desarrollan nuevas tecnologías, las que deben implementarse gradualmente durante la construcción.

Actualmente se construye el proyecto vial denominado “Escénica Alternativa de Acapulco” que incluye el que será el túnel carretero más largo de México, cuya longitud es de 3,188 m y el que comunicará la bahía de Acapulco con la zona de Punta Diamante. Lo anterior muestra que la construcción de túneles en México es fundamental para las vías terrestres entre otras disciplinas y que es un área que debe seguir desarrollándose en nuestro país.

## 2.2. GENERALIDADES DE LOS TÚNELES

La construcción de túneles es una parte fundamental de la Ingeniería Civil, debido a que reduce el impacto ambiental tomando ventaja de espacios subterráneos [13]. Un túnel es la comunicación entre dos puntos ciegos, un túnel se diseña para favorecer el paso continuo y seguro de vehículos, materiales y/o personas a través de los obstáculos topográficos que impone la naturaleza al trazado del camino, siendo los más comunes las montañas, esto implica que, en la mayoría de los casos, los túneles de carretera atraviesan macizos rocosos al igual que suelos con diferentes tipos de rigidez.

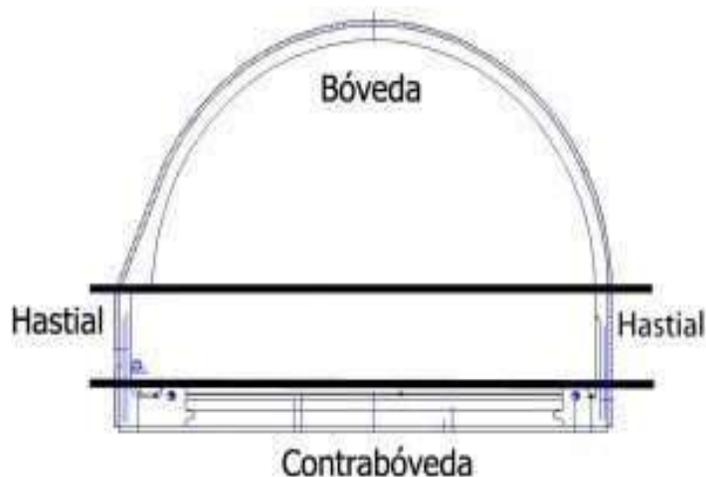


Figura 1.- Partes típicas que componen a un túnel [8].

Los túneles representan diferentes usos dentro de la ingeniería civil, drenaje, carreteras, vías férreas, conductos hidráulicos, etc. Su diseño además de seguro, cómodo y funcional, debe ser estético para que el usuario lo utilice sin temor. Un túnel carretero requiere de características geométricas particulares que obedecen a las necesidades del tráfico vehicular en lo que confiere al tema de este trabajo; sus excavaciones, de entre 100 y 140 m<sup>2</sup> de área, no son ni simples ni tienen la

forma y dimensiones convencionales que suelen adoptar otros túneles por ejemplo hidráulicos, ferroviarios, entre otros.

Un túnel debe de generar confianza al conductor y seguridad por lo que se debe garantizar que esto suceda del mismo modo. El proyecto de trazado de un túnel debe tomar en cuenta ciertas consideraciones importantes respecto a la visibilidad, como evitar su pérdida a la salida, ya que el cambio de las condiciones de luz dificulta la percepción de la vía, pudiendo causar que el conductor disminuya de forma abrupta la velocidad. Por tanto, es de suma importancia una buena coordinación entre la orientación del túnel y la iluminación [2].

La topografía es otro factor muy importante ya que de no tener bien esta parte del proyecto se pueden llegar a cometer errores geométricos que afecten la sección del túnel o bien movimientos de tierras inadecuados o innecesarios que implicaran mayor costo de la obra.



Figura 2. Túnel carretero de la autopista Durango-Mazatlán (Cortesía grupo OMEGA)

### 2.3. PROYECTO Y DISEÑO DE TÚNELES

Según el Manual de Diseño y Construcción de Túneles para Carreteras de la SCT, en su página 2, Diseño del Trazo y de la Sección Tipo del túnel [2]. Recomienda ciertos trazos según la longitud del túnel:

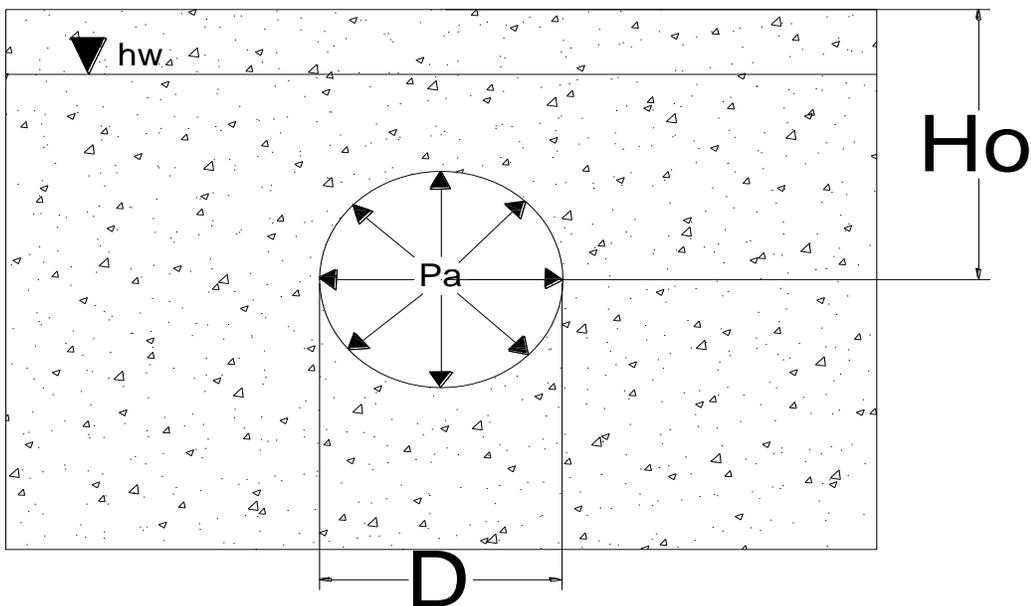
- a) En el caso de túneles cortos (longitud < 200 m), se recomienda que tengan un trazo en tangente: es conveniente que al entrar pueda verse la salida (la percepción de la luz natural al otro lado ayuda a no tener deslumbramientos) por las siguientes razones:
  - 1) El conductor percibe el cambio de condiciones brevemente (200 m a 80-90 km/h = 7 s).
  - 2) El conductor puede percibir la existencia de objetos en la calzada por contraste.
  
- b) Si el túnel es más o menos largo (1,000 a 1,500 m), es importante disponer de curvas en las bocas para evitar el deslumbramiento, facilitando una transición adecuada de las condiciones de luz.
  
- c) Para túneles de más de 1,500 m de longitud, se recomienda disponer de curvas de radios amplios para facilitar una adecuada distancia de visibilidad.
  
- d) Para el diseño del alineamiento vertical del túnel, deben tomarse en cuenta las siguientes consideraciones:
  - 1) Una primera condición para un buen alineamiento vertical del túnel es el drenaje, por lo que debe asegurarse una pendiente mínima de 0.5% para desalojar adecuadamente el agua que pueda recibir el túnel.

- 2) Se requiere una pendiente mínima para drenar las aguas procedentes del macizo rocoso que son captadas por el sistema de impermeabilización y conducidas por el colector del túnel hacia el drenaje exterior.
- 3) Evitar curvas verticales, tanto convexas muy pronunciadas que no permitan la visibilidad, como cóncavas que provoquen puntos bajos que obliguen a requerir equipos de bombeo para desalojar el agua acumulada.
- 4) Es conveniente contar con una pendiente longitudinal (entre 2 y 5 %) en túneles bidireccionales, mientras que, en unidireccionales, ascendente menor al 2% y descendente menor al 5%.
- 5) Ventilación natural en caso de túneles cortos y, pendientes adecuadas para favorecer un óptimo funcionamiento de la ventilación de los túneles que lo requieran.
- 6) Tipo y composición de vehículos que circularán.

#### **2.4. PARÁMETROS DE DISEÑO DE TÚNELES**

Entre los factores más importantes a considerar en el diseño, se encuentran los siguientes parámetros:

- a) Profundidad y diámetro del túnel ( $H_0$ ,  $D$ )
- b) Peso volumétrico de los diferentes estratos ( $\gamma$ )
- c) Posición del nivel piezómetro a la profundidad del túnel ( $h_w$ )
- d) Angulo de fricción interna y cohesión del material geotécnico ( $\phi$ ,  $c$ )
- e) Módulo de elasticidad del suelo ( $E$ )
- f) Factor de resistencia (parámetro empírico que depende de las características mecánicas de las formaciones)
- g) Presión interna en el túnel  $P_a$



*Imagen 3. Características de la sección de un túnel.*

### 2.4.1. SUELOS

Según el libro de Cimentaciones y Túneles de P. Galabru (1965) [4]. El cual hace referencia a una clasificación de los suelos de acuerdo al grado de las dificultades especialmente en cuanto a la estibación del túnel, e indicando los métodos de perforación las variedades del suelo se pueden clasificar como sigue:

**PRIMERA CATEGORIA.** Roca que exige el empleo de explosivos. Esta categoría va desde la roca dura e intacta que permite el ataque a gran sección sin entibación, a la roca inestable que hace necesaria ésta.

**SEGUNDA CATEGORIA.** Buen terreno extraído sin explosivos, que permite la ejecución de 1 a 3 m de galería de sección adecuada sin entibación. Entran en esta categoría las arcillas duras, las tierras compactas, las areniscas, las arenas y gravas aglomeradas y las pudingas

**TERCERA CATEGORIA.** Terreno medio o mediocre, en el que el techo de una galería de sección adecuada puede mantenerse algunos minutos y los laterales y

el frente de ataque una hora aproximadamente. Tal es el caso de las arcillas consistentes, la tierra seca, la grava aglomerada y ciertas rocas dislocadas.

CUARTA CATEGORIA. Mal terreno, en el que el techo de las galerías de sección adecuada debe apuntalarse a medida que se avanza, resistiendo los laterales algunos minutos. Tal es el caso de las arcillas blandas o que se expanden al aire, las arenas húmedas, gravas o tierras vegetales sin gran cohesión, roca descompuesta o gravas.

QUINTA CATEGORIA. Terrenos sueltos, como arenas o gravas en los que no se puede progresar en sección pequeña más que al abrigo del blindaje continuo tanto en el frente como en el techo y muros laterales. Cuando se trata de arenas finas saturadas de agua, de arcillas blandas o de venidas de agua importantes, se imponen métodos especiales.

Una forma general de clasificar al suelo es en base a su módulo de elasticidad (E) ya que este define que tanto se deforma el suelo en base al esfuerzo que se le aplique, el E tiene el mismo valor para una tensión que para una compresión y actúa como una constante independiente del esfuerzo siempre y cuando no exceda el límite plástico, en esta investigación se presentan dos tipos de suelos, esto quiere decir dos rigideces diferentes que representan un suelo con las características del suelo de la Ciudad de Morelia Michoacán con una cohesión y ángulo de fricción iguales.

Tabla 1. Clasificación de los suelos de acuerdo a su módulo de elasticidad [3].

CONSISTENCIA	MODULO DE ELASTICIDAD ( Mpa)	MODULO DE ESLASTICIDAD (Ton/m <sup>2</sup> )
Muy blanda	< 2.5	< 254.929
Blanda	2.5 a 5	254.929 a 509.858
Media	5 a 10	509.858 a 1019.716
Rígida	10 a 20	1019.716 a 2039.432
Muy rígida	20 a 40	2039.432 a 4078.864
Dura	< 40	> 4078.864

#### 2.4.2. FACTORES PARA LA ELECCIÓN DEL REVESTIMIENTO DEL TÚNEL

Existen factores que debemos de considerar a la hora de revestir el túnel:

**Geológicos:** se relacionan con la litología (suelos, rocas y sus diferentes tipologías); la estructura (estratigrafía, naturaleza de las discontinuidades, estructuras geológicas mayores como fallas, plegamientos, etc.), la composición química del terreno (suelos o rocas expansivas, minerales agresivos para las estructuras, etc.); el tectonismo y la geohidrología del sitio, entre otros [2].

**Topográficos:** representan las condiciones de frontera de la obra y en muchas ocasiones determinan de manera muy importante las soluciones constructivas y estructurales; túneles urbanos con estructuras superficiales cercanas, túneles en montaña con terrenos accidentados o condiciones de superficie desfavorables, túneles profundos con problemas de grandes presiones de roca, etc. [2].

**Geotécnicos:** tiene relación con la resistencia de los materiales, su deformabilidad, los posibles modos de falla o rotura (si son estructuralmente controlados o regidos por grandes deformaciones y/o esfuerzos); en roca, la naturaleza y las condiciones de las discontinuidades; en suelos, la permeabilidad, grado de saturación, consolidación (si es el caso), la propia consistencia (granulares, finos, etc.) [2].

#### 2.4.3. DE ACUERDO A LA FUNCIONALIDAD DE LA OBRA:

**Tipo de carretera:** implica volumen de tránsito, dimensiones de la calzada, velocidad de proyecto, trazado, señalización, niveles de seguridad necesarios, etc. [2].

**Instalaciones:** por un lado, están las electromecánicas (iluminación, ventilación, sistemas de control para seguridad, etc.) y por otro las de emergencia (incendio, telefonía, salidas y bahías de emergencia, etc.) [2].

Todo lo anterior se toma en cuenta para el revestimiento del túnel, ya que en base a esto y sus posibles combinaciones se deberá de elegir el tipo de acabado, si se coloca concreto hidráulico simple o armado o lo que se realiza actualmente, el concreto lanzado, aunque por algunas cuestiones estéticas no se emplea para ciertos casos. Para el revestimiento, lo que se busca es emplear un material que resista las condiciones del suelo a revestir, al igual que después de colocado se le pueda brindar un adecuado y fácil mantenimiento, en ocasiones el concreto lanzado genera cierta inseguridad al conductor.

La función principal de un revestimiento es mantener la estabilidad de la excavación, esto mediante un factor de seguridad adecuado permitiendo que el terreno alcance un valor de equilibrio admisible y que este se mantenga constante a lo largo del tiempo.

Para saber la presión necesaria que debe de llevar el ademe, se sigue un criterio al que se le conoce como Curva Característica, en el cual se realiza la interacción del sistema medio-revestimiento, esto se realiza con la única finalidad de que la excavación no colapse, funcionando como un sistema de apuntalamiento tomando en cuenta la presión crítica de toda la excavación y también una deformación inicial del suelo generada al momento de la excavación y antes de poner el ademe (ver gráficas 1 y 2), tiempo en el que se genera la deformación total y la que es tomada por el sistema de ademe y/o revestimiento [2].

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)**

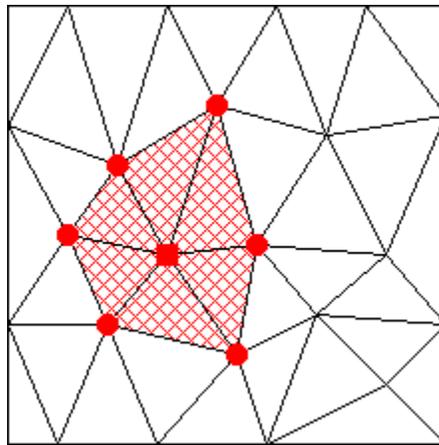
Un modelo de cálculo es una representación matemática de la realidad de un sistema estructural; es una forma de simular los elementos que intervienen en la respuesta general de una estructura y en su interacción con el terreno. Las relaciones matemáticas entre los componentes del modelo deben representar de manera realista las existentes entre las diferentes entidades o aspectos del sistema real. Una vez representado el sistema en forma de modelo, pueden aplicarse las herramientas matemáticas para deducir o predecir su comportamiento. El éxito o fracaso depende de la precisión con la que se construya esta representación y la fidelidad con la que se concreten hechos y situaciones naturales en forma de variables relacionadas entre sí. La geometría de estos modelos puede estar definida en dos (2D) o tres dimensiones (3D). Los modelos pueden considerar la respuesta estática o dinámica de un sistema y pueden incluir propiedades físicas, elásticas, resistentes, hidráulicas y térmicas, entre otras [2].

Los métodos de cálculo en ingeniería y en especial en el ámbito de la geotecnia no dejan de ser solo aproximaciones y los resultados que con éstos se concretan dependen de forma muy importante de la selección de los parámetros que rigen el comportamiento mecánico de los materiales, así como de la correcta modelización de los distintos eventos que ocurren en el transcurso de la obra [2].

Los modelos numéricos nos permiten inducir comportamientos reales del suelo dependiendo del diseño de las obras geotécnicas, de la clasificación y la buena caracterización del suelo, lo que nos permite elegir el modelo constitutivo adecuado que emule la realidad.

El (MEF) FEM se puede describir sencillamente en tres partes:

- a) Discretización del continuo: esto es que tan caracterizado y dividido este el modelo y por lo tanto es más preciso, mediante el uso de nodos.
   
 (i, j, k)
- b) Funciones de forma: en esta parte nos interesamos por los campos de desplazamiento, que son problemas de elasticidad, elastoplasticidad, etc.
- c) Ensamble y solución, considerando la distribución de cada uno de los elementos se obtiene una ecuación global, la cual se basa en el método de las rigideces.



*Imagen 4. Caracterización del medio mediante nodos.*

$$[K]\{\delta\} = \{F\} \tag{1}$$

En donde:

[K]= matriz de rigideces

{δ}= vector de desplazamientos

{F}= vector de fuerzas aplicadas al modelo

RS2® es un programa para el análisis geotécnico en estructuras y aplica tanto en rocas como en suelos, se utiliza en excavaciones subterráneas, diseño de cimentaciones, terraplenes, consolidación, etc. [7]. El método de elemento finito tiene diferentes aplicaciones y aunque su metodología es numérica, podemos obtener resultados adecuados que nos acerquen a la realidad del comportamiento de algún material (p. ej [18] y [19]).

El método de elementos finitos (FEM) se basa en una técnica numérica muy general para la solución de problemas geotécnicos y fenómenos físicos de ingeniería, esta herramienta nos da cabida a situaciones en las cuales el nivel de complejidad es tal que su solución analítica es difícil de obtener [10].

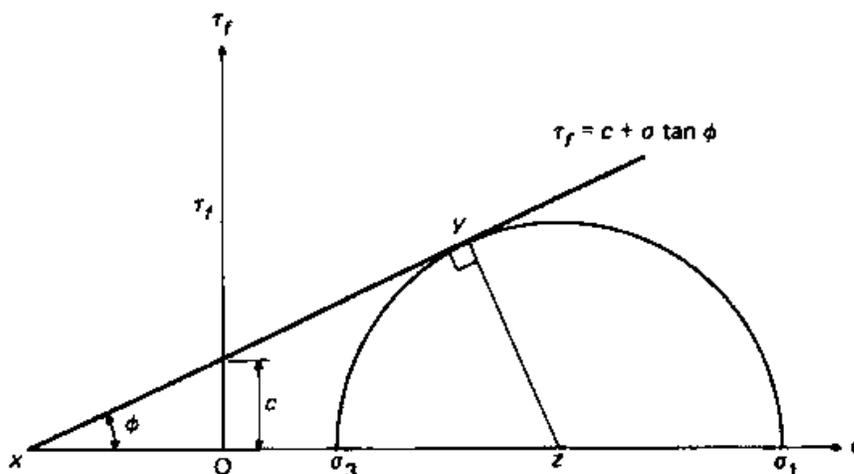
Por otro lado la selección de la malla en RS2® es definitiva para los resultados que obtendremos, de tal modo que tendremos mayor precisión a la hora de determinar el comportamiento del terreno, al subdividir un cuerpo continuo con una mayor cantidad de elementos finitos interconectados entre sí, obtendremos las mismas condiciones de equilibrio de fuerzas y compatibilidad de desplazamientos, por lo tanto haremos más precisos los procedimientos de cálculo, esta precisión se verá reflejada en el número de nodos que le demos a nuestra malla.

FEM es en general un método que divide a una estructura por medio de una malla de elementos finitos divididos y caracterizados del mismo modo. A los cuales los describen ciertas ecuaciones llamados modelos constitutivos como lo es el de Mohr-Coulomb y que fue el utilizado en este trabajo de tesis.

### **3.2. MODELO DE RESISTENCIA MOHR-COULOMB**

Esta teoría afirma que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, en si no existe una definición general del concepto de falla, se podría definir como el principio del comportamiento inelástico del material o bien el momento de ruptura del mismo [11].

Para la modelación de suelos y para el caso de algunos materiales más estables pueden utilizarse modelos cohesivos-friccionantes usando la teoría de Mohr-Coulomb. Un suelo cohesivo-friccionante ( $c - \phi$ ) que es el caso a estudiar para este trabajo, es un suelo que contiene pequeñas partículas y su interacción físico-química para que el suelo se adhiera a sí mismo, por su parte un suelo granular está compuesto por gravas y arenas que son partículas gruesas y las cuales no presentan cohesión ( $c$ ).



*Imagen 5. Envolvente de falla de Mohr-Coulomb.*

La ecuación que describe la superficie de falla del modelo de Mohr-Coulomb, está dada por:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi \quad (2)$$

En donde:

$\tau$ = resistencia al esfuerzo cortante

$\sigma$ = esfuerzo normal

$\phi$ = ángulo de fricción interna del suelo



Se puede apreciar en la gráfica 1 que el punto E en el que se interceptan (cruzan) la respuesta del revestimiento y la del suelo, es el punto en el que se alcanza el equilibrio de la presión radial que se está desarrollando en el terreno excavado y que es el momento en el que debe estabilizarse el sistema suelo-revestimiento, para su condición de equilibrio bidimensional final y de acuerdo a la teoría de la Curva-Characterística [4].

La presión en la periferia del túnel inicialmente es la geoestática ( $\gamma \cdot H_0$ , siendo  $\gamma$  el peso volumétrico del material y  $H_0$  la profundidad del eje del túnel) y desciende a medida que se desarrolla el desplazamiento radial; en principio de manera lineal, lo que corresponde al comportamiento elástico-lineal del medio, y posteriormente no-lineal a partir del punto L, lo cual se atribuye a la formación de zonas plásticas alrededor del túnel. La otra curva muestra el correspondiente comportamiento del revestimiento opuesto al del medio; es decir, a medida que el desplazamiento radial de la periferia del túnel se incrementa, el revestimiento recibe mayor carga. Precisamente este efecto caracteriza la interacción medio-soporte; es decir, la relajación del medio generada por la excavación del túnel la toma el sistema medio-soporte con base en sus rigideces [12].

La estabilidad de excavación de un túnel depende de tres factores:

1. Calidad del macizo rocoso (suelo).
2. Tipo de soporte (revestimiento).
3. Procedimiento constructivo (método).

Llevando a cabo el estudio minucioso de estos tres factores sin desligarlos uno del otro, se lleva a cabo un buen diseño de la obra.

### **3.4. MÉTODOS DE EXCAVACIÓN TRADICIONALES PARA TÚNELES**

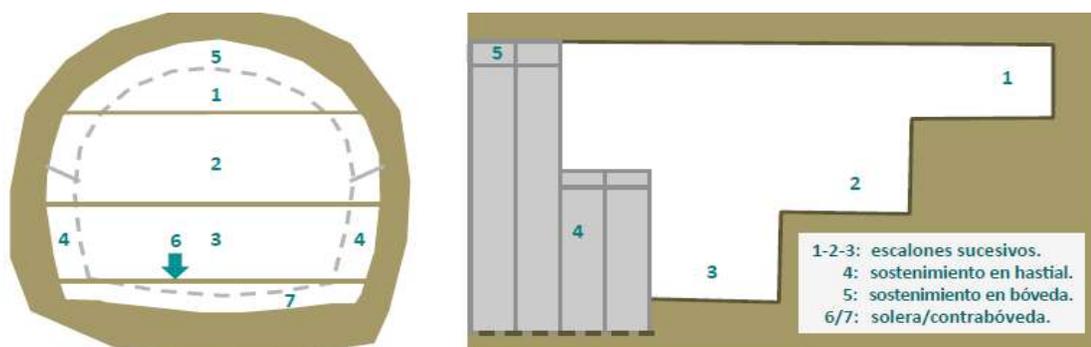
#### **3.4.1. Método Inglés**

También llamado método de plena sección, estos túneles son inferiores a los 15m<sup>2</sup>, los túneles más importantes pueden atacarse a sección plena para terrenos de segunda categoría y, naturalmente en roca (primera categoría) (Ver sección anterior), en algunos casos se puede atacar a plena sección realizando la excavación en toda la anchura del túnel, pero con varios escalones de ataque [4].

La excavación se realiza por franjas horizontales, comenzando por la parte superior del túnel, pero la evacuación definitiva a nivel el piso inferior, requiere de varias actuaciones (ver Imagen 1).

Este método es más fácil para los obreros que realizan la excavación, ya que da más espacio que en las galerías estrechas de los demás métodos tradicionales.

Este método se vuelve muy práctico en roca franca, cuando no se necesita revestir, sin embargo, cuando el terreno exige revestimiento (terrenos de segunda categoría en general), la situación se complica y en este caso el revestimiento se realiza por etapas [4].



*Imagen 6. Sección tipo de excavación para la construcción de túneles usando el Método Inglés [8].*

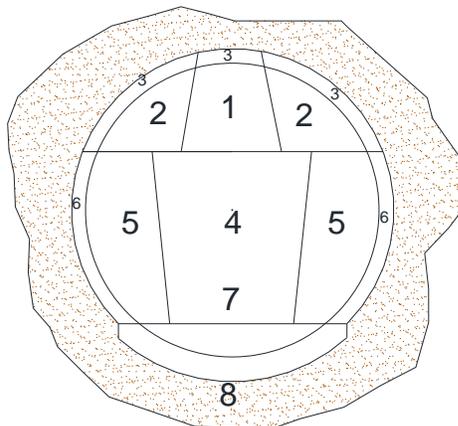
### 3.4.2. Método de la Galería de Clave o Método Belga

Tiene dos formas de realizarse que corresponden a terreno bueno y terreno malo respectivamente.

#### a) Caso terreno competente

Se ataca el túnel en galería de avance de pequeña sección en el eje del túnel y en la parte superior. El ancho de esta galería va de 2.5 a 3 m, una altura de 2 a 4 m y su sección de 5 a 12 m<sup>2</sup>. Se construye la primera galería a nivel de la bóveda, ya después se va ensanchando de derecha a izquierda o viceversa. La Imagen 2 presenta el esquema de cómo se debe desarrollar la excavación del túnel [4].

- Se construye la bóveda, si el terreno es competente se hace descansar directamente sobre él, en caso de que el terreno sea menos competente, se colocan tablonces longitudinales para que así repartan las presiones.
- Cuando la bóveda ha compactado se quitan los puntales y el encofrado.
- Se comienza a excavar la parte inferior del túnel excavado, prácticamente es una zanja central que se reviste temporalmente en caso de ser necesario.
- Se comienza a excavar hacia los costados de la cuneta de derecha a izquierda alternativamente, en longitudes pequeñas de 4 a 6 m [4].



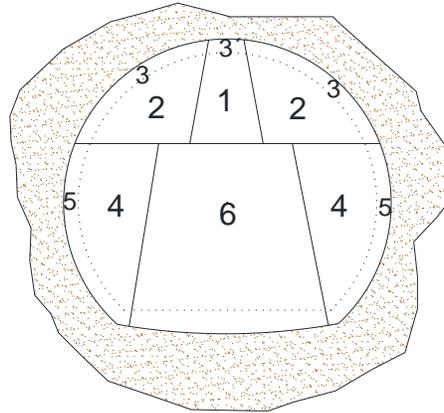
*Imagen 7. Método de la Galería para terrenos buenos [4].*

Dónde:

1. Galería de coronación
2. Excavación de la bóveda
3. Bóveda
4. Destroza
5. Zona de los muros
6. Muros
- 7 Y 8. Solera (eventualmente)

#### **b) Caso de terreno poco competente**

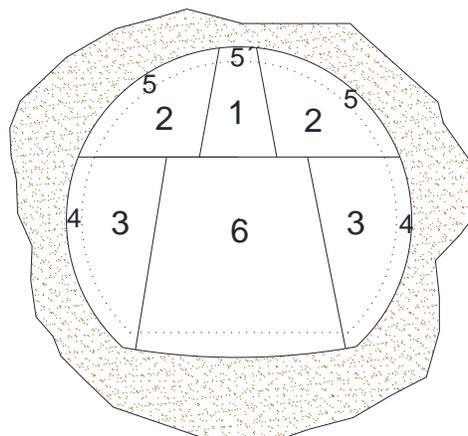
Cuando el terreno es de poca resistencia y es necesario el revestimiento (tercera y cuarta categoría) lo único que se tiene que hacer es cambiar el método de excavación de las destroza y la construcción de los muros, de lo contrario la bóveda sufrirá asentamientos durante la construcción de la zanja y de la destroza (ver Imagen 5).



*Imagen 8. Método de la galería de clave en mal terreno [4].*

Dónde:

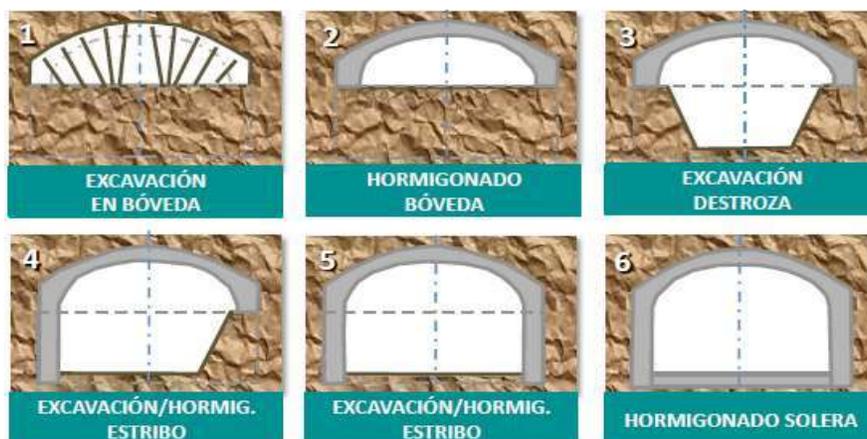
1. Galería de clave
2. Ensanches de la bóveda
3. Bóveda
4. Excavación de los muros
5. Muros
6. Destroza y solera eventualmente



*Imagen 9. Método de la galería de clave en terreno poco competente (variable) [4].*

Dónde:

1. Galería de clave
2. Excavación de la bóveda
3. Excavación de los muros
4. Muros
5. Bóveda
6. Destroza, y solera (eventualmente)

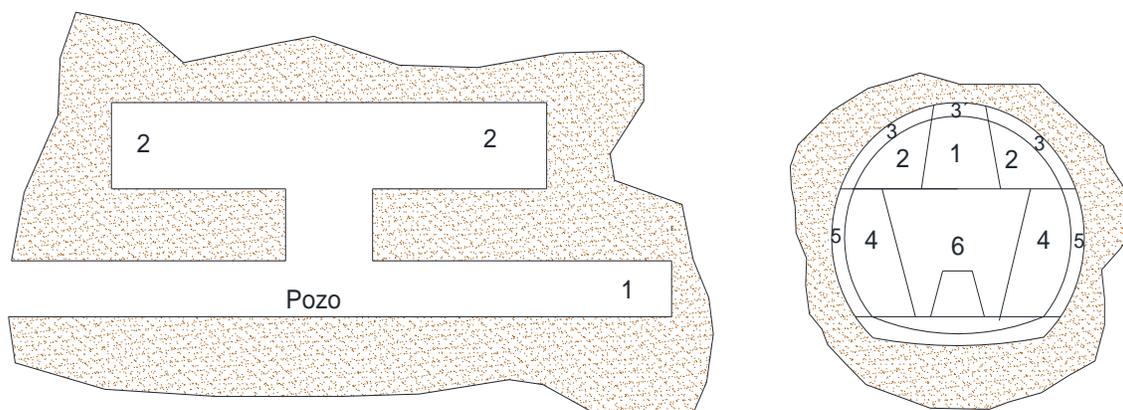


*Imagen 10. Proceso de excavación del Método Belga [9].*

### 3.4.3. Método de las dos galerías o Método Austriaco

El método emplea una galería de avance en el eje del túnel y en ella se realiza una vía de evacuación que se utiliza durante toda la obra. Cuando se ha avanzado con la galería hasta cierta longitud, se sube verticalmente con un pozo hacia la clave del túnel atacando posteriormente una segunda galería por encima de la primera y realizando la excavación hacia delante y hacia atrás (ver imagen 8). Ya que esta perforada la galería de clave el proceso se realiza como el Método Belga: bóveda, destroza, excavación de los muros y construcción del revestimiento de

éstos. Las imágenes 11 y 12 presentan la secuencia de excavación para llevarse a cabo en el Método Austriaco según sea el caso.

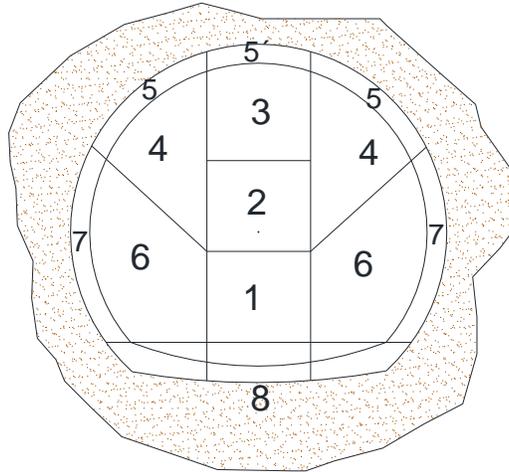


*Imagen 11. Secuencia de excavación de las dos Galerías [4].*

*Dónde:*

1. Galería de base
2. Galería de coronación
3. Excavación de la bóveda
4. Y 4". Bóveda
5. Destroza
6. Excavación de los muros
7. Muros
8. Solera (eventualmente)

O bien puede evitarse la perforación de la segunda galería de clave, realizando un corte de clave elevado en dos etapas de la galería de base como lo indica la imagen 12.



*Imagen 12. Método de las dos Galerías realizando un corte de clave elevado en dos etapas de la galería de base [4].*

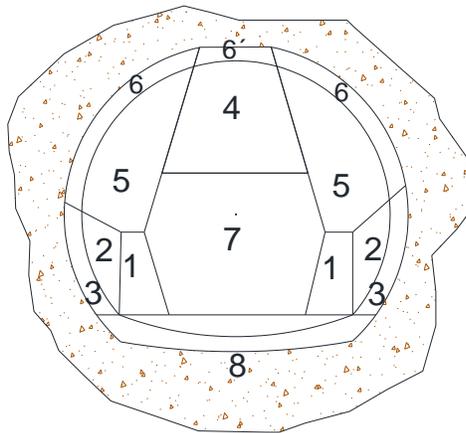
Dónde:

1. Galería de avance
2. Y 3. Corte de clave
4. Excavaciones de riñones
5. Y 5". Bóveda
6. Destroza
7. Muros
8. Solera (eventualmente)

#### **3.4.4. Método de las tres galerías o Método Alemán**

En este método se conserva la destroza hasta la terminación de los muros y de la bóveda, esta sirve de apoyo para todos los puntales encargados de sostener el túnel, de la misma forma evita el empleo de andamios. Para utilizar este método es necesario que la sección de túnel tenga un área de excavación superior a 50 m<sup>2</sup>, se atacan dos galerías de la base a derecha e izquierda del túnel,

posteriormente se ensanchan y se construyen los muros, si se da el caso de que sea un terreno poco competente los muros se construyen apuntalados con la destroza.



*Imagen 13. Método de las tres galerías o Método Alemán [4].*

### 3.4.5. Método Italiano

Es muy similar al Método Belga, solo hay una pequeña diferencia, que lo último a ejecutar son los muros.

En base a la experiencia que se ha obtenido a lo largo de tiempo realizando las excavaciones para túneles empleando los diferentes tipos de métodos a estudiar en este trabajo, se puede decir que es raro poder utilizar el Método Inglés con ataque a plena sección en túneles de grandes dimensiones, pero cuando es posible emplearlo, este método que no exige el trabajo en galerías de sección reducida, es el más económico y rápido. Por su parte el Método Belga que no exige más que una galería de coronación, y el austriaco que exige además una galería de base cómoda para la evacuación de los escombros, pueden utilizarse en la mayoría de los terrenos. El Método Austriaco es más costoso que el Belga, pero es más rápido, pues permite la multiplicación de los tajos de coronación y

bóveda. El Método Alemán con sus tres galerías de avance, es aún más costoso, pero es seguro en terrenos con malas características [4].

En esta investigación no se pretende estimar cual es más caro o más barato, ni cual método se realiza con mayor rapidez, lo que realmente se pretende es observar de manera numérica mediante el uso de elemento finito (FEM) en el programa RS2®, el comportamiento del suelo ante la simulación de excavación que exigen los diferentes métodos, y así observar a lo largo del proceso de excavación de cada método cómo se comporta el suelo y que parte del túnel se ve más afectada (bóveda, contra-bóveda, hastiales), tanto para suelo malo como para suelo medio y poder dejar en claro que método es el más adecuado para cada uno de estos dos tipos de suelo estudiados.

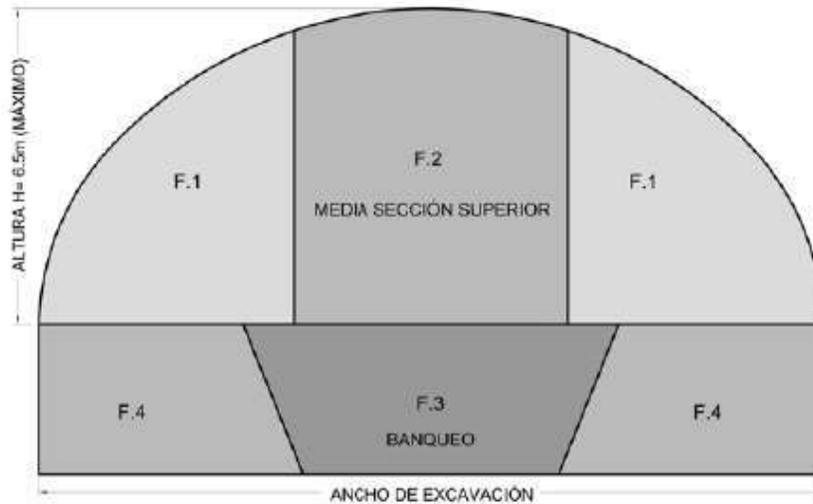
## **4. MODELOS ANALIZADOS**

### **4.1. SELECCIÓN DEL TÚNEL DE ESTUDIO**

En el dimensionamiento de la sección transversal de un túnel de carretera entran en juego diversos factores: tipo de carretera, ancho necesario para la circulación de los vehículos, ancho de las banquetas, necesidades geométricas de las instalaciones y equipamientos, etc. Con base en lo anterior y de acuerdo con las Normas de Servicios Técnicos de Proyecto Geométrico, es conveniente enunciar la clasificación de las carreteras de acuerdo a su Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), se toman en cuenta los tipos de carretera más comunes, que son las tipo A, B y C. En caso de que se requiera construir un túnel en carreteras tipo D o E, este podrá proyectarse utilizando los mismos criterios establecidos en el manual de la SCT, pero adaptando la sección para cada caso en particular [2].

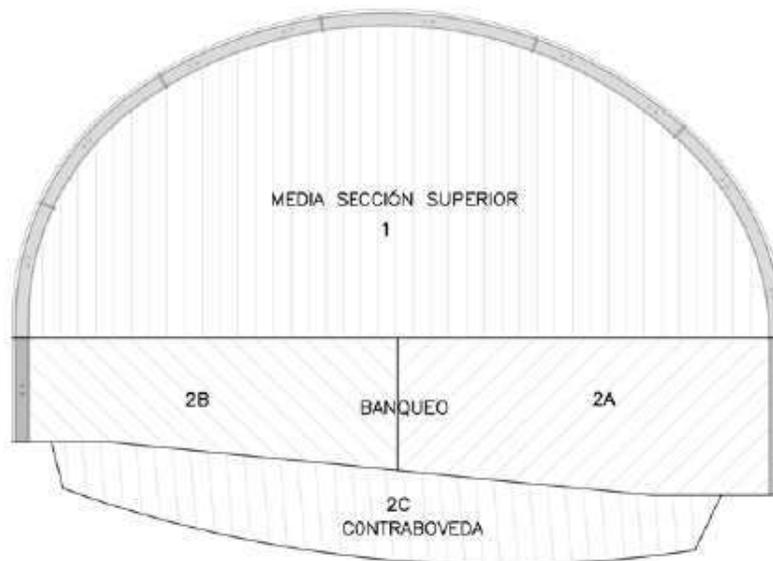
El diseño de un túnel siempre estará regido por las dimensiones del mismo, la calidad del material y el tipo de sostenimiento.

Un túnel carretero de dimensiones para alojar dos o tres carriles, corresponde a una sección de excavación dividida en una primera fase denominada media sección superior y una segunda llamada banqueo, ambas pueden excavar en una o varias fases. En este trabajo se excavarán en varias fases como lo indican los métodos referenciados en la sección anterior [2].



*Imagen 14. Esquema de la excavación por etapas de un túnel [2].*

Existen ocasiones en las que el material es de mala calidad, para estos casos se realiza en la construcción del túnel una contra-bóveda para evitar las deformaciones del terreno distribuyendo más uniformemente los esfuerzos, ya que al realizar la contra-bóveda se tiende a tomar una forma circular.



*Imagen 15. Sección de un túnel con contra-bóveda [2].*

## 4.2. TÚNEL DE LONGITUD MENOR A 500 M

La geometría de la sección propuesta para este tipo de carretera se define considerando la situación más desfavorable que corresponde a un grado de curvatura de  $7^{\circ}30'$ , con sobreelevación máxima de 10% y una ampliación de la calzada y la corona que, para una velocidad de proyecto de 70 km/h, es de 0.80 m. Al tratarse de túneles que funcionan en sentido unidireccional, la ampliación de la calzada y la corona se ubicará en el lado interior de la curva del alineamiento horizontal. La sección de cada túnel es simétrica hasta la junta de colado en el remate de las zapatas, con un espacio libre de corona de 8.3 m y un gálibo de 5.5 m; los arcos de la bóveda son constantes, así como las paredes en los tramos de tangente y curva. [2].

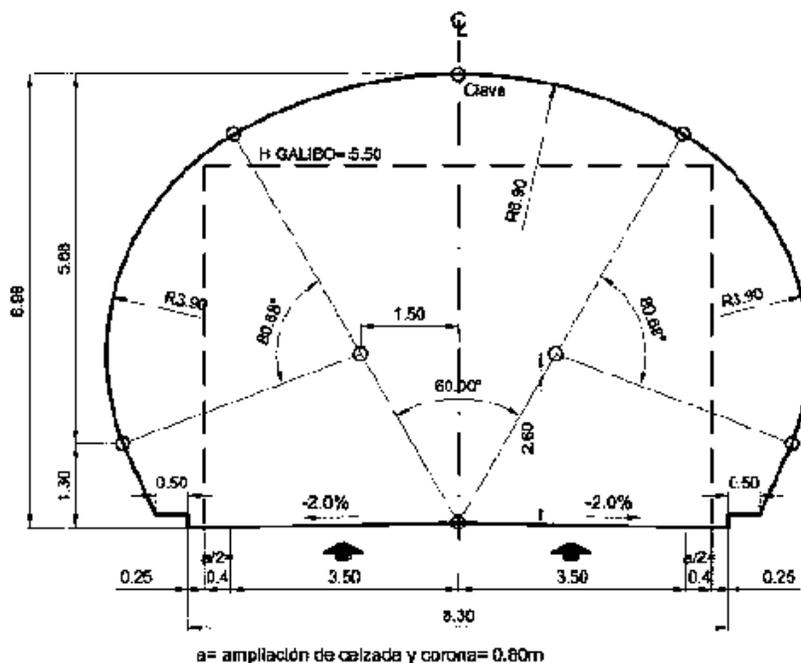


Imagen 16. Sección tipo en tangente para túnel de longitud menor a 500 m, de sentido unidireccional, con 2 carriles en carreteras Tipo A4 S. [2].

El programa RS2® solo maneja ciertos valores para las dimensiones del túnel, y no es tan específico como lo maneja el manual de la SCT, se optó por una sección tipo muy similar realizada en el programa AutoCAD® con dimensiones adecuadas más amplias, ya que el manual maneja distancias bajas como las de ancho de la

corona por mencionar algunas, por cuestiones económicas, la sección quedará de la siguiente manera:

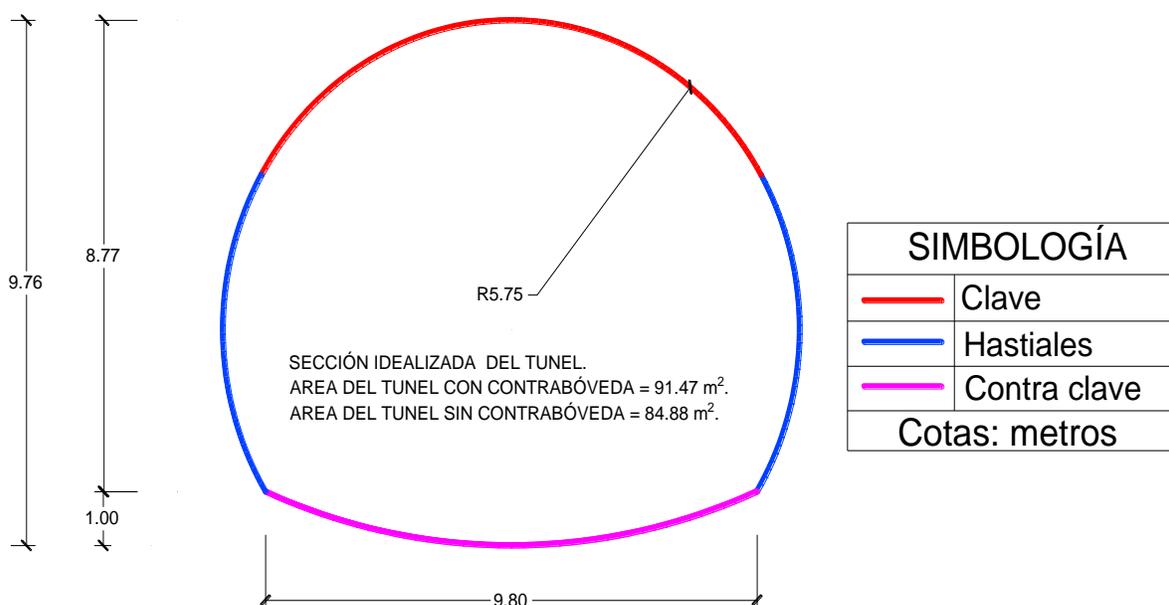


Imagen 17. Sección idealizada del túnel a estudiar.

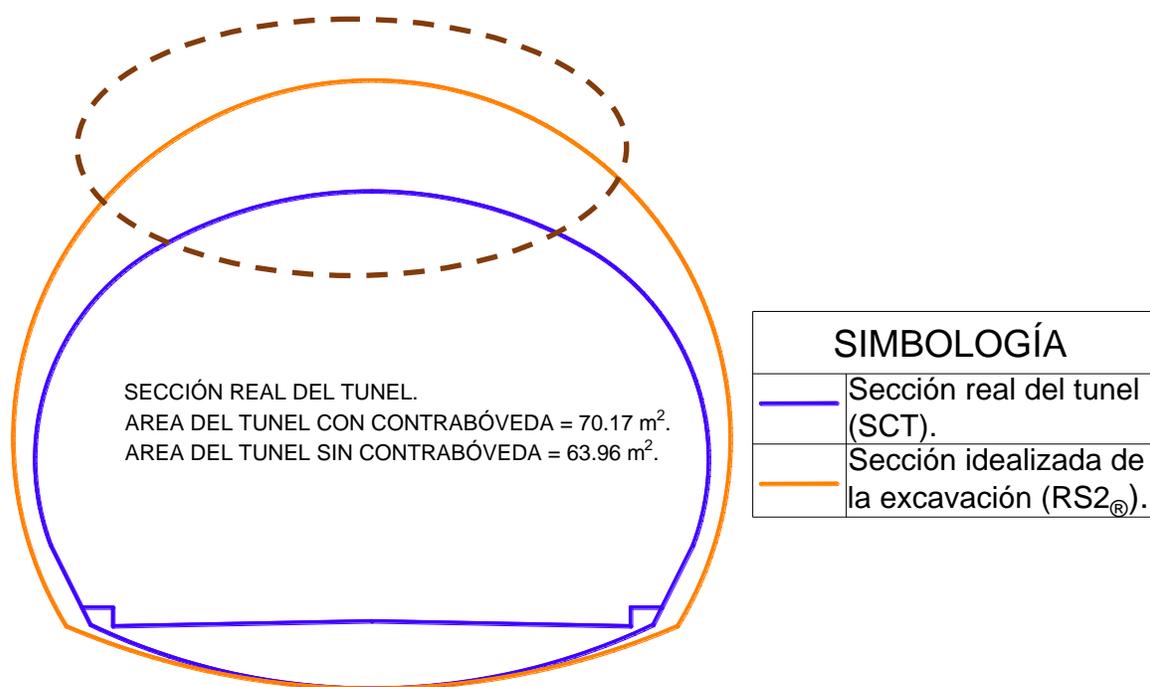


Imagen 18. Sección real del túnel SCT contra sección idealizada.

#### 4.3. PARÁMETROS DEL SUELO Y CONCRETO USADOS EN ESTE TRABAJO

En este trabajo se utilizó en el diseño un revestimiento de concreto lanzado de primera calidad como lo indica el manual de diseño de túneles de la SCT. [2]. Cabe mencionar que el diseño del revestimiento debe de tener una resistencia alta, el programa RS2® maneja una  $f'c$  de  $480 \text{ kg/cm}^2$  el cual se dejará como tal, la SCT maneja un peralte de 35 cm, así que el concreto lanzado de primera calidad queda de acuerdo a la Tabla 2:

Tabla 2. Parámetros del revestimiento modelado en RS2®.

CONCRETO LANZADO DE PRIMERA CALIDAD	
$f'c$	$480 \text{ kg/cm}^2$
Espesor (t)	35cm
E	3059150
Relación de Poisson	0.2

El suelo se tomó de acuerdo a las características que presenta en un gran promedio el suelo de la ciudad de Morelia Michoacán (véase tabla 3). Se emplearon dos tipos dos rigideces diferentes según sea el caso para los diferentes métodos de excavación, lo que nos permitió determinar los problemas esfuerzo-deformación e interacción suelo-estructura para dos consistencias diferentes.

Tabla 3. Características del suelo de la ciudad de Morelia Michoacán

		DATOS	
		SUELO 1	SUELO 2
Condiciones iniciales	Carga inicial del elemento	Esfuerzos del campo y gravedad	Esfuerzos del campo y gravedad
	Peso volumétrico	1.8 t/m <sup>3</sup>	1.8 t/m <sup>3</sup>
Rigidez	Relación de poisson $\nu$	0.3	0.45
	Módulo de elasticidad ( <b>E</b> )	2039.43 t/m <sup>2</sup>	1223.66 t/m <sup>2</sup>
Fuerza	Teoría de comportamiento del suelo	Elástica	Elástica
	Ángulo de fricción máximo ( $\phi$ )	22°	22°
	Cohesión máxima ( <b>c</b> )	1.6 t/m <sup>2</sup>	1.6 t/m <sup>2</sup>
Propiedades hidráulicas	Comportamiento del material	Drenado (no se considera el efecto del agua)	Drenado (no se considera el efecto del agua)

Tabla 4. Coeficiente  $K_0$  considerado en RS2®.

COEFICIENTE DE PRESIÓN LATERAL DE TIERRAS EN REPOSO ( $K_0$ )	
Tipo de esfuerzo en campo	gravedad
Relación efectiva de esfuerzo (horizontal/vertical en el plano)	0.6
Relación efectiva de esfuerzo (horizontal/vertical fuera del plano)	0.6

Se consideró un coeficiente de presión lateral de tierras de  $K_0=0.6$  debido a que es un valor utilizado para el diseño de túneles, además de estar acorde a nuestro suelo cohesivo friccionante como se aprecia en la Tabla 5.

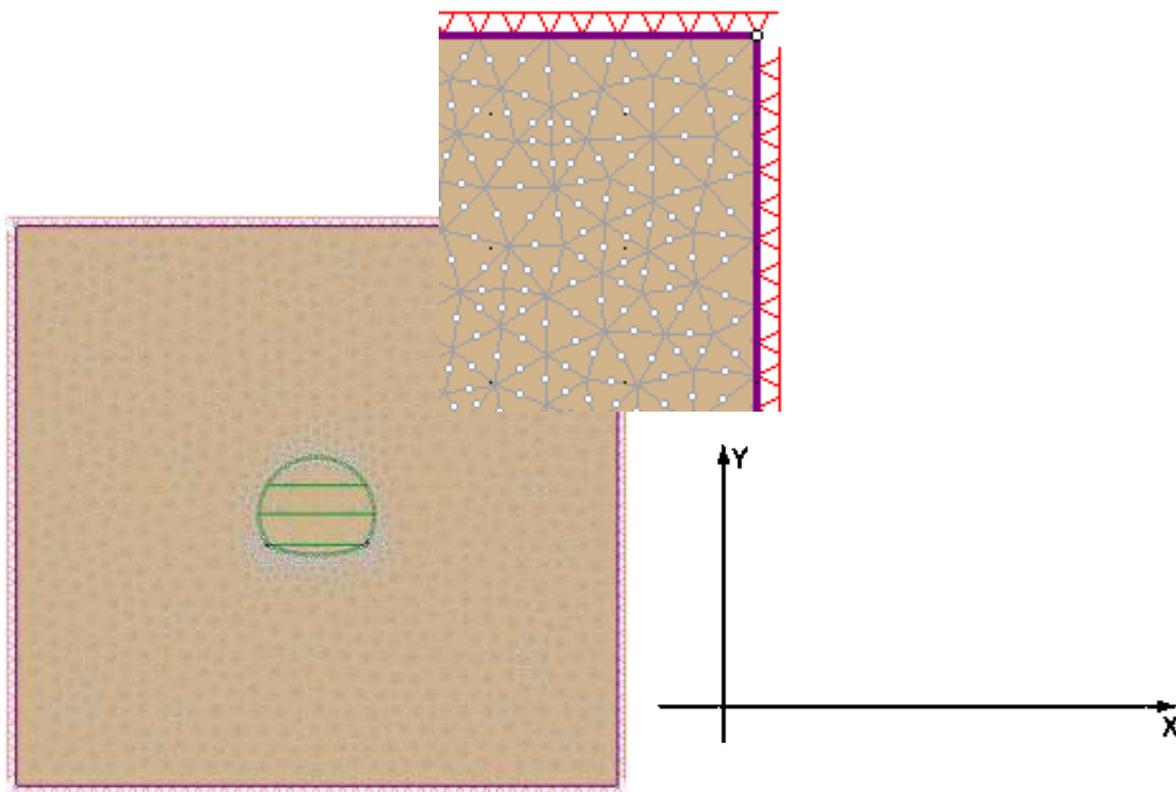
Tabla 5. Coeficiente de presión lateral de tierras [5].

SUELO	K <sub>0</sub>
Gravas, arenas y arenas limosas con o sin cimentación (GW - SM)	0.5
Limos arenosos, arenas arcillosas y arcillas de baja plasticidad (ML - SC y CL)	0.6
Arcillas de alta plasticidad (CH)	0.7

#### 4.4. CONDICIONES DE FRONTERA, MALLAS EN ELEMENTOS FINITOS Y PRESIÓN INTERNA

Las restricciones del terreno se consideraron de una forma ideal, de tal forma de que se reproduzca un comportamiento lógico y adecuado para el túnel elegido en este estudio.

No todos los factores que intervienen en el cálculo de un túnel son aleatorios ni comparten la misma naturaleza; algunos están asociados con la estructura y es ahí donde entran las restricciones que son elementos estructurales que simulan la interacción con el terreno, permitiendo tener en cuenta prácticamente todos los factores que influyen en el comportamiento global de la unidad, sensibilizándonos así en la relación estructura-suelo. Estos elementos se relacionan más con la geometría y tipo de sección de la excavación, las cuales deben cumplir ciertas especificaciones o necesidades. Y también están los agentes externos, tales el clima, el agua, la sismicidad de la zona por mencionar algunos [2].

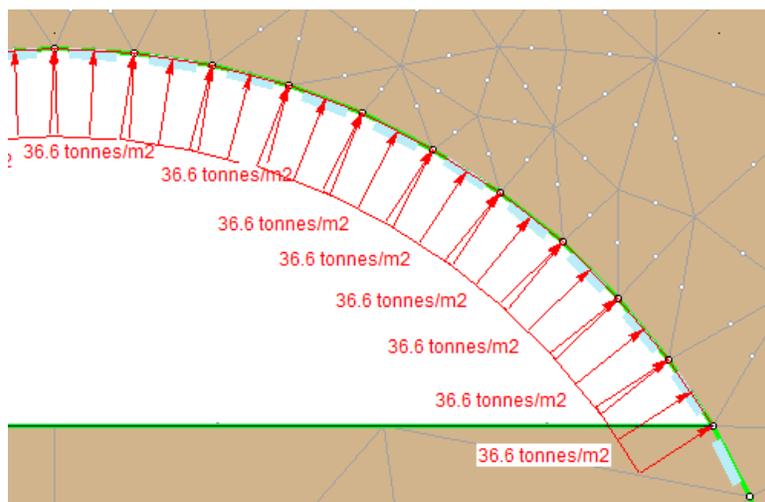


*Imagen 19. Malla graduada con 6 nodos con elementos triangulares y restricciones del modelo numérico en las direcciones x, y .*

*Tabla 6. Configuración de la malla en RS2®, para los dos tipos de suelo a estudiar*

Configuración de la malla	
Tipo de malla	Graduada
Tipo de elemento	6 nodos triangulares
Número predeterminado de nodos en externo	90
Número de elementos	2246
Número de nodos	4426

El efecto de ademado se llevó a cabo colocando una presión interna  $P_a$ , que se eligió en base a la curva característica de los casos presentados. En la Imagen 20 se presenta la presión modelada en el programa RS2®.



*Imagen 20. Colocación de ademe en la sección excavada y simulación de la relajación de los esfuerzos [7]*

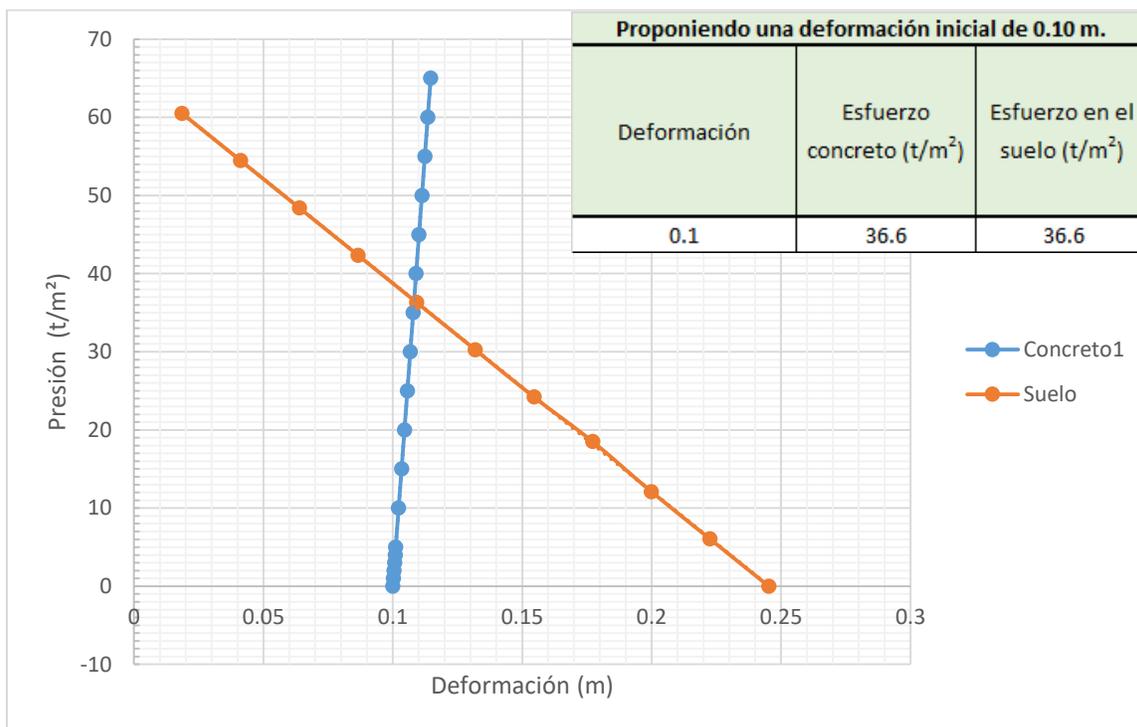
Debemos modelizar la excavación de forma tal que represente de manera realista el avance la excavación de un túnel, es decir que la redistribución de los estados de esfuerzos (ver Imagen 20), varíe de acuerdo con el método de excavación utilizado y que se consideren adecuadamente la presencia y el momento de implementación de los elementos de sostenimiento [2].

## 5. RESULTADOS

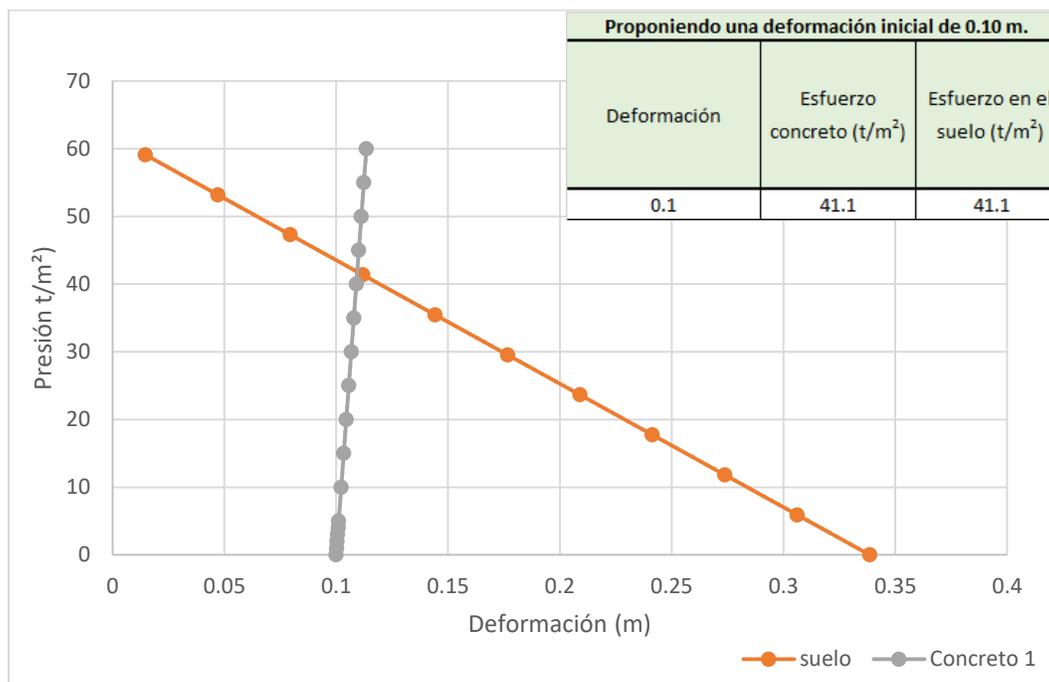
### 5.1. OBTENCIÓN DE LA CURVAS CARACTERÍSTICAS EN ESTUDIO

Se presentan a continuación las curvas características obtenidas en este estudio particular y de acuerdo a lo presentado en la sección 3.3.

De acuerdo a la Gráfica 2, se presenta el punto de cruce entre las dos respuestas (suelo-revestimiento), presenta una deformación de 0.11m aproximadamente y una presión del concreto y del suelo de 36.6 t/cm<sup>2</sup>. Este es por lo tanto el esfuerzo del suelo en el que se colocará el ademe en el contorno de la excavación.



*Gráfica 1. Curva característica suelo vs concreto para E = 20,000 kPa. [15]*



Grafica 3. Curva característica suelo vs concreto para  $E = 12,000 \text{ kPa}$  [15].

## 5.2. METODO INGLES CON UN MÓDULO ELÁSTICO DE $E=20\,000 \text{ kPa}$ .

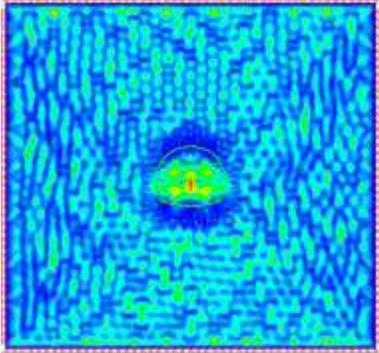
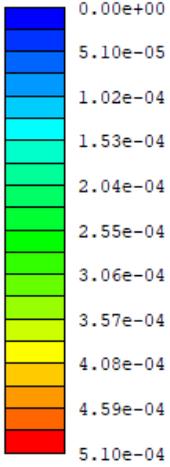
### 5.2.1. MÉTODO INGLÉS SIN REVESTIMIENTO

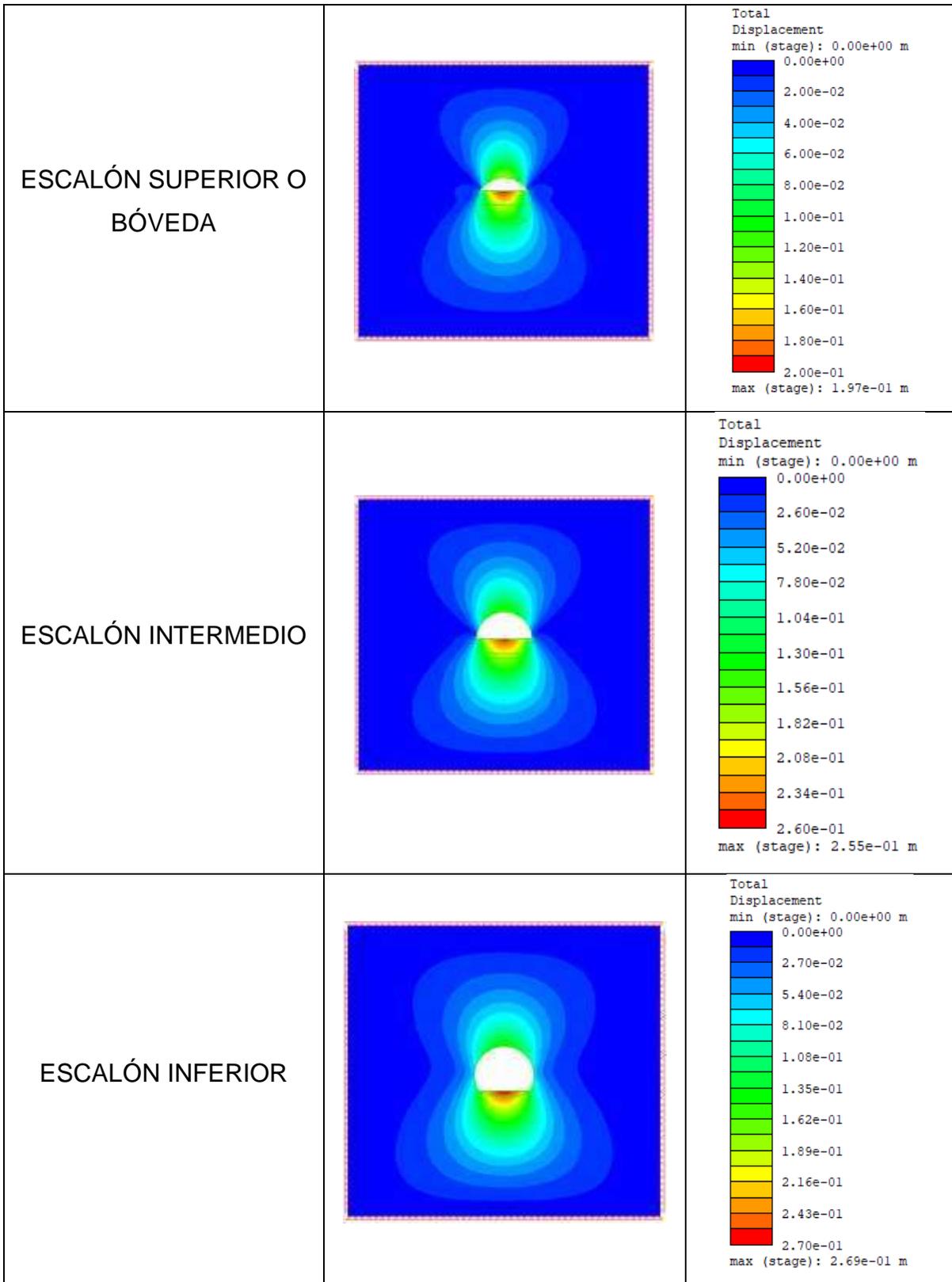
En una primera fase del estudio, se realizó el modelo numérico sin revestimiento y por consecuencia sin apuntalar la excavación, esto con el único fin de observar en donde se presentarán las zonas críticas de la excavación. Cabe señalar que en la práctica esto no es real, sin embargo, nos ayudará a distinguir y a corroborar las cinemáticas de desplazamientos y si los modelos numéricos están funcionando adecuadamente.

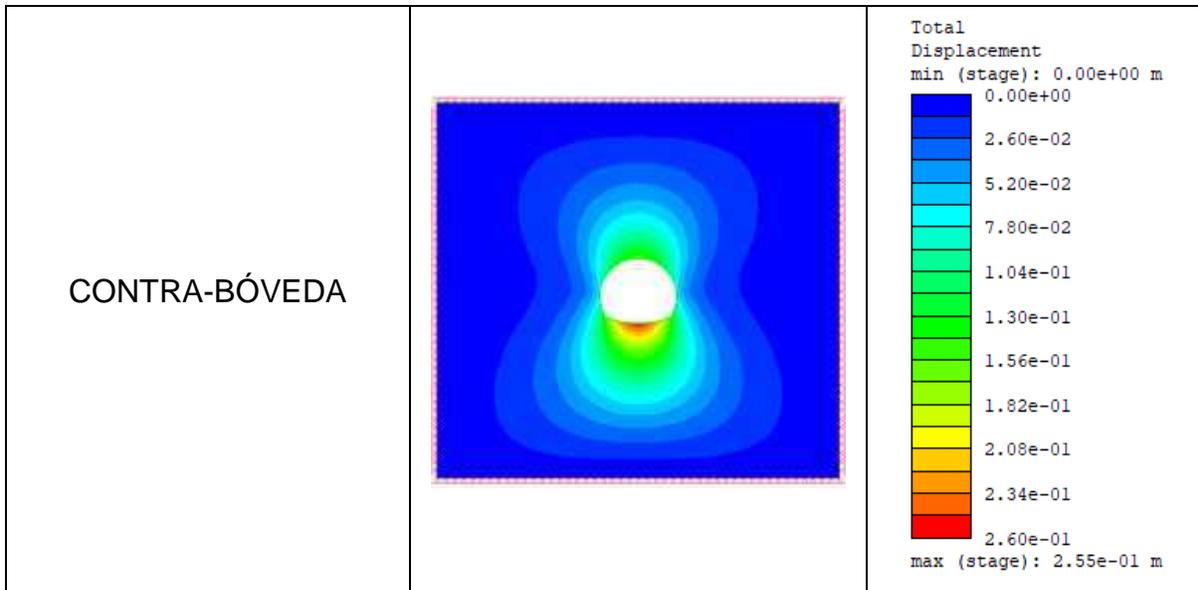
La secuencia de excavación se llevó a cabo de acuerdo a lo establecido en la sección 3.3.1. En RS2 (2) se modelaron 5 etapas para representar las zonas excavadas partiendo de las condiciones *in situ*.

En la Tabla 7, se pueden observar las cinemáticas de desplazamiento generadas en las diferentes etapas que corresponden al proceso de excavación del método Inglés. Los desplazamientos se reportan del lado derecho en donde podemos observar con la escala de colores la magnitud de éstos, siendo el rojo el valor más alto y el azul el valor más bajo. En la etapa *in situ* se observa que realmente el desplazamiento es nulo, sin embargo, la escala de colores se presenta debido a los cálculos matemáticos que realiza el programa en sí. En la etapa 2 (escalón superior) se comienzan a desarrollar las deformaciones en la bóveda y mayormente en la contra-bóveda y así conforme se avanza la excavación las deformaciones siguen aumentando en ambas partes de la sección.

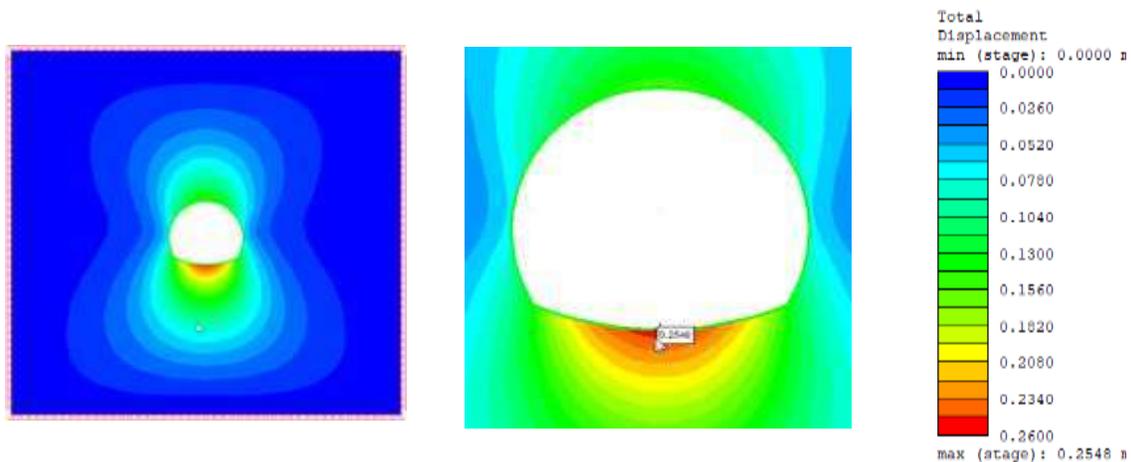
*Tabla 7. Secuencia de excavación del Método Inglés sin revestir.*

ETAPAS DE EXCAVACIÓN	CINEMÁTICAS DE DEFORMACIÓN DEL SUELO	DESPLAZAMIENTOS
INSITU		<p>Total Displacement  min (stage): 0.00e+00 m  max (stage): 5.03e-04 m</p> 

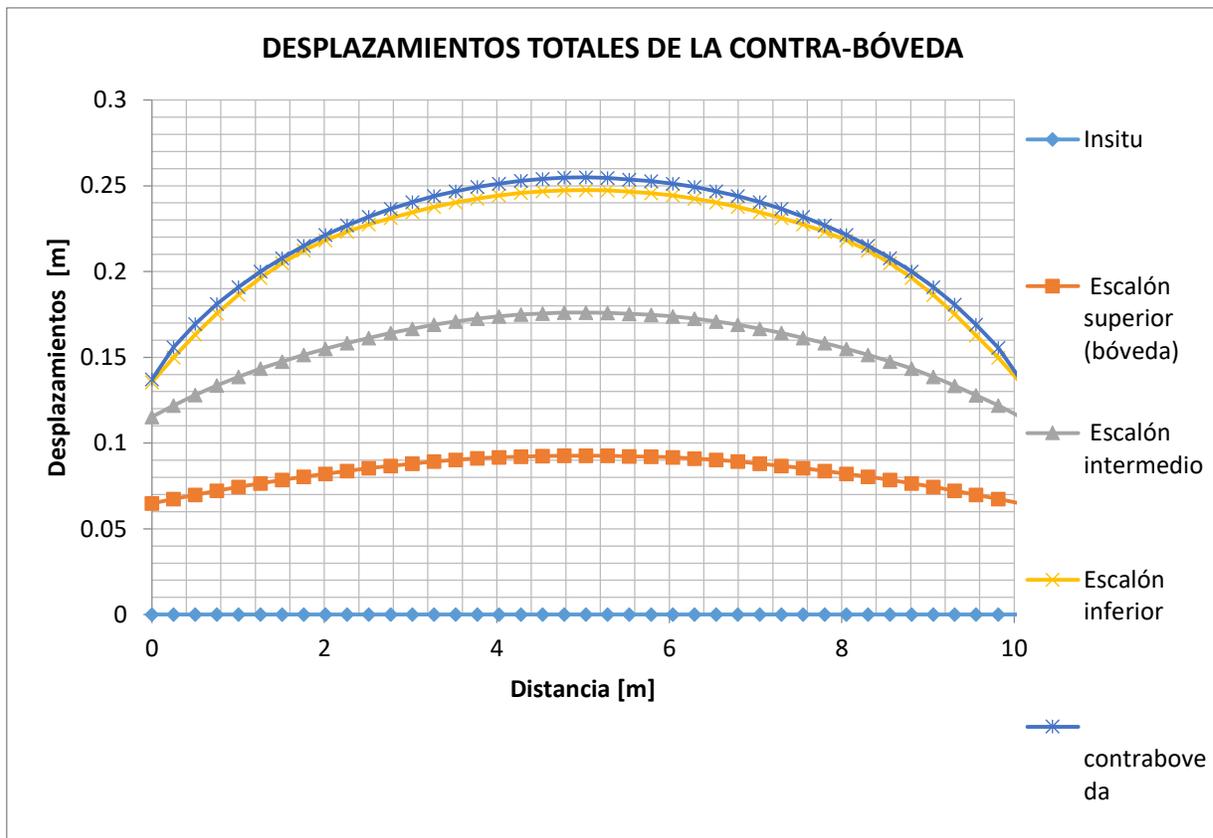




Este método no presentó deformación importante en los hastiales como se puede apreciar en la Figura 18. Las deformaciones críticas ocurren en la bóveda y mayormente en la contra-bóveda del túnel, por lo tanto, el suelo tenderá a levantarse en el piso (contra-bóveda). Sin embargo, la deformación es razonable dentro del límite lógico de las excavaciones.



*Imagen 18. Cinemáticas de deformación al concluir todas las etapas de excavación.*



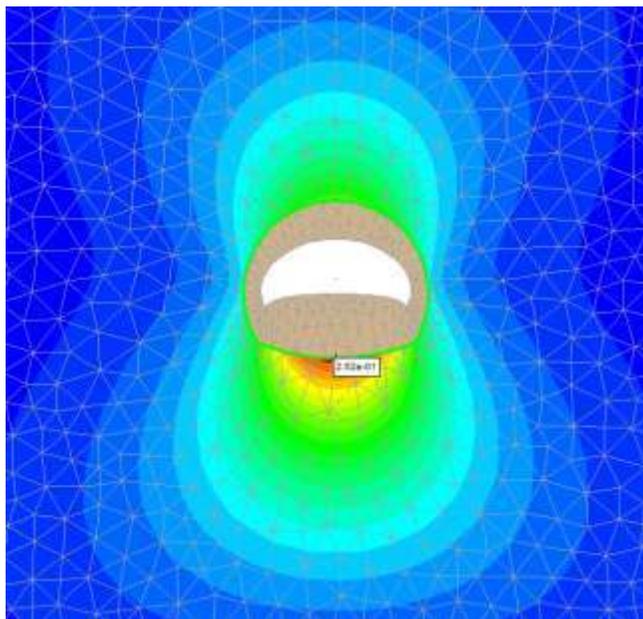
Gráfica 6. Representación las cinemáticas de desplazamiento sin revestimiento, se observa como la contra-bóveda es la más afectada.

En la gráfica 5 se presenta la Distancia, esta distancia la tomamos a partir del hastial izquierdo a derecho a lo largo de toda la contra-bóveda, así como los Desplazamientos totales que se desarrollan en esta zona eligiéndose esta parte del túnel por ser la zona crítica.

En grafica 5 se observa que la etapa *in situ* representada con círculos rellenos, no presenta ninguna deformación como es lógico, en la etapa 2 (Escalón superior) que está representada por pequeños recuadros de color naranja, la contra-bóveda sigue sin verse afectada tiene una ligera deformación de aproximadamente 9 cm, la curva representada por triángulos de color gris se forma a partir de la excavación del escalón intermedio misma excavación sigue aumentando la deformación de manera lineal siguiendo con el escalón inferior y hasta la contra-

bóveda que es donde se presenta la deformación máxima de aproximadamente 25 cm.

La secuencia en el centro de la contra-bóveda a lo largo de la excavación del túnel se mantiene, esta aumenta linealmente conforme se avanza en cada etapa.



*Imagen 19. Sección final del túnel sin revestimiento para un  $E=20,000$  kPa.*

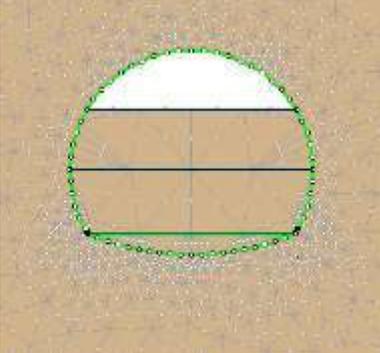
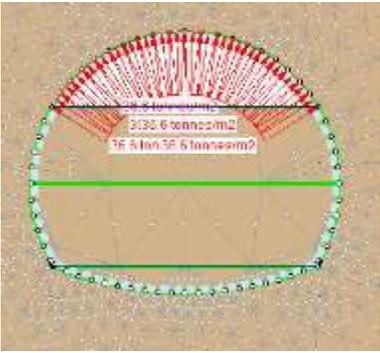
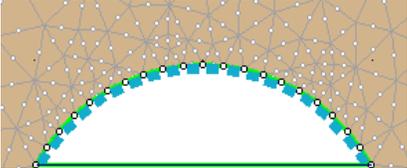
A partir de estas cinemáticas se concluye que la etapa final de excavación es la crítica, debido a que se presentan las deformaciones totales en toda la periferia del túnel, debiéndose poner cuidado especial al momento de colocar el revestimiento del piso, además de ser el momento en el que la clave y su revestimiento cargan al máximo el peso del túnel y es cuando el revestimiento del techo debe soportar los momentos máximos generados.

### **5.2.2. MÉTODO INGLES CON REVESTIMIENTO**

Lo único que genera el revestimiento es que el material ya no se siga deformando y por lo tanto se mantenga estable, éste se coloca después de quitar el ademe y por consecuente también se quitará la presión que ejerce el mismo lo que le da tiempo de tener una deformación al suelo que varía entre los 10 y 13 cm en todos los métodos estudiados, para así después lanzar el concreto, mismo que

estabilizará y evitará más deformaciones del túnel. lo ideal es excavar, apuntalar, desapuntalar y revestir en ese orden.

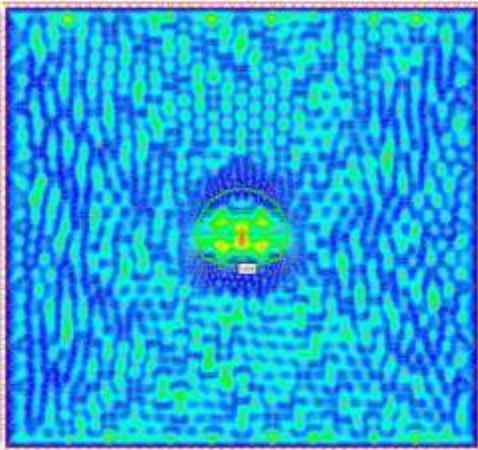
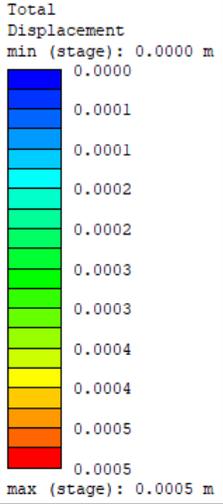
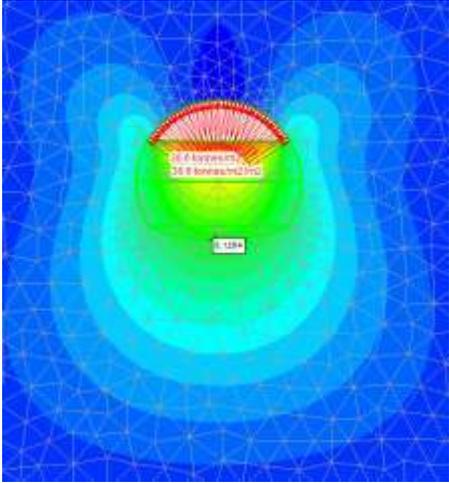
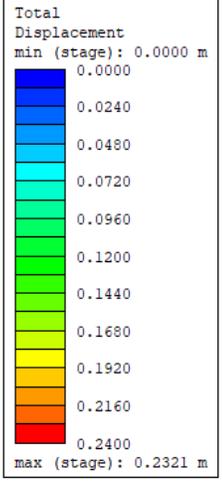
*Tabla 8. Proceso de excavación del método Inglés.*

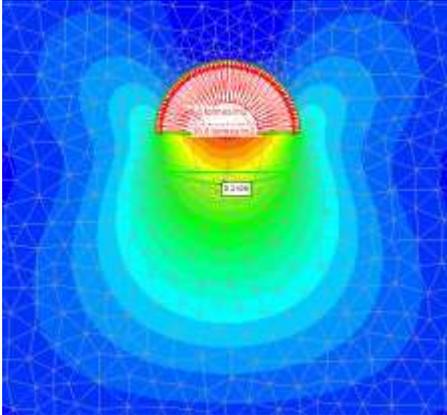
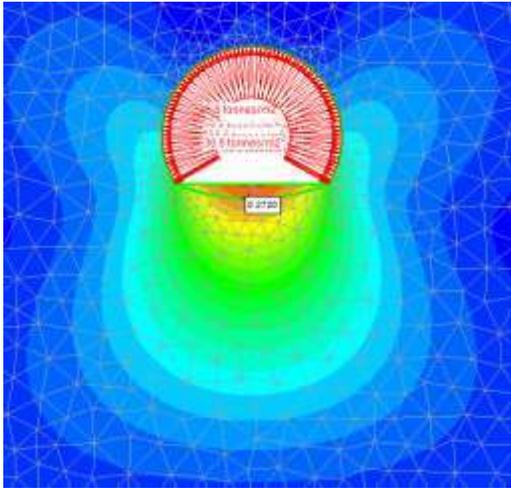
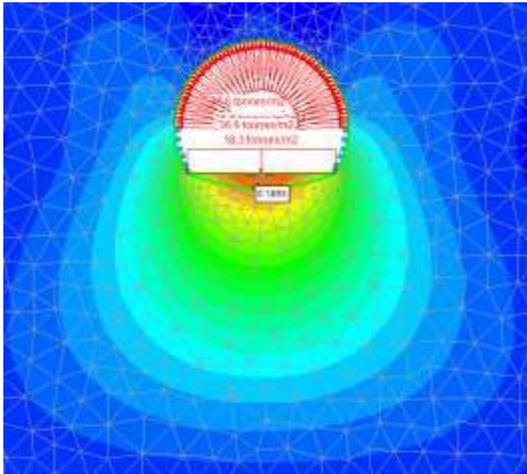
Excavación	Ademe	Revestimiento
		

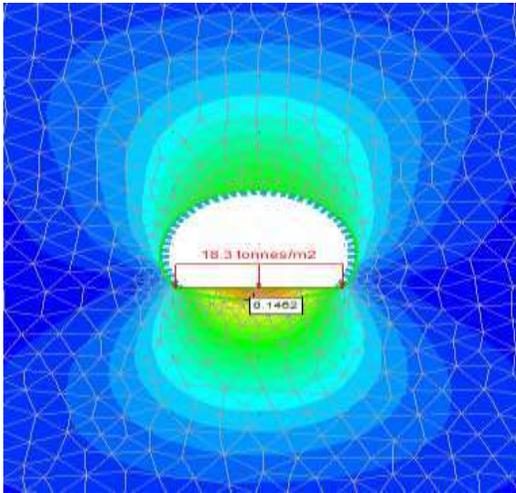
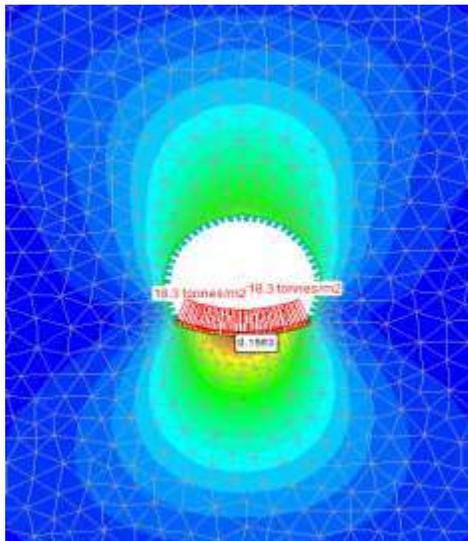
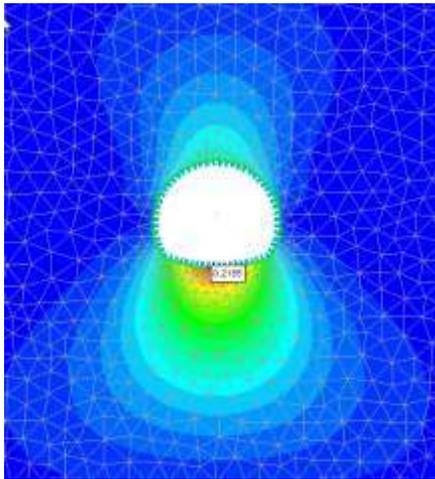
A lo largo de la excavación se observa un comportamiento de movimiento de tierras normal (lógico) y similar al que se realizó sin revestimiento, este comportamiento se mantiene estable en la construcción de todos los escalones (superior, intermedio e inferior) y en el primer revestimiento que se marca de líneas punteadas de color azul alrededor de toda la excavación sucede en los hastiales, durante este proceso el empuje de tierras se ve en la contra bóveda teniendo una deformación considerable de aproximadamente 21cm como se observa en la tabla 6 en la última etapa (revestimiento de la contra-bóveda).

Al momento de quitar el ademe y revestir la bóveda se observa que la excavación comenzara a fallar por la parte superior de la excavación (bóveda), con una deformación más chica que la de la contra-bóveda aún, este comportamiento tiende a hacerse por el suelo que estamos ademando en la parte inferior del túnel, ya que al momento de excavar la contra-bóveda y quitarle el ademe para revestirla se quitan las presiones del empuje del suelo en la bóveda lo que permite que el revestimiento se mantenga estable. En la Tabla 9 se presenta la secuencia de excavación y ademado de acuerdo a la Tabla 8.

Tabla 9. Secuencia de excavación del método Inglés con revestimiento.

ETAPAS DE EXCAVACIÓN	CINEMATICAS DE DEFORMACIÓN DEL SUELO	DESPLAZAMIENTO S
INSITU		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m max (stage): 0.0005 m</p> 
ESCALÓN SUPERIOR CON ADEME		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m max (stage): 0.2321 m</p> 

<p>                 ESCALÓN INTERMEDIO CON ADEME             </p>		<p>                 Total Displacement                  min (stage): 0.0000 m                  0.0000                  0.0290                  0.0580                  0.0870                  0.1160                  0.1450                  0.1740                  0.2030                  0.2320                  0.2610                  0.2900                  max (stage): 0.2870 m             </p>
<p>                 ESCALÓN INFERIOR CON ADEME             </p>		<p>                 Total Displacement                  min (stage): 0.0000 m                  0.0000                  0.0300                  0.0600                  0.0900                  0.1200                  0.1500                  0.1800                  0.2100                  0.2400                  0.2700                  0.3000                  max (stage): 0.2907 m             </p>
<p>                 REVESTIMIENTO DE HASTIALES             </p>		<p>                 Total Displacement                  min (stage): 0.0000 m                  0.0000                  0.0210                  0.0420                  0.0630                  0.0840                  0.1050                  0.1260                  0.1470                  0.1680                  0.1890                  0.2100                  max (stage): 0.2044 m             </p>

<p>REVESTIMIENTO DE BÓVEDA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m 0.0170 0.0340 0.0510 0.0680 0.0850 0.1020 0.1190 0.1360 0.1530 0.1700 max (stage): 0.1608 m</p>
<p>EXCABACIÓN DE CONTRA-BÓVEDA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m 0.0160 0.0320 0.0480 0.0640 0.0800 0.0960 0.1120 0.1280 0.1440 0.1600 max (stage): 0.1565 m</p>
<p>REVESTIMIENTO DE CONTRA-BÓVEDA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m 0.0220 0.0440 0.0660 0.0880 0.1100 0.1320 0.1540 0.1760 0.1980 0.2200 max (stage): 0.2157 m</p>

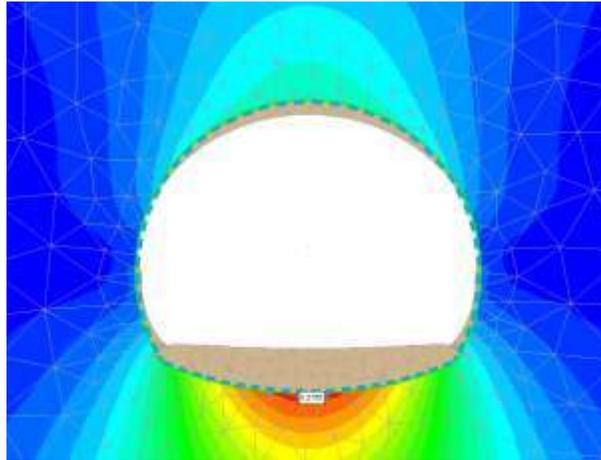


Imagen 20. Sección final del túnel excavado revestido.

En las imágenes 21 y 22 nos muestran las etapas de excavación de la contra-bóveda y del revestimiento, de la misma podemos observar de qué manera está actuando el empuje del suelo hacia la sección excavada ya revestida.

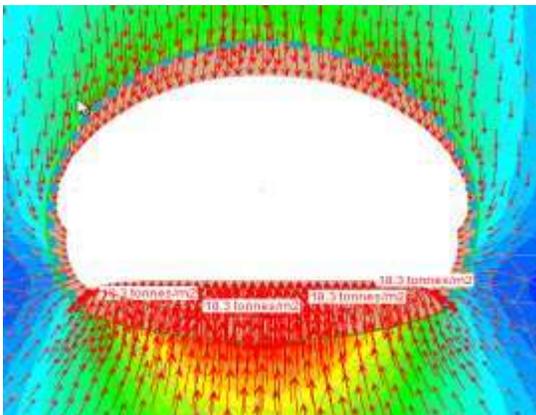


Imagen 21. Excavación de la contra-bóveda

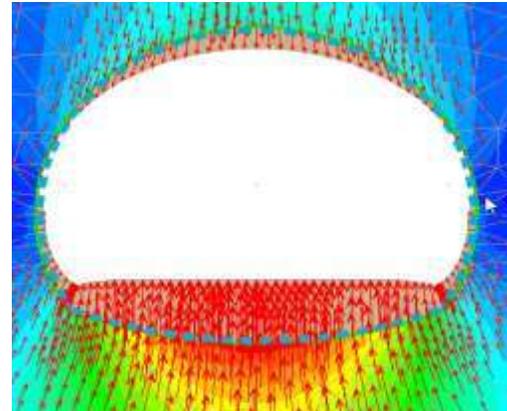
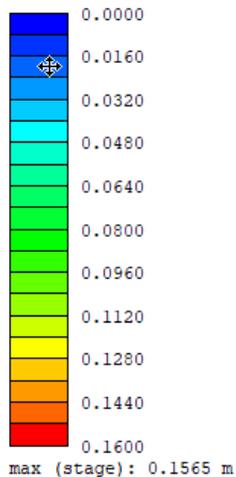
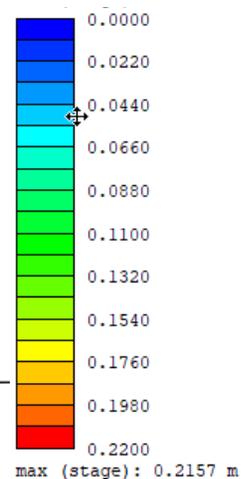
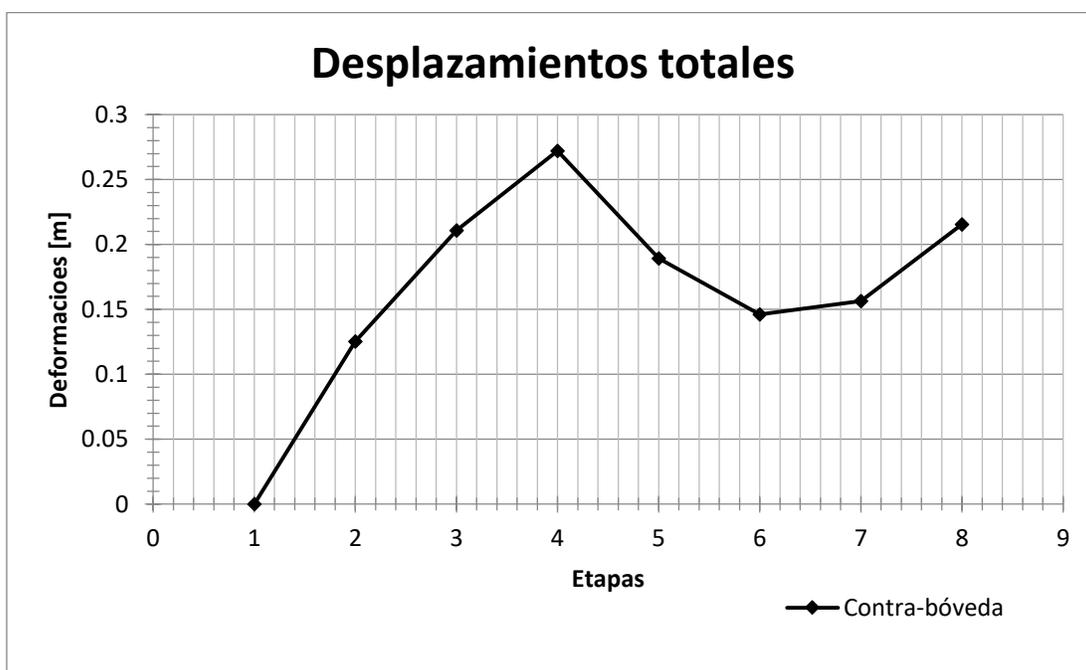


Imagen 22. Revestimiento de la contra-bóveda etapa final



Se llevaron a cabo modelaciones sin ademar la parte inferior del túnel a partir del revestimiento de la contra-bóveda y haciendo esto no se ve afectada la contra-bóveda, lo que demuestra que, en la práctica en lo absoluto, se podría realizar la excavación sin ademar la parte inferior.

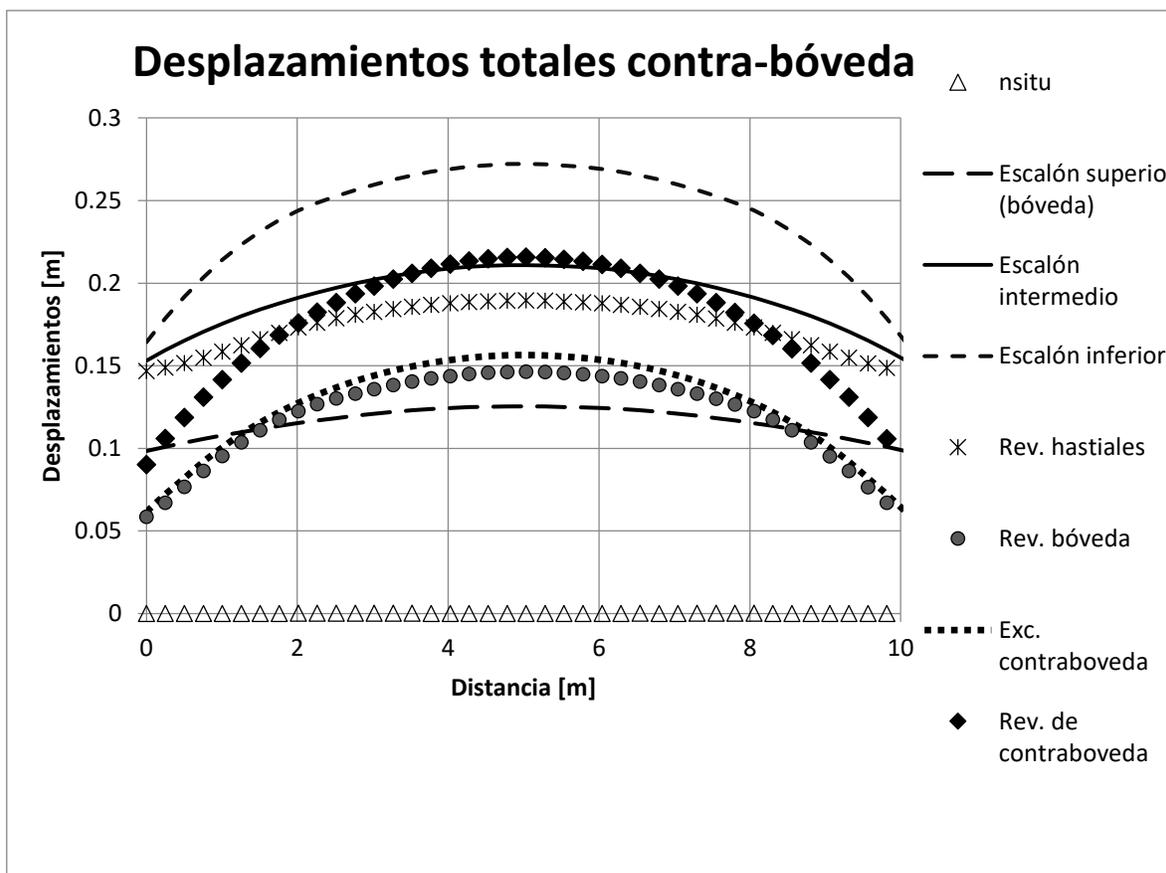
Se puede observar de manera más directa la deformación a lo largo de la contra-bóveda marcando un solo punto en el centro de la misma, pero graficado en todas las etapas (ver gráfica 6):



*Gráfica 7. Desplazamientos totales al centro de la contra-bóveda, con revestimiento*

Como se ve la gráfica en la etapa 4 (escalón inferior), se tiene una deformación considerable. En esta etapa el método funciona como si excaváramos toda la galería en un solo paso, al pasar a la etapa 5 donde se comienza con el revestimiento de hastiales, las deformaciones comienzan a bajar, después a partir de la etapa 7 se comienza a notar un ligero incremento de deformación esto se debe al empuje de tierra que se da al momento de excavar la contra-bóveda. A esta contra-bóveda se le quita la presión del ademe y es el momento en el que se

coloca el revestimiento de la misma, teniendo así una deformación muy pequeña (5cm). La diferencia que hace el revestimiento en la secuencia de una excavación se puede observar de mejor manera comparando las gráficas 6 y 8, notándose una ligera diferencia en cuanto a la deformación del suelo al final de la excavación en la parte de la contra-bóveda, lo que nos hace entender aún más que la función principal del revestimiento es evitar que el suelo se siga deformando. Sin embargo, es importante recalcar que las deformaciones del túnel siguen presentes a pesar del revestimiento generándose deformaciones a pesar de la modelación numérica de éste y lo que también ocurre en la realidad. Con lo anterior se concluye que el que el diseño del revestimiento depende de los resultados de las cinemáticas obtenidas.



*Gráfica 8. Representación las cinemáticas de desplazamiento con revestimiento, se observa como la contra-bóveda es la más afectada.*

Como bien se puede notar al comparar las gráficas 8 y 6 respectivamente, se puede observar que cuando realizamos el proceso como el método lo indica es decir con revestimiento (véase gráfica 8), la deformación máxima de la contra-bóveda ocurre cuando excavamos el último escalón y cuando excavamos la contra-bóveda se relaja la estructura, esto debido a que hay una mejor distribución de esfuerzos.

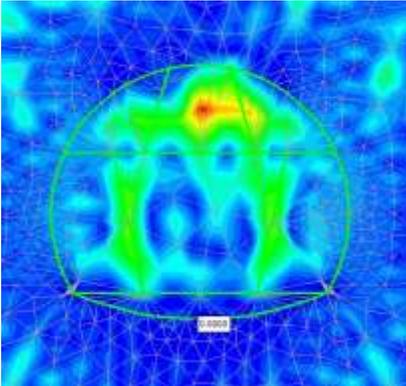
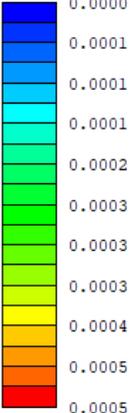
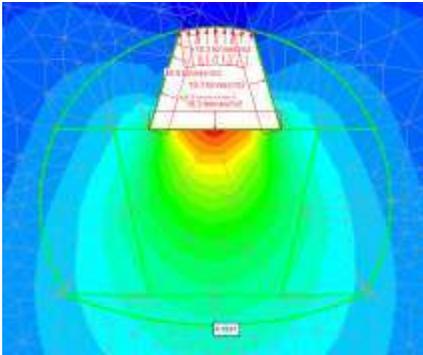
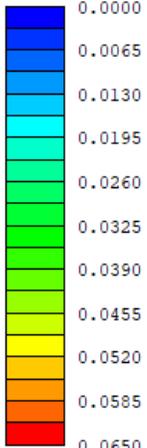
Al colocarle el revestimiento final, la contra-bóveda se deforma mucho menos que si vemos el método sin revestir (véase gráfica 6). Es decir, si lo hacemos sin revestir, la deformación máxima se presenta cuando excavamos la contra-bóveda.

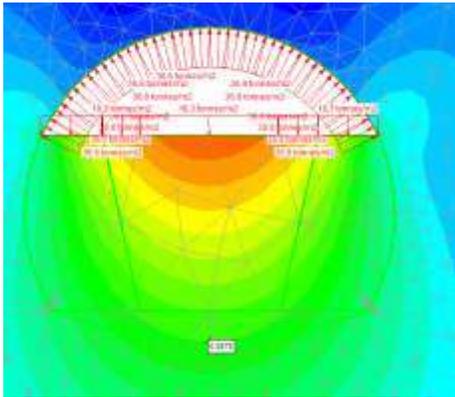
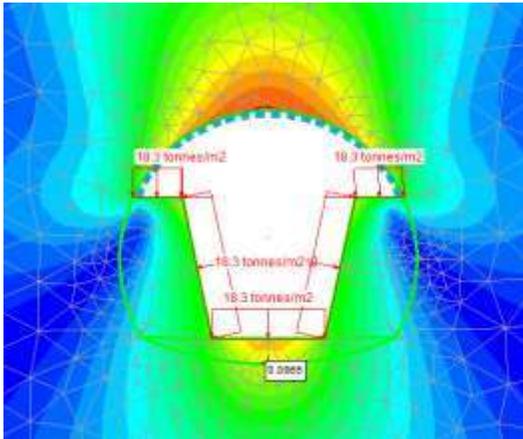
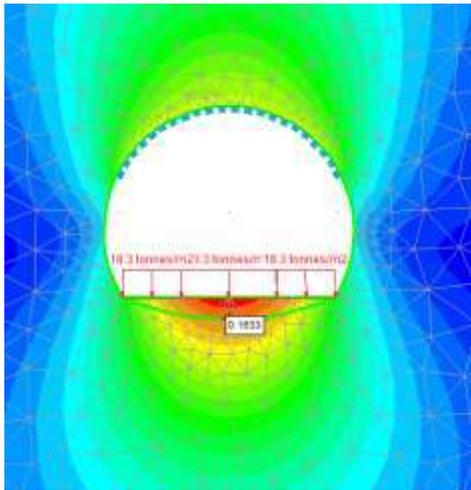
De forma práctica es necesario poner especial atención al momento de la excavación del escalón inferior debido a que prácticamente toda la bóveda está contenida por el revestimiento.

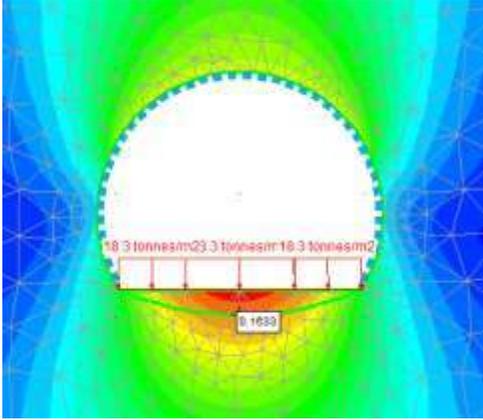
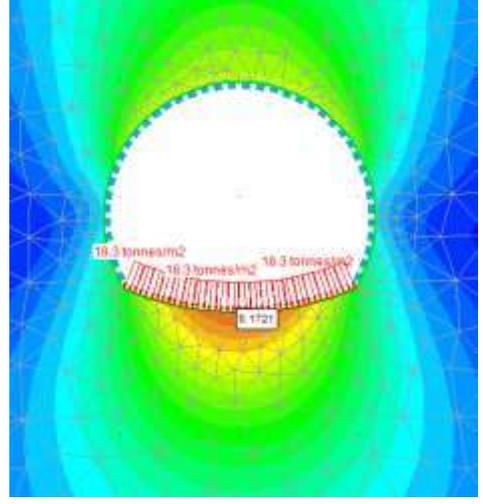
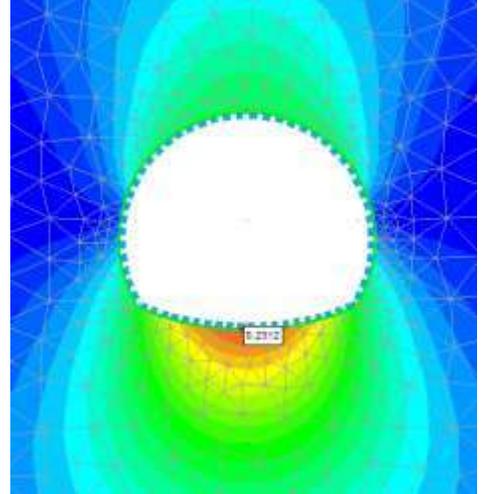
### **5.3. METODO BELGA CON UN MÓDULO ELÁSTICO DE 20000 kPa**

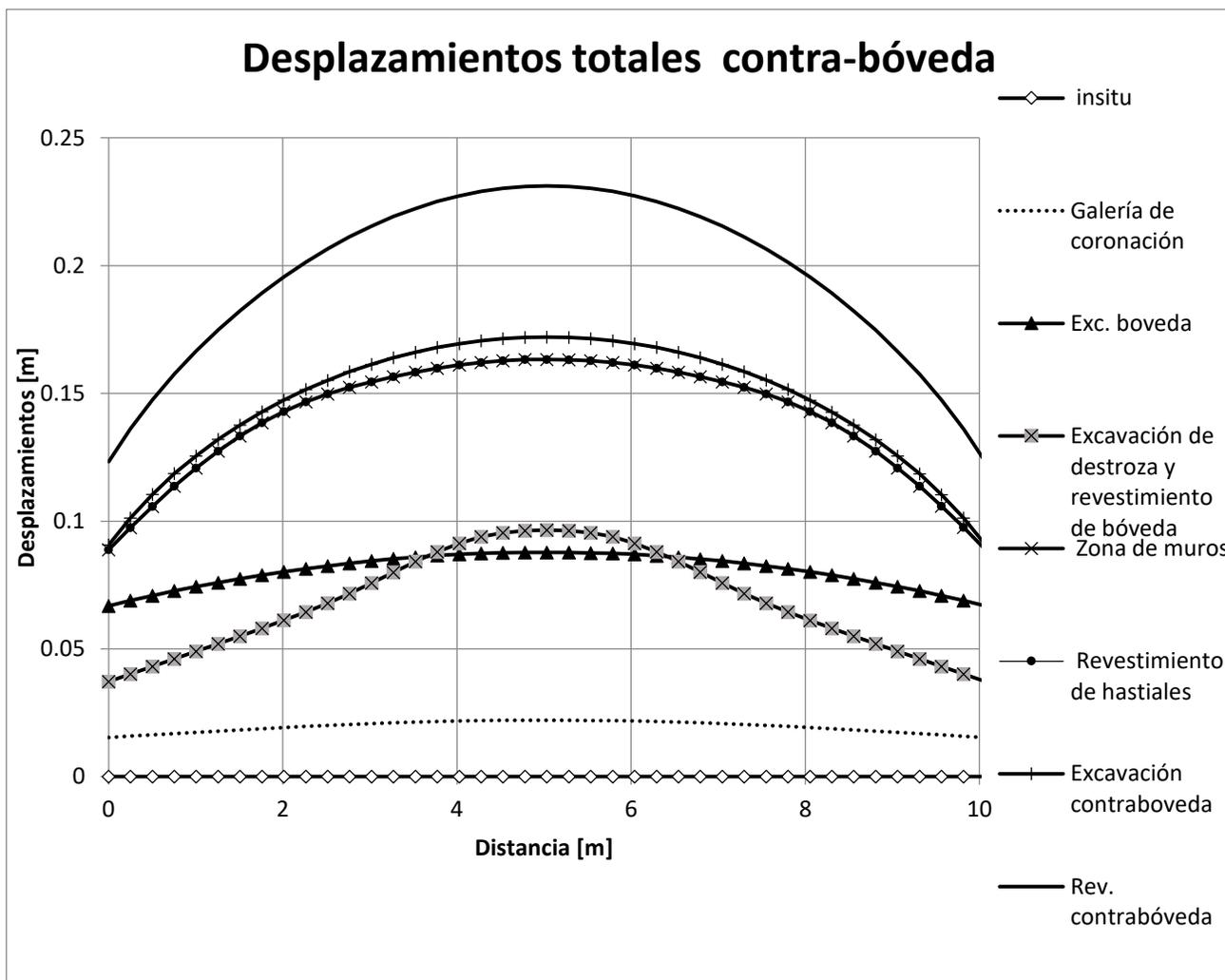
Este método resulta adecuado en cuanto a su proceso de excavación ya que las deformaciones ocurren de manera ideal alrededor de la bóveda, es decir el terreno descansa sobre el área ya revestida de la sección mientras que esta relajación del suelo permite que en el área del piso no sea empujada y en los hastiales no se presente deformación significativa y se pueda continuar con el proceso de excavación de la contra-bóveda, revestimiento de hastiales y por ultimo revestimiento de la contra-bóveda respectivamente, el método Belga permite que el suelo busque su estado de reposo rápidamente con la colocación del revestimiento de la bóveda y a medida que se avanza en la excavación tiende a ser menos propenso a colapsar, como bien se puede observar en las cinemáticas de la tabla 10 las deformaciones máximas las tendrá la contra-bóveda con 24 cm de deformación aproximadamente lo que es poco significativo en cuestiones de campo.

Tabla 10. Cinemáticas de deformación del método Belga.

ETAPAS	CINEMÁTICAS DE DEFORMACIÓN DEL SUELO	DESPLAZAMIENTOS
INSITU		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p>  <p>max (stage): 0.0005 m</p>
GALERIA DE CORONACIÓN		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p>  <p>max (stage): 0.0646 m</p>

<p>EXCAVACIÓN DE LA BÓVEDA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m 0.0160 0.0320 0.0480 0.0640 0.0800 0.0960 0.1120 0.1280 0.1440 0.1600 max (stage): 0.1512 m</p>
<p>REVESTIMIENTO DE LA BÓVEDA Y EXCAVACIÓN DE LA DESTROZA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m 0.0130 0.0260 0.0390 0.0520 0.0650 0.0780 0.0910 0.1040 0.1170 0.1300 max (stage): 0.1248 m</p>
<p>ZONA DE HASTIALES</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m 0.0180 0.0360 0.0540 0.0720 0.0900 0.1080 0.1260 0.1440 0.1620 0.1800 max (stage): 0.1778 m</p>

<p>REVESTIMIENTO DE HASTIALES</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m 0.0000 0.0180 0.0360 0.0540 0.0720 0.0900 0.1080 0.1260 0.1440 0.1620 0.1800 max (stage): 0.1778 m</p>
<p>CONTRA- BÓVEDA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m 0.0000 0.0180 0.0360 0.0540 0.0720 0.0900 0.1080 0.1260 0.1440 0.1620 0.1800 max (stage): 0.1721 m</p>
<p>REVESTIMIENTO DE LA CONTRA- BÓVEDA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m 0.0000 0.0240 0.0480 0.0720 0.0960 0.1200 0.1440 0.1680 0.1920 0.2160 0.2400 max (stage): 0.2312 m</p>



*Grafica 9. Desplazamientos totales de la contra-bóveda empleando el método belga.*

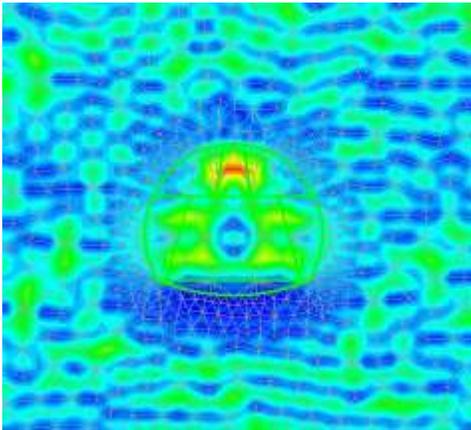
La gráfica 9 nos muestra las deformaciones de la contra-bóveda misma que tiene 10 metros de largo, se pueden observar las etapas de excavación y de revestimiento del método Belga, y cómo se comporta la contra-bóveda en cada una de ellas, la deformación máxima de la misma ocurre al momento de revestirla deformando 24 cm el piso, si lo comparamos con la curva inferior denotada por cruces (excavación de la contra-bóveda) se puede apreciar en esta etapa una deformación de 18 cm esto quiere decir que al momento de colocar el revestimiento el concreto tiene una deformación de 6 cm lo cual es tolerable dentro del rango.

### 5.3.1. METODO BELGA PARA TERRENO POCO COMPETENTE CON UN MÓDULO ELÁSTICO DE 20000 kPa.

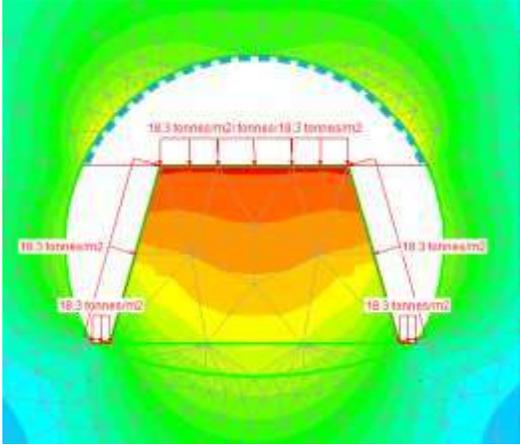
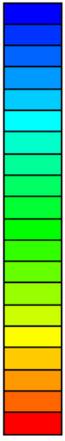
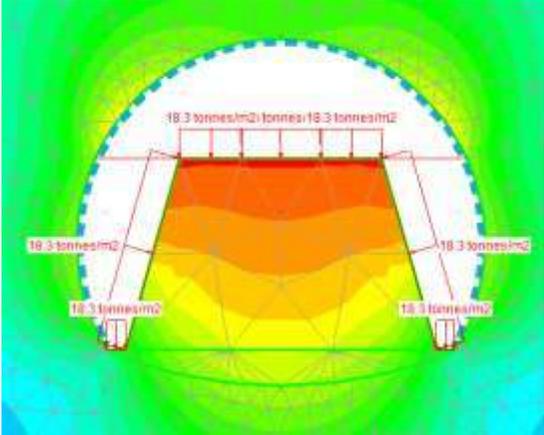
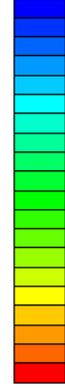
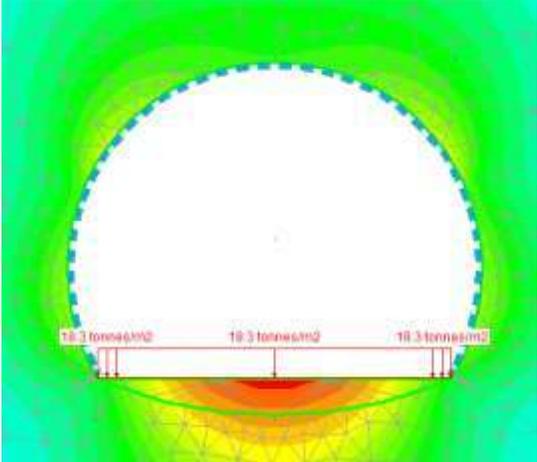
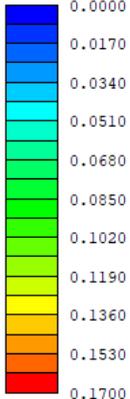
El método Belga tiene dos variantes para terreno poco competente y poco competente variable (tabla 11 y 12), que se igualan hasta la cuarta etapa con el método Belga ordinario visto anteriormente.

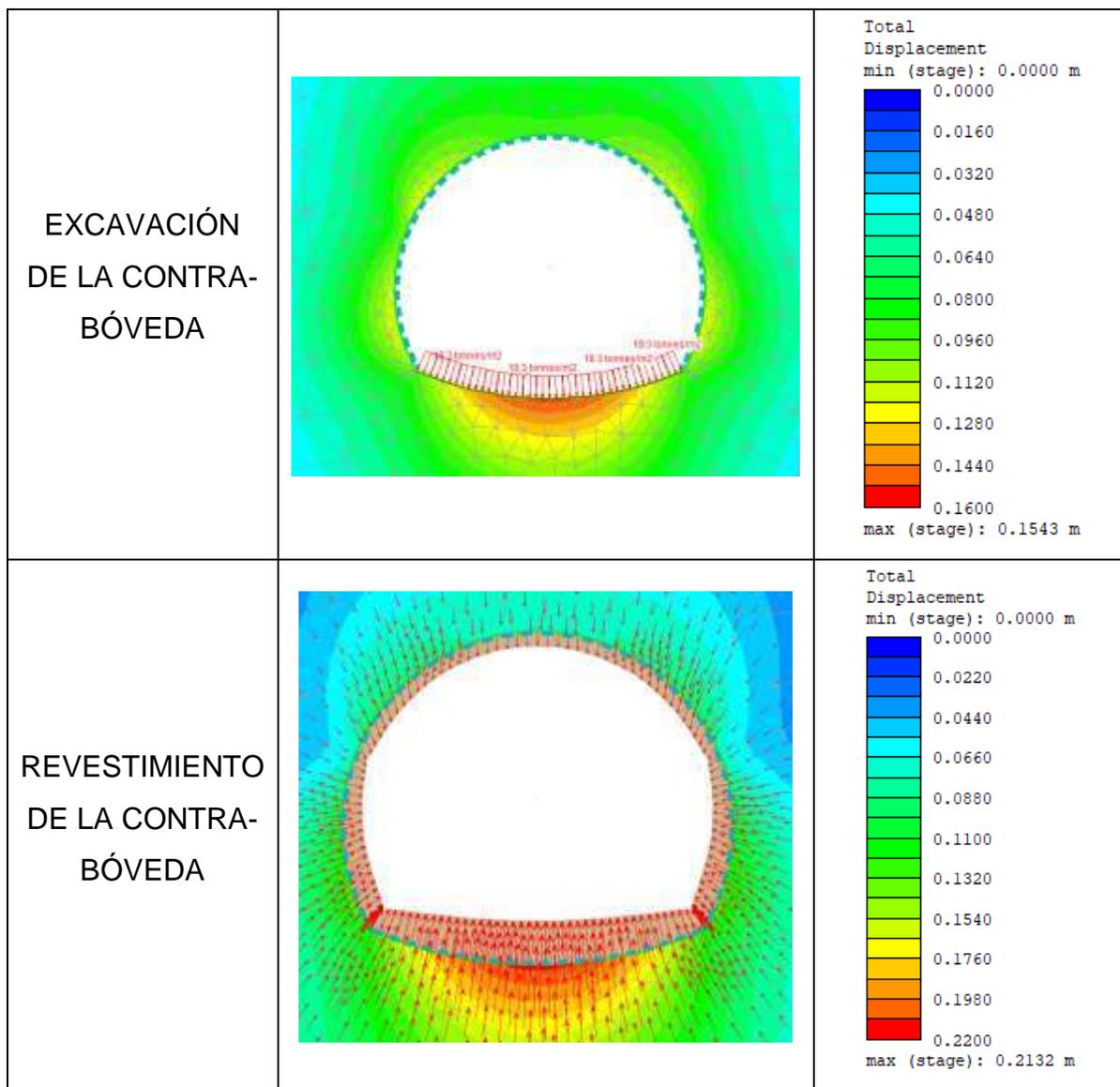
El método empleado para terreno poco competente hace la diferencia en excavar los hastiales después de la bóveda lo que hace que se le genere mayor carga a la periferia del túnel y como se ve en la etapa final de la tabla 11, los hastiales se ven un poco más vulnerables excavando la sección empleando este método para un terreno con una rigidez de 20,000 kPa, aunque la contra-bóveda se deforma solo un poco menos que con el método Belga ordinario, comparando estos dos resulta más conveniente emplear el método Belga estudiado en la sección 5.3.

*Tabla 11. Cinemáticas de deformación del método Belga para terreno poco competente.*

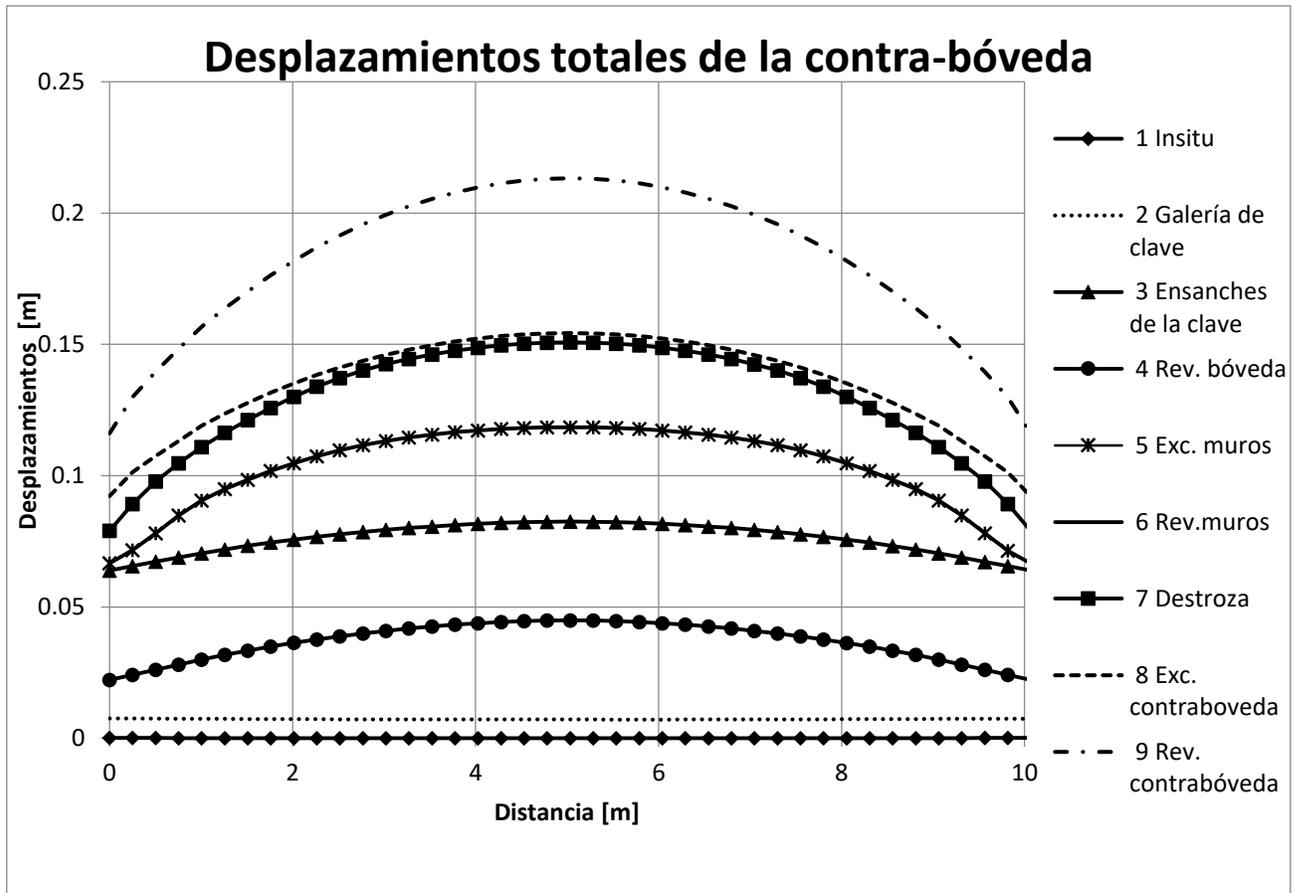
ETAPAS	CINEMÁTICAS DE DEFORMACIÓN DEL SUELO	DESPLAZAMIENTOS
INSITU		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 5px;"> <p>0.0000</p> <p>0.0000</p> <p>0.0001</p> <p>0.0001</p> <p>0.0002</p> <p>0.0002</p> <p>0.0003</p> <p>0.0003</p> <p>0.0004</p> <p>0.0004</p> <p>0.0004</p> </div> </div> <p>max (stage): 0.0004 m</p>



<p>EXCAVACIÓN DE MUROS</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p>  <p>max (stage): 0.1639 m</p>
<p>REVESTIMIENTO DE MUROS</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p>  <p>max (stage): 0.1639 m</p>
<p>DESTROZA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p>  <p>max (stage): 0.1668 m</p>



La grafica 10 muestra el comportamiento de la contra-bóveda, cuando se reviste la bóveda se relaja la contra-bóveda (curva con círculos) de forma contraria a lo que sucede en el método Belga ordinario (grafica 9), en éste cuando se reviste la bóveda la contra-bóveda se deforma aún más, pero como se revisten hastiales después de revestir la bóveda, como se mencionó anteriormente tienden a verse más afectados estos debido a la presión del suelo, de mejor manera se pueden observar las cinemáticas de las tablas 10 y 11 respectivamente.

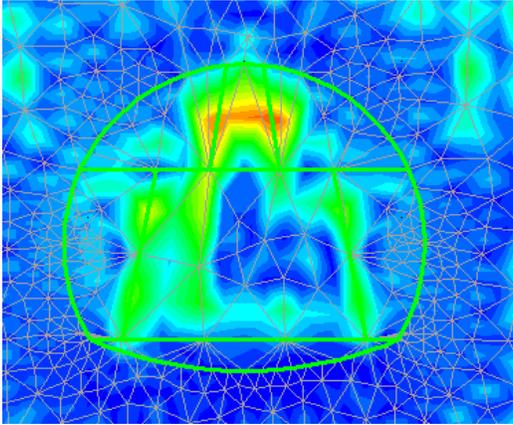
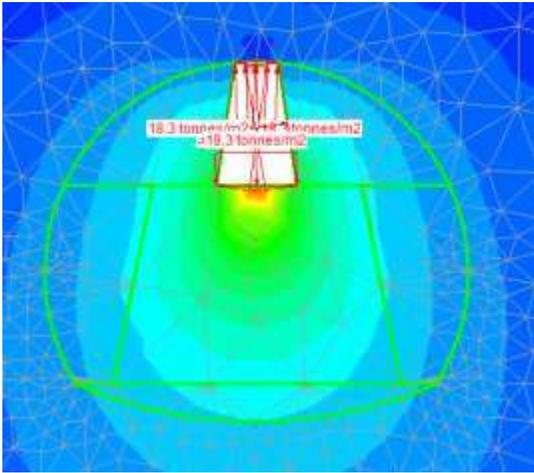
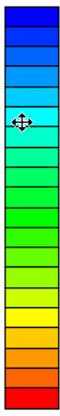


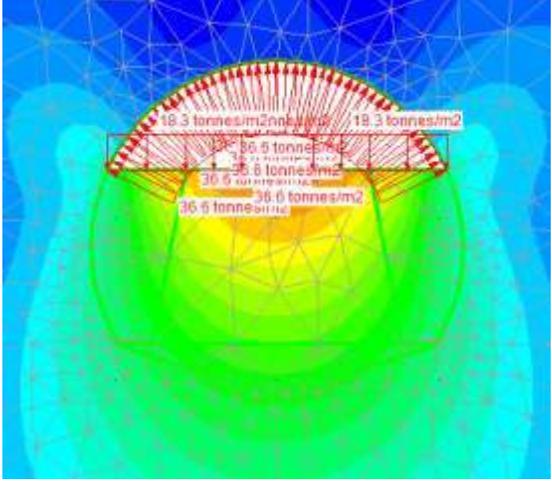
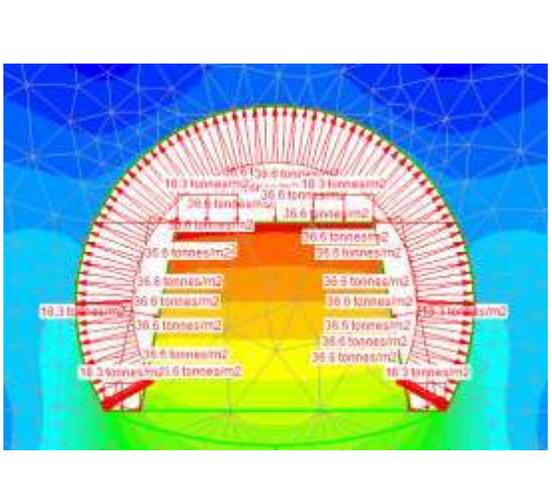
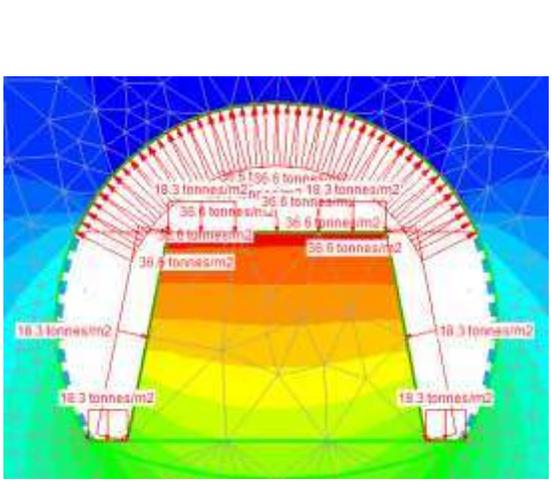
Grafica 10. Desplazamientos totales de la contra-bóveda empleando el método belga para terreno poco competente.

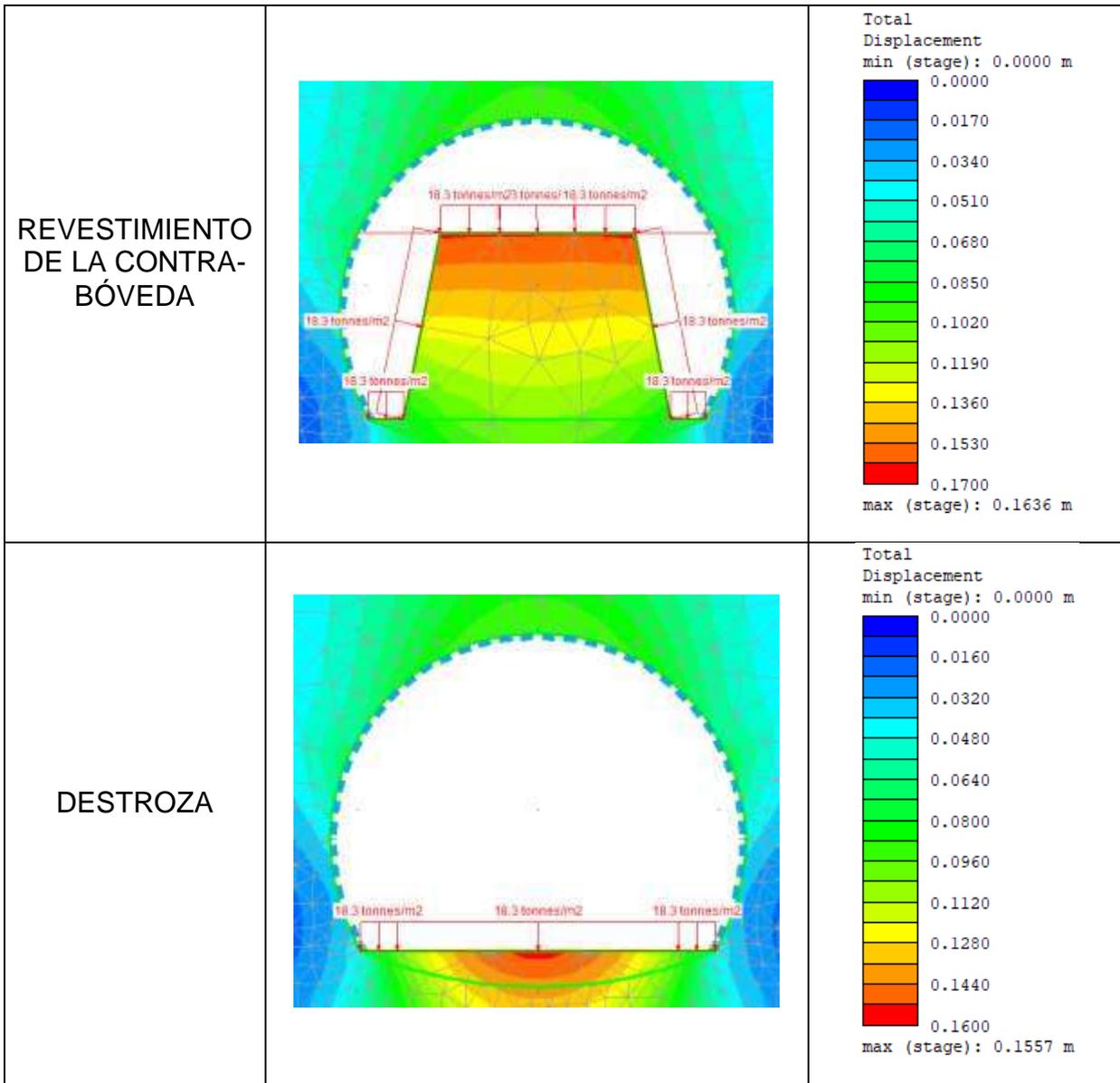
### 5.3.2. METODO BELGA PARA TERRENO POCO COMPETENTE (VARIABLE) CON UN MÓDULO ELÁSTICO DE 20000 kPa.

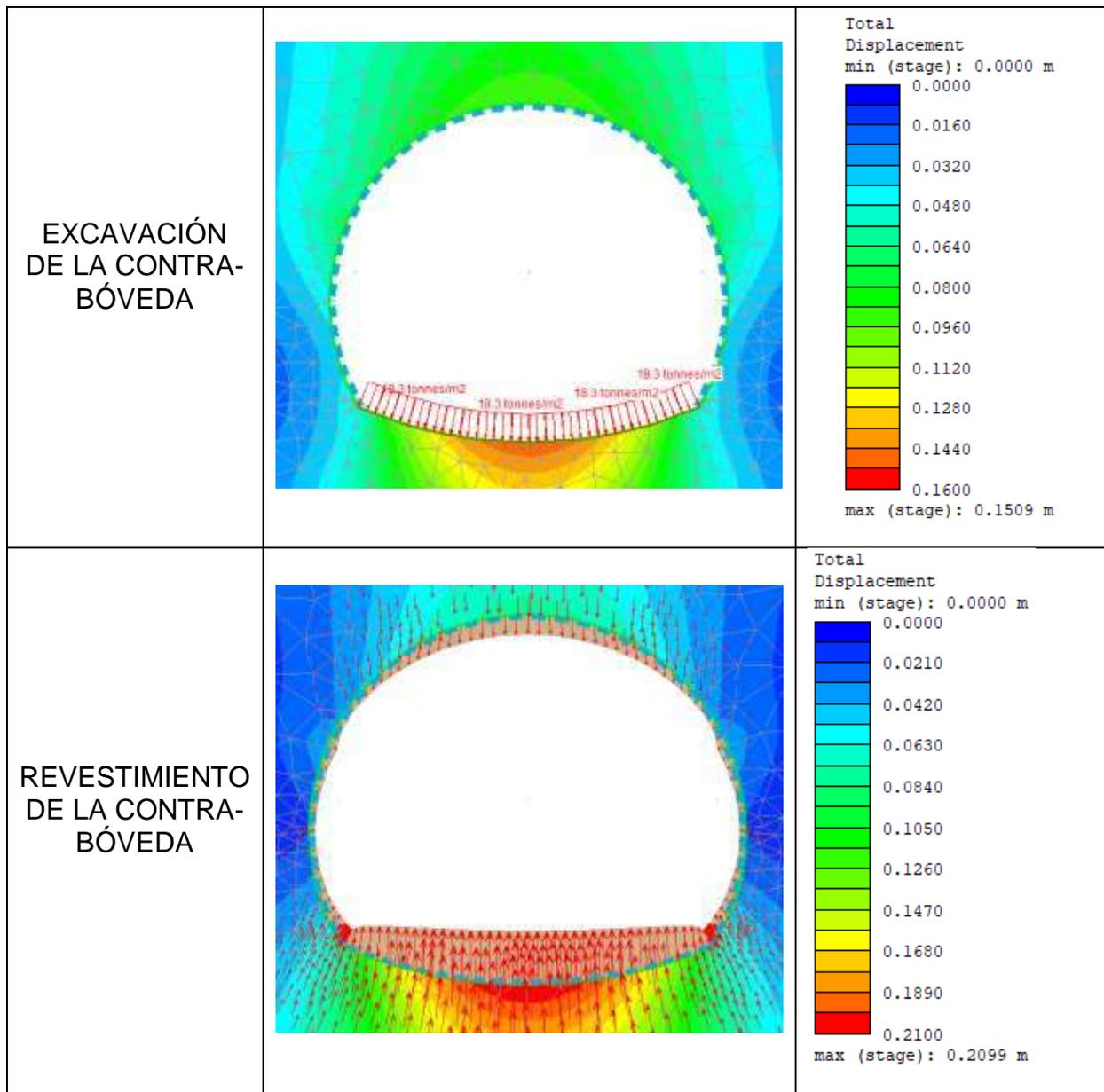
Si comparamos los dos métodos anteriores con este método Belga empleado para terreno poco competente con suelo variable, resulta más adecuado emplear éste ante los dos anteriores (Belga y Belga para terreno poco competente), ya que estaríamos obteniendo resultados más conservadores si lo vemos por el lado de la seguridad, como se ve en la tabla 12 en la última etapa donde se muestra cómo actúa el suelo metiéndose a la sección excavada, este método comienza a revestirse por los hastiales y posteriormente se reviste la bóveda, esto hace que cuando el suelo descansa sobre la bóveda esta se apoye con los hastiales y así tener deformaciones más chicas en la bóveda y contra-bóveda.

Tabla 12. Cinemáticas de deformación del método Belga para terreno poco competente variable.

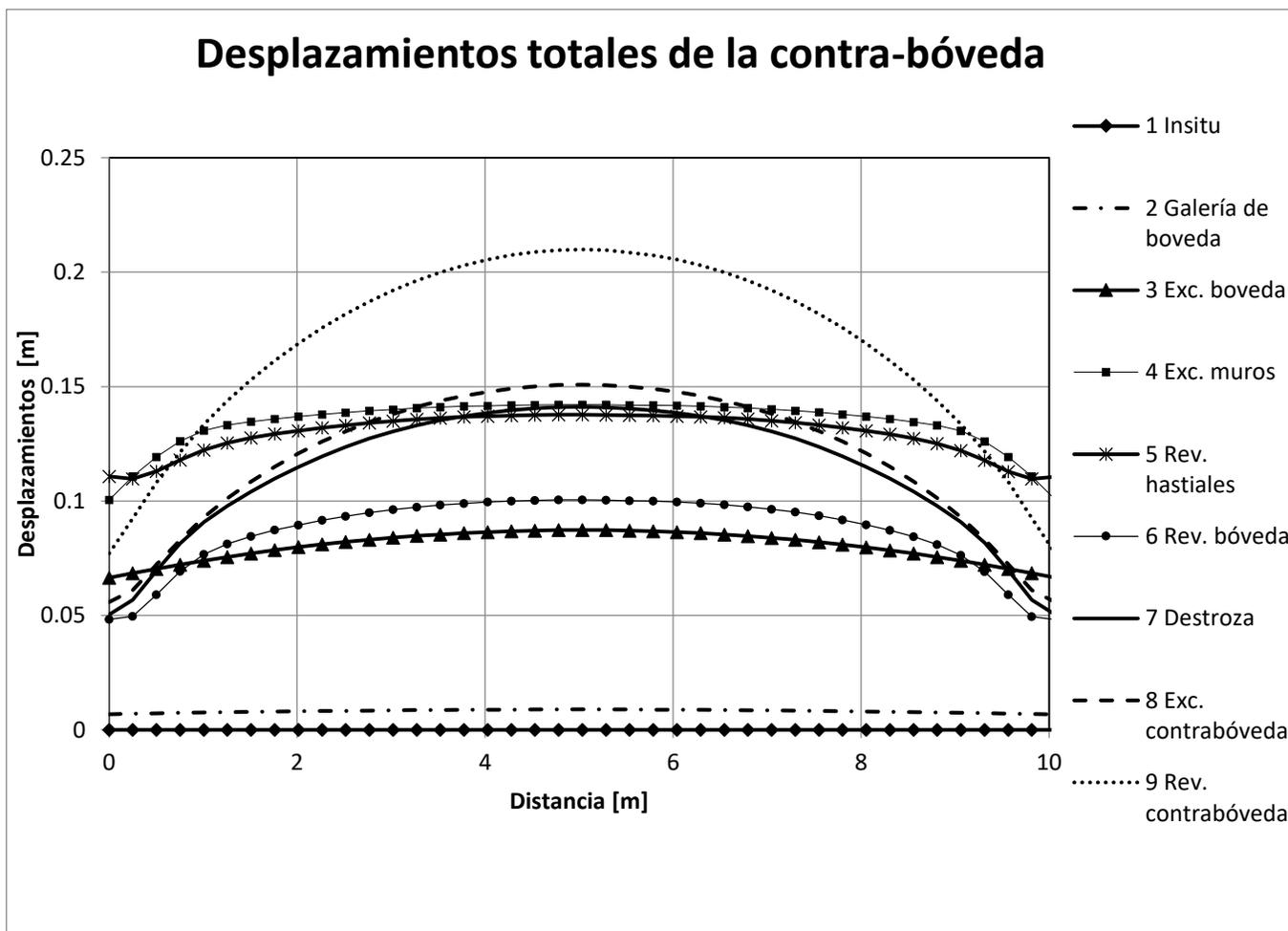
ETAPAS	CINEMÁTICAS DE DEFORMACIÓN DEL SUELO	DESPLAZAMIENTOS
INSITU		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p>  <p>max (stage): 0.0005 m</p>
GALERIA DE BÓVEDA		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p>  <p>max (stage): 0.0352 m</p>

<p>EXCAVACIÓN DE LA BÓVEDA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m 0.0000 0.0160 0.0320 0.0480 0.0640 0.0800 0.0960 0.1120 0.1280 0.1440 0.1600 max (stage): 0.1503 m</p>
<p>EXCAVACIÓN DE MUROS</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m 0.0000 0.0210 0.0420 0.0630 0.0840 0.1050 0.1260 0.1470 0.1680 0.1890 0.2100 max (stage): 0.2055 m</p>
<p>REVESTIMIENTO DE HASTIALES</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m 0.0000 0.0210 0.0420 0.0630 0.0840 0.1050 0.1260 0.1470 0.1680 0.1890 0.2100 max (stage): 0.2045 m</p>





De mejor manera la gráfica 11, nos muestra como esta forma de excavación muestra un comportamiento más lineal y más estable a lo largo del todo el proceso, se aprecian las curvas de excavación de bóveda y contra-bóveda que se mantiene estables y solo se deforman lo necesario a la hora de colocar el revestimiento mismas que no se ven afectadas por las demás etapas del proceso.



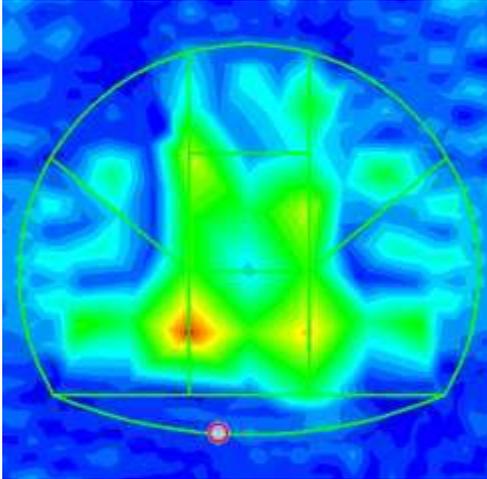
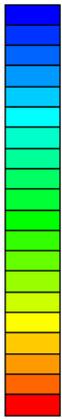
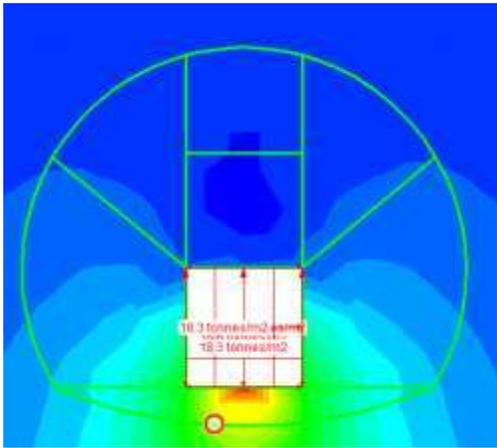
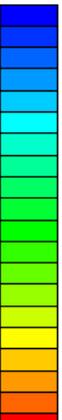
Grafica 11. Desplazamientos totales de la contra-bóveda empleando el método belga para terreno poco competente variable.

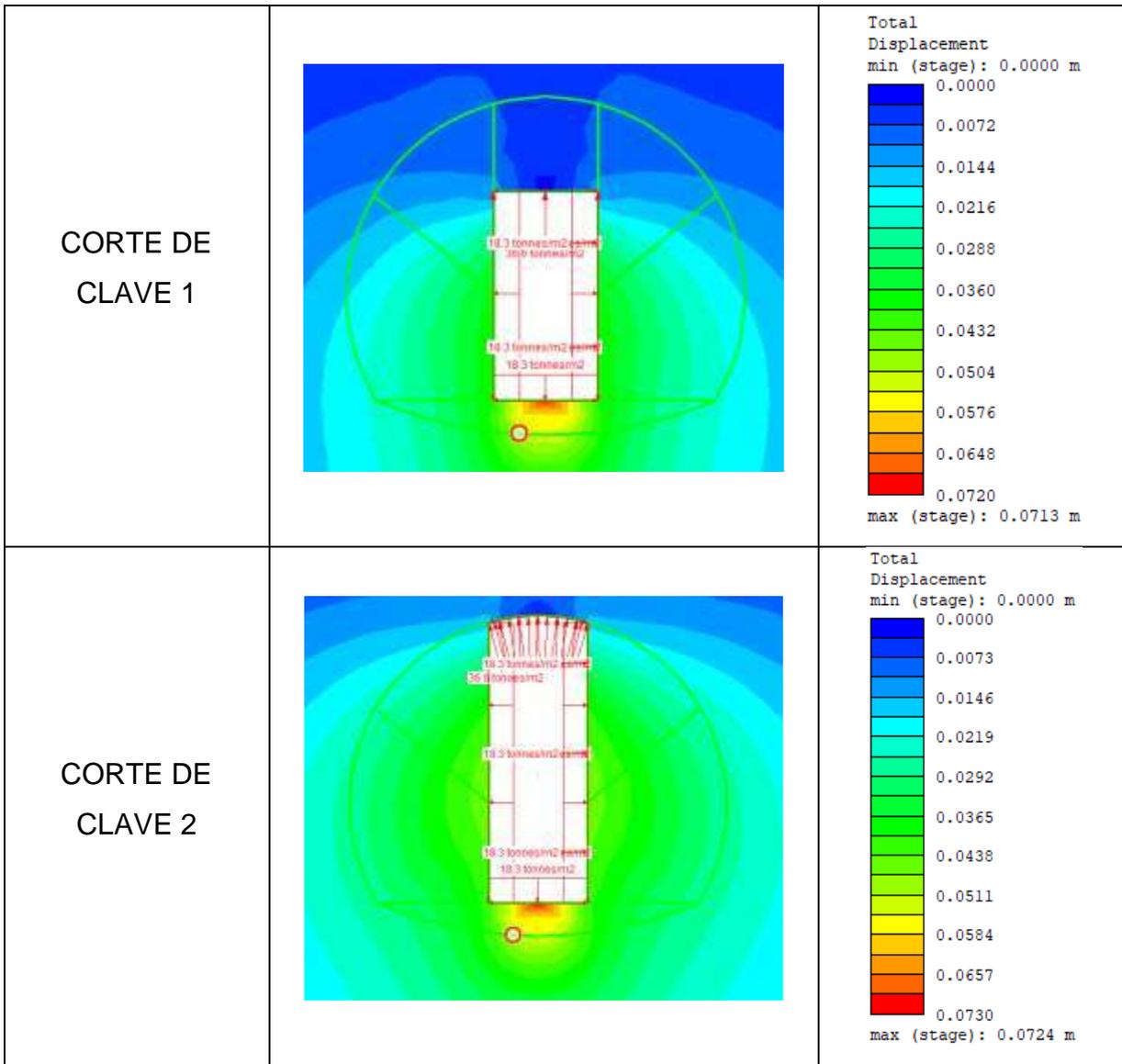
#### 5.4. METODO AUSTRIACO CON UN MÓDULO ELÁSTICO DE 20000 kPa.

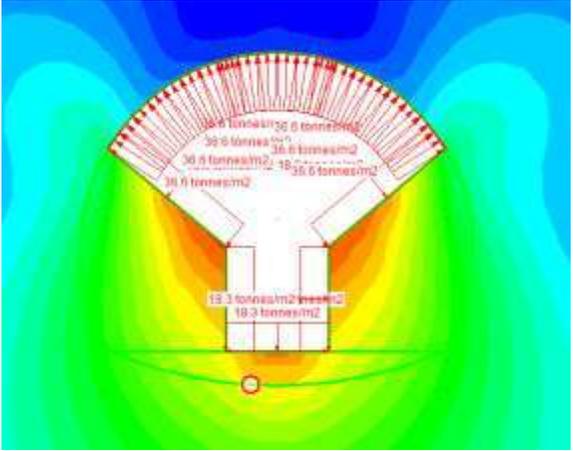
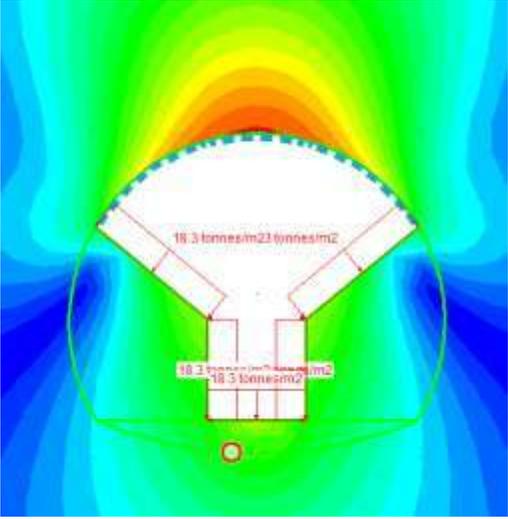
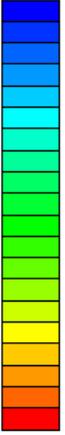
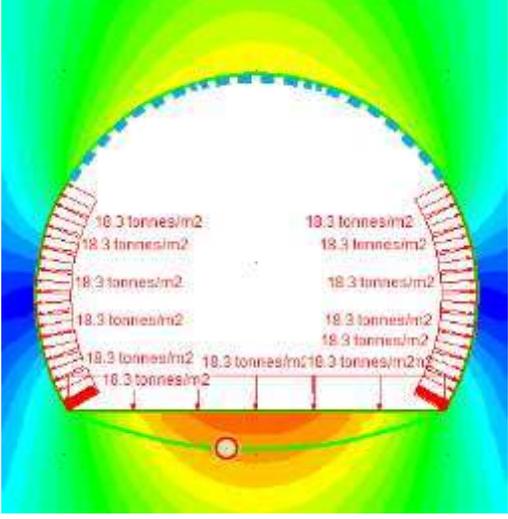
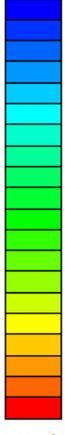
El método Austriaco por su parte resulta muy práctico y seguro en cuanto al comportamiento del suelo en el interior de su excavación (véase tabla 13), hasta la cuarta etapa éste se mantiene sin deformación significativa del suelo, las deformaciones se comienzan a notar a partir de la etapa de excavación de riñones, en esta misma parte se reviste la bóveda y el empuje del suelo se vuelve mayor en esta parte, pero teniendo una deformación que prácticamente será la final de aproximadamente 13 cm, misma que variara muy poco a forma de que avance la excavación, los hastiales no presentan deformación lo que

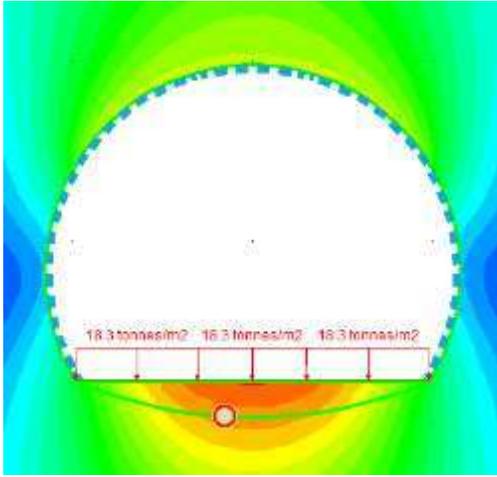
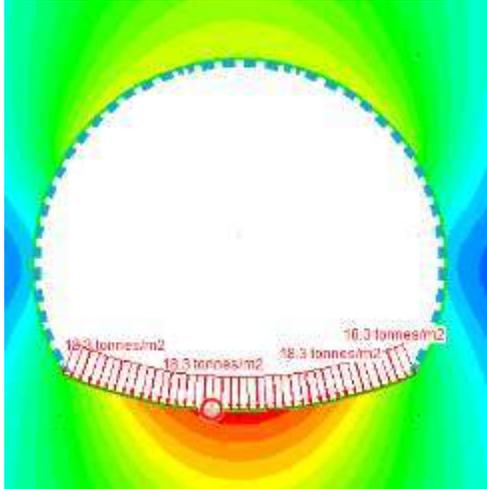
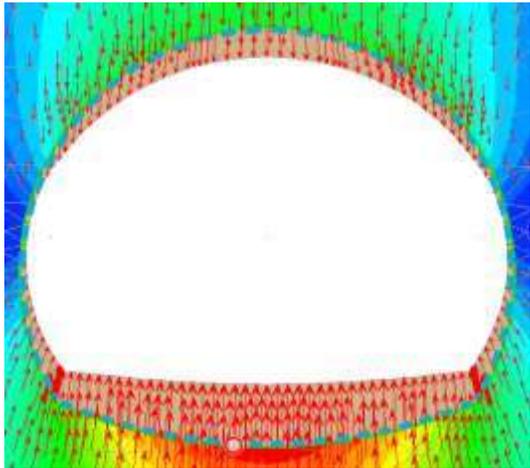
hace que este método sea seguro y más fácil de trabajar, la deformación más crítica como en todos los métodos la presenta la contra-bóveda misma que tendrá una deformación de 23 cm aproximadamente en la etapa final de revestimiento.

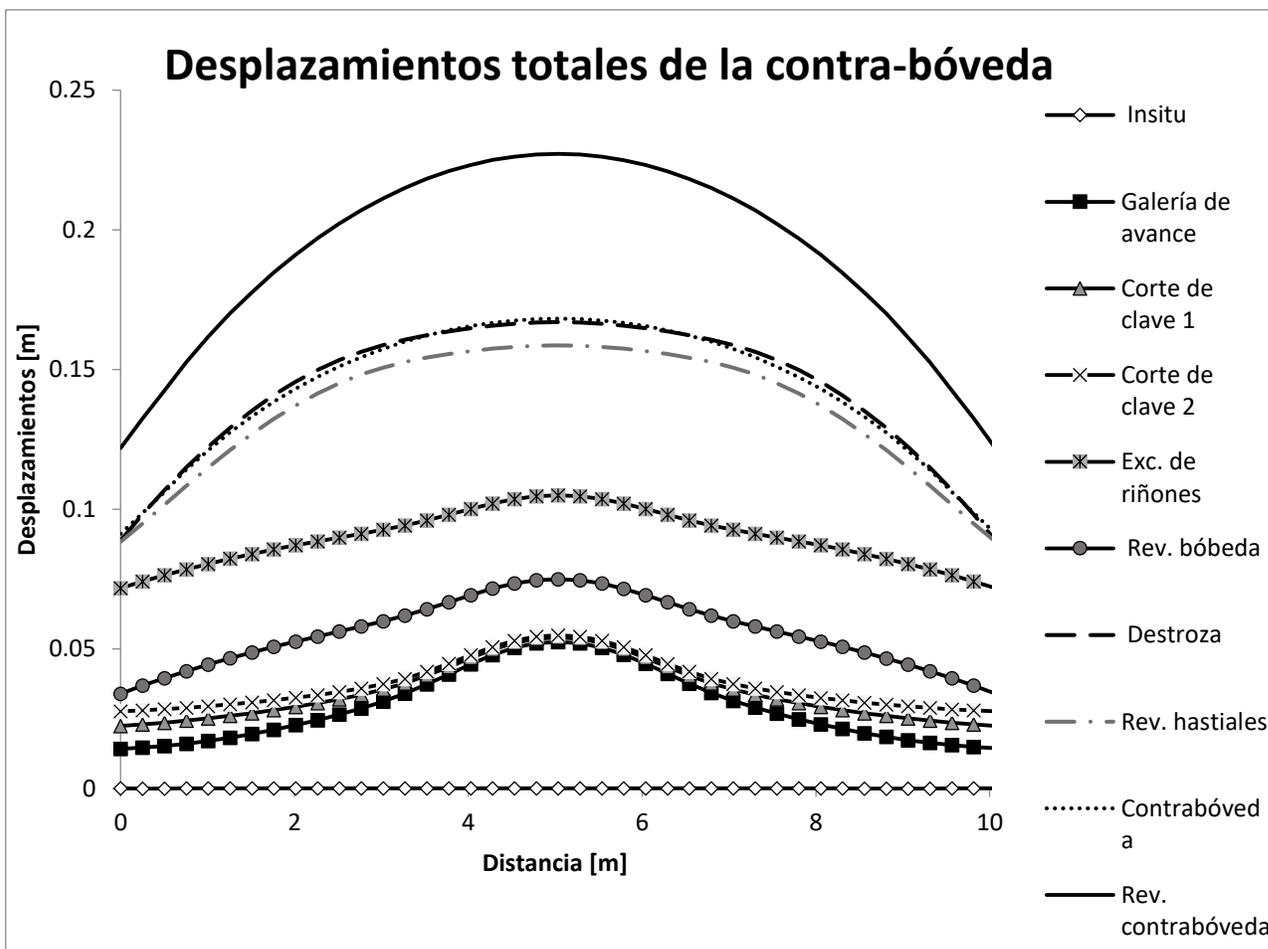
*Tabla 13. Cinemáticas de deformación para el método Austriaco.*

ETAPAS	CINEMÁTICAS DE DEFORMACIÓN DEL SUELO	DESPLAZAMIENTOS
INSITU		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p>  <p>max (stage): 0.0005 m</p>
GALERIA DE AVANCE		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p>  <p>max (stage): 0.0689 m</p>



<p>EXCAVACIÓN DE RIÑONES</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p>  <p>max (stage): 0.1249 m</p>
<p>REVESTIMIENTO DE BÓVEDA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p>  <p>max (stage): 0.1253 m</p>
<p>DESTROZA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p>  <p>max (stage): 0.1803 m</p>

<p>REVESTIMIENTO DE HASTIALES</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m max (stage): 0.1734 m</p>
<p>EXCAVACIÓN DE CONTRA-BÓVEDA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m max (stage): 0.1682 m</p>
<p>REVESTIMIENTO DE CONTRA-BÓVEDA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m max (stage): 0.2272 m</p>



*Gráfica 12. Desplazamientos totales de la contra-bóveda empleando el método Austriaco.*

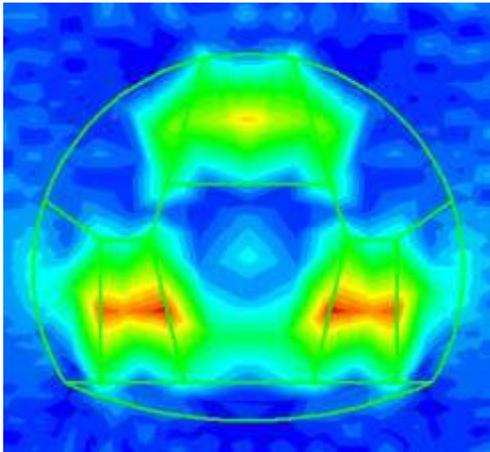
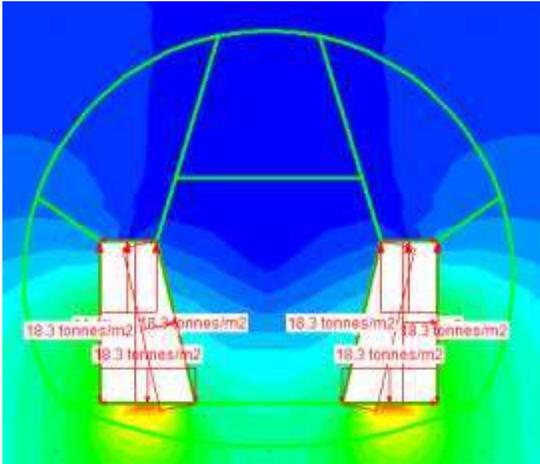
La gráfica 12 por su parte nos da a conocer mediante curvas que las deformaciones máximas de la contra-bóveda ocurren al centro de la misma, aunque realmente las deformaciones son pequeñas en las primeras 4 etapas del método, a partir de la etapa 5 (excavación de riñones) se comienza a notar que en la parte interior de la excavación hay un empuje del suelo y se observa en la curva caracterizada por asteriscos de color negro, las estructura se comienza a relajar a partir de revestir la bóveda y es que ahí se relaja la estructura y los empujes del suelo son prácticamente nulos.

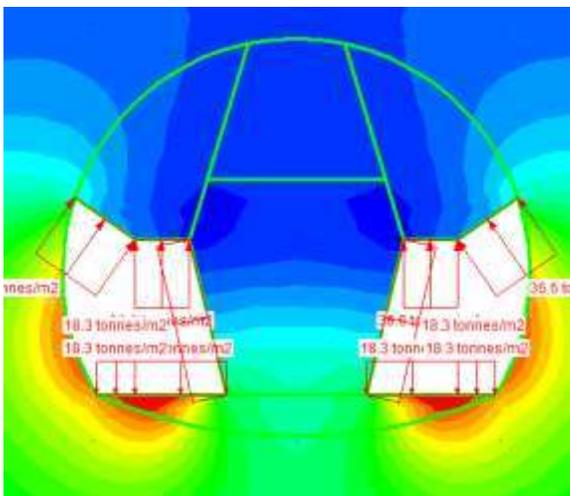
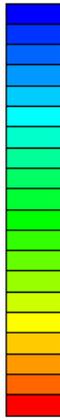
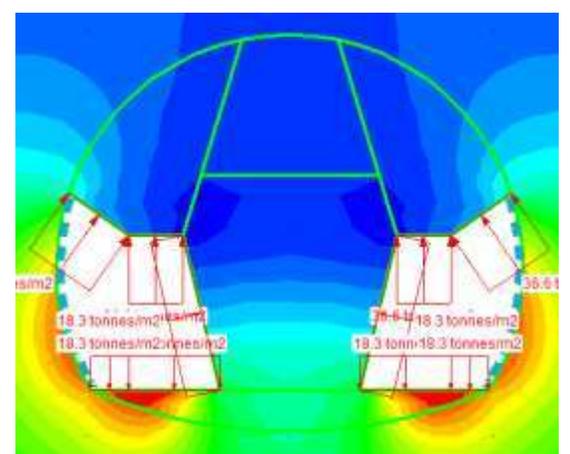
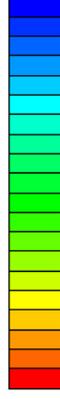
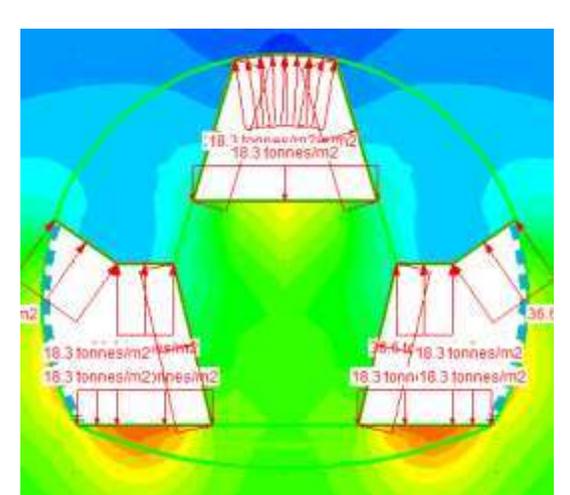
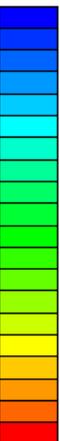
### 5.5. METODO ALEMÁN CON UN MÓDULO ELÁSTICO DE 20000 kPa.

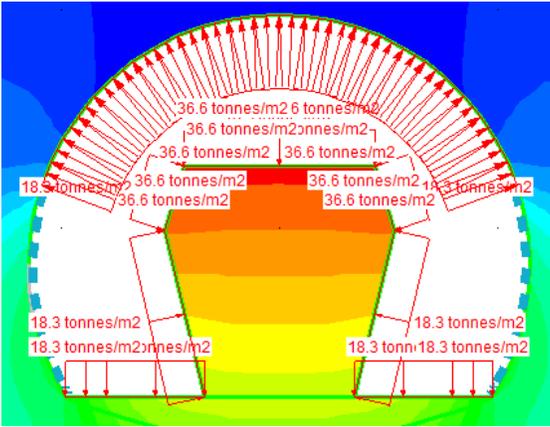
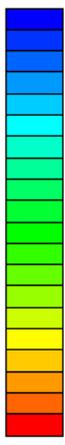
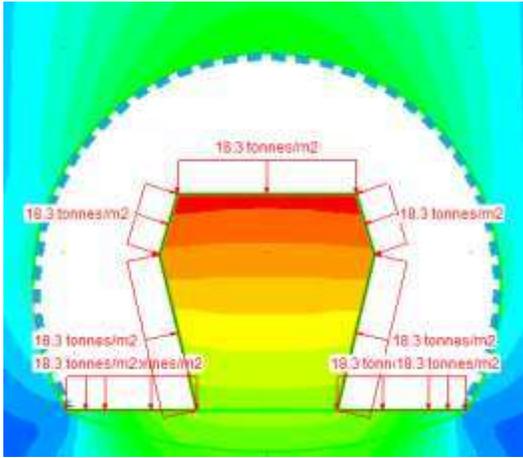
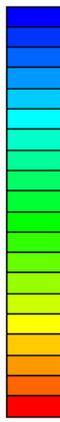
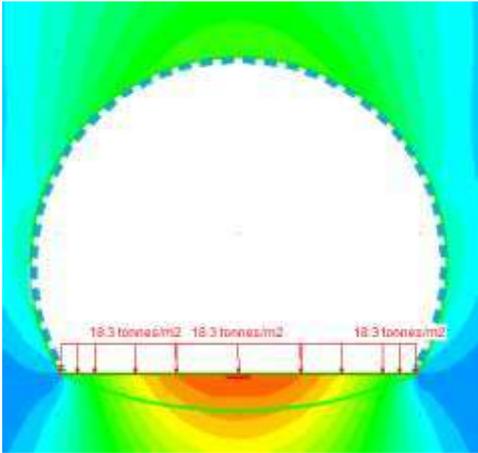
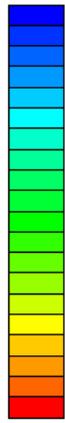
De acuerdo a la tabla 14 donde se ven las cinemáticas de deformación del método alemán, se puede apreciar que este método tiene un proceso un poco más complicado que todos los métodos tradicionales vistos anteriormente, esto solo repercutiría en cuanto al tiempo de excavación y quizá algunas cuestiones económicas, resulta asimilarse al método Belga empleado para terreno poco competente de suelo variable, este también comienza por revestir los hastiales y posteriormente la bóveda, solo que a este método debido al proceso de excavación tiene deformaciones en la bóveda casi nulas o poco considerables mientras que en los demás métodos la deformación de la bóveda ronda entre los 12 y 13 cm en este método fue de 6 cm, misma cinemática de deformaciones se puede reflejar en la gráfica 13 donde se muestran las deformaciones de la contra-bóveda siendo esta la parte más crítica y si comparamos las deformaciones de contra-bóveda de los métodos estudiados en este trabajo, el método Alemán resulta ser el que menos deforma la contra-bóveda aunque la diferencia no sea notoria.

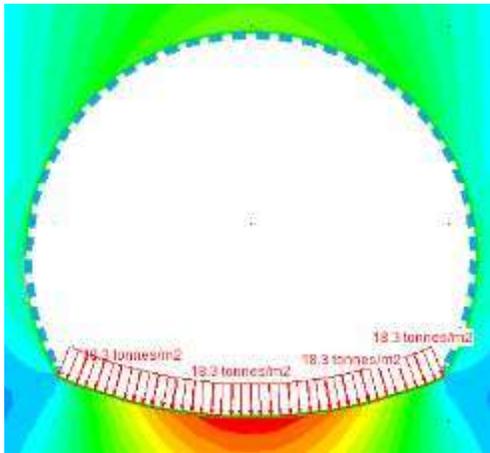
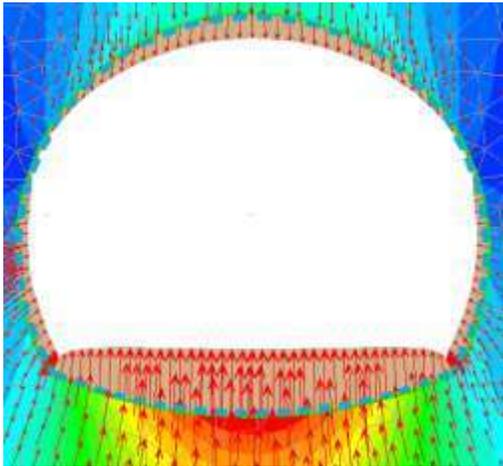
*Tabla 14. Cinemáticas de deformación para el método Aleman.*

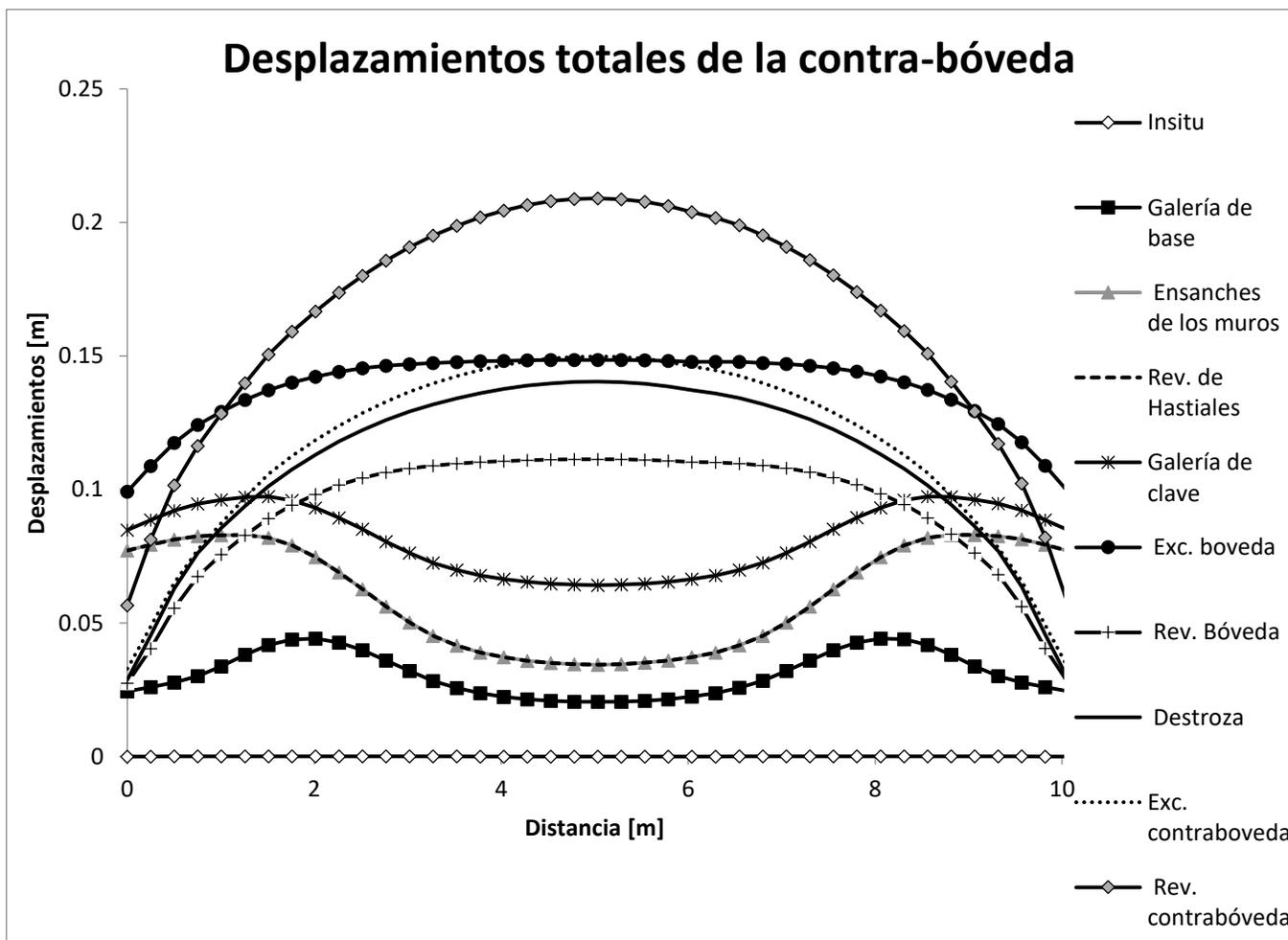
ETAPAS	CINEMÁTICAS DE DEFORMACIÓN DEL SUELO	DESPLAZAMIENTOS
--------	---	-----------------

<p>INSITU</p>		<p>Total Displacement</p> <p>min (stage): 0.0000 m</p> <p>0.0000</p> <p>0.0001</p> <p>0.0001</p> <p>0.0002</p> <p>0.0003</p> <p>0.0003</p> <p>0.0004</p> <p>0.0005</p> <p>0.0005</p> <p>0.0006</p> <p>0.0007</p> <p>max (stage): 0.0007 m</p>
<p>GALERIA DE BASE</p>		<p>Total Displacement</p> <p>min (stage): 0.0000 m</p> <p>0.0000</p> <p>0.0056</p> <p>0.0112</p> <p>0.0168</p> <p>0.0224</p> <p>0.0280</p> <p>0.0336</p> <p>0.0392</p> <p>0.0448</p> <p>0.0504</p> <p>0.0560</p> <p>max (stage): 0.0551 m</p>

<p>ENSANCHES DE LOS MUROS</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p>  <p>0.0000 0.0088 0.0176 0.0264 0.0352 0.0440 0.0528 0.0616 0.0704 0.0792 0.0880</p> <p>max (stage): 0.0875 m</p>
<p>REVESTIMIENTO DE HASTIALES</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p>  <p>0.0000 0.0088 0.0176 0.0264 0.0352 0.0440 0.0528 0.0616 0.0704 0.0792 0.0880</p> <p>max (stage): 0.0875 m</p>
<p>GALERIA DE CLAVE</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m</p>  <p>0.0000 0.0110 0.0220 0.0330 0.0440 0.0550 0.0660 0.0770 0.0880 0.0990 0.1100</p> <p>max (stage): 0.1036 m</p>

<p>EXCAVACIÓN DE LA BÓVEDA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m max (stage): 0.2153 m</p> 
<p>REVESTIMIENTO DE LA BÓVEDA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m max (stage): 0.1766 m</p> 
<p>DESTROZA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m max (stage): 0.1547 m</p> 

<p>EXCAVACIÓN DE LA CONTRA-BOVEDA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m max (stage): 0.1499 m</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0.0000</li> <li>0.0150</li> <li>0.0300</li> <li>0.0450</li> <li>0.0600</li> <li>0.0750</li> <li>0.0900</li> <li>0.1050</li> <li>0.1200</li> <li>0.1350</li> <li>0.1500</li> </ul>
<p>REVESTIMIENTO DE LA CONTRA-BÓVEDA</p>		<p>Total Displacement min (stage): 0.0000 m max (stage): 0.2091 m</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0.0000</li> <li>0.0210</li> <li>0.0420</li> <li>0.0630</li> <li>0.0840</li> <li>0.1050</li> <li>0.1260</li> <li>0.1470</li> <li>0.1680</li> <li>0.1890</li> <li>0.2100</li> </ul>



*Grafica 13. Desplazamientos totales de la contra-bóveda empleando el método Alemán.*

La grafica 13 nos muestra claramente que las deformaciones de este método comienza a ocurrir mayormente en los extremos de la contra-bóveda, esto debido a que el método comienza a excavar a los costados, el método comienza a tener uniformidad a partir del revestimiento de hastiales, se puede apreciar también que la deformación se mantiene constante al centro de la contra-bóveda en las etapas de excavación de la bóveda y excavación de la contra-bóveda y finalmente alcanza su deformación final en la etapa de revestimiento de la contra-bóveda teniendo una deformación final de aproximadamente 21 cm.

Finalmente, y respecto a los resultados obtenidos para las diferentes rigideces, concluimos que la principal diferencia entre excavar suelos con módulos de

elasticidad diferentes son las deformaciones, éstas aumentan a modo de que sean más bajos los valores de rigidez. De modo que si cambiamos el suelo por ejemplo a uno con una rigidez de 12000 kPa, las cinemáticas serán las mismas que como se comportan con un suelo de 20000 kPa de rigidez, solo con deformaciones más significativas en la bóveda y contra-bóveda.

## 6. CONCLUSIONES

- Las deformaciones mayores para cualquier sección de túnel, generadas usando los métodos tradicionales de excavación, siempre se dará en la bóveda y mayormente en la contra-bóveda, por lo que son las partes en las que debemos poner atención para el diseño estructural.
- El método de excavación adecuado no existe ya que el suelo es variante y un análisis numérico, nos permite obtener las aproximaciones de los comportamientos del suelo, colocando datos que pueden variar en campo, lo que hace necesario tener una adecuada caracterización geotécnica y geológica.
- En los resultados numéricos obtenidos se observó que, la parte menos afectada de la sección siempre serán los hastiales, de manera contraria, las partes más afectadas son la bóveda y contra-bóveda como se mencionó en la primera conclusión, siendo los hastiales la sección menos crítica para el diseño de túneles.
- Todos los métodos tradicionales resultan adecuados, ya que el suelo es variante en muchos sentidos, de esta manera no se podría descartar alguno por no ser adecuado o bien, elegir uno como método tradicional definitivo

para excavación de túneles, por lo que cualquiera de los métodos resulta una buena opción de excavación.

- los elementos finitos ayudan a determinar el comportamiento del suelo, como RS2®, sin embargo, son herramientas que se deben manejar con precaución y con un nivel adecuado de geotecnia, para llevar a cabo simulaciones aproximadas a la realidad, tomando en cuenta que los modelos numéricos, muchas veces no permiten simular condiciones reales como por ejemplo la simulación del efecto de las máquinas al momento de la excavación.
- El método Inglés es el más práctico en cuanto a su proceso constructivo, sin embargo tiene una desventaja, que solo se emplea para secciones pequeñas de túneles menores a 15 m<sup>2</sup>.
- De acuerdo a los resultados obtenidos del comportamiento del suelo en base a todos los métodos de excavación, y considerando la integridad de la sección escavada, resulta más adecuado el método Alemán, debido a que en cuestiones numéricas es el que presenta las deformaciones más pequeñas en la parte de bóveda y contra-bóveda, esto debido a que este método comienza por los hastiales que es la zona más segura ante el empuje del suelo en la periferia de la sección, cabe señalar que es el método más complicado de realizar, debido a sus diversas galerías de excavación.
- El método Belga para terreno poco competente para suelo variable, se asemeja a partir de la etapa 5 al método Alemán, y si nos acercamos un poco más a la realidad los terrenos son variantes en cuanto a su composición, lo que nos da a entender que estos dos métodos se adaptarían mejor a cualquier tipo de suelo, esto incluyendo un suelo con las características del suelo de la ciudad de Morelia.

- El empleo de ademe es esencial para retener el terreno y para colocar el revestimiento necesario, sin embargo, el suelo tenderá a deformarse aun existiendo un revestimiento de por medio, a medida que se avanza con las etapas de excavación se relaja la estructura y esta deformación del revestimiento se considera como final.
- Finalmente podemos decir, que los modelos numéricos son un acompañamiento para los procesos de construcción de todas las obras civiles.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Chunga, M. (2019, 30 octubre). Historia de los túneles y su evolución histórica.

Recuperado de:

[https://www.academia.edu/25052471/Historia de los túneles y su evolución histórica](https://www.academia.edu/25052471/Historia_de_los_túneles_y_su_evolución_historica)

[2] Manual y Diseño de Túneles para Carretera. 2016. Dirección General de Servicios Técnicos. SCT.

[3] Gonzales, M. (2012, 17 enero). Mecánica de suelos – Compresibilidad – Ensayos de Compresión. Recuperado de Fuente:

<http://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/fuerzas/mecanica-de-suelos-compresibilidad-ensayos-de-compresión#ixzz3ftspDad8>

[4] Galabru, P. (1965). Tratado de Procedimientos Generales de Construcción Cimentaciones y Túneles. Barcelona, España: Reverté.

[5] Tamez, E., Rangel, J. L., & Olguín, E. (1997). Diseño Geotécnico de Túneles (Ed. rev.). México D.F., México: TGC Geotecnia.

[6] Barqueros, I. (2009, 11 diciembre). Los túneles en Madrid: Métodos clásicos. Recuperado de:

<https://ecomovilidad.net/madrid/tuneles-madrid-metodos-clasicos/>

[7] RS2.....

[8] Soto Saavedra, P.R. (2004): «Construcción de Túneles». Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Construcción Civil.

[9] Estudio Informativo de Integración del Ferrocarril en Sant Feliu de Llobregat» (Barcelona). Recurso electrónico:

[http://www.sanreliu.cat/directori/ProjecteSoterrament/Estudio Integración del Ferrocarril en Sant Feliu de Llobregat/01 Memoria y Anejos/Anejos/](http://www.sanreliu.cat/directori/ProjecteSoterrament/Estudio_Integración_del_Ferrocarril_en_Sant_Feliu_de_Llobregat/01_Memoria_y_Anejos/Anejos/)

[10] Ortiz-Prado, A., Ruiz-Cervantes, O., Ortiz-Valera, J. A. (2013). Modelo De Procesos de Manufactura. Capítulo 8 Conceptos básicos del método por elemento finito. Apuntes de la División de Ingeniería Mecánica e Industrial de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

[11] Braja M. D. (2001). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Cengage Learning.

[12] Rangel, J. L, & Ayala, A. G. (s.f.). Evaluación numérica de los esfuerzos incidentes en el revestimiento durante la construcción de un túnel en roca. México D. F.: instituto de Ingeniería, UNAM.

[13] Hernández-Desentis, R. D. (2014). “Planeación en túneles y obras subterráneas.” Proc. Cuarto Congreso Mexicano de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, México.

[14] Broms, B. B., and Bennermark, H. (1967). “Stability of Clay at Vertical Openings.” Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 93(SM1), 71-94.

[15] Terzaghi, K. (1942). “Liner-Plate Tunnels on the Chicago (IL) Subway.” Proc., American Society of Civil Engineers, ASCE 68(6), 862-899.

[16] Equihua-Anguiano, L. N., Rubio-Saldaña, I., Orozco-Calderón, M., Arreygue-Rocha, J. E., and Chávez-Negrete, C. (2018). “Equivalent FEM meshes from Axisymmetric (AXID) to three (3D) dimensions applied to tunnels in clay.” In: Shu S., He L., Kai Y. (eds) New Developments in Materials for Infrastructure Sustainability and the Contemporary Issues in Geo-environmental Engineering. GeoChina 2018. Sustainable Civil Infrastructures. Springer, Cham, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95774-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95774-6_2).

[17] Hanumanthappa, M., and Maji, V. B. (2017). “Empirical and Numerical Analyses of Tunnel Closure in Squeezing Rock.” International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 3(38), Springer ISBN 2199-9260, doi.org/10.1007/s40891-017-0118-2.

[18] Hughes, T. J. (2000). The Finite Element Method. New York: DOVER.  
J., T. (s.f.). the finite element method.

[19] Rubio, C., & Romero, V. (2010). Método de elemento finito: Fundamentos y aplicaciones con ansys. Editorial Limusa.