



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO PARAMÉTRICO PARA OBTENER EL COMPORTAMIENTO DE SUELOS EN TÚNELES

Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil

Presenta:

Roberto Sánchez Rodríguez

Asesor de tesis:

Dr. Jaime Saavedra Rosales

Co - asesor de tesis:

Dra. Luisa Nicté Equihua Anguiano

Morelia, Michoacán. Agosto del 2021.



Contenido

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	4
PALABRAS CLAVE.....	4
OBJETIVOS	5
Objetivo general.....	5
Objetivos particulares.	5
1. INTRODUCCIÓN	6
2. TÚNELES	7
2.1. GENERALIDADES DE LOS TÚNELES.....	7
2.2. ESTADO ACTUAL DE LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN MÉXICO	8
3. METODOLOGÍA	10
3.1. INTRODUCCIÓN AL ELEMENTO FINITO	10
3.2. LEYES CONSTITUTIVAS O MODELOS CONSTITUTIVOS	13
3.2.1 TEORÍA DE MOHR - COULOMB	14
3.2.2 TEORÍA DE HOEK & BROWN	15
3.3. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE P_a	16
3.4. CURVA CARACTERÍSTICA.....	17
4. PROPIEDADES GEO - MECÁNICAS, GEOMETRÍA Y CARACTERÍSTICAS DE LA MODELACIÓN DEL TÚNEL.....	19
4.1. GEOMETRÍA DE LA SECCIÓN PROPUESTA DEL TÚNEL	19
4.2. PROPIEDADES GEOMECAÑICAS DEL SUELO.....	23
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	23
5.1. DETERMINACIÓN DE PRESIÓN P_a	24
5.2. EJEMPLIFICACIÓN DE LA OBTENCIÓN DE UNA CURVA CARACTERÍSTICA... 24	
5.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS VARIANDO LA RELACIÓN DE POISSON... 37	
5.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS VARIANDO EL MÓDULO DE ELASTICIDAD. 44	
5.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS VARIANDO LA PROFUNDIDAD DEL EJE DE LA EXCAVACIÓN.....	51
5.6. NORMALIZACIÓN DE LAS CURVAS CON RESPECTO AL MÓDULO DE ELASTICIDAD	66
5.6.1 COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS ECUACIONES DE LAS CURVAS NORMALIZADAS COMPARANDO CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SOFTWARE RS2 ®.	73



6. CONCLUSIONES..... 77
Referencias 79



AGRADECIMIENTOS

Los logros nos son nada si no se tiene con quien compartirlos, y con quien más se comparten sino con las personas que supieron apoyarme, hacerme crecer y que me sirvieron como ejemplo e inspiración, agradezco por la paciencia, conocimiento y experiencias compartidas.

Mis padres que nunca me dejaron sin apoyo a lo largo de mi formación profesional, a mi co – asesora, doctora Luisa Nicté Equihua Anguiano y asesor, doctor Jaime Saavedra Rosales por las enseñanzas y tiempo compartidos. Agradecer a la arquitecta Isabel Leslie Vargas Sánchez por todo el apoyo brindado en todos los aspectos.



RESUMEN

En esta tesis se presenta un análisis en dos dimensiones de un túnel carretero con sección transversal de herradura. Éste fue llevado a cabo mediante un software comercial basado en el Método de Elementos Finitos para la obtención de deformaciones y esfuerzos en el medio. Los parámetros del suelo fueron variados, obteniendo así resultados diferentes en cada modelo.

Los resultados obtenidos mediante el análisis fueron utilizados para presentar un nomograma mediante el cual se puede calcular de manera más sencilla las deformaciones o la presión en la periferia de la sección transversal del túnel. Dicho nomograma fue logrado gracias a la normalización de los resultados obtenidos con respecto al módulo de elasticidad del suelo en el cual se encuentra la excavación.

ABSTRACT

In this work is presented a two-dimensional analysis of a highway tunnel which has a horseshoe cross section. This analysis was performed by using a commercial software, based on Finite Element Method, to acquire displacements and forces in the medium. The soil parameters were varied to obtain different results on each model.

Results of this analysis were used to obtain and present graphics, through which displacements and pressures on the periphery of the tunnel cross section, can be obtained easier than doing a complete analysis. Results were normalized respect to the different material's elastic modulus.

PALABRAS CLAVE

Elemento, modelo, desplazamiento, presión, normalización.



OBJETIVOS

Objetivo general

Simplificar el proceso de cálculo de deformaciones y presiones en dos dimensiones en la periferia de la excavación de un túnel con sección de herradura, utilizando un nomograma el cual sirve de partida para obtener las ecuaciones con las que es posible realizar estos cálculos.

Objetivos particulares.

- Analizar la curva característica de presiones – deformaciones, obtenidas por medio del método del elemento finito, de una excavación de un túnel con sección de herradura en un software de modelación numérica en dos dimensiones.
- Crear varios modelos del mismo túnel, pero variando las características geo - mecánicas del material, así como la profundidad a la que se encuentra la excavación para obtener grupos de curvas características diferentes.
- Integrar las diferentes curvas en un solo nomograma usando una ecuación para normalizarlas.
- Obtener el nomograma y las ecuaciones adecuados para usarlos en conjunto para determinar presiones o deformaciones en la periferia del túnel analizado.



1. INTRODUCCIÓN

Los humanos siempre hemos tenido la necesidad de explorar todo nuestro entorno, ya sea solo para reconocimiento o para explotar los recursos naturales a nuestra disposición. Una consecuencia de esta necesidad por explorar y explotar da como resultado, sin duda alguna, el desarrollo de técnicas constructivas tan complejas como lo es una excavación y más específicamente la excavación de un túnel.

Los primeros túneles en la historia fueron desarrollados con la intención de extraer minerales del subsuelo y su creación se remonta hacia finales de la edad de piedra, mientras se llevaban a cabo los primeros descubrimientos metalúrgicos. Los túneles destinados a la circulación de viajeros y mercancía son relativamente recientes, datan de hace más de dos siglos y medio, del año 1750 (Enrique Tamez González, José Luis Rangel Núñez, Ernesto Holguín, 1997).

Actualmente, los túneles son utilizados para llevar a través de ellos agua potable, así como sistemas de alcantarillado en las ciudades transportando aguas negras, como parte de la infraestructura ferroviaria y otros tipos de medios de transporte como los metros en las ciudades, además en la minería, etc. Una de las grandes ramas del estudio de los túneles se deriva de las carreteras, a través de las cuales se transportan mercancías, servicios, personas, etc., siendo infraestructura civil de suma importancia, debido a que marcan la pauta en el desarrollo económico de las regiones y de los países. Al momento de trazar los caminos, los túneles representan una opción viable para atravesar grandes obstáculos permitiendo además disminuir el impacto ambiental al respetar la superficie y la flora y fauna existente en la zona y en la cual, utilizando alguna otra solución ingenieril como puede ser un corte del terreno, se produciría un daño al ecosistema diferente.

De acuerdo a lo especificado anteriormente, los túneles representan una parte muy importante dentro de la ingeniería civil, retando además a los ingenieros debido a la variabilidad de las características en el medio a excavar. En ese sentido, para el análisis de éstos, es necesario el llevar a cabo estudios particulares de cada caso, sin embargo, es requerido contar con métodos prácticos que permitan hacer cálculos rápidos y sencillos cuando se necesiten.

Este trabajo presenta un estudio con elementos finitos en dos dimensiones de túneles con la misma geometría de su sección transversal, pero analizados con diferentes propiedades mecánicas del material en el que están excavados, así como también varía la profundidad de éstos con respecto de la superficie, incluyendo las variables que llegan a influir con mayor importancia el análisis de la excavación respecto a los esfuerzos y deformaciones producidos en éstas.



2. TÚNELES

En este capítulo se hace una breve referencia a la descripción generalizada de los túneles y se presenta una vista general de la construcción que se ha desarrollado en México de acuerdo a lo reportado por la SCT (Secretaría de comunicaciones y Transportes). Es importante mencionar que únicamente se presenta el desarrollo en cuanto a túneles en el transporte carretero.

2.1. GENERALIDADES DE LOS TÚNELES

La frase “la forma sigue a la función” es muy acertada si se habla de túneles, ya que, en las excavaciones de éstos, los ingenieros lidiamos con el problema de optimizar el área de su sección transversal, y con éste, determinar la capacidad y diseño del túnel para que sea funcional. Por lo anterior, en la práctica se tienen varios tipos y formas de secciones transversales según el uso que vaya a tener. Además del destino para el que vaya a ser utilizado, las condiciones del terreno en el que se vaya a realizar la excavación también son factores que intervienen para la selección de la forma y capacidad del túnel, algunas de estas formas se ilustran en la *Figura 1*.

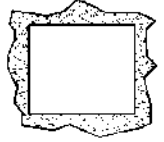

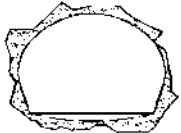
	Sección cuadrada o de caja
	Sección circular
	Sección en herradura con o sin contraclave

Figura 1. Distintas geometrías de sección transversal de túneles de acuerdo a su destino.

Las partes de un túnel con sección transversal de herradura se esquematizan en la *figura 2.*, típica geometría de un túnel carretero.

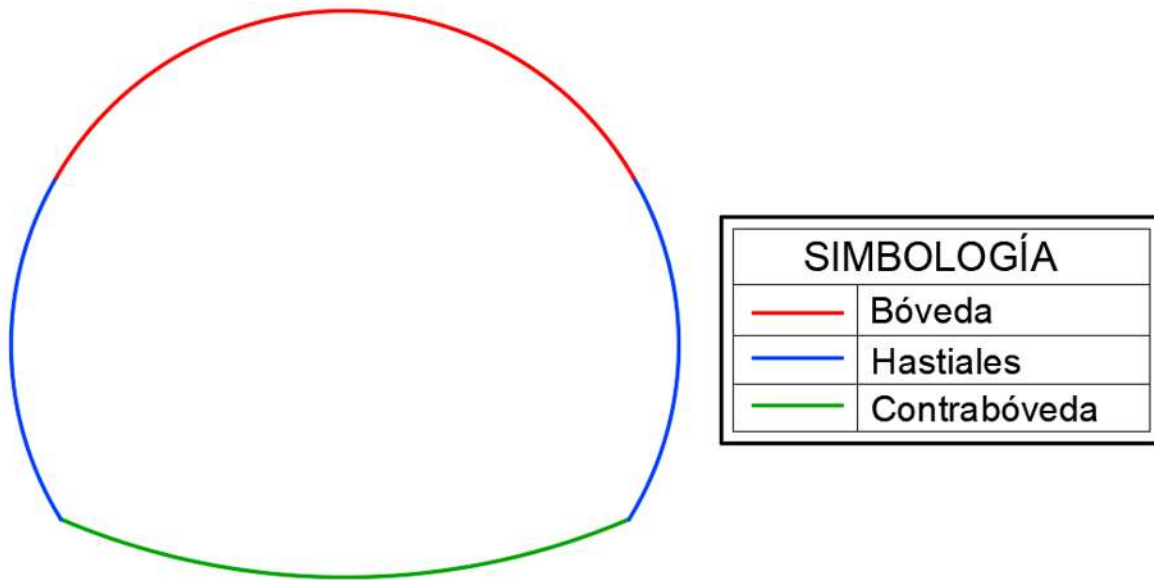


Figura 2. Esquemática de las partes en que se divide la sección transversal en herradura.

2.2. ESTADO ACTUAL DE LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES 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 muy corto en la carretera de Cuetzalan, Puebla, destruido a finales de los años cincuenta y el mítico túnel de Ogarrio, inaugurado en 1901, pero que funcionó con tranvía hasta 1908, luego con carretones tirados por bestias hasta 1950 en que dio paso a los primeros vehículos motorizados a la ciudad de Real de Catorce. Más reciente fue la construcción del túnel de acceso a la hidroeléctrica de Chicoasén (1979), con unos 600 m de longitud, excavado en roca caliza sin revestir. A principios de los años 80 se construyó el túnel carretero del libramiento de la ciudad de Puerto Vallarta de unos 450 m de longitud aproximadamente (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2016).

Más tarde, entre 1989 y 1993 se construyeron 3 importantes túneles en la autopista Cuernavaca- Acapulco; Tierra Colorada (400 m de longitud), Agua de Obispo (450 m de longitud) y los Querendes. Este último, aunque muy corto (100 m.) fue, sin embargo, el túnel de carretera de mayor sección construido hasta entonces en México (y posiblemente en el mundo), con un área transversal de cerca de 200 m², un claro de 22 m y altura cercana a los 14 m. Este túnel cuenta con cuatro carriles de circulación más banquetas. Con la construcción de esta obra además se rompió con el tabú de que el “mínimo techo para construir un túnel debería de ser tres veces el claro”. En



este caso el techo o cobertura era de solo 15 m (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2016).

Relativamente pocos túneles carreteros fueron construidos en México antes de la primera década de este siglo, así que, podría decirse que en la década anterior (2010 – 2019) se ha iniciado la verdadera era para los túneles en México, marcando la pauta los de la autopista México – Toluca. Dichas obras fueron parte de autopistas de cuota modernas con especificaciones muy rigurosas en trazo y construcción, especificaciones que necesitaban de técnicas de excavación, soporte, medición y análisis numérico que correspondieran a su modernidad y exigencia.

Recientemente en un periodo de 6 años se proyectaron y construyeron 69 túneles en las autopistas Durango – Mazatlán y México – Tuxpan con una longitud total de 26,400 m.

De estos 69 túneles mencionados, 61 se encuentran en la carretera Durango – Mazatlán, considerado uno de los proyectos carreteros técnica y constructivamente más ambiciosos del país en esta década. Destaca entre éstos el túnel El Sinaloense con una longitud de 2,795 m, el cual cumple con exigentes especificaciones de seguridad, incluida una galería de emergencia con salidas de conexión. Este proyecto demandó un gran esfuerzo de todos quienes lo llevaron a cabo al integrar el diseño, secciones geométricas y los procesos constructivos que se aplicaron.

Los estudios y proyectos de este túnel se realizaron en un periodo de 6 años, y en toda la duración de su construcción se llevó a cabo un seguimiento geológico – geotécnico, sin embargo, durante la ejecución de la obra se llevaron a cabo varias adecuaciones y mejoras respecto al proyecto original. Las razones principales de dichos cambios fueron: la geología real que iba resultando a medida que se excavaba y se daba soporte al túnel; debido a su magnitud se necesitó de la coordinación de múltiples técnicas constructivas y maquinarias empleadas por las diferentes empresas, y a causa de su duración se implementaron nuevas tecnologías que surgían gradualmente durante el proceso.

En cuanto al análisis y diseño de los túneles, actualmente se usan tres métodos para solucionar dichas problemáticas; los métodos empíricos, analíticos y numéricos. La solución del problema de la excavación debe elegirse de acuerdo a los recursos de los cuales se disponga, tanto económicos, como humanos y herramientas.

Los métodos numéricos se apoyan en los métodos analíticos, y al igual que éstos, son utilizados para predecir el posible comportamiento de una excavación, del suelo y revestimiento, debido a su relación, se pueden comparar resultados entre ambos métodos. Cabe resaltar que estas obras representan una alta complejidad debido a la variabilidad de los materiales al momento de la construcción, lo que demanda de un excelente conocimiento en geotecnia y a su vez en el uso de modelos numéricos para llevar a cabo con éxito este tipo de infraestructura civil.



3. METODOLOGÍA

Este capítulo presenta los métodos y principios técnicos usados para el desarrollo de este trabajo de tesis.

3.1. INTRODUCCIÓN AL ELEMENTO FINITO

El Método del Elemento Finito (MEF) es uno de los tres métodos numéricos que son los más utilizados convencionalmente en la solución de problemas de ingeniería, los otros dos son el método de diferencias finitas y el método de elementos discretos. En esta investigación se aplicó el MEF debido a que es con el que el software RS2 Rocscience® ejecuta los modelos.

Se le llama Método del Elemento Finito (MEF), a la técnica de sustituir el medio a analizar en zonas delimitadas (finitos) con una geometría regular, dichas zonas son llamadas elementos. Los elementos se conectan entre sí por medio de nodos, normalmente ubicados en las esquinas de cada uno de los elementos, y también a lo largo de sus lados, si se requiere, a este proceso se le denomina discretizar el medio. La *Figura 3.*, presenta los tipos de elementos usados en los softwares en dos dimensiones o deformación plana (2D), así como la posición de los nodos en cada elemento.

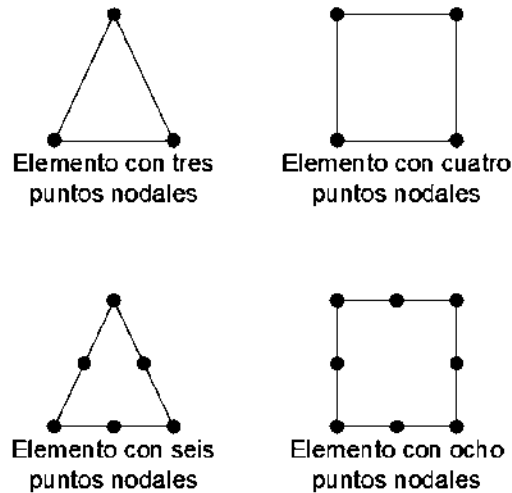


Figura 3. Elementos con diferentes geometrías y nodos.

La combinación de los nodos y los elementos limitados geoméricamente recibe el nombre de malla de elementos finitos y podemos conocer el número de elementos que la integran y el número de nodos mediante los cuales se modela el medio. El número de nodos y de elementos está directamente relacionado con la precisión matemática que tiene el medio analizado, por lo que, a mayor número de elementos y nodos, la precisión en los cálculos es mayor, pero el trabajo computacional requerido es proporcional a esta precisión.

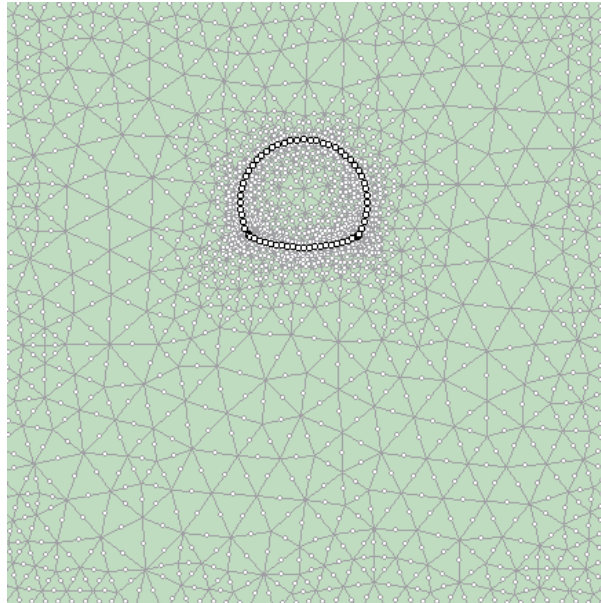


Figura 4. Malla completa de elementos finitos con las partes que la conforman (Nodos y elementos).

El método consiste en que cualquier alteración de las condiciones iniciales en el medio (la malla de elementos finitos) provocará un desplazamiento en los nodos y por consecuencia, en los elementos. Debido a su conexión entre ellos, afectará el nodo, y por lo tanto, al elemento vecino y así sucesivamente se verán afectados por la alteración. El cambio o alteración del estado *In situ* de los elementos, puede ser debido, por ejemplo, a la aplicación de una fuerza o carga externa, o bien por el proceso de excavación, etc.

El MEF puede resumirse también en tres pasos, como lo indica O. C. Zienkiewicz y R. L. Taylor (1994).

1. El continuo se divide en elementos, mediante líneas o superficies imaginarias, en un número de “elementos finitos”.
2. Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos, que llamaremos nodos, situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán incógnitas fundamentales en el problema, tal como ocurre en el análisis simple de estructuras.
3. Se toma un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada “elemento finito” en función de los desplazamientos nodales de dicho elemento.
4. Estas funciones nodales de desplazamientos definirán entonces de manera única el estado de deformación dentro del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las deformaciones



- iniciales y las propiedades constitutivas del material, definirán el estado de tensiones en todo el elemento y, por consiguiente, también en sus contornos.
5. Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, tal que equilibre las tensiones en el contorno y cualesquiera cargas repartidas, resultando así una relación entre fuerzas y desplazamientos.

(O. C. Zienkiewicz y R. L. Taylor, 1994)

Las propiedades geo - mecánicas y la relación entre el esfuerzo – deformación son utilizadas por los programas computacionales para componer una expresión matemática equivalente a una ecuación diferencial, para después conformar un sistema global de ecuaciones que se resuelve para cada nodo, dicho sistema se representa en la *ecuación 1*.

$$[K]\{u\} = \{b\} \quad (1)$$

Donde:

[K] = Matriz de rigideces.

{u} = Vector de desplazamientos.

{b} = Vector de fuerzas.

La malla de elementos finitos es alimentada con la información y propiedades geo - mecánicas del medio que se está analizando y, de acuerdo a la ley constitutiva que se haya elegido usar, así serán las propiedades mecánicas del material solicitadas. La malla debe representar lo más cercano a la realidad las condiciones del medio, aunque debido a la complejidad de la interacción medio – túnel, las discrepancias entre las propiedades geo - mecánicas obtenidas y las que puedan presentarse en el terreno conforme al avance de la excavación y otras cuestiones obliguen a una gran simplificación del modelo.

Una malla de elementos finitos triangulares permite un mayor detalle del modelo, permitiendo dividir en más elementos el medio y adaptándose mejor a una geometría más compleja. El tipo de elemento se elige para acercarse a un equilibrio entre la precisión que se requiere y el tiempo de cómputo y costo de análisis. Entre más complejo sea el análisis, mayor tiempo le llevará al equipo de cómputo el realizar la resolución del sistema.

Los programas de cómputo permiten el análisis del medio en dos dimensiones (2D), x en sentido horizontal y y en sentido vertical (profundidad del medio), una vez definidos



los límites de la malla, el programa lo discretiza descomponiéndolo en los elementos dando la oportunidad de modificar la cantidad de éstos, así como la cantidad de nodos.

SISTEMA DE EJES COORDENADOS

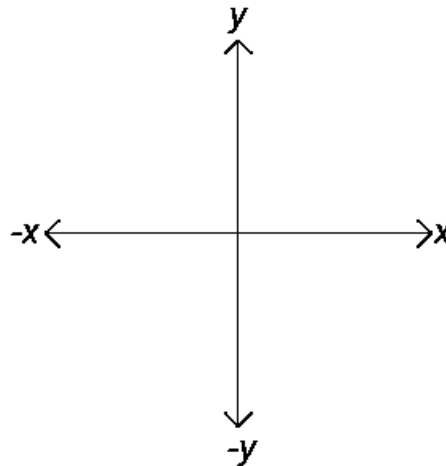


Figura 5. Sistema de ejes coordenados que se utilizan en la modelación en RS2®.

Las condiciones de fronteras son aplicadas en términos de restricciones horizontales y/o verticales, estas condiciones dependen del comportamiento del medio que se desea estudiar (Svensson, 2010)

TIPOS DE RESTRICCIONES



Figura 6. Simbología de diferentes tipos de restricciones.

3.2. LEYES CONSTITUTIVAS O MODELOS CONSTITUTIVOS

La ley constitutiva que se elija para estudiar el problema de la excavación, definirá el comportamiento de los materiales en cuanto a la relación esfuerzo – deformación.



Las leyes constitutivas son el resultado de la observación experimental del comportamiento de los materiales, en este caso por el tema estudiado, adaptadas al comportamiento de los geo - materiales (suelos o rocas).

Los modelos o leyes constitutivas además representan el comportamiento de la relación esfuerzo - deformación de los materiales en diferentes niveles de complejidad, desde lo más simple como lo es el comportamiento elástico – lineal, hasta las representaciones más complejas como el estado elástico – plástico.

Las teorías más comunes mediante las cuales se pueden modelar los geo - materiales en el software de modelación numérica en dos dimensiones RS2® de Rocscience® son la teoría de Hoek & Brown y la teoría de Mohr – Coulomb; la primera de ellas más apta para el análisis de macizos de roca dura sanos o fracturados, y la segunda es más usada para soluciones de problemas de suelos.

Al elegir el modelo constitutivo con el cual se van a modelar los materiales también se deben definir otras dos características del comportamiento del material: si el medio es continuo o discontinuo, y anisótropo o isótropo, así como en cuales direcciones se presentan dichas características, y si el comportamiento del material es elástico, plástico o elastoplástico, así como la historia de esfuerzos a los que fue o está sometido el material.

3.2.1 TEORÍA DE MOHR - COULOMB

La Teoría de Mohr – Coulomb, también es llamada Teoría de Fricción Interna o Criterio de Envolvente de Esfuerzos. Se trata de un modelo matemático utilizado para describir el comportamiento de materiales quebradizos ante el corte y tensión normal (Saldaña, 2018). Esta teoría analiza el comportamiento del material en condiciones elásticas.

En el campo de la ingeniería civil es utilizada en materiales como suelos, concreto, y hasta algunas rocas blandas, en otras palabras, es utilizada para materiales en los que existe cohesión entre sus partículas. Se considera que el medio es continuo, isótropo y uniforme en todas las direcciones en las que se analice.

Es llamada teoría de las envolventes debido a que la falla de ruptura se representa por una curva en una gráfica de esfuerzo normal – esfuerzo cortante del material, ya que, en esta teoría se considera que el material falla a causa de una combinación de estos dos esfuerzos, dicha curva se traza entre los dos puntos de los círculos de Mohr y representa la resistencia del suelo ante el esfuerzo cortante y es la suma de la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna del material (φ). Para comprender mejor la envolvente, véase la *figura 7*.

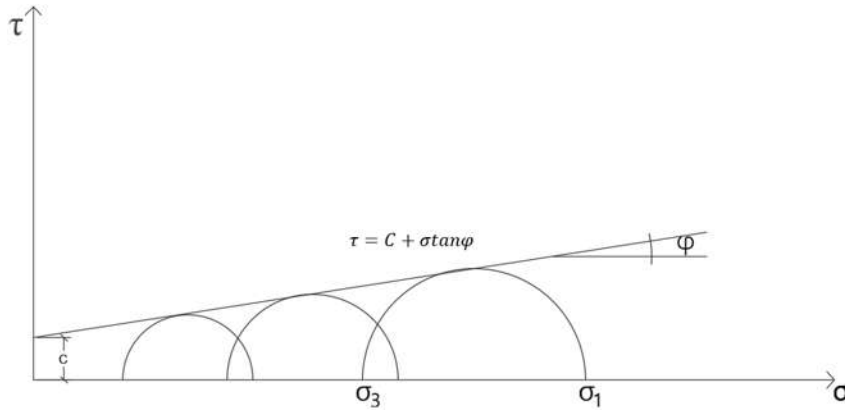


Figura 7. Círculos de Mohr.

3.2.2 TEORÍA DE HOEK & BROWN

El modelo de Hoek y Brown fue introducido a los análisis de diseño de excavaciones subterráneas en roca competente, con el propósito de proporcionar los datos de partida para éstos.

El criterio se dedujo a partir de los resultados de las investigaciones de Hoek de roturas frágiles de rocas intactas y de un modelo de estudio del comportamiento de macizos rocosos de Brown (E. Joek, C. Carranza-Torres, B. Corkum., 2002).

Hoek trató la derivación de las resistencias cohesivas y de los ángulos de fricción equivalentes para diferentes situaciones prácticas. Estas deducciones se basaron en las tangentes a la envolvente de Mohr obtenida por Bray (E. Joek, C. Carranza-Torres, B. Corkum., 2002).

A través de los años y analizando resultados de ejemplos prácticos, se le hicieron ajustes a la teoría inicialmente propuesta por Hoek y Brown, para llegar a una presentación comprensiva del criterio de rotura, representada por el criterio de Hoek – Brown generalizado, expresado en la *ecuación 2*.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2)$$

Donde:

σ'_1 y σ'_3 = esfuerzos principales efectivos mayor y menor en el momento de rotura.

σ'_{ci} = resistencia a compresión uniaxial del material intacto.

m_b = valor reducido de la constante del material m_i .

s y a = constantes del macizo rocoso determinadas usando el GSI (Geological Strength Index).



3.3. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE P_a .

Cuando el material está *in situ* sin ser alterado se encuentra a una cierta presión ejercida por el peso volumétrico del mismo y la cual aumenta proporcionalmente con respecto a la profundidad. El medio en el que se aplica este estudio es considerado homogéneo e isótropo, y en un estado drenado, otra característica a tomar en cuenta es que el coeficiente de presión lateral (K) es igual a la unidad ($K = 1$), lo cual se interpreta como que los esfuerzos horizontales y verticales son iguales en cualquier punto del medio. Haciendo estas consideraciones, la presión ejercida se puede calcular con la *ecuación 2*:

$$P_a = \gamma \cdot H \quad (3)$$

Donde:

P_a = Presión en la periferia de la sección transversal del túnel (t/m^2).

γ = Peso específico del suelo (t/m^3).

H = Profundidad del centro de la sección transversal del túnel (m).

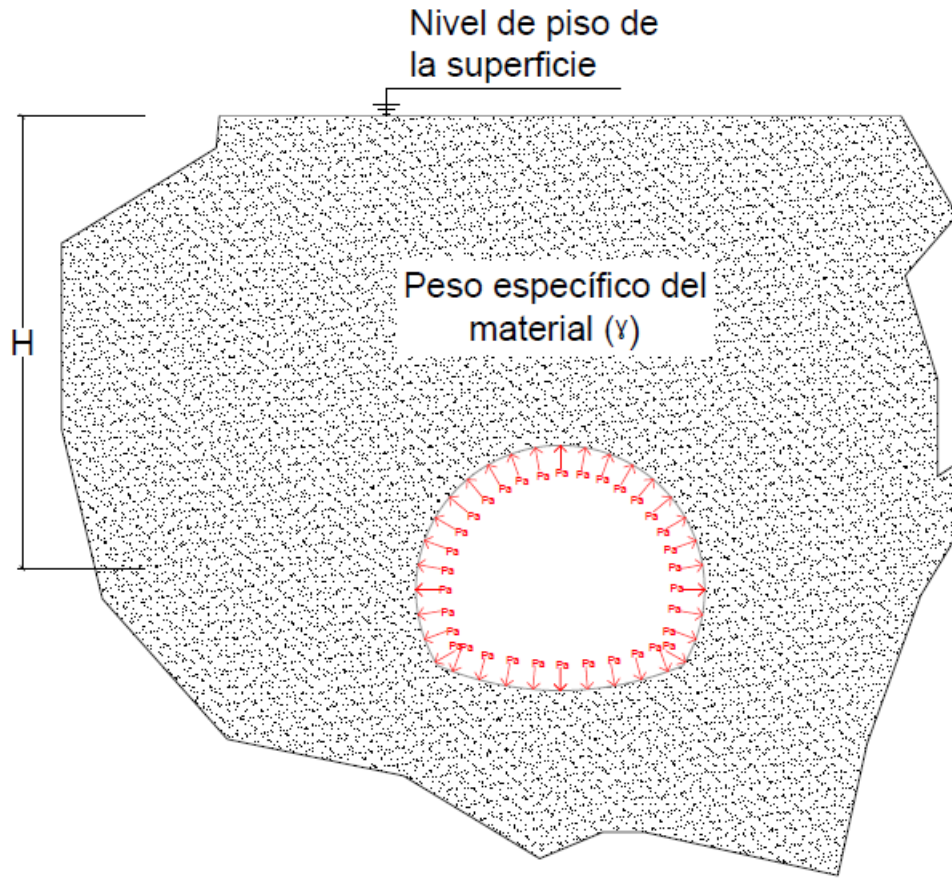


Figura 8. Esquema de la obtención de la presión P_a .

3.4. CURVA CARACTERÍSTICA

La curva característica de una excavación es la manera gráfica en que se expresa la deformación de cierto punto, o nodo (si se refiere a la malla de elementos finitos), en el medio.

La pérdida de presión al interior de la excavación se debe al desequilibrio provocado por el aflojamiento y extracción del material, y la manera de representar esto en el modelo fue creando 11 etapas, siendo la primera del modelo *in situ* con sus presiones en equilibrio, para después partir de un 90% de la presión determinada como lo indica el capítulo 3.4., y reduciendo el 10% de la presión la etapa inicial (*in situ*) en cada en cada etapa hasta llegar a 0% correspondiente a cuando la excavación del túnel está terminada.

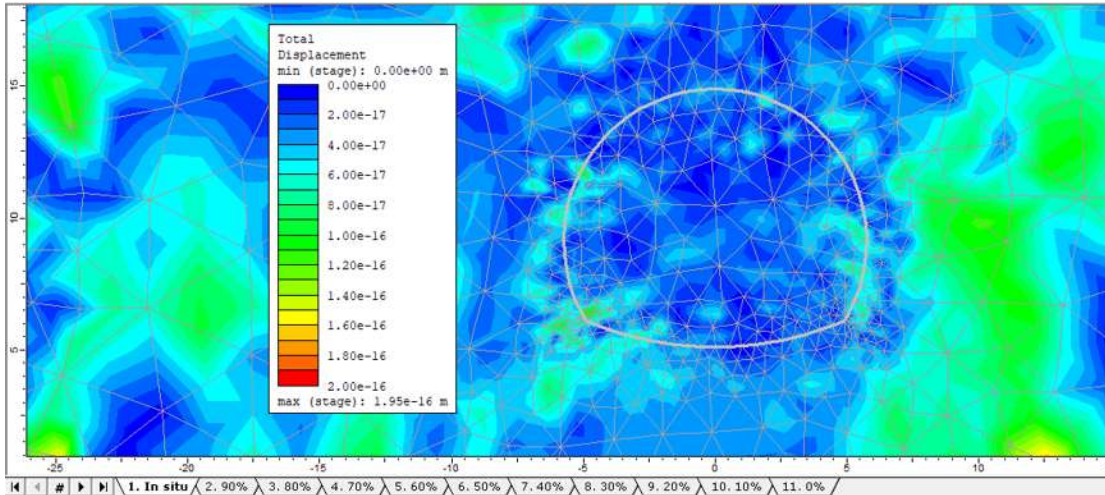


Figura 9. Apreciación de las etapas o escenarios para obtener la deformación del punto crítico de la sección transversal.

En el caso de esta investigación se optó por tomar un solo punto de la excavación (nodo en términos de la malla del modelo), dicho punto es elegido por ser el más crítico en cuanto a su deformación (el que más se desplaza) en toda la periferia.

Una vez obtenido este punto, calculado por el software, se obtiene su curva característica, o sea, su curva esfuerzo – deformación.

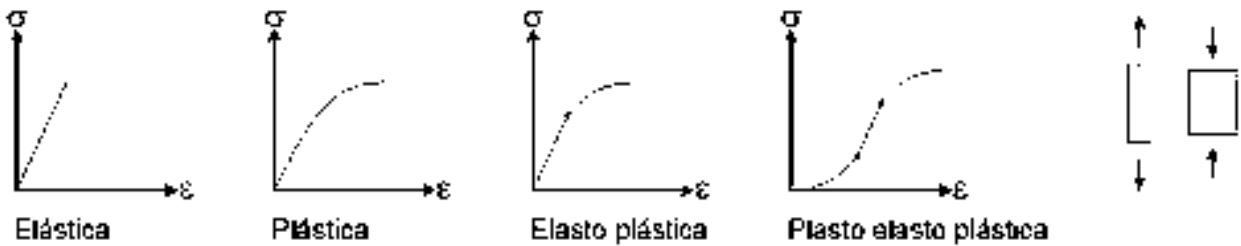


Figura 10. Curva característica Esfuerzo - Deformación de suelos (Duque Escobar, Gonzalo., 2003).



4. PROPIEDADES GEO - MECÁNICAS, GEOMETRÍA Y CARACTERÍSTICAS DE LA MODELACIÓN DEL TÚNEL

4.1. GEOMETRÍA DE LA SECCIÓN PROPUESTA DEL TÚNEL

Este estudio está enfocado a los túneles carreteros, por lo tanto, se recurrió a las especificaciones geométricas que nos sugiere el manual de diseño y construcción de túneles de carretera elaborado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en su versión 2016 basadas en la experiencia de túneles ya construidos en México.

En el manual se especifican diferentes geometrías de las secciones dependiendo del tipo de carretera para la que estén destinados y las carreteras a su vez, se clasifican de acuerdo al Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) que vaya a circular en ellas durante su vida útil, la velocidad permitida, su importancia, etc. Para mejor comprensión se anexaron las *tablas 1 y 2* donde se especifica la nomenclatura y clasificación de carreteras, según la SCT.

Tipo de Carretera	Nomenclatura
Carretera de cuatro carriles, Eje de Transporte	ET4
Carretera de dos carriles, Eje de Transporte	ET2
Carretera de cuatro carriles	A4
Carretera de dos carriles	A2
Carretera de cuatro carriles, Red primaria	B4
Carretera de dos carriles, Red primaria	B2
Carretera de dos carriles, Red secundaria	C
Carretera de dos carriles, Red alimentaria	D

Tabla 1. Clasificación de carreteras por su sección transversal. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2003)

A esta clasificación se anexa el TDPA (Tránsito Diario Promedio Anual) para el cual funcionan las carreteras con la nomenclatura anteriormente especificada (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2016):



Tipo A
<ul style="list-style-type: none">• a) Tipo A2 para un TDPA de 3,000 a 5,000 vehículos• b) Tipo A4 para un TDPA de 5,000 a 20,000 vehículos
Tipo B
<ul style="list-style-type: none">• Para un TDPA de 1,500 a 3,000 vehículos
Tipo C
<ul style="list-style-type: none">• Para un TDPA de 500 a 1,500 vehículos
Tipo D
<ul style="list-style-type: none">• Para un TDPA de 100 a 500 vehículos
Tipo E
<ul style="list-style-type: none">• Para un TDPA de hasta 100 vehículos

Tabla 2. Clasificación de las carreteras según su Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA). (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2016).

El túnel elegido es el que se especifica para el caso de una carretera del tipo A4. Excavar y construir un túnel con la capacidad de contener cuatro carriles en su interior es una tarea complicada y compleja de llevar a cabo. El volumen de material que se debe extraer es demasiado, la altura del gálibo aumenta proporcionalmente al ancho de la misma. Lograr equilibrar las presiones de una excavación de esa magnitud lo hace técnica y económicamente poco viable.

Para darle solución a este problema se opta por hacer una reducción de carriles en el tramo del túnel, de cuatro a tres carriles. Otra solución por la que se puede optar es realizar excavaciones para dos túneles gemelos para contener, cada uno de estos, dos carriles de cada sentido de la carretera.

Para fines de este estudio, se elige revisar una sección transversal de dos carriles, a la cual corresponden las dimensiones que se expresan en la *figura 11*.

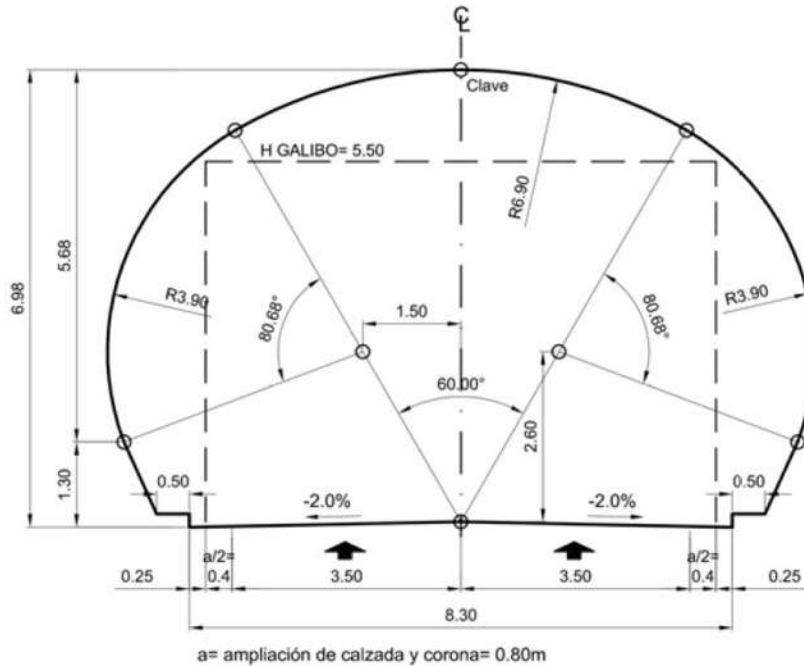


Figura 11. "Sección transversal de túnel de carretera Tipo A4S para longitudes menores de 500m.", capturado de: Manual de Túneles carreteros de la SCT. Fecha de publicación del libro: 2016. Pág. 22, El 01/07/2020

El software de modelación numérica utilizado tiene limitaciones en cuanto a la selección de la geometría de la sección transversal, no permite modelar a detalle las características geométricas sugeridas por el manual, por esta razón se ajustó una sección que se adaptara a las características que el software permite modificar, lo más similar que se pudiera a la sección original y principalmente que pudiera contener la misma altura libre del galibo original especificado por el manual. Por otro lado, las dimensiones otorgadas por el manual son interiores, en ellas no se tiene contemplado un recubrimiento, lo cual sí se tuvo que considerar en la sección ajustada, ya que lo que se modeló fue la excavación del túnel, no el túnel ya terminado.

Haciendo todas las consideraciones anteriores, se llegó a la adaptación de la siguiente geometría de sección transversal mostrada en la figura 12.

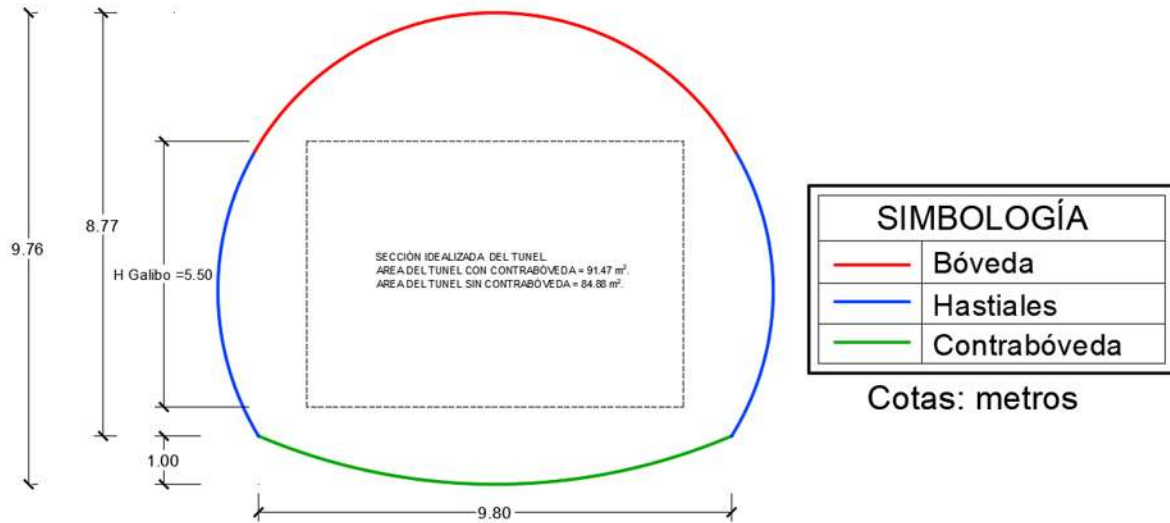


Figura 12. Esquema de las partes que componen un túnel.

Para una mejor apreciación de la diferencia de las dos secciones, tanto la sugerida por la SCT y la ajustada para su modelación se ponen a comparación en la figura 13.

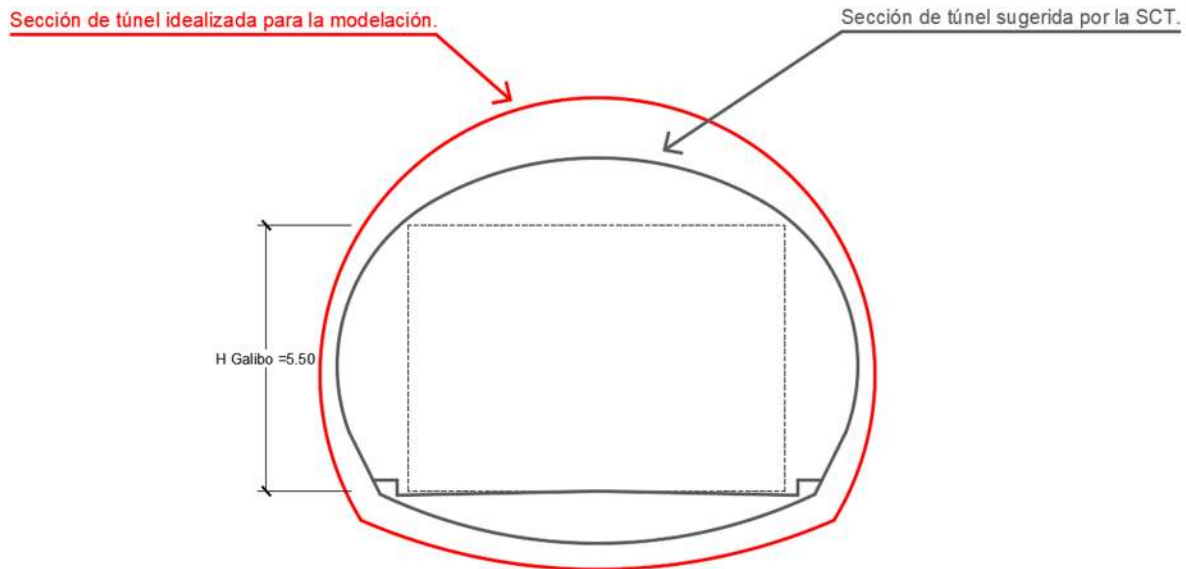


Figura 13. Comparación de la sección transversal propuesta para la modelación en el software y la especificada en SCT.



4.2. PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DEL SUELO

Las propiedades y características geo - mecánicas del medio son las que verdaderamente hacen el estudio de cada túnel un caso diferente y único, aparte de ser las variables que realmente no se pueden controlar y en ocasiones muy impredecibles, incluso cuando se hacen todos los estudios para determinar y medir estas propiedades. Al momento de ejecutar los trabajos de campo puede haber variaciones inesperadas en el comportamiento del suelo, así como cambios abruptos de sus características y propiedades.

Cabe destacar que quizás una de las características más importantes y con más influencia en el comportamiento geo - mecánico de los suelos y las rocas es la presencia o ausencia de agua, en el caso particular de los modelos realizados para este estudio fue considerado un estado de ausencia de agua en el medio, o sea, se considera un material totalmente drenado.

El software empleado para la obtención de los resultados de esfuerzo y deformación del túnel estudiado (RS2® de Rocscience®), utilizando el modelo constitutivo mencionado en el capítulo 3.3., requiere de varias propiedades del material para su aplicación y obtener resultados más apegados a los reales esperados en trabajo en campo. Las propiedades y características del material que se requieren son las siguientes:

- Módulo elástico (E).
- Módulo de Poisson (ν).
- Peso específico (γ).
- Cohesión (c).
- Ángulo de fricción (ϕ).
- Profundidad a la que se encuentra el túnel, medida de la superficie del terreno hasta el centro de la sección transversal de éste (H)

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan por separado los resultados obtenidos en las diferentes etapas de cada uno de los modelos creados con las variaciones de las propiedades geo - mecánicas del suelo solicitadas en el software de modelación numérica, y también variando la profundidad a la que se realice la excavación. En todos los modelos se utiliza la misma geometría de la sección transversal en herradura.

Entiéndase como resultados obtenidos de Rocscience® (RS2®), las gráficas que representan la curva característica del punto crítico de las excavaciones.



5.1. DETERMINACIÓN DE PRESIÓN P_a

Como primer paso se obtuvo la presión *in situ* que es ejercida por el material sin alterar y depende de su peso específico y la profundidad del centro de la excavación, como se indicó en el capítulo 3.4.

Por lo tanto, el cálculo de la presión *in situ* queda de la siguiente manera.

$$P_a = \gamma \cdot H$$
$$P_a = 1.8 \cdot \left(13.12 + \frac{9.77}{2}\right) \left(\frac{t}{m^3} \cdot m\right)$$
$$P_a = 32.41 t/m^2$$

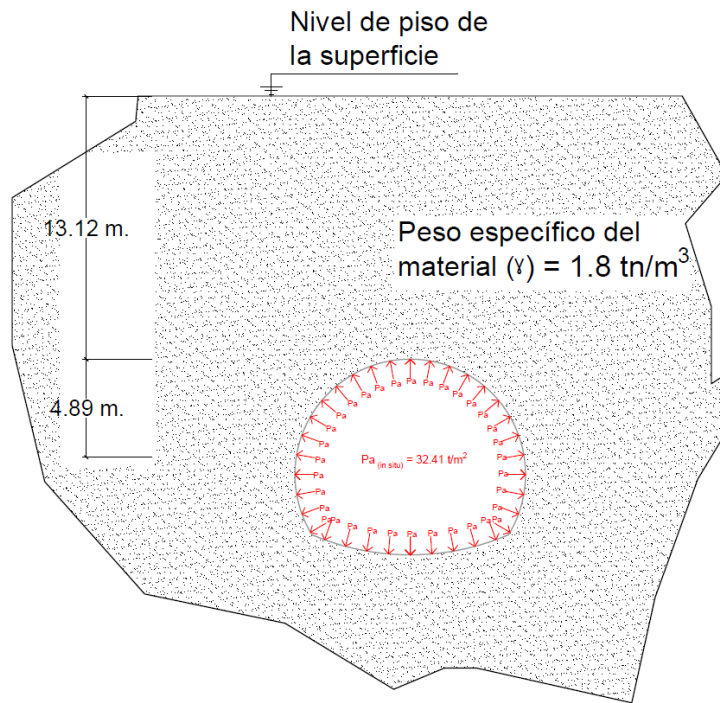


Figura 14. Esquema de determinación de la presión P_a .

5.2. EJEMPLIFICACIÓN DE LA OBTENCIÓN DE UNA CURVA CARACTERÍSTICA

Se procede a obtener la curva característica siguiendo la metodología ya especificada en el capítulo 3.5., aplicando la presión calculada anteriormente en el capítulo 5.1.

Se muestra solo un ejemplo de las etapas que se generaron en la modelación ya que para todos los modelos fueron el mismo número de etapas y se siguió el mismo procedimiento reduciendo la presión interior del túnel en un 10% de la presión *in situ* en cada etapa respecto a la anterior.

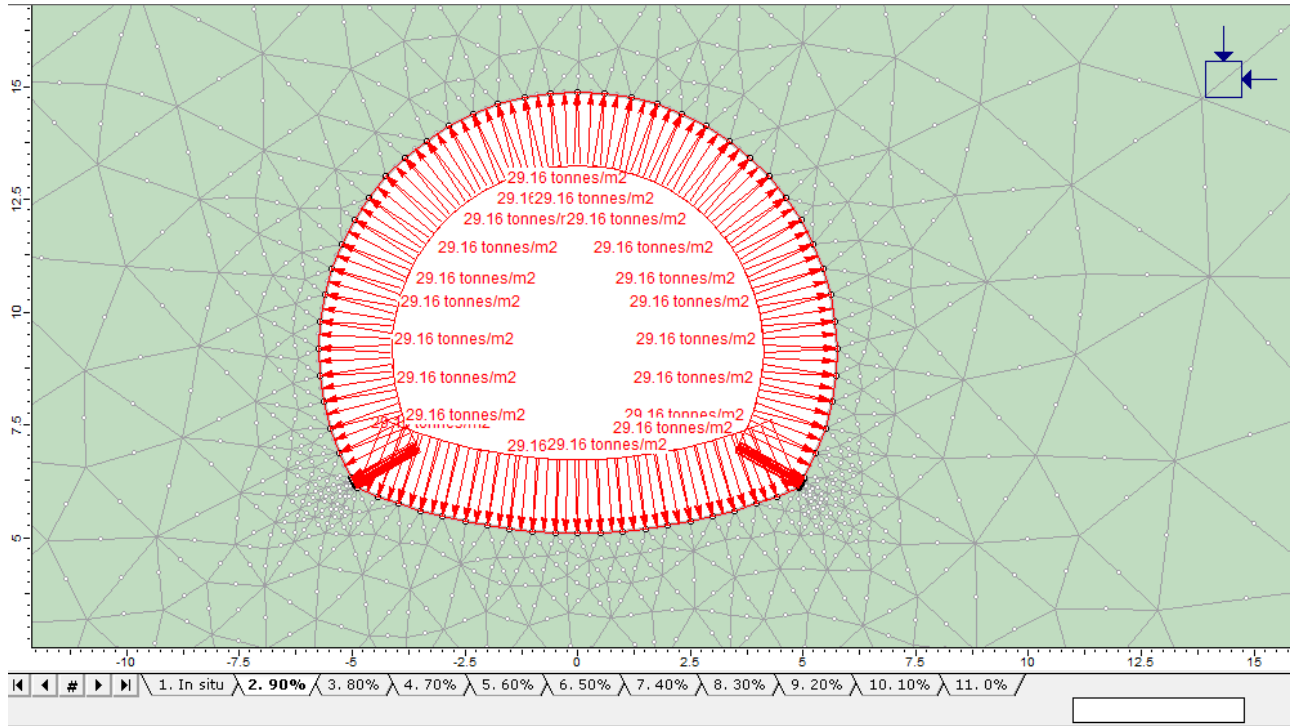


Figura 15. Aplicación de la presión P_a al 90%.

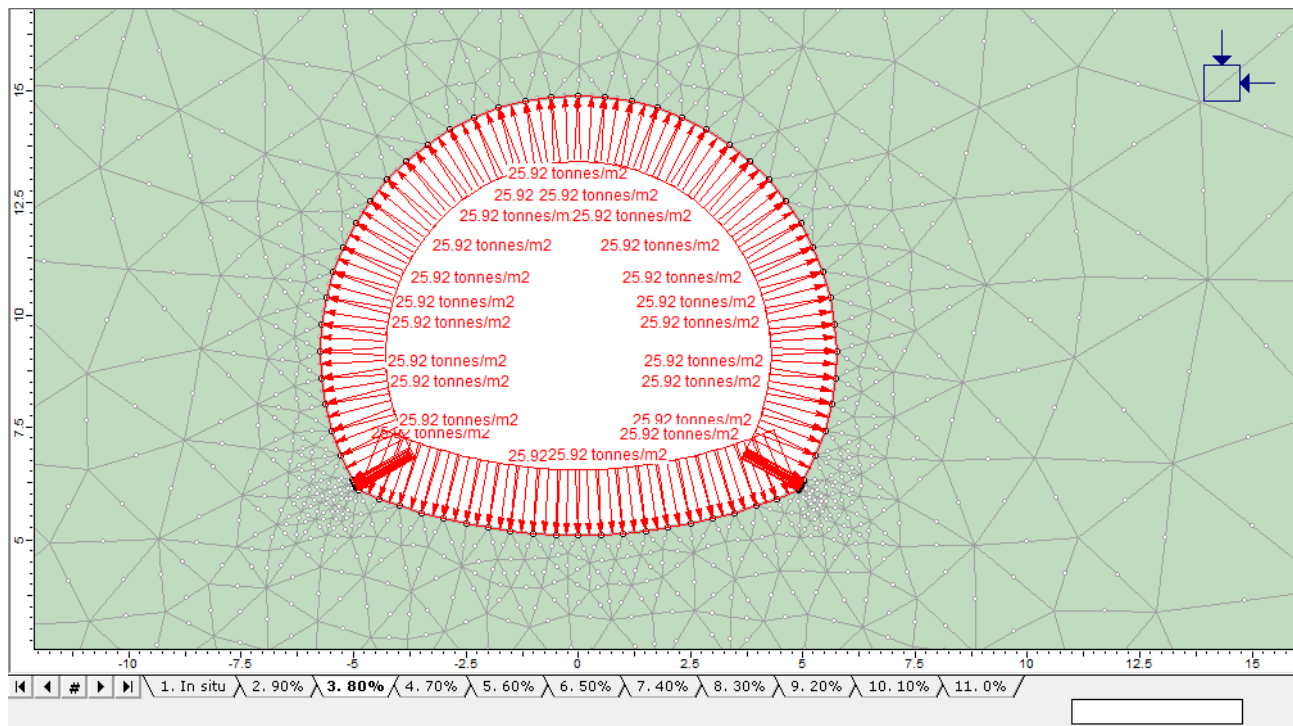


Figura 16. Aplicación de la presión P_a al 80%.

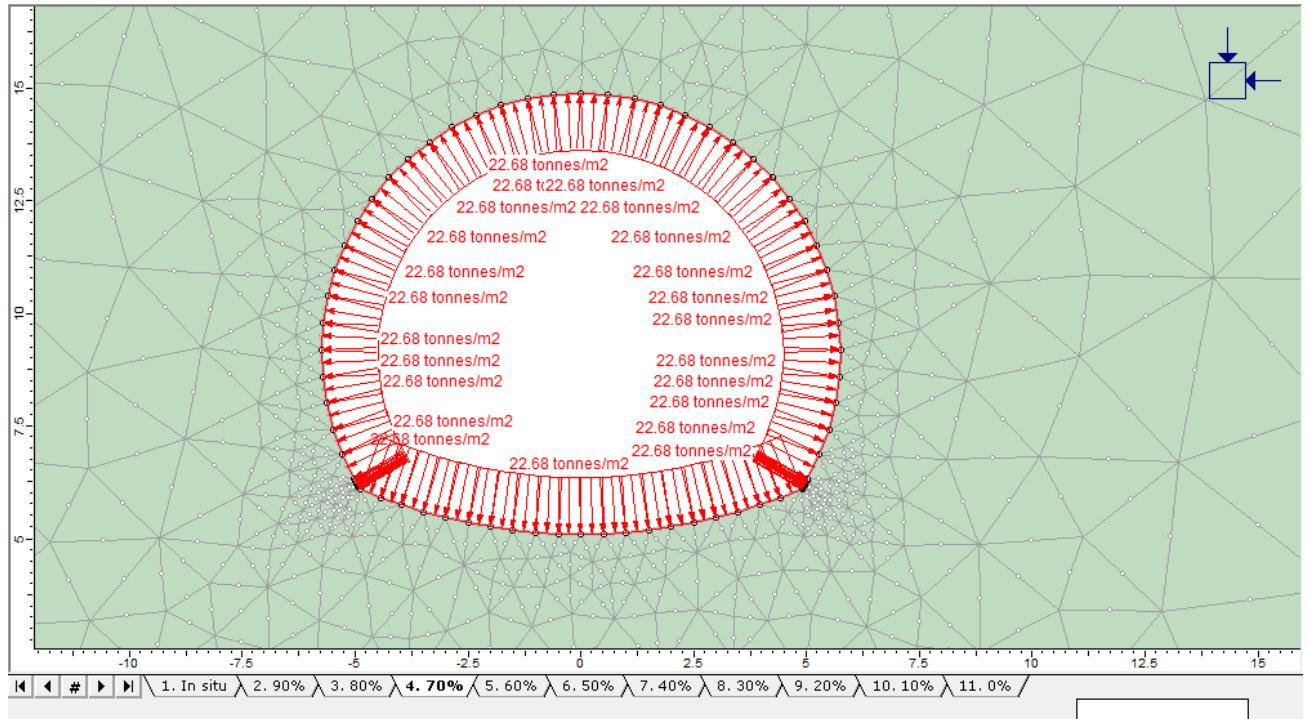


Figura 17. Aplicación de la presión P_a al 70%.

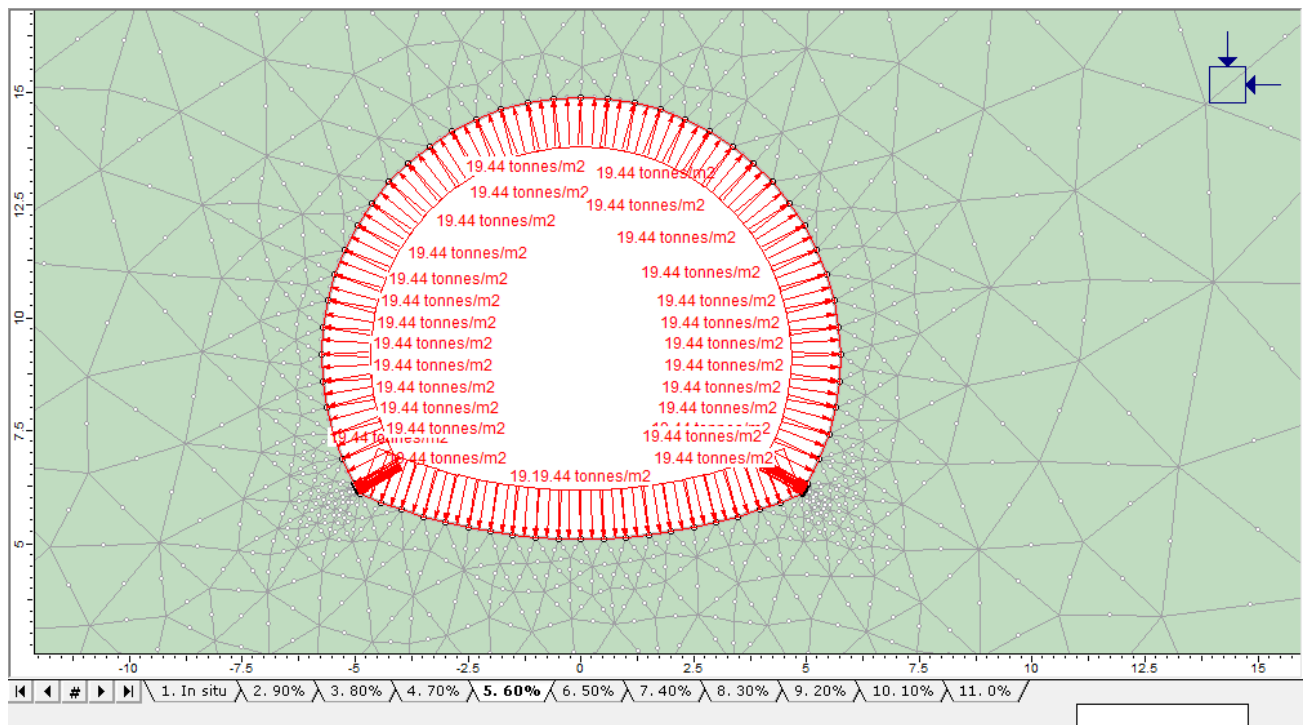


Figura 18. Aplicación de la presión P_a al 60%.

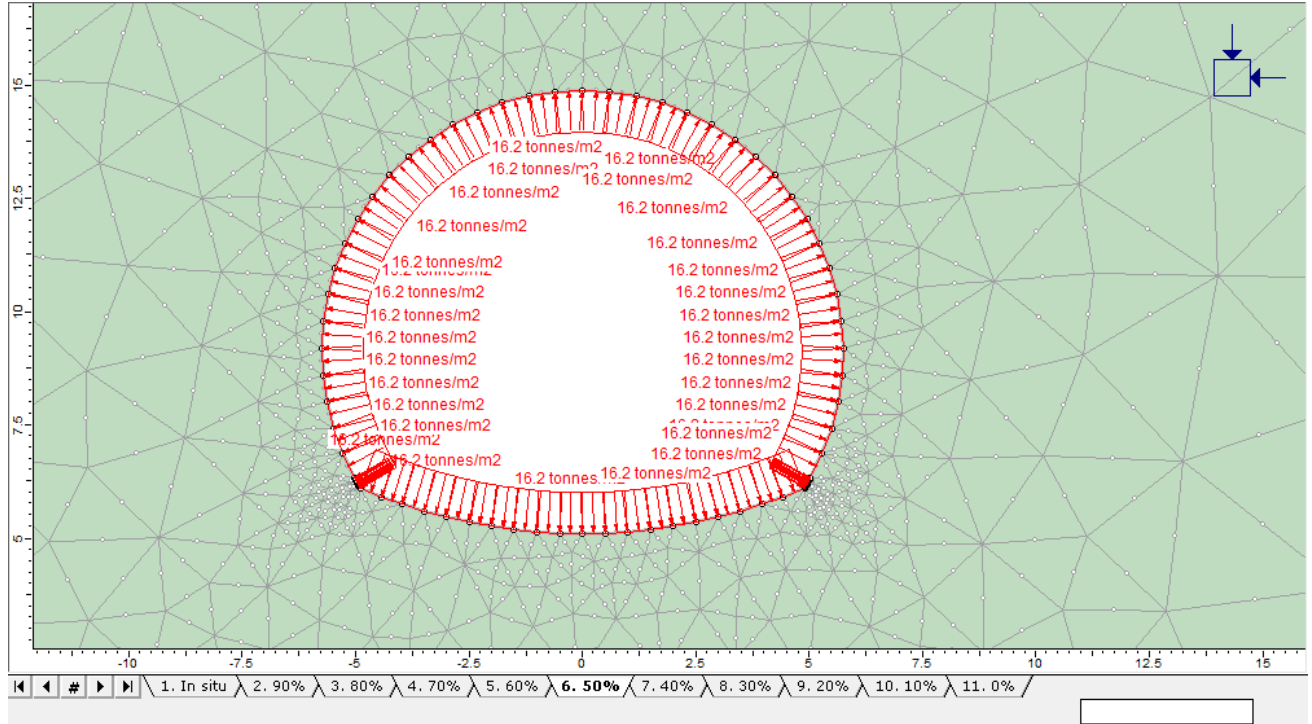


Figura 19. Aplicación de la presión P_a al 50%.

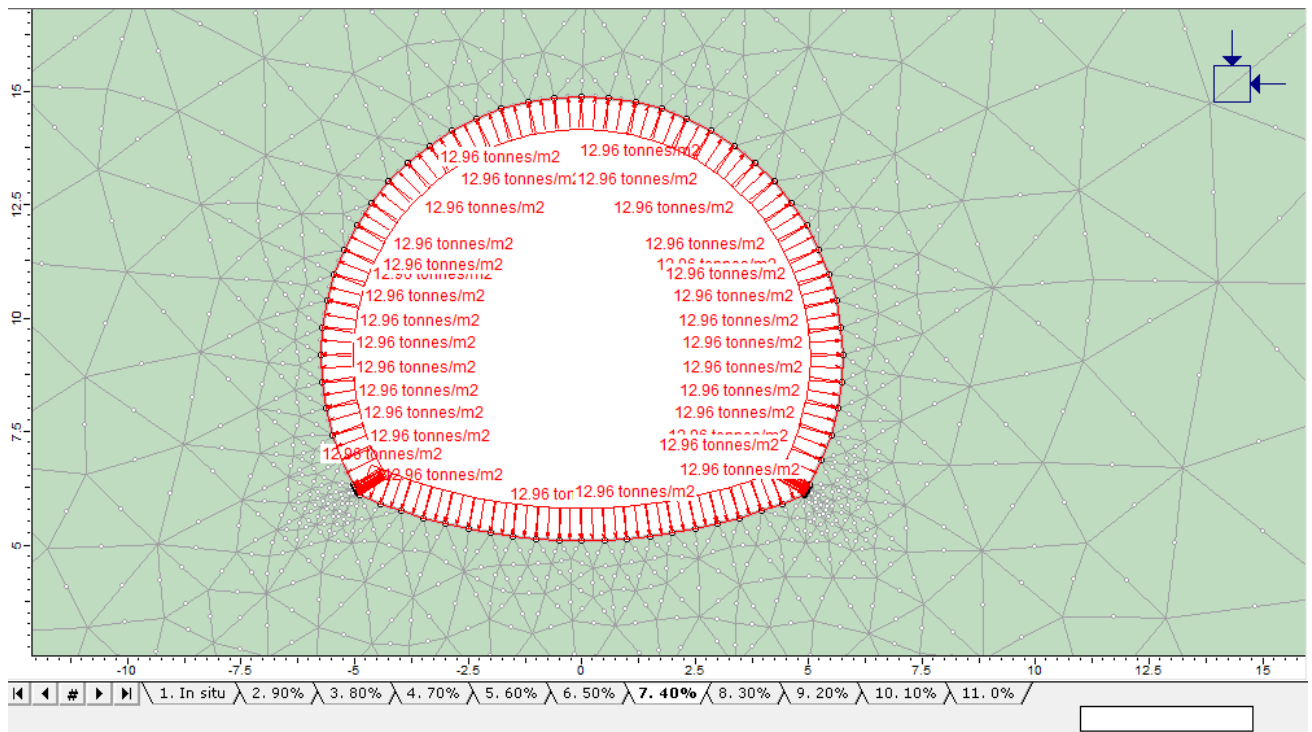


Figura 20. Aplicación de la presión P_a al 40%.

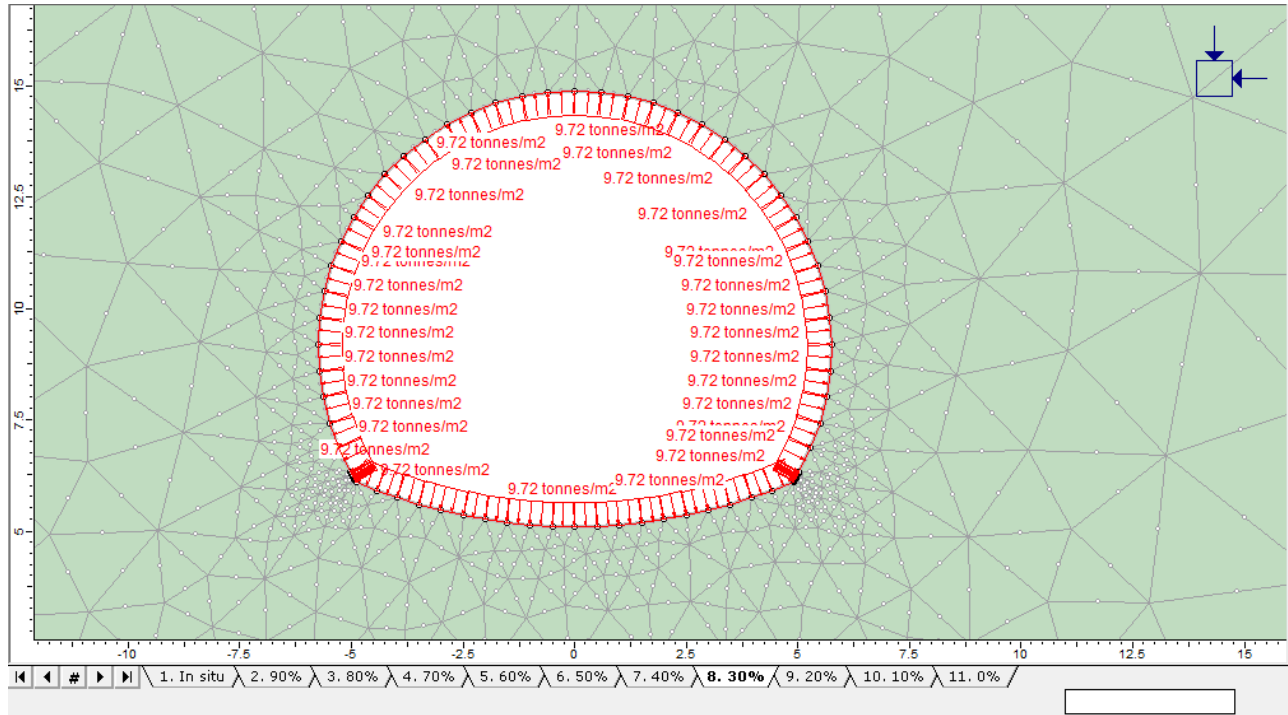


Figura 21. Aplicación de la presión P_a al 30%.

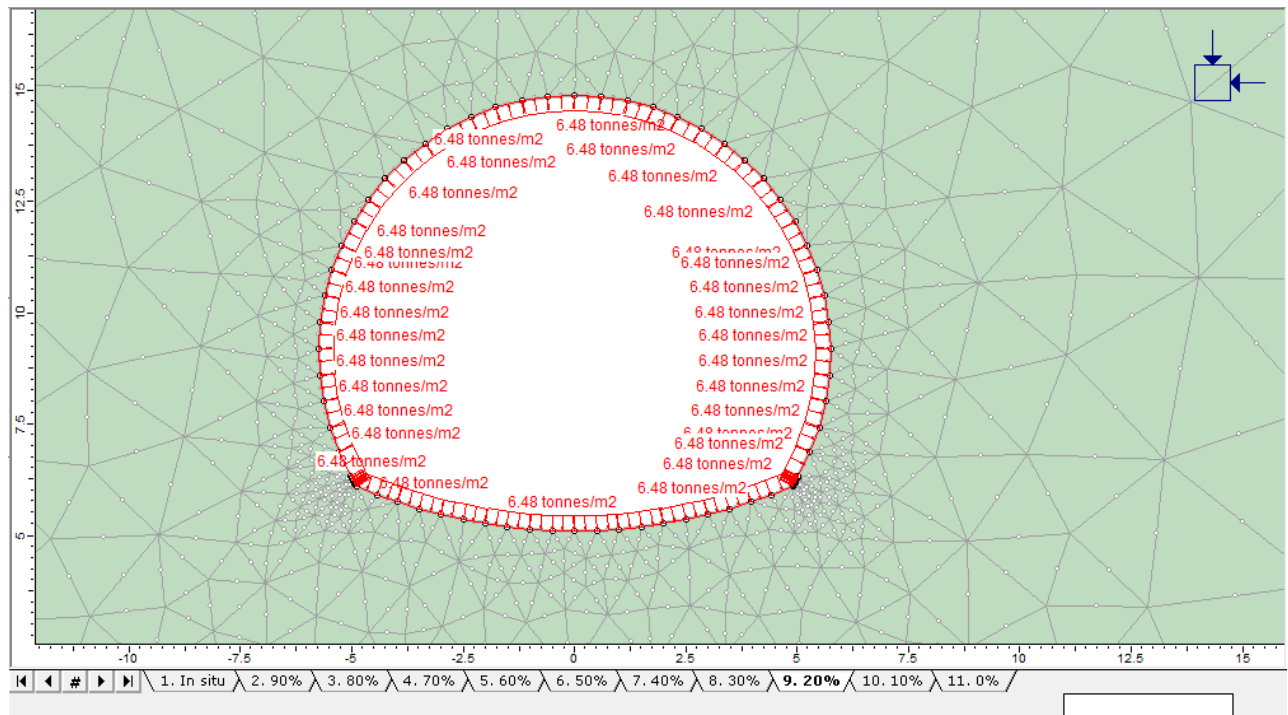


Figura 22. Aplicación de la presión P_a al 20%.

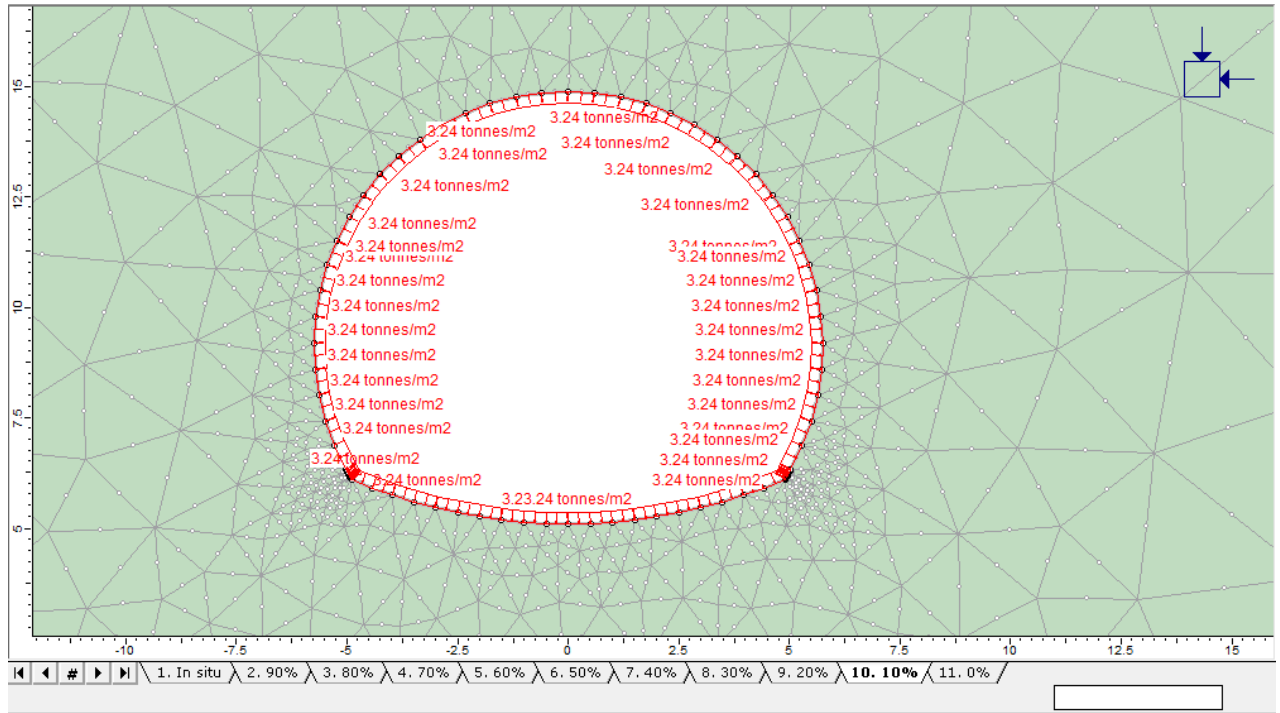


Figura 23. Aplicación de la presión P_a al 10%.

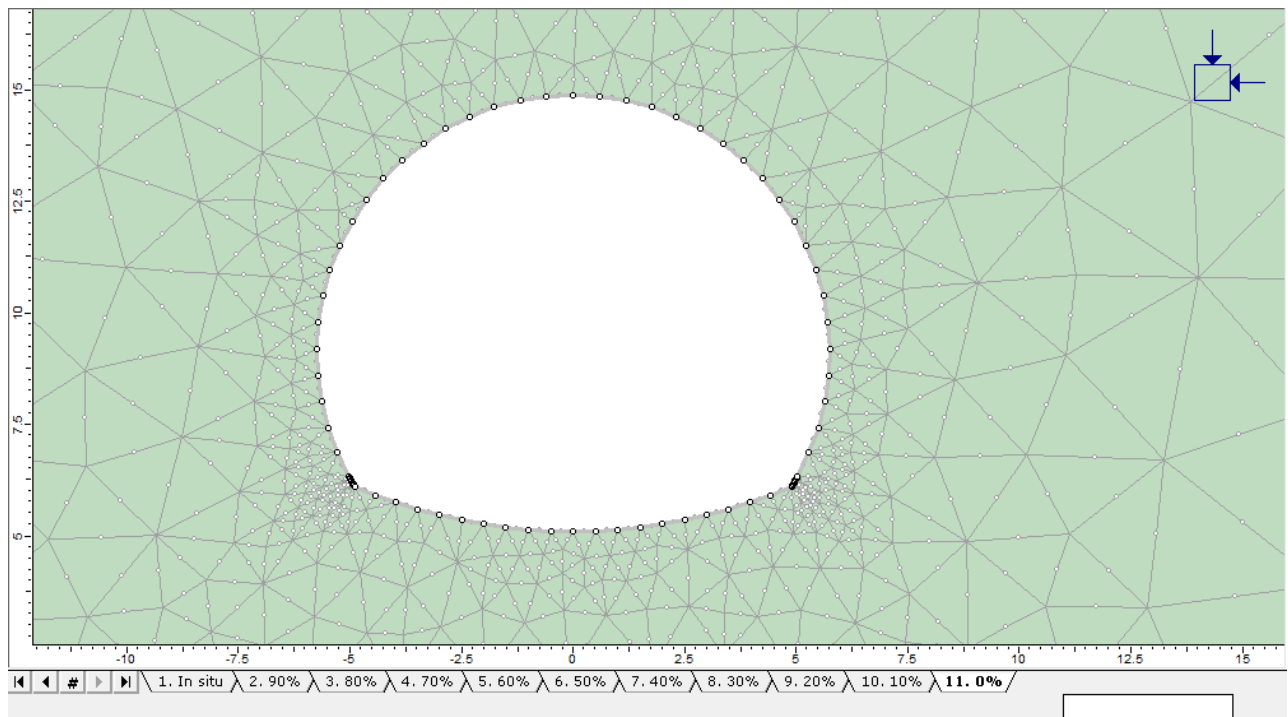


Figura 24. Sección transversal sin presión interna.



Después ejecutar el programa y correr el modelo, se recurre a analizar los resultados que este análisis arroja, entre ellos, los esfuerzos en cualquier punto del medio y las deformaciones o desplazamientos totales. En este estudio se pueden observar los resultados de los modelos en las siguientes imágenes junto con una escala para los desplazamientos.

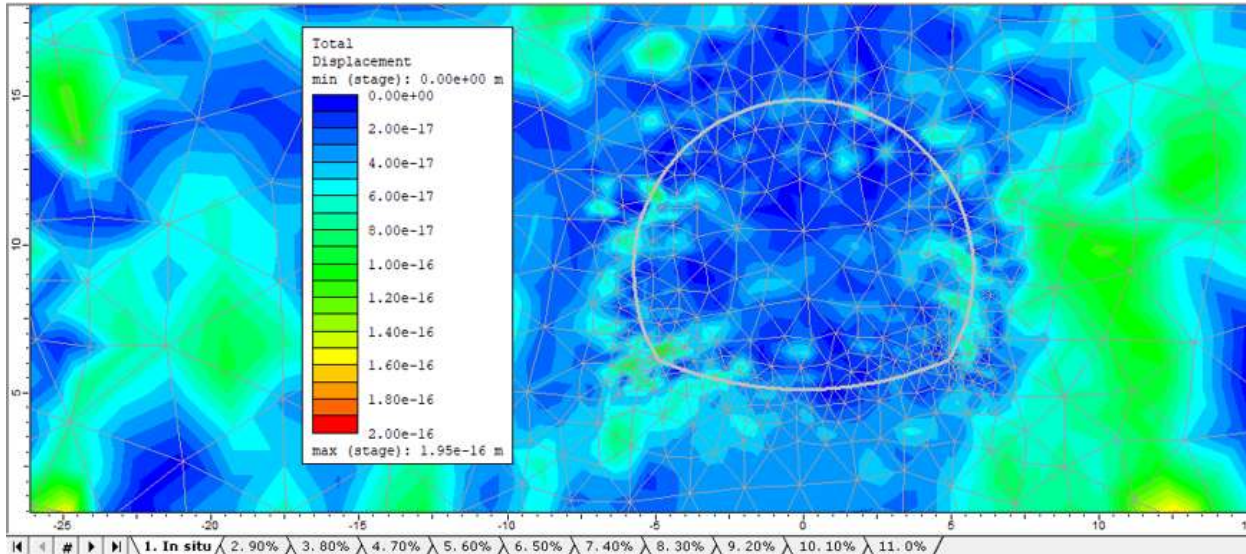


Figura 25. Deformación total de la sección transversal In Situ.

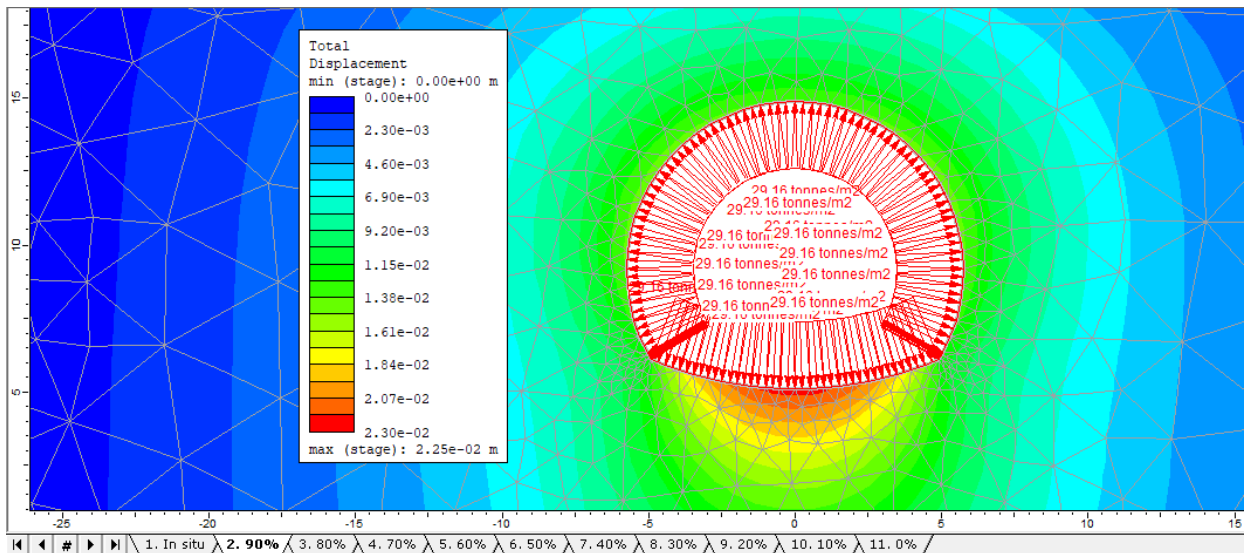


Figura 26. Deformaciones totales de la sección transversal al 90% de P_a .

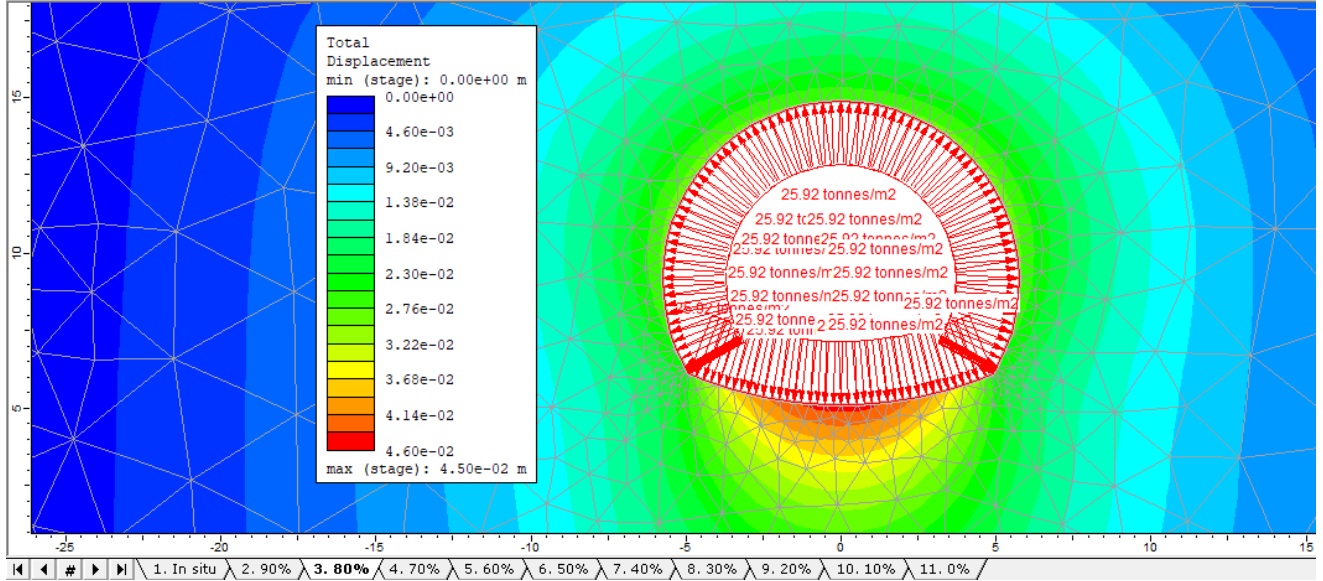


Figura 27. Deformaciones totales de la sección transversal al 80% de P_a .

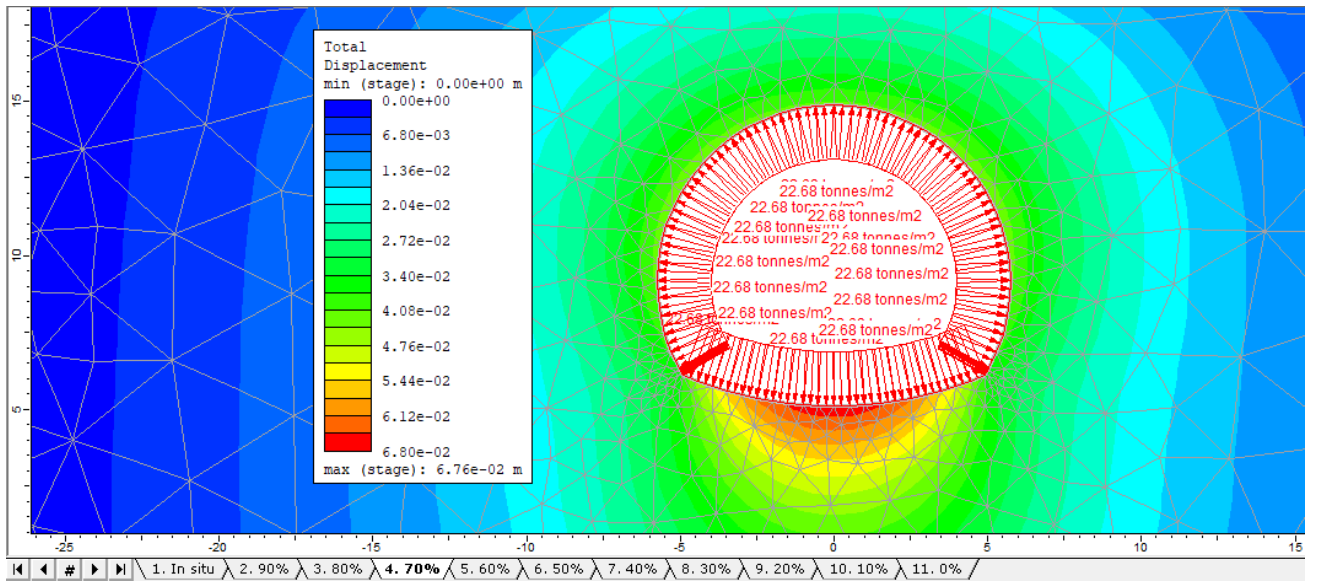


Figura 28. Deformaciones totales de la sección transversal al 70% de P_a .

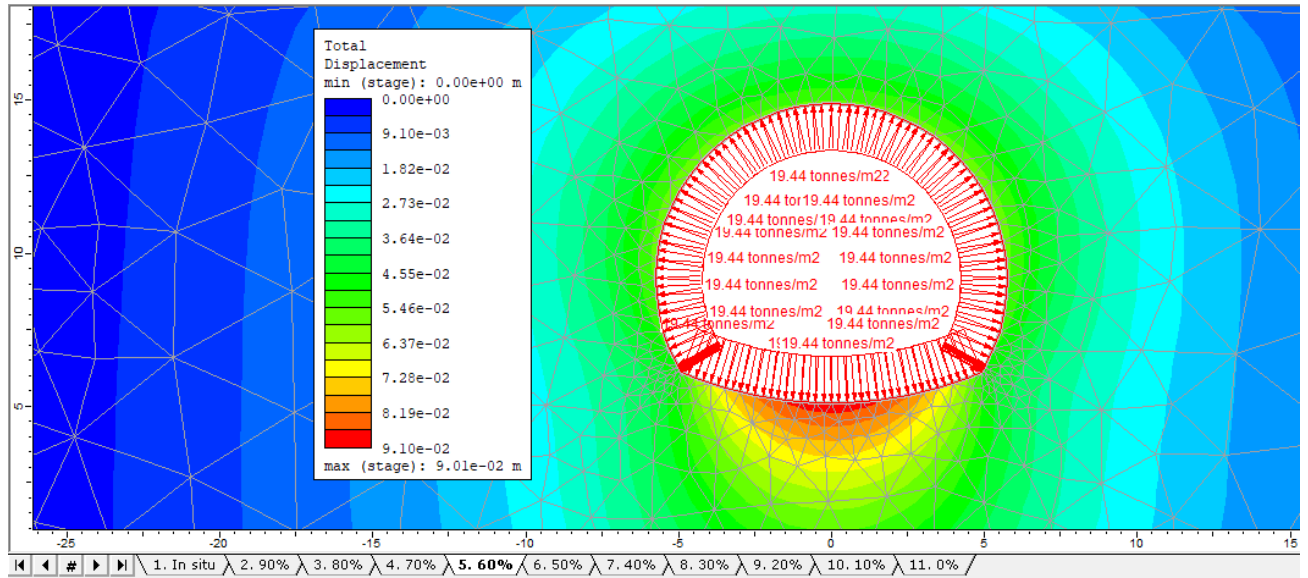


Figura 29. Deformaciones totales de la sección transversal al 60% de P_a .

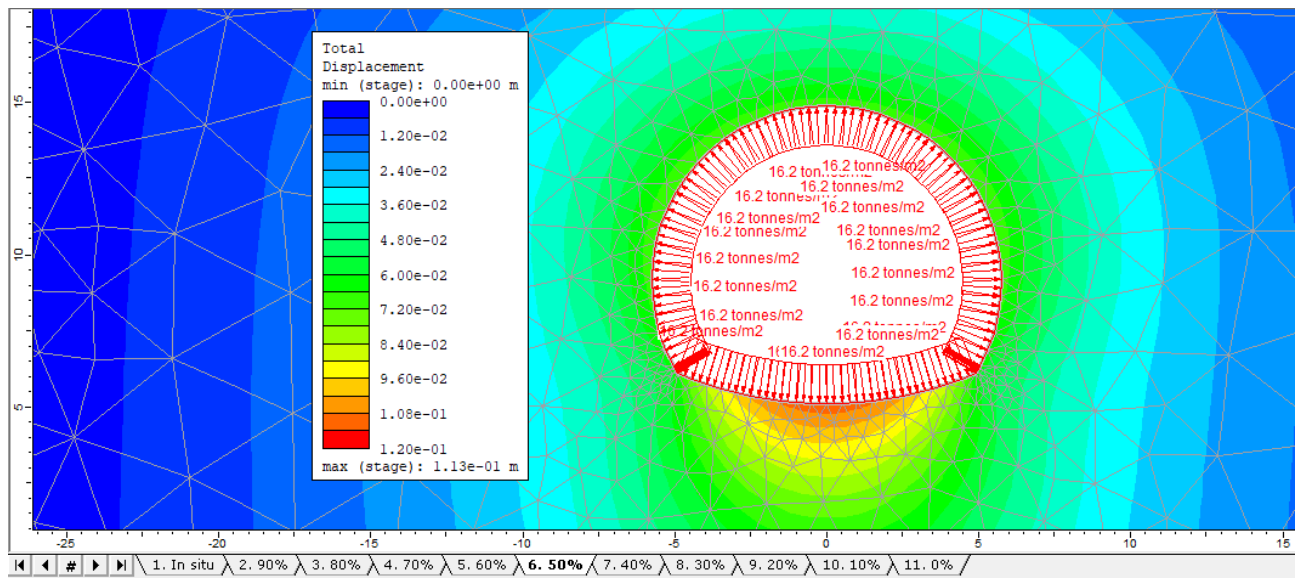


Figura 30. Deformaciones totales de la sección transversal al 50% de P_a .

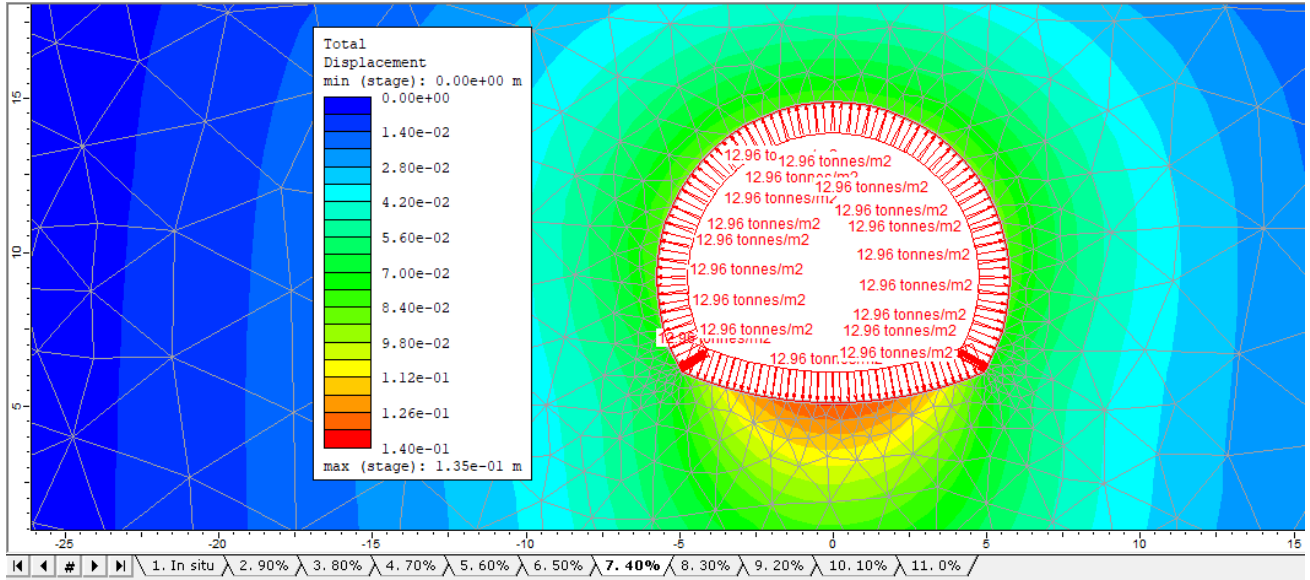


Figura 31. Deformaciones totales de la sección transversal al 40% de P_a .

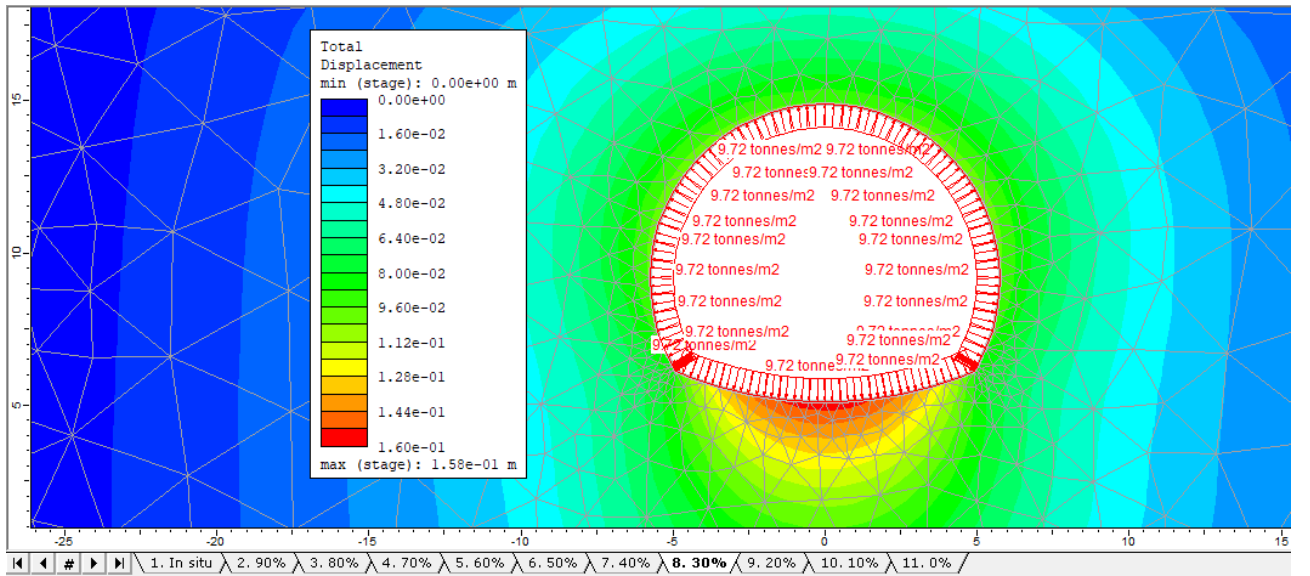


Figura 32. Deformaciones totales de la sección transversal al 30% de P_a .

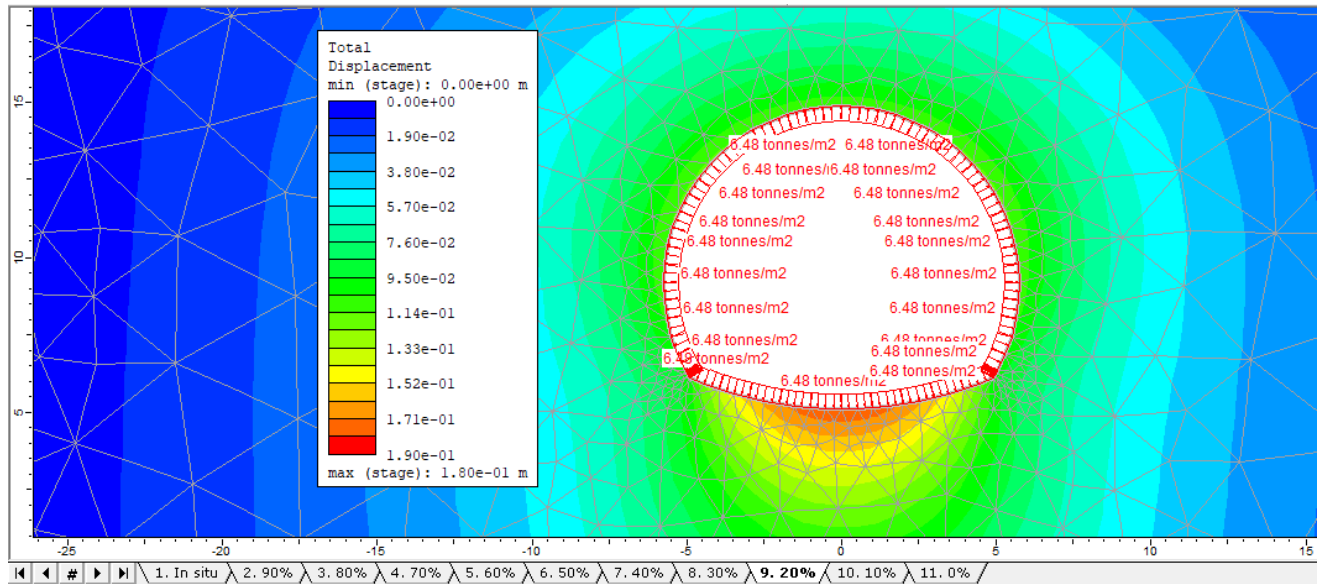


Figura 33. Deformaciones totales de la sección transversal al 20% de P_a .

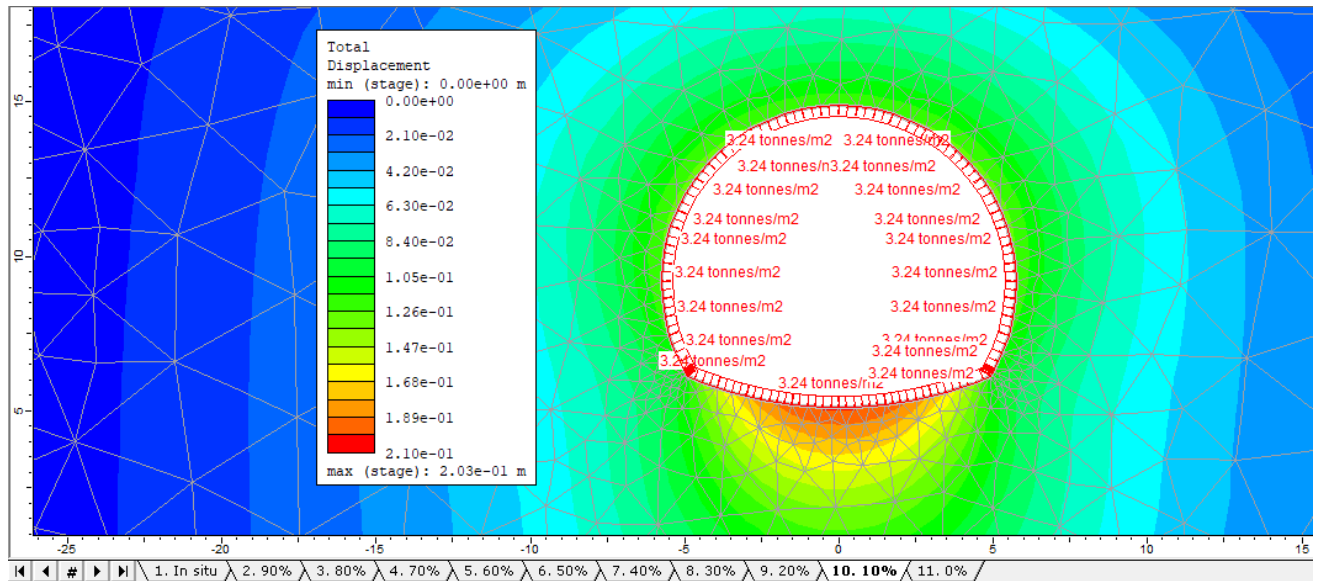


Figura 34. Deformaciones totales de la sección transversal al 10% de P_a .

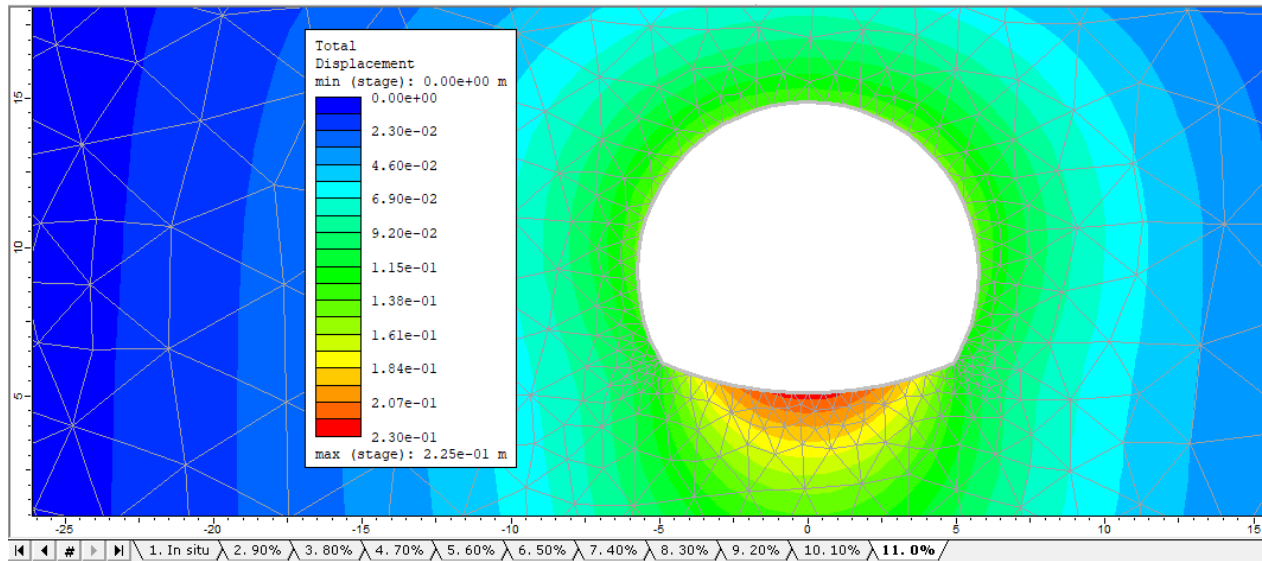


Figura 35. Deformaciones totales de la sección transversal al 0% de P_a .

Observando y analizando la cinemática de las deformaciones de la sección transversal del túnel, nos damos cuenta que la parte que más se deforma de ésta es el centro de la contra-bóveda, desde el principio del análisis hasta el fin, resultando una deformación de 0.23 m en la última etapa que indica que el túnel ya no tiene ninguna presión ejercida por el material del suelo.

A continuación, se presenta en la *tabla 3* las deformaciones de este punto en cada etapa, así como la gráfica obtenida directamente del análisis del software.



RESULTADOS DE LAS DEFORMACIONES DEL MODELO CON E = 12 MPa.

Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a las etapas del modelo

Stage Number	Total Displacement [m]
1	0.0000
2	0.0329
3	0.0658
4	0.0987
5	0.1316
6	0.1645
7	0.1974
8	0.2303
9	0.2632
10	0.2961
11	0.3290

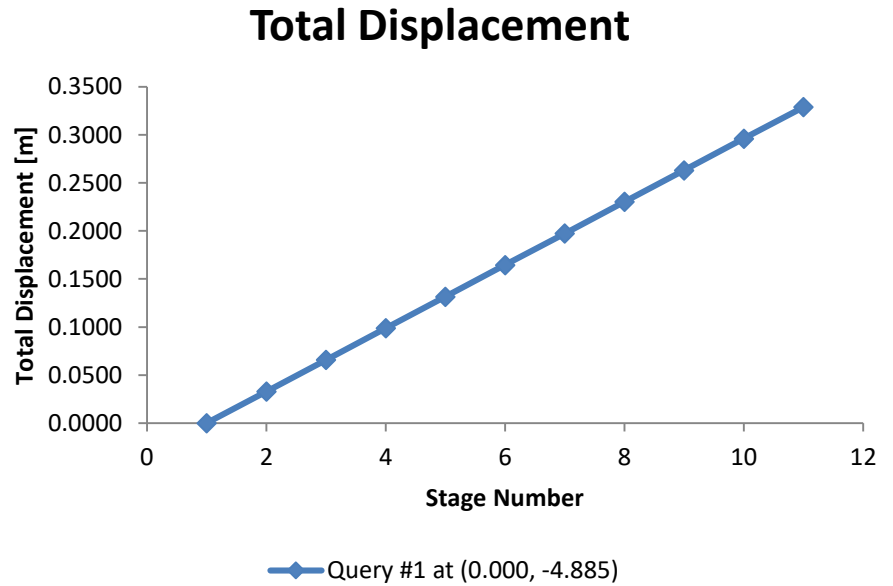


Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a la presión dentro del túnel

Presión Pa (t/m ²)	Deformación δ (m)
50.40	0.0000
45.36	0.0329
40.32	0.0658
35.28	0.0987
30.24	0.1316
25.20	0.1645
20.16	0.1974
15.12	0.2303
10.08	0.2632
5.04	0.2961
0.00	0.3290

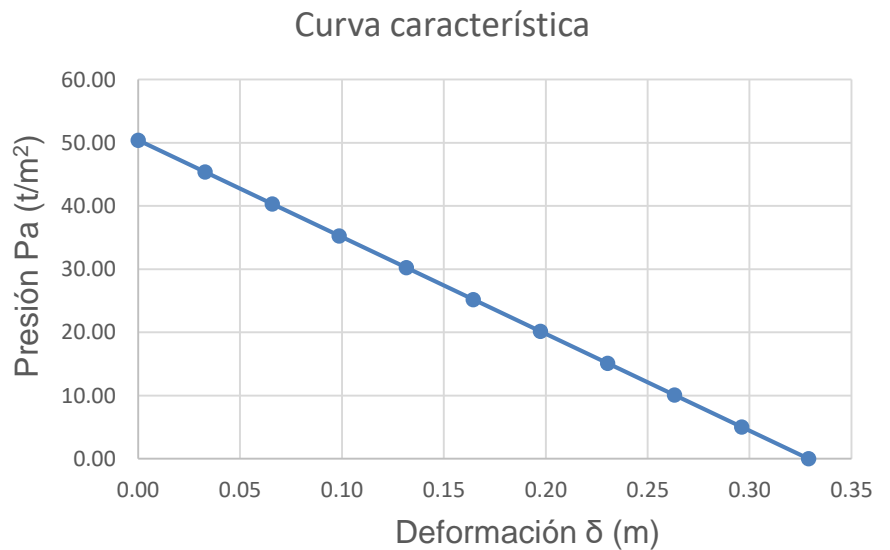


Tabla 3. Resultados del análisis del modelo con E = 12 MPa.



5.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS VARIANDO LA RELACIÓN DE POISSON

Con el fin de estudiar la influencia de la relación de Poisson en las deformaciones de la periferia de la excavación del túnel se hizo la variación únicamente de este parámetro en tres diferentes valores y dejando las demás propiedades fijas para poder analizar la influencia de dicha propiedad mecánica individualmente.

Los valores de la relación de Poisson utilizados, son los típicos valores de suelos tales como arcillas medias, arcillas y suelos granulares, etc., mostrados en la *figura 36*, según (Ministerio de vivienda, 2006).

En la *tabla 4* se muestran las propiedades geo-mecánicas del medio y de la malla de elementos finitos.

Tipo de suelo	Coefficiente de Poisson
Arcillas blandas normalmente consolidadas	0.40
Arcillas medias	0.30
Arcillas duras pre consolidadas	0.15
Arenas y suelos granulares	0.30

Figura 36. Tabla D.24. Valores orientativos del coeficiente de Poisson (Ministerio de vivienda, 2006).

Propiedades del medio	Características de la malla		Valores proporcionados para la relación de Poisson (ν)
	Geometría del elemento	Triangular con 3 puntos nodales	
$E = 20 \text{ Mpa}$			$\nu_1 = 0.15$
$\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$	Número de nodos	3,425.00	$\nu_2 = 0.30$
$H = 28 \text{ m.}$	Número de elementos	1,668.00	$\nu_3 = 0.48$

Tabla 4. Propiedades de los modelos para comparación de la influencia de la relación de Poisson.

A continuación, se muestra de manera gráfica el comportamiento de las deformaciones de la periferia de la sección transversal de la excavación.

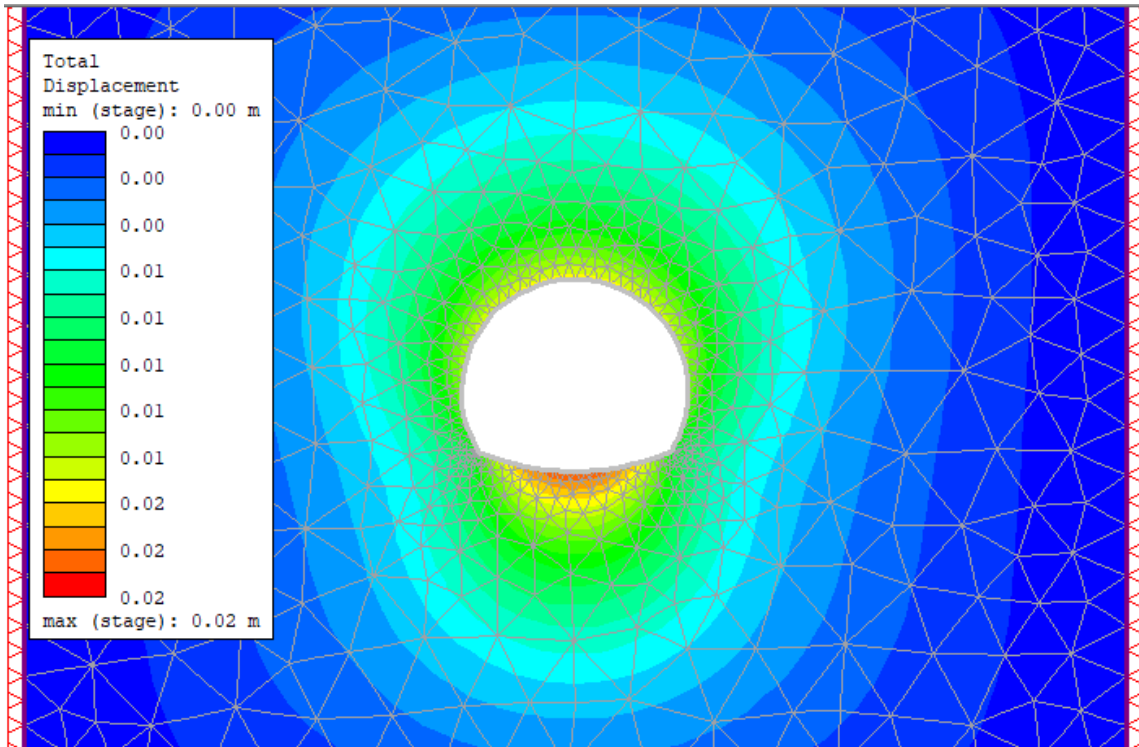


Figura 37. Análisis del comportamiento de las deformaciones del medio.

Así mismo en la siguiente figura se muestra la manera en la que fluyen los esfuerzos en el suelo y por dicha fluencia de esfuerzos se presentan las deformaciones en en túnel.

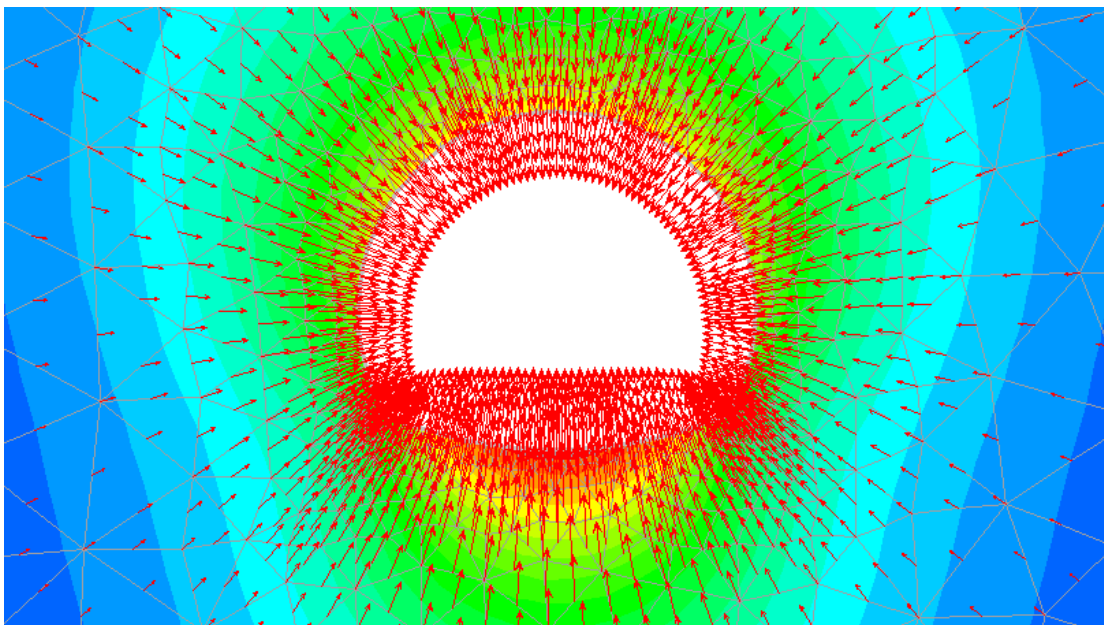


Figura 38. Fluencia de esfuerzos que provocan las deformaciones del medio.



Como se puede distinguir en las figuras, el punto con mayor deformación en la sección transversal del túnel es en el centro de la contra-bóveda. Se aprecia que en la bóveda se presenta una deformación menor, de esta observación podemos concluir que si no se excavara la contra-bóveda se presentaría una deformación aún mayor en una superficie plana.

Aun excavando la contra-bóveda, en el caso de la sección transversal de este modelo las deformaciones mayores se presentan en ésta, por lo cual se deben obtener los desplazamientos de este punto de la sección en cada etapa, información con la cual se grafica su curva característica.

Los modelos en los que solamente se varia la relación de Poisson siguen el mismo esquema de deformación, es decir, que en los otros dos modelos coincide el mismo punto crítico y su comportamiento es idéntico, únicamente variando el valor de las deformaciones, por lo que se procede a presentar las tablas con sus deformaciones y gráficas.



RESULTADOS DE LAS DEFORMACIONES DEL MODELO CON $\nu = 0.15$.

Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a las etapas del modelo

Stage Number	Total Displacement [m]
1	0.0000
2	0.0193
3	0.0386
4	0.0579
5	0.0772
6	0.0965
7	0.1158
8	0.1351
9	0.1544
10	0.1737
11	0.1930

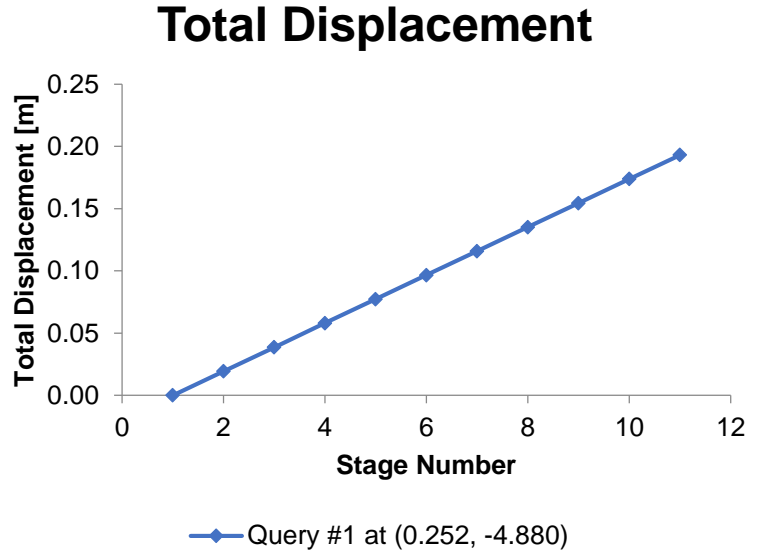


Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a la presión dentro del túnel

Presión Pa (t/m ²)	Deformación δ (m)
50.40	0.0000
45.36	0.0193
40.32	0.0386
35.28	0.0579
30.24	0.0772
25.20	0.0965
20.16	0.1158
15.12	0.1351
10.08	0.1544
5.04	0.1737
0.00	0.1930

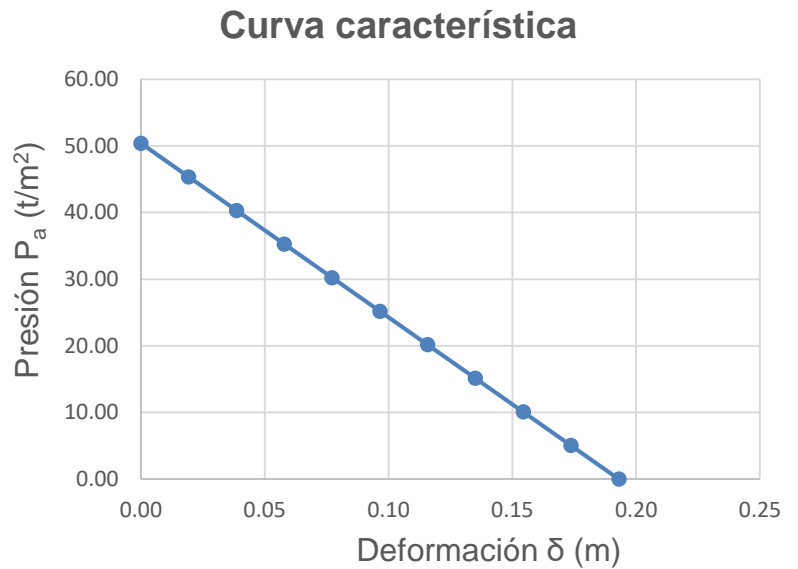


Tabla 5. Resultados del análisis del modelo con módulo de Poisson = 0.15.



RESULTADOS DE LAS DEFORMACIONES DEL MODELO CON $\nu = 0.30$.

Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a las etapas del modelo

Stage Number	Total Displacement [m]
1	0.0000
2	0.0197
3	0.0395
4	0.0592
5	0.0790
6	0.0987
7	0.1184
8	0.1382
9	0.1579
10	0.1777
11	0.1974

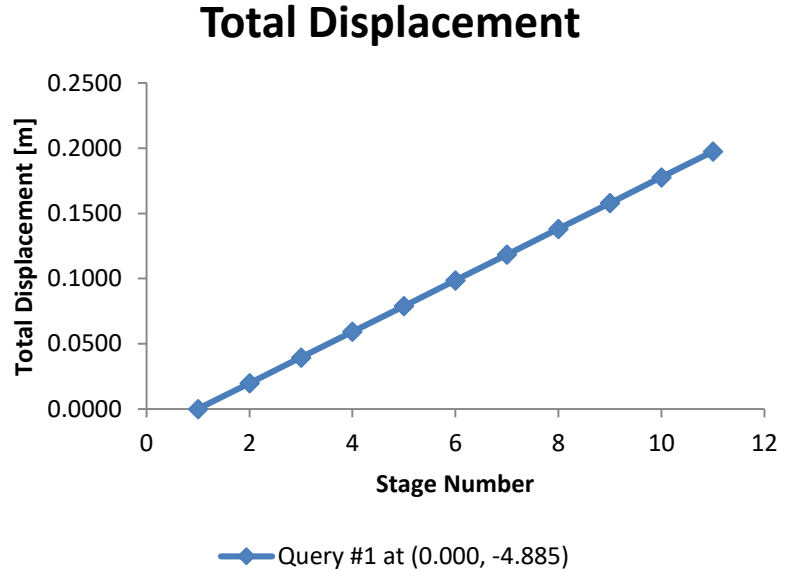


Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a la presión dentro del túnel

Presión Pa (t/m ²)	Deformación δ (m)
50.40	0.0000
45.36	0.0197
40.32	0.0395
35.28	0.0592
30.24	0.0790
25.20	0.0987
20.16	0.1184
15.12	0.1382
10.08	0.1579
5.04	0.1777
0.00	0.1974

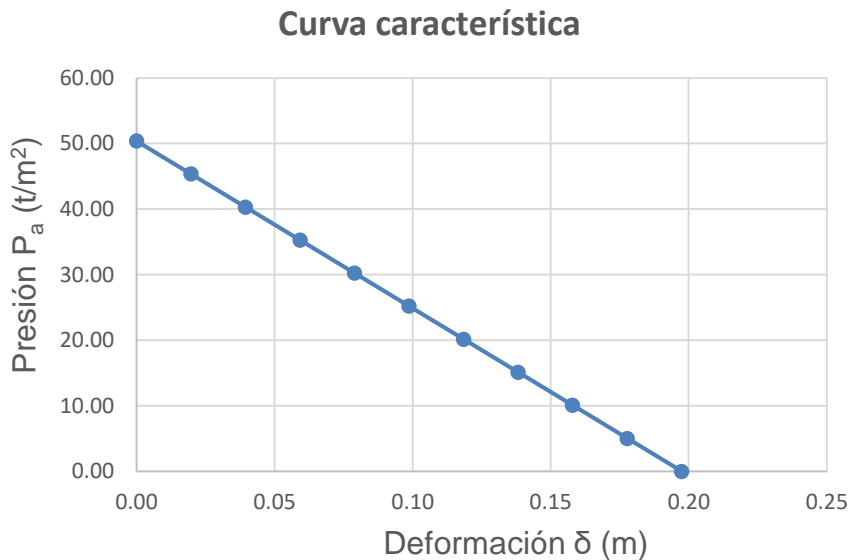


Tabla 6. Resultados del análisis del modelo con módulo de Piosson = 0.30.



RESULTADOS DE LAS DEFORMACIONES DEL MODELO CON $\nu = 0.48$.

Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a las etapas del modelo

Stage Number	Total Displacement [m]
1	0.0000
2	0.0126
3	0.0252
4	0.0377
5	0.0503
6	0.0629
7	0.0755
8	0.0880
9	0.1006
10	0.1132
11	0.1258

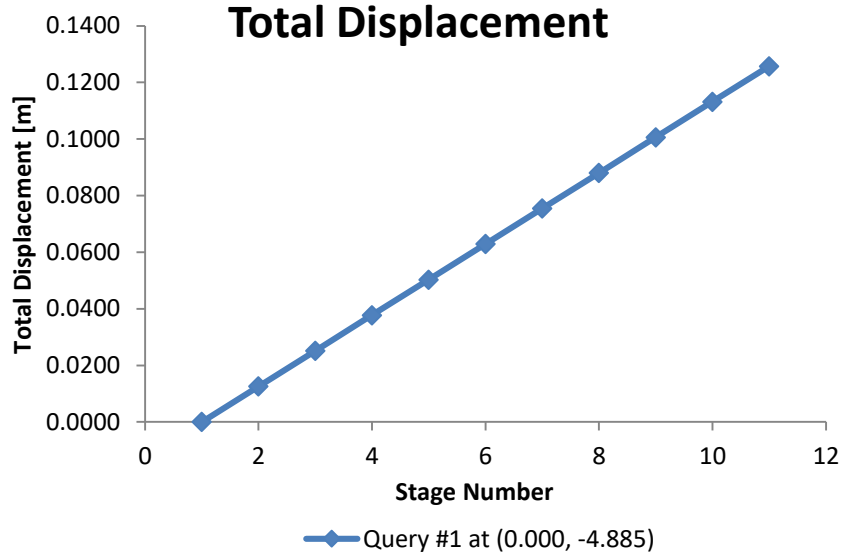


Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a la presión dentro del túnel

Presión Pa (t/m ²)	Deformación δ (m)
50.40	0.0000
45.36	0.0126
40.32	0.0252
35.28	0.0377
30.24	0.0503
25.20	0.0629
20.16	0.0755
15.12	0.0880
10.08	0.1006
5.04	0.1132
0.00	0.1258

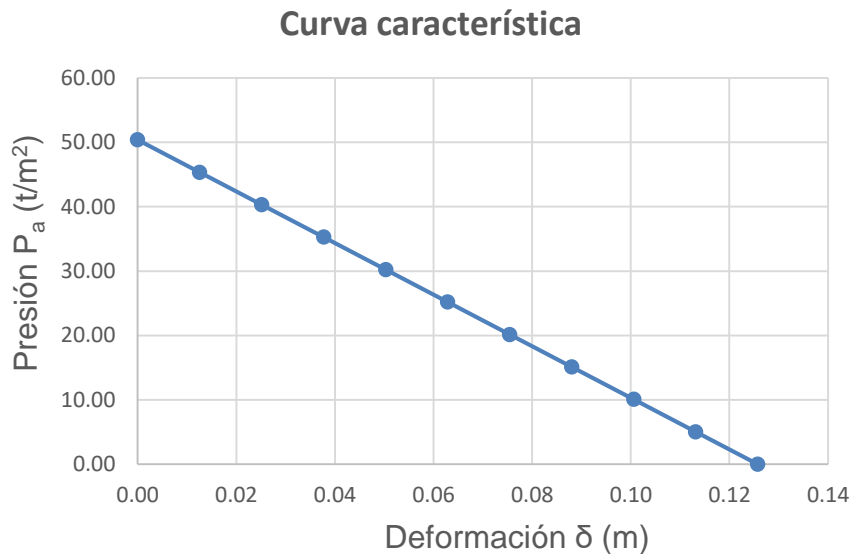


Tabla 7. Resultados del análisis del modelo con módulo de Poisson = 0.48.



Una vez presentados los resultados obtenidos del análisis mediante el software, se muestran la comparación de éstos haciendo las tres variaciones del módulo de Poisson, en una sola tabla y en una misma gráfica para facilitar la visualización de las diferencias.

	$\nu = 0.15$	$\nu = 0.30$	$\nu = 0.48$
Presión P_a (t/m^2)	Deformación δ (m)	Deformación δ (m)	Deformación δ (m)
50.40	0.0000	0.0000	0.0000
45.36	0.0193	0.0197	0.0126
40.32	0.0386	0.0395	0.0252
35.28	0.0579	0.0592	0.0377
30.24	0.0772	0.0790	0.0503
25.20	0.0965	0.0987	0.0629
20.16	0.1158	0.1184	0.0755
15.12	0.1351	0.1382	0.0880
10.08	0.1544	0.1579	0.1006
5.04	0.1737	0.1777	0.1132
0.00	0.1930	0.1974	0.1258

Tabla 8. Comparación numérica de las deformaciones en la contra – bóveda con variación de módulo de Poisson.

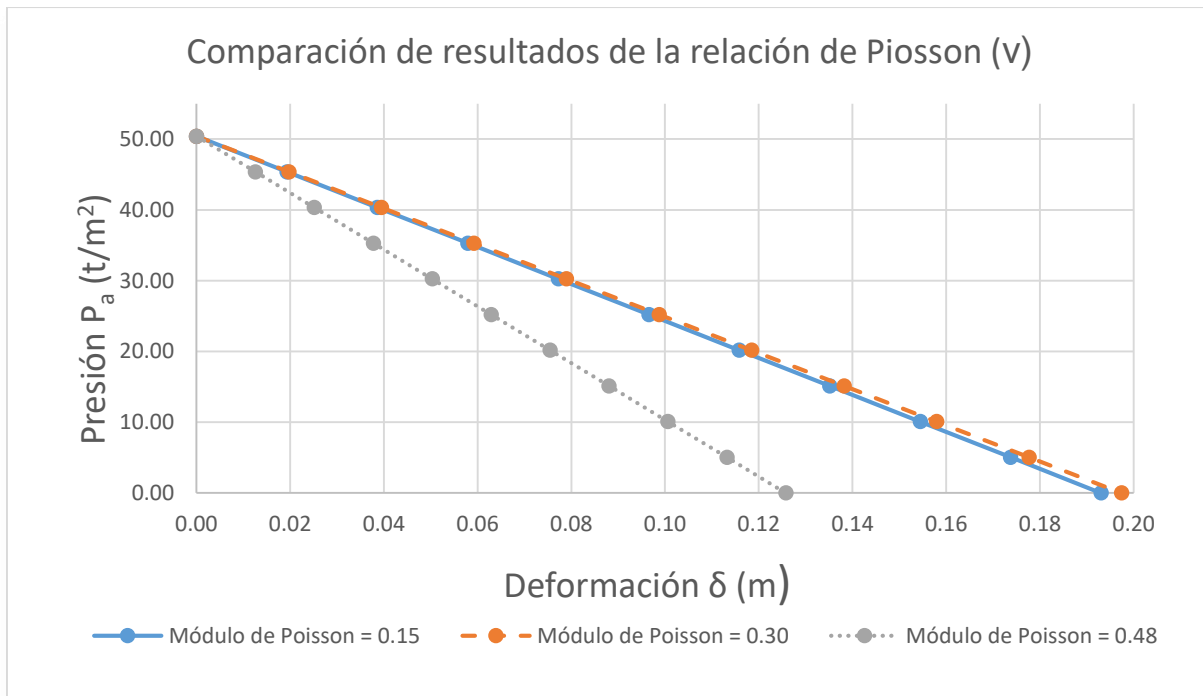


Figura 39. Gráfica de comparación de curvas características con variación en la relación de Poisson.



Como se puede observar tanto en la gráfica como si comparamos los valores de las deformaciones no hay una variación de éstas que se pueda relacionar proporcionalmente a la variación del parámetro estudiado en esta fase del análisis.

5.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS VARIANDO EL MÓDULO DE ELASTICIDAD.

El módulo de elasticidad del suelo es otra de las propiedades importantes de éste, define que tan rígido o elástico es un material. Así como el módulo de Poisson, esta propiedad está directamente relacionada a las deformaciones del material, por lo cual se recurre a hacer la comparación de los resultados al variarla entre el rango de valores de un suelo blando o flojo, según la clasificación de (Ministerio de vivienda, 2006) que va de los 8 a 40 MPa ,mostrada en la *figura 40*:

Tipo de suelo	N _{STP}	Qu (kN/m ²)	E (MN/m ²)
Suelos muy flojos o muy blandos.	< 10	0 – 80	< 8
Suelos flojos o blandos.	10 – 25	80 – 150	8 – 40
Suelos medios.	25 – 50	150 – 300	40 – 100
Suelos compactos o duros.	50 – Rechazo	300 – 500	100 – 500
Rocas blandas.	Rechazo	500 – 5,000	500 – 8,000
Rocas duras.	Rechazo	5,000 – 40,000	8,000 – 15,000
Rocas muy duras.	Rechazo	> 40,000	> 15,000

Figura 40. Tabla D.23. Valores orientativos de N_{STP}, resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad de suelos (Ministerio de vivienda, 2006).

En la *tabla 9* se presentan las propiedades del suelo que quedan fijas en los tres modelos y la variación del módulo de elasticidad, la propiedad estudiada en esta parte del análisis.

Propiedades del medio	Características de la malla		Valores proporcionados para el módulo de elasticidad (E)
v = 0.30	Geometría del elemento	Triangular con 3 puntos nodales	E ₁ = 10 Mpa
γ = 1.8 t/m ³	Número de nodos	3,425.00	E ₂ = 12 Mpa
H = 28 m.	Número de elementos	1,668.00	E ₃ = 20 Mpa

Tabla 9. Propiedades de los modelos con variación del Módulo de elasticidad (E).



El comportamiento de las deformaciones de la sección transversal se muestra en las *figuras 41 y 42*. Como es evidente este es exactamente el mismo que el análisis en la variación del módulo de Poisson.

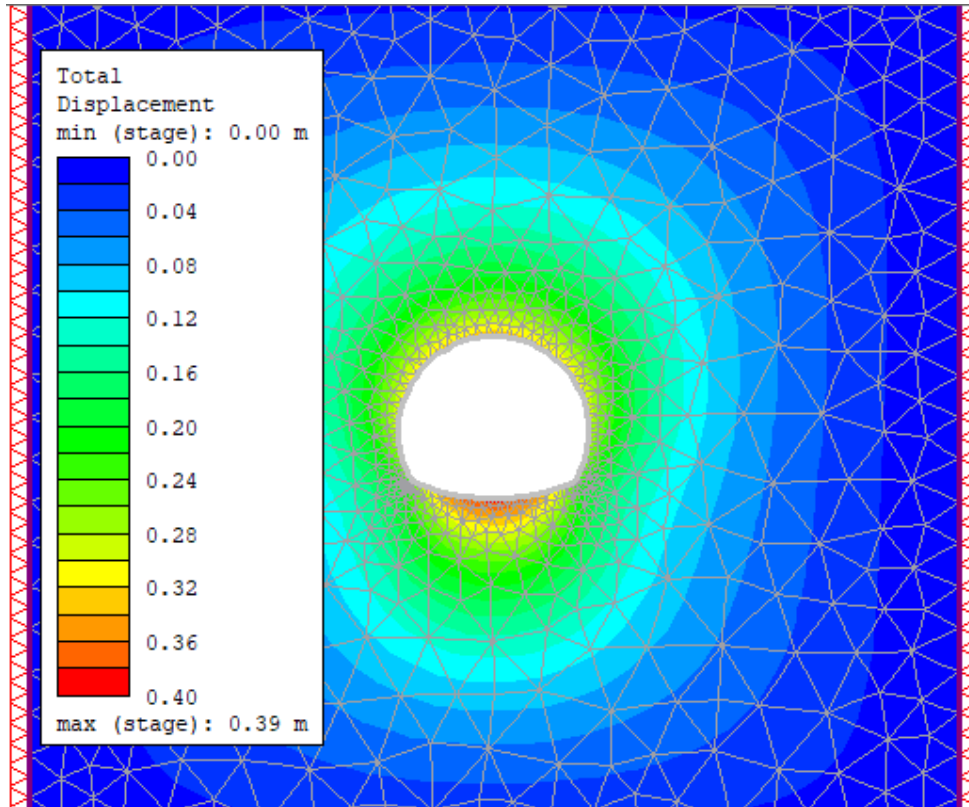


Figura 41. Análisis del comportamiento de las deformaciones del medio.

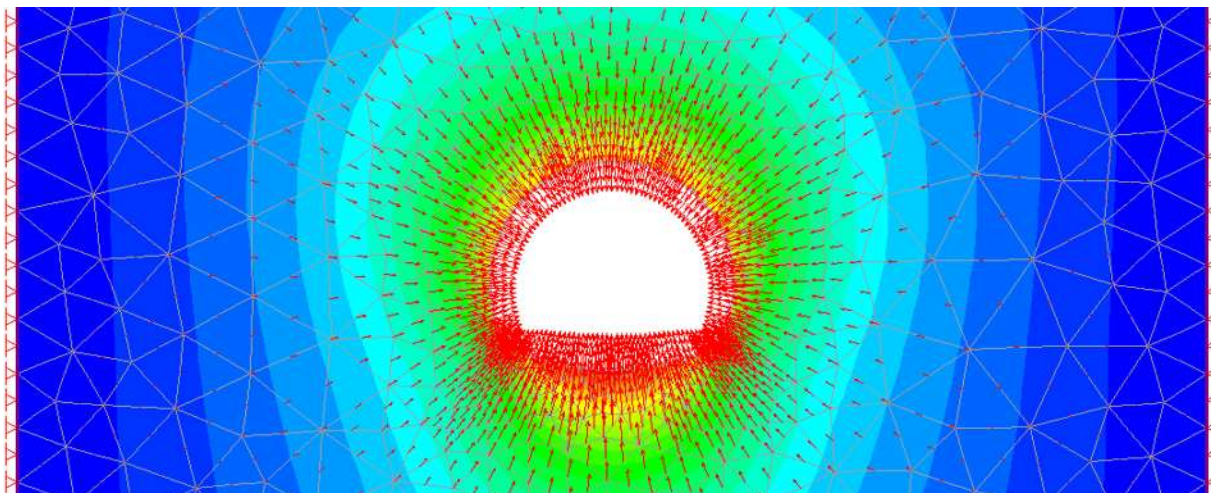


Figura 42. Fluencia de esfuerzos que provocan las deformaciones del medio.



Una vez ubicado el punto crítico de las deformaciones se repite el procedimiento para la obtención de sus curvas esfuerzo – deformación las cuales se muestran a continuación en las *tablas 10, 11 y 12*.

RESULTADOS DE LAS DEFORMACIONES DEL MODELO CON E = 10 MPa.

Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a las etapas del modelo

Stage Number	Total Displacement [m]
1	0.0000
2	0.0395
3	0.0790
4	0.1184
5	0.1579
6	0.1974
7	0.2369
8	0.2764
9	0.3159
10	0.3553
11	0.3948

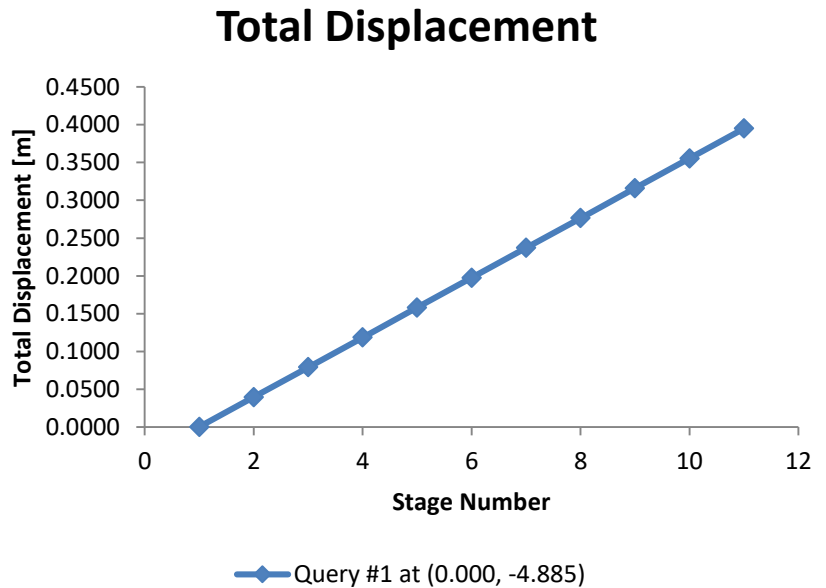


Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a la presión dentro del túnel

Presión Pa (t/m ²)	Deformación δ (m)
50.40	0.0000
45.36	0.0395
40.32	0.0790
35.28	0.1184
30.24	0.1579
25.20	0.1974
20.16	0.2369
15.12	0.2764
10.08	0.3159
5.04	0.3553
0.00	0.3948

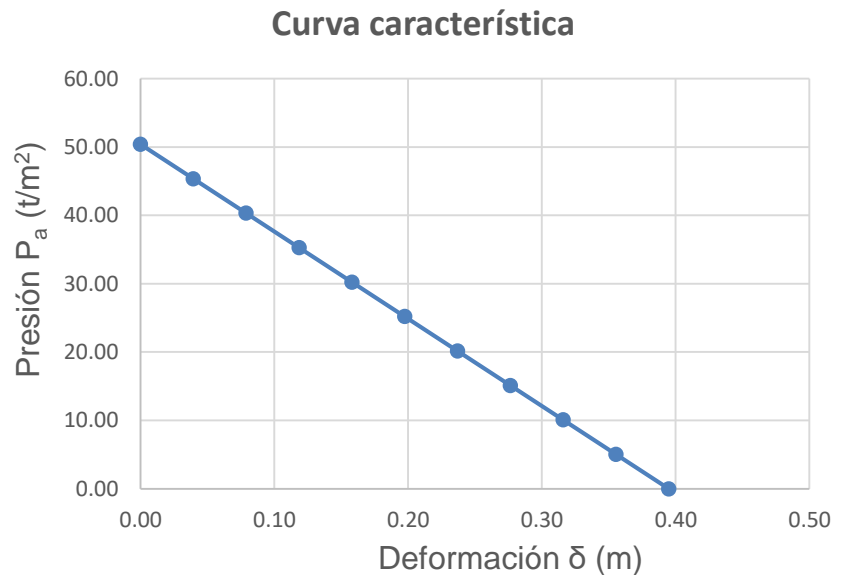


Tabla 10. Resultados del análisis del modelo con E = 10 MPa.



RESULTADOS DE LAS DEFORMACIONES DEL MODELO CON E = 12 MPa.

Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a las etapas del modelo

Stage Number	Total Displacement [m]
1	0.0000
2	0.0329
3	0.0658
4	0.0987
5	0.1316
6	0.1645
7	0.1974
8	0.2303
9	0.2632
10	0.2961
11	0.3290

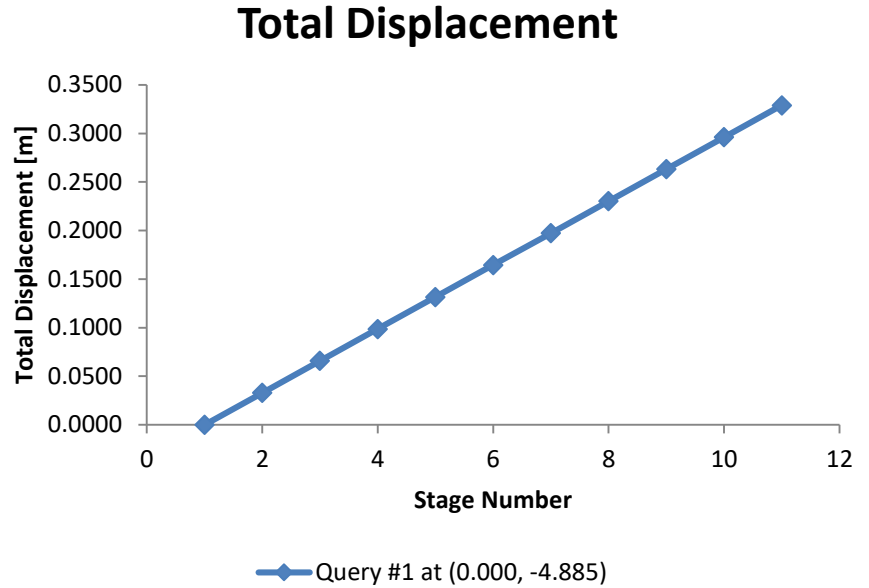


Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a la presión dentro del túnel

Presión Pa (t/m ²)	Deformación δ (m)
50.40	0.0000
45.36	0.0329
40.32	0.0658
35.28	0.0987
30.24	0.1316
25.20	0.1645
20.16	0.1974
15.12	0.2303
10.08	0.2632
5.04	0.2961
0.00	0.3290

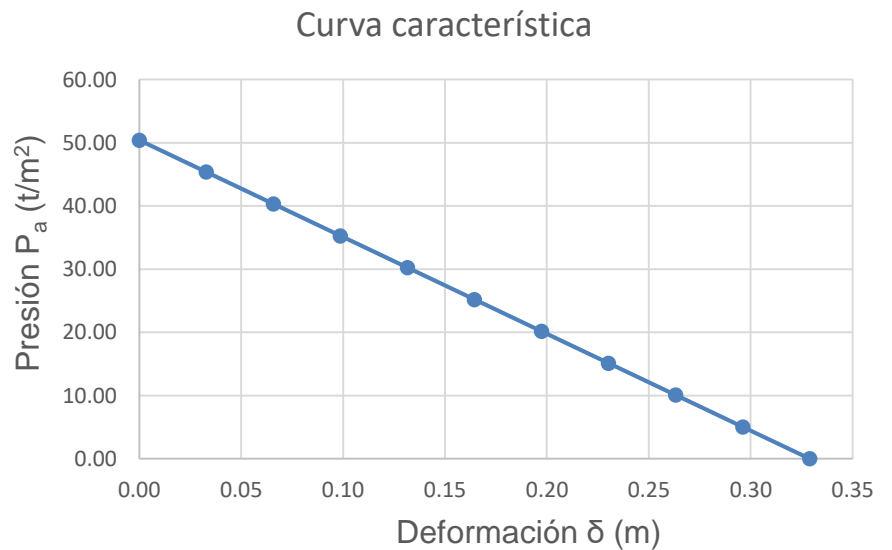


Tabla 11. Resultados del análisis del modelo con E = 12 MPa.



RESULTADOS DE LAS DEFORMACIONES DEL MODELO CON E = 20 MPa.

Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a las etapas del modelo

Stage Number	Total Displacement [m]
1	0.0000
2	0.0197
3	0.0395
4	0.0592
5	0.0790
6	0.0987
7	0.1184
8	0.1382
9	0.1579
10	0.1777
11	0.1974

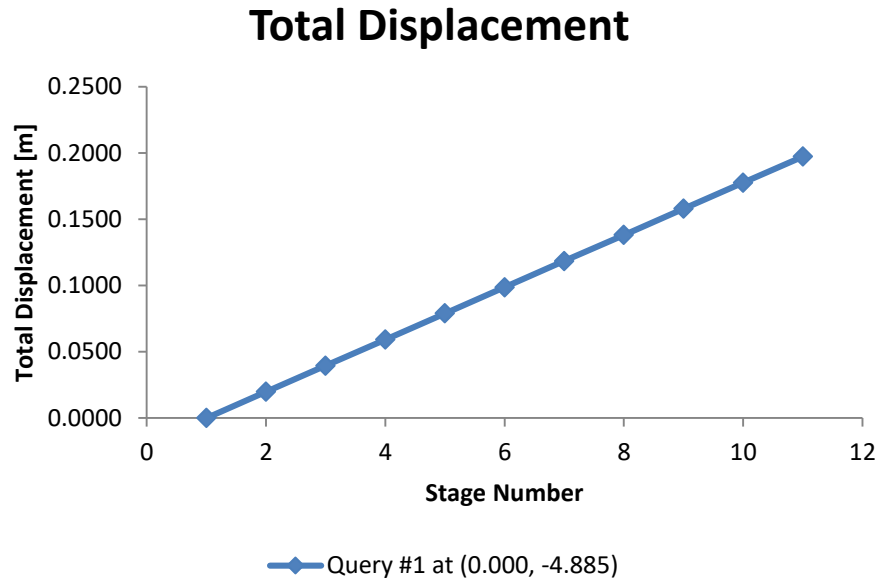


Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a la presión dentro del túnel

Presión Pa (t/m ²)	Deformación δ (m)
50.40	0.0000
45.36	0.0197
40.32	0.0395
35.28	0.0592
30.24	0.0790
25.20	0.0987
20.16	0.1184
15.12	0.1382
10.08	0.1579
5.04	0.1777
0.00	0.1974

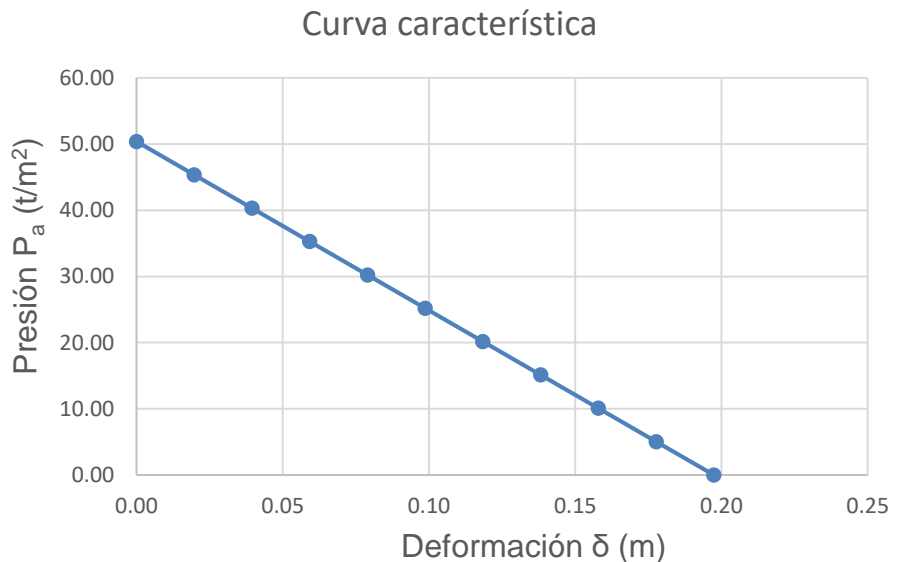


Tabla 12. Resultados del análisis del modelo con E = 20 MPa.



Al igual que en el caso anterior, se aprecia de una mejor manera las diferencias de los resultados del análisis si se ponen estos en una sola tabla y gráfica como se muestra a continuación.

	E = 10 Mpa	E = 12 MPa	E = 20 MPa
Presión Pa (t/m ²)	Deformación δ (m)	Deformación δ (m)	Deformación δ (m)
50.40	0.0000	0.0000	0.0000
45.36	0.0395	0.0329	0.0197
40.32	0.0790	0.0658	0.0395
35.28	0.1184	0.0987	0.0592
30.24	0.1579	0.1316	0.0790
25.20	0.1974	0.1645	0.0987
20.16	0.2369	0.1974	0.1184
15.12	0.2764	0.2303	0.1382
10.08	0.3159	0.2632	0.1579
5.04	0.3553	0.2961	0.1777
0.00	0.3948	0.3290	0.1974

Tabla 13. Comparación de las deformaciones en la contra – bóveda con variación del módulo de elasticidad (E).

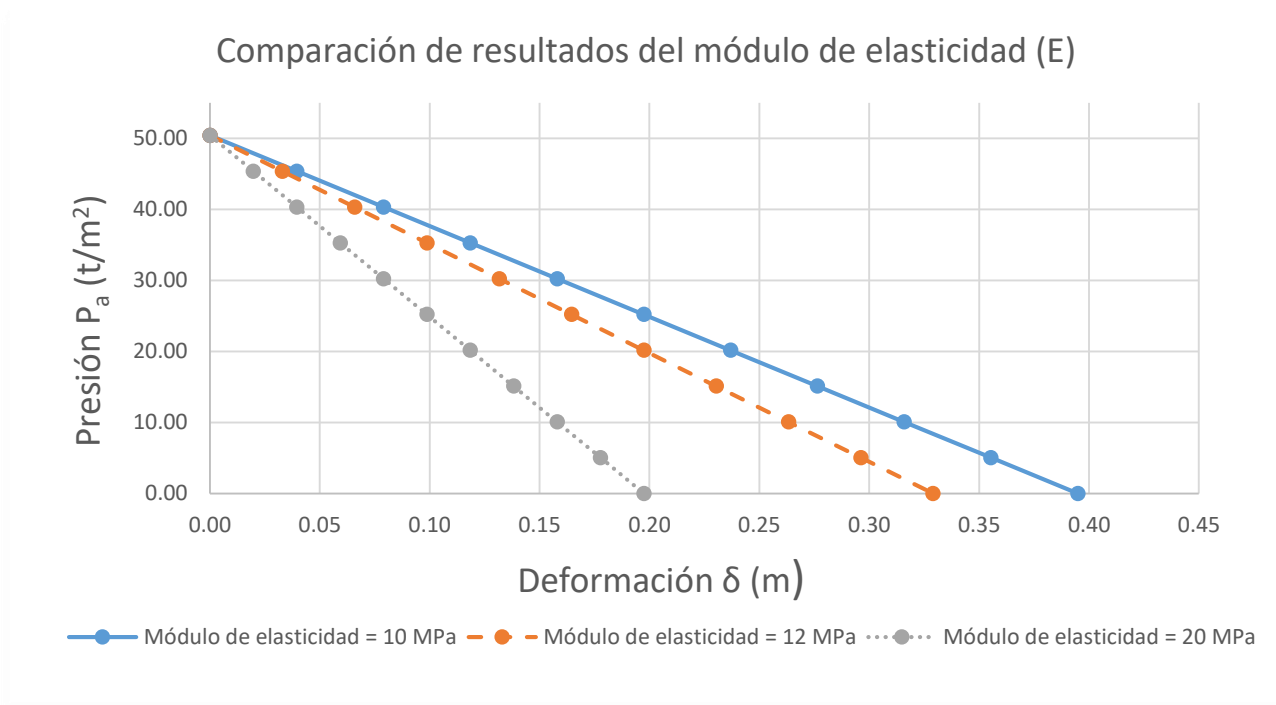


Figura 43. Gráfica de comparación de las tres curvas características con variación del módulo de Elasticidad.



A diferencia de la comparación de resultados de la variación del módulo de Poisson, en esta variación sí que hay una proporcionalidad inversa entre la magnitud del módulo de elasticidad y las deformaciones que se presentan en la periferia de la sección transversal del túnel, efecto de la relajación de los esfuerzos al interior de éste.

De la observación de estos resultados se deduce entonces que, como es de esperarse, pero ahora basado en resultados del software, el suelo, mientras más rígido sufre menores deformaciones al ejecutarse la excavación del túnel, y la deformación máxima se presentará, al igual que en el caso anterior, en la contra – bóveda de la sección.



5.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS VARIANDO LA PROFUNDIDAD DEL EJE DE LA EXCAVACIÓN

La profundidad a la que se realiza la excavación, no es una propiedad geo mecánica del medio, sin embargo, juega un papel muy importante en el comportamiento de las deformaciones y esfuerzos a los que se encuentra sometido el túnel.

En este capítulo se realizó la variación de la profundidad en tres diferentes modelos, empezando en 18 m medidos de la superficie al centro de la excavación, y aumentando en 10 m., respecto al anterior para los otros dos modelos, finalizando con un túnel a una profundidad de 38 m.

H	Propiedades geomecánicas del medio	Presión P_a <i>in situ</i>	Características de la malla	
18 m	$E = 12 \text{ Mpa}$	32.40 t/m^2	Geometría de la malla	Triangular de 6 nodos
	$\nu = 0.30$		Número de nodos	2,552
	$\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$		Número de elementos	1,192

Tabla 14. Propiedades del modelo con $H = 18 \text{ m}$.

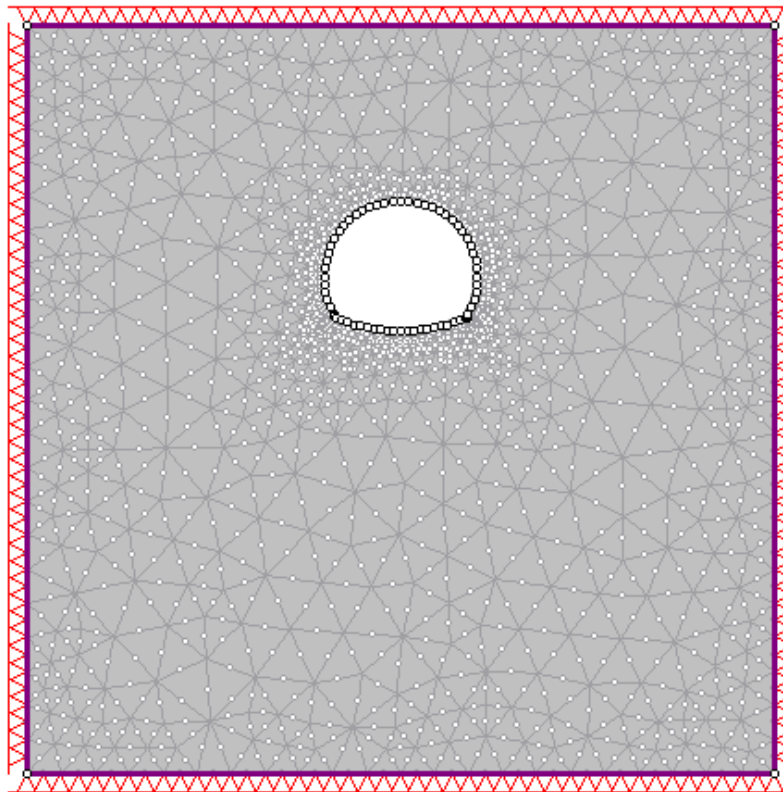


Figura 44. Malla de elementos finitos del modelo $H = 18 \text{ m}$.

Una vez analizado el modelo, es obtenido el comportamiento de la sección.

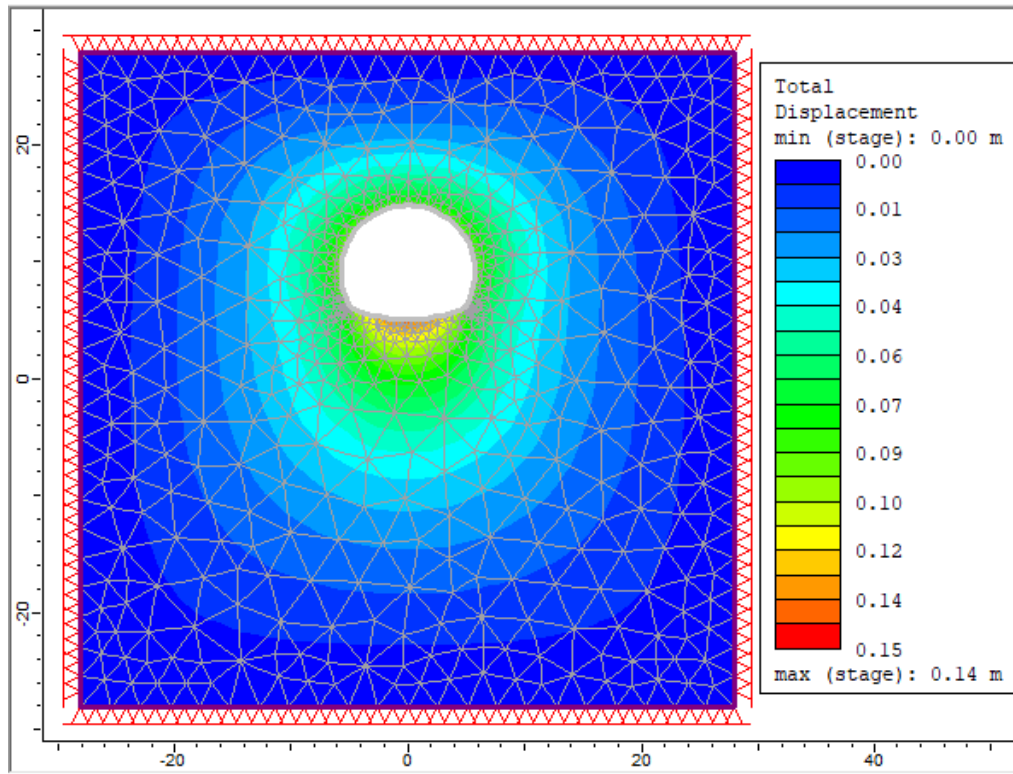


Figura 45. Análisis del comportamiento de las deformaciones del medio.

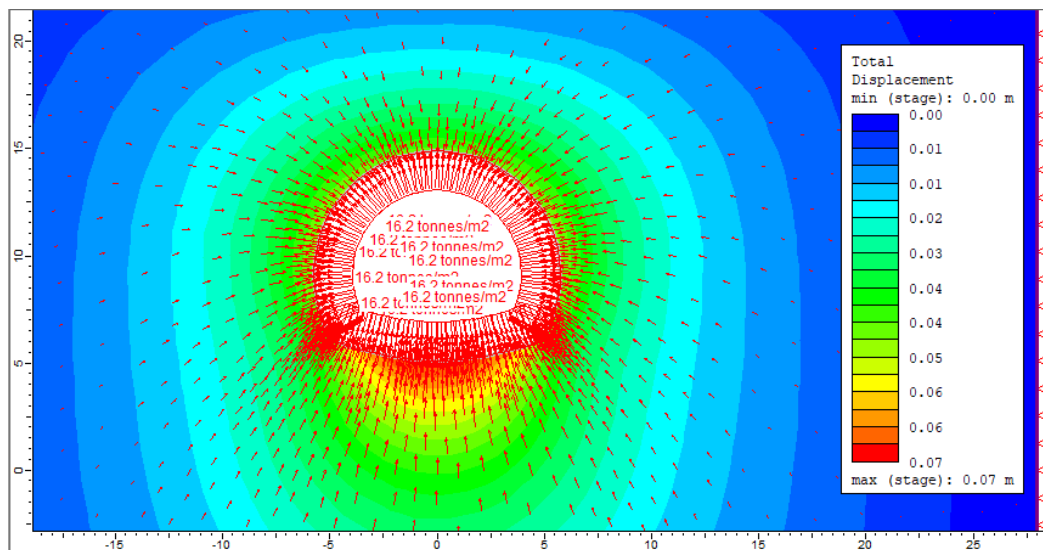


Figura 46. Fluencia de esfuerzos que provocan las deformaciones del medio.

Es notable un comportamiento igual al de los análisis anteriores, presentando su deformación más grande en el centro de la contra – bóveda en todas las etapas.

En tablas y de manera gráfica se presentan el resultado del punto crítico de deformación en la *tabla 15*



RESULTADOS DE LAS DEFORMACIONES DEL MODELO CON H = 18 m.

Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a las etapas del modelo

Stage Number	Total Displacement [m]
1	0.0000
2	0.0140
3	0.0282
4	0.0421
5	0.0561
6	0.0701
7	0.0841
8	0.0982
9	0.1122
10	0.1262
11	0.1402

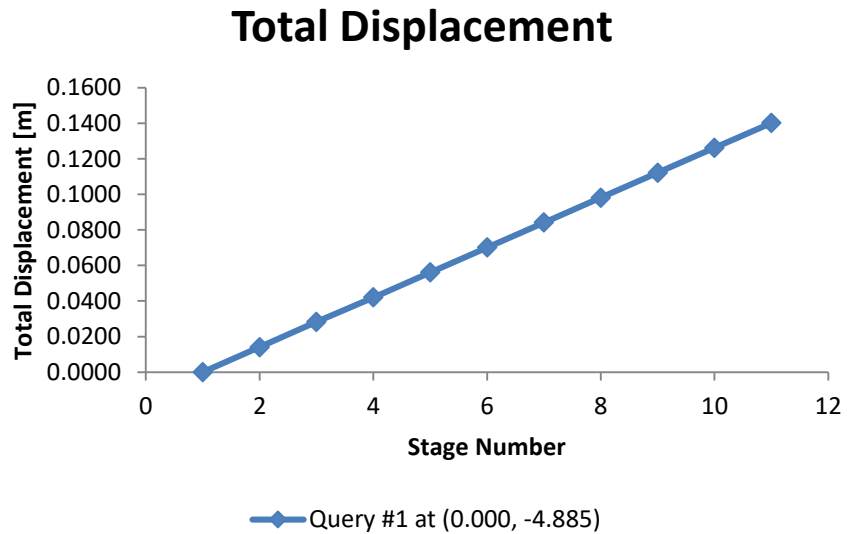


Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a la presión dentro del túnel

Presión Pa (t/m ²)	Deformación δ (m)
32.40	0.0000
29.16	0.0140
25.92	0.0282
22.68	0.0421
19.44	0.0561
16.20	0.0701
12.96	0.0841
9.72	0.0982
6.48	0.1122
3.24	0.1262
0.00	0.1402

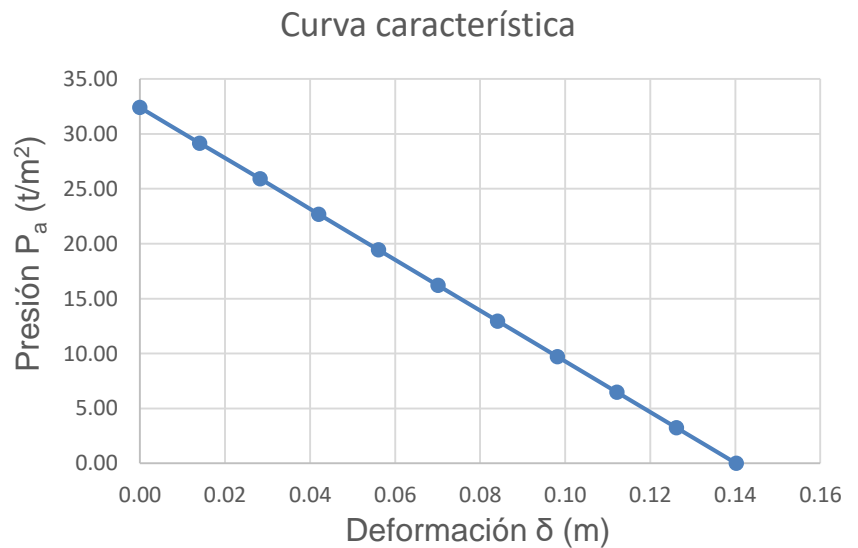


Tabla 15. Resultados del análisis del modelo con H = 18 m.



La siguiente variación del modelo se realizó a 28 m.

H	Propiedades geomecánicas del medio	Presión P_a <i>in situ</i>	Características de la malla	
28 m	$E = 12 \text{ Mpa}$	50.40 t/m^2	Geometría de la malla	Triangular de 6 nodos
	$\nu = 0.30$		Número de nodos	3,425
	$\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$		Número de elementos	1,668

Tabla 16. Propiedades de modelo con $H = 28 \text{ m}$.

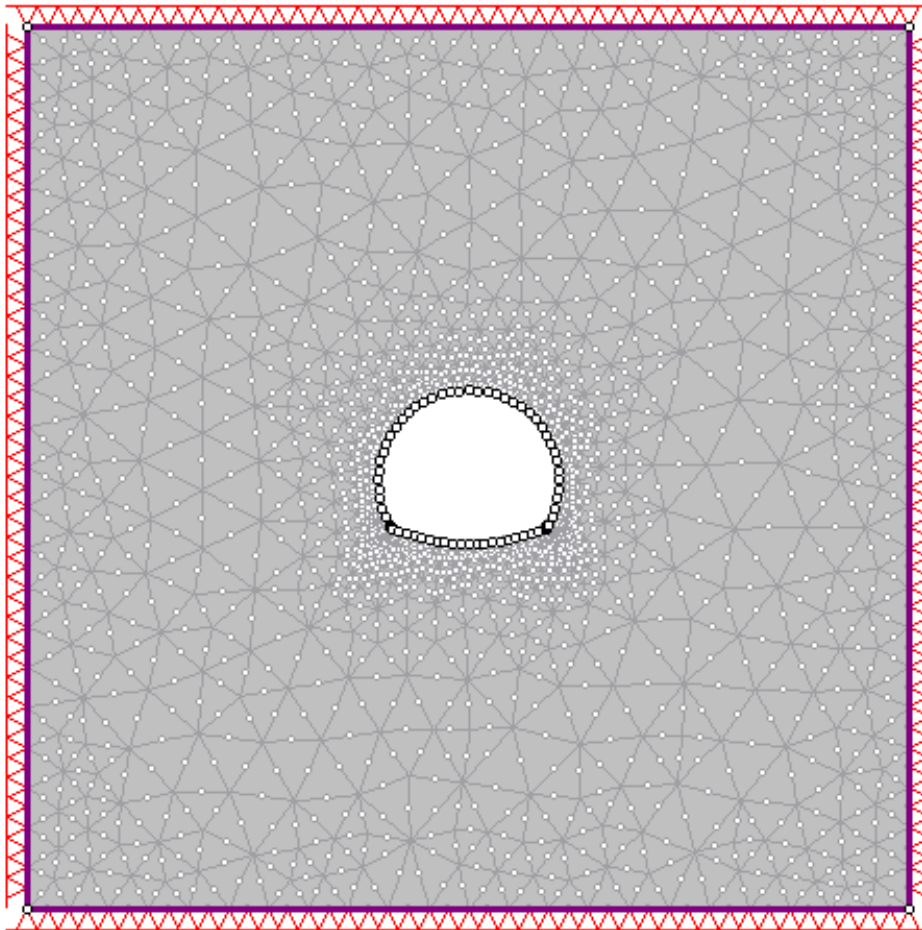


Figura 47. Malla de elementos finitos del modelo $H = 28 \text{ m}$.

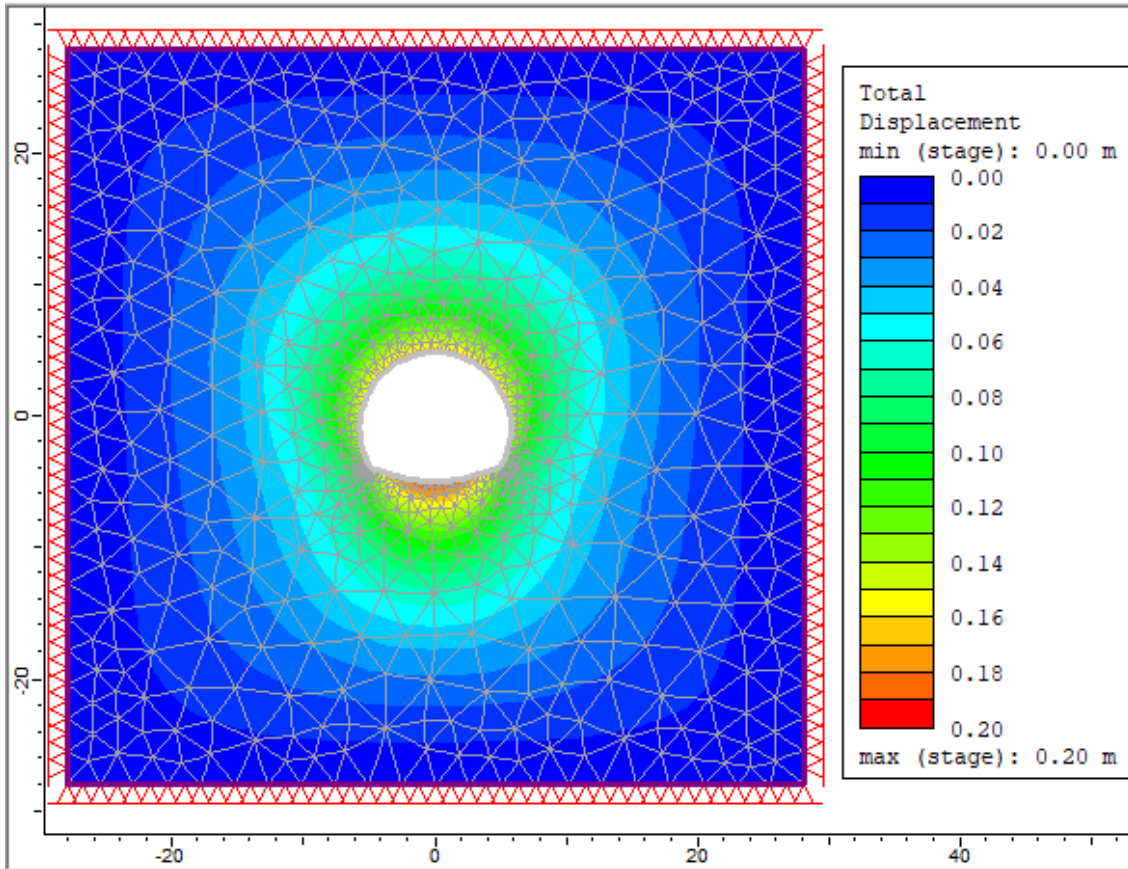


Figura 48. Análisis del comportamiento de las deformaciones del medio.

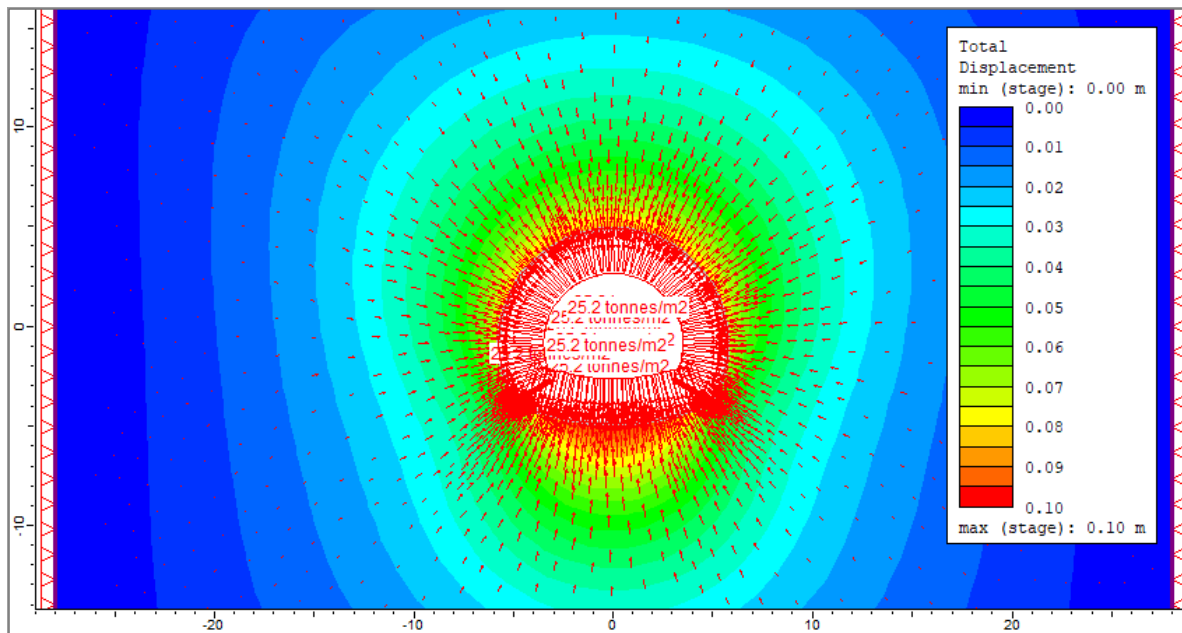


Figura 49. Fluencia de esfuerzos que provocan las deformaciones del medio.



De nueva cuenta el punto de mayor deformación se encuentra en el centro de la contra – bóveda.

RESULTADOS DE LAS DEFORMACIONES DEL MODELO CON H = 28 m.

Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a las etapas del modelo

Stage Number	Total Displacement [m]
1	0.0000
2	0.0197
3	0.0395
4	0.0592
5	0.0790
6	0.0987
7	0.1184
8	0.1382
9	0.1579
10	0.1777
11	0.1974

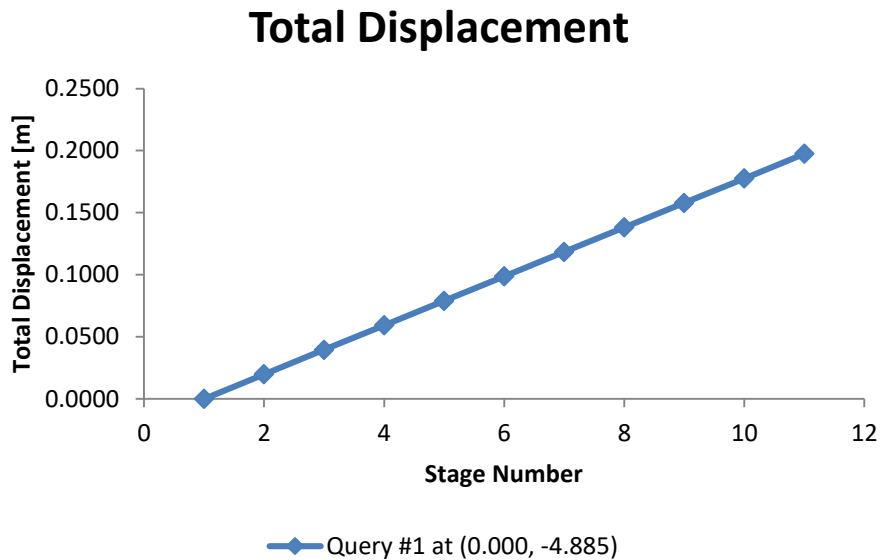


Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a la presión dentro del túnel

Presión Pa (t/m ²)	Deformación δ (m)
50.40	0.0000
45.36	0.0197
40.32	0.0395
35.28	0.0592
30.24	0.0790
25.20	0.0987
20.16	0.1184
15.12	0.1382
10.08	0.1579
5.04	0.1777
0.00	0.1974

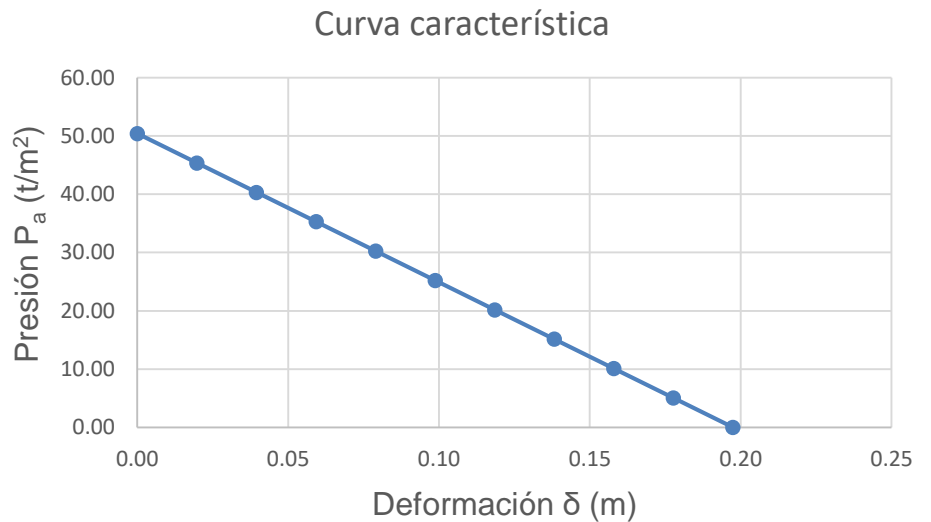


Tabla 17. Resultados del análisis del modelo con H = 28 m.



Por último, se realizó el análisis del túnel con profundidad de 38 m. A continuación, sus características y resultados:

H	Propiedades geomecánicas del medio	Presión P_a <i>in situ</i>	Características de la malla	
38 m	$E = 12 \text{ Mpa}$	68.40 t/m^2	Geometría de la malla	Triangular de 6 nodos
	$\nu = 0.30$		Número de nodos	3,177
	$\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$		Número de elementos	1,544

Tabla 18. Propiedades de modelo con $H = 38 \text{ m}$.

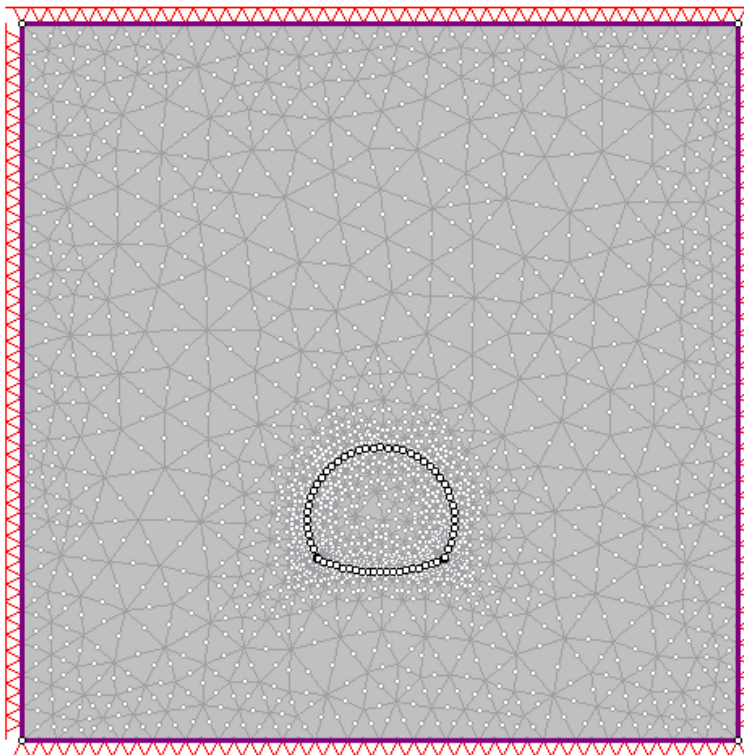


Figura 50. Malla de elementos finitos del modelo $H = 38 \text{ m}$.

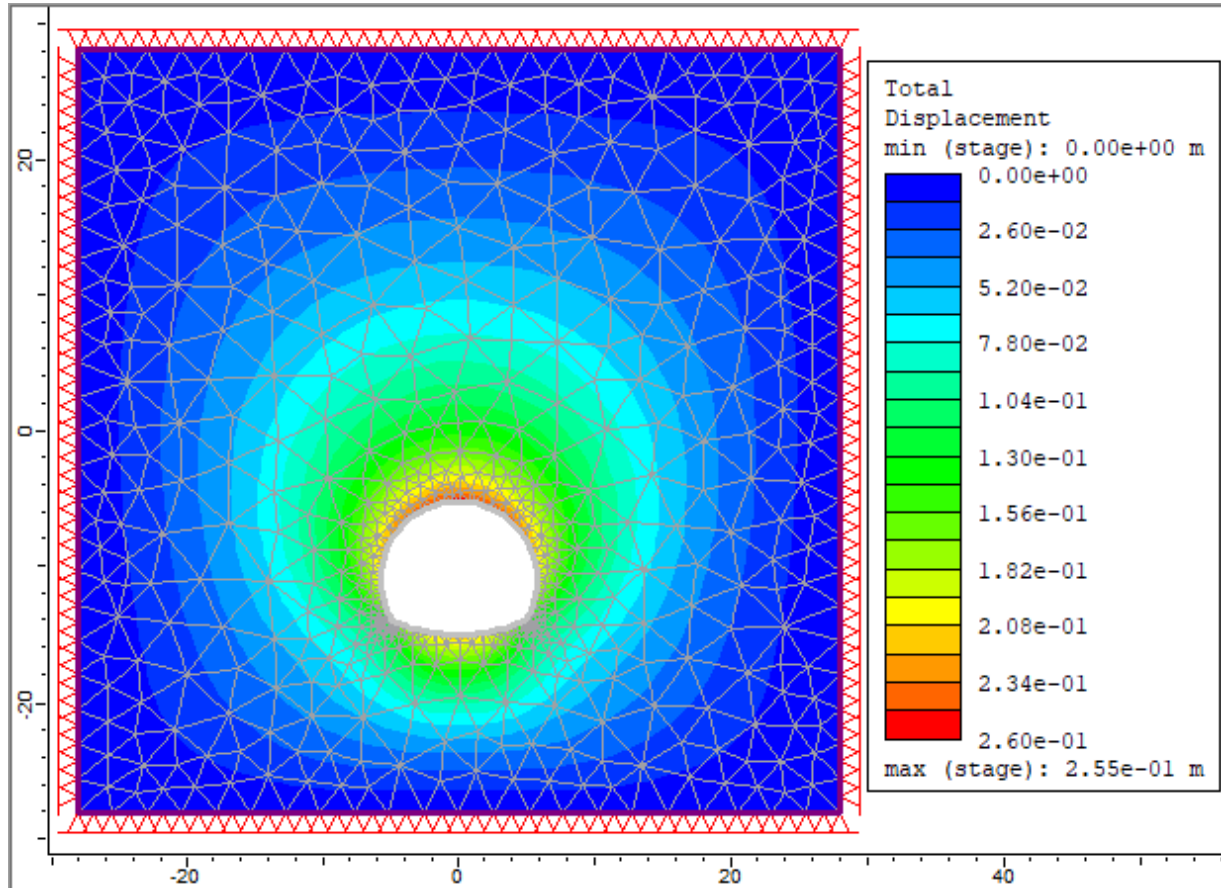


Figura 51. Análisis del comportamiento de las deformaciones del medio.

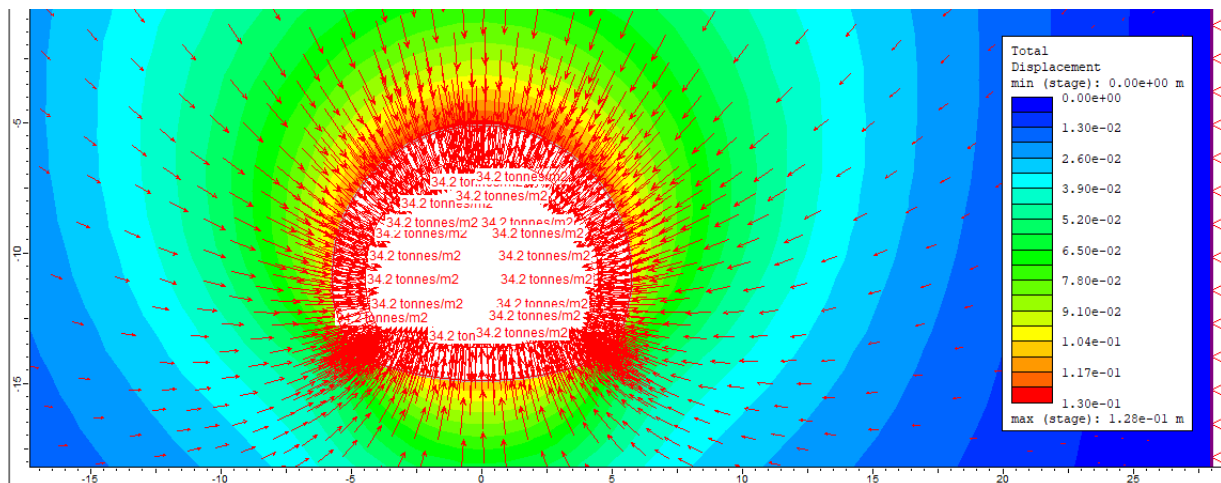


Figura 52. Fluencia de esfuerzos que provocan las deformaciones del medio.



RESULTADOS DE LAS DEFORMACIONES DEL MODELO CON H = 38 m.

Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a las etapas del modelo

Stage Number	Total Displacement [m]
1	0.0000
2	0.0255
3	0.0510
4	0.0765
5	0.1020
6	0.1274
7	0.1529
8	0.1784
9	0.2039
10	0.2294
11	0.2549

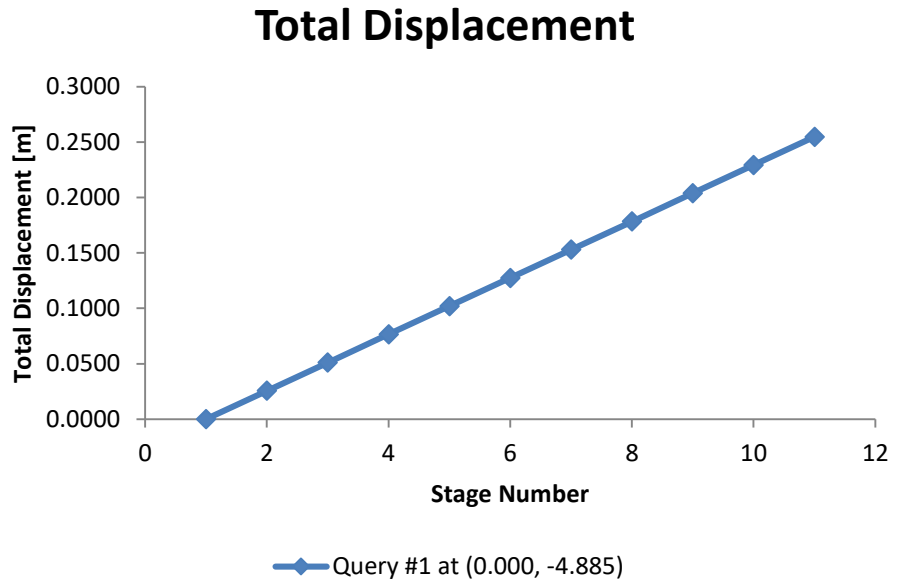


Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a la presión dentro del túnel

Presión Pa (t/m ²)	Deformación δ (m)
68.40	0.0000
61.56	0.0255
54.72	0.0510
47.88	0.0765
41.04	0.1020
34.20	0.1274
27.36	0.1529
20.52	0.1784
13.68	0.2039
6.84	0.2294
0.00	0.2549

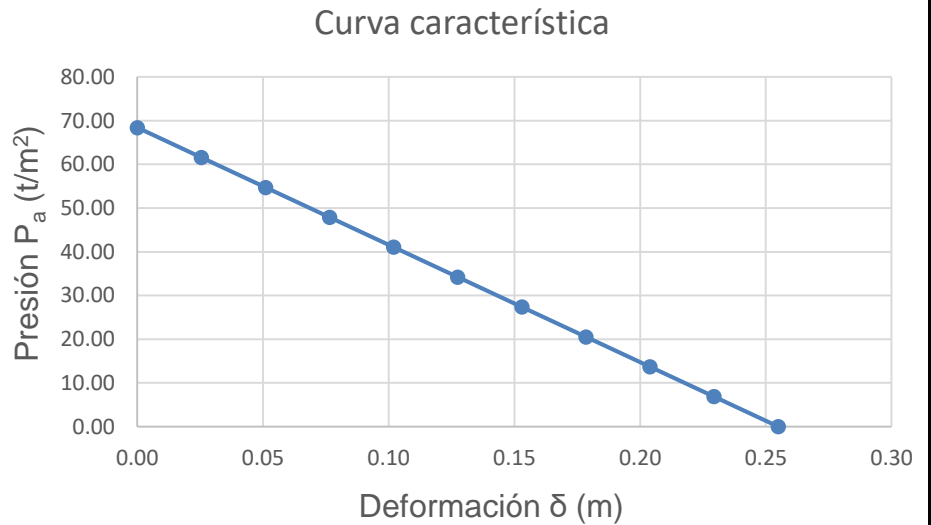


Tabla 19. Resultados del análisis del modelo con H = 38 m.



En este modelo, sí que se presenta una diferencia con todos los anteriores, pues el punto de mayor deformación ha cambiado su localización respecto de éstos, ubicándose en medio de la bóveda.

La razón de este cambio en el punto de mayor deformación es debida a que al estar la sección transversal más cerca de la frontera del medio en el eje y en la parte de la contra – bóveda, el material no ejerce la suficiente presión para deformarla en esa parte, por lo contrario, en la bóveda se presentan los mayores esfuerzos y, por lo tanto, mayores deformaciones.

Adicionalmente a estos modelos, se realizó otro más, esta vez modificando las fronteras del medio, pero con el túnel a la misma profundidad de 38 m., del análisis anterior. En la *tabla 20* se presentan las propiedades del modelo.

H	Propiedades geomecánicas del medio	Presión P_a <i>in situ</i>	Características de la malla	
38 m	E = 12 Mpa	68.40 t/m ²	Geometría de la malla	Triangular de 6 nodos
	v = 0.30		Número de nodos	4,487
	$\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$		Número de elementos	2,198

Tabla 20. Propiedades del modelo con la variación de la frontera en el eje y.

Para entender mejor el cambio realizado, en la *figura 53* se comparan los dos modelos con profundidad de 38 m.

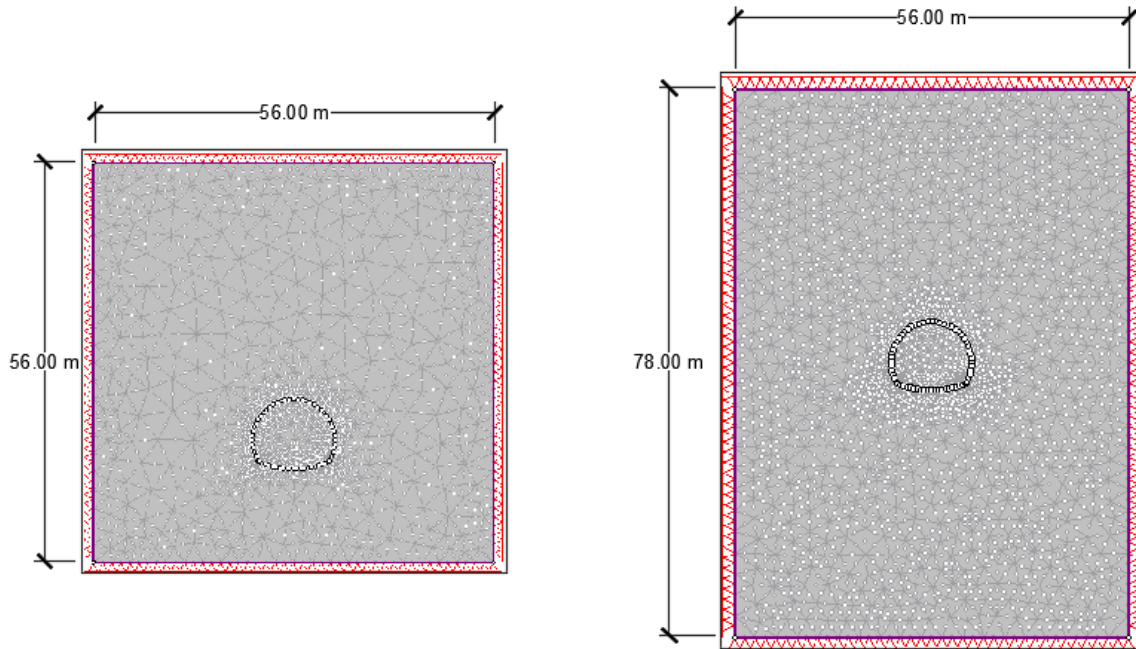


Figura 53. Comparación de fronteras con la misma profundidad de excavación.

Se ejecutó el análisis al igual que los modelos anteriores y se presentan los resultados en la figura 54 y figura 55.

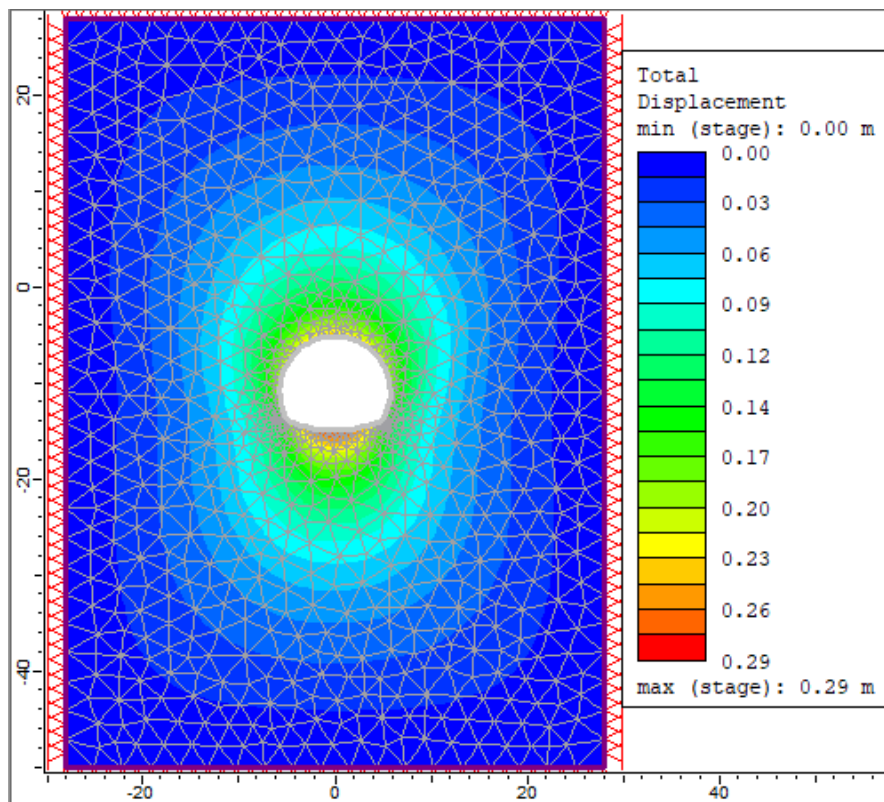


Figura 54. Análisis del comportamiento de las deformaciones del medio.

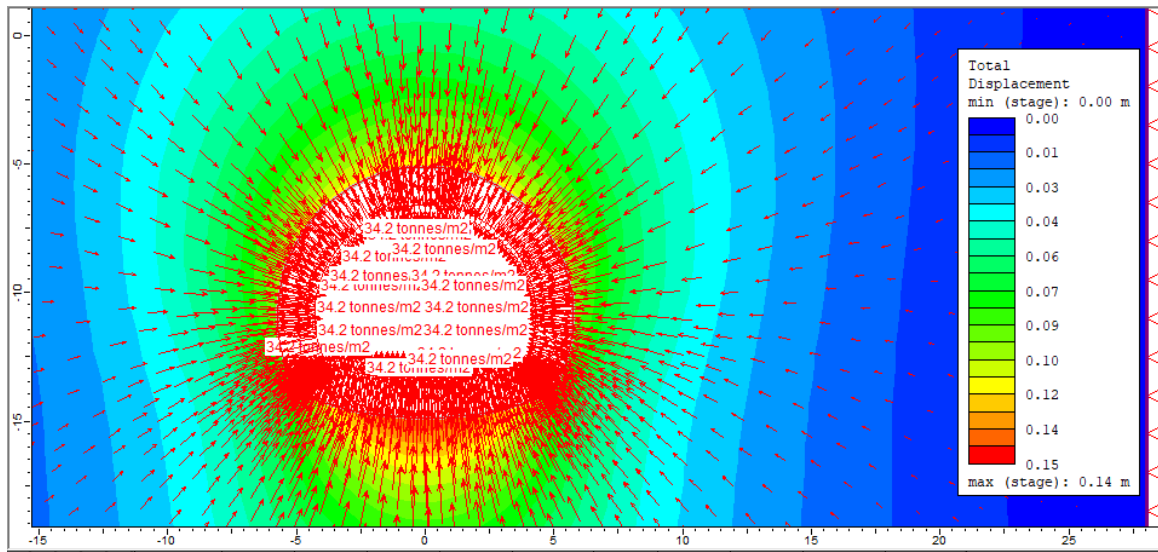


Figura 55. Fluencia de esfuerzos que provocan las deformaciones del medio.



RESULTADOS DE LAS DEFORMACIONES DEL MODELO CON H = 38 m.

Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a las etapas del modelo

Stage Number	Total Displacement [m]
1	0.0000
2	0.0286
3	0.0573
4	0.0859
5	0.1146
6	0.1432
7	0.1719
8	0.2005
9	0.2291
10	0.2578
11	0.2864

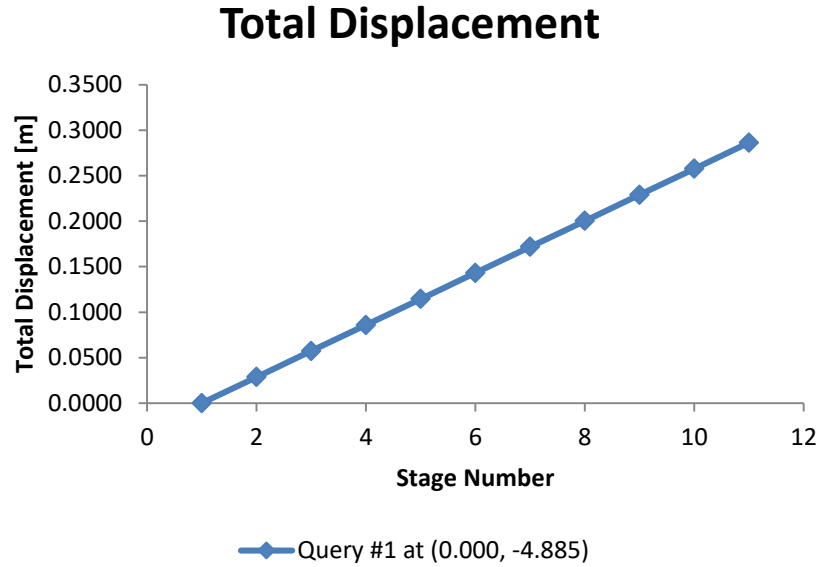


Tabla y curva de deformaciones del punto crítico con respecto a la presión dentro del túnel

Presión Pa (t/m ²)	Deformación δ (m)
68.40	0.0000
61.56	0.0286
54.72	0.0573
47.88	0.0859
41.04	0.1146
34.20	0.1432
27.36	0.1719
20.52	0.2005
13.68	0.2291
6.84	0.2578
0.00	0.2864

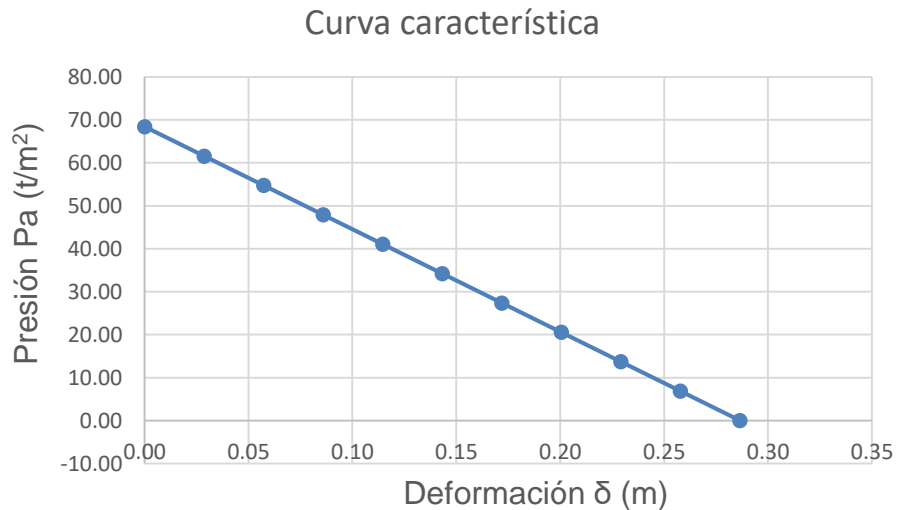


Tabla 21. Resultados del análisis del modelo con H = 38 m y frontera inferior modificada.

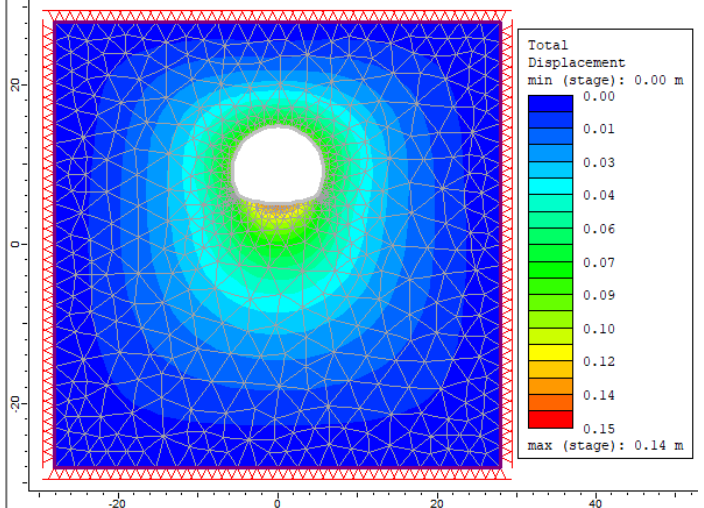


Los resultados arrojados por el análisis y mostrados en las *figuras 54 y 55*, indican que el punto crítico con mayor deformación en la sección transversal del túnel se presenta en la contra – bóveda. En el modelo anterior, con la malla de dimensiones de 56m x 56m, y profundidad de 38m dicho punto crítico se ubica en la bóveda.

Estos resultados demuestran que, si la sección transversal del túnel está ubicada cerca de las fronteras del medio, dichas fronteras influyen en el comportamiento de los esfuerzos actuantes y que provocan las deformaciones.

La frontera del medio no indica que el material esté aislado, las fronteras pueden indicar que existe un cambio abrupto en las propiedades geo – mecánicas del material, o incluso que hay un cambio del material, ya que, en los modelos analizados en este estudio, el material en toda la malla se considera homogéneo e isótropo, y la frontera puede representar este cambio de material. Un ejemplo de este cambio sería que; en los modelos de este trabajo se analizaron propiedades de suelos, así que, la frontera podría indicar un cambio de material de suelo a roca, que sería mucho más rígida, influyendo en la distribución de esfuerzos y presentando un comportamiento como el mostrado en la *figura 51 y figura 52*.

Por último, con fines de hacer una comparación de magnitudes de deformación en función de la profundidad de la sección transversal del túnel, se presenta la *tabla 22* comparando los 4 modelos antes presentados.

H (m)	Comportamiento de la sección del túnel	Deformación máxima del punto crítico δ (m)
18		0.1402



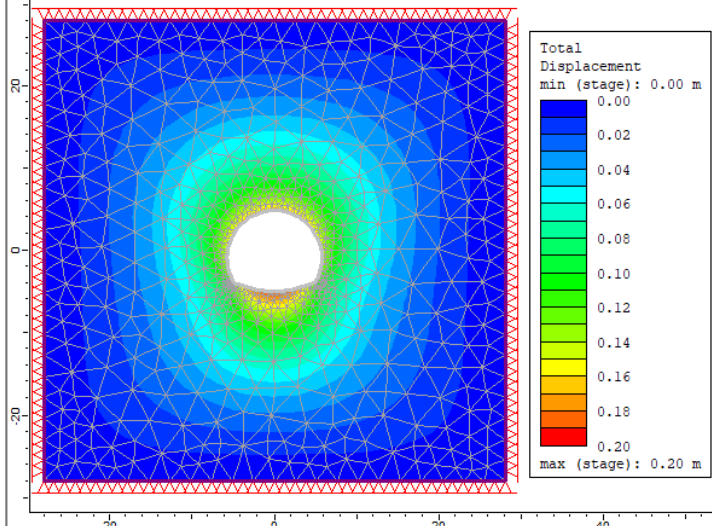
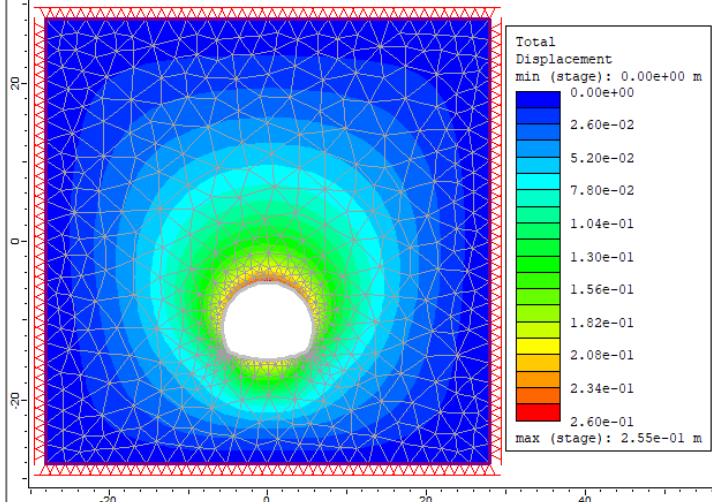
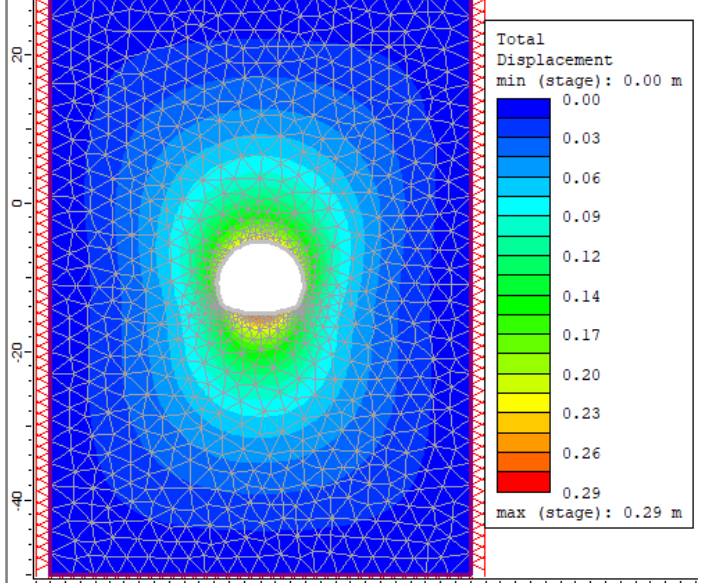
28		0.1974
38		0.2549
38		0.2864

Tabla 22. Comparación de resultados con variación de la profundidad H.



5.6. NORMALIZACIÓN DE LAS CURVAS CON RESPECTO AL MÓDULO DE ELASTICIDAD

En este capítulo se realiza la normalización de las curvas características de los resultados mostrados y comparados en el capítulo 5.4., en los cuáles se analiza la influencia del módulo elástico del medio en las deformaciones de la sección transversal del túnel.

La normalización está basada en el uso de la *ecuación 4*. Esta ecuación emplea los parámetros que tienen más influencia en el comportamiento del medio, este procedimiento nos permite encontrar la variable ρ (Rho), la cual es necesaria para trazar la curva normalizada de los modelos.

Cabe aclarar que estas ecuaciones solo son efectivas para modelos con las características del suelo especificadas en la *tabla 23*, e incluyen todos los valores de módulos de elasticidad (E) entre 10 y 20 MPa.

$$\rho = \frac{\gamma \cdot \delta}{H_0 \cdot \gamma - P_a} \cdot \frac{E}{E_{max}} \quad (4)$$

Las características de los modelos se despliegan en la *tabla 23*:

Propiedades del medio	Características de la malla		Valores proporcionados para el módulo de elasticidad (E)
	Geometría del elemento	Triangular con 3 puntos nodales	
$v = 0.30$	Número de nodos	3,425.00	$E_1 = 10$ Mpa
$\gamma = 1.8$ t/m ³	Número de elementos	1,668.00	$E_2 = 12$ Mpa
$H = 28$ m.			$E_3 = 20$ Mpa

Tabla 23. Propiedades de los modelos empleados en la normalización de E.

Empleando la *ecuación 3* y utilizando los resultados obtenidos del capítulo 5.4. se obtienen los resultados presentados en las *tablas 24, 25 y 26*.



Resultados del modelo con E = 10 Mpa		
Presión P_a (t/m ²)	Deformación δ (m)	$\rho = \frac{\gamma \cdot \delta}{H_0 \cdot \gamma - P_a} \cdot \frac{E}{E_{max}}$
50.40	0.0000	-
45.36	0.0395	0.0071
40.32	0.0790	0.0071
35.28	0.1184	0.0071
30.24	0.1579	0.0071
25.20	0.1974	0.0071
20.16	0.2369	0.0071
15.12	0.2764	0.0071
10.08	0.3159	0.0071
5.04	0.3553	0.0071
0.00	0.3948	0.0071

Tabla 24. Resultados de normalización E = 10 MPa.

Resultados del modelo con E = 12 Mpa		
Presión P_a (t/m ²)	Deformación δ (m)	$\rho = \frac{\gamma \cdot \delta}{H_0 \cdot \gamma - P_a} \cdot \frac{E}{E_{max}}$
50.40	0.0000	-
45.36	0.0329	0.0071
40.32	0.0658	0.0071
35.28	0.0987	0.0071
30.24	0.1316	0.0071
25.20	0.1645	0.0071
20.16	0.1974	0.0071
15.12	0.2303	0.0071
10.08	0.2632	0.0071
5.04	0.2961	0.0071
0.00	0.3290	0.0071

Tabla 25. Resultados de normalización E = 12 MPa.



Resultados del modelo con E = 20 Mpa		
Presión P_a (t/m ²)	Deformación δ (m)	$\rho = \frac{\gamma \cdot \delta}{H_0 \cdot \gamma - P_a} \cdot \frac{E}{E_{max}}$
50.40	0.0000	-
45.36	0.0197	0.0071
40.32	0.0395	0.0071
35.28	0.0592	0.0071
30.24	0.0790	0.0071
25.20	0.0987	0.0071
20.16	0.1184	0.0071
15.12	0.1382	0.0071
10.08	0.1579	0.0071
5.04	0.1777	0.0071
0.00	0.1974	0.0071

Tabla 26. Resultados de normalización E = 20 MPa.

Como se puede notar se pudieron normalizar los resultados de los modelos, pues en los tres coinciden los valores de la variable ρ logrando una sola curva y graficada en función a las presiones P_a en la *figura 56* y en función a δ en la *figura 57*.

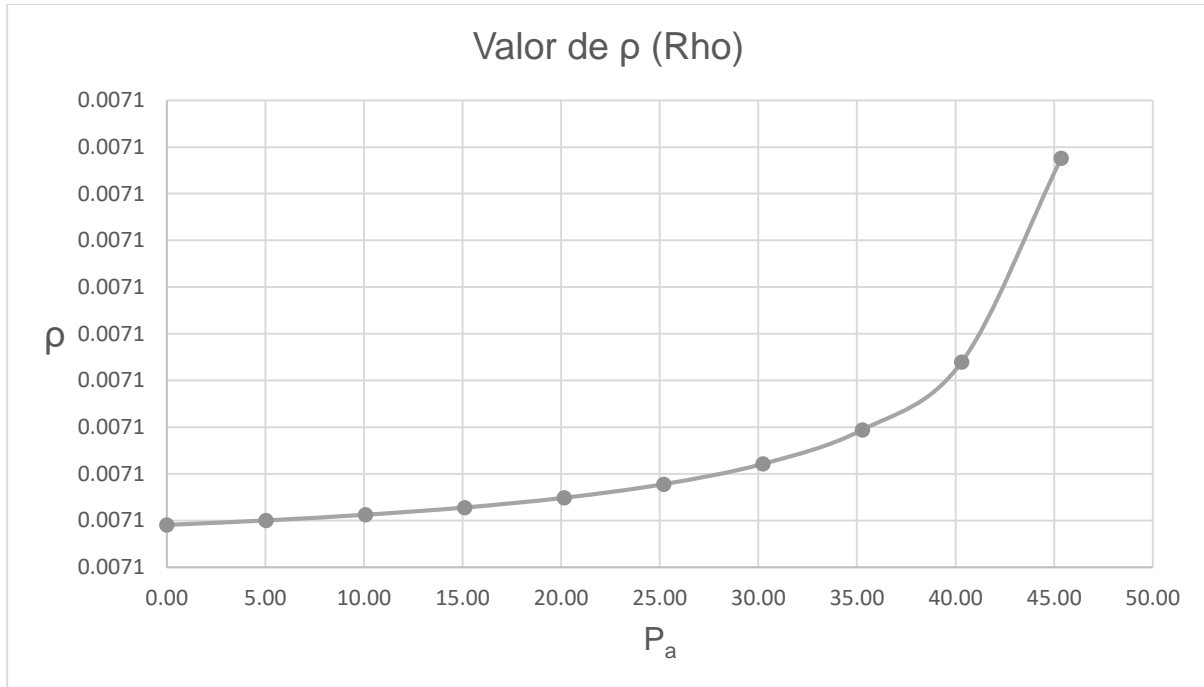


Figura 56. Gráfica de ρ en función de P_a .

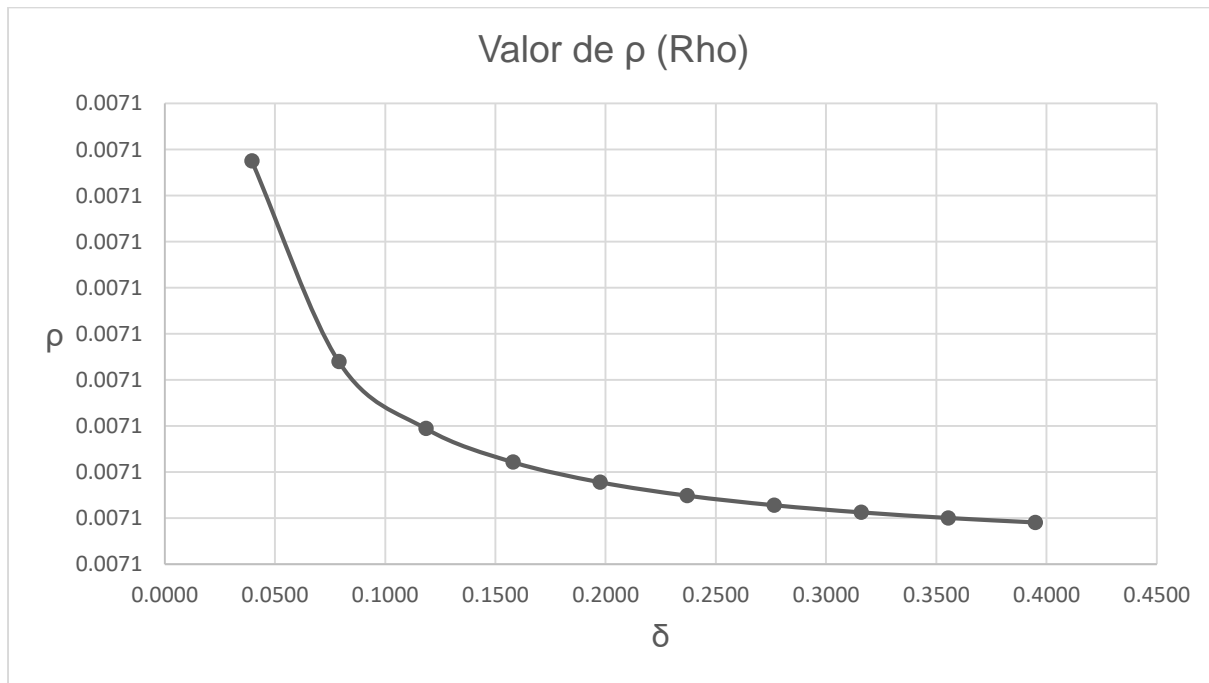


Figura 57. Gráfica de ρ en función de δ .



Las curvas normalizadas fueron utilizadas para obtener las ecuaciones que ayudan a determinar las deformaciones y/o presiones en la sección transversal de los modelos realizados. Para que las curvas de tendencia ajustaran lo mejor posible, fue necesario segmentar las curvas normalizadas en dos partes y tener dos ajustes y dos ecuaciones diferentes que funcionan en dos intervalos de la curva, la manera en que se segmentó la curva se observa en las *figuras 58 y 59*.

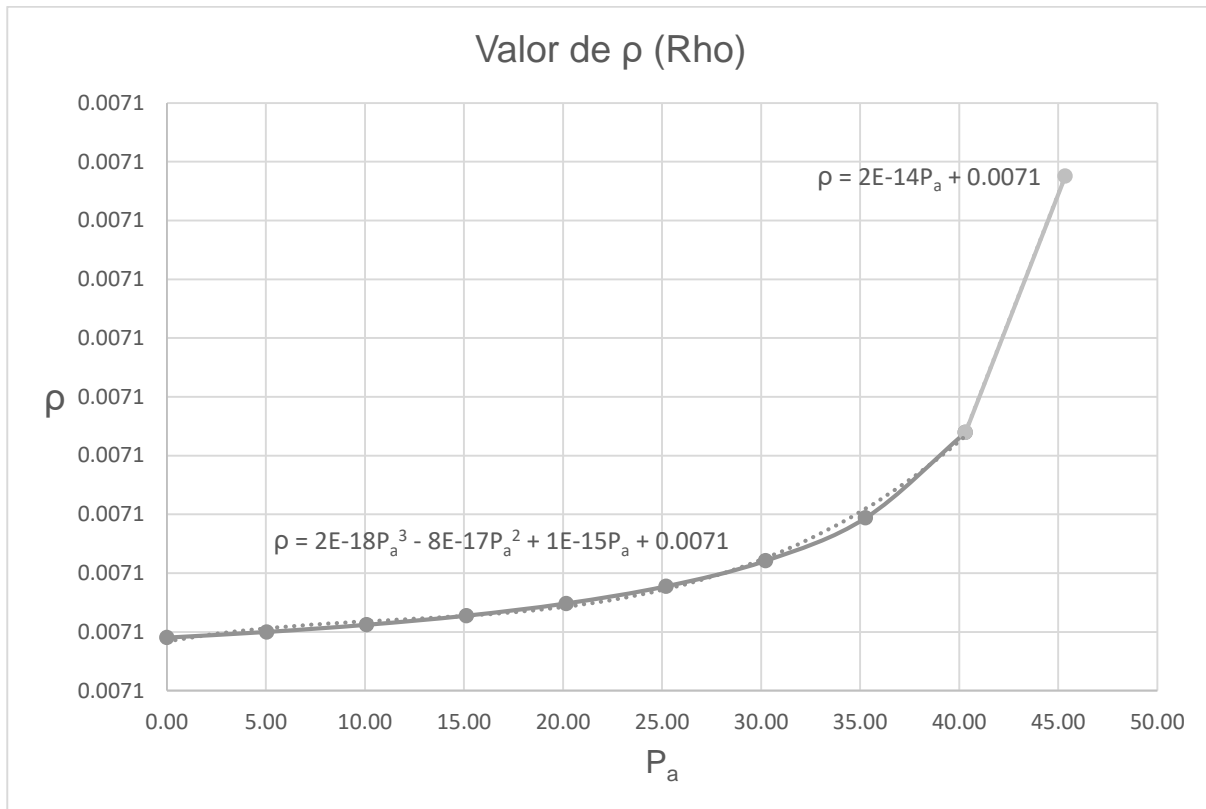


Figura 58. Ecuaciones para obtener ρ en función de Pa.

Las *ecuaciones 5 y 6* nos ayudan a determinar el valor ρ, necesario para calcular los desplazamientos en la sección transversal del túnel. En la *tabla 27* se presentan los intervalos en los cuales son válidas las ecuaciones:

$$\rho = 2 \times 10^{-18}P_a^3 - 8 \times 10^{-17}P_a^2 + 1 \times 10^{-15}P_a + 0.0071 \quad (5)$$

$$\rho = 2 \times 10^{-14}P_a + 0.0071 \quad (6)$$



Ecuaciones para obtener ρ en función de P_a	
Intervalo para utilizar la ecuación (t/m^2)	Ecuación
$0 < P_a \leq 40$	$\rho = 2 \times 10^{-14}P_a^3 - 8 \times 10^{-17}P_a^2 + 1 \times 10^{-15}P_a + 0.0071$
$40 \leq P_a \leq 50$	$\rho = 2 \times 10^{-14}P_a + 0.0071$

Tabla 27. Intervalos de las ecuaciones de ρ en función de P_a .

Las ecuaciones 5 y 6 arrojan un valor de ρ para ser utilizado en la ecuación 7 con la cual se calculan los desplazamientos.

$$\delta = \rho \frac{E_{max}}{E} \frac{H_0\delta - P_a}{\gamma} \tag{7}$$

De esta manera al contar con el dato de la presión P_a en la periferia de la sección transversal con las características del medio ya especificadas en la tabla 23, se puede obtener la deformación en el punto crítico de ésta.

De la misma manera también se pueden obtener las presiones usando las mediciones de los desplazamientos del punto crítico de la sección usando las ecuaciones 8 y 9 que se presentan en la figura 59.

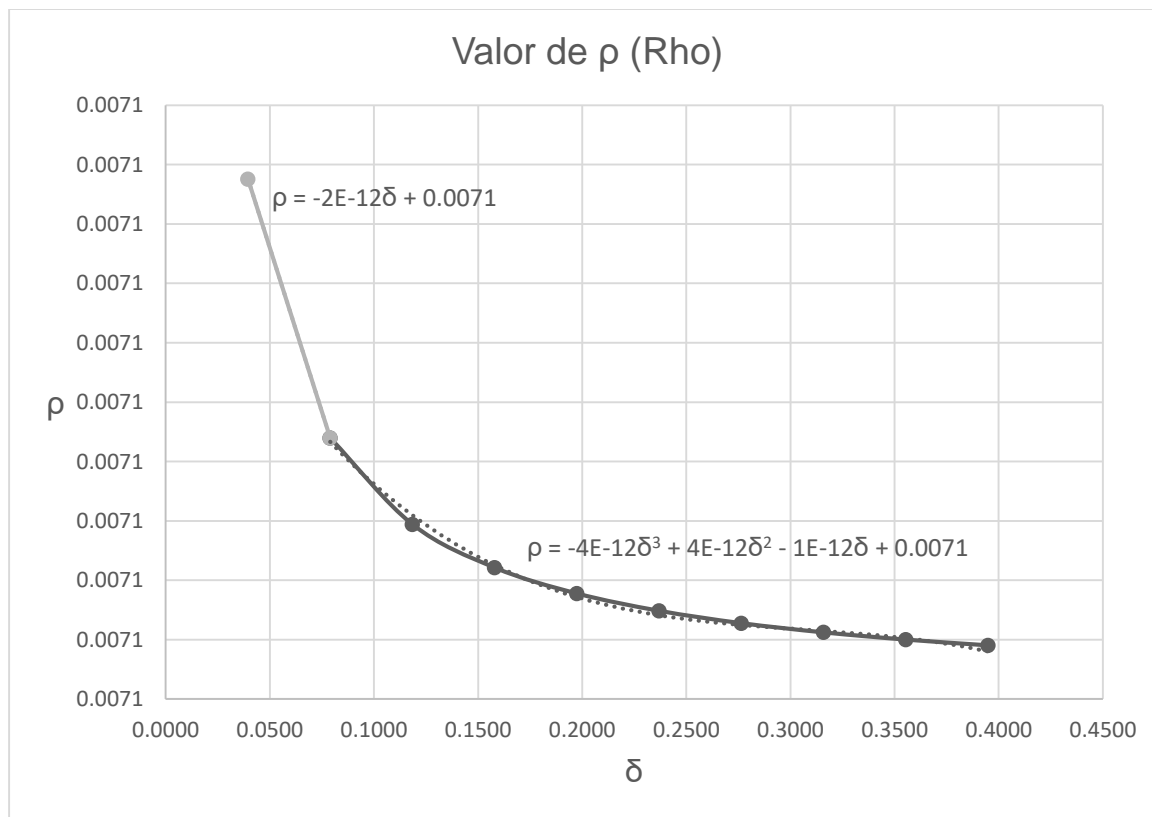


Figura 59. Ecuaciones para obtener ρ en función de δ .



$$\rho = -2 \times 10^{-12} \delta + 0.0071 \quad (8)$$

$$\rho = -4 \times 10^{-12} \delta^3 + 4 \times 10^{-12} \delta^2 - 1 \times 10^{-12} \delta + 0.0071 \quad (9)$$

Ecuaciones para obtener ρ en función de δ	
Intervalo para utilizar la ecuación (m)	Ecuación
$0 < \delta \leq 0.06$	$\rho = -2 \times 10^{-12} \delta + 0.0071$
$0.06 < \delta \leq 0.39$	$\rho = -4 \times 10^{-12} \delta^3 + 4 \times 10^{-12} \delta^2 - 1 \times 10^{-12} \delta + 0.0071$

Tabla 28. Intervalos de las ecuaciones de ρ en función de δ .

Una vez obtenido el valor de ρ con las ecuaciones 8 y 9, se sustituye en la ecuación 10 para calcular la presión correspondiente a esa deformación.

$$P_a = \gamma \left(H_0 - \frac{\delta \cdot E}{\rho \cdot E_{max}} \right) \quad (10)$$



5.6.1 COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS ECUACIONES DE LAS CURVAS NORMALIZADAS COMPARANDO CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SOFTWARE RS2®.

Para comprobar el funcionamiento de las ecuaciones, se utilizan los resultados obtenidos del análisis del software RS2® y se comparan con los resultados que arroja el cálculo con las ecuaciones. Primeramente, se comparan las presiones que se aplicaron en los modelos con las calculadas usando las ecuaciones.

E = 10 Mpa				
Deformación medida (dato) (m)	$\rho f(\delta)$	$P_a = \gamma \left(H_0 - \frac{\delta \cdot E}{\rho \cdot E_{max}} \right)$ (t/m)	P_a resultado de RS2® (t/m)	Error (t/m)
0.0000	0.0071	50.40	50.40	0.00
0.0395	0.0071	45.40	45.36	0.04
0.0790	0.0071	40.39	40.32	0.07
0.1184	0.0071	35.39	35.28	0.11
0.1579	0.0071	30.38	30.24	0.14
0.1974	0.0071	25.38	25.20	0.18
0.2369	0.0071	20.37	20.16	0.21
0.2764	0.0071	15.37	15.12	0.25
0.3159	0.0071	10.36	10.08	0.28
0.3553	0.0071	5.36	5.04	0.32
0.3948	0.0071	0.35	0.00	0.35

Tabla 29. Comprobación de resultados de P_a del software RS2® y las ecuaciones normalizadas ($E = 10$ MPa).

E = 12 Mpa				
Deformación medida (dato) (m)	$\rho f(\delta)$	$P_a = \gamma \left(H_0 - \frac{\delta \cdot E}{\rho \cdot E_{max}} \right)$ (t/m)	P_a resultado de RS2® (t/m)	Error (t/m)
0.0000	0.0071	50.40	50.40	0.00
0.0329	0.0071	45.40	45.36	0.04
0.0658	0.0071	40.39	40.32	0.07
0.0987	0.0071	35.39	35.28	0.11
0.1316	0.0071	30.38	30.24	0.14
0.1645	0.0071	25.38	25.20	0.18
0.1974	0.0071	20.37	20.16	0.21
0.2303	0.0071	15.37	15.12	0.25
0.2632	0.0071	10.36	10.08	0.28
0.2961	0.0071	5.36	5.04	0.32
0.3290	0.0071	0.35	0.00	0.35

Tabla 30. Comparación de resultados de P_a del software RS2® y las ecuaciones normalizadas ($E = 12$ MPa).



E = 20 Mpa				
Deformación medida (dato) (m)	$\rho f(\delta)$	$P_a = \gamma \left(H_0 - \frac{\delta \cdot E}{\rho \cdot E_{max}} \right)$ (t/m)	P_a resultado de RS2® (t/m)	Error (t/m)
0.0000	0.0071	50.40	50.40	0.00
0.0197	0.0071	45.40	45.36	0.04
0.0395	0.0071	40.39	40.32	0.07
0.0592	0.0071	35.39	35.28	0.11
0.0790	0.0071	30.38	30.24	0.14
0.0987	0.0071	25.38	25.20	0.18
0.1184	0.0071	20.37	20.16	0.21
0.1382	0.0071	15.37	15.12	0.25
0.1579	0.0071	10.36	10.08	0.28
0.1777	0.0071	5.36	5.04	0.32
0.1974	0.0071	0.35	0.00	0.35

Tabla 31. Comparación de resultados de P_a del software RS2® y las ecuaciones normalizadas (E = 20 MPa).



De igual manera que con las presiones, se comparan las deformaciones calculadas por el software de elementos finitos con las que resultan del uso de las ecuaciones obtenidas de las curvas normalizadas.

E = 10 Mpa				
Presión medida (dato) (t/m)	$\rho f(P_a)$	$\delta = \rho \frac{E_{max}}{E} \cdot \frac{H_0 \cdot \gamma - P_a}{\gamma}$ (m)	δ resultado de RS2® (m)	Error (m)
50.40	0.0071	0.0000	0.0000	0.00
45.36	0.0071	0.0398	0.0395	0.00
40.32	0.0071	0.0795	0.0790	0.00
35.28	0.0071	0.1193	0.1184	0.00
30.24	0.0071	0.1590	0.1579	0.00
25.20	0.0071	0.1988	0.1974	0.00
20.16	0.0071	0.2386	0.2369	0.00
15.12	0.0071	0.2783	0.2764	0.00
10.08	0.0071	0.3181	0.3159	0.00
5.04	0.0071	0.3578	0.3553	0.00
0.00	0.0071	0.3976	0.3948	0.00

Tabla 32. Comparación de resultados de δ del software RS2® y las ecuaciones normalizadas (E = 10 MPa).

E = 12 Mpa				
Presión medida (dato) (t/m)	$\rho f(P_a)$	$\delta = \rho \frac{E_{max}}{E} \cdot \frac{H_0 \cdot \gamma - P_a}{\gamma}$ (m)	δ resultado de RS2® (m)	Error (m)
50.40	0.0071	0.0000	0.0000	0.00
45.36	0.0071	0.0331	0.0329	0.00
40.32	0.0071	0.0663	0.0658	0.00
35.28	0.0071	0.0994	0.0987	0.00
30.24	0.0071	0.1325	0.1316	0.00
25.20	0.0071	0.1657	0.1645	0.00
20.16	0.0071	0.1988	0.1974	0.00
15.12	0.0071	0.2319	0.2303	0.00
10.08	0.0071	0.2651	0.2632	0.00
5.04	0.0071	0.2982	0.2961	0.00
0.00	0.0071	0.3313	0.3290	0.00

Tabla 33. Comparación de resultados de δ del software RS2® y las ecuaciones normalizadas (E = 12 MPa).



E = 20 Mpa				
Presión medida (dato) (t/m)	$\rho f(P_a)$	$\delta = \rho \frac{E_{max}}{E} \cdot \frac{H_0 \cdot \gamma - P_a}{\gamma}$ (m)	δ resultado de RS2® (m)	Error (m)
50.40	0.0071	0.0000	0.0000	0.00
45.36	0.0071	0.0199	0.0197	0.00
40.32	0.0071	0.0398	0.0395	0.00
35.28	0.0071	0.0596	0.0592	0.00
30.24	0.0071	0.0795	0.0790	0.00
25.20	0.0071	0.0994	0.0987	0.00
20.16	0.0071	0.1193	0.1184	0.00
15.12	0.0071	0.1392	0.1382	0.00
10.08	0.0071	0.1590	0.1579	0.00
5.04	0.0071	0.1789	0.1777	0.00
0.00	0.0071	0.1988	0.1974	0.00

Tabla 34. Comparación de resultados de δ del software RS2® y las ecuaciones normalizadas ($E = 20$ MPa).

De esta manera queda comprobado que la normalización de las curvas mediante el uso de la ecuación de la variable ρ , funciona para obtener tanto deformaciones, como presiones, en dos dimensiones si se cuenta con alguna de estas dos como dato.

Las ecuaciones 5, 6, 8 y 9 funcionan únicamente para excavaciones con las propiedades del medio especificadas en la tabla 23 y de sección transversal como la especificada en la figura 12.



6. CONCLUSIONES

En este estudio se analizó como influyen algunas de las propiedades geo – mecánicas más importantes del suelo, y cómo éstas cambian los desplazamientos, tanto en su comportamiento como en su magnitud en la periferia de la sección transversal del túnel carretero en análisis. A través de corridas de prueba en el software, se determinaron las dimensiones de la malla adecuadas para analizar el comportamiento de la sección transversal sin que las fronteras, tanto en el eje x como en y , produjeran ruido en los desplazamientos de la sección y ésta se comportara de una manera adecuada, considerando que el medio es homogéneo e isótropo.

Las propiedades del suelo que se modificaron fueron el módulo de elasticidad (E), la relación de Poisson (ν) y la profundidad del túnel con respecto a la superficie, o frontera superior de la malla de elementos finitos.

Del análisis de la influencia de cada una de estas propiedades se obtuvieron resultados diferentes:

- Los resultados indicaron que, de acuerdo al análisis por el método de elementos finitos, no hay una proporcionalidad entre el valor de la relación de Poisson y los desplazamientos que se manifiestan en le periferia de la sección transversal.
- Al variar el valor del módulo de elasticidad, se encuentran los resultados esperados, ya que los desplazamientos aumentan de magnitud inversamente proporcional al módulo de elasticidad, resultando la mayor deformación de la contra – bóveda en la última etapa del modelo con $E = 12$ MPa, que fue el modelo menos rígido analizado.
- Analizando la influencia de la profundidad a la que se localiza la sección transversal, se demuestra que ésta únicamente influye en la magnitud de los desplazamientos, sin embargo al localizar la sección transversal muy cerca de las fronteras, éstas influyen en el comportamiento como se deforma la sección, ya que en este caso, con una profundidad de 38 m, la sección ya se encontraba muy cerca de la frontera inferior de la malla, cambiando así la ubicación del punto crítico con mayor deformación, en este modelo se localizó en la parte central de la bóveda. Inicialmente se pensó que, a mayor profundidad, el punto crítico se ubicaría en la bóveda, al contrario que en los modelos con menor profundidad, pero realizando otro modelo en el cual se mantuvo la magnitud de la profundidad de 38 m, pero las dimensiones de la malla fueron modificadas, aumentando ésta en el sentido negativo en el eje x . Los resultados de este último modelo demostraron que, si las fronteras se encuentran suficientemente alejadas de la sección transversal del túnel, éstas no influyen en el comportamiento de las deformaciones. Este último modelo también confirma que la profundidad de la sección transversal influye proporcionalmente en la



magnitud de las deformaciones, pero la ubicación del punto crítico se mantiene y no depende de la profundidad.

Se logró el objetivo de esta investigación de crear un nomograma en el cual, con la ayuda de la determinación del parámetro ρ , propuesto en este trabajo de investigación, se normalizaron las curvas características de los resultados obtenidos de variar la magnitud del módulo de elasticidad. Posterior a normalizar los resultados, se obtuvieron cuatro ecuaciones, por medio de las cuales es posible calcular los desplazamientos del punto crítico de la sección transversal y las presiones en la periferia del túnel en dos dimensiones las cuales funcionan en dos intervalos en función de cada una de las dos variables antes mencionadas. Para comprobar el funcionamiento de estas ecuaciones, se compararon los resultados obtenidos con éstas con los arrojados por el análisis del software.

Los softwares computacionales son herramientas de mucha ayuda en lo referente a tiempos de cálculo, especialmente en casos tan complejos como lo es el análisis de materiales por el método de elementos finitos. Mientras el software sea más sofisticado, involucre más parámetros de la situación a analizar y permita apegarse más a la situación real que se simula en éstos, mejores serán los resultados. Los cálculos que realizan estos programas no tienen errores, los errores se cometen al interpretar los resultados que éstos arrojan y no analizarlos adecuadamente. Por lo expresado anteriormente, es esencial la intervención de los ingenieros que cuentan con un criterio profesional para decidir si los resultados de un análisis calculado por un software son útiles para su interés, y si no es así, buscar alguna modificación en la información proporcionada a los modelos, buscar el error y la solución.



Referencias

- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Cuarta edición*. Ciudad de México: Cengage Learning Editores S.A. de C.V.
- Duque Escobar, Gonzalo. (2003). *Manual de Geología para ingenieros. Universidad Nacional de Colombia, Manizales*,. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57121/consolidaciondesuelos.pdf?sequence=9&isAllowed=y>
- E. Joek, C. Carranza-Torres, B. Corkum. (2002). El criterio de rotura de Hoek-Brown - Edición 2002.
- Enrique Tamez González, José Luis Rangel Núñez, Ernesto Holguín. (1997). *Diseño geotécnico de túneles*. Ciudad de México: TGC Geotécnica S.A. de C.V.
- Luisa Nicté Equihua Anguiano, Ivan Rubio Saldaña. (2017). *Sustitución de un análisis 3D, por uno en condiciones axisimétricas para túneles en Herradura. 12vo congreso estatal de ciencia, tecnología e innovación y 6to encuentro de jóvenes investigadores del estado de Michoacán*. Morelia, Michoacán.
- Lunardi, P. (2008). *Design and Construction of Tunnels*. Milano, Italia: Springer.
- Ministerio de vivienda. (2006). *Código técnico de la edificación*.
- Ministerio de vivienda. (2006). Código Técnico de la Edificación. Partes I y II. En M. d. vivienda.
- O. C. Zienkiewicz y R. L. Taylor. (1994). *El método de los elementos finitos Cuarta Edición. Volumen 1 Formulación básica y problemas lineales*. Madrid, España.: McGraw-Hill.
- Palafox, A. L. (2018). *Análisis del comportamiento mecánico en terrenos cársticos en presencia de agua y aplicación de cargas estáticas*. Morelia, Michoacán.
- Saldaña, I. I. (2018). *ÁBACO DE DESPLAZAMIENTOS 3D PARA TÚNELES EN HERRADURA A PARTIR DE UNA SIMULACIÓN AXISIMÉTRICA USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)*. Morelia, Michoacán.: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2003). *Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-034-SCT2-2003, Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas*. México, Distrito Federal.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Manual de diseño y construcción de túneles de carretera 2016*. Ciudad de México.
- Svensson, H. (2010). *Design of foundations for wind turbines*. Lund, Sweden: Wallin & Dalholm Digital AB.



T.M. Megaw, J.V. Bertlett. (1990). *Túneles. Planeación, diseño y construcción. Volumen 2*. México, D.F.: LIMUSA S.A. de C.V.

Taylor, O. C. Zienkiewicz y R. L. (1994). *El método de los Elementos finitos*. Barcelona, España: McGraw-Hill/Interamericana de España S.A.