

**MODELAMIENTO DE EXCAVACIONES SUBTERRANEAS EN ROCA
INALTERADA POR MEDIO DEL SOFTWARE PHASE 2.0**

**LEIDY TATIANA MARTINEZ MORA
CARLOS ANDRES PUENTES MONTOYA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014

**MODELAMIENTO DE EXCAVACIONES SUBTERRANEAS EN ROCA
INALTERADA POR MEDIO DEL SOFTWARE PHASE 2.0**

**LEIDY TATIANA MARTINEZ MORA
CARLOS ANDRES PUENTES MONTOYA**

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Civil**

**Director
WILFREDO DEL TORO RODRIGUEZ
Ingeniero Civil, MSc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2014**

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1 MARCO TEORICO.....	13
1.1. Phase 2.0	13
1.2.Excavaciones Subterráneas en Roca inalterada.....	15
1.3.Contenido del manual.....	25
2DESCRIPCIÓN	45
3METODOLOGÍA.....	46
3.1.MODELAMIENTO DE UNA EXCAVACIÓN SUBTERRANEA EN ROCA ITNALTERADA.....	46
1.3.1.Análisis de la Modelación.	48
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
BIBLIOGRAFIA	50
ANEXOS	53

TABLA DE FIGURAS

<i>Figura 1 Esfuerzos Principales.....</i>	14
<i>Figura 2 Métodos de refuerzo y soporte de terrenos, modificada de Hoek (2000).</i>	15
<i>Figura 3 Características de falla para macizos rocosos de diferente calidad y comportamiento. Note que las escalas de esfuerzos son diferentes. Modificada de Hoek (1997).....</i>	18
<i>Figura 4. Envoltentes de Mohr-Coulomb en términos de (a) esfuerzos tangenciales y normales y (b) esfuerzos principales. Para un estado tensional situado por debajo de las rectas o envoltentes no se producirá la rotura. González et al (2004).</i>	21
<i>Figura 5. Envoltentes de rotura del criterio de Hoek y Brown en función de (a) los esfuerzos principales y de (b) los esfuerzos normal y tangencial. Representación de las diferentes condiciones de esfuerzo para rotura de la matriz rocosa. González et al (2004)</i>	24
<i>Figura 6. Tipos de límites diferentes en Phase2</i>	26
<i>Figura 7. Entrada gráfica del límite de excavación.....</i>	27
<i>Figura 8. Enmallado de una superficie</i>	28
<i>Figura 9. Configuración de la Malla.....</i>	29
<i>Figura 10. Campo de esfuerzo constante</i>	30
<i>Figura 11. Modelo de una excavación subterránea (Campo de Esfuerzo Constante).....</i>	31
<i>Figura 12. Campo de esfuerzo Gravitacionales</i>	32
<i>Figura 13. Modelo de una excavación al aire libre (Campo de Esfuerzo Gravitacional)</i>	33
<i>Figura 14 . a. Carga uniforme, b. Carga Puntual.....</i>	34
<i>Figura 15. Agregar Carga Distribuida.....</i>	34
<i>Figura 16. Agua estancada (patrón de sombreado azul)</i>	35
<i>Figura 17. Peso de agua estancada modelada como una carga distribuida equivalente.</i>	35
<i>Figura 18. Carga Puntual vertical.</i>	36
<i>Figura 19. Fuerza Sísmica</i>	37
<i>Figura 20. Visualización de resorte aplicada al nodo</i>	38
<i>Figura 21. a. Momento puntual, b. Momento de superficie completa.</i>	39
<i>Figura 22. Definir propiedades del material.....</i>	40
<i>Figura 23. Límites de consulta</i>	43
<i>Figura 24. Gráfica de Sigma 1 a lo largo de límites de excavación.</i>	43
<i>Figura 25. Líneas Iso-contorno.....</i>	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de falla para materiales rocosos, Bieniawski (1984)	19
Tabla 2. Valores máximos de m_i para la matriz rocosa, Hoek Brown (1997).....	23
Tabla 3. Parámetros del macizo y la roca.	47
Tabla 4. Rango de valores de esfuerzos según Goodman (1989)	47
Tabla 5. Parámetros de entrada para realización del modelo	48

RESUMEN

TITULO: MODELAMIENTO DE EXCAVACIONES SUBTERRANEAS (TÚNELES)
POR MEDIO DEL SOFTWARE PHASE 2.0

AUTORES: CARLOS ANDRES PUENTES MONTOYA
LEIDY TATIANA MARTINEZ MORA

PALABRAS CLAVES: Excavación subterránea, Roca inalterada, Elementos finitos, Resistencia del material.

DESCRIPCIÓN:

Dentro del campo de la geotecnia uno de los grandes retos es definir el comportamiento mecánico de los materiales. Para poder explicar este comportamiento se crean modelos geo mecánicos. Para llegar a una correcta caracterización de un material debemos adoptar un modelo y calibrar los parámetros que lo definen. El uso de nuevas tecnologías informáticas en la industria de la construcción ha llevado al hombre a tener dentro de sus requerimientos el manejo necesario de usar herramientas informáticas. Industrias como Rocsiencie Inc. Permite mediante el desarrollo de software hacer análisis de comportamientos de estructuras en proyección a construirse permitiendo la toma acertada de decisiones y procesos que en ejecución se traducirán directamente en la optimización de los presupuestos. Algunas de estas herramientas tienen mayor o menor dificultad al momento de ser manipuladas por el usuario que al no conocer con precisión lo que está modelando puede llegar a resultados erróneos, en este punto es donde juega un papel importante el manual de usuario del programa que estemos trabajando, de forma que permita ver a la persona que está modelando las diferentes opciones de la interfaz y el entorno grafico que ofrece; consecuencia de este proceso es la correcta interpretación de los resultados tomados del modelo.

* Proyecto de grado

**Facultad físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director Wilfredo Del Toro Rodriguez, Ingeniero Civil

ABSTRACT

TITLE: MODELING OF UNDERGROUND EXCAVATIONS (TUNNELS) BY THE SOFTWARE PHASE 2.0

AUTHOR'S: CARLOS ANDRES PUENTES MONTOYA
LEIDY TATIANA MARTINEZ MORA

KEY WORDS: Unaltered rock, underground excavation, finite element, resistance material.

DESCRIPTION

Within the geotechnical field, one of the biggest challenges is to understand the mechanic behavior of the material. In order to explain this behavior, many geo-mechanic models are created. To achieve an appropriate characterization of any material we must adopt a model and calibrate the parameters that define it. The use of new informatics technologies on the construction industry has led the man to have within his requirements the necessary management of using informatic tools. Industries like Rocscience Inc allows, through the development of software, making analysis about the behavior of structures which are in process of construction, allowing the right way when someone make decisions among in process that in its execution will mean directly in the optimization of the budgets. Some of these tools has more or less difficulty at the moment of being manipulated by the user who, by ignoring exactly what he is designing, can obtain very bad outcomes. Is in this part when a very important role is played in the user manual we are working in such way we could see the person that is making models of the different options of the interface and the graphic environment it offers. The consequence of this process, is the correct interpretation of the results taken from the model.

* Proyecto de grado

**Facultad físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director Wilfredo Del Toro Rodriguez, Ingeniero Civil

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de las obras para creación o mejoramiento de infraestructura en Colombia tiene que tenerse en cuenta a la geotecnia como una herramienta que permite analizar los diferentes problemas que se presentan al concebir el suelo como base o inicio de construcción. Una de las obras que marcan la pauta hoy por hoy en el mejoramiento de redes viales, canalizaciones, aliviaderos de presión en represas etc, son los túneles.

Con el fin de predecir el comportamiento del mismo en pre y post construcción se han desarrollado programas de computación que por medio de análisis finitos y parámetros de resistencia del terreno de afectación permiten saber en qué parte de la obra se pueden tener las mayores debilidades, cuáles serían los refuerzos necesarios en la construcción y la forma como funcionaria la modalidad de construcción que se elija entre otra mucha más información que se puede obtener del modelo.

1 MARCO TEORICO

1.1. Phase 2.0

Phase 2.0 es un programa de la empresa Rocscience Inc. la cual desarrolla software, utilizado en todo el mundo para aplicaciones civiles y minería. Se puede utilizar para una amplia gama de proyectos de ingeniería e incluye soporte de diseño, elementos finitos de estabilidad de taludes, filtración de aguas subterráneas y el análisis probabilístico. [1]

EL Software Phase 2.0 permite realizar modelos en varias etapas las cuales pueden ser fácilmente creadas y analizadas rápidamente de túneles, cavernas subterráneas, minas a cielo abierto, estructuras de tierra, y mucho más.

Phase 2.0 ofrece una amplia gama de opciones de soporte de modelado. Elementos de revestimiento pueden aplicarse en el modelado de hormigón proyectado, hormigón, sistemas de fijación de acero, muros, pilotes, revestimientos multicapa, geotextiles y mucho más. Permite conocer los tipos de pernos a usar, ya sean pernos de anclado, completamente consolidado, pernos de cable, abrazaderas, entre otros.

Una de las principales características de Phase 2.0 es el análisis de elementos finitos estabilidad del talud usando el método de reducción de resistencia a la cizalladura. Esta opción es totalmente automatizada y se puede utilizar con cualquiera de los parámetros de resistencia de Mohr-Coulomb o de Hoek-Brown.

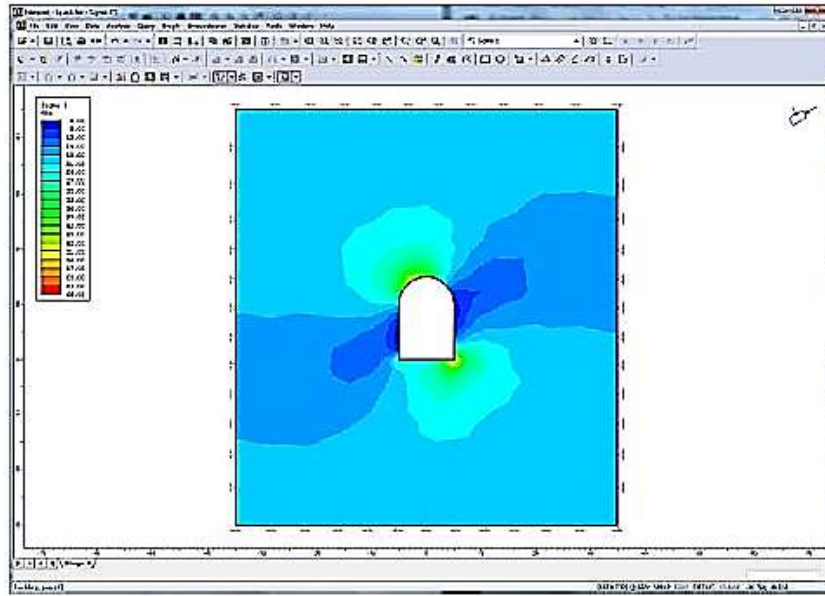


Figura 1 Esfuerzos Principales

Fuente: www.rocsiencie.com

Phase 2.0 incluye el estado de equilibrio, análisis de elementos finitos filtraciones subterráneas integrada en el programa. No hay necesidad de utilizar un programa de aguas subterráneas por separado. La presión de poros se determina, así como el flujo y el gradiente, con base en las condiciones de contorno hidráulico y la conductividad de material definido por el usuario. Los resultados de la presión de poros se incorporan automáticamente en el análisis de esfuerzos.

Modelos de material para roca y el suelo son de Mohr-Coulomb, generalizado de Hoek-Brown y Cam-Clay. Nuevas características de análisis de gran alcance para el modelado de roca articulado le permiten generar automáticamente las redes conjuntas o para fracturas discretas de acuerdo con una variedad de modelos estadísticos.

1.2. Excavaciones Subterráneas en Roca inalterada

La excavación de un túnel causa la redistribución de esfuerzos y el surgimiento de deformaciones en el macizo rocoso provocando en algunos casos el colapso de la excavación si no es intervenido. El soporte y el refuerzo hacen referencia a elementos estabilizadores como son: concreto lanzado o vaciado, pernos (anclajes), arcos de acero, solera (invert), malla electrosoldada, enfilajes, lamina acanalada y recientemente pernos en fibra de vidrio, inyecciones y otros como lo presenta la Figura 2. [2]

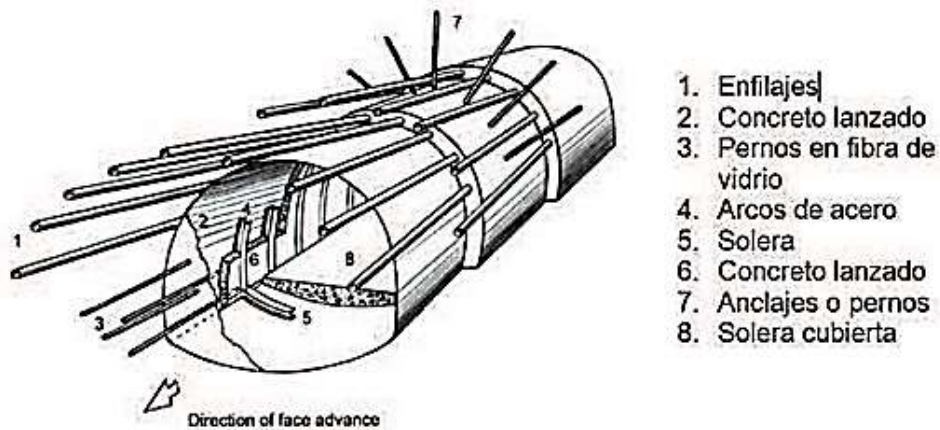


Figura 2 Métodos de refuerzo y soporte de terrenos

Fuente: HOK E., BROWN, E. T., 1985. Excavaciones subterráneas en Rocas.

Es de gran importancia mantener la estabilidad en el frente de excavación, por esto ante la presencia de agua se deben realizar drenajes que mantengan bajas presiones; en casos críticos, se establece como medida la excavación parcial del frente.

La estabilidad de una excavación subterránea también depende de las condiciones estructurales presentes en el macizo y también de la relación que existe entre los esfuerzos en la roca y su resistencia. Las excavaciones a poca profundidad como lo son la mayoría de túneles de carreteras, ferrocarril o socavones mineros cerca de

la superficie, reciben una gran influencia de las condiciones estructurales y del grado de meteorización del macizo. Por otra parte la estabilidad de las excavaciones profundas depende casi totalmente del comportamiento del macizo en relación con el campo de esfuerzos inducidos alrededor de las cavidades.

Las características de la matriz rocosa, del macizo rocoso y los modelos de tensión – deformación, al ser analizados conjuntamente permiten definir los tipos de comportamiento esperado.

1.2.1. Matriz rocosa.

Es el material rocoso exento de discontinuidades, o bloques de roca intacta que quedan entre ellas. La matriz rocosa, a pesar de considerarse continua presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral. Mecánicamente queda caracterizada por su peso específico, su resistencia y su deformabilidad.

Los ensayos de laboratorio permiten cuantificar las propiedades físicas y mecánicas de la matriz rocosa que definen su comportamiento mecánico como son La naturaleza de la roca, la resistencia a la rotura, la deformación a corto y largo plazo, la influencia del agua en su comportamiento, el comportamiento ante la meteorización y el comportamiento en función del tiempo. [3]

1.2.2. Macizo rocoso.

Es el conjunto de bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades de diverso tipo que afectan el macizo rocoso. Mecánicamente los macizos rocosos son medios discontinuos, anisotrópicos y heterogéneos, cambia sus propiedades reológicas con el cambio de esfuerzos, temperatura y presión y puede considerarse que presenta una resistencia a la tracción nula.

Los ensayos in-situ miden las propiedades de los macizos rocosos en su estado y condiciones naturales y a escalas representativa, además permiten simular sobre el terreno situaciones a las que se puede ver sometido el macizo.

Los factores geológicos que dominan el comportamiento y las propiedades mecánicas de los macizos rocosos son: la litología, las propiedades de la matriz rocosa, la estructura geológica, las discontinuidades, el estado de esfuerzos a que está sometido el material, el grado de alteración o meteorización y las condiciones hidrogeológicas, estos deben ser determinados a partir del método sugerido para la descripción cuantitativa de las discontinuidades en el macizo rocoso como lo presenta la ISRM, 1978. [4]

1.2.3. Modelos de tensión deformación.

Los esfuerzos que actúan sobre las masas rocosas determinan los modelos de deformación y el comportamiento mecánico del conjunto. Los modelos basados en la relación tensión-deformación adoptan un comportamiento de la roca y del macizo rocoso como un material elástico, elástico-frágil, elástico-plástico y la denominada pérdida de resistencia por deformación (strain-softening) cuyos esquemas básicos son presentados en la Figura 2; el comportamiento mecánico del macizo se relaciona directamente con el nivel de deformación y el esfuerzo máximo admisible Hoek (1997). [5]



Figura 3 Características de falla para macizos rocosos de diferente calidad y comportamiento. Note que las escalas de esfuerzos son diferentes. Modificada de Hoek (1997)

Fuente: HOKE., BROWN, E. T., 1985. Excavaciones subterráneas en Rocas.

a) Comportamiento Elástico-frágil. La resistencia del macizo - roca aumenta linealmente hasta alcanzar la resistencia máxima, después esta disminuye drásticamente hasta alcanzar un valor próximo a cero, este fenómeno puede presentarse en macizos de roca dura como granitos o cuarcitas poco fracturadas, cuando la resistencia del macizo rocoso es excedida se produce caída repentina de la resistencia asociada a la dilatación de los fragmentos de roca, Hoek (1997), las deformaciones antes del debilitamiento son muy bajas, ver Figura 3a

b) Ablandamiento. Equivale a un comportamiento frágil-dúctil o parcialmente frágil, la resistencia aumenta hasta un valor pico, desde el cual la resistencia de la roca-macizo disminuye hasta un cierto valor. Permite el registro de deformaciones, ver Figura 3b

c) Comportamiento elástico-plástico. La deformación aumenta hasta un valor pico, después puede continuar resistiendo deformaciones sin que se pierda la resistencia, en este caso la resistencia pico y la residual son iguales. Permite el registro de deformaciones, ver Figura 3c

1.2.4. Criterios de falla.

Un criterio de falla es una expresión algebraica de las condiciones mecánicas bajo las cuales un material falla por fracturamiento o deformación hasta un límite específico, este puede ser definido en términos de carga, esfuerzo, deformación u otros parámetros.

- **Criterios de falla para rocas.** La búsqueda de los criterios de falla para la roca ha sido llevada a cabo por un considerable número de años como es mostrado en la Tabla 1, los criterios de falla que se han popularizado hoy son El criterio de falla de Mohr – Coulomb y el de Hoek- Brown, la principal diferencia entre ambos es que el primero es un criterio lineal y el segundo no lineal, más adecuado al comportamiento mecánico real de las rocas. [6]

Nombre del criterio	Proponente	Fecha	Referencia
Coulomb-Navier	Coulomb	1773	Jaeger and Cook, 1979
Maximun shear stress	Tresca	1864	Nadai, 1950
Maximun principal stress	Rankine	1869	Nadai, 1950
Maximun elastic strain	St. Venant	1870	Nadai, 1950
Constant elastic energy of deformation	Beltrami	1885	Nadai, 1950
Shear failure	Mohr	1900	Jaeger and Cook, 1979
	Huber	1904	
Constant octahedral shearing stress	Hencky	1920	Jaeger and Cook, 1979
Second invariant of stress deviation	Von Mises	1913	Jaeger and Cook, 1979
Griffith-original	Griffith	1921	Griffith, 1921, 1924
Statistical failure theory	weibull	1939	weibull, 1952
Fracture toughness	Irwin	1960	Irwin, 1960
Griffith-modified	Mc Clintock-Walsh	1962	Mc Clintock-Walsh, 1962
Griffith-modified	Hoek and Bieniawski	1965	Hoek and Bieniawski, 1965
Griffith-modified	Murrel	1963	Murrel, 1963
Empirical rock mass strength	Hoek-Brown	1980	Hoek-Brown, 1980

Tabla 1. Criterios de falla para materiales rocosos,

Fuente: Bieniawski (1984)

Criterio de Mohr-Coulomb.

Este criterio expresa la resistencia al corte a lo largo de un plano en un estado triaxial de tensiones, obteniéndose la relación entre los esfuerzos normal y tangencial actuantes en el momento de la rotura mediante la expresión matemática:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

Donde:

τ, σ_n son las tensiones tangencial y normal sobre el plano de rotura.

c, ϕ son la cohesión y ángulo de rozamiento de la matriz rocosa.

El criterio puede expresarse igualmente en función de los esfuerzos principales

σ_1, σ_2 como lo presentan las ecuaciones (2) y (3)

$$\sigma_1 = \frac{2c + \sigma_3 [\text{sen}2\theta + \tan\phi(1 - \text{cos}2\theta)]}{\text{sen}2\theta - \tan\phi(1 + \text{cos}2\theta)} \quad (2)$$

permitiendo obtener la resistencia en cualquier plano definido por θ . Para el plano crítico de rotura

$\theta = 45^\circ + \phi/2$, la expresión anterior será igual a:

$$\sigma_1 = \frac{2c + \sigma_3 [1 + \text{sen}\phi]}{1 + \text{sen}\phi} \quad (3)$$

Si se da la condición $\sigma_3 = 0$, σ_1 será la resistencia a compresión simple de la roca:

$$\sigma_1 = \sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4)$$

El criterio también proporciona el valor de la resistencia a tracción:

$$\sigma_t = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (5)$$

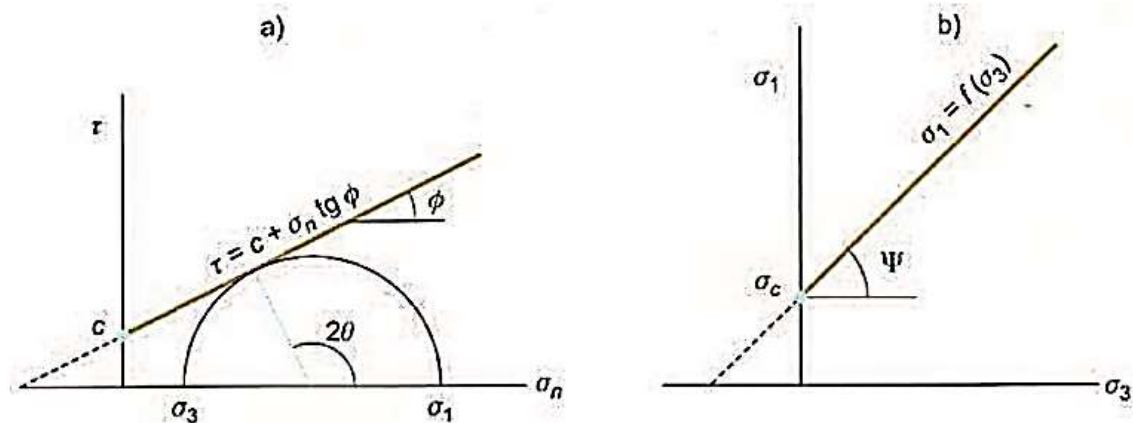


Figura 4. Envoltentes de Mohr-Coulomb en términos de (a) esfuerzos tangenciales y normales y (b) esfuerzos principales. Para un estado tensional situado por debajo de las rectas o envoltentes no se producirá la rotura. González et al (2004).

El criterio de Mohr-Coulomb implica que tiene lugar una fractura por corte al alcanzarse la resistencia pico del material. La gran ventaja de este criterio es su sencillez. Sin embargo, presenta inconvenientes debido a que: (1) Las envoltentes de la resistencia en roca no son lineales, (2) la dirección del plano de la fractura según este criterio no siempre coincide con los resultados experimentales (3) el criterio sobrevalora la resistencia a la tracción. [7]

Criterio de Hoek y Brown.

Para evaluar la resistencia de la matriz rocosa es más adecuado un criterio no lineal, donde la representación gráfica de la rotura es una curva de tipo cóncavo.

El propuesto por Hoek y Brown (1980) es un criterio empírico de rotura no lineal válido para evaluar la resistencia de la matriz rocosa isótropa en condiciones triaxiales:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m_i \sigma_{ci} + \sigma_{ci}^2} \quad (6)$$

donde σ_1, σ_3 son los esfuerzos principales mayor y menor en rotura, σ_{ci} es la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa y m_i es una constante que depende de las propiedades de la matriz rocosa. El valor σ_{ci} debe ser determinado en ensayos de laboratorio o, en su defecto, a partir del ensayo de carga puntual (PLT). El valor de m_i depende de la mineralogía, la composición y tamaño de grano de la roca intacta. Puede estimarse a partir de ensayos triaxiales sobre la roca o de tablas, la Tabla 2 incluye los valores máximos de m_i para distintas litologías.

Tipo de roca y valor de la constante m_i				
Sedimentarias clásticas	Conglomerado	(-22)	Lutita	4
	Arenisca	19	Grauvaca	(-18)
	Limolita	9		
Sedimentarias no clásticas	Caliza margosa	7	Caliza micrítica	8
	Brecha caliza	(-20)	Yeso	16
	Caliza esparrítica	(-10)	Anhidrita	13
metamórficas	Mármol	9	Gneiss(*)	33
	Cuarcita	24	Esquisto (*)	4-8
	Migmatita	(-30)	Filita (*)	(-10)
	Anfibolita	25-31	Pizarra (*)	9
	milonita	(-6)		
Ígneas	Granito	33	Diorita	(-28)
	Riolita	(-16)	Andesita	19
	Granodiorita	(-30)	Gabro	27
	Dacita	(-17)	Basalto	(-17)
Ígneas extrusivas piro clásticas	Aglomerado	(-20)	Toba	(-15)
	Brecha	(-18)		

() Valores estimados.

(*) Valores obtenidos de ensayos en matriz rocosa con dirección de aplicación de la carga normal a los planos de foliación. El valor de m_i será significativamente diferentes si la rotura ocurre a favor de los planos de debilidad.

Tabla 2. Valores máximos de m_i para la matriz rocosa,

Fuente: Hoek Brown (1997)

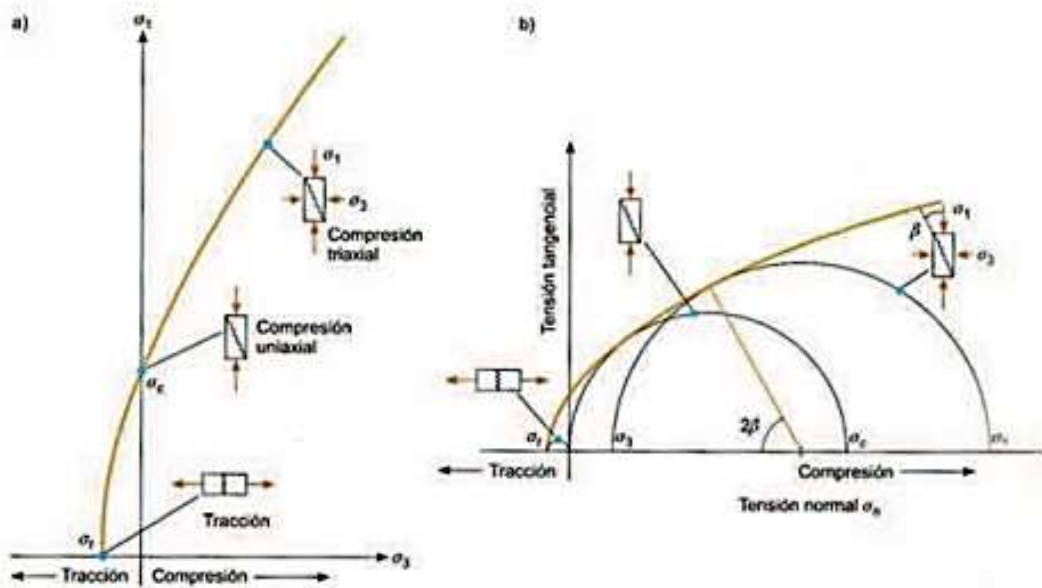


Figura 5. Envolturas de rotura del criterio de Hoek y Brown en función de (a) los esfuerzos principales y de (b) los esfuerzos normal y tangencial. Representación de las diferentes condiciones de esfuerzo para rotura de la matriz rocosa.

Fuente: González et al (2004)

La resistencia de la roca a compresión simple viene dada por la expresión anterior $\sigma_3 = 0$ la resistencia a tracción se obtiene resolviendo para $\sigma_1 = 0$ y $\sigma_3 = \sigma_t$ sustituyendo:

$$\sigma_t = \frac{1}{2} \sigma_{ci} \left(m_i - \sqrt{m_i^2 + 4} \right) \quad (7)$$

La expresión del criterio de rotura en función de esfuerzos tangenciales y normales es:

$$\tau = A \sigma_{ci} \left(\frac{\sigma_n \sigma_t}{\sigma_{ci}} \right)^B \quad (8)$$

Donde σ_1 , es la resistencia a tracción y A, B son constantes dependientes del valor de m_i . [8]

1.3. Contenido del manual

1.3.1. Modelado

Existen varios tipos diferentes límites están definidos en Phase 2 con el propósito de crear el modelo geométrico:

- Externo (abarca todas las entidades de otro modelo)
- Excavación
- Material
- Etapa
- Empalme
- Interfaz estructural
- Piezométrico

Todos los modelos requieren un límite externo.

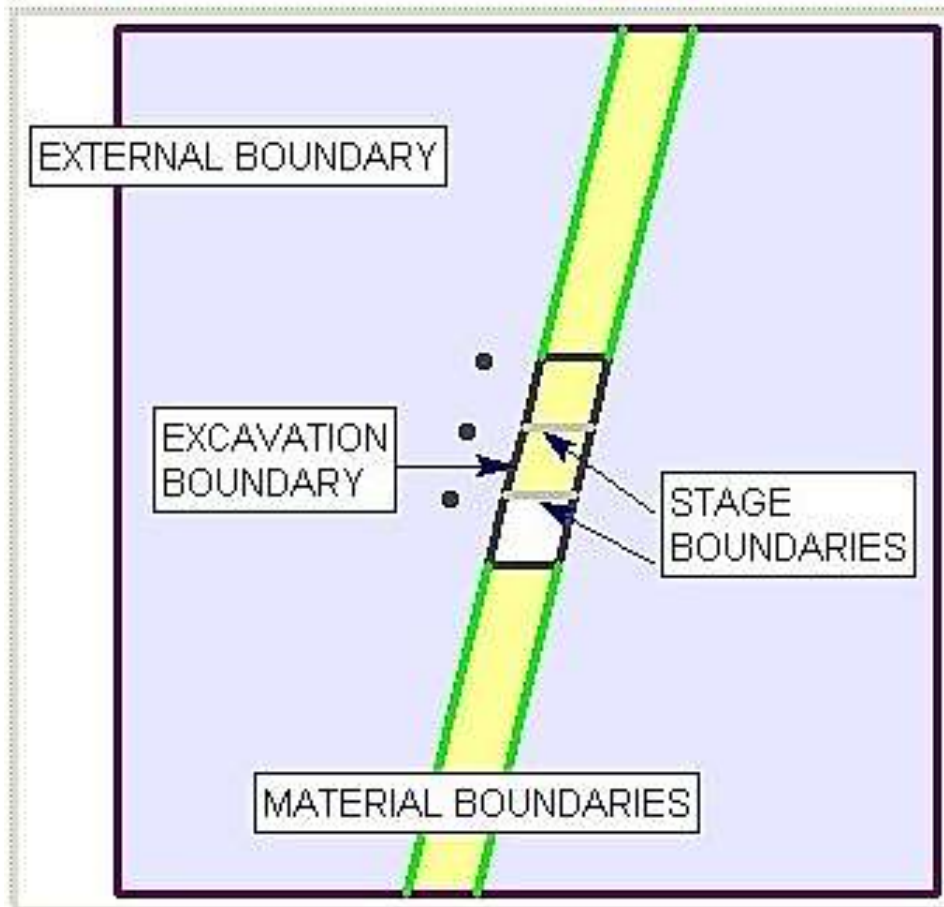


Figura 6. Tipos de límites diferentes en Phase2

Fuente. Elaboración Propia

Modelado: Introducción de Geometría

Phase 2.0 proporciona potentes funciones de modelado para la definición de la geometría del modelo. Los límites pueden ser definidos así:

- Dibujando con el ratón
- Introduciendo las coordenadas en línea pronta
- Introduciendo las coordenadas en un cuadro de diálogo hoja de cálculo
- Importación de archivos DXF u otros tipos de archivos

Posee características tales como rejillas, deshacer, que se implementan para simplificar enormemente el proceso.

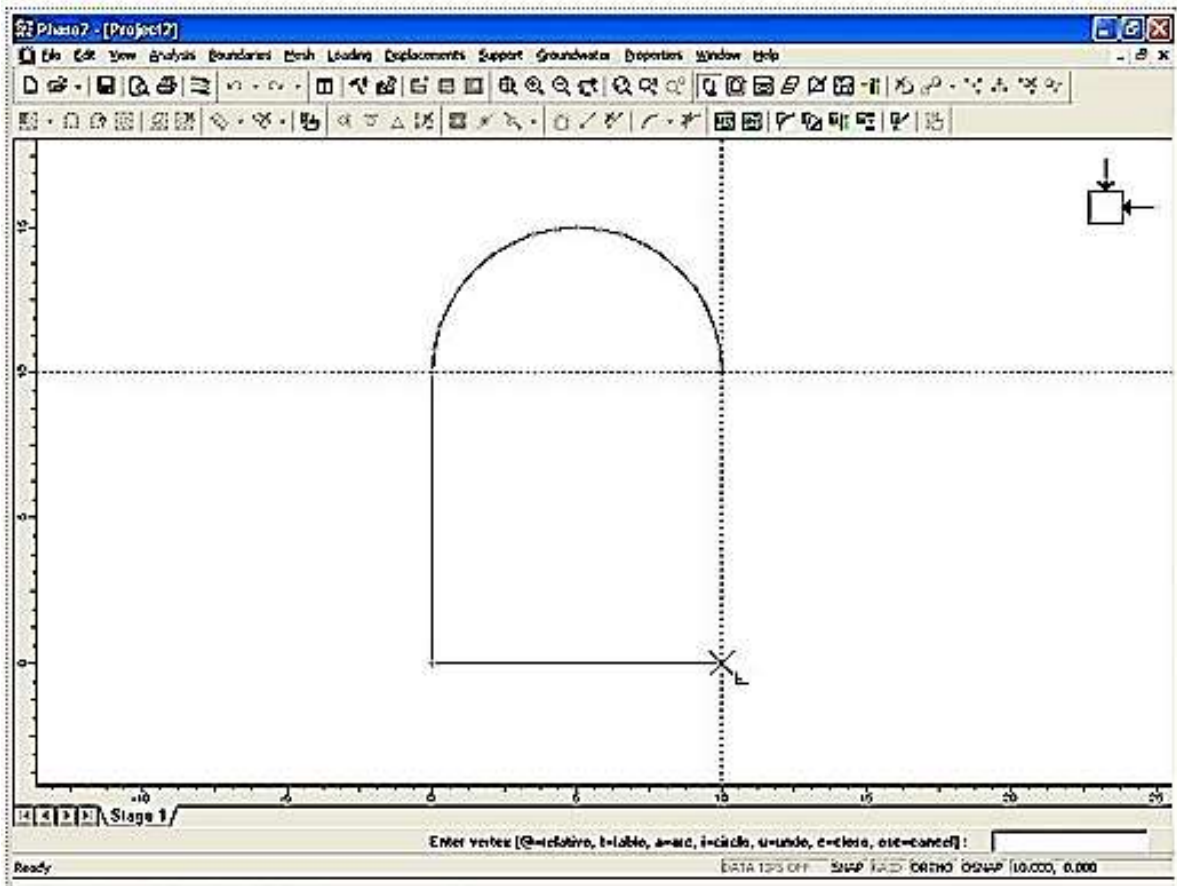


Figura 7. Entrada gráfica del límite de excavación

Fuente. Elaboración Propia

1.3.2. Generación de la Malla

Incorpora un generador de estado del arte dimensional automático, malla de elementos finitos, que puede generar mallas basadas en cualquiera de los elementos finitos triangulares o cuadriláteros. El algoritmo de mallado avanzado utilizado en Phase 2.0 simplifica enormemente la tarea de generación de mallas

para el usuario: una malla de alta calidad puede ser generada con un solo clic del ratón. La malla se puede personalizar fácilmente si es necesario.

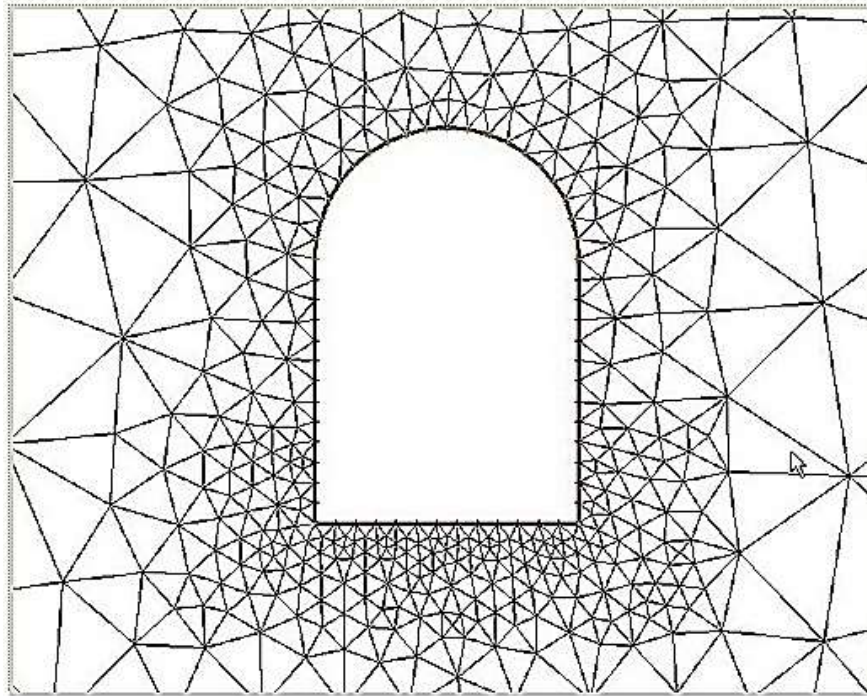


Figura 8. Enmallado de una superficie

Fuente. Elaboración Propia

Malla: Configuración de malla

Los principales parámetros de configuración de la malla se especifican en el programa de instalación de malla de diálogo. Esto le permite elegir el tipo de malla (gradual, uniforme o Radial) y el tipo de elemento (3-Noded o 6 Noded Triángulos, o 4-Noded u 8 Noded cuadriláteros).

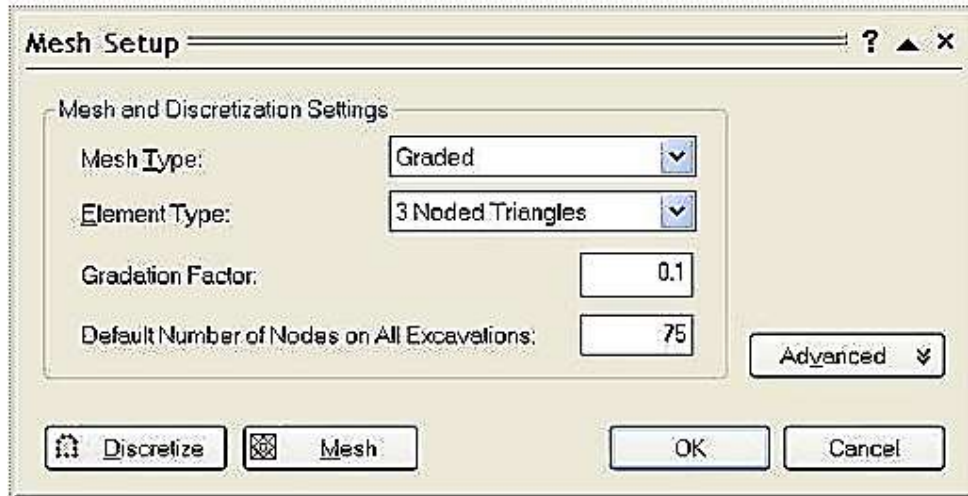


Figura 9. Configuración de la Malla

Fuente. Elaboración Propia

Varios parámetros de discretización y gradación también se pueden especificar, incluida la opción Advanced Discretización, que permite al usuario personalizar la discretización de las fronteras.

La herramienta Malla tiene las varias opciones como las siguientes:

- Malla Tipo
- Tipo de elemento
- Personalización
- Asignado enmallado
- Condiciones de frontera
- Infinito Elementos
- Calidad de Malla

1.3.3. Campo de esfuerzo

La opción de campo de esfuerzo permite definir las condiciones de esfuerzo in situ sobre el terreno antes de la excavación. Hay dos opciones disponibles para definir la tensión de campo: Campo de esfuerzo constante o Gravedad.

Campo de esfuerzo: Constante

La opción de campo de esfuerzo constante se puede utilizar para el modelado de excavaciones profundas. En los casos en que el gradiente de tensión gravitatoria es despreciable en toda la altura de su modelo, en comparación con la magnitud global del esfuerzo, un campo de tensión constante es preferible. Un campo de esfuerzo constante se define por dos tensiones en-plano principal (Sigma 1 y Sigma 3), y un ángulo que define la orientación de los esfuerzos en el plano. También se requiere el esfuerzo principal fuera de plano (Sigma Z).

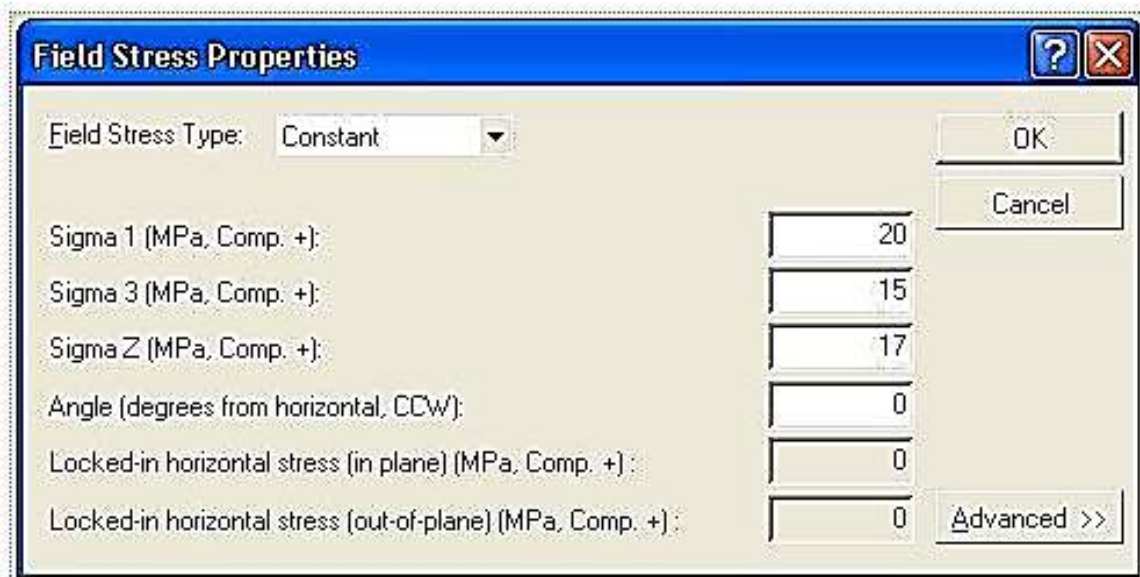


Figura 10. Campo de esfuerzo constante

Fuente. Elaboración Propia

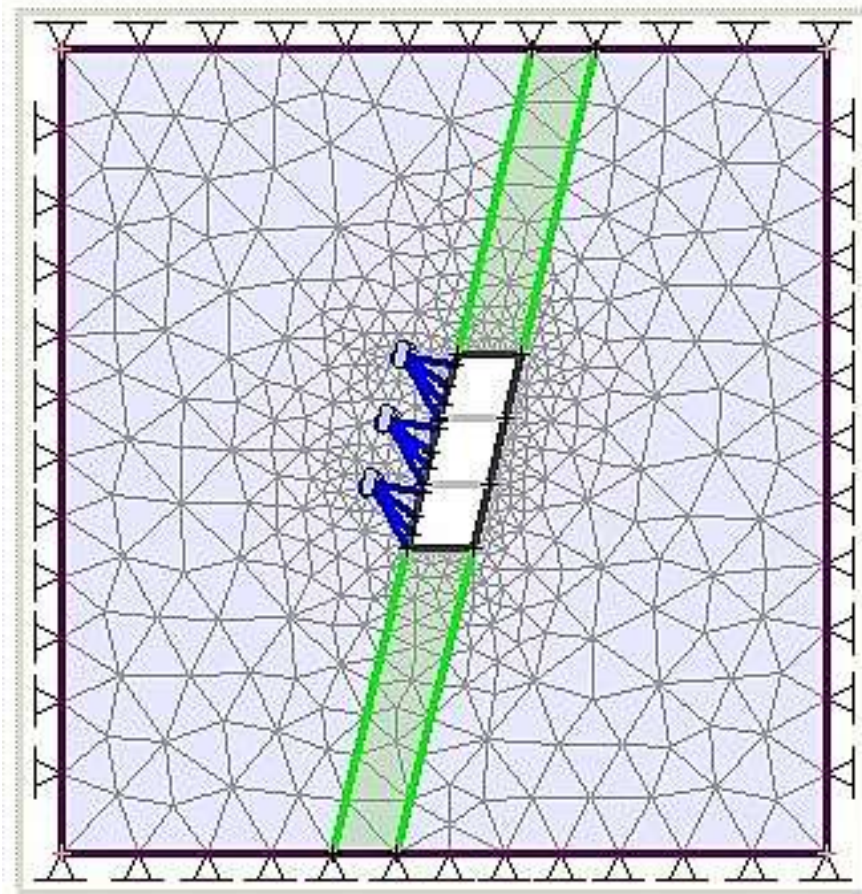


Figura 11. Modelo de una excavación subterránea (Campo de Esfuerzo Constante)

Fuente. Elaboración Propia

Campo de esfuerzo: Gravitacionales

En la superficie o cerca de la superficie de excavaciones, es apropiado utilizar un campo de tensiones de gravedad, en el que se supone que el esfuerzo vertical que varía linealmente con la profundidad, la profundidad y el peso unitario del material que recubre determinan la distribución de los esfuerzos verticales en todo el modelo. El esfuerzo horizontal se calcula multiplicando el esfuerzo vertical de las relaciones de esfuerzo / verticales horizontales. Los esfuerzos iniciales verticales y horizontales se calculan utilizando las siguientes ecuaciones:

$$S_v = \gamma * H \quad (9)$$

$$S_h = L + K * S_v \quad (10)$$

Donde

S_v = Esfuerzo vertical

S_h = Esfuerzo Horizontal

L = esfuerzo de Locked-in (Esfuerzo horizontal en la superficie del suelo)

K= Relación de esfuerzos horizontales

gamma = Peso unitario medio del suelo / roca

H = Profundidad del centro de elemento por debajo de la superficie del suelo

La ecuación para esfuerzos horizontales se aplica tanto a los esfuerzos horizontales en el plano y fuera de plano.

Field Stress Type:	Gravity	<input type="checkbox"/> Use actual ground surface	OK
		<input type="checkbox"/> Use effective stress ratio	Cancel
Ground Surface Elevation (m):	0		
Unit Weight of Overburden (MN/m3):	0.027		
Total Stress Ratio (horiz/vert in plane):	1		
Total Stress Ratio (horiz/vert out-of-plane):	1		
Locked-in horizontal stress (in plane) (MPa, Comp. +):	0		
Locked-in horizontal stress (out-of-plane) (MPa, Comp. +):	0		Advanced >>

Figura 12. Campo de esfuerzo Gravitacionales

Fuente. Elaboración Propia

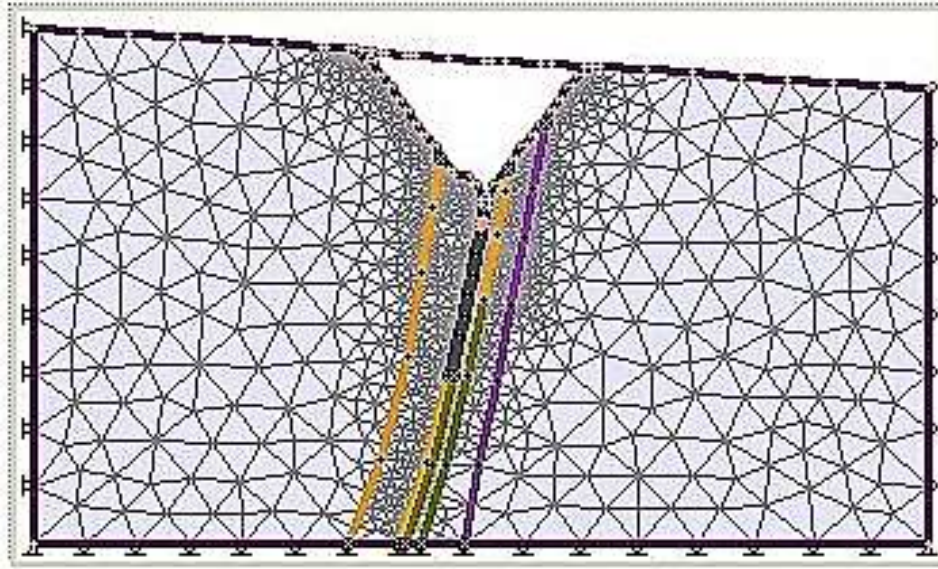


Figura 13. Modelo de una excavación al aire libre (Campo de Esfuerzo Gravitacional)

Fuente. Elaboración Propia

1.3.4. Cargas

Los siguientes tipos de carga externa se pueden aplicar para un modelo de elementos finitos:

- Carga distribuida

Una carga distribuida representa una carga de superficie o la presión (fuerza) / (unidad de superficie) al considerar la dimensión fuera del plano de la modelo. Hay 3 opciones diferentes para la aplicación de cargas distribuidas: Uniforme, Triangular y carga de agua estancada.

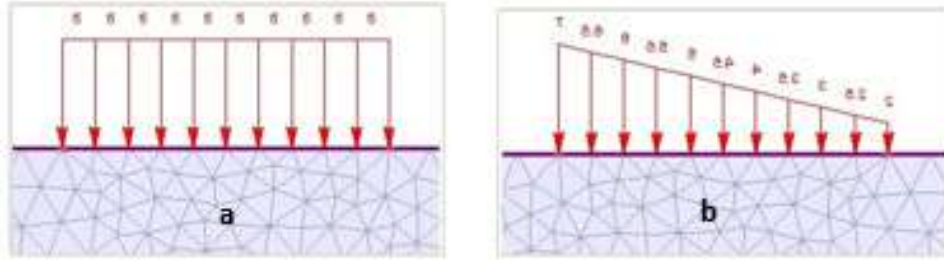


Figura 14. a. Carga uniforme, b. Carga Puntual

Fuente. Elaboración Propia

Las cargas se pueden aplicar en cualquier orientación: normal fronteras, vertical, horizontal o en cualquier ángulo. La magnitud de la carga puede ser aumentada o disminuida en diferentes etapas mediante la selección de la casilla de verificación Etapa de carga y de entrar en factores de multiplicación en el cuadro de diálogo Factores etapa.

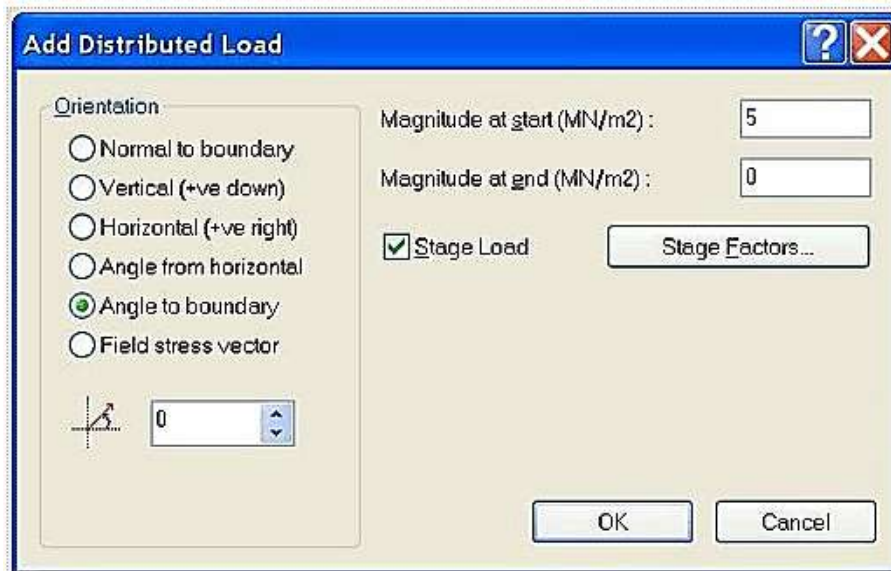


Figura 15. Agregar Carga Distribuida

Fuente. Elaboración Propia

- Carga de Agua estancada

Para definir la carga distribuida debido al agua estancada (por ejemplo, estanques de agua contra una pendiente o represa), se proporciona la opción especializada, **Add Ponded Water Load**. Esto le permite definir fácilmente la carga hidrostática debido al encharcamiento de agua mediante la especificación de las condiciones de contorno total de la cabeza en los segmentos de límites seleccionados por el usuario. Sencillamente lo que hace es simular el peso del agua como una carga distribuida en todas las superficies en la cual el agua ejerce una fuerza.

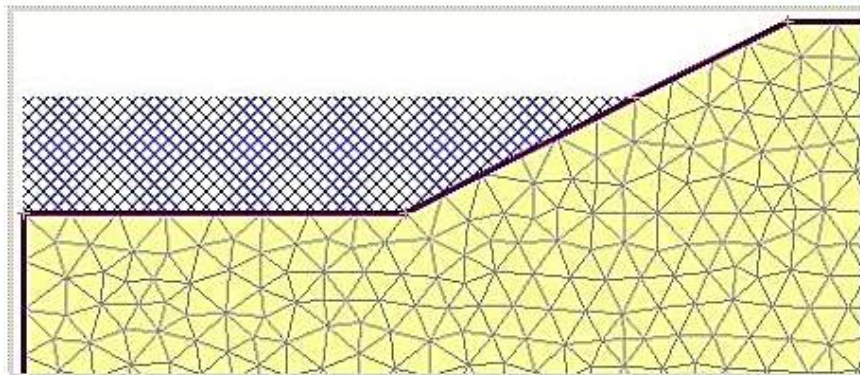


Figura 16. Agua estancada (patrón de sombreado azul)

Fuente. Elaboración Propia

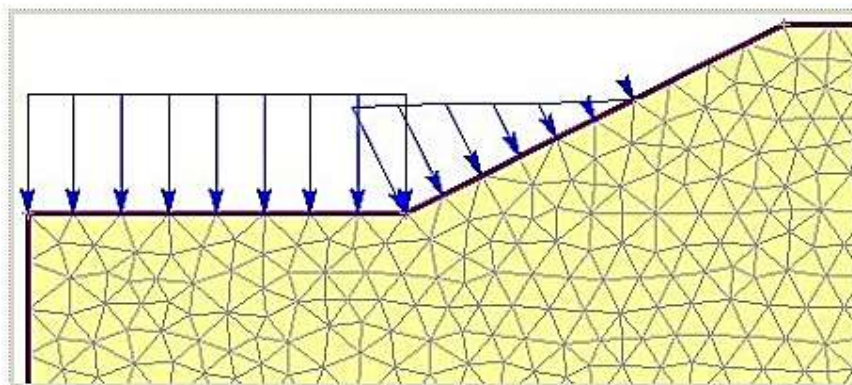


Figura 17. Peso de agua estancada modelada como una carga distribuida equivalente.

Fuente. Elaboración Propia

- Carga Puntual

Cargas concentradas se pueden modelar con la opción de carga lineal. La magnitud de la carga lineal representa una unidad de fuerza por unidad de longitud (por ejemplo kN / m) al considerar la dimensión fuera del plano del modelo.

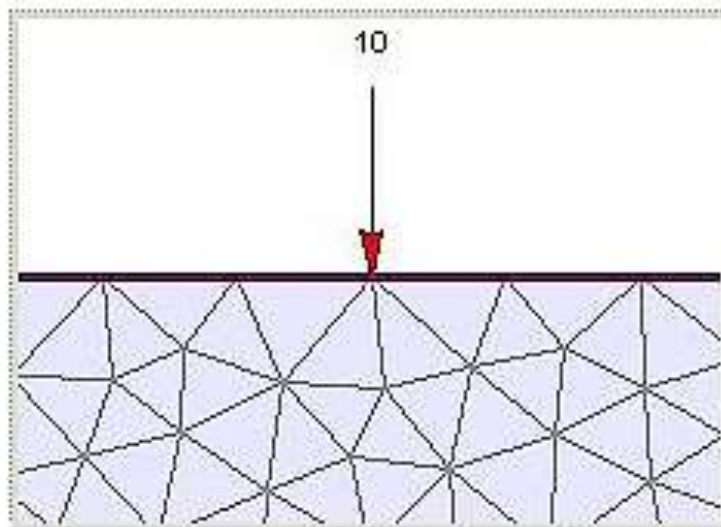


Figura 18. Carga Puntual vertical.

Fuente. Elaboración Propia

- Carga Sísmica (pseudo-estática)

La carga sísmica permite la opción de definir un sismo (terremoto) carga pseudo-estática, mediante la introducción de coeficientes sísmicos horizontales y / o verticales en el cuadro de dialogo de carga sísmica.

Los coeficientes sísmicos son coeficientes adimensionales que representan la aceleración sísmica (máxima) como una fracción de la aceleración debida a la gravedad. Los valores típicos están en el rango de 0,1 a 0,3. Cuando se define un coeficiente sísmico, una Fuerza adicional será aplicada a cada uno de los elementos finitos en la malla, como sigue:

Fuerza Sísmica = Coeficiente Sísmico * Área de elemento * Peso unitario del material del elemento

La fuerza sísmica se añade vectorialmente a la Fuerza que existe debido a la gravedad, para obtener la fuerza total que actúa sobre un elemento.

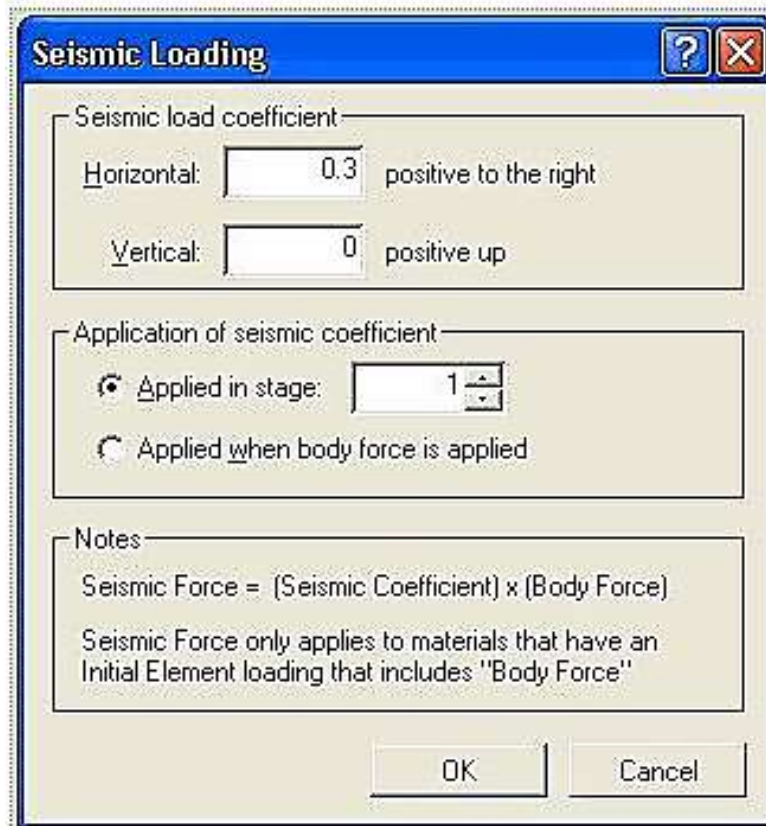


Figura 19. Fuerza Sísmica

Fuente. Elaboración Propia

- Resortes

Los resortes pueden añadir a cualquier nodo de la malla de elementos finitos utilizando la opción **Add Springs**. Los Resortes pueden ser utilizados para modelar el efecto de montantes o elementos de soporte similares.

Las propiedades de resorte se definen mediante la introducción de valores de rigidez en las direcciones X y Y. Una fuerza inicial del resorte puede ser incluido también en las direcciones X y / o Y.

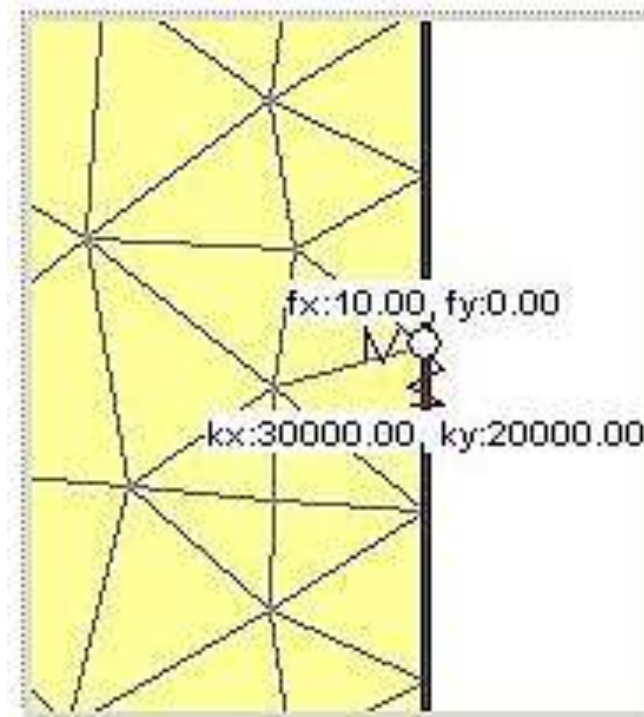


Figura 20. Visualización de resorte aplicada al nodo

Fuente. Elaboración Propia

- Momento Lineal

El momento lineal es una opción de carga que permiten definir las condiciones de contorno para los momentos lineales. Si es puntual o en una superficie completa.

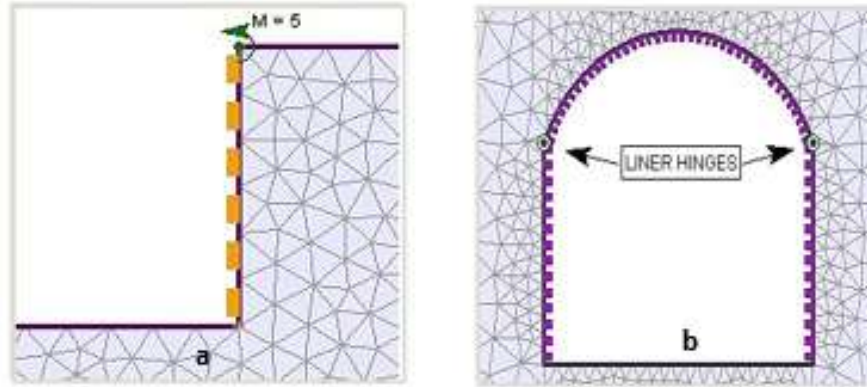


Figura 21. a. **Momento puntual**, b. **Momento de superficie completa**.

Fuente. Elaboración Propia

1.3.5. Propiedades de los Materiales

La resistencia y las propiedades elásticas del material (roca o suelo) se introducen en el cuadro de diálogo **Define Material Properties**. Si el modelo es de aguas subterráneas las propiedades hidráulicas materiales se introducen en el cuadro de dialogo **Define Hydraulic Properties**. Las propiedades de los materiales se asignan a diferentes regiones de la modelo con la opción **Assign** de propiedades.

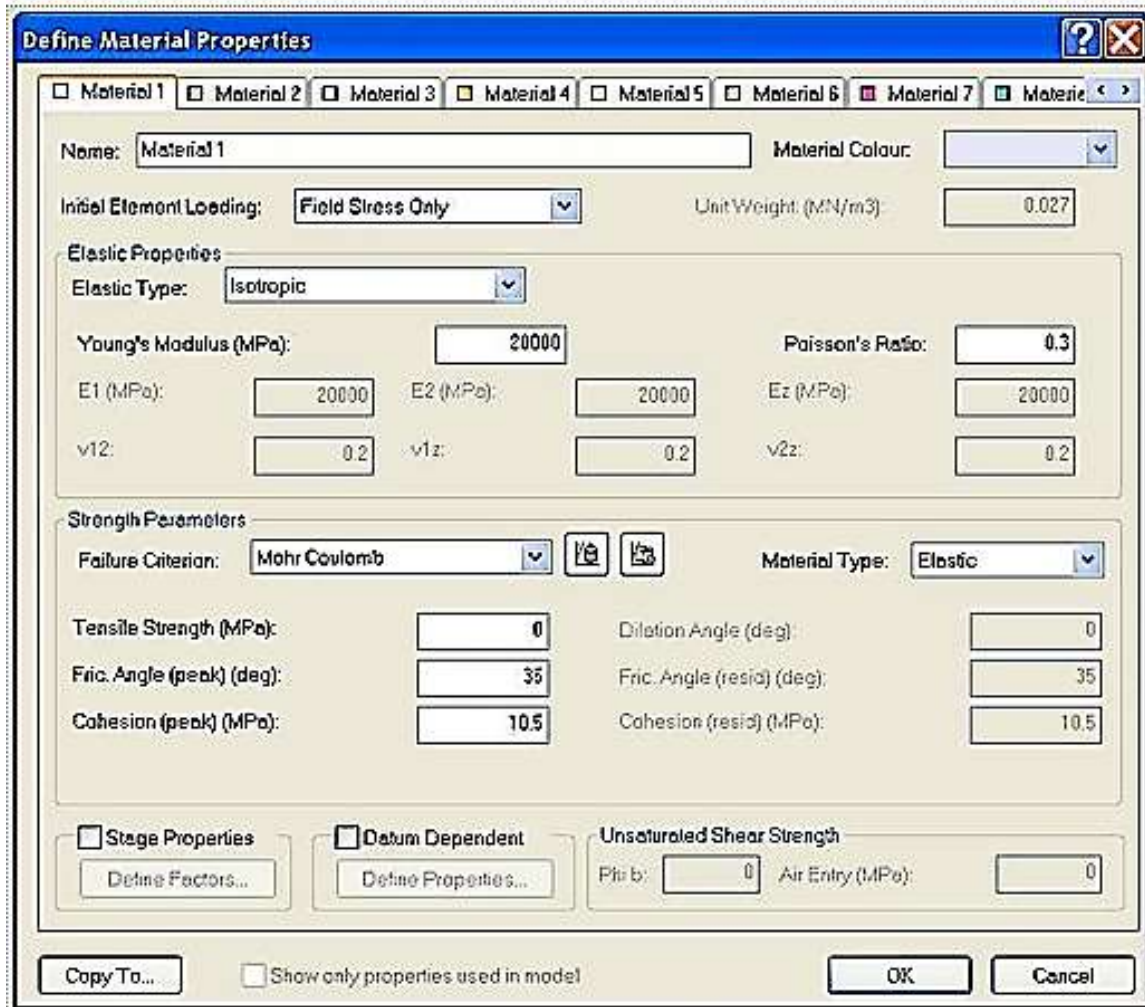


Figura 22. Definir propiedades del material.

Fuente. Elaboración Propia

Phase 2.0 permite definir los siguientes parámetros de resistencia del material:

- Mohr-Coulomb
- Hoek-Brown (criterio del original)
- Generalizado de Hoek-Brown (última versión)
- Drucker-Prager
- Cam-Clay
- Modificado Cam-Clay

Si se establece que el tipo de material sea elástico, entonces se supone que el material tenga una fuerza ilimitada. La respuesta del material será lineal elástica, independientemente de la magnitud del esfuerzo. Se puede definir los parámetros de fuerza, pero sólo será utilizada para el cálculo del factor de resistencia (es decir, el grado de sobrecarga). Si se establece que el tipo de material sea plástico, entonces el material puede producir y exhibir un comportamiento tensión-deformación no lineal. Para los modelos de Drucker-Prager Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, puede especificar el pico y los parámetros de resistencia residual. Resistencia residual se aplicará si se supera la fuerza máxima. Si resistencia residual es la máxima (pico) define un material plástico elástico-perfecto. Si la resistencia residual es cero define un material frágil.

Los parámetros elásticos

Phase 2.0 permite definir los siguientes parámetros elásticos:

- Isotrópicos
- Transversalmente Isotrópicos
- Orto trópico
- Hiperbólicos de Duncan-Chang

De forma predeterminada se supone que los materiales isotrópicos tienen propiedades elásticas. Esto significa que las propiedades elásticas no dependen de direccionalidad, y se definen por un solo valor de módulo de Young y un único valor de la relación de Poisson.

1.3.6. Interpretación de Datos

Para interpretar el programa ofrece una amplia caja de herramientas de los recursos para la visualización y presentación de los resultados del análisis. Los

resultados pueden ser contorneados, modelados, graficados, exportados, y mucho más.

Contornos

El principal medio de interpretación de los datos después de un Phase 2.0, es la visualización de los contornos de datos directamente en el modelo. Los análisis de esfuerzo incluyen:

- ✓ Esfuerzo Principal: Sigma 1, Sigma 3, Sigma Z, Esfuerzo medio, Esfuerzo de tensión.
- ✓ Desplazamiento: Horizontal, Vertical, Total
- ✓ Factor de Fuerza
- ✓ Cortante máximo

Material de Consultas

En Phase 2.0 una consulta es una línea definida por el usuario o una polilínea que se define dentro de la masa de roca o el suelo, a lo largo de la cual los datos se interpolan a partir de las gráficas de contorno, a intervalos definidos por el usuario. Después se crea una consulta, los datos pueden ser:

- ✓ Graficados.
- ✓ Se muestra directamente en el modelo.
- ✓ Copiado en el portapapeles
- ✓ Guardar en un archivo

Las consultas de forma automática se pueden crear en las fronteras, para trazar rápidamente los datos, por ejemplo a lo largo de las superficies de excavación. En la figura siguiente, un acceso directo del botón derecho se utiliza para generar automáticamente una consulta en un límite de excavación

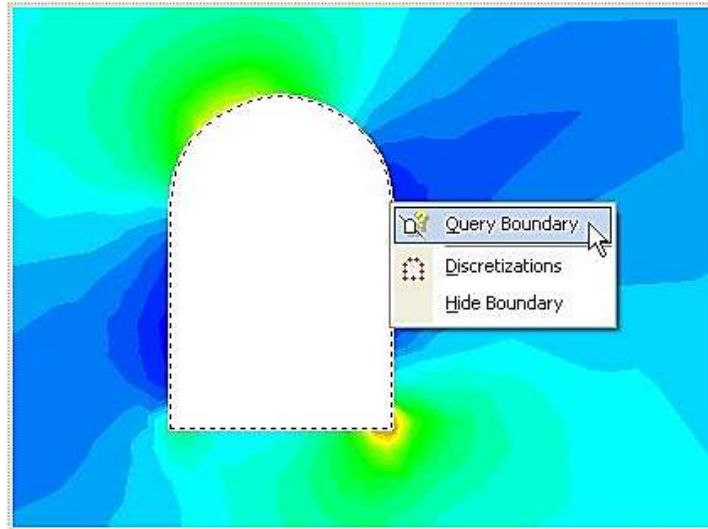


Figura 23. Límites de consulta

Fuente. Elaboración Propia

Los datos de la consulta se pueden visualizar en el modelo o graficarse.

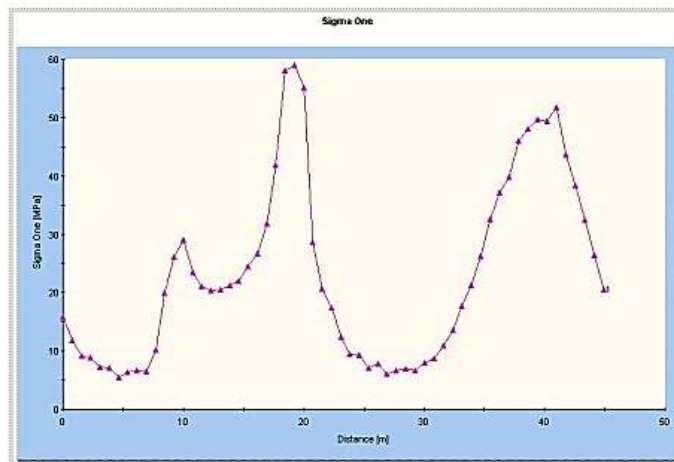


Figura 24. Gráfica de Sigma 1 a lo largo de límites de excavación.

Fuente. Elaboración Propia

Iso-Contornos

Las isolíneas se pueden agregar a gráficos de contorno de cualquier variable. Una línea Iso en un gráfico de contorno representa un valor constante de una variable contorneada. Líneas Iso-contorno se añaden con la opción **Add Iso - Line**.

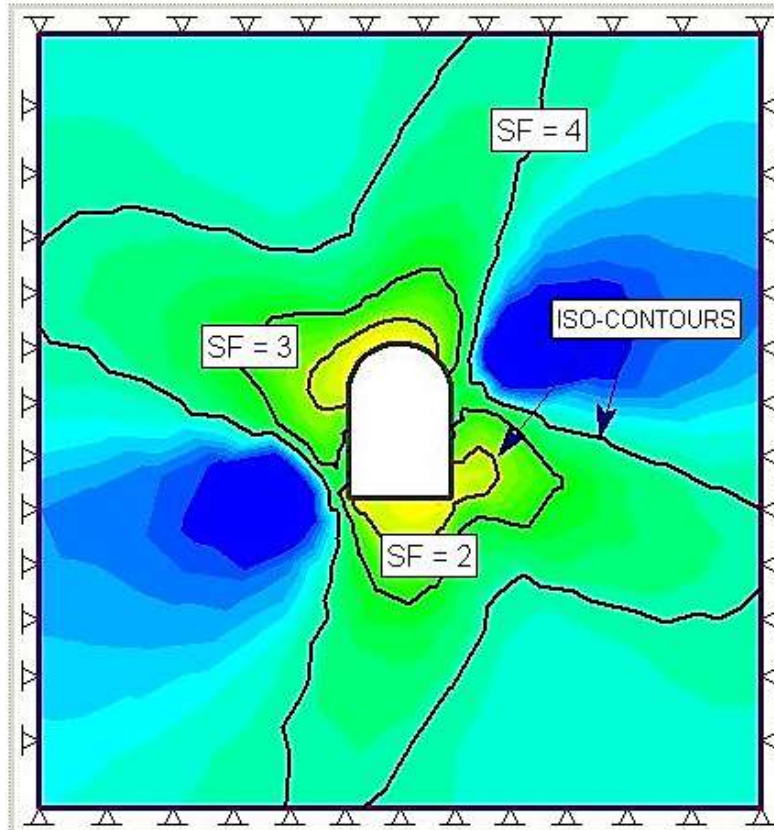


Figura 25. Líneas Iso-contorno

Fuente. Elaboración Propia

2 DESCRIPCIÓN

Por su naturaleza, los túneles, cavernas y en general todo tipo de excavaciones o cimentaciones profundas, son los más sensibles a los efectos de materiales rocosos. La implementación de Software como ayuda en la ejecución de estas obras ha tenido más auge con el tiempo pero esto sucede más a nivel internacional, aunque en Colombia no se implemente con tanta frecuencia como a en Europa, Chile y otros. Inicialmente en este proyecto el objetivo es dar a conocer la posibilidad de hacerlo.

Es esencial que cualquier proyecto de túnel comience con una investigación sobre las condiciones del terreno. Esto nos permitirá definir inicialmente el tipo de material del cual está compuesto, a su vez la maquinaria a usar y métodos de excavación que no comprometan la estabilidad del talud. Es de gran utilidad usar ayudas como El software Phase 2.0, el cual nos permitirá modelar la excavación. Los resultados de la modelación nos permitirán determinar la estabilidad del talud, definir la resistencia asociada al proceso de excavación, refuerzo y soporte del terreno; además nos especificará si el refuerzo y sostenimiento usado es el adecuado para prevenir un colapso o deformaciones inaceptadas.

El Software Phase 2.0, es un potente programa de análisis de esfuerzos por elementos finitos elastoplástico 2D para excavaciones subterráneas o superficiales de la roca o el suelo. El uso de este software ayuda a los usuarios mejorar la seguridad y reducir los costos cuando se analizan las estructuras superficiales y subterráneas en roca. Recomendado por expertos en el campo, además son programas de fácil uso que pueden facilitar proyectos de diseño tales como excavaciones subterráneas, túneles, minas a nivel y laderas de roca y el suelo.

El objetivo principal de este proyecto es dar a conocer este software y usarlo como modelador para una excavación Tipo Túnel en Roca inalterada o roca virgen. Para ello se crea una manual como material de apoyo para el manejo del software.

3 METODOLOGÍA

3.1. MODELAMIENTO DE UNA EXCAVACIÓN SUBTERRANEA EN ROCA ITNALTERADA

Los valores utilizados para realizar el modelamiento de la excavación se tomaron de un estudio realizado para el diseño del Túnel De La Línea, para el sitio conocido como Pórfidos. [10]

Refuerzos Usados

Como soporte se emplea concreto lanzado con un espesor máximo de 0.050m y pernos sistemáticos.

Características de los materiales

GSI. Los valores del GSI son estimados a partir del RMR de Bieniawski 1989, como lo recomiendan Hoek Kasier y Bawden, 1995; El macizo rocoso presenta valores promedio del índice RMR89 = 65 ± 9 .

Resistencia a la compresión. La resistencia de la roca ensayada en este sector es variable, la resistencia es tomada de los ensayos de compresión uniaxial presentando un valor promedio de 36.5MPa.

Parámetro m_i . Se toma para modelación el valor de $m_i = 15$ considerando la baja resistencia del material en este sector.

Parámetro D. La longitud de avance está establecida entre 2 y 3m, realizando voladuras en las cuales se alcanzan factores de carga altos, que pueden afectar el macizo rocoso, por esta razón se toma un valor de la perturbación alto $D = 0.7$.

Parámetros E_m , m_b , s y a . Son calculados en el programa RockLab, a partir de los valores presentados en las Tabla 3.

PARAMETRO	SIMBOLO	VALOR			ORIGEN
Resistencia de la roca intacta	S_i	36.5 MPa			Medido
Constante de H-B	m_i	15			Asumido
Perturbación	D	0.7			Asumido
RMR _{gg}	RMR _{gg}	65±9			Leído
GSI	GSI	60±9			Calculado
Modulo de deformación MPa	E_m	1669.98	2929.95	4713.98	Calculado
Relación de Poisson	ν	0.2			Asumido
Parámetros para la modelación	mb	1.016	1.666	2.731	Calculado
	s	0.0008	0.0030	0.0112	Calculado
	a	0.505	0.503	0.501	Calculado

Tabla 3. Parámetros del macizo y la roca.

Esfuerzos. No se tienen datos de esfuerzos medidos en el TPL, por tal razón se analizan partiendo del esfuerzo gravitacional básico y definiendo el rango de variación de los esfuerzos a partir de 2 ecuaciones teóricas (1) Hoek & Brown, (1980) y (2) Goodman, (1989) Para una profundidad promedio de 75m y según Hoek & Brown, (1980) se tiene una relación de esfuerzos K que debe estar contenida entre 1.6 a 3.5, según Goodman, (1989), el K para un régimen distensivo será de 0.10 y para un régimen compresivo de 3.5, usando $\gamma = 27 \frac{KN}{m^3}$ se obtienen los valores de esfuerzos presentados en la Tabla 4.

Sitio	Cobertura [m]	Esfuerzo principal [MPa]		
		Calculo	Max.	Min.
Pórfidos	75	$\sigma_v = \gamma h$	2.02	2.02
		$\sigma_h = K\sigma_v$	0.23	7.8

Tabla 4. Rango de valores de esfuerzos según Goodman (1989)

Se considera que el macizo responde a un régimen ligeramente compresivo, por lo cual se aumentan los esfuerzos horizontales paulatinamente hasta obtener la respuesta esperada del macizo, se obtiene un esfuerzo horizontal de 4.7MPa, correspondiente a un K de 2,3, es considerado válido debido a la alta influencia tectónica sobre la zona.

Fuente. Elaboración Propia

CONCRETO LANZADO (SHOTCRETE)		PROPIEDADES DE LOS PERNOS	
Espesor (m)	0,15	Tipo de perno	Fully bonded
Modulo de Youngs (MPa)	30000	Diametro de perno (mm)	25,4
Relación de Poisson	0,15	Modulo, E (Mpa)	200000
Resistencia a la compresión (MPa)	30	Capacidad a la tensión (MN)	0,2
Resistencia a la tensión (Mpa)	4	Capacidad residual a la tensión (MN)	0,2
		Espaciamiento (m)	3
		Platinas	SI
MACIZO ROCOSO			
Parámetro	Símbolo	Macizo Inalterado	
Resistencia de la roca intacta Mpa	Si	36,5	Medido
Constante de H-B	mi	15	Leído
Perturbación	D	0,7	Conforme con el control de Campo
RMR ₈₉	RMR ₈₉	65±9	Medido
GSI	GSI	60±9	Calculado
Modulo de deformación Mpa	Em	2929,95	Calculado
Relación de Poisson	v	0,2	Asumido
Parámetros para la modelación Mpa	mb	1666	Calculado
	s	0,003	Calculado
	a	0,503	Calculado
Esfuerzos principales Mpa	s1	2,02	Calculado
	s2	4,7	Ajustado

Tabla 5. Parámetros de entrada para realización del modelo

1.3.1. Análisis de la Modelación.

La sección del túnel y el soporte no fallan, se identifican bajas deformaciones dentro del rango elástico con un factor de seguridad superior a 1.

Durante la relajación de los esfuerzos el soporte presenta bajas deformaciones con desarrollo de trabajo elástico en el macizo y en el soporte, por lo cual se considera estable el diseño.

Los esfuerzos se consideran válidos, ya que cumplen con (1) Relaciones de esfuerzos K adecuadas y (2) Requisitos deformacionales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Concluimos del modelamiento de la excavación del túnel compuesto por manto o en roca inalterada que su comportamiento mecánico ante un estado de relajación por des confinamiento es tal que las deformaciones máximas son inferiores a las máximas permitidas, que ante este resultado teóricamente no es necesario reforzar con ningún tipo de estructura ya que los factores de seguridad arrojados por el modelo cuando la excavación se hace sin refuerzo cumplen dando valores mayores a 1.0. Así mismo se concluye que es de vital importancia conocer de manera precisa datos que se asemejen a la realidad como los estados de esfuerzos parámetro de entrada al modelo, características mecánicas y dimensionamiento de refuerzos y elementos de la sección transversal que se proyecta construir ya que datos que se alejen a los de campo arrojan resultados que en el modelo o análisis echo en software están bien o cumpliendo y en la realidad el comportamiento obedece a otras características, un análisis bien hecho y datos que puedan usarse para modelar requieren de análisis tanto físico como químico de los materiales y elementos en campo.

La creación del manual del software Phase 2.0 constituye un aporte como material didáctico científico y brinda elementos novedosos, además es aplicable a cualquier tipo de excavación tanto en obras subterráneas como de superficie.

El manual permite modelar el comportamiento de una excavación subterránea en condiciones normales y condiciones hidráulicas no normales, es decir la presencia de aguas subterránea. Permite modelar todas las Cargas que se tienen en condiciones reales en el terreno. También permite definir las propiedades de los materiales, como por ejemplo las propiedades de la resistencia del material como lo son: Mohr-Coulomb, Hoek-Brown (criterio del original), entre otras.

Además permite interpretar los datos como de diferentes formas para facilitar el entendimiento de los mismos, como lo son en el modelo mismo, graficando incluso exportándolos.

BIBLIOGRAFIA

[1] Análisis del comportamiento de un túnel excavado en rocas altamente expansivas.

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4936/1/Mem%C3%B2ria.pdf>

(Consultado Abril 13 – 2014)

[2] Bolt Support in Phase2.0 of Rocscience Inc.

<https://www.rocscience.com/products/3/feature/63>

(Consultado Abril 28– 2014)

[3] Caracterización geo mecánica De macizos rocosos en obras subterráneas De la región oriental de país

<http://es.scribd.com/doc/123147475/CARACTERIZACION-GEOMECANICA-DE-MACIZOS-ROCOSOS-EN-OBRAS>

(Consultado Abril 6 – 2014)

[3] Data Interpretation in Phase2.0 of Rocscience Inc.

<https://www.rocscience.com/products/3/feature/72>

(Consultado Abril 30 – 2014)

[4] Diseño y construcción de túneles con el sistema de análisis de la deformación controlada en rocas y suelos

http://www.rocksoil.com/pdf/adeco_spagnolo.pdf

(Consultado Abril 12 – 2014)

[5] Especificaciones técnicas 3.Tuneles

http://www.ramos.utfsm.cl/doc/583/sc/ETE_TUNELES_LA_POLVORA.pdf

(Consultado Abril 9 – 2014)

[6] Field Stress in Phase2.0 of Rocscience Inc.

<https://www.rocscience.com/products/3/feature/60>

(Consultado Abril 22 – 2014)

[7] Material Properties in Phase2.0 of Rocscience Inc.

<https://www.rocscience.com/products/3/feature/62>

(Consultado Abril 27 – 2014)

[8] Mesh Generation in Phase2.0 of Rocscience Inc.

<https://www.rocscience.com/products/3/feature/59>

(Consultado Abril 20 – 2014)

[9] Modeling in Phase2.0 of Rocscience Inc

<https://www.rocscience.com/products/3/feature/57>

(Consultado Abril 18– 2014)

[10] Phase2.0 de Rocscience Inc.

<https://www.rocscience.com/products/3/Phase2>

(Consultado Abril 16 – 2014)

[11] Piles and Geosynthetics in Phase2.0 of Rocscience Inc.

<https://www.rocscience.com/products/3/feature/66>

(Consultado Abril 30 – 2014)

[12] Project Settings in Phase2.0 of Rocscience Inc.

<https://www.rocscience.com/products/3/feature/58>

(Consultado Abril 18 – 2014)

[13] Propuesta de técnica para la determinación del comportamiento del terreno en excavaciones subterráneas con base en un túnel exploratorio. Caso: túnel de la línea.

[http://www.bdigital.unal.edu.co/6782/1/Perez%2C D. %282012%29 Parte 1.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/6782/1/Perez%2C%20D.%282012%29%20Parte%201.pdf)

(Consultado Abril 4 – 2014)

[14] Rocscience Inc.

<http://www.linkedin.com/company/rocscience-inc>

(Consultado Marzo 29 – 2014)

CITAS BIBLIOGRAFICAS

[1] **BIENIAWSKI, Z.T, (1984)**. Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling. A.A Balkema Publishers. Rotterdam.

[2] **GONZALEZ DE VALLLEJO, 1998**, Las clasificaciones geomecánicas para túneles. En Ingeotuneles, vol 1. Cap. 1. Ed López de Jimeno. Entorno Grafico, Madrid.

[3] **GOODMAN, R. E. 1989**. Introduction to rock mechanics. Universidad de California at Berkeley. Ed John Wiley & Sons.

[4] **HOK E., BROWN, E. T., 1985**. Excavaciones subterráneas en Rocas, Segunda Edición, Mc Graw-Hill, 633P. México,. ISBN 0-900-488-55-7

[5] **PEREZ PEREZ, DIANA MARCELA, 2012**. Propuesta de técnica para la determinación del comportamiento del terreno en excavaciones subterráneas con base en un túnel exploratorio. Caso: túnel de la línea.

[6] **SHEOREY, K., LANARO, F. AND LANRU, J. (2002)**. Strategy for a rock mechanics site descriptive model-development and testing of the empirical

[7] **SUAREZ, L., 2008**. Rock Mass Mechanical Behavior Assessment at the Porco III Underground Hydropower, Central Colombia - South America, Tesis de Maestria en Ingenieria – Geotecnia.

[8] **Rocsciencie Inc**, Phase 2.0, definition.

[9] **Rocsciencie Inc**, Phase 2,0 subterranean excavation

[10] **WIKHAM, G.E. TIEDEMANN, H.R. ANDSKINNER, EH (1972)**. Support determination based on geologic predictions. Proceeding, Rapid Excavation and Tunneling Conference, AIME, New York. approach. SKB rapport R-02-01. ISSN 1402-3091.

ANEXOS



**MODELAMIENTO DE EXCAVACIONES SUBTERRANEAS
(TUNELES) EN ROCA INALTERADA
SOFTWARE PHASE 2.0**

Manual de Usuario

ELBORADO POR:

Carlos Andrés Puentes Montoya - 2083448

Estudiante de Ingeniería Civil

Leidy Tatiana Martínez Mora - 2083502

Estudiante de Ingeniería Civil

Elaborado como requisito para optar el título como Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA MAYO DE 2014

Índice de Contenido

1	Introducción	2
2	Información General	2
3	Modelado de Túnel sin refuerzo	2
3.1	Creación de la sección transversal del túnel	3
3.2	Creación de la Externa de trabajo	4
3.3	Configuración de la malla de trabajo	5
3.3.1	Discretización y generación de malla	5
3.4	Definición de estado de esfuerzos	6
3.5	Definición de etapas de proyecto	7
3.6	Definición material del proyecto	8
3.7	Asignación de materiales y Excavaciones	8
4	Análisis de resultados	9
4.1	Inicio de calculadora	10
4.2	Interprete de resultados	10

5 Modelado de túnel con refuerzo 12

5.1 Refuerzo de tipo "Bolt" o Perno de anclaje Metálico..... 12

5.1.1 Propiedades de refuerzo "Bolt"13

5.2 Refuerzo de tipo "Linner" o Refuerzo en concreto.....13

5.2.1 Propiedades de refuerzo "Liner" 14

6 Análisis de resultados 14

1 Introducción

El presente manual brinda una guía al usuario para la configuración, implementación y utilización del software Phase 2.0 usado para el modelamiento de todo tipo de excavaciones; este manual en particular está enfocado en el modelamiento de estructuras tipo túnel actuando bajo el parámetro de roca inalterada. Este software diseñado con el fin de permitir al usuario predecir el comportamiento de cualquier tipo de estructura o de terreno ante cualquier sollicitación que pudiese tener, fue desarrollado por la firma estadounidense Rocscience productores de software aplicado en el campo de la geotecnia utilizado con bastante frecuencia en América Latina.

En la actualidad el uso de herramientas informáticas que permitan tener ideas aproximadas del cualquier tipo de estructura en el ámbito de la geotecnia partiendo de un proceso de carácter computacional ha cobrado importancia por cuanto es más económico analizar el comportamiento de cierta infraestructura desde el proceso echo en un computador que luego de construido. A su vez diferentes tipos de análisis partiendo de teorías que han sido base de estudio durante muchos años permiten al usuario tener más de una opción al momento de tomar decisiones, incluso; combinar procesos, conceptos e ideas que enfocadas en la optimización de un proceso, en este caso de carácter constructivo, se traducirán más tarde en resultados en menores tiempos, con márgenes de errores más pequeños y mucho más competentes ante la gran oferta en industrias de construcción que actualmente existe.

Son entonces las herramientas computacionales una muy buena opción con la cual todas las empresas hoy por hoy basan muchos de sus procesos porque permiten ir más allá bajo un análisis supuesto producido en un computador, este manual es una forma básica que permite al usuario modelar la construcción de un túnel por etapas de construcción partiendo de datos propios de estudios de campo o de forma empírica a base de teorías ya estudiadas.

2 Información General

Phase 2.0 es un potente programa de análisis de esfuerzos por elementos finitos elasto-plástico en 2D para excavaciones subterráneas o superficiales en roca o el suelo. Se puede utilizar para una amplia gama de proyectos de ingeniería e incluye soporte de diseño, elementos finitos de estabilidad de taludes, filtración de aguas subterráneas y el análisis probabilístico. Para este manual en particular se indica al usuario los pasos para modelar un túnel a partir de características propias de la roca, condiciones del entorno, de carga, etc. Dentro de los resultados que el programa arroja están los desplazamientos totales y efectivos, presiones de poros, esfuerzos tanto verticales como horizontales y factores de seguridad. Dentro de los procesos que pueden hacerse están aparte de excavaciones por etapas de construcción modelar estructuras de contención como elementos anclados, pantallas, ataguías entre otros.

3 Modelado de Túnel sin refuerzo

Para modelar la excavación del túnel tendremos a consideración dos situaciones principales en varias etapas, la primera una excavación sin ningún tipo de apoyo donde no usaremos anclajes metálicos y la segunda opción una excavación por donde usaremos anclajes de tipo metálico

verificando la utilidad de los mismos en la última etapa y el aporte a la estabilidad de la superficie del túnel.

3.1 Creación de la sección transversal del túnel

En el entorno de trabajo el programa nos permite crear de forma manual la sección transversal del túnel de siguiente forma: En la pestaña Boundaries -> Add Excavation e ingresamos las coordenadas de los vértices de la sección transversal del túnel digitando primero la coordenada en x y luego en y separadas por un espacio de la siguiente forma [-5 5], así para cada uno de los vértices. Generalmente este tipo de estructuras en la superficie más alta se modelan en forma circular o de arco presionamos la tecla arc y escogemos tres vértices y el número de segmentos en que queremos dividir el de círculo.

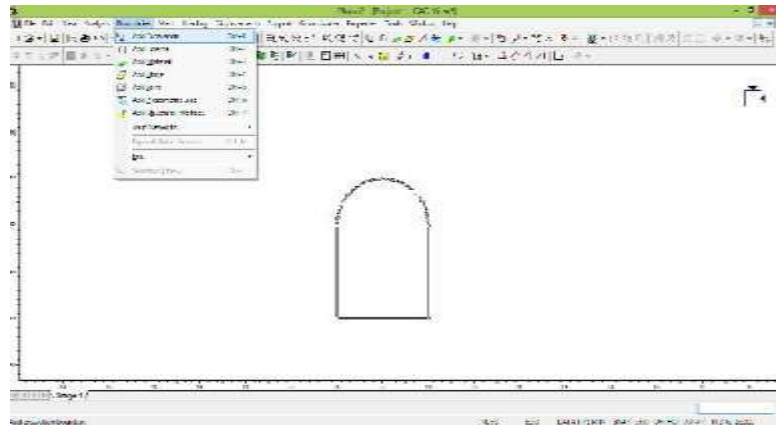


Figura 1 Creación sección transversal túnel

Además de crear la sección trasversal por coordenadas desde el interfaz del programa podemos importar la misma cuando la trabajamos desde AutoCAD en secciones transversales más complejas que tiene muchos más vértices. Debemos hacer el dibujo en AutoCAD creándolo en una capa que podemos llamar superficie o sección y guardarla en un archivo de formato .Dxf, luego de ello procedemos a importar la sección transversal desde el menú file->Import->Import .Dxf y buscamos el archivo donde lo dejamos guardado. Cabe aclarar que la sección dibujada en AutoCAD tiene que estar en una capa que podamos reconocer en Phase 2.0 porque después de importada la sección lo que se hace es llamar como tal la capa, no el dibujo solamente.

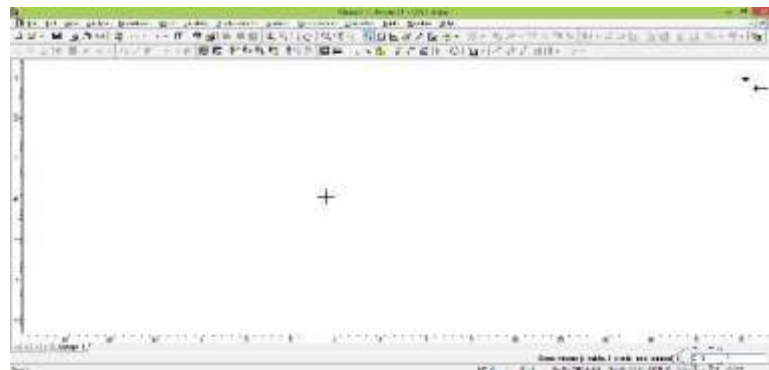


Figura 2 Campo de trabajo creación de sección transversal

Si estamos ingresando el arco de forma manual o por coordenadas tecleamos arc, luego nos

aparece una ventana donde indicamos el número de puntos de referencia del arco y el número de segmentos en que queremos que el arco se divida.

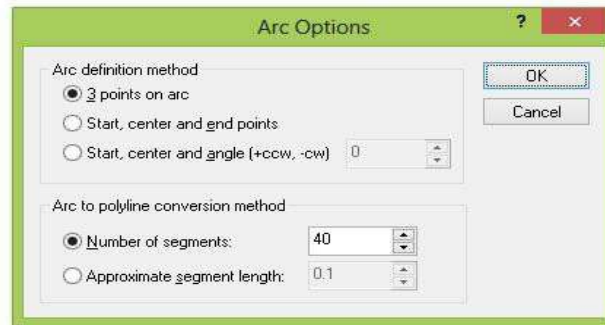


Figura 3 Configuración de arco de sección transversal

3.2 Creación de la Externa de trabajo

Luego de definir el área de la sección transversal tenemos que definir la externa que es el área que limita el campo de trabajo, es decir, dentro de esta área externa el programa va a realizar análisis en todos los puntos que contiene y a su vez la misma contiene la sección transversal, tenemos que asegurar que los resultados que dan en los límites o bordes de determinada externa sean iguales o tiendan a ser iguales porque es allí donde vamos a poner las restricciones y no pueden ser puntos de importancia para análisis.

Para definir la externa vamos al mismo menú Boundaries->Add External, nos aparece una ventana donde vamos a definir la externa en tipo caja con un valor escalado de la sección transversal como 3. Este valor de escala puede ser el que el usuario elija y depende de que tan lejos de la sección transversal el usuario necesite conocer datos de análisis.

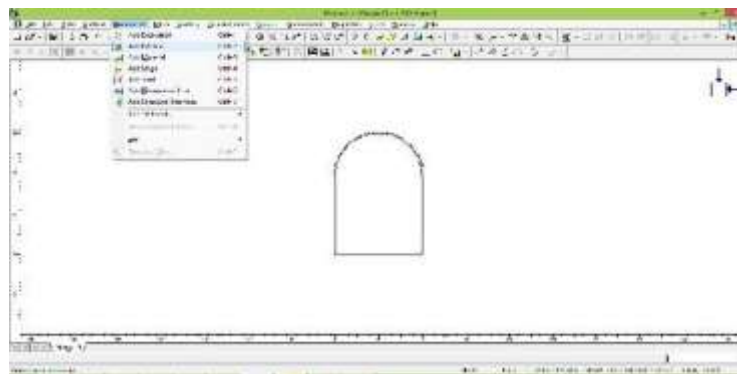


Figura 4 Agregar externa

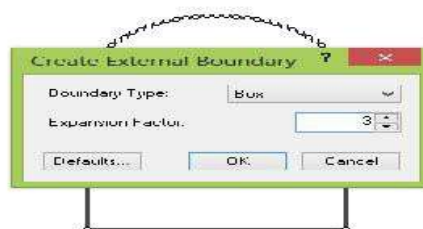


Figura 5 Definición de la externa y valor de escala

3.3 Configuración de la malla de trabajo

Para que el programa pueda realizar análisis y por tratarse de un análisis de elementos finitos debemos de indicarle al programa en que puntos él debe hacer análisis para interpolar el resto y que no se convierta en un análisis infinito. Vamos a la opción Mesh->Mesh Setup. Allí se abre una ventana que nos da la opción de una malla graduada, triangular o circular; escogemos graduada y le damos el número máximo de nodos en toda la malla, entre más nodos tengamos en la malla más puntos el programa tendrá que analizar y por ende más resultados obtendremos.

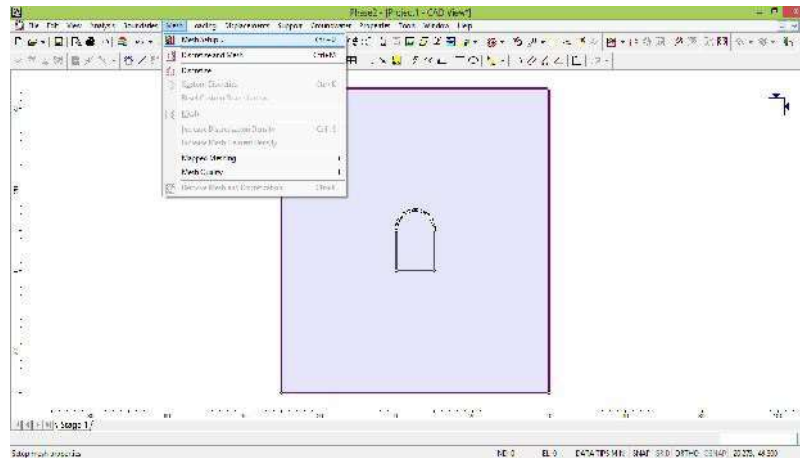


Figura 6 Opción Mesh configuración de malla

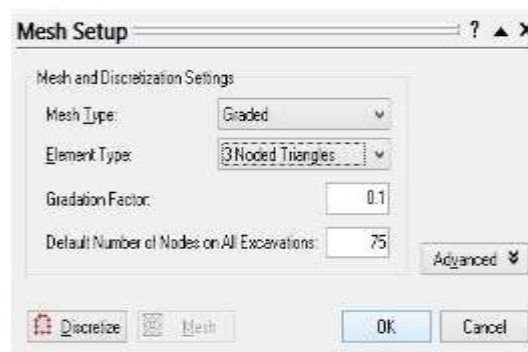


Figura 7 Configuración opciones de malla

3.3.1 Discretización y generación de malla

El programa tiene que realizar un proceso de discretización de la zona que vamos a excavar o de diferenciación de la sección transversal que ingresamos o dibujamos del resto de la externa, para ello vamos a la opción Mesh->Discretize. Luego de ello procedemos a generar la malla en Mesh->Mesh y con ello obtenemos la malla de toda la superficie de trabajo establecida.

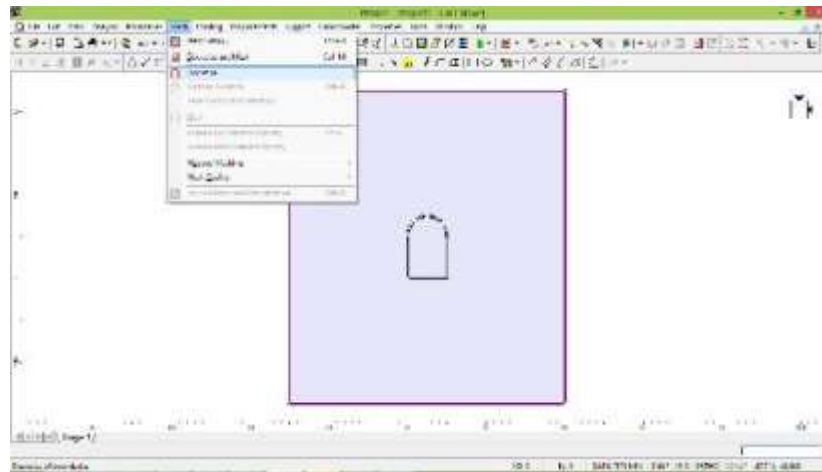


Figura 8 Configuración de la malla

Luego de haber discretizado el campo de análisis, configurar la malla y generar la misma debemos tener algo como esto:

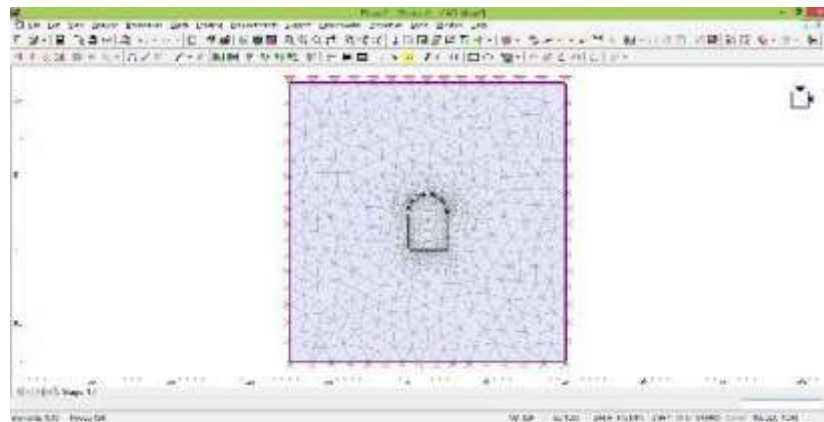


Figura 9 Campo de trabajo discretizado y enmallado

En la figura anterior tenemos el modelo con la sección transversal del túnel lista, la externa delimitada y la malla generada. Además de ello podemos observar por todos los bordes de la externa las restricciones al desplazamiento y fuerzas que el programa automáticamente limitando el análisis dentro de la externa.

3.4 Definición de estado de esfuerzos

Para que el programa asigne cargas a los materiales que vamos a crear más adelante es necesario tener el tensor o estado de esfuerzos del material rocoso en este caso roca inalterada, estos datos en ocasiones se pueden obtener como resultado de ensayos insitu pero en ocasiones por las profundidades a las que se necesitan datos y complejidad de los ensayos se hace complicado obtenerlos directamente. Existen fórmulas empíricas que permiten llegar a valores aproximados de esfuerzos verticales y horizontales partiendo de un parámetro K que tiene en cuenta la profundidad y el módulo de elasticidad de la roca, en cualquier caso es

necesario contar o bien sea con el parámetro en mención o con el tensor de esfuerzos. Para nuestro caso vamos a definir el tensor de esfuerzos en el menú Loading-> Fiel Stress, nos aparece la siguiente ventana:



Figura 10 Definición del tensor de esfuerzos

3.5 Definición de etapas de proyecto

Una de las características que hace al Phase 2.0 un programa más práctico y a su vez más aproximado es poder dividir todo el modelo en etapas o partes de construcción o proceso que permiten al usuario realizar análisis parciales de cada movimiento que pueda darse en la construcción. Con la definición de etapas dentro del modelo podemos programar las excavaciones por ciclos e ir revisando cómo se comporta el resto de la estructura a medida que le vamos retirando o agregando partes. Para ello vamos al menú Analysis->Project Settings:

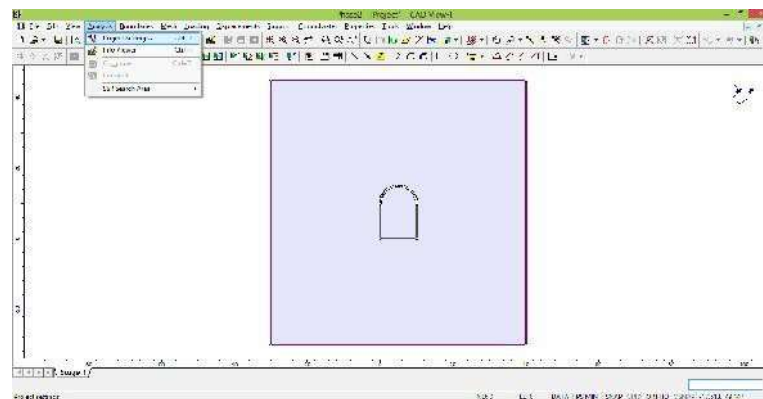


Figura 11 Definición de etapas de construcción

Se abre una venta en donde podemos modificar varias configuraciones del proyecto, por el momento solo hacemos click en Stages (Etapas) y agregamos cuantas creamos que son necesarias, esto depende únicamente del usuario y damos ok.



Figura 12 Agregar etapas de construcción

Al definir más de una etapa en el proyecto garantizamos que en cada una de las etapas de más que hallamos habilitado dentro del proyecto podamos hacer cambios, excavaciones, inclusión de materiales, etc. A su vez cada una de las etapas que proyectemos en el modelo al momento de interpretar los resultados finales nos arroja resultados por separado lo que puede indicarnos cómo se comporta la estructura no totalmente terminada sino al momento de construcción.

3.6 Definición material del proyecto

Luego de haber definido las etapas del proyecto es importante definir el o los materiales que vamos a modelar, estos materiales se definen por sus características propias como lo son si es isotrópico o no, módulo de Young, Modulo de Poisson, Esfuerzo último, Angulo de fricción y cohesión. Vamos a Properties->Define Materials Properties y empezamos a definir cuantos materiales tengamos para modelar. En este caso solo tenemos un material y el programa por defecto lo asigna a toda la externa incluyendo el área de excavación. Podemos dejar los valores que por defecto el programa asume y damos ok.

3.7 Asignación de materiales y Excavaciones

El último paso antes de correr el análisis consiste en asignar cada material en el dibujo, así mismo indicar que zonas son de excavación y en qué etapa del proceso cada zona va a excavar. Para esto vamos a Properties->Assign Properties.

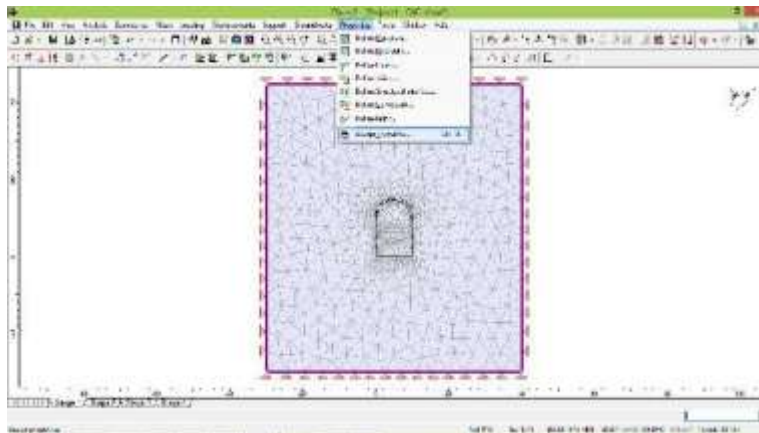


Figura 13 Asignación de propiedades Excavaciones y Materiales

Luego de ello nos sale un recuadro donde se encuentran todos los materiales que el programa por defecto asigna entre esos el material que nosotros definimos, para nuestro caso el programa ya tiene asignado por defecto el único material definido pero en caso de haber definido más de uno sencillamente con seleccionarlo en el recuadro y picando con el cursor en la franja donde es cada material el programa lo asignara. Para las excavaciones tenemos que tener en cuenta las etapas, asignar una excavación a cada etapa que definimos con el fin de obtener análisis por separado. En el recuadro seleccionamos excavación y vamos a picar dentro del primer volumen que va a ser excavado.

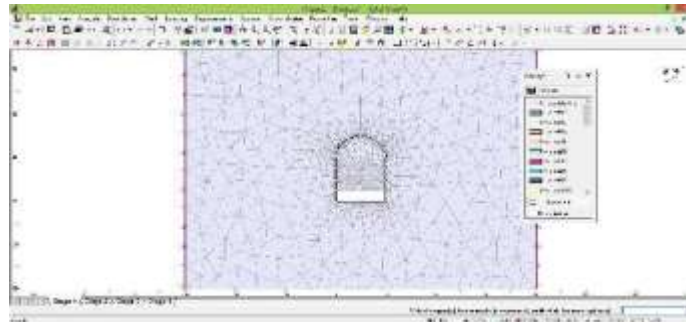


Figura 14 Asignación de excavación en primer estado

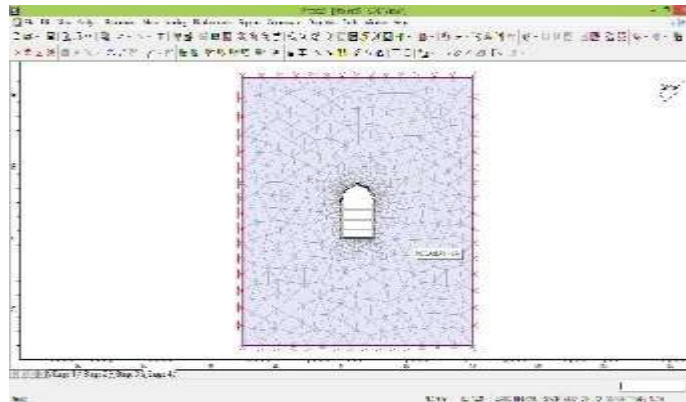


Figura 15 Asignación de excavación total en 4 etapas

4 Análisis de resultados

Con el paso anterior cerramos lo necesario para poder modelar la excavación partiendo de las características propias de la roca, una definición del proyecto por etapas y actividades que corresponden a cada uno. En este manual nos vamos a enfocar en las deformaciones, donde según el estado de esfuerzos programados se producen las mayores y cuáles son las herramientas que el programa tiene para disminuir las deformaciones excesivas.

4.1 Inicio de calculadora

Para iniciar el análisis vamos a buscar en la barra superior un icono en forma de calculadora, damos click y el programa empieza a iterar.

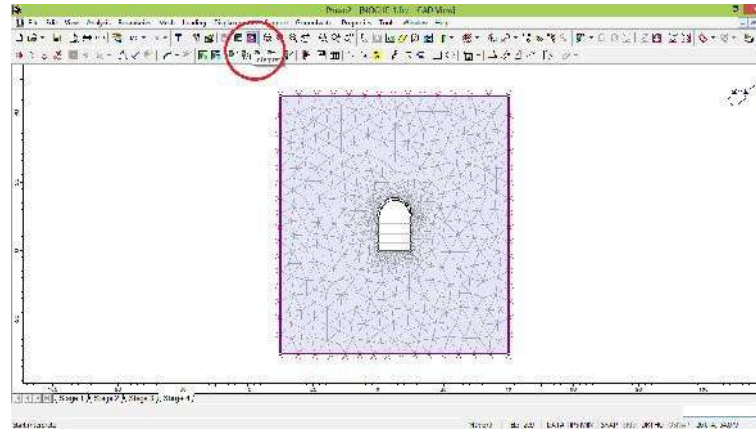


Figura 16 Arranque de análisis

4.2 Interprete de resultados

Después que el programa termina de iterar debemos buscar el icono interprete que esta enseguida del icono calculadora, damos clic y se abre la ventana del intérprete de datos, estando hay buscamos en la barra de tareas el espacio donde dice Sigma 1, en esa misma le damos y buscamos desplazamientos totales, dando clic allí y cambiando por etapas el programa nos va a entregar los desplazamientos totales que se producen en la sección transversal del túnel luego de haber iniciado el proceso de excavación.

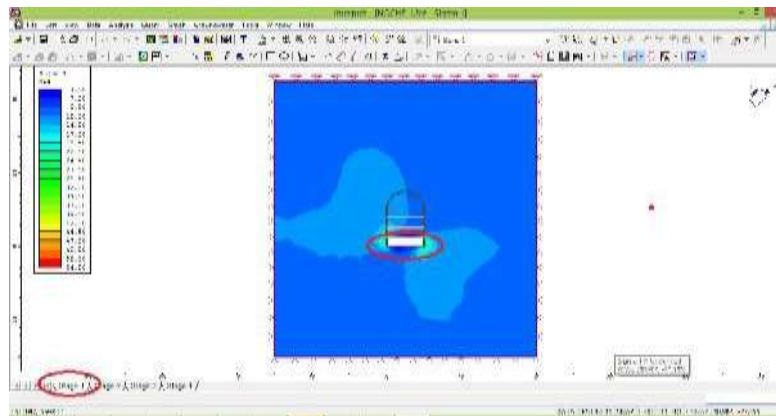


Figura 17 Deformaciones totales Etapa 1

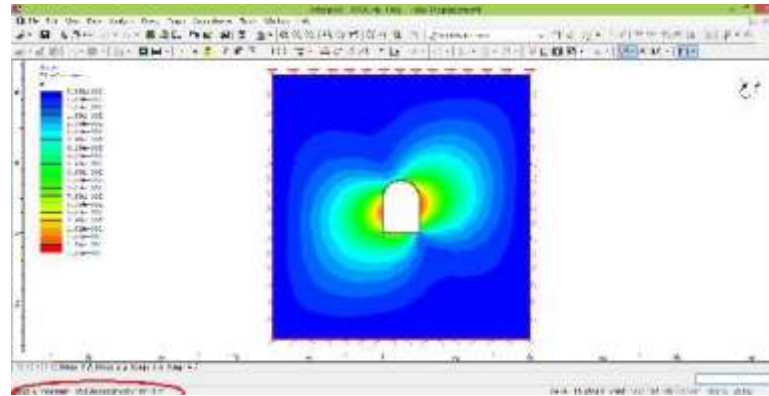


Figura 18 Deformación máxima en
Etapa 4

En la misma opción donde seleccionamos desplazamientos totales podemos encontrar también la opción factor de seguridad y el programa nos indica el factor en cualquier punto de la superficie, para este caso nos resulta más de 1 por ser las deformaciones máximas a las permitidas y las fuerzas actuantes mayores a la resistencia del material.

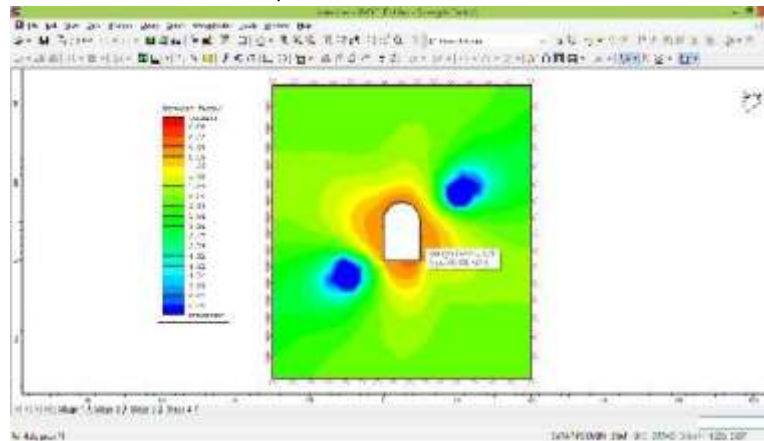


Figura 19 Factor de seguridad

Dentro de las opciones visuales que el programa nos ofrece para visualizar resultados del análisis son los vectores de desplazamiento. Esta opción nos indica en que forma y dirección se están produciendo los mismos, es de más utilidad damos la opción de desplazamientos totales. En la barra superior de tareas Displacement Vectors y automáticamente se actualizara en la pantalla del interprete la figura con los desplazamientos en forma vectorial.

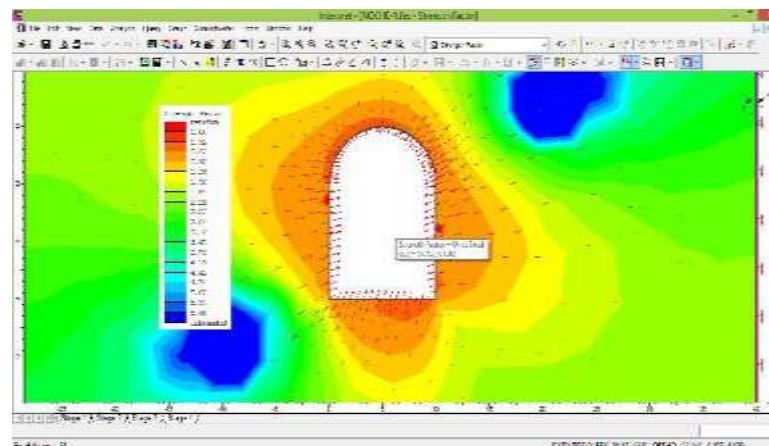


Figura 20 Vectores de desplazamiento

5 Modelado de túnel con refuerzo

Como resultado del análisis de la sección transversal y los desplazamientos que se producían en la misma en el segmento anterior nos daba que sin ningún tipo de refuerzo en la sección transversal las paredes, techo y costado superior del túnel fallarían por deformación. Para esta parte lo que vamos a hacer es en las mismas etapas de construcción iremos asignando refuerzos de tipo anclaje metálico y pared en concreto. Para esto necesitamos definir los materiales, sus módulos de elasticidad, longitudes y luego de tener creados los refuerzos los vamos a asignar por etapas de construcción de la misma forma que se hizo con la excavación en el segmento pasado.

5.1 Refuerzo de tipo "Bolt" o Perno de anclaje Metálico

Para la creación de este tipo de refuerzo vamos en la barra superior a la opción Support->Add Bolt Pattern, nos aparece una venta en donde tenemos que definir si queremos los refuerzos normales a la superficie o pared del túnel, de forma radial o con algún Angulo de inclinación respecto de la horizontal, escogemos refuerzo en forma Normal a la superficie, longitud de cada anclaje de 15 m lineales y espaciados cada 1 m y damos ok.

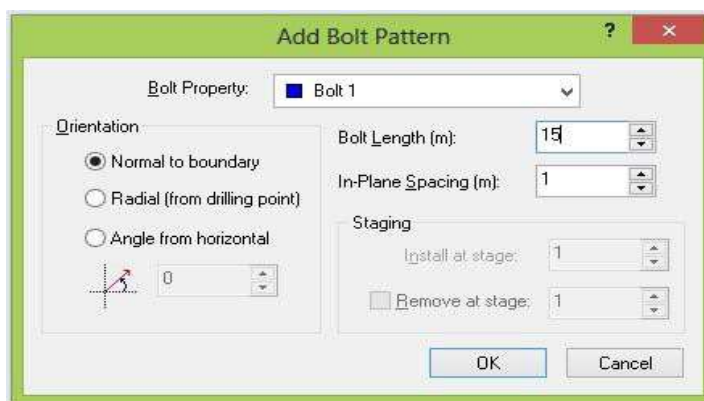


Figura 21 Configuración de refuerzos tipo Bolt

Luego de esto y por etapas de construcción iniciamos dibujando los anclajes, después de haber dado ok en el paso anterior basta con seleccionar las paredes laterales de la primera excavación y el programa automáticamente va a generar anclajes normales a la superficie que seleccionemos de longitud 15 m espaciados cada 1 metro de distancia. Después procedemos a hacer lo mismo en las demás etapas de excavación hasta completar la etapa 4.

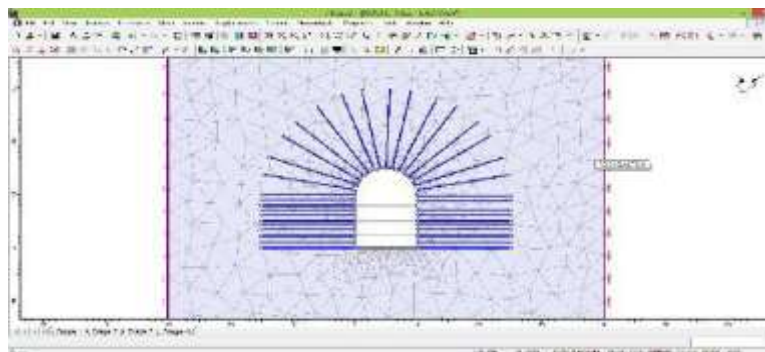


Figura 23 Anclajes normales a superficie al final de las etapas de construcción

5.1.1 Propiedades de refuerzo “Bolt”

Después de haber asignado los diferentes refuerzos que vamos a instalar en toda la sección transversal del túnel es necesario definir las características de los mismos. Vamos a la opción en la barra de herramientas superior Properties-> Define Bolts y nos aparece una ventana donde encontramos por defecto el nombre que el programa le asigna al primer refuerzo creado. Siempre que creemos solamente un tipo de refuerzo, un tipo de material, etc., el programa automáticamente lo asumirá al elemento dibujado. Para este caso lo dejamos con el nombre por defecto, en el tipo le damos anclado al final, le damos diámetro al elemento, módulo de elasticidad del acero y dejamos los otros valores por defecto. En la parte de debajo de la venta na que aparece nos da la opción si el refuerzo es un anclaje pretensado indicar cuál es la magnitud de la fuerza que actúa sobre el elemento en dicho proceso.

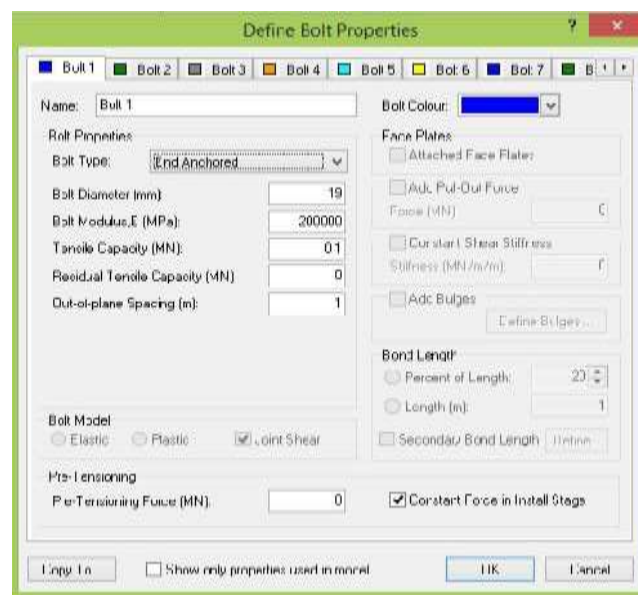


Figura 24 Definición de propiedades y características refuerzo tipo Bolt

El programa tiene la opción que podemos crear tantos elementos con tantas características como queramos esto con el fin de utilizar refuerzos mucho más robustos en zonas más críticas y a su vez elementos menos robustos en zonas de falla menores.

5.2 Refuerzo de tipo “Linner” o Refuerzo en concreto

Para la creación de este tipo de refuerzo vamos en la barra superior a la opción Support->Add Linner, nos aparece una venta en donde tenemos que definir el nombre del refuerzo, para este caso lo llamamos concreto, acá sencillamente indicamos que lo vamos a poner en la etapa 1 de la construcción y vamos como en el paso anterior a seleccionar los elementos laterales de la sección transversal del túnel. Para los refuerzos en las siguientes etapas de construcción sencillamente nos ubicamos en la etapa 2 en la barra inferior y repetimos el proceso anterior indicando que los refuerzos se van a construir en la etapa actual y le damos ok, así para las demás etapas.

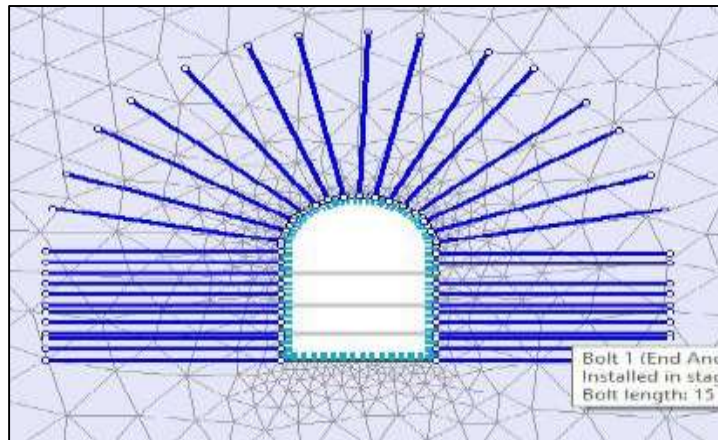


Figura 25 Refuerzo con pantalla en concreto y anclajes metalicos en toda la superficie

5.2.1 Propiedades de refuerzo “Liner”

De forma similar como definimos el refuerzo de tipo Bolt vamos a definir el refuerzo tipo refuerzo de concreto, vamos a Properties->Define Line Properties y nos aparece una ventana donde damos nombre al refuerzo en este caso concreto, le indicamos el módulo de Young del concreto que vamos a usar, módulo de Poisson, en Thickness le damos 2 m y en Beam Element Formulation seleccionamos Bernoulli y damos ok. Como solamente tenemos creado un elemento de refuerzo en concreto el programa automáticamente asume las características que acabamos de crear y las asigna a ese elemento.

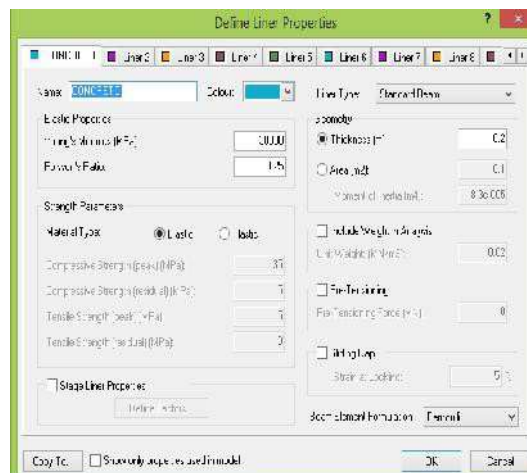


Figura 26 Características de refuerzo en concreto

6 Análisis de resultados

De la misma forma como iniciamos el análisis para el modelo cuando no se tenía ningún tipo de refuerzo lo hacemos esta vez para una sección transversal reforzada con elementos metálicos y en concreto. Los resultados visualizados en el intérprete para este nuevo análisis nos indican una reducción en las deformaciones totales para cada punto que pertenece a las paredes de la sección transversal del túnel, así mismo un aumento en el factor de seguridad a desplazamiento interno.

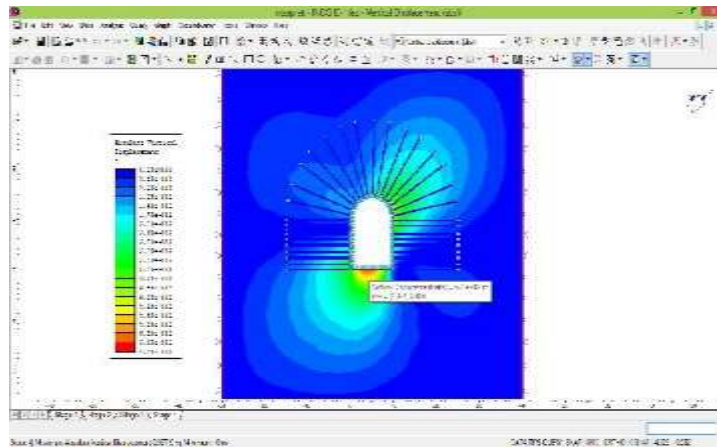


Figura 27 Deformaciones totales con refuerzo anclajes y concreto

Como se demostró en las dos formas de modelar estructuras de tipo túnel cuando reforzamos o no las paredes de la sección transversal de la estructura el programa nos arroja en ambos casos resultados para deformaciones, esfuerzos, factores de seguridad entre otra más información, a su vez, si se definen bien las etapas desde el principio de la configuración del proyecto podremos obtener resultados parciales de cómo se comporta la estructura si aplicamos o no refuerzos en cada uno de los procesos constructivos o de excavaciones.