

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MODELAMIENTO DE 3 CASOS PRÁCTICOS
UTILIZANDO EL SOFTWARE ROCK AND SOIL 2 (RS2)

LUIS FERNANDO ORTIZ JAIMES
RICARDO ALFONSO MONTAÑA CUBIDES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2020

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MODELAMIENTO DE 3 CASOS PRÁCTICOS
UTILIZANDO EL SOFTWARE ROCK AND SOIL 2 (RS2)

LUIS FERNANDO ORTIZ JAIMES
RICARDO ALFONSO MONTAÑA CUBIDES

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil

Directora:
HEBENLY CELIS LEGUIZAMO
Ingeniera Civil. MSc

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2020

DEDICATORIA

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; todos mis logros se los debo a ustedes.

Gracias padre y madre.

Luis Fernando Ortiz Jaimés.

DEDICATORIA

Dedico de manera especial a mi mamá Ana Cecilia, pues ella fue el principal cimiento para la construcción de mi vida personal, sentó en mí, las bases de responsabilidad y deseos de superación.

Gracias madre.

Ricardo Alfonso Montana Cubides

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	12
1 OBJETIVOS	13
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 ROCK AND SOIL (RS2)	14
2.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM).....	14
2.3 MÉTODO PHI-C REDUCCIÓN	15
2.4 CRITERIO DE ROTURA LINEAL DE MOHR-COULOMB.....	15
2.5 CRITERIO DE ROTURA NO LINEAL DE HOEK&BROWN	16
3 VARIABLES A MODIFICAR EN CADA UNO DE LOS MODELOS	17
3.1 VARIABLES GENERALES.....	17
3.1.1 Tipo de malla.	17
3.1.2 Tipo de elemento.	17
3.1.3 Número de elementos.....	18
3.1.4 Restricciones.	18
3.2 VARIABLES EN TALUD.....	18
3.3 VARIABLES EN FLUJO DE AGUA.	18
3.4 VARIABLES EN TÚNEL.....	18
4 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS MODELOS.....	19
4.1 MODELO DE TALUD	19
4.1.1 Características geotécnicas	19
4.1.2 Características generales del modelo en RS2	19
4.2 MODELO FLUJO DE AGUA.....	20
4.2.1 Características geotécnicas.....	20
4.2.2 Características generales del modelo en RS2.....	21
4.3 MODELO DE TÚNEL	22

4.3.1	Características geotécnicas.....	22
5	ANÁLISIS DE LOS MODELOS EN RS2	24
5.1	ANÁLISIS DEL TALUD EN CONDICIÓN ESTÁTICA.....	24
5.1.1	Variación de la cantidad y tipo de elementos.....	24
5.1.2	Variación de las restricciones y tipos de elementos.....	26
5.2	ANÁLISIS DEL TALUD EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA.....	27
5.2.1	Variación de las restricciones y tipos de elementos.....	28
5.3	ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE FLUJO DE AGUA	28
5.3.1	Variación de la cantidad y tipo de elementos.....	29
5.3.2	Variación de las restricciones.	31
5.4	ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE FLUJO DE AGUA CON FILTRO.....	32
5.4.1	Variación de la cantidad y tipo de elementos.....	32
5.5	ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE UN TÚNEL.....	34
5.5.1	Variación de la cantidad de elementos.	35
6	COMPARACIÓN	41
6.1	TALUD.....	41
6.1.1	Factor de seguridad en condición pseudoestática y estática.....	41
6.1.2	Comparación grafica del talud en condición estática y pseudoestática.	43
6.2	FLUJO DE AGUA.....	44
6.2.1	Comparación de los caudales en presencia y ausencia de filtro.....	44
6.2.2	Comparación de las cabezas de presión de manera grafica	46
6.3	TÚNEL.....	46
6.3.1	Valores de esfuerzos y desplazamiento.	46
7	CONCLUSIONES.....	49
	REFERENCIAS	51
	BIBLIOGRAFIA.....	53
	ANEXOS.....	54

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tipo de elementos en RS2	17
Figura 2. Valores estimados de porosidad (%).	20
Figura 3. Valores estimados de conductividad hidráulica (m/día).	21
Figura 4. Modelo del talud en el software RS2	24
Figura 5. Factor de seguridad variando el número de elementos para cada tipo. .	26
Figura 6. Modelo de talud con su coeficiente pseudoestático en RS2	27
Figura 7. Modelo del talud para la simulación de flujo de agua	28
Figura 8. Graficas de dispersión de cada punto de control según el tipo y cantidad de elementos. a) Datos caudal 1. b) Datos caudal 2. c) Datos caudal 3	30
Figura 9. Caudales variando el número de elementos, con 8 nodos cuadriláteros.	31
Figura 10. Graficas de dispersión de cada punto de control según el tipo y cantidad de elementos. a) Datos caudal 1. b) Datos caudal 2. c) Datos caudal 3.	33
Figura 11. Caudales variando el número de elementos, con 6 nodos triangular. ..	34
Figura 12. Modelo de túnel, con sus puntos de control.....	35
Figura 13. Esfuerzo vertical (a) y esfuerzo horizontal (b) variando el número de elementos.	37
Figura 14. Comparación de esfuerzos horizontales en cada esquina perfilada variando el número de elementos.....	40
Figura 15. Comparación de factores de seguridad estático obtenidos en RS2 y Slope/W.	42
Figura 16. Comparación de factores de seguridad pseudoestático obtenidos en RS2 y Slope/W.	42
Figura 17. Comparación grafica de la falla en talud modelado en RS2 (b) y (d) y Slope/w (a) y (c).....	43
Figura 18. Comparación grafica de la cabeza de presión total, modelado en RS2 (b) y (d) y Seep/w (a) y (c).	46
Figura 19. Geometría del túnel y su malla, a) modelo en Plaxis 2D, b) modelo en RS2.....	47
Figura 20. Contorno de desplazamiento horizontal, a) modelo en Plaxis 2D, b) modelo en RS2.	48

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros geotécnicos del talud.....	19
Tabla 2. Parámetros del modelo de talud en RS2.	20
Tabla 3. Parámetros geotécnicos del modelo para flujo de agua.	21
Tabla 4. Parámetros del modelo en RS2.	22
Tabla 5. Parámetros geotécnicos del túnel.....	23
Tabla 6. Factores de seguridad, obtenidos variando tipo y número de elementos.	25
Tabla 7. Factores de seguridad en condición estática con 5000 elementos, obtenidos variando tipo de elemento y las restricciones.....	27
Tabla 8. Factores de seguridad en condición pseudoestática con 5000 elementos, obtenidos variando tipo de elemento y las restricciones.....	28
Tabla 9. Caudales en los puntos de control del modelo sin filtro	29
Tabla 10. Caudales modificando las restricciones.	32
Tabla 11. Caudales en los puntos de control del modelo con filtro	32
Tabla 12. Esfuerzos verticales y horizontales en los puntos de control con esquina rectas.....	36
Tabla 13. Desplazamientos verticales y horizontales en los puntos de control con esquina rectas.	36
Tabla 14. Esfuerzos verticales y horizontales en los puntos de control en esquina curva de 1 cm.	37
Tabla 15. Desplazamientos verticales y horizontales en los puntos de control en esquina curva de 1 cm.....	38
Tabla 16. Esfuerzos verticales y horizontales en los puntos de control en esquina curva de 5 cm.	38
Tabla 17. Desplazamientos verticales y horizontales en los puntos de control en esquina curva de 5 cm.....	38
Tabla 18. Esfuerzos verticales y horizontales en los puntos de control en esquina curva de 10 cm	39
Tabla 19. Desplazamientos verticales y horizontales en los puntos de control en esquina curva de 10 cm.....	39
Tabla 20. Factores de seguridad estático obtenidos de RS2 y Slope/w.	41
Tabla 21. Factores de seguridad dinámico obtenidos de RS2 y Slope/w.	42
Tabla 22. Porcentaje de error de caudal entre RS2 y Seep/w del modelo sin filtro.	44
Tabla 23. Porcentaje de error de caudal entre RS2 y Seep/w del modelo con filtro.	45
Tabla 24. Esfuerzo vertical y horizontal obtenidos en RS2 y Plaxis.....	47
Tabla 25. Desplazamientos verticales y horizontales obtenidos en Rs2 y Plaxis. .	47

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexos A. Manual para modelación en RS2	54
Anexos B. Resultados de simulaciones	71

RESUMEN

TÍTULO

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MODELAMIENTO DE 3 CASOS PRÁCTICOS UTILIZANDO EL SOFTWARE ROCK AND SOIL 2 (RS2) *

AUTORES

LUIS FERNANDO ORTIZ JAIMES, RICARDO ALFONSO MONTAÑA CUBIDES**

PALABRAS CLAVE: RS2, Rocscience, talud, túnel, filtración de agua

DESCRIPCIÓN: En este proyecto de grado se presenta el modelamiento de tres casos que se pueden presentar en la práctica de la geotecnia: un talud en el que se determina el factor de seguridad mediante el método phi-c reducción, una presa de tierra para hallar sus caudales de infiltración y sus cabezas de presión en 3 puntos de control y un túnel en el cual se determinan esfuerzos principales y desplazamientos variando la geometría de las esquinas, esto haciendo uso del programa RS2 perteneciente a la compañía Rocscience, el cual se basa en el método de elementos finitos. Posteriormente se realizará una comparación de estos modelos con resultados obtenidos de Plaxis 2D, Slope/w y Seep/w, esto permite establecer lineamientos para realizar una optimización de los modelos y que no constituya un excesivo gasto computacional y sus resultados se acerquen a la realidad.

Esto se logra al realizar variaciones de características en el software RS2, como tipología de la malla, cantidad de nodos y elementos, ausencia o presencia de restricciones, además de unas variaciones específicas en cada modelo, lo cual conlleva a un refinamiento del proceso de cálculo.

*Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Hebenly Celis Leguizamo, ingeniera civil. MSc

ABSTRACT

TITLE

COMPARATIVE MODELING ANALYSIS OF 3 CASE STUDIES USING THE ROCK AND SOIL 2 SOFTWARE (RS2) *

AUTHOR

LUIS FERNANDO ORTIZ JAIMES, RICARDO ALFONSO MONTAÑA CUBIDES**

KEY WORDS: RS2, Rocscience, slope, tunnel, water filtration

DESCRIPCIÓN: This degree project presents the modeling of three cases that can be presented in the practice of geotechnical engineering: a slope in which the safety factor is determined by the phi-c reduction method, an earth dam to find its infiltration flows and pressure heads in 3 control points and a tunnel in which main stresses and displacements are determined by varying the geometry of the corners, this using the RS2 program belonging to the company Rocscience, which is based on the finite element method. Subsequently, a comparison of these models with results obtained from Plaxis 2D, Slope/w and Seep/w will be carried out. This allows establishing guidelines to carry out an optimization of the models so that they do not constitute an excessive computational expense and their results are close to reality.

This is achieved by making variations of characteristics in the RS2 software, such as type of mesh, number of nodes and elements, absence or presence of restrictions, in addition to some specific variations in each model, which leads to a refinement of the calculation process.

*Degree project

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Hebenly Celis Leguizamo, Civil Engineer. MSc

INTRODUCCION

Teniendo en cuenta que la geotecnia es una de las ramas más relevantes de la ingeniería civil y que dentro de esta, los resultados obtenidos de los análisis de simulaciones se encuentran sometidos a grados de incertidumbre significativos por la constitución y heterogeneidad de los materiales y modelos, pese a esto, se debe resaltar que “en las últimas décadas se han optimizado estos procesos de análisis y calculo recurriendo a métodos numéricos para modelar la incertidumbre dentro de un marco racional para diversos problemas en el campo de la geotecnia”. [1]

En este caso limitamos la problemática a tres ejercicios particulares y nos apoyamos en el software RS2 basado en el método de elementos finitos (FEM). El cual nos permite entre otras ventajas ajustar una malla que defina la forma geométrica del modelo. “Esta malla puede estar compuesta de un solo tipo de elemento o de una mezcla de elementos de diversas tipologías” [2], así bien, lograr obtener la combinación adecuada entre tipo de malla, geometría y cantidad de elementos, es un factor primordial a la hora de optimizar los procesos computacionales. Los resultados obtenidos por las condiciones recomendables de cálculo, se someten a verificación en otro software que no necesariamente utiliza el método de los elementos finitos (FEM), es decir, se pretende encontrar una hoja de ruta que ayude a estudiantes y profesionales a definir variables a la hora de modelar un problema de los anterior mencionados y optimiza aún más los procesos de cálculo.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar los resultados obtenidos del software Rocscience RS2, mediante el modelamiento de 3 casos prácticos realizando un análisis comparativo con otro software basado en elementos finitos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer el software Rocscience Rs2 con sus diferentes aplicaciones a la geotecnia.
- Modelar 3 casos prácticos que involucren flujo de agua, phi reducción y simulación de túneles, evaluando las diferentes variables del programa que pueden incidir en los resultados
- Realizar un análisis comparativo con los resultados de RS2 y otro software

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 ROCK AND SOIL (RS2)

RS2 (anteriormente RS^2 o Phase 2) es un poderoso programa de elementos finitos en 2D para aplicaciones de suelo y roca. RS2 se puede utilizar para una amplia gama de proyectos de ingeniería [3], análisis de estructuras geotécnicas para aplicaciones civiles y mineras, de propósito general para diseño de túneles y soportes, excavaciones subterráneas, excavaciones de superficie, estabilidad de taludes, terraplenes, análisis dinámico, cimientos, consolidación, filtración de agua subterránea, muros de contención y más. [4]

Una de las principales características de RS2 es el análisis de estabilidad de taludes con elementos finitos utilizando el método de reducción de la resistencia al corte. Esta opción está totalmente automatizada y se puede usar con varios criterios de falla, incluidos Mohr-Coulomb y Generalized Hoek-Brown. Los modelos de pendiente se pueden importar o exportar entre Slide2 y RS2, lo que permite una fácil comparación del equilibrio límite y los resultados de elementos finitos. [3]

2.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)

Para resolver los problemas de análisis de comportamiento lineal, estático y dinámico, de las estructuras continuas sometidas a acciones diversas con infinitos grados de libertad, es necesario estudiar un modelo matemático de estructura dividida (o discretizada) en partes pequeñas denominadas elementos finitos y conectadas entre sí, solamente, a través de los llamados puntos nodales (o nodos de borde del elemento finito) reproduciendo la estructura real lo más ajustadamente posible y pasando de una estructura de infinitos grados de libertad a una de un número finito. Con ello ya es posible abordar el estudio del comportamiento de tal estructura discretizada por los conocidos métodos matriciales y mediante el empleo de ordenador [5]

2.3 MÉTODO PHI-C REDUCCIÓN

El método de reducción de parámetros de la resistencia, o phi-c reducción, se basa en reducir los parámetros resistentes del material, durante sucesivos análisis de elementos finitos, hasta llegar a la rotura, caracterizada por la no convergencia del MEF. Fue utilizado por primera vez por Zienkiewicz et al. En 1975 [6].

Es un análisis de deformación no lineal fundamentado en el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, en el que se suponen esfuerzos cortantes elastoplásticos para los materiales del talud. Dichos esfuerzos cortantes se reducen gradualmente por un factor de reducción F, hasta que se presenta la falla:

$$\Sigma Msf = \frac{\tan\phi_{inicial}}{\tan\phi_{reducido}} = \frac{c_{inicial}}{c_{reducido}} \quad (1)$$

donde ΣMsf es el máximo valor para llegar a un equilibrio y es el equivalente al factor de seguridad mínimo calculado, $\phi_{inicial}$ y $c_{inicial}$ son los parámetros de resistencia al cortante iniciales y $\phi_{reducido}$ y $c_{reducido}$ son los parámetros de resistencia reducidos.[7]

2.4 CRITERIO DE ROTURA LINEAL DE MOHR-COULOMB

El criterio de rotura de Mohr-Coulomb, introducido por primera vez por Coulomb en el año 1773, inicialmente pensado para el estudio en suelos, es un criterio de rotura lineal. Aunque el comportamiento de la roca en un ensayo triaxial no concuerda con un modelo lineal, Mohr-Coulomb se sigue utilizando mucho por su sencillez y comodidad.

Generalmente para el caso del criterio de Mohr-Coulomb, se define el criterio de rotura en función de la tensión tangencial y la tensión normal en un plano. En este caso la superficie de fluencia es de la forma $\tau=f(\sigma)$. La expresión matemática de dicha ecuación es [8]:

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

donde:

- c es la cohesión.
- φ es el ángulo de fricción
- τ es la tensión tangencial que actúa en el plano de rotura
- σ es la tensión normal que actúa en el plano de rotura

2.5 CRITERIO DE ROTURA NO LINEAL DE HOEK&BROWN

El criterio de rotura de Hoek&Brown su versión original fue introducida en el 1980 (Hoek y Brown, 1980) desde entonces su uso se ha generalizado en el ámbito de la mecánica de rocas, traspasando los límites para los que fue propuesto (cálculo de la estabilidad en taludes y estados tensionales en el entorno de un túnel, para macizos rocosos duros). Debido a esto, y con el fin de mejorarlo, el criterio ha sufrido varias modificaciones, así como la introducción de nuevos parámetros para definir el estado del material, y nuevas propuestas para obtener la caracterización del macizo, la última en 2002 [8]

La formulación del criterio es:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (3)$$

Siendo σ'_1 y σ'_3 tensiones efectivas principales mayor y menor en el momento de la rotura, σ_{ci} resistencia a compresión simple de la roca matriz, y m_b , a , s son constantes que dependen de las propiedades del macizo rocoso.[9]

Hoek y Brown introdujeron su criterio de rotura en un intento de proporcionar los datos de partida para el análisis necesario en el diseño de excavaciones subterráneas en roca competente. 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 [10]

3 VARIABLES A MODIFICAR EN CADA UNO DE LOS MODELOS

3.1 VARIABLES GENERALES.

3.1.1 Tipo de malla. El software RS2 permite al usuario trabajar con 3 diferentes tipos de malla, esto con el fin de elegir la más apropiada y la que mejor se ajuste a su simulación, estos tipos de malla pueden ser, Graded (graduada) la cual es la más utilizada en la mayoría de los modelos, el programa sugiere usarla en excavaciones como lo son los túneles, también se encuentra la malla tipo Uniform (uniforme), la cual es la más apropiada para el estudio de taludes y flujo de agua, el tercer tipo de malla Radial, la cual se usa en algunas simulaciones especiales, ya que esta funciona para excavaciones circulares o elípticas, por que produce una malla en forma de circunferencia.[4]

3.1.2 Tipo de elemento. El programa permite elegir en 4 tipos de elementos finitos diferentes de comportamiento bien definido, que sustituyen un número infinito de variables desconocidas. Estos son:

- ❖ Triángulo de 3 nodos.
- ❖ Triángulo de 6 nodos.
- ❖ Cuadrilátero de 4 nodos.
- ❖ Cuadrilátero de 8 nodos.

Figura 1. Tipo de elementos en RS2



Fuente: Rocscience

El número de nodos es directamente proporcional al tamaño de la malla, debido a que, al aumentar los nodos, la malla se hace más fina, y esto genera que las matrices que resuelve el problema aumenten y el tiempo de solución sea mayor.

3.1.3 Número de elementos. Se permite elegir el número de elementos que desea trabajar, este número es un aproximado, ya que al realizar la discretización y generar la malla, está se acopla al número real de elementos que genera y es ligeramente diferente al ingresado.

Al igual que en los nodos, al aumentar la cantidad de elementos, la simulación entra en una fase de refinamiento, la división de la geometría en pequeños elementos, resuelve un problema complejo al subdividirlo en problemas más simples, situación que le permite a la computadora aumentar la eficiencia, dando lugar a un mayor tiempo de solución, la cual también dependen de las características de la máquina.

3.1.4 Restricciones. Debemos tener en cuenta que los modelos son bidimensionales, por tal motivo, estos usan restricciones a lo largo del eje X como el eje Y, y sus posibles combinaciones (solo restringido en eje X, solo restringido en eje Y, sin restricción y restringido en ambas direcciones).

Dependiendo de la ubicación de cada restricción, el software nos arrojará soluciones, que posteriormente, compararemos y analizaremos.

3.2 VARIABLES EN TALUD.

Para el modelo del talud, las variaciones a modificar en el software son la condición estática y pseudoestática, para obtener un factor de seguridad y una representación gráfica de la falla.

3.3 VARIABLES EN FLUJO DE AGUA.

Para el modelo de flujo de agua se realiza una simulación en la cual está presente un talud de presa de tierra estático con presencia y ausencia de filtro.

3.4 VARIABLES EN TÚNEL.

La variación en la simulación de túnel, es geometría de las esquinas para determinar diferencia de esfuerzos de acuerdo a la densificación de la malla.

4 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS MODELOS

4.1 MODELO DE TALUD

4.1.1 Características geotécnicas. Para el modelo del talud, se tomaron los valores de registro del estudio geotécnico presentados en el trabajo de grado [6], dicho estudio se realizó a un talud ubicado en el municipio de Ocaña del departamento de Norte de Santander, Colombia, por la empresa INGETER-INGENIERIA DEL TERRENO S.A.S, mediante ensayos SPT y su posterior análisis en laboratorio teniendo como resultado parámetros en la tabla 1;

Tabla 1. Parámetros geotécnicos del talud.

Parámetro	Unidades	Valor
Material	-	SM
Peso Unitario	KN/m ³	17
Módulo de Young	KPa	30640
Coef. Poisson	-	0,3
Criterio de falla	-	Mohr Coulomb
Angulo de fricción	°	33
Cohesión	KPa	15

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Características generales del modelo en RS2. Las características propias del modelamiento del talud en el programa RS2 se definen por automatización y por interacción del usuario, los criterios de solución y análisis vienen definidos, como lo es el tipo de solución (eliminación gaussiana) y el tipo de análisis (deformación plana). Los parámetros presentes en la siguiente tabla, corresponden a algunos valores modificables que inciden en la solución del modelo, compete al usuario según su conocimiento ingenieril, definir estos parámetros de acuerdo con el modelo que desarrolle, teniendo en cuenta que para nuestra simulación tomamos únicamente los valores de la tabla 2, dejando los demás en parámetros por defecto.

Tabla 2. Parámetros del modelo de talud en RS2.

Parámetro	Valor
Nombre	Modelo Talud
Unidades	Metrico-Kpa
N° Max de iteraciones	500
Tolerancia	0,001
Estimación inicial del FS	1
Tolerancia de FS	0,01
Tipo de malla	Uniforme
Tipo de material	Plástico
Criterio de Falla	Mohr Coulomb

Fuente: Elaboración propia.

4.2 MODELO FLUJO DE AGUA

4.2.1 Características geotécnicas. Para el modelo de flujo de agua se decide optar por representar una presa de tierra, a su lado izquierdo cuenta con una carga de agua de 12 metros, las características filtrantes para el cuerpo de tierra que se usaron para el desarrollo en el programa RS2 son la permeabilidad, la porosidad y la relación hidráulica, para determinar estos valores, decidimos tomar como referencia un suelo limoso, por tal motivo se indago en la literatura, y se encontraron los siguientes resultados:

La porosidad total para un limo según Sanders (1998), se estima en un rango de 34% a 50% como se observa en la figura 2 el valor elegido fue de un 50%, ya que es el máximo valor dentro del rango.

Figura 2. Valores estimados de porosidad (%).

	total	eficaz
Arcillas	40 a 60	0 a 5
Limos	35 a 50	3 a 19
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa o bien clasificada	21 a 50	22 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26
Shale intacta	1 a 10	0,5 a 5
Shale fraturada/alterada	30 a 50	
Arenisca	5 a 35	0,5 a 10
Calizas, dolomías NO carstificadas	0,1 a 25	0,1 a 5
Calizas, dolomías carstificadas	5 a 50	5 a 40
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	0,01 a 1	0,0005
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	1 a 10	0,00005 a 0,01

Fuente: Sanders (1998)

La conductividad hidráulica varía según las estimaciones de diferentes autores, en la figura 3 se encuentran valores que, para diferentes suelos sedimentarios, para nuestro modelo, se opta por una permeabilidad de limo, esta tiene valores entre 1×10^{-4} (m/día) a 1 (m/día), debido a que no existe unanimidad entre los autores, tomamos un valor intermedio, por esto, el dato elegido es de 1×10^{-2} (m/día) que es igual a 1×10^{-7} (m/seg).

Figura 3. Valores estimados de conductividad hidráulica (m/día).

		Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Sedimentos	Grava	25 a 2500	$100 \text{ a } 10^5$	$100 \text{ a } 10^6$	10 a 1000	
	Grava con arena					
	Arena gruesa	0,1 a 500	$0,01 \text{ a } 1000$	1 a 1000	1 a 100	1 a 100
	Arena media	0,1a 50				
	Arena fina	0,02a 20			0,01 a 1	0,01 a 1
	Arena arcillosa			0,01 a 100	0,001 a 0,1	
	Silt, loess	$10^{-4} \text{ a } 2$	$10^{-4} \text{ a } 1$	$10^{-4} \text{ a } 1$	0,001 a 0,1	$10^{-4} \text{ a } 1$
	Arcilla	$10^{-6} \text{ a } 4 \times 10^{-4}$	$10^{-7} \text{ a } 10^{-3}$		$10^{-6} \text{ a } 10^{-3}$	$10^{-6} \text{ a } 10^{-3}$
	Arcilla marina inalterada	$10^{-7} \text{ a } 2 \times 10^{-4}$		$10^{-11} \text{ a } 10^{-7}$		

Fuente: Sanders (1998)

En la tabla 3 se encuentra el resumen de los datos suministrados al programa. La relación hidráulica, se eligió por los autores del presente trabajo.

Tabla 3. Parámetros geotécnicos del modelo para flujo de agua.

Parámetro	Unidades	Valor
Material	-	Limo
Permeabilidad	m/s	$1,00 \times 10^{-7}$
Relación hidráulica	-	1,5
Porosidad	%	50

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Características generales del modelo en RS2. Para realizar un análisis de un modelo con infiltración de agua se deben realizar unos cambios debidamente necesarios para poder contar con una solución adecuada dentro del software, es por esto que en la tabla 4 se observan estas modificaciones, las cuales se deben de realizar según sea el caso y otras son estrictamente obligatorias. Un cambio

preciso es el método de análisis (Groundwater Analysis) la cual es Steady State, esto nos permite poder usar los comandos que posee el programa para una mejor interpretación, como el uso de una sección de descarga, con la cual podemos obtener los caudales de infiltración, dependiendo de su ubicación, o el uso de drenes, para observar su cambio en la línea piezométrica. Los cambios que dependen del caso es por ejemplo la cabeza de agua o las condiciones de borde, los cuales son cambios que dependen de la simulación, los demás parámetros como el peso unitario, o el módulo de Young, se pueden dejar por defecto, ya que el programa nos permite calcular únicamente el flujo de agua sin tener en cuenta el análisis de tensión por propiedades mecánicas del suelo.

Tabla 4. Parámetros del modelo en RS2.

Parámetro	Valor
Nombre	Modelo infiltración
Unidades	Metrico-Kpa
Nº Max de iteraciones	500
Tolerancia	0,001
Método de análisis	Steady State
Cabeza de agua	12 m
Condiciones de borde	Q=0; P=0
Tipo de malla	Uniforme
Comportamiento del material	Dreined

Fuente: Elaboración propia

4.3 MODELO DE TÚNEL

4.3.1 Características geotécnicas. Los parámetros que se usaron para el modelo de túnel, fueron obtenidos del proyecto de grado [11] y están plasmados en la tabla 5, estos parámetros del macizo rocoso son determinados a partir de ensayos como compresión, tracción, ensayos de ultrasonidos, entre otros, con el ánimo de obtener los valores más reales posibles. Los datos como GSI y m_i , se determinan para arenisca y un factor “D” que depende del grado de alteración del macizo. Para determinar los valores de m_b (valor reducido de la constante m_i), a y s que son unas constantes del macizo rocoso, son valores que se originan a partir de software (rocdata), para esto se agregan unos valores de entrada que son GSI, m_i y D.

Tabla 5. Parámetros geotécnicos del túnel.

Parámetro	Unidades	Valor
Material	-	Roca
Peso Unitario	MN/m ³	0,024
Módulo de Young	Mpa	33022,4
Coef. Poisson	-	0,3
Criterio de falla	-	Generalized Hoek-Brown
Tipo de material	-	Elástico
GSI	-	72
Fuerza de compresión	Mpa	86,62
mi	-	17
D	-	0
mb	-	6,25
s	-	0,0446
a	-	0,5
Esfuerzo de campo	-	Gravitacional
Ko	-	0,5

Fuente: Elaboración propia

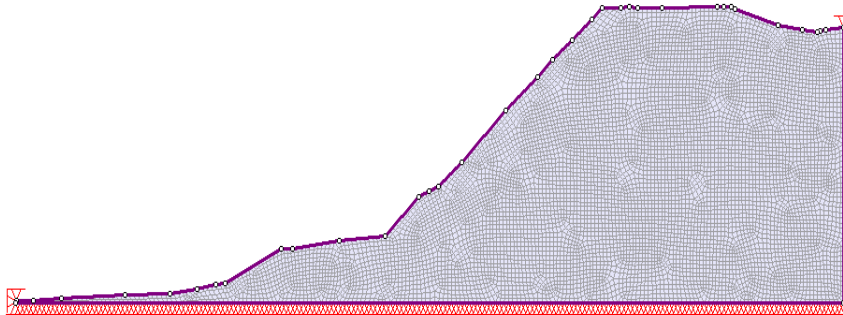
Los valores de mb, s y a, fueron corroborados al momento de realizar el modelo en el software RS2, el cual nos permite ingresar estos valores manualmente o también nos ayuda a determinarlos con los otros parámetros GSI, mi y D, ya mencionados.

5 ANÁLISIS DE LOS MODELOS EN RS2

5.1 ANÁLISIS DEL TALUD EN CONDICIÓN ESTÁTICA

Se plantea un modelo de talud con las características tanto geotécnicas como las de RS2 evidenciadas en la tabla 1 y 2

Figura 4. Modelo del talud en el software RS2



Fuente: Elaboración propia

5.1.1 Variación de la cantidad y tipo de elementos. Siguiendo las recomendaciones que nos ofrece el programa para este tipo de simulaciones, se decide trabajar con el tipo de malla Uniforme, comenzando con un valor de 1000 elementos aumentados en 1000 hasta los 8000, variando además el tipo de elementos 3 y 6 nodos Triangulares y 4 y 8 nodos cuadriláteros, como se evidencia en la tabla 6, donde además se observan los valores obtenidos de factor de seguridad con cada una de las combinaciones de variables.

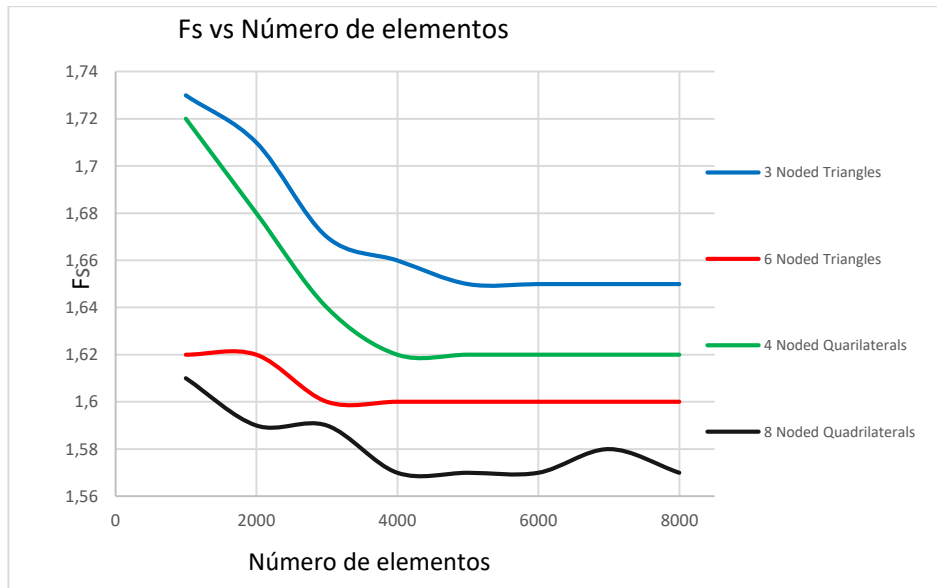
Tabla 6. Factores de seguridad, obtenidos variando tipo y número de elementos.

NUMERO DE ELEMENTOS	MESH TYPE	UNIFORM	
	ELEMENT TYPE	3 Noded Triangles	6 Noded Triangles
	1000	1,73	1,62
	2000	1,71	1,62
	3000	1,67	1,6
	4000	1,66	1,6
	5000	1,65	1,6
	6000	1,65	1,6
	7000	1,65	1,6
	8000	1,65	1,6
	MESH TYPE	UNIFORM	
	ELEMENT TYPE	4 Noded Quadrilaterals	8 Noded Quadrilaterals
	1000	1,72	1,61
	2000	1,68	1,59
	3000	1,64	1,59
	4000	1,62	1,57
	5000	1,62	1,57
	6000	1,62	1,57
	7000	1,62	1,58
8000	1,62	1,57	

Fuente: Elaboración propia

En base a la tabla 6, se obtiene un gráfico (figura 5), donde evidenciamos la estabilización de los valores de factor de seguridad, a partir de un determinado número de elementos, dependiendo de la cantidad de nodos.

Figura 5. Factor de seguridad variando el número de elementos para cada tipo.



Fuente: Elaboración propia.

Para nuestro caso comprobamos que, a partir de 5000 elementos, independientemente del tipo de este, los valores de factor de seguridad, se mantenían constantes, por tanto, tomamos este número de elementos, como el estandarizado para trabajar las diferentes variaciones que se harán de ahora en adelante para el modelo de taludes tanto estático como dinámico.

5.1.2 Variación de las restricciones y tipos de elementos. Teniendo definido un número de elementos, la siguiente variación será prescindir o disponer de las restricciones en los ejes bidimensionales X y, los valores obtenidos de factor de seguridad, los encontramos en la tabla 7.

Tabla 7. Factores de seguridad en condición estática con 5000 elementos, obtenidos variando tipo de elemento y las restricciones.

	3 Noded Triangles	6 Noded Triangles
RESTRICCIÓN X.Y	1,65	1,6
RESTRICCIÓN X	NO converge	NO converge
RESTRICCIÓN Y	0,46	0,43
SIN RESTRICCIÓN	NO converge	NO converge
	4 Noded Quadrilaterals	8 Noded Quadrilaterals
RESTRICCIÓN X.Y	1,62	1,57
RESTRICCIÓN X	NO converge	NO converge
RESTRICCIÓN Y	0,47	0,35
SIN RESTRICCIÓN	NO converge	NO converge

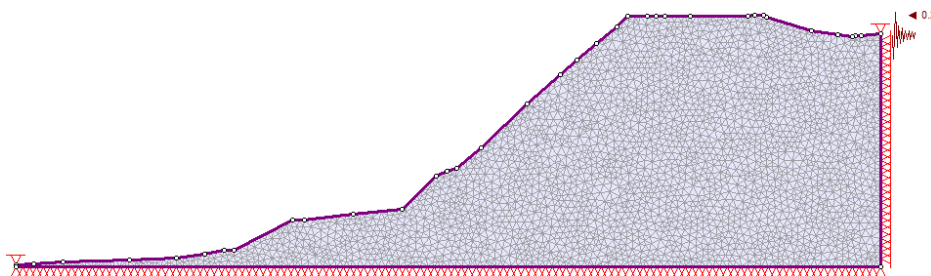
Fuente: Elaboración propia

Cabe anotar que la no convergencia, corresponde a una inestabilidad del modelo matemático, que interpreta la falta de restricción, como una posibilidad de desplazamiento tendiente al infinito, siempre y cuando exista una fuerza en la misma dirección que lo provoque.

5.2 ANÁLISIS DEL TALUD EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA.

Se plantea un modelo de talud con las características tanto geotécnicas como las de RS2 evidenciadas en la tabla 1 y 2 con una variación de su condición estática, al incluir una fuerza horizontal que simula la existencia de un sismo cuyo valor es de 0,2g.

Figura 6. Modelo de talud con su coeficiente pseudoestático en RS2



Fuente: Elaboración propia

5.2.1 Variación de las restricciones y tipos de elementos. Los valores obtenidos del factor de seguridad al variar las restricciones tanto en eje X como en eje Y, además de los diferentes tipos de elementos, son los evidenciados en la tabla 8:

Tabla 8. Factores de seguridad en condición pseudoestática con 5000 elementos, obtenidos variando tipo de elemento y las restricciones.

	3 Noded Triangles	6 Noded Triangles
RESTRICCIÓN X.Y	1,21	1,15
RESTRICCIÓN X	NO converge	NO converge
RESTRICCIÓN Y	NO converge	NO converge
SIN RESTRICCIÓN	NO converge	NO converge
	4 Noded Quadrilaterals	8 Noded Quadrilaterals
RESTRICCIÓN X.Y	1,17	1,09
RESTRICCIÓN X	NO converge	NO converge
RESTRICCIÓN Y	NO converge	NO converge
SIN RESTRICCIÓN	NO converge	NO converge

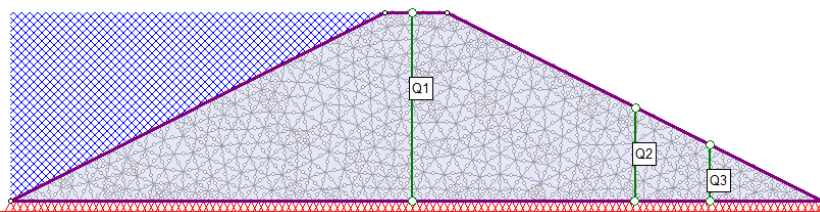
Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el análisis estático, no existe una convergencia al limitar las restricciones en el eje X, adicional a esto existe una fuerza representada por el sismo la cual induce a la no convergencia en el eje Y.

5.3 ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE FLUJO DE AGUA

Dentro del análisis de flujo de agua, realizamos el siguiente modelo, el cual posee las características de la tabla 3 y 4, con puntos de control de caudal de infiltración para 3 sectores diferentes.

Figura 7. Modelo del talud para la simulación de flujo de agua



Fuente: Elaboración propia.

5.3.1 Variación de la cantidad y tipo de elementos. En la tabla 9 evidenciamos los caudales obtenidos en un modelo de presa de tierra teniendo en cuenta que se hacen variaciones de la cantidad y tipo de elementos para los 3 caudales de control.

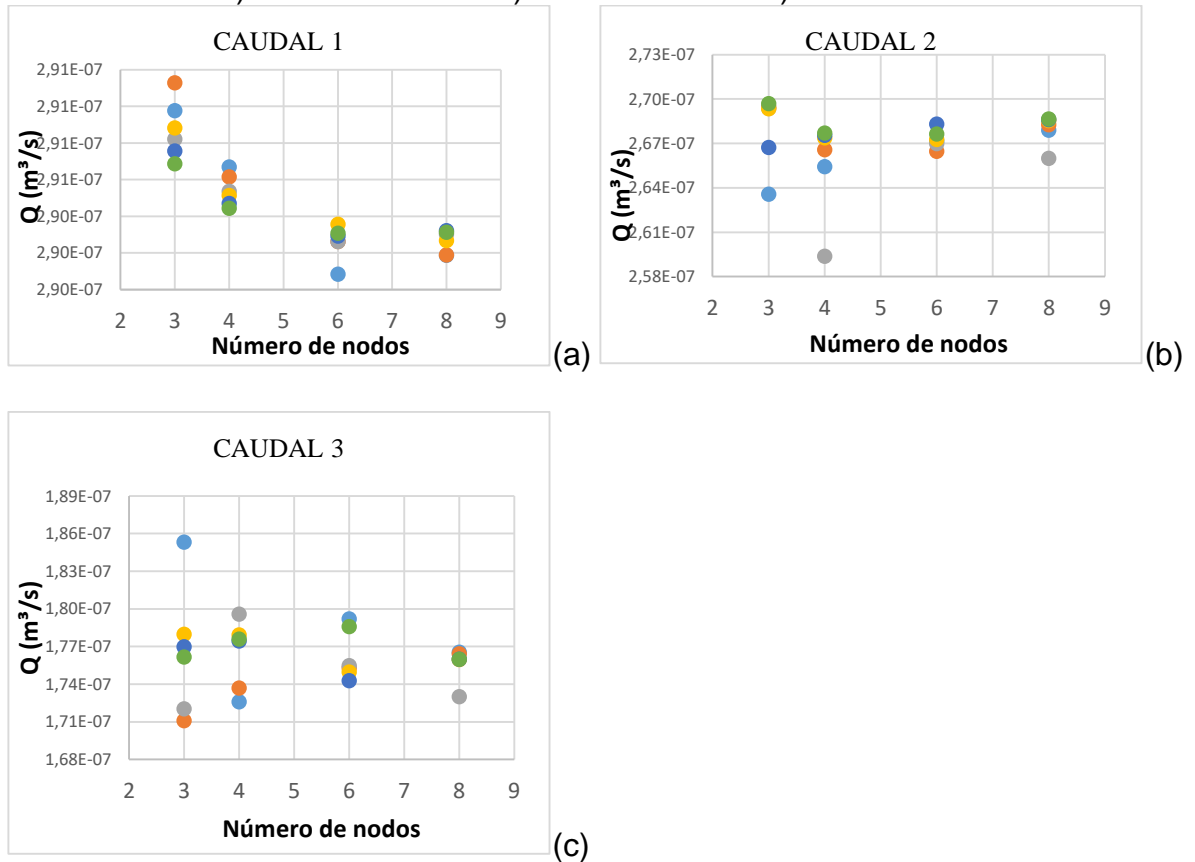
Tabla 9. Caudales en los puntos de control del modelo sin filtro

CAUDALES SIN FILTRO [m³/s]						
ELEMENT TYPE	1000			2000		
	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
3 Noded Triangles	2,91E-07	2,64E-07	1,85E-07	2,91E-07	2,69E-07	1,71E-07
6 Noded Triangles	2,90E-07	2,67E-07	1,79E-07	2,90E-07	2,66E-07	1,75E-07
4 Noded Quadrilaterals	2,91E-07	2,65E-07	1,73E-07	2,91E-07	2,67E-07	1,74E-07
8 Noded Quadrilaterals	2,90E-07	2,68E-07	1,77E-07	2,90E-07	2,68E-07	1,76E-07
ELEMENT TYPE	3000			4000		
	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
3 Noded Triangles	2,91E-07	2,69E-07	1,72E-07	2,91E-07	2,69E-07	1,78E-07
6 Noded Triangles	2,90E-07	2,67E-07	1,75E-07	2,90E-07	2,67E-07	1,75E-07
4 Noded Quadrilaterals	2,91E-07	2,59E-07	1,80E-07	2,91E-07	2,67E-07	1,78E-07
8 Noded Quadrilaterals	2,90E-07	2,66E-07	1,73E-07	2,90E-07	2,69E-07	1,76E-07
ELEMENT TYPE	5000			6000		
	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
3 Noded Triangles	2,91E-07	2,67E-07	1,77E-07	2,91E-07	2,70E-07	1,76E-07
6 Noded Triangles	2,90E-07	2,68E-07	1,74E-07	2,90E-07	2,68E-07	1,79E-07
4 Noded Quadrilaterals	2,90E-07	2,68E-07	1,77E-07	2,90E-07	2,68E-07	1,78E-07
8 Noded Quadrilaterals	2,90E-07	2,69E-07	1,76E-07	2,90E-07	2,69E-07	1,76E-07

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente con los datos obtenidos en la simulación, realizamos unas graficas de dispersión para definir qué tipo de elemento tiene mayor estabilidad en sus resultados de caudal y seguido a esto establecer ese tipo de elemento como el más preciso y el que se usara en las comparaciones futuras.

Figura 8. Graficas de dispersión de cada punto de control según el tipo y cantidad de elementos. a) Datos caudal 1. b) Datos caudal 2. c) Datos caudal 3



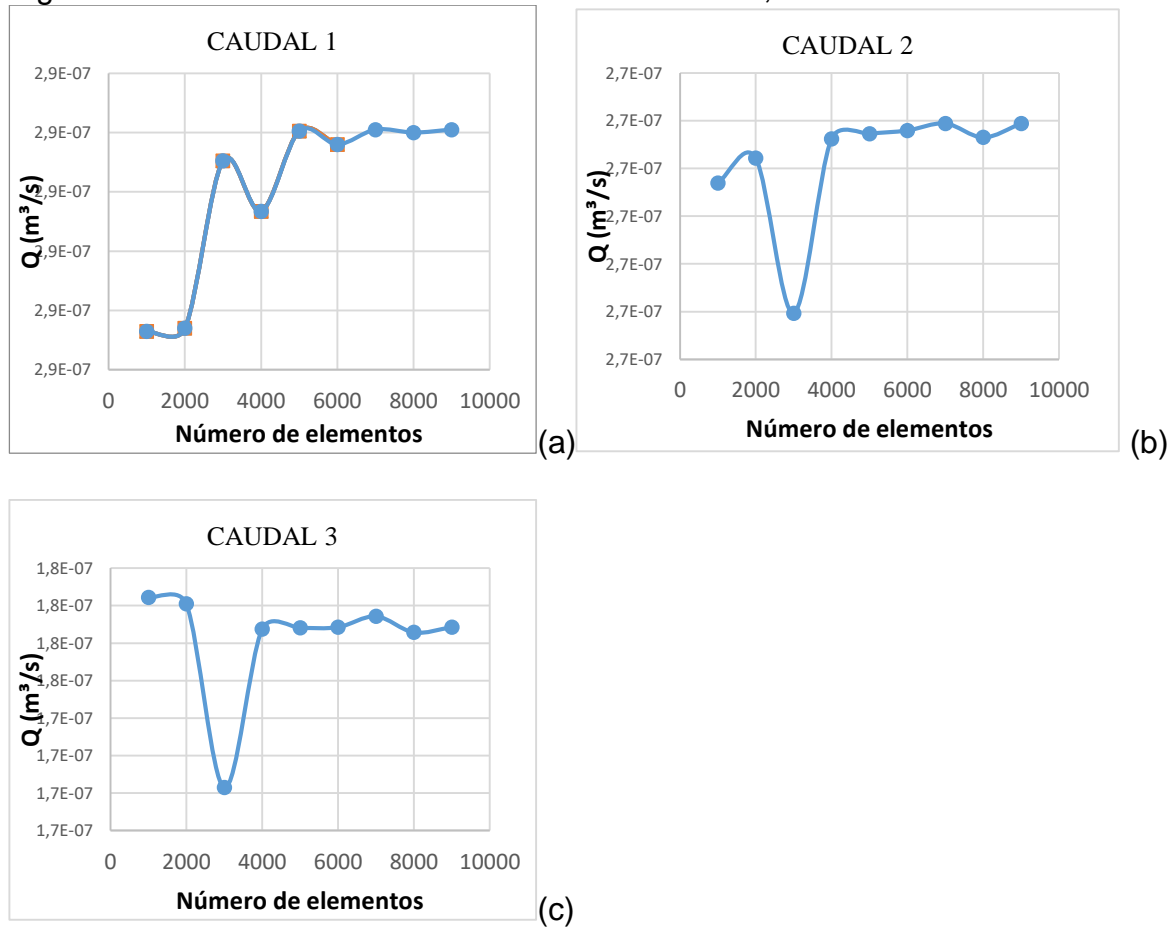
Fuente: Elaboración propia.

En este sentido y con base en las gráficas de la figura 8, limitamos el tipo de elemento, para el caudal 1 observamos una menor dispersión en los resultados del elemento tipo cuadrilátero de 8 nodos, para el caudal 2 esta menor dispersión se presentó en el elemento tipo triangular de 6 nodos y para el caudal 3 el elemento más preciso es el de 8 nodos cuadrilátero, por tal motivo definimos como parámetro general para toda la simulación el tipo de elemento 8 nodos cuadrilátero que, aunque no es el tipo de elemento que presenta menor dispersión en el caudal 2, si son muy preciso sus valores en este punto de control.

En las gráficas siguientes (figura 9) podemos observar como a partir 5000 elementos y 8 nodos cuadriláteros, los valores de caudal se comportan de una

manera muy similar, permitiéndonos deducir esta cantidad de elementos como el punto donde los caudales se empiezan a estabilizar.

Figura 9. Caudales variando el número de elementos, con 8 nodos cuadriláteros.



Fuente: Elaboración propia.

Para la comparación del modelo en RS2 con SEEP/W, se estableció una cantidad de elementos de 5000 y tipo de elemento de 8 nodos cuadrilátero.

5.3.2 Variación de las restricciones. En esta simulación, limitamos las restricciones en los ejes X y el eje Y, para obtener los caudales respectivos, utilizando 5000 elementos y variando el tipo de elemento, además obtuvimos la condición de no convergencia cuando retiramos la restricción en Y, y cuando dejamos el modelo sin ninguna restricción, como se observa en la tabla 10.

Tabla 10. Caudales modificando las restricciones.

CAUDALES [m³/s] SIN FILTRO CON 5000 ELEMENTOS												
ELEMENT TYPE	Restricción de elementos x,y			Restricción de			Restricción de elementos y			Sin restricción		
	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
3 Noded	2,9E-7	2,6E-7	1,7E-7	No	No	No	2,9E-7	2,7E-7	1,8E-7	No	No	No
6 Noded	2,9E-7	2,6E-7	1,7E-7	No	No	No	2,9E-7	2,7E-7	1,7E-7	No	No	No
4 Noded	2,9E-7	2,6E-7	1,7E-7	No	No	No	2,9E-7	2,7E-7	1,8E-7	No	No	No
8 Noded	2,9E-7	2,7E-7	1,7E-7	No	No	No	2,9E-7	2,7E-7	1,8E-7	No	No	No

Fuente: Elaboración propia

5.4 ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE FLUJO DE AGUA CON FILTRO

5.4.1 Variación de la cantidad y tipo de elementos. En la tabla 11 evidenciamos los caudales obtenidos en un modelo de presa de tierra que incluye un filtro, teniendo en cuenta que se hacen variaciones de la cantidad y tipo de elementos para los 3 caudales de control.

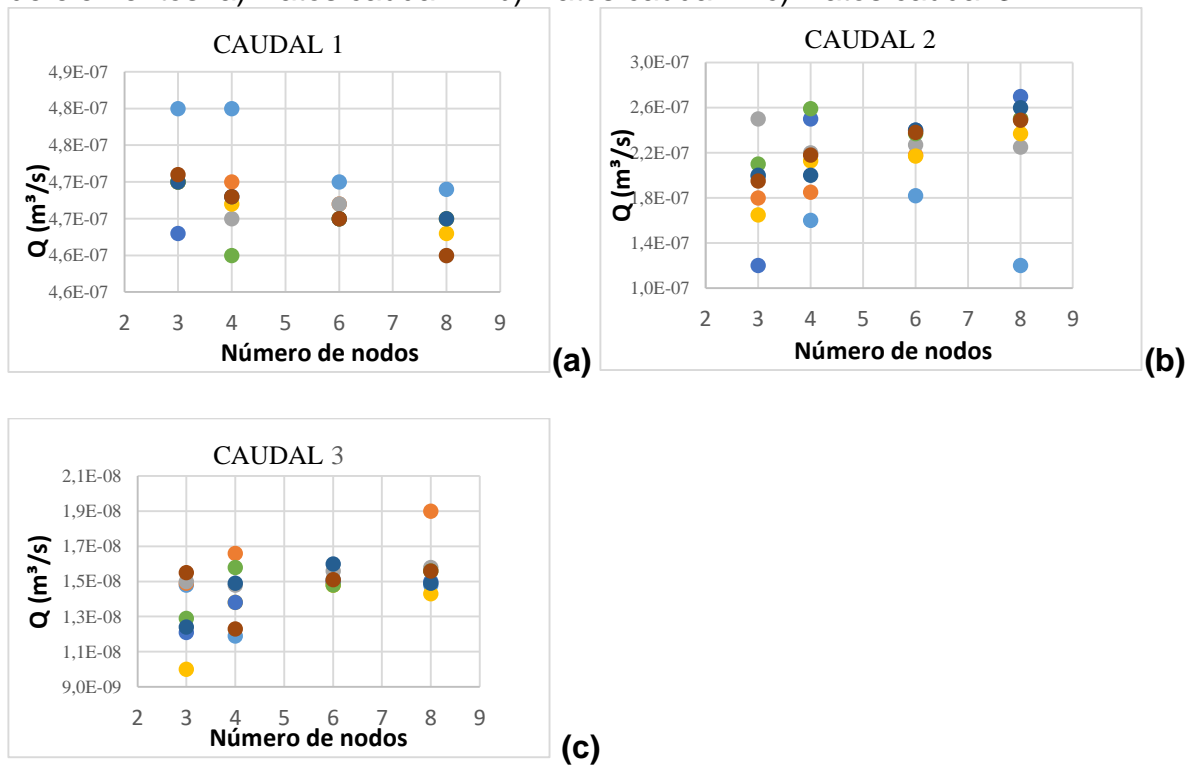
Tabla 11. Caudales en los puntos de control del modelo con filtro

CAUDALES SIN FILTRO [m³/s]						
ELEMENT TYPE	1000			2000		
	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
3 Noded Triangles	4,80E-07	1,99E-07	1,48E-08	4,70E-07	1,80E-07	1,49E-08
6 Noded Triangles	4,70E-07	1,82E-07	1,51E-08	4,67E-07	2,18E-07	1,50E-08
4 Noded Quadrilaterals	4,80E-07	1,60E-07	1,19E-08	4,70E-07	1,85E-07	1,66E-08
8 Noded Quadrilaterals	4,69E-07	1,20E-07	1,48E-08	4,65E-07	2,50E-07	1,90E-08
ELEMENT TYPE	3000			4000		
	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
3 Noded Triangles	4,70E-07	2,50E-07	1,50E-08	4,78E-07	1,65E-07	1,00E-08
6 Noded Triangles	4,67E-07	2,27E-07	1,56E-08	4,67E-07	2,17E-07	1,48E-08
4 Noded Quadrilaterals	4,65E-07	2,20E-07	1,48E-08	4,68E-07	2,13E-07	1,38E-08
8 Noded Quadrilaterals	4,60E-07	2,25E-07	1,58E-08	4,60E-07	2,37E-07	1,43E-08
ELEMENT TYPE	5000			6000		
	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
3 Noded Triangles	4,70E-07	1,20E-07	1,21E-08	4,70E-07	2,10E-07	1,29E-08
6 Noded Triangles	4,65E-07	2,40E-07	1,50E-08	4,65E-07	2,37E-07	1,48E-08
4 Noded Quadrilaterals	4,67E-07	2,50E-07	1,38E-08	4,60E-07	2,59E-07	1,58E-08
8 Noded Quadrilaterals	4,63E-07	2,70E-07	1,50E-08	4,65E-07	2,50E-07	1,56E-08

Fuente: Elaboración propia

Para el modelo de la presa de tierra se evidencia según la siguientes graficas (figura 10) que el tipo de elemento triangular de 6 nodos es el que presenta menor dispersión en cada uno de los puntos de control, posteriormente, tomaremos este elemento, con el que se obtiene los resultados más precisos y analizaremos la cantidad mínima de elementos necesarios para obtener un resultado donde se presente una estabilidad en los caudales.

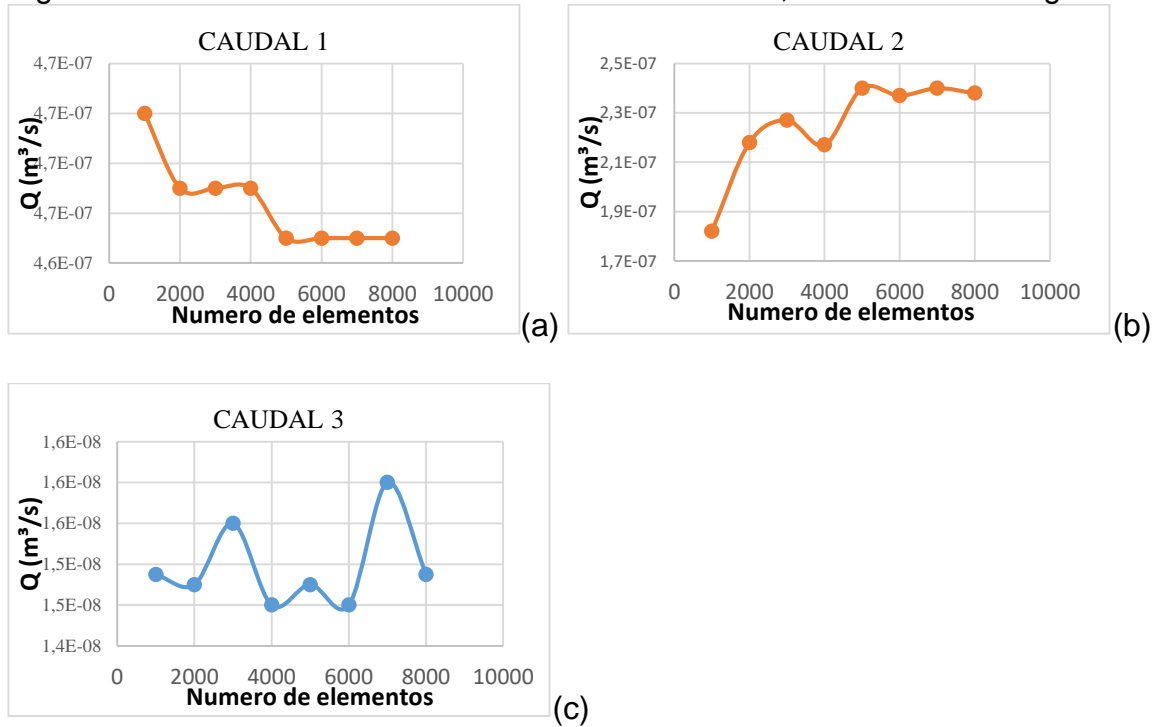
Figura 10. Graficas de dispersión de cada punto de control según el tipo y cantidad de elementos. a) Datos caudal 1. b) Datos caudal 2. c) Datos caudal 3.



Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia según las gráficas en la figura 11 a) y b) que para los puntos de control de caudales 1 y 2, se obtiene una estabilidad en los resultados a partir de 5000 elementos, mientras que para el punto de control de caudal 3 en la figura 11 c), no se evidencia una convergencia en cada uno de los resultados, aunque los valores no distan mucho unos de los otros, el grafico nos muestra unas diferencias, que en orden de magnitud equivaldrían a $1 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$, siendo esta la máxima discrepancia.

Figura 11. Caudales variando el número de elementos, con 6 nodos triangular.



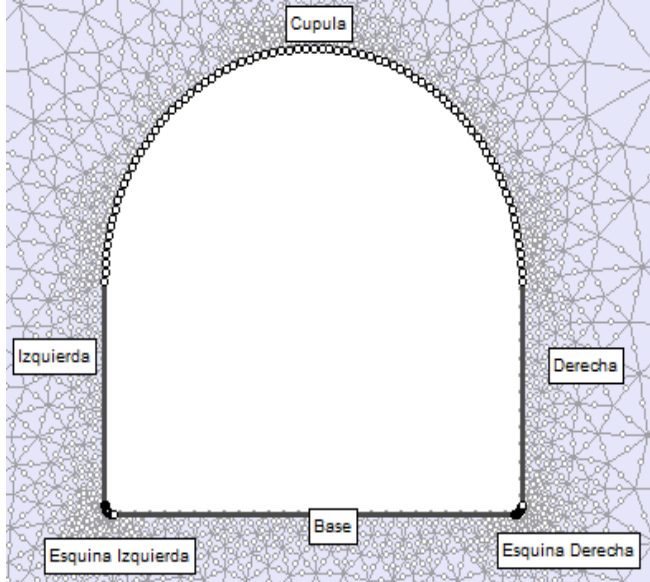
Fuente: Elaboración propia.

Después de realizar el análisis, establecemos como criterios de simulación para una presa de tierra con filtro, el tipo de elemento de 6 nodos triangular y cantidad mínima de elementos 5000.

5.5 ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE UN TÚNEL

Para el análisis del túnel, se estableció una nomenclatura de los puntos de control correspondientes a la figura 12, el cual incluye las características evidenciadas en la tabla 5

Figura 12. Modelo de túnel, con sus puntos de control.



Fuente: Elaboración propia.

5.5.1 Variación de la cantidad de elementos. En la tabla 12 evidenciamos los valores de esfuerzos tanto horizontales como verticales además en la tabla 13 se agregan los valores de desplazamientos en puntos de control de una excavación teniendo en cuenta que el contorno del modelo ha sido realizado como una figura en forma de bóveda con las esquinas inferiores formando ángulos de 90° , igualmente se realizó variación en la cantidad de elementos desde 25 hasta 1000 para establecer un grado de convergencia, el tipo de malla tomado fue graduada de 6 nodos, debido a recomendaciones del software para este tipo de problemas de excavaciones. [4]

Tabla 12. Esfuerzos verticales y horizontales en los puntos de control con esquina rectas.

Elementos	Esfuerzos Verticales En (MPa)			Esfuerzos Horizontales (MPa)		
	Esquina	Esquina	Cúpula	Esquina	Esquina	Cúpula
25	0,66	0,66	0,124	0,2	0,18	0
50	0,746	0,788	0,116	0,22	0,25	0
100	0,98	0,98	0,14	0,3	0,3	0,01
200	1,61	1,61	0,08	0,54	0,54	0,04
400	1,88	2,1	0,12	0,665	0,71	0,01
600	2,18	2,3	0,14	0,744	0,79	0,008
800	2,465	2,465	0,17	0,83	0,83	0,023
1000	3,7	3,51	0,09	1,215	1,215	0,025

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Desplazamientos verticales y horizontales en los puntos de control con esquina rectas.

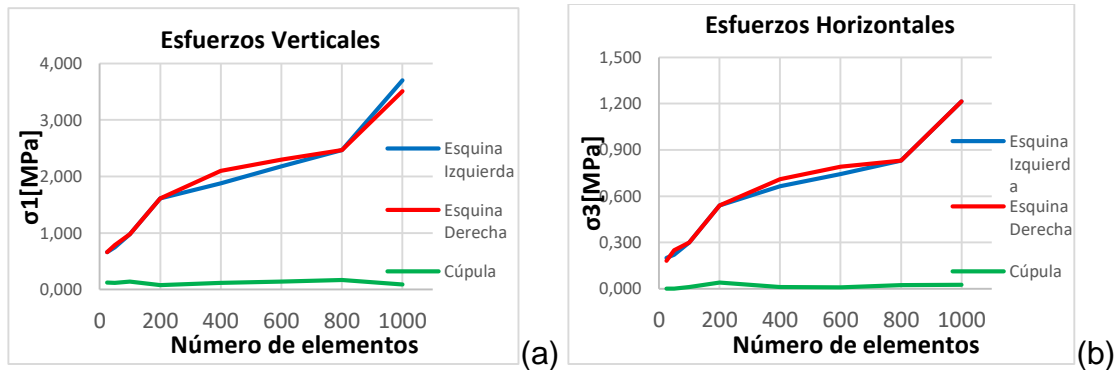
Elementos	Desplazamiento vertical (m)		Desplazamiento horizontal (m)	
	Cúpula	Base	Izquierda	Derecha
25	1,0,E-05	1,7,E-05	5,3,E-06	5,3,E-06
50	1,0,E-05	1,8,E-05	5,3,E-06	5,3,E-06
100	1,0,E-05	1,8,E-05	5,4,E-06	5,4,E-06
200	1,0,E-05	1,8,E-05	5,4,E-06	5,4,E-06
400	1,0,E-05	1,8,E-05	5,4,E-06	5,4,E-06
600	1,0,E-05	1,8,E-05	5,4,E-06	5,4,E-06
800	1,0,E-05	1,8,E-05	5,4,E-06	5,4,E-06
1000	1,0,E-05	1,8,E-05	5,4,E-06	5,4,E-06

Fuente: Elaboración propia

Podemos observar según las gráficas de la figura 13, un comportamiento ascendente en los valores de esfuerzos a medida que aumentamos la densidad de la malla, este comportamiento mantiene su tendencia debido a un fenómeno dentro del método de elementos finitos, conocido como la singularidad de esfuerzos [12]. Las singularidades son regiones críticas y, en análisis de tensiones, están ligadas a vértices que penetran en el dominio, cambios bruscos en las propiedades del material, en las condiciones de contorno o en las cargas aplicadas [13]. En este caso la excavación de un túnel al simular las esquinas en ángulos rectos y que

exista un vértice hace que el esfuerzo soportado por el modelo tienda a infinito conforme se aumenta la densidad de la malla.

Figura 13. Esfuerzo vertical (a) y esfuerzo horizontal (b) variando el número de elementos.



Fuente: Elaboración propia.

Para solucionar este problema, perfilamos las esquinas con una curva de diferentes radios que se acerca más a la realidad de un modelo de excavación pues será casi imposible lograr reducir las esquinas inferiores a un Angulo de 90°, lo correcto y acorde a las condiciones reales del problema sería perfilar dichas esquinas de tal manera que sean imperceptibles a la vista, que no se genere dificultad a la hora de la realización de la simulación y también donde los esfuerzos presenten la mayor estabilidad y grado de convergencia, la estabilidad en los valores de esfuerzos horizontales y verticales se evidencian en las siguientes tablas:

Tabla 14. Esfuerzos verticales y horizontales en los puntos de control en esquina curva de 1 cm.

Elementos	Esfuerzo Vertical En (MPa)			Esfuerzo Horizontal (MPa)		
	Esquina Izquierda	Esquina Derecha	Cúpula	Esquina Izquierda	Esquina Derecha	Cúpula
25	3,69	3,9	0,12	0,985	0,87	0,05
50	3,7	3,5	0,1	0,54	0,55	0,01
100	3,32	3,32	0,08	0,158	0,287	0,014
200	3,51	3,51	0,09	0,172	0,172	0,006
400	3,415	3,415	0,085	0,083	0,083	0,005
600	3,51	3,51	0,09	0,014	0,014	0,014
800	3,51	3,51	0,09	0,006	0,006	0,006
1000	3,415	3,415	0,085	0,008	0,008	0,008

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Desplazamientos verticales y horizontales en los puntos de control en esquina curva de 1 cm

Elementos	Desplazamiento vertical (m)		Desplazamiento horizontal (m)	
	Cúpula	Base	Izquierda	Derecha
25	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
50	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
100	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
200	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
400	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
600	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
800	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
1000	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Esfuerzos verticales y horizontales en los puntos de control en esquina curva de 5 cm.

Elementos	Esfuerzo Vertical En (MPa)			Esfuerzo Horizontal (MPa)		
	Esquina Izquierda	Esquina Derecha	Cúpula	Esquina Izquierda	Esquina Derecha	Cúpula
25	1,9	1,8	0,1	0,305	0,305	0,005
50	1,8	1,8	0,09	0,28	0,28	0,008
100	1,8	1,705	0,09	0,273	0,273	0,005
200	1,705	1,8	0,09	0,293	0,293	0,004
400	1,705	1,705	0,09	0,283	0,283	0,003
600	1,705	1,705	0,09	0,283	0,283	0,003
800	1,705	1,705	0,09	0,283	0,283	0,003
1000	1,705	1,705	0,09	0,283	0,283	0,003

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Desplazamientos verticales y horizontales en los puntos de control en esquina curva de 5 cm.

Elementos	Desplazamiento vertical (m)		Desplazamiento horizontal (m)	
	Cúpula	Base	Izquierda	Derecha
25	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-05
50	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-05
100	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-05
200	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-05
400	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
600	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
800	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
1000	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Esfuerzos verticales y horizontales en los puntos de control en esquina curva de 10 cm

Elementos	Esfuerzo Vertical En (MPa)			Esfuerzo Horizontal (MPa)		
	Esquina Izquierda	Esquina Derecha	Cúpula	Esquina Izquierda	Esquina Derecha	Cúpula
25	1,325	1,325	0,125	0,215	0,215	0,005
50	1,325	1,325	0,125	0,215	0,215	0,005
100	1,25	1,325	0,125	0,22	0,22	0,005
200	1,3	1,3	0,11	0,208	0,208	0,005
400	1,3	1,3	0,11	0,208	0,208	0,005
600	1,3	1,3	0,11	0,208	0,208	0,005
800	1,3	1,3	0,11	0,208	0,208	0,005
1000	1,3	1,3	0,11	0,208	0,208	0,005

Fuente: Elaboración propia.

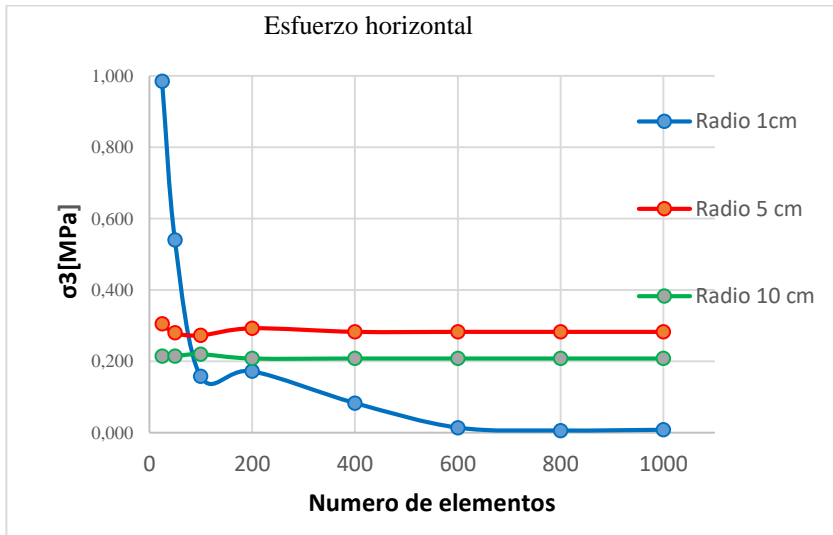
Tabla 19. Desplazamientos verticales y horizontales en los puntos de control en esquina curva de 10 cm

Elementos	Desplazamiento vertical (m)		Desplazamiento horizontal (m)	
	Cúpula	Base	Izquierda	Derecha
25	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
50	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
100	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
200	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
400	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
600	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
800	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06
1000	1,E-05	2,E-5	5,E-06	5,E-06

Fuente: Elaboración propia.

Los desplazamientos se conservan independientemente del cambio de los radios y tipos de elementos, incluidas las variaciones de perfilamiento en las esquinas, pero de acuerdo a los resultados de esfuerzos y a su comparación establecemos un modelo de control y comparación el cual presenta un radio de 10 cm en las esquinas, como se evidencia en la figura 14, pues su convergencia se presenta a menor cantidad de elementos y se mantiene dicho resultado estable con la variación de estos.

Figura 14. Comparación de esfuerzos horizontales en cada esquina perfilada variando el número de elementos.



Fuente: Elaboración propia.

6 COMPARACIÓN

A continuación, se realizará la comparación de los resultados del programa RS2 en cada uno de los modelos anteriormente expuestos, con otro software, los cuales fueron seleccionados a medida que se realizaban las simulaciones.

6.1 TALUD

6.1.1 Factor de seguridad en condición pseudoestática y estática. El modelo realizando en software RS2, se ejecutó con las variables establecidas con anterioridad, los resultados de esta simulación se obtienen a partir del método denominado reducción de resistencia al corte (PHI-C REDUCTION), en el cual según (Duncan, 1996) se suponen esfuerzos cortantes que se reducen gradualmente por un factor de reducción F, hasta que se presenta la falla, este factor de reducción es equivalente al factor de seguridad [7] el cual es comparado con los valores del software Slope/W.

Dentro de los métodos de análisis utilizados para esta investigación en el cálculo del factor de seguridad, con el software Slope/W y teniendo en cuenta que cada una de las metodologías se basan en la formulación de equilibrio limite, mencionamos los siguientes: método simplificado de Bishop, método Ordinario, método de Morgenstern – Price, método riguroso de Janbú y método de Spencer. [14]

A continuación, se presentan las tablas comparativas de las simulaciones tanto estáticas (tabla 20) como pseudoestáticas (tabla 21) de los dos softwares.

Tabla 20. Factores de seguridad estático obtenidos de RS2 y Slope/w.

ANÁLISIS ESTÁTICO			
RS2		Slope/W	
ELEMENT TYPE	FS	MÉTODO	FS
3 Noded Triangles	1,65	Bishop	1,63
6 Noded Triangles	1,60	Ordinario	1,56
4 Noded Quadrilaterals	1,62	Morgenstern	1,62
8 Noded Quadrilaterals	1,57	Janbú	1,53
		Spencer	1,62

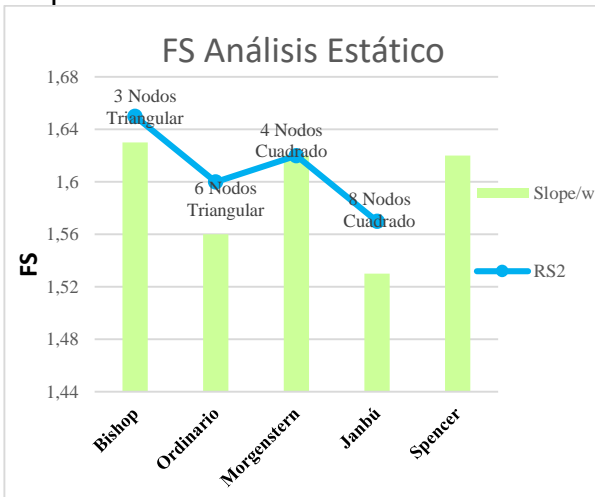
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Factores de seguridad dinámico obtenidos de RS2 y Slope/w.

ANÁLISIS PSEUDOESTÁTICO			
RS2		Slope/W	
ELEMENT TYPE	FS	MÉTODO	FS
3 Noded Triangles	1,21	Bishop	1,20
6 Noded Triangles	1,15	Ordinario	1,13
4 Noded Quadrilaterals	1,17	Morgenstern	1,20
8 Noded Quadrilaterals	1,09	Janbú	1,10
		Spencer	1,20

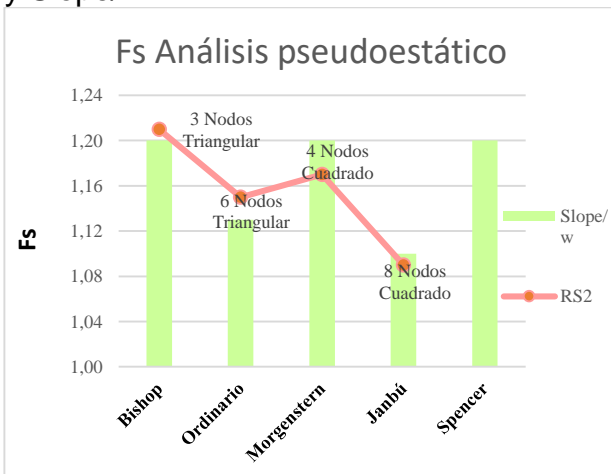
Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Comparación de factores de seguridad estático obtenidos en RS2 y Slope/W.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Comparación de factores de seguridad pseudoestático obtenidos en RS2 y Slope/W.



Fuente: Elaboración propia.

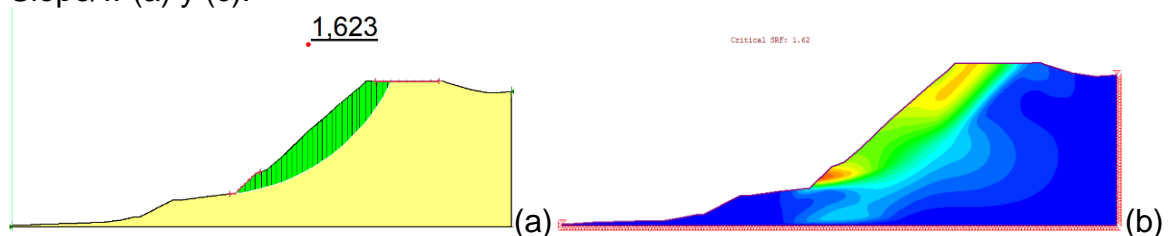
En el análisis estático podemos evidenciar una correspondencia entre los valores obtenidos en los dos softwares, marcadas similitudes entre los métodos Bishop, Morgenstern y Spencer, y equivalencias en RS2 al modelo simulado con una malla de tipo cuadrilátero de 4 nodos, en conjunto los valores de Slope/W tienden a ser más bajos comparados con RS2, ya que el valor más pequeño de factor de seguridad se obtuvo por el método de Janbú (1.53) y el valor más grande utiliza una malla triangular de 3 nodos (1.65) en RS2 como se observa en la figura 15.

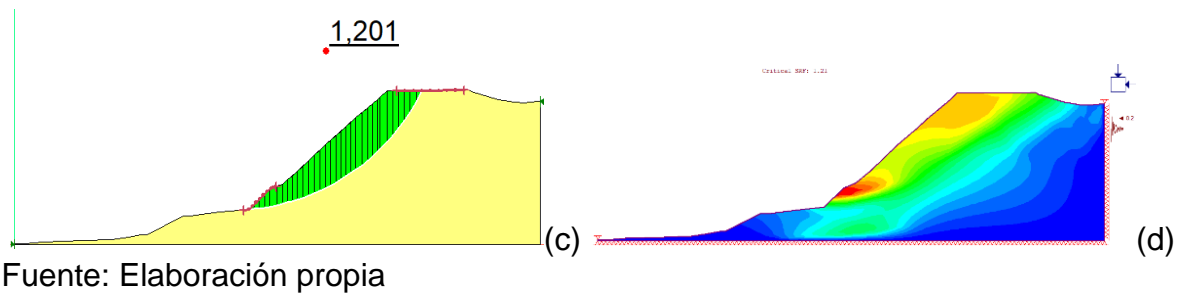
En el modelo de talud pseudoestático, observamos una disminución en los factores de seguridad, debido a la presencia de una fuerza sísmica, pues las fuerzas actuantes aumentarían, lo que conlleva a esta disminución, los métodos Bishop, Morgenstern y Spencer continúan con las similitudes en los valores de factores de seguridad, esta vez, acercándose más a la malla de tipo triangular de 3 nodos, el método de Janbú refleja un valor que corresponde en RS2 al obtenido con una malla de 8 nodos cuadrilátero, a su vez, en los dos softwares este es el factor de seguridad más crítico. Figura 16

6.1.2 Comparación gráfica del talud en condición estática y pseudoestática.

En la figura 17 se observa, como los dos softwares representan la superficie de falla en Slope/w y los desplazamientos en RS2 utilizando sus respectivos métodos de análisis.

Figura 17. Comparación gráfica de la falla en talud modelado en RS2 (b) y (d) y Slope/w (a) y (c).





Al realizar la comparación de las áreas de falla de manera gráfica, podemos evidenciar en el modelo estático (figura 17 (a) y (b)) mayor similitud en la geometría de la falla, mientras que en el dinámico (figura 17 (c) y (d)), se notan marcadas diferencias, esto debido a la manera como cada software calcula el factor de seguridad, mientras que en Slope/w analiza las fuerzas actuantes y resistentes dentro de la superficie de falla, RS2 evalúa el criterio de reducción en todo el talud y muestra las zonas de desplazamientos en todo el modelo, por ende no es tan evidente la similitud.

6.2 FLUJO DE AGUA

6.2.1 Comparación de los caudales en presencia y ausencia de filtro. Los valores de caudales obtenidos en la simulación, tanto con presencia de filtro como sin este en los softwares Seep/w y RS2 se muestran en la tabla 22 y tabla 23 donde se realiza una comparación y se establece un porcentaje de error, tomando como valor teórico el caudal obtenido en RS2.

Tabla 22. Porcentaje de error de caudal entre RS2 y Seep/w del modelo sin filtro.

	Q1 (m3/s)	Q2 (m3/s)	Q3 (m3/s)
SEEP/W	2,9E-07	2,7E-07	1,8E-07
RS2	2,9E-07	2,7E-07	1,8E-07
% error	0,11%	0,52%	1,15%

Fuente: Elaboración propia.

Sin filtro obtenemos un porcentaje de error relativamente bajo en los 3 puntos de control, indicándonos de esta manera, la similitud de cálculo entre los dos softwares, cabe mencionar que el software Seep/w trae por defecto la geometría de malla definida como cuadrilátero, mientras que en RS2 si podemos variar la forma de

estos elementos; para este caso de comparación los porcentajes de error bajos son generados ya que el tipo elemento más apropiado según criterios de convergencia y exactitud es el 8 nodos cuadrilátero, semejante a la geometría de la malla en Seep/w.

Tabla 23. Porcentaje de error de caudal entre RS2 y Seep/w del modelo con filtro.

	Q1 (m3/s)	Q2 (m3/s)	Q3 (m3/s)
SEEP/W	4,21E-07	2,25E-07	1,29E-08
RS2	4,65E-07	2,40E-07	1,50E-08
% error	9,46%	6,25%	14,00%

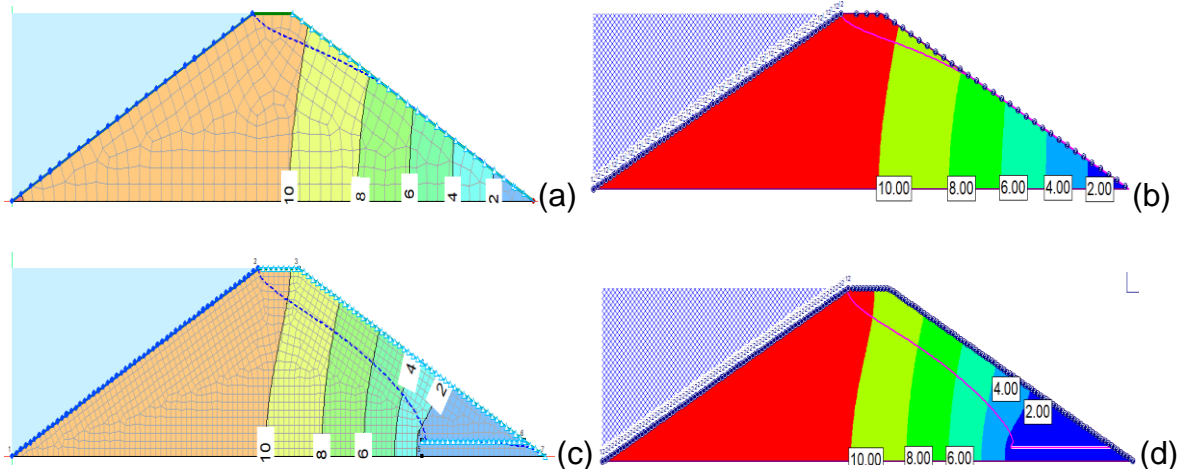
Fuente: Elaboración propia.

Para la condición en presencia de filtro, se evidencia en la tabla 23 un porcentaje de error en los puntos de control de los caudales más alto, en comparación con el anterior análisis, esto surge debido a las condiciones de entrada que cada software maneja, es decir para asemejar el modelo en Seep/w se debe ingresar una condición de borde equivalente a una presión cero sobre el dren simulado, este no permite establecer geometría de drenes, en RS2 se destaca por permitir unas condiciones personalizadas al tipo de dren con unas características propias, tales como el diámetro, la longitud, la simultaneidad, la separación entre estos y la permeabilidad, para lograr una comparación adecuada, solo se usaron las condiciones de longitud y la presión cero en los dos software, pero debido a que RS2 por defecto debemos introducir un diámetro, este se modifica hasta obtener un valor más cercano a Seep/w.

También se observa que el porcentaje de error en el punto control del caudal 3, es el mayor, ya que este se ubica en el filtro y las condiciones no son las mismas en los dos softwares.

6.2.2 Comparación de las cabezas de presión de manera grafica

Figura 18. Comparación grafica de la cabeza de presión total, modelado en RS2 (b) y (d) y Seep/w (a) y (c).



Fuente: Elaboración propia

Las cabezas de presión total del modelo presentan similitudes muy marcadas dentro de los dos softwares, como evidenciamos en la figura 18 (a) y (b) para la simulación sin filtro, y en la figura 18 (c) y (d) con filtro, también se observa para los dos modelos, los valores de cabeza presión son exactamente los mismos, de igual manera la línea piezométrica describe el mismo recorrido en las dos simulaciones, esto debido a que los dos programas realizan cálculos a partir del método de elementos finitos.

6.3 TÚNEL

6.3.1 Valores de esfuerzos y desplazamiento. En la tabla 24 se presenta los esfuerzos horizontales y verticales en el modelo del talud con geometría circular en las esquinas de radio 10 cm, igualmente en la tabla 25 se observan los desplazamientos obtenidos en Plaxis 2D y RS2, en los diferentes puntos de control.

Al realizar la simulación en los programas se observa porcentajes máximos de error en los esfuerzos horizontales en la cúpula.

Tabla 24. Esfuerzo vertical y horizontal obtenidos en RS2 y Plaxis.

Software	Esfuerzos Verticales en esquinas (MPa)		
	Izquierda	Derecha	Cúpula
RS2	1,250	1,325	0,125
PLAXIS	1,026	1,004	0,087
%Error	17,9%	24,2%	30,4%
Software	Esfuerzos Horizontales en esquinas (MPa)		
	Izquierda	Derecha	Cúpula
RS2	0,22	0,22	0,005
PLAXIS	0,216	0,195	0,009
%Error	1,8%	11,4%	80,0%

Fuente: Elaboración propia.

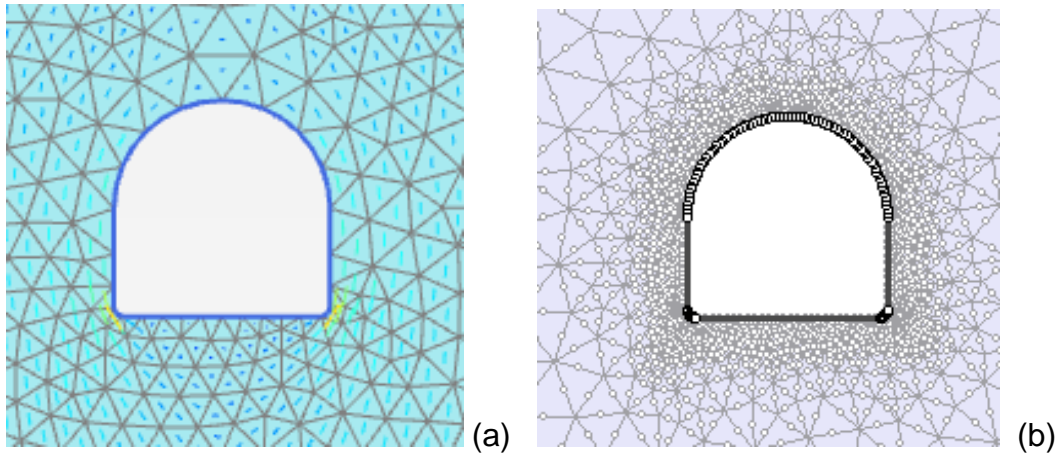
Tabla 25. Desplazamientos verticales y horizontales obtenidos en Rs2 y Plaxis.

Software	Desplazamientos verticales (m)		Desplazamientos horizontales (m)	
	Cúpula	Base	Izquierda	Derecha
RS2	1,00E-05	1,80E-05	5,30E-06	5,30E-06
PLAXIS	1,32E-05	1,63E-05	4,16E-06	4,16E-06
%Error	32,0%	9,4%	21,5%	21,5%

Fuente: Elaboración propia.

Los porcentajes de error responden a la diferencia de la malla como se observa en la figura 19, pues esta se densifica en el contorno de excavación de RS2 y es más estable en Plaxis 2D.

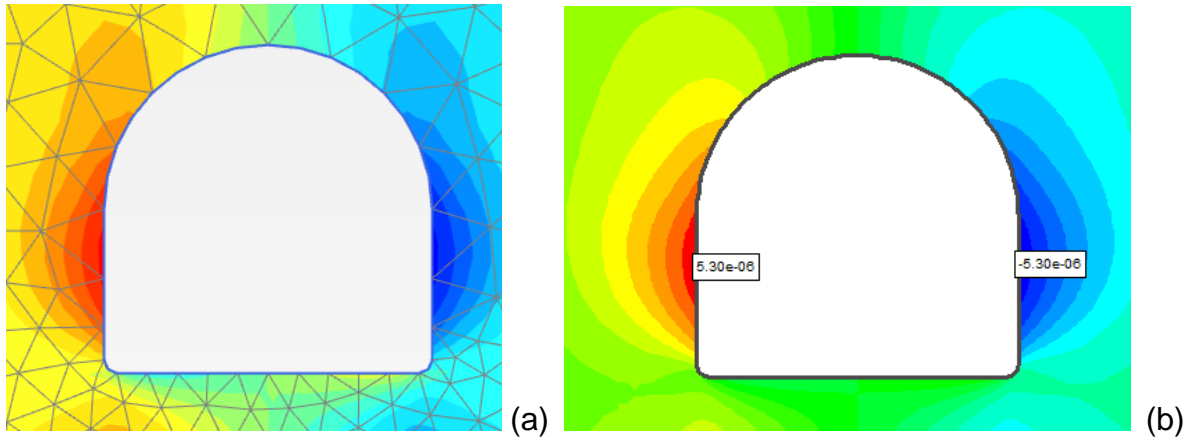
Figura 19. Geometría del túnel y su malla, a) modelo en Plaxis 2D, b) modelo en RS2.



Fuente: Elaboración propia

Los desplazamientos verticales (tabla 25), presentan un error en la cúpula del 32%, que en orden de magnitud equivale a una diferencia de 0,003 mm, de igual manera en la figura 20 (a) y (b), se observa la similitud de los contornos de desplazamiento horizontal cerca a los laterales del túnel, los cuales son los mayores y se representan por color rojo y azul.

Figura 20. Contorno de desplazamiento horizontal, a) modelo en Plaxis 2D, b) modelo en RS2.



Fuente: Elaboración propia

7 CONCLUSIONES

- El software RS2 tiene diversas aplicaciones para la geotecnia, entre ellas están la simulación de túneles, taludes y agua subterránea, utiliza el método de elementos finitos donde los resultados depende del tipo de malla, cantidad de nodos y elementos, así como de las condiciones de frontera.
- Para el talud evaluado, el factor de seguridad obtenido en condición estática y pseudoestática, se estabiliza a partir de los 5000 elementos, para cualquier número de nodos, este valor se obtiene con una malla de tipo uniforme y con restricción en los dos sentidos (eje X, eje Y).
- En los modelos de flujo de agua los caudales de infiltración determinados, tienen una mayor precisión con 8 nodos en ausencia de un filtro y con 6 nodos cuando se incluye un dren, además estos valores tienden a estabilizarse cuando se suministra al programa un número de elementos igual a 5000 y tipo de malla uniforme.
- Los esfuerzos en el modelo de túnel con esquinas rectas, presentan una singularidad, en la cual estos valores crecerán infinitamente; Los esfuerzos y desplazamientos en el modelo de túnel con perfilamiento de esquinas, se estabilizan con 200 elementos proporcionados al programa con una malla graduada y con 6 nodos.
- El factor de seguridad del talud estático obtenido en RS2 con una malla uniforme y 4 nodos, es semejante al valor conseguido en Slope/w por el método de Spencer (1.62), el factor de seguridad más alto utiliza 3 nodos (1.65) en RS2 y el valor más bajo se da por el método de Janbu (1.53) en Slope/w.
- El factor de seguridad del talud pseudoestático obtenido en RS2 con una malla uniforme y 3 nodos es semejante al valor conseguido en Slope/w por el método de

Spencer (1.2), el valor más crítico determinado por elementos finitos se percibe con 8 nodos (1.09) y en equilibrio límite por el método de Janbu (1.1).

- Cuando se comparan los valores obtenidos por RS2 y Seep/w, los caudales de infiltración en el modelo sin filtro en los 3 puntos de control, tienen un porcentaje de error promedio de 0.6%.
- Cuando se comparan los valores obtenidos en RS2 y Seep/w los caudales de infiltración en el modelo con filtro están dados en orden de magnitudes de $10E-8m^3/s$, tienen un porcentaje de error del 9%, 6% y 14%, ya que los dos softwares no nos permiten simular el dren en igualdad de condiciones
- Los esfuerzos verticales y horizontales del túnel obtenidos en RS2 y comparados con Plaxis 2D, tienen un alto porcentaje de error (80%), esto se debe a que la malla se densifica a medida que se acerca al contorno del túnel en RS2, y más aún en geometrías curvas, lo cual difiere de Plaxis 2D, ya que este último dibuja la malla uniforme en todo el modelo.

REFERENCIAS

- [1] Auvinet, G. "Incertidumbre en geotecnia". In Decimosexta Conferencia Nabor Carrillo, Querétaro, México, 2002, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. pp. 34-36
- [2] Ribó, R., & Bugada Castelltort, G. "Desarrollo de un sistema integrado para tratamiento de geometría, generación de malla y datos para el análisis por el método de los elementos finitos". International Centre for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Barcelona, 2001, pp 13-13.
- [3] Rock and soil, RS2, Disponible en <https://www.rocscience.com/software/rs2>, [Citado 20 de Julio de 2020].
- [4] Descripción general de las aplicaciones de RS2, Rocscience. Disponible en: <https://www.rocscience.com/help/rs2/>, [Citado 20 de Julio de 2020].
- [5] J. M Fornons "El método de los elementos finitos en la ingeniería de estructuras", Universidad politécnica de Barcelona, Editorial Marcombo, Barcelona 1982, Capítulo I, p.1.
- [6] Martínez J A. "Análisis paramétrico de un talud en función del ángulo de fricción" [Tesis Maestría], Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2019.
- [7] De La Fuente, H. A., López, n. p., & Guichard, G. A. "Evaluación de la seguridad de bordos de protección bajo condiciones de vaciado rápido mediante análisis numéricos acoplados de flujo transitorio-deformación y análisis de estabilidad". XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Cancún, noviembre 14 a 16, 2012.
- [8] Ros Ávila, J. Análisis comparativo de los criterios de rotura de Hoek&Brown y Mohr-Coulomb en el estudio de estabilidad en macizos rocosos [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2008.

- [9] F Puell, P De La Fuente, M Arenillas. “La linealización del criterio de hoek-brown en el análisis de la estabilidad general de taludes en roca”. Revista de obras públicas, n° 3446, pp.37-44.
- [10] Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. “El criterio de rotura de Hoek-Brown–Edición 2002 Hoek-Brown failure criterion–2002 Edition”. University of Minnesota, RocScience Inc.
- [11] Arévalo J. C. “Análisis de estabilidad del macizo rocoso de la formación mirador para la construcción de un túnel minero en la vereda La selva, corregimiento la Donjuana, municipio de Bochalema, Norte de Santander, Colombia” [Tesis Maestría], Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2014.
- [12] D. M. O. Suárez, J. Vivas y E. R. S. Rangel, “Uso del método de elementos finitos (mef) para la determinación de esfuerzos y deformaciones en un modelo de pozo”, Revista Fuentes: El Reventón Energético, vol. 7, n° 1, 2009, pp. 27-35.
- [13] Ana V. M. “Mejora de los elementos de transición en XFEM aplicado a Mecánica de la Fractura Elástica Lineal” [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2010.
- [14] Hurtado, J. E. A. “Análisis de estabilidad de taludes”. Ciencia y Tecnología-Facultad de Ingeniería Civil, vol. 62. 1994.

BIBLIOGRAFIA

- [11] Arévalo J. C. “Análisis de estabilidad del macizo rocoso de la formación mirador para la construcción de un túnel minero en la vereda La selva, corregimiento la Donjuana, municipio de Bochalema, Norte de Santander, Colombia” [Tesis Maestría], Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2014.
- [5] J. M Fornons “El método de los elementos finitos en la ingeniería de estructuras”, Universidad politécnica de Barcelona, Editorial Marcombo, Barcelona 1982, Capítulo I, p.1.
- [6] Martínez J A. “Análisis paramétrico de un talud en función del ángulo de fricción” [Tesis Maestría], Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2019.
- [3] Rock and soil, RS2, Disponible en <https://www.rocscience.com/software/rs2>, [Citado 20 de Julio de 2020].
- [8] Ros Ávila, J. Análisis comparativo de los criterios de rotura de Hoek&Brown y Mohr-Coulomb en el estudio de estabilidad en macizos rocosos [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2008.

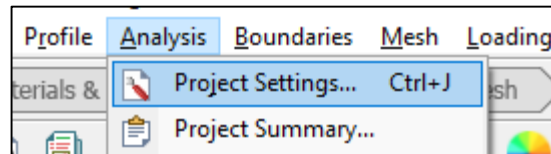
ANEXOS

Anexos A. Manual para modelación en RS2

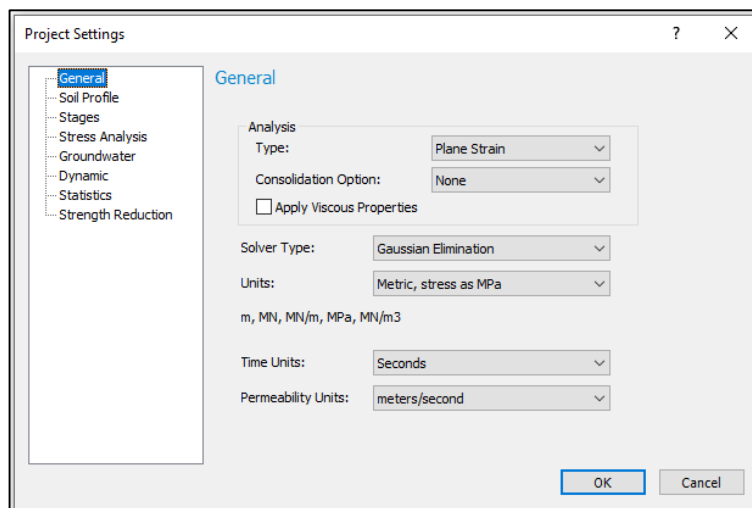
1. MANUAL PARA LA MODELACIÓN DE UN TALUD EN RS2.

1.1 Configuración general

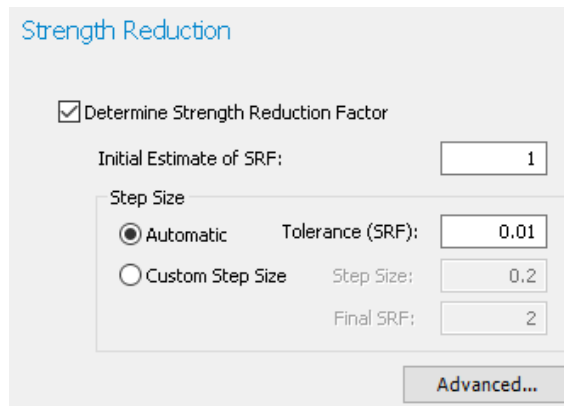
En la interface principal > barra de tareas > Analysis > Project Settings.



Nos aparece la siguiente ventana, seleccionamos: General > Units, para definir las unidades que trabajara el modelo.




Utilizamos la opción Groundwater si queremos incluir dentro del talud un nivel freático, en la pestaña Strength Reduction indicamos la utilización automática del factor de seguridad SRF iniciando en 1.

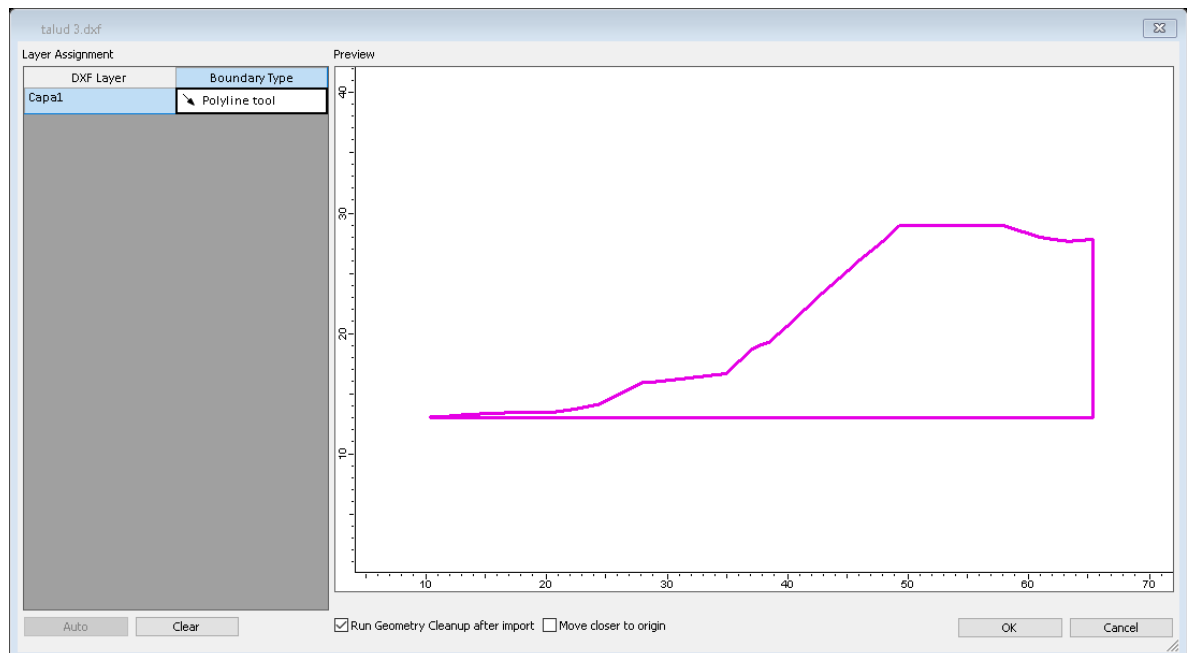


Los demás valores los dejamos por defecto.



1.2 Importar modelo de AutoCAD.

Para crear el modelo del talud a partir de una figura hecha en AutoCAD, debemos tener el contorno guardado como archivo DXF, seguidamente seleccionamos >

 > File> Import> Import DXF> Aparece una pestaña donde ingresamos la ubicación del archivo, lo seleccionamos y abrimos.





En esta pestaña que aparece, seleccionamos polilínea como tipo de perímetro dentro de la capa 1, nos aparece un boceto del talud.

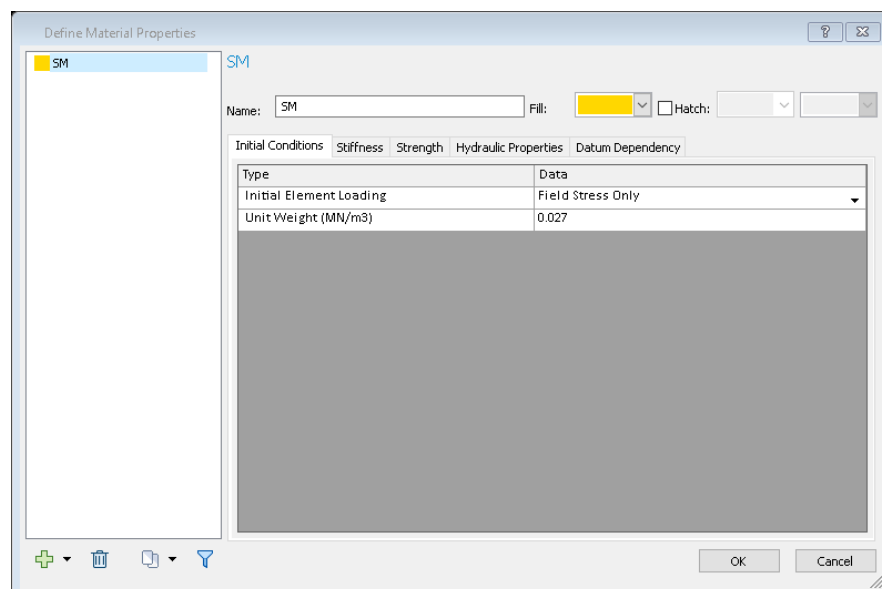
Seguido añadimos el perímetro del talud seleccionando  > Add External  > Inmediatamente procedemos a dibujar el perímetro teniendo como referencia el boceto creado, RS2 nos permite calcar los puntos de referencia del formato DXF, para facilitarnos la creación del talud.

Con la opción  > Add Stage  > Podemos agregar estratos en el modelo según lo requiera.

Teniendo dibujado el talud procedemos a eliminar las líneas de referencia que importamos en DXF, para lo cual las seleccionamos y borramos.



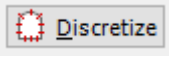
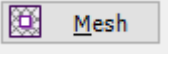
1.3 Definir los materiales

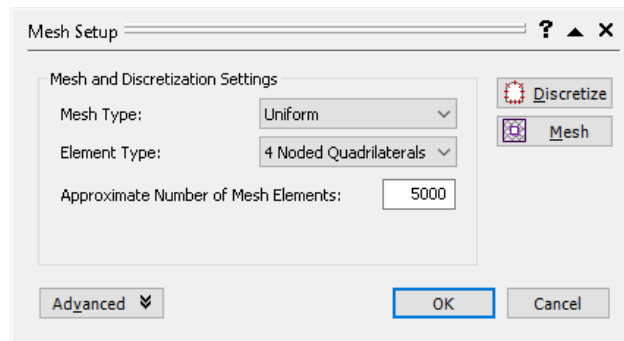
En la interface principal  > Define Material Properties  > Nos aparece una ventana donde agregamos las propiedades del material, modificando su nombre y las pestañas Initial Conditions, Stiffness y Strength, con las características de las tablas 1 y 2. Este proceso se realiza para cada estrato que manejemos en el modelo.







Para añadir el material, en la interface principal damos click derecho sobre el modelo > assign material > y seleccionamos el material correspondiente.

1.4 Definir malla y elementos

En la interface principal >  > Mesh Setup  > Aparece una ventana donde definimos el tipo de malla, el tipo y cantidad de elemento > seleccionamos  y luego  para generar la malla > Ok. Los valores del modelo se presentan a continuación.

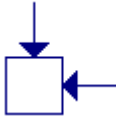



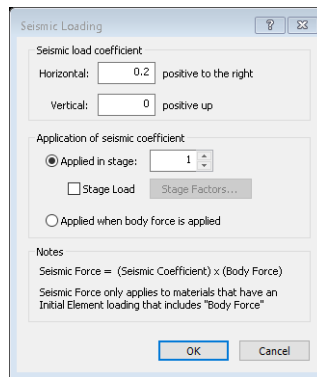
1.5 Restricciones

La asignación de las restricciones después de tener definido el modelo inicia seleccionando  > según sea el caso escogemos > Restricción en X y  > Restricción en X  > Restricción en Y  > En el perímetro del talud damos click para asignar la restricción y finalizamos con enter.

1.6 Asignación de carga sísmica.



En la parte superior derecha del modelo damos click derecho en el icono Field stress

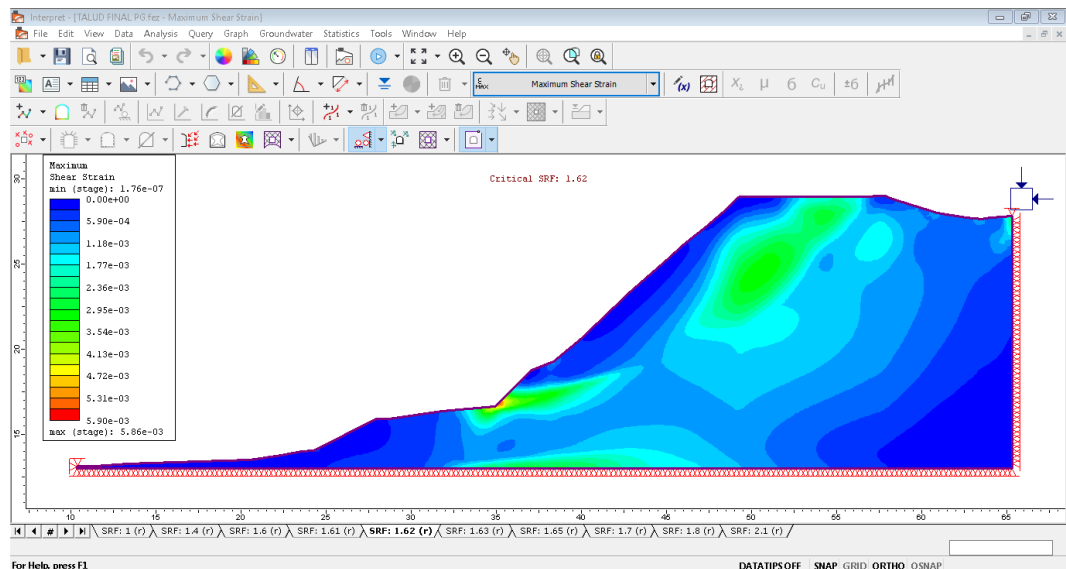
 > Luego seleccionamos  Seismic Loading... Nos aparece la siguiente ventana.



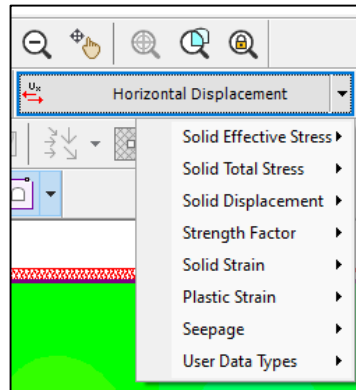
Insertamos el coeficiente sísmico vertical u horizontal según corresponda, para nuestro caso corresponde a 0.2 lo que equivale a 0.2 veces la aceleración de la gravedad, debemos tener en cuenta la dirección de aplicación (derecha e izquierda), de acuerdo a la geometría del modelo, es decir si se encuentra distribuido mayormente hacia la izquierda el valor sería negativo y viceversa.


1.7 Cálculo y resultados

Se inicia el cálculo del modelo seleccionando > Compute  > Después de calcular seleccionamos > Interpret  > se genera una nueva ventana donde observamos los resultados del cálculo.



Dentro de esta ventana podemos ver resultados como, factor de seguridad, esfuerzos, desplazamientos etc. desde la pestaña desplegable.

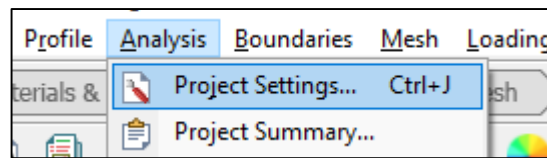


Para obtener valores en cualquier lugar del modelo seleccionamos > Tools, en la barra de tareas > Add tools > Label contour  y hacemos Click sobre el lugar del cual queremos saber su valor.

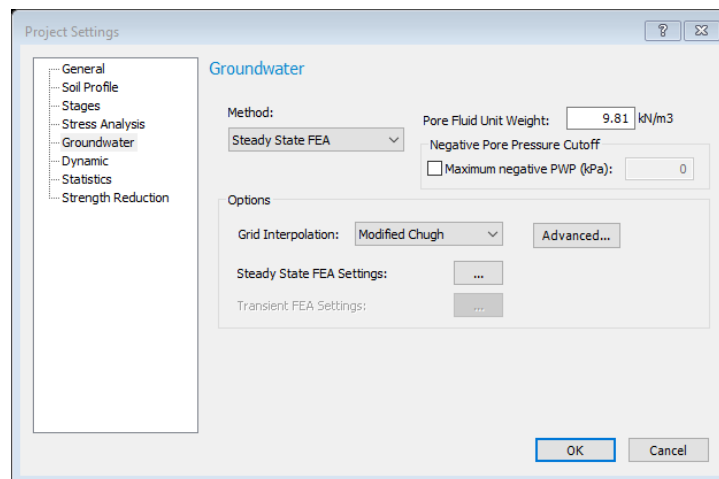
2. MANUAL PARA LA MODELACIÓN DE FLUJO DE AGUA EN RS2.

2.1 Configuración general

En la interface principal > barra de tareas > Analysis > Project Settings.





Nos aparece la siguiente ventana, seleccionamos: General > Units, para definir las unidades que trabajara el modelo, en este caso usaremos “Metric, stress as kPa”





Para calcular la infiltración de agua, seleccionamos: Groundwater > Method > Steady State FEA, este método nos permite trabajar el modelo para el cálculo hidráulico, también añadimos el peso unitario del agua. Los demás valores los dejamos por defecto.

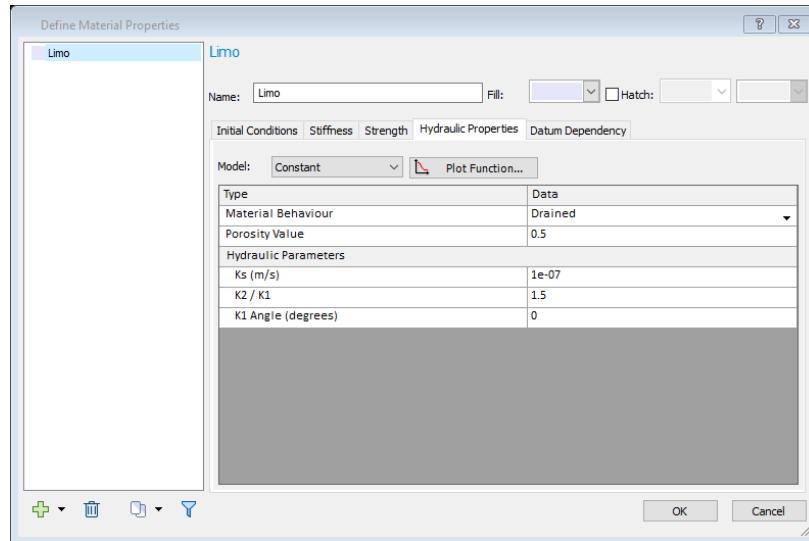
2.2 Crear contorno del modelo.

El modelo para analizar su filtración de agua, asemeja una presa de tierra, por tal motivo para esto dibujamos el contorno seleccionando >  > Add

External  > ingresamos la coordenada en X seguido de una coma y después la coordenada en Y (0,0), así para cada uno de los vértices, .



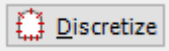
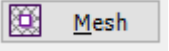
2.3 Definir los materiales

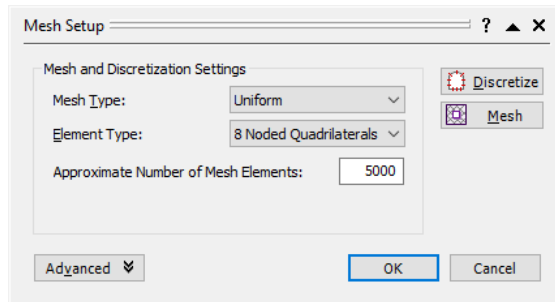
En la interface principal >  > Define Material Properties 
> Nos aparece una ventana donde agregamos las propiedades del material, modificando su nombre y la pestaña Hydraulic properties, con las características de las tablas 3. Este proceso se realiza para cada estrato que manejemos en el modelo.





Para añadir el material, en la interface principal damos click derecho sobre el modelo > assign material > y seleccionamos el material correspondiente.

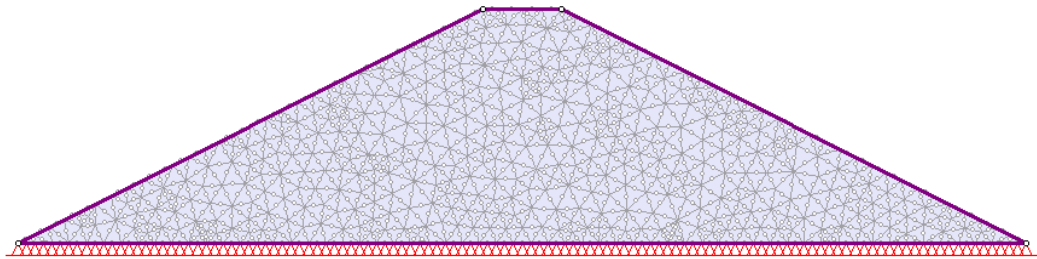
2.4 Definir malla y elementos

En la interface principal >  > Mesh Setup  > Aparece una ventana donde definimos el tipo de malla, el tipo y cantidad de elemento > seleccionamos  y luego  para generar la malla > Ok. Los valores del modelo se presentan a continuación.





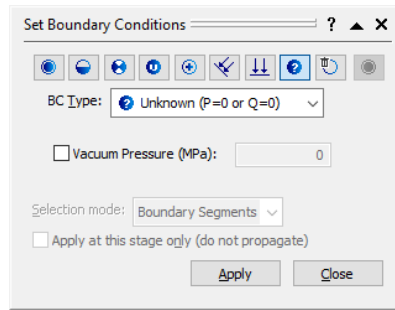
2.5 Restricciones

Automáticamente al crear la malla, las restricciones se añaden en todo el contorno del modelo, pero no es necesario el todo su perímetro, por esto para eliminar las restricciones o cambiarlas seleccionamos:  > Free restraints  > y damos clic sobre la línea de contorno donde queremos dejar libre de restricciones seguido de un “enter”. Para el modelo del artículo, se usarán restricciones solo en la parte de abajo.

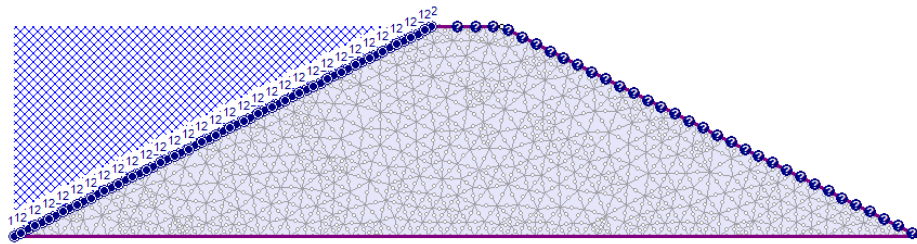


2.6 condiciones de contorno y secciones de descarga


El modelo es una presa de tierra, por eso debemos dar unas condiciones de frontera para asemejar una altura de agua a su lado izquierdo, para eso seleccionamos:  > Set Groundwater Boundary Conditions  > BC Type > Unknown (P=0 or Q=0) > damos click sobre los contornos donde no existe una cabeza de agua y damos aplicar.




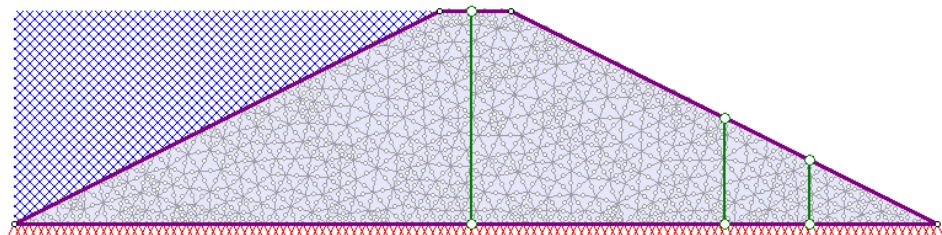
De la misma manera realizamos para el contorno donde hay una cabeza de agua, seleccionamos: BC Type > Total Head (H) > Total head value > 12, que es la altura de la cabeza de agua que se utiliza para el modelo, damos clic sobre el contorno y aplicamos.



En la imagen se observa la cabeza total de 12 metros al lado izquierdo y signos de interrogación al lado derecho y en la corona que representa que no existe agua en su contorno.

Para el determinar el caudal de infiltración se debe incluir una secciones de descarga en el modelo, para eso seleccionamos:  > Add Discharge

Section  > dentro del modelo dibujamos la sección y damos “enter”, para esta simulación quedara de la siguiente manera.

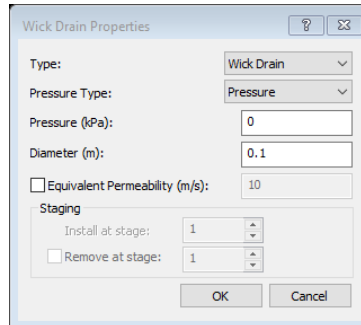


2.7 Añadir filtro

El programa RS2 permite realizar una simulación con un dren el cual se puede agregar seleccionando: Barra de tareas > Groundwater > Add wick Drain/Relief Well



> en el modelo dibujamos el dren con la longitud deseada, inmediatamente sale el siguiente cuadro.



En este nos permite añadir características del dren, como lo es el diámetro, la permeabilidad y la presión dentro del filtro

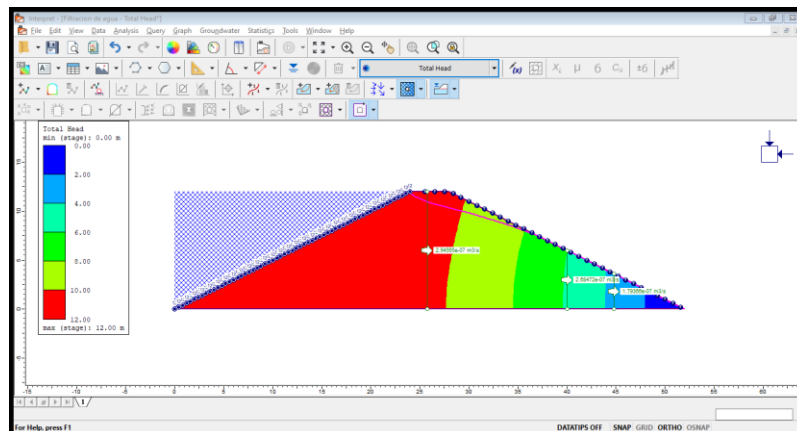
2.8 Cálculo y resultados

Se inicia el cálculo del modelo únicamente para infiltración seleccionando >

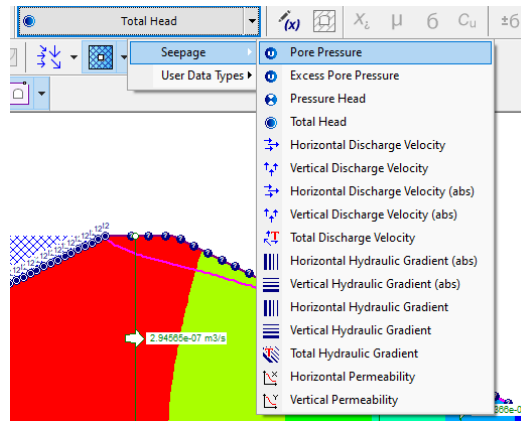
Compute (groundwater only)



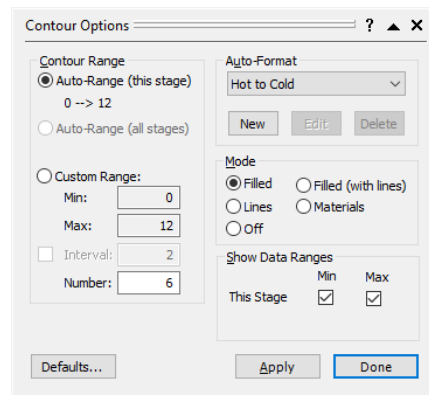
> Después de calcular seleccionamos > Interpret > se genera una nueva ventana donde observamos los resultados del cálculo.



Dentro de esta ventana podemos ver resultados de los caudales de infiltración donde dibujamos las secciones de descarga, también podemos ver gráficamente la cabeza total o la presión de poros etc, desde la pestaña desplegable.



Para ver los resultados gráficamente con más o menos colores > Contour Options > sale la siguiente ventana.



En Number insertamos el número de colores que deseamos para ver gráficamente, y damos en aplicar, también podemos obtener valores en cualquier lugar del modelo para esto seleccionamos > Tools, en la barra de tareas > Add tools > Label contour

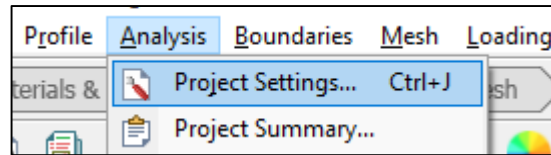


y hacemos Click sobre el lugar del cual queremos saber su valor.

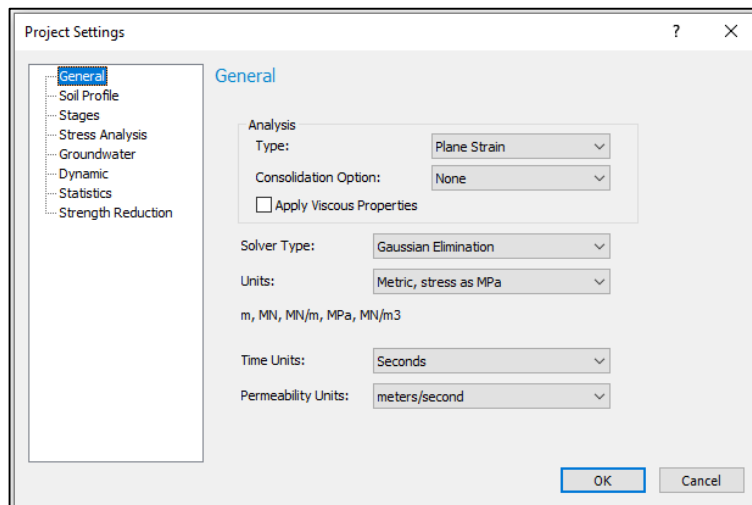
3. MANUAL PARA LA MODELACIÓN DE UN TÚNEL EN RS2

3.1 Configuración general

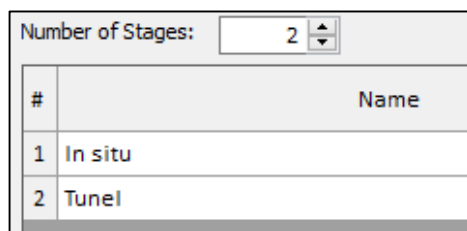
En la interface principal > barra de tareas > Analysis > Project Settings.



Nos aparece la siguiente ventana, seleccionamos: General > Units, para definir las unidades que trabajara el modelo.





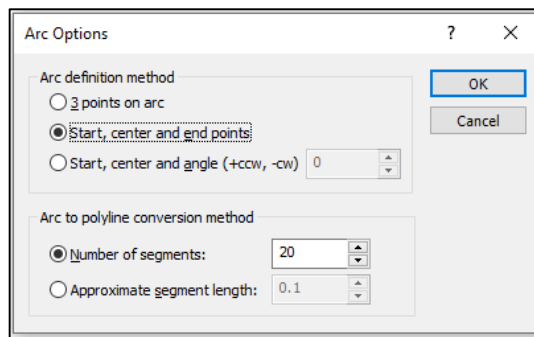
El programa RS2, permite realizar un modelo en diferentes etapas, para esta simulación se hará en una primera etapa con el material intacto y la segunda etapa cuando se realiza la excavación de túnel, para definir las etapas del proyecto: Stages > Number of Stages> 2> Nombramos las etapas > Ok.





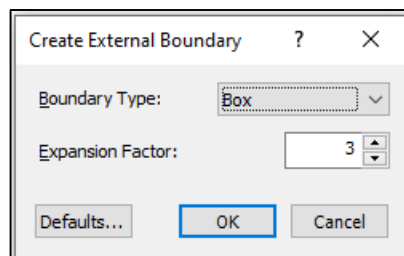
Los demás valores los dejamos por defecto.

3.2 Crear contorno del túnel.



Para crear el contorno de excavación del túnel, nos dirigimos en la pestaña de la etapa In situ seleccionamos >  > Add excavation  > ingresamos la coordenada en X seguido de una coma y después la coordenada en Y (0,0), así para cada uno de los vértices, para la parte donde existe una geometría curva, tecleamos la letra “a”, seguido de enter, nos aparece una ventana donde ingresamos los puntos de referencia del arco y cantidad de segmentos.



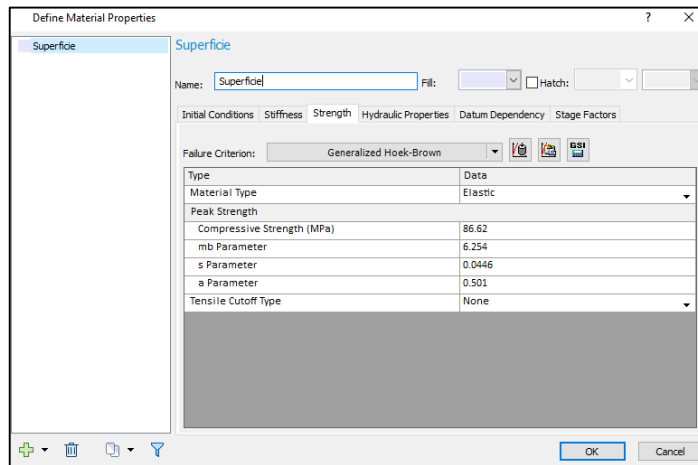
Seguido añadimos el contorno externo a la excavación >  > Add External  > nos aparece una ventana donde seleccionamos el tipo de perímetro y su factor de expansión, para este modelo, es el siguiente.



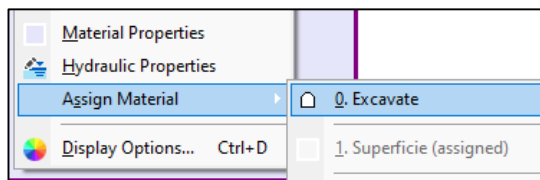
3.3 Definir los materiales



En la interface principal >  > Define Material Properties  > Nos aparece una ventana donde agregamos las propiedades del material,

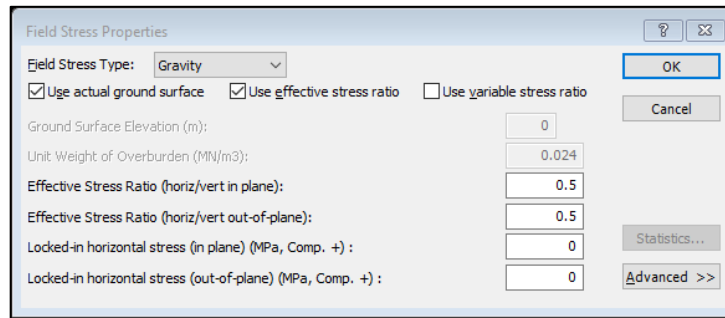
modificando su nombre y las pestañas Initial Conditions, Stiffness y Strengt, con las característica de la tabla 5.





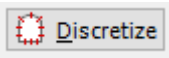
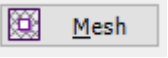
Para añadir el material, en la interface principal damos click derecho sobre el modelo > assign material > y seleccionamos el material correspondiente. Para realizar la excavación del túnel vamos a la etapa Túnel, damos click derecho sobre el modelo a excavar > assign material > y seleccionamos 0. Excavate

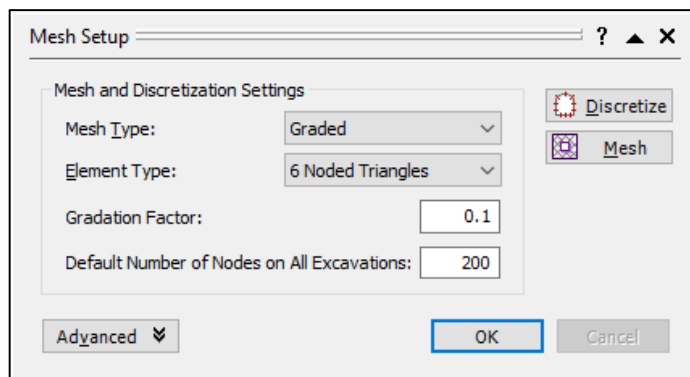


Los esfuerzos de campo se añaden desde la pestaña  > Field Stress Parameters  > Seleccionamos tipo de esfuerzo de campo y sus propiedades, para el modelo son las siguientes.





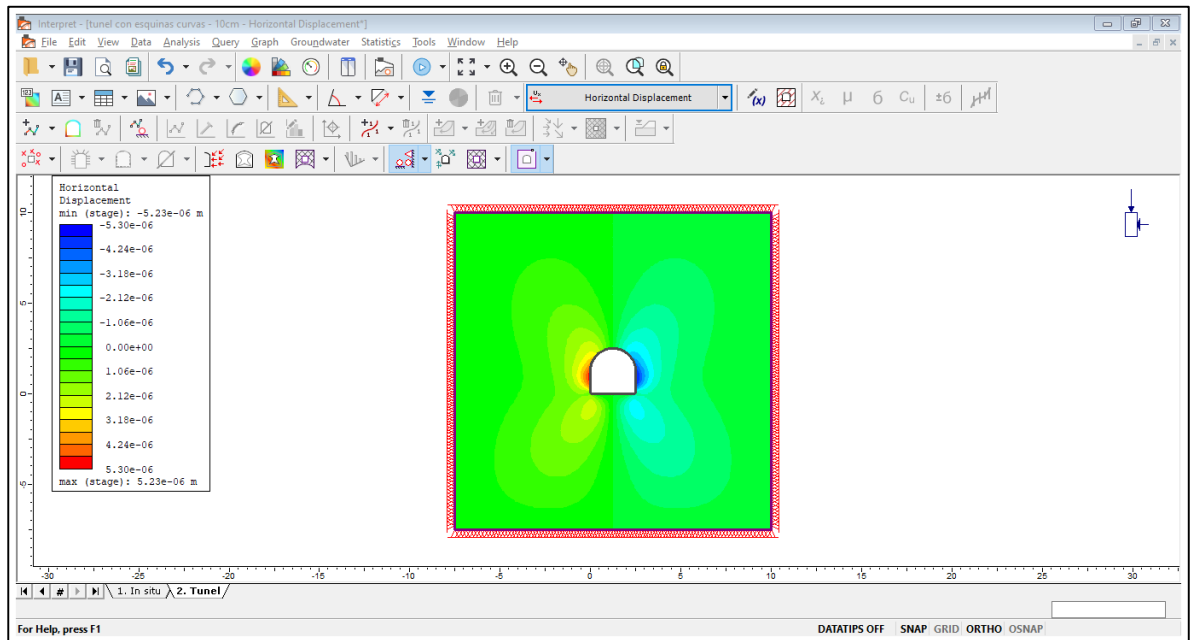
3.4 Definir malla y elementos

En la interface principal >  > Mesh Setup  > Aparece una ventana donde definimos el tipo de malla, el tipo y cantidad de elemento > seleccionamos  y luego  para generar la malla > Ok. Los valores del modelo se presentan a continuación.

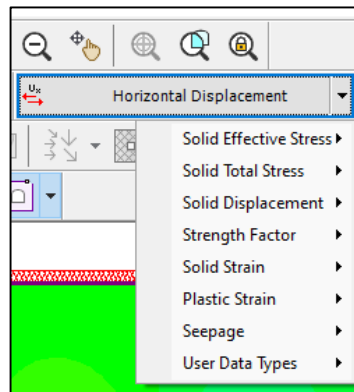



3.5 Calculo y resultados

Se inicia el cálculo del modelo seleccionando > Compute  > Después de calcular seleccionamos > Interpret  > se genera una nueva ventana donde observamos los resultados del cálculo .



Dentro de esta ventana podemos ver resultados como, esfuerzos, desplazamientos etc. desde la pestaña desplegable.



Para obtener valores en cualquier lugar del modelo seleccionamos > Tools, en la barra de tareas > Add tools > Label contour  y hacemos Click sobre el lugar del cual queremos saber su valor.

Anexos B. Resultados de simulaciones

Modelos de Talud

A continuación, presentamos el modelo del talud con sus dimensiones.

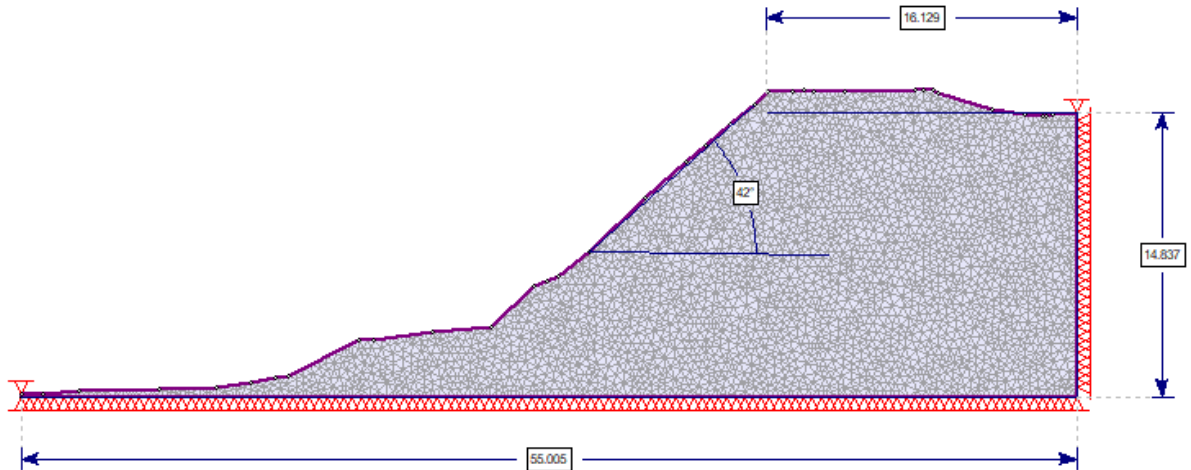


Figura 21. Dimensiones del talud

Teniendo el modelo de talud en el software RS2, procedemos a realizar la simulación para determinar los factores de seguridad, en condición estático y Pseudoestático, al variar el número de nodos y mantener un número de elemento igual a 5000 suministrados al programa y con restricción en los dos sentidos. Los resultados de los modelos se presentan a continuación.

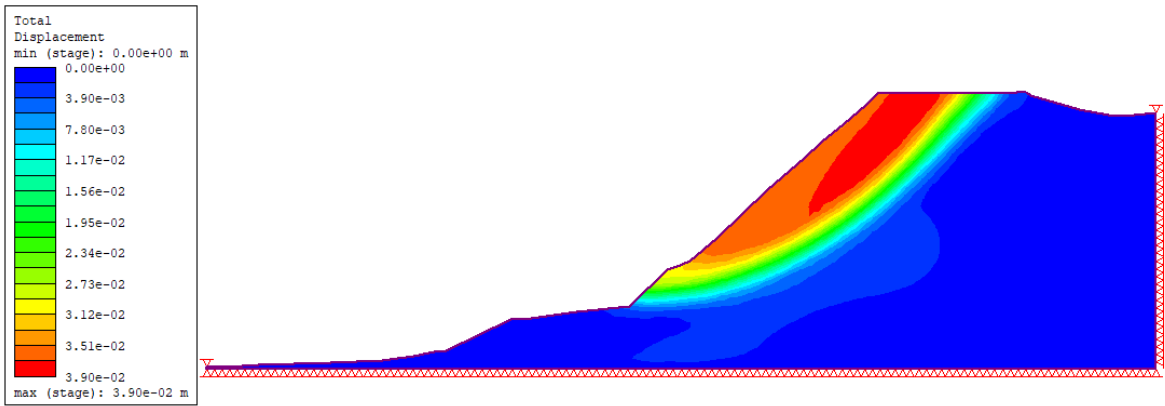


Figura 22. Resultado de modelo estático con una malla uniforme de 3 nodos triangular y 5000 elementos.

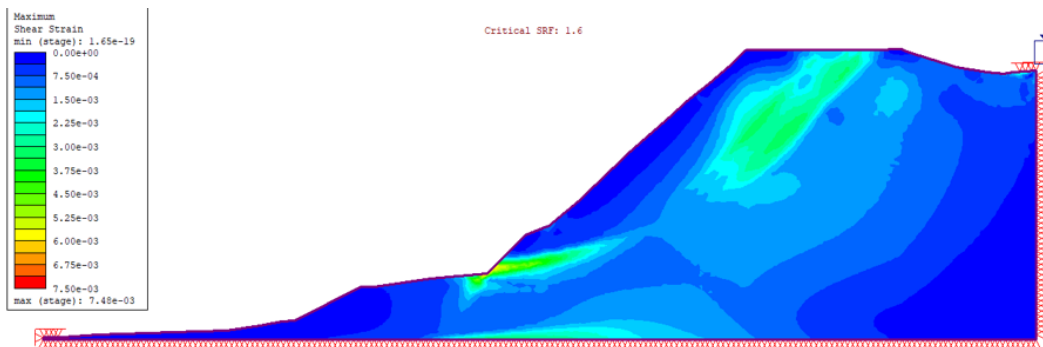


Figura 23. Resultado de modelo estático con una malla uniforme de 6 nodos triangular y 5000 elementos.

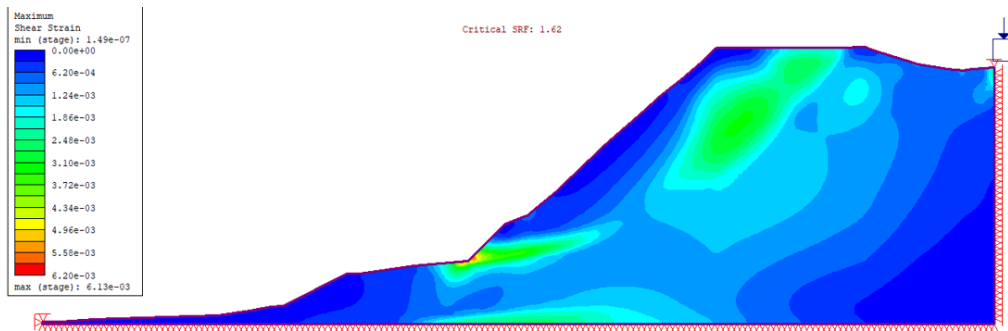


Figura 24. Resultado de modelo estático con una malla uniforme de 4 nodos cuadrilátero y 5000 elementos.

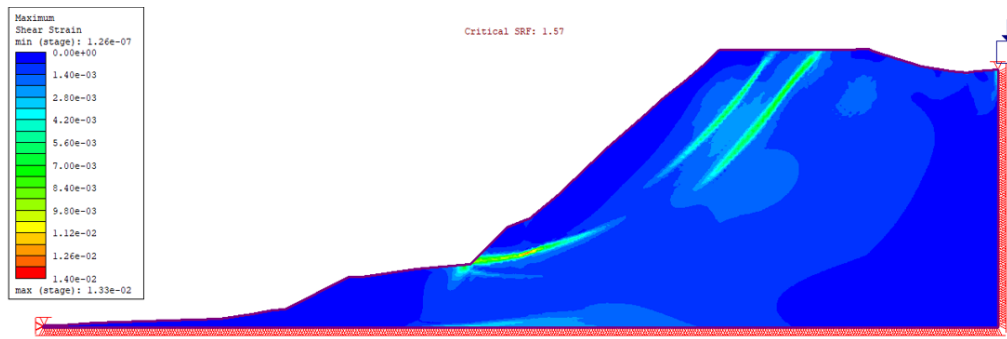


Figura 25. Resultado de modelo estático con una malla uniforme de 8 nodos cuadrilátero y 5000 elementos.

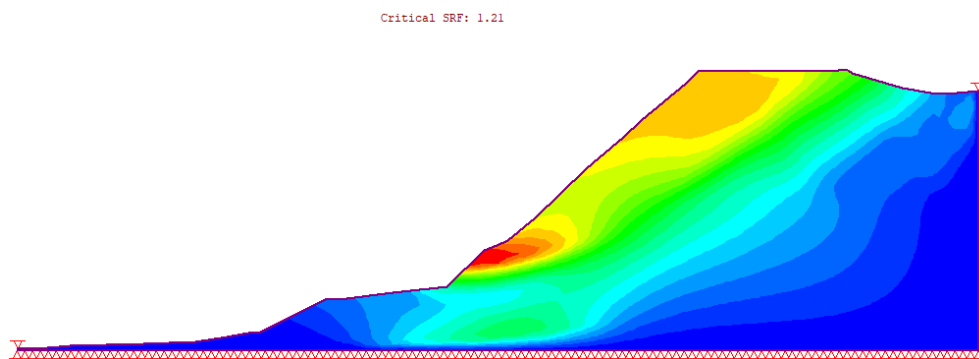


Figura 26. Resultado de modelo pseudoestático con una malla uniforme de 3 nodos triangular y 5000 elementos.

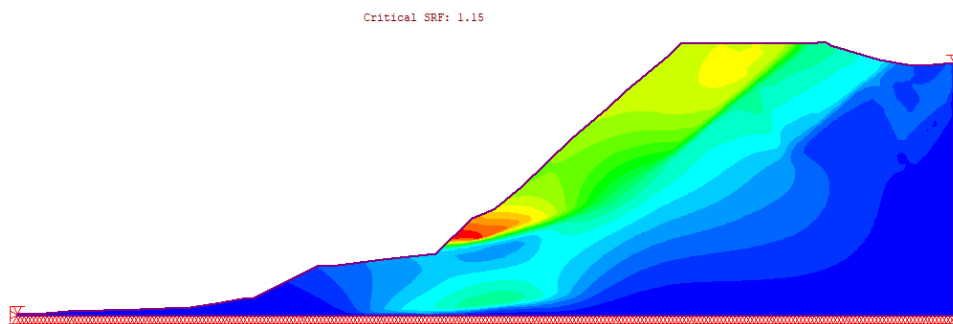


Figura 27. Resultado de modelo pseudoestático con una malla uniforme de 6 nodos triangular y 5000 elementos.

Critical SRF: 1.17

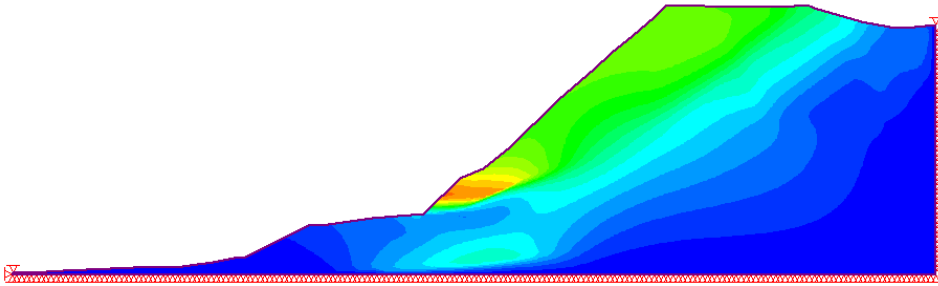


Figura 28. Resultado de modelo pseudoestatico con una malla uniforme de 4 nodos cuadrilátero y 5000 elementos.

Critical SRF: 1.09

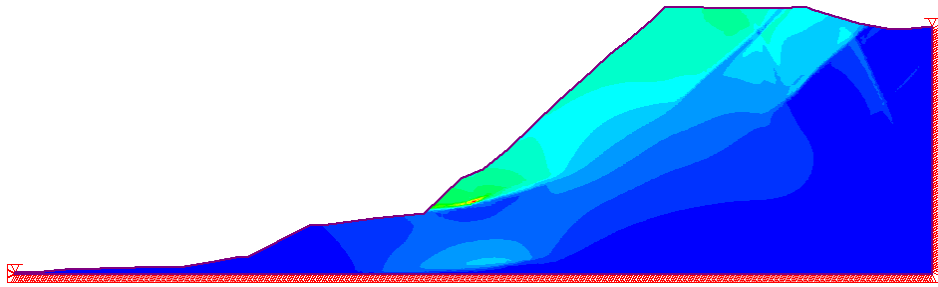


Figura 29. Resultado de modelo pseudoestatico con una malla uniforme de 8 nodos cuadrilátero y 5000 elementos.

Modelos de flujo de agua

A continuación, presentamos el modelo para flujo de agua simulando una presa de tierra con sus dimensiones.

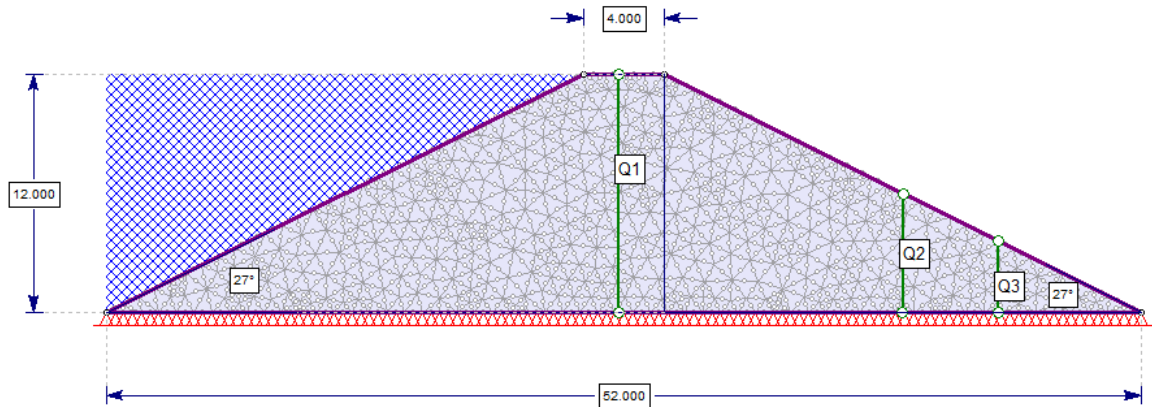


Figura 30. dimensiones de la presa de tierra

Teniendo el modelo de flujo de agua en el software RS2, procedemos a realizar la simulación para determinar los valores de caudal de infiltración y cabeza de total, cuando se presenta filtro y en ausencia de este, al mantener un número de elemento igual a 5000 suministrados al programa y con restricción en los dos sentidos. Los resultados de los modelos se presentan a continuación.

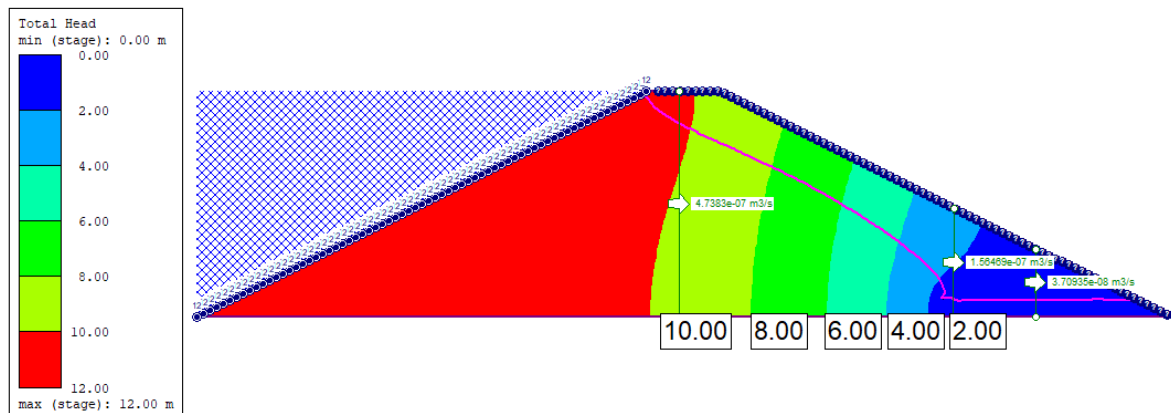


Figura 31. Resultado de modelo de flujo de agua en presencia de filtro con una malla uniforme de 3 nodos Triangular y 5000 elementos.

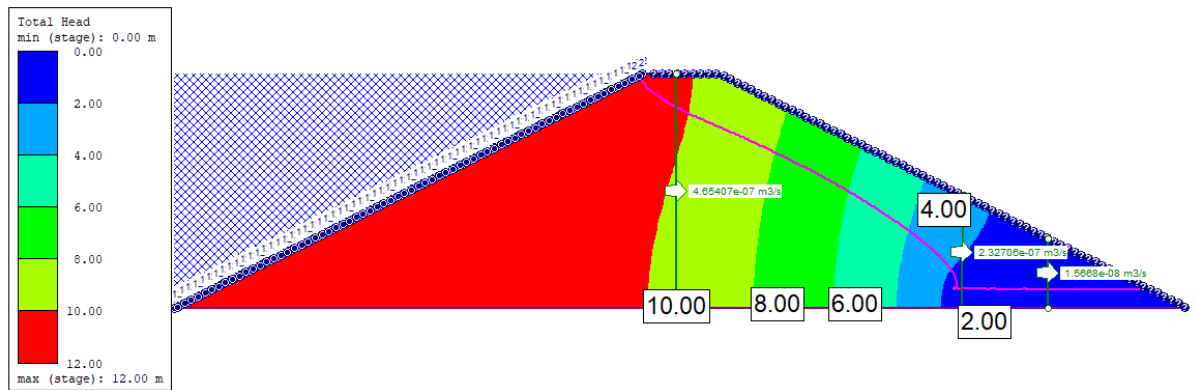


Figura 32. Resultado de modelo de flujo de agua en presencia de filtro con una malla uniforme de 6 nodos Triangular y 5000 elementos.

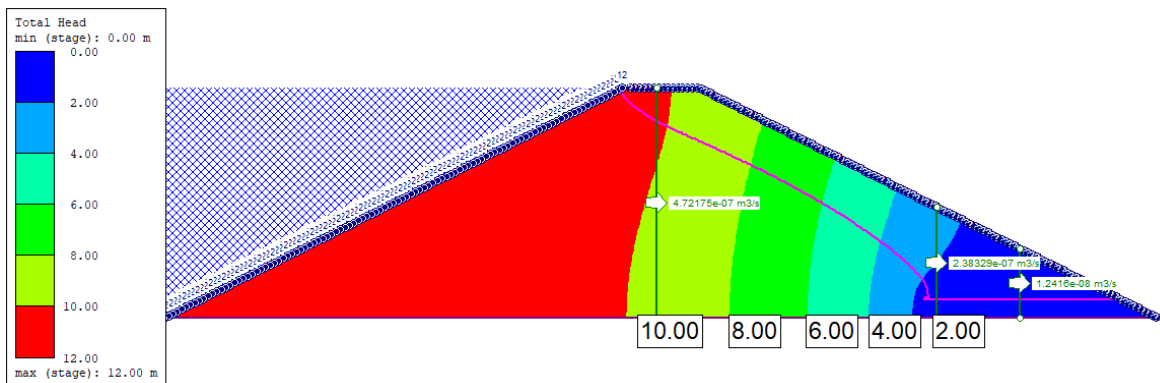


Figura 33. Resultado de modelo de flujo de agua en presencia de filtro con una malla uniforme de 4 nodos cuadrilátero y 5000 elementos.

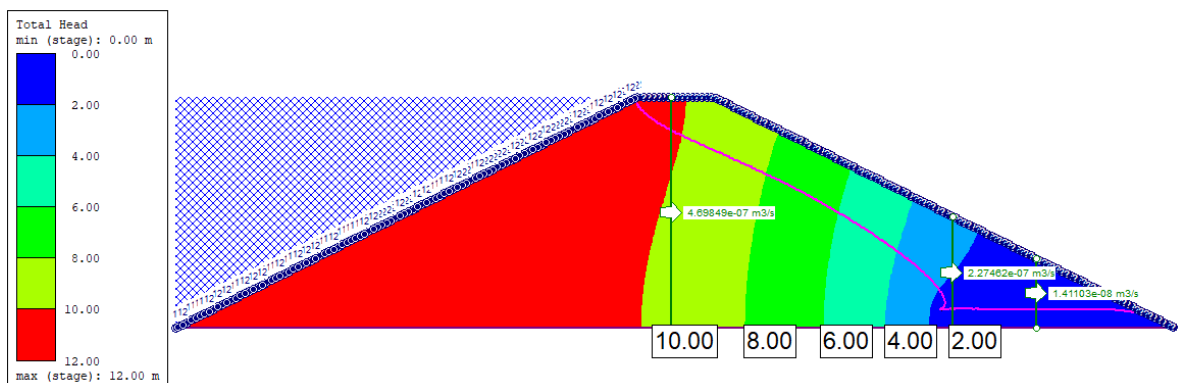


Figura 34. Resultado de modelo de flujo de agua en presencia de filtro con una malla uniforme de 8 nodos cuadrilátero y 5000 elementos.

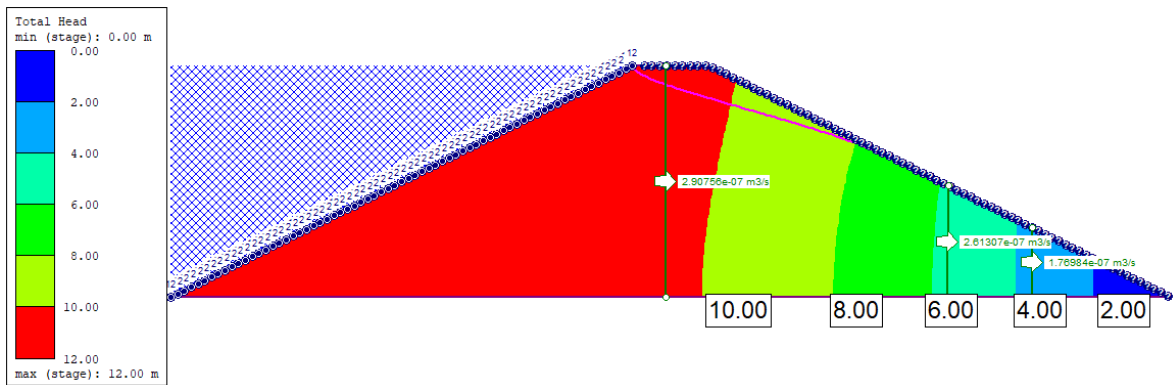


Figura 35. Resultado de modelo de flujo de agua en ausencia de filtro con una malla uniforme de 3 nodos triangular y 5000 elementos.

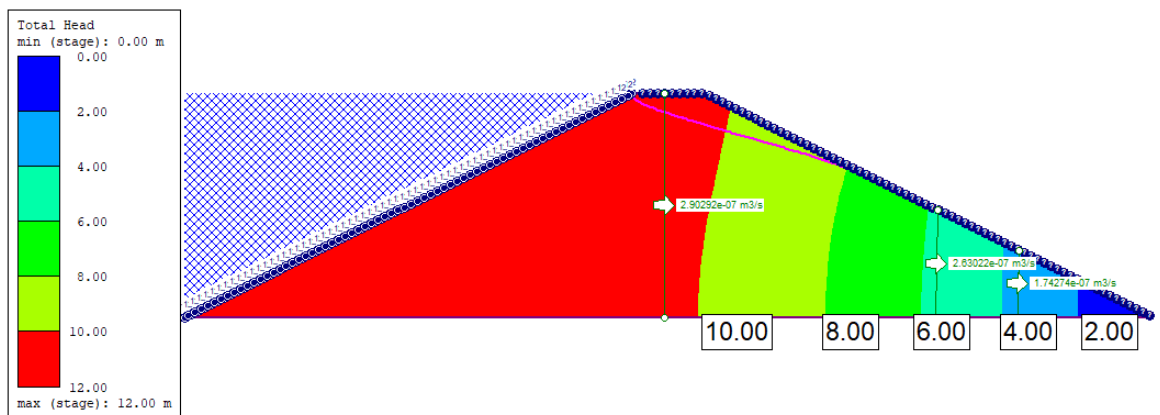


Figura 36. Resultado de modelo de flujo de agua en ausencia de filtro con una malla uniforme de 6 nodos triangular y 5000 elementos.

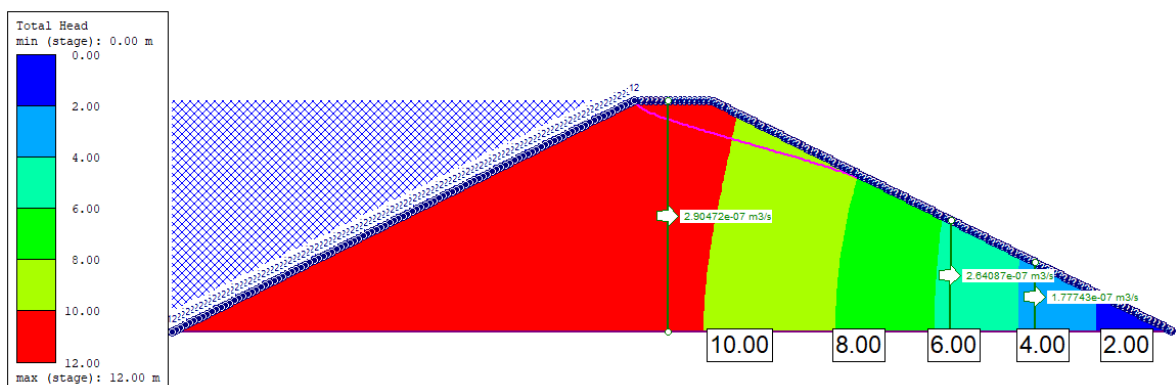


Figura 37. Resultado de modelo de flujo de agua en ausencia de filtro con una malla uniforme de 4 nodos cuadrilátero y 5000 elementos.

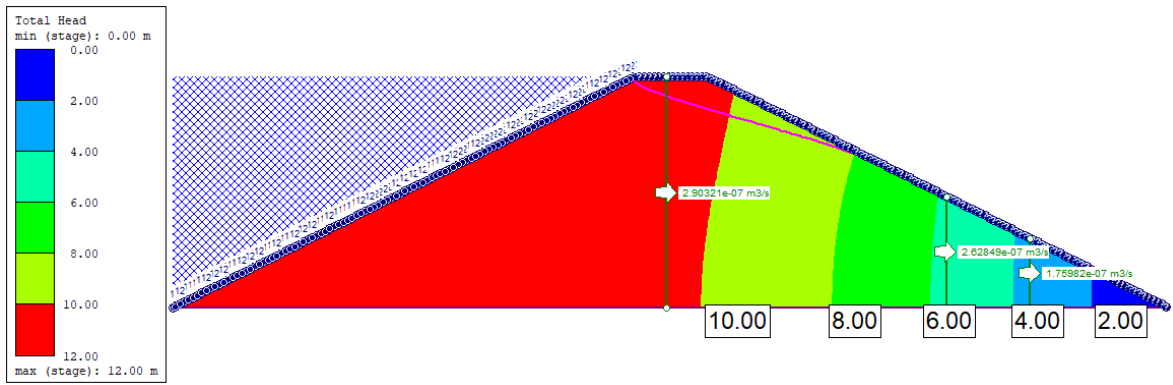


Figura 38. Resultado de modelo de flujo de agua en ausencia de filtro con una malla uniforme de 8 nodos cuadrilátero y 5000 elementos.

Modelos de Túnel

A continuación, presentamos el modelo de excavación simulando un túnel en roca con sus dimensiones.

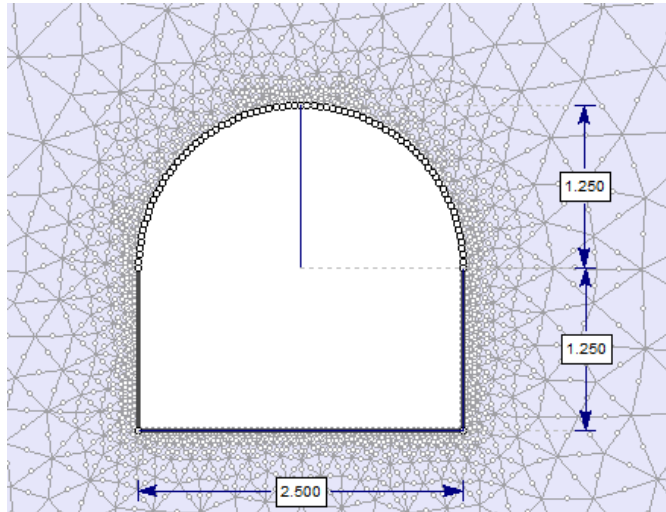


Figura 39. dimensiones de la excavación.

Teniendo el modelo de excavación en el software RS2, procedemos a realizar la simulación para determinar los valores de Esfuerzos, cuando se presenta esquinas rectas y esquinas perfiladas, con restricción en los dos sentidos. Los resultados de los modelos se presentan a continuación.

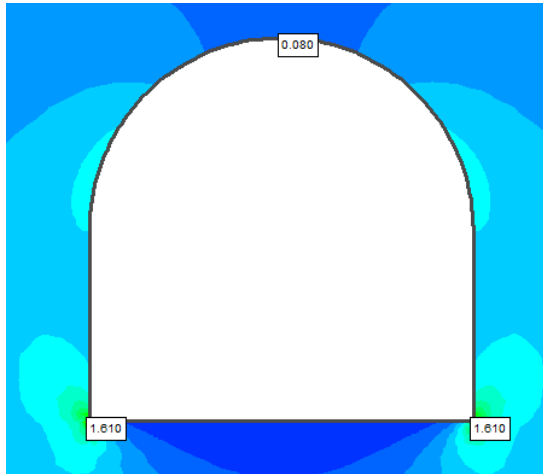


Figura 40. Esfuerzos verticales en túnel con esquinas rectas, con malla graduada y 6 nodos triangular y 200 elementos.

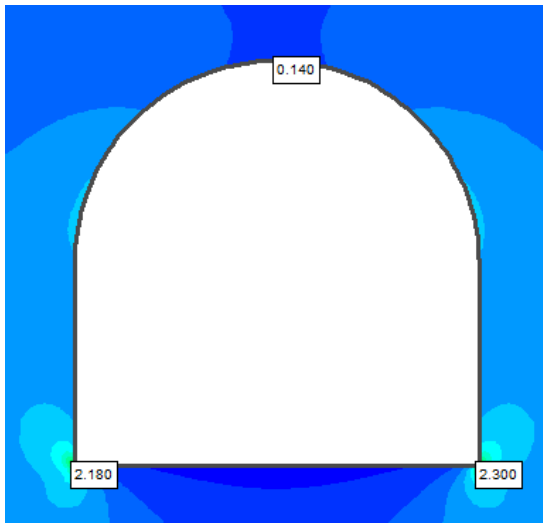


Figura 41. Esfuerzos verticales en túnel con esquinas rectas, con malla graduada y 6 nodos triangular y 600 elementos.

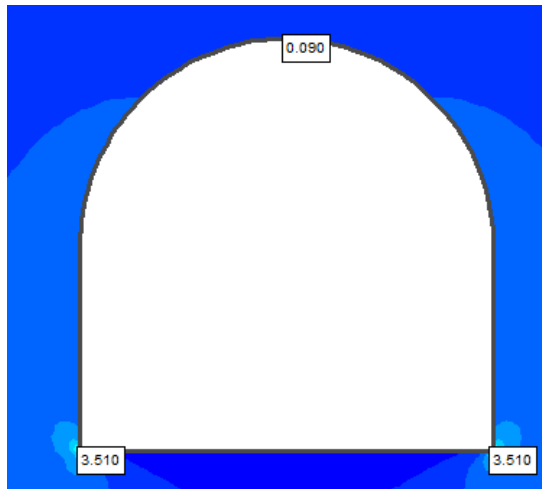


Figura 42. Esfuerzos verticales en túnel con esquinas perfiladas a 1 cm, con malla graduada y 6 nodos triangular y 200 elementos.

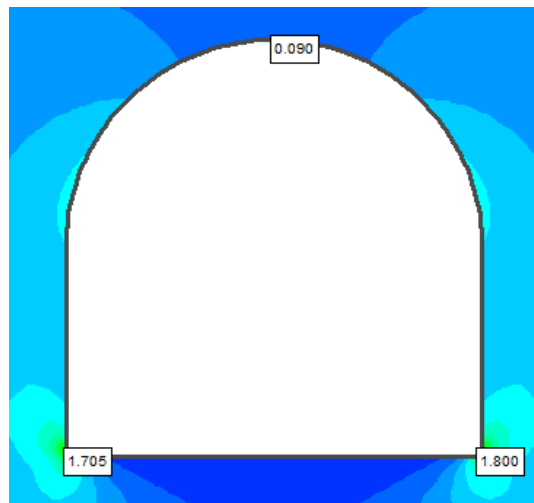


Figura 43. Esfuerzos verticales en túnel con esquinas perfiladas a 5 cm, con malla graduada y 6 nodos triangular y 200 elementos.

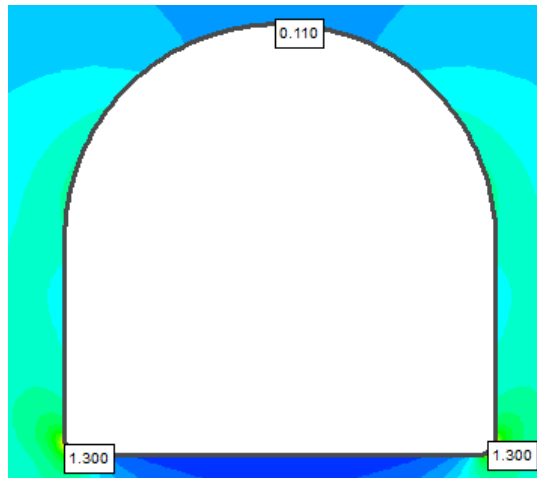


Figura 44. Esfuerzos verticales en túnel con esquinas perfiladas a 10 cm, con malla graduada y 6 nodos triangular y 200 elementos.