

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN  
ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE  
TÚNELES CIRCULARES SUPERFICIALES UTILIZANDO SIMULACIÓN  
NUMÉRICA**



Por:  
**Kevin Mauricio Barreto Riaño**  
**Juan Camilo Durán Moreno**



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO  
2020**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN  
ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE TÚNELES  
CIRCULARES SUPERFICIALES UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA**



Por:  
**Kevin Mauricio Barreto Riaño**  
**Juan Camilo Durán Moreno**

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional de ingeniero civil

Aprobado por:  
**Ing. Sergio Enrique Argüello Vera, MSc.**  
Director

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO  
2020**

## **AUTORIDADES ACADÉMICAS**

**Fray José Gabriel Mesa Ángulo, O.P.**  
Rector General

**Fray Eduardo González Gil, O.P.**  
Vicerrector Académico General

**Fray José Antonio Balaguera Cepeda, O.P.**  
Rector Sede Villavicencio

**Fray Rodrigo García Jara, O.P.**  
Vicerrector Académico Sede Villavicencio

**Julieth Andrea Sierra Tobón**  
Secretaria de División Sede Villavicencio

**Ing. Manuel Eduardo Herrera Pabón, MSc.**  
Decano Facultad de Ingeniería Civil

**Nota de aceptación**

ING. MANUEL EDUARDO HERRERA PABÓN  
Decano Facultad Ingeniería Civil

ING. SERGIO ENRIQUE ARGÜELLO VERA  
Director Trabajo de Grado

ING. LUIS FERNANDO DIAZ CRUZ  
Jurado

Villavicencio, 4 de agosto del 2020

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestro orientador, el ingeniero Sergio Enrique Argüello Vera por su comprensión, acompañamiento constante, enseñanza y su inmenso interés por este trabajo de grado.

A nuestro grupo de profesores e ingenieros del grupo de la facultad de Ingeniería Civil por su, siempre, disposición e interés en ayudarnos con dudas e inquietudes.

A nuestras familias que fueron esenciales ya que, de alguna manera, contribuyeron enormemente para que pudiéramos llegar a esta instancia de presentar este trabajo con éxito.

A nuestros compañeros de carrera por su acompañamiento y apoyo en los mejores y peores momentos en nuestra vida social.

Por último, y no menos importante, gracias a Dios todopoderoso por permitir que se pudiera ejecutar esta investigación y por permitirnos llegar hasta aquí.

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	17
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	18
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	18
3. JUSTIFICACIÓN	19
4. OBJETIVOS	21
4.1. OBJETIVO GENERAL	21
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
5. ALCANCE	22
6. MARCO DE REFERENCIA	23
6.1. MARCO TEÓRICO	23
6.1.1. ESTABILIDAD DEL FRENTE DE TÚNELES	23
6.1.2. DEFINICIÓN DE UN TÚNEL SUPERFICIAL	23
6.1.3. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS	26
6.1.3.1. EJECUCIÓN A CIELO ABIERTO	26
6.1.3.2. EJECUCIÓN SUBTERRÁNEA	26
6.1.4. NUEVO MÉTODO AUSTRIACO DE TÚNELES (NATM)	26
6.1.5. MÉTODO DE EXCAVACIÓN MECÁNICA CON TUNELADORAS	27
6.1.5.1. TUNELADORAS PARA ROCAS BLANDAS Y SUELOS: ESCUDOS	27
6.2. MARCO CONCEPTUAL	28
6.2.1. TIPO DE SOLUCIONES A PROBLEMAS GEOTÉCNICOS	28
6.2.1.1. SOLUCIÓN EXACTA	28
6.2.1.2. TEOREMA ANÁLISIS LÍMITE	28
6.2.1.3. TEOREMA LÍMITE SUPERIOR	28
6.2.1.4. TEOREMA DE LÍMITE INFERIOR	28
6.2.1.5. MODELOS NUMÉRICOS	29
6.2.1.6. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)	30
6.2.1.7. MODELOS FÍSICOS	31
6.2.2. FACTOR DE SEGURIDAD	31
6.2.3. STRENGTH REDUCTION FACTOR	32
6.3. ESTADO DEL ARTE	34
7. METODOLOGÍA	37
7.1. DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS	38
7.2. ETAPA 1: DEFINICIÓN DEL ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	38
7.3. ETAPA 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	38
7.4. ETAPA 3: SÍNTESIS DE SOLUCIONES ANALÍTICAS MEDIANTE UN PROGRAMA EJECUTABLE	38
7.5. ETAPA 4: MODELACIÓN NUMÉRICA 3D	38
7.6. ETAPA 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS	38
8. ETAPA 3: SÍNTESIS DE SOLUCIONES ANALÍTICAS MEDIANTE UN PROGRAMA EJECUTABLE	40
8.1. SOLUCIÓN ANALÍTICA PROPUESTA POR CARRANZA TORRES, T. REICH & D. SAFTNER (2013)	40

8.1.1. CAQUOT (1934) Y CAQUOT & KERISEL (1949)	40
8.1.2. CARRANZA TORRES, T. REICH & D. SAFTNER (2013)	43
8.2. VERIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE CARRANZA TORRES, C., T. REICH, & D. SAFTNER (2013)	44
8.3. SOLUCIÓN ANALÍTICA PROPUESTA POR ENRIQUE TAMEZ (1997)	47
8.4. VERIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE ENRIQUE TAMEZ (1997)	50
8.5. SOLUCIÓN ANALÍTICA PROPUESTA POR VERMEER, P.A., RUSE, N., MARCHER, T., (2002)	53
8.6. VERIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE VERMEER, P.A., RUSE, N., MARCHER, T., (2002)	55
8.7. SOLUCIÓN ANALÍTICA PROPUESTA POR QIUJING PAN & DANIEL DIAS (2017)	57
8.8. VERIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE Q. PAN & D. DIAS.	59
9. ETAPA 4: MODELACIÓN NUMÉRICA	62
9.1. VALIDACIÓN NUMÉRICA	62
9.2. SOLUCIÓN PANET PARA DESPLAZAMIENTOS LONGITUDINALES	62
9.2.1. VALIDACIÓN NUMÉRICA	62
9.3. SOLUCIÓN KIRSCH	65
9.3.1. VALIDACIÓN NUMÉRICA	66
9.3.1.1. CASO 1 Y 2	67
9.3.1.2. CASO 3	72
9.4. SOLUCIÓN SALENÇON	74
9.4.1. VALIDACIÓN NUMÉRICA	75
10. ETAPA 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS	77
10.1. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO EN 3D	77
10.1.1. DEFINICIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD UTILIZANDO LA TÉCNICA STRENGTH REDUTION FACTOR EN ABAQUS 6.14-2	77
10.1.2. MODELO NUMÉRICO PARA VALIDAR LA CONDICIÓN $L = 1D$	78
10.1.3. GEOMETRÍA DEL MODELO, MALLA DE ELEMENTOS Y ETAPAS DE LA EXCAVACIÓN	78
10.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS OBTENIDOS NUMÉRICAMENTE	80
10.2.1. PARA $L/D=1.0$	80
10.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA	82
10.3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS	92
10.4. REPRODUCCIÓN DE MODELOS FÍSICOS	95
10.4.1. CHAMBON E CORTÉ (1989)	95
10.4.1.1. VALIDACIÓN NUMÉRICA	95
10.4.1.2. RESULTADOS	96
11. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	98
11.1. CONCLUSIONES	98
11.2. TRABAJOS FUTUROS	99
BIBLIOGRAFÍA	100
ANEXOS	102

## LISTA DE TABLAS

TABLA 6.1. CARACTERIZACIÓN DE UN TÚNEL.....	25
TABLA 6.2. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO QUE SATISFACEN LOS DIFERENTES MÉTODOS DE ANÁLISIS (MODIFICADO DE POTTS,2003).....	29
TABLA 0.1. PARÁMETROS PARA LA VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE KIRSCH	66
TABLA 0.1. PARAMETROS UTILIZADOS EN EL MACIZO.....	78
TABLA 0.2. PROPIEDADES DE SOPORTE SIMULADO UTILIZADO EN ABAQUS 6.14-2.....	79
TABLA 0.3. VALORES DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE PARA SUELOS COHESIVOS DE DISTINTA PLASTICIDAD. ....	83
TABLA 0.4. VALORES DE ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO EN SUELOS GRANULARES NO PLÁSTICOS EN FUNCIÓN DE LA GRANULOMETRÍA. ....	83
TABLA 0.5. ESCENARIOS DE SUELOS COHESIVOS-FRICCIONANTES MODELADOS NUMÉRICAMENTE .....	84
TABLA 0.6. RESUMEN DE DATOS SRF VS DESPLAZAMIENTOS.....	84
TABLA 0.7. CONTORNOS DE DESPLAZAMIENTO PARA CASOS DE ESTUDIO .....	88
TABLA 0.8. RESUMEN DE RESULTADOS DE FS OBTENIDOS NUMÉRICAMENTE Y LOS ANALÍTICOS, OBTENIDOS MEDIANTE LA HERRAMIENTA DESARROLLADA EN EL PROGRAMA DE MATLAB.....	92
TABLA 0.9. PARÁMETROS DE ARENA FOINTANEBLAU .....	95



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 6.1. PRESIONES PRESENTES EN LA ESTABILIDAD DE UN TÚNEL.	23
FIGURA 6.2. ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA, PROPUESTO POR MIGUEL TRUZMAN.	24
FIGURA 6.3. DEFINICIÓN ANCHO EQUIVALENTE PARA UN TÚNEL SUPERFICIAL.	25
FIGURA 6.4. ESQUEMA MÉTODO CONSTRUCTIVO AUSTRIACO.	26
FIGURA 6.5. VISTA PERSPECTIVA DE UNA MODERNA TUNELADORA QUE SE UTILIZARÁ PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA FUTURA LÍNEA 9 DEL METRO EN BARCELONA.	27
FIGURA 6.6. MODELACIÓN REALIZADA EN ABAQUS 6.14-2 PARA LA VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN ANALÍTICA PROPUESTA POR KIRSCH	30
FIGURA 6.7. MODELO FÍSICO SISTEMA MECÁNICO DE PERFORACIÓN AVANCE DE TUNELADORAS TBM-EPB EN SUELOS BLANDOS	31
FIGURA 7.1. METODOLOGÍA DEL PROYECTO DE GRADO, ETAPAS Y TAREAS.	37
FIGURA 8.1. INTERFAZ GRÁFICA DEL PROGRAMA “SHACIT” ELABORADO CON ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN EN MATLAB.	40
FIGURA 8.2. SOLUCIÓN ESTÁTICAMENTE ADMISIBLE PROPUESTA POR CAQUOT (1934).	41
FIGURA 8.3. VISTA LATERAL DE LA ZONA DELANTERA DEL TÚNEL CERRADO POR LA SUPERFICIE ESFÉRICA PARA UNA PROPORCIÓN DE LONGITUD SIN SOPORTE Y EL RADIO DE TÚNEL $L/2r = 0.5$ ASUMIDO POR LA SOLUCIÓN DE CAQUOT Y KERISEL (1949).	42
FIGURA 8.4. EJEMPLO DE LONGITUD DE EXCAVACIÓN SIN SOPORTE DEL FRENTE DE TÚNEL CON CONSIDERACIÓN DE UNA CAVIDAD ESFÉRICA.	44
FIGURA 8.5. INTERFAZ GRÁFICA DE CARRANZA ET AL. Y DATOS DE ENTRADA EVALUADOS.	45
FIGURA 8.6. GRÁFICA DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA POR CARRANZA TORRES ET AL.	45

FIGURA 8.7. RESULTADOS OBTENIDOS DIRECTAMENTE DE MATLAB Y EL CÓDIGO ELABORADO, FS=1.0 PARA UN L/D=1.0.	46
FIGURA 8.8. EQUILIBRIO DEL MECANISMO DE FALLA SIMPLIFICADO DEL FRENTE DE EXCAVACIÓN.	47
FIGURA 8.9. FUERZAS QUE INTERVIENEN EN EL MECANISMO SIMPLIFICADO DEL EQUILIBRIO DEL FRENTE.	48
FIGURA 8.10. VARIABLES APLICADAS AL CASO DE SUELO SECO, PARA UN TÚNEL CIRCULAR SUPERFICIAL, ANALIZADO POR MEDIO DE LA SOLUCIÓN DE CARRANZA TORRES ET AL.	51
FIGURA 8.11. RESULTADOS DE FACTOR DE SEGURIDAD PARA LOS DIFERENTES CASOS DE SUELO CON SOLUCIÓN EXTENDIDA DE CAQUOT (PROPUESTA POR CARRANZA TORRES) Y RESULTADOS NUMÉRICOS DE UNA MODELACIÓN CON EL SOFTWARE FLAC.	51
FIGURA 8.12. INTERFAZ GRÁFICA DE ENRIQUE TAMEZ Y DATOS DE ENTRADA EVALUADOS.	52
FIGURA 8.13. GRÁFICA DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA POR ENRIQUE TAMEZ.	52
FIGURA 8.14. RESULTADOS OBTENIDOS DIRECTAMENTE DE MATLAB, FS=1.7815 PARA UN L/D=1.	53
FIGURA 8.15. A) CURVA TÍPICA DE PRESIÓN VERSUS DESPLAZAMIENTOS EN EL PUNTO DE CONTROL OBTENIDO POR VERMEER ET AL. (2002) B) RESULTADOS DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL MODELO TRIDIMENSIONAL ESTUDIADO POR VERMEER ET AL. (2002)	54
FIGURA 8.16. A) GRÁFICO $N\gamma$ VERSUS D/D PARA TÚNELES CON H/D>1 VARIANDO EL ÁNGULO DE FRICCIÓN. B) ESQUEMA GENERAL EN DOS DIMENSIONES DEL PROBLEMA ESTUDIADO POR VERMEER ET AL. (2002). FUENTE: ARTÍCULO “ESTABILIDAD DEL FRENTE DEL TÚNEL EN TERRENO DRENADO”. [17]	54
FIGURA 8.17. EJERCICIO DE APLICACIÓN DE LA PARTE SUPERIOR DEL TÚNEL RENNSTEIG EN TERRENO HOMOGÉNEO.	55

FIGURA 8.18. INTERFAZ GRÁFICA DE VERMEER ET AL. Y DATOS DE ENTRADA EVALUADOS.	56
FIGURA 8.19. GRÁFICA DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA POR VERMEER ET AL.	56
FIGURA 8.20. RESULTADOS OBTENIDOS DIRECTAMENTE DE MATLAB, FS=1.36 PARA UN L/D=0.2.	57
FIGURA 8.21. COMPARACIÓN DE LAS ECUACIONES PROPUESTAS POR VERMEER ET AL. (2002), DANIEL DIAS ET AL. (2017) Y SRM (THE STRENGTH REDUCTION METHOD) MÉTODO REALIZADO POR DIAS ET AL. (2017).	58
FIGURA 8.22. EL FACTOR DE SEGURIDAD EN FUNCIÓN DE COHESIONES NORMALIZADAS CON DIFERENTES ÁNGULOS DE FRICCIÓN.	59
FIGURA 8.23. INTERFAZ GRÁFICA DE DANIEL DIAS ET AL. Y DATOS DE ENTRADA EVALUADOS.	60
FIGURA 8.24. GRÁFICA DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA POR DANIEL DIAS ET AL.	60
FIGURA 8.25. RESULTADOS OBTENIDOS DIRECTAMENTE DE MATLAB, FS=1.289 PARA UN L/D=0.	61
FIGURA 9.1. GEOMETRÍA UTILIZADA EN LA VALIDACIÓN, SOLUCIÓN DE PANET	63
FIGURA 9.2. MALLA DE ELEMENTOS FINITOS UTILIZADA EN LA VALIDACIÓN, SOLUCIÓN DE PANET	64
FIGURA 9.3. DISTRIBUCIÓN DE DESPLAZAMIENTOS PARA EL MODELO 3D, SOLUCIÓN DE PANET	64
FIGURA 9.4 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL MODELO UTILIZADO EN ABAQUS 6.14-2 EN REPRESENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE KIRSCH	67
FIGURA 9.5 MALLA DE ELEMENTOS FINITOS UTILIZADA. (A) MALLA COMPLETA (B) ZOOM DEL ÁREA RESALTADA DE EXCAVACIÓN	68
FIGURA 9.6 RESUMEN DE LOS DESPLAZAMIENTOS TOTALES OBTENIDOS EN ABAQUS 6.14-2 PARA EL PRIMER ESTUDIO DE CASO AL EVALUAR EL RENDIMIENTO DEL SOFTWARE EN RELACIÓN CON LA SOLUCIÓN ANALÍTICA DE KIRSCH	69

FIGURA 9.7 CONTORNO DE TENSIONES RADIALES OBTENIDAS EN ABAQUS 6.14-2 PARA EL PRIMER ESTUDIO DE CASO AL EVALUAR EL RENDIMIENTO DEL SOFTWARE EN RELACIÓN CON LA SOLUCIÓN ANALÍTICA DE KIRSCH 70	
FIGURA 9.8 (A) GEOMETRÍA UTILIZADA EN LA MODELACIÓN (B) MALLA DE ELEMENTOS FINITO	72
FIGURA 10.1 LOCALIZACIÓN DE LOS NODOS DE INTERÉS	77
FIGURA 10.2 DATOS UTILIZADOS EN LA MODELACION INICIAL (A) CORTE LONGITUDINAL DE LA GEOMETRIA (B) MALLA DE ELEMENTOS FINITOS Y GEOMETRIA DEL MACIZO (CARRANZA-TORRES, ET AL. 2013)	78
FIGURA 10.3 MALLA DE ELEMENTOS FINITOS UTILIZADA Y DIMENSIONES DEL MODELO UTILIZADAS	80
FIGURA 10.4. COMPARACIÓN DE LA REGIÓN PLÁSTICA Y LOS CONTORNOS DE DESPLAZAMIENTOS OBTENIDOS INMEDIATAMENTE ANTES DE LA FALLA PARA $L/D=1.0$ .	81
FIGURA 10.5– GEOMETRÍA UTILIZADA NUMÉRICAMENTE REPRESENTANDO LOS ENSAYOS ELABORADOS POR CHAMBON E CORTÉ (1989)	96
FIGURA 10.6 – MECANISMOS DE RUPTURA PARA UN TÚNEL EXCAVADO CON RELACIÓN $C/D=1$ (A) RESULTADOS NUMÉRICOS (B) MODELO FÍSICO	97
FIGURA 10.7 – PRESIÓN NECESARIA PARA MANTENER LA ESTABILIDAD DEL FRENTE VS $C/D$ (A) ARENA COMPACTA (B) ARENA SUELTA	97

## GLOSARIO

### Letras Griegas y Latinas

<i>C</i>	Cobertura por encima del túnel
<i>c</i>	Cohesión del material
<i>c<sub>u</sub></i>	Resistencia no drenada
<i>D</i>	Diámetro del túnel
<i>E</i>	Módulo de Young
<i>H</i>	Profundidad del túnel
<i>L</i>	Longitud de excavación sin soporte
<i>v</i>	Coefficiente de Poisson
$\phi$	Angulo de fricción del material
$\psi$	Angulo de dilatancia
$\gamma$	Peso específico del suelo
<i>q<sub>s</sub></i>	Sobrecarga superficial
<i>p<sub>s</sub></i>	Presión aplicada en el frente de túnel

### Siglas

<i>2D</i>	Dos dimensiones
<i>3D</i>	Tres dimensiones
<i>C3D20R</i>	Elemento tridimensional cuadrático de 20 nudos con integración reducida (ABAQUS 6.14-2)
<i>CPE8R</i>	Elemento bidimensional de 8 nudos, deformación plana e integración reducida (ABAQUS 6.14-2)
<i>FS</i>	Factor de Seguridad
<i>NATM</i>	Nuevo Método Austriaco de Túneles

***SRF***      Strength Redution Factor

***TBM***      Tunnel Boring Machine

## RESUMEN

Al momento de diseñar tuneles poco profundos, un problema importante es la estabilidad del frente de excavación durante la etapa de construcción. Debido a la poca profundidad, eventuales inestabilidades pueden conducir fácilmente a fallas con graves consecuencias en la superficie, hay muchos factores involucrados en este evento, como lo son: los parámetros de resistencia, sobrecarga en la superficie, profundidad del túnel y la longitud de excavación sin soporte (L). Para analizar estos factores se desarrolla un algoritmo de programación en el software Matlab con las teorías analíticas de varios autores, entre los que se destacan Carranza Torres et al. (2013) y Enrique Tamez (1997). De igual manera, el análisis se complementa con una serie de modelaciones en el software ABAQUS 6.14-2, con el fin de generar un análisis de sensibilidad de los parámetros de resistencia (cohesión y fricción) y con ayuda de la metodología Strength Reduction Factor (SRF) llegar a calcular un factor de seguridad (FS) numérico. Definiendo así que el parámetro de resistencia más influyente en la estabilidad de un túnel circular superficial es la cohesión y evidenciando que, persiste una relación directamente proporcional entre estos parámetros de resistencia y el FS.

**Palabras Clave:** Elementos finitos, excavación, factor de reducción de la fuerza, longitud de excavación sin soporte, modelación numérica, túnel.

## ABSTRACT

An important problem, analyzed when designing shallow tunnels, is the stability of the excavation face during the construction stage. Due to the shallow depth, eventual instabilities can easily lead to faults with serious consequences in the surface, there are many factors involved in this event, such as: resistance parameters, surface overload, tunnel depth and excavation length without support (L). To analyze these factors, a programming algorithm is developed in the Matlab software with the analytical theories of several authors, among which Carranza Torres et al. (2013) and Enrique Tamez (1997). Similarly, the analysis is complemented with a series of modeling in the ABAQUS 6.14-2 software, in order to generate a sensitivity analysis of the resistance parameters (cohesion and friction) and with the help of the Strength Reduction Factor methodology (SRF) get to calculate a factor of safety (FS). Defining thus that the most influential resistance parameter in the stability of a superficial circular tunnel is cohesion and showing that a directly proportional relationship persists between these resistance parameters and the FS.

**Key Word:** Finite elements, excavation, strength reduction factor, unsupported excavation length, numerical modeling, tunnel.



## 1. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de proyectos de infraestructura vial, se están implementando cada vez más túneles que contribuyan en la disminución de tiempos de viaje para los usuarios. La ejecución de este tipo de obras en su construcción, se puede dividir en tres etapas: excavación, instalación de soporte y entrega final. [1]

La etapa de excavación se refiere al proceso empeñado a romper la compacidad del suelo por medio de herramientas y elementos convenientes que hacen posible su remoción. Dentro de las técnicas de excavación los procedimientos se pueden dividir en dos grupos: excavación convencional o excavación mecanizada. [1]

Durante la construcción de un túnel, una de las mayores preocupaciones en seguridad reside en la estabilidad del frente de excavación, en donde se busca evitar una ruptura en el macizo hasta la superficie, también llamada falla global, y prevenir riesgos al frente del trabajo y maquinaria, relacionada a una falla local. [2] Debido a estos factores se han propuesto modelos matemáticos, de parte de varios autores para predecir el comportamiento del frente de excavación de túneles superficiales, como lo son: Carranza Torres et al (2013), Enrique Tamez (1997), Vermeer et al (2002) y Daniel Dias et al (2017).

Se debe resaltar que para el análisis de la superficie en función de la estabilidad del frente es usado significativamente el método de Terzaghi para excavación en galerías donde se analiza geoméricamente el comportamiento del mecanismo de rotura y dado que es analizado geoméricamente este puede ser definido por el parámetro de cobertura (C) sobre el diámetro del túnel circular (D), y la longitud de la excavación sin soporte (L), (Ver Figura 6.1). [2] Aun así, no existe a ciencia cierta un modelo que contemple una gran variedad de condiciones geotécnicas.

En el presente trabajo de investigación se desarrolló un algoritmo de programación en el programa Matlab de las diferentes soluciones existentes en la literatura con el fin de analizar el comportamiento que presenta el frente de excavación en túneles superficiales, así mismo se realizó una serie de modelaciones numéricas mediante el software ABAQUS 6.14-2 en donde se varían los parámetros de resistencia del suelo de acuerdo al criterio de Mohr Coulomb (cohesión y ángulo de fricción) para analizar la influencia que presentan en la estabilidad del frente de excavación de un túnel de naturaleza superficial. También, se realizó un análisis comparativo entre los resultados obtenidos de esta modelación numérica con modelos físicos ya existentes, elaborados en laboratorio por autores como Atkinson J.H, Potts D.M y Schofield A.N. En donde se demostró la similitud entre los resultados obtenidos mediante un análisis de los factores más influyentes en la estabilidad de un túnel circular raso.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La construcción de túneles y obras subterráneas, es una actividad que históricamente, desde finales del siglo XIX con la implementación de túneles ferroviarios, ha tenido un desarrollo considerable y se ha visto, actualmente, aun mas impulsada por las exigencias de grandes obras de ingeniería del siglo XXI. [3] La localización de las obras subterráneas en zonas urbanas y la presencia de perfiles geológicos más complejos son algunas de las consecuencias por las cuales las condiciones de excavación han venido tornándose más difíciles. Un ejemplo de esto es que, dentro de lo que respecta a perfiles geológicos complejos, al momento de iniciar la excavación, se pueden presentar dos estados en el frente del túnel; un terreno heterogéneo con dos o más tipos de terreno de características distintas, o un macizo rocoso en función de las propiedades de la roca, su calidad y su estado tensional. [4]

Se puede llegar a creer que todas las dificultades y problemáticas de la estabilidad del frente de un túnel y su comportamiento geotécnico, han llegado a tener una amplia investigación para la búsqueda de soluciones de los diferentes casos que se pueden llegar a presentar durante el proceso de excavación, pero dentro del “Catalogue of Notable Tunnel Failures Case Histories” se evidencian 27 casos, de 64 de los que se tiene registro en todo el mundo, donde persisten fallas considerables en el proceso de construcción de túneles. Como ocurrió con el Proyecto de Tránsito de Tren Ligero de Ottawa, Canadá, en 2014 donde se produjo un movimiento de tierra a través de la corona del túnel produciendo la formación de un sumidero en presencia de material de arcilla arenosa. [5] Probablemente, esto sea un indicador de que, para comprender la estabilidad del frente de un túnel todavía se carece de investigación y por ende, los casos aumentan por desconocimiento de un oportuno control y seguimiento.

A pesar de que, varios autores han elaborado propuestas teóricas, estas se han centrado en casos específicos o son un estudio de un caso muy concreto. Provocando que, en relación con la práctica, los cálculos analizados no coincidan con los resultados en obra. [4]

### 2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo a lo expuesto en el ítem 2.1, se formula la pregunta ¿Qué se debe analizar y estudiar para contribuir en la investigación del estudio de los suelos en el proceso de construcción del frente de un túnel circular superficial evitando la construcción en físico de un modelo a escala que genere altos gastos económicos en esta investigación?

### 3. JUSTIFICACIÓN

A raíz de que en la actualidad se presentan continuamente necesidades de infraestructura vial, búsqueda de facilidades de comunicación en zonas urbanas, contención de inundaciones o abastecimiento de agua, la excavación de túneles cercanos a la superficie va adquiriendo más auge y, acarrea en su construcción, tener en cuenta la seguridad de trabajadores y estabilidad de la obra.

Por esta razón, se vienen elaborando modelos y métodos numéricos desde Terzaghi en 1925, con el fin de analizar el comportamiento de la estabilidad del frente de excavación de un túnel en suelo blando. Sin embargo, estas soluciones analíticas: cubren un caso en específico, los estudios son generalizados, el comportamiento de tensiones es desconocido o se analizaron tan solo mecanismos de rotura particulares. [1]

Posiblemente, el desconocimiento a ciencia cierta, del comportamiento de perfiles geológicos de suelos blandos en el frente de excavación, pudo ser la causa de la variedad de incidentes que, a través de la historia de la construcción de túneles, se generaron en proyectos de excavación subterránea. Incluso, existen varios registros de incidentes en el “Catalogue of Notable Tunnel Failures” [5], donde se pueden encontrar gran cantidad de fallas, producto del desconocimiento del suelo, como se ha venido registrando desde mediados del siglo XIX hasta la actualidad.

Siendo así, es de vital importancia analizar el caso del colapso del túnel excavado en la ciudad de Rastatt en Alemania en Agosto de 2017, en donde se hace uso de tuneladoras TBM-EPB (Tunnel Boring Machine – Earth Pressure Balance) y además, también asocian técnicas de congelamiento de suelo; aconteciendo un desprendimiento de suelo en una zona de túnel por donde la tuneladora tipo EPB había pasado de manera segura pero que a causa de vibración excesiva, intercambio de calor entre el proceso de excavación con el tratamiento de suelo congelado y pérdida de presión ejercida por los gatos hidráulicos de empuje de la tuneladora provoca un hundimiento de 50 cm en las carrileras de las líneas ferroviarias produciendo la interrupción en el tráfico de trenes por más de dos meses y una pérdida económica considerable. [6] Entonces, se puede llegar a pensar que sí en un país con un historial más amplio en investigación, experiencia e innovación en implementación de proyectos de este tipo de obras civiles, como Alemania se siguen presentando problemas en la etapa de excavación, en un país como Colombia, donde los presupuestos asignados para proyectos de infraestructura vial o investigación son limitados, imprevistos de mayor gravedad se puedan generar por falta de inversión en la previa investigación y análisis del suelo próximo a una excavación.

Para Salvador Senent Domínguez, las modelaciones numéricas representan un alto costo en cuanto a requerimientos de memoria de un equipo y elaboración del mismo por el tiempo que requieren para lograr hacerlos funcionar. Sin embargo, al poder alterar estratos de suelo y sus propiedades, las modelaciones numéricas permiten abarcar casi todas las situaciones que se puedan presentar en un proyecto de un túnel y comparado con la implementación de modelos físicos, las modelaciones resultan económicamente

más favorables. [4] Siendo así y dado que la Universidad Santo Tomás adquirió a lo largo del presente año una licencia para el uso del software ABAQUS 6.14-2 versión 6.14-2 e incentivando el aprovechamiento de los recursos institucionales que se prevén para la comunidad educativa, este proyecto de grado implementará el software para la elaboración de los análisis de estabilidad del frente de excavación por medio de una modelación de un túnel circular superficial. Dejando como resultado un aporte al conocimiento del comportamiento del mismo, a través de un artículo donde se argumente, se expongan resultados y se produzcan conclusiones.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. OBJETIVO GENERAL**

Analizar los factores que influyen en la estabilidad del frente de túneles circulares superficiales mediante simulación numérica.

### **4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar diferentes soluciones existentes en la literatura para evaluar la estabilidad del frente de un túnel circular raso y compilarlas en un algoritmo de programación.
- Establecer el factor de seguridad del frente de excavación utilizando la técnica numérica Strength Reduction Factor.
- Realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros de resistencia del suelo de acuerdo al criterio Mohr Coulomb (cohesión, ángulo de fricción) con respecto al factor de seguridad.
- Comparar los resultados obtenidos en las modelaciones numéricas con modelos físicos existentes en la literatura presentados por Chambon e Corté (1989).

## **5. ALCANCE**

La investigación de este proyecto de grado se centra específicamente en el análisis de la estabilidad de túneles circulares superficiales y basados en los objetivos planteados se deben elaborar ciertos procesos que faciliten el cumplimiento de los mismos por medio de las siguientes actividades:

- Luego de la revisión teórica, se realizará un modelo de simulación numérica en el software ABAQUS 6.14-2 , en el cual se analizará como la variación de los parámetros afecta la estabilidad del frente de un túnel circular superficial.
- Se elaborará un análisis de sensibilidad donde se pueda observar como el factor de seguridad varía para cada parámetro de resistencia (cohesión y ángulo de fricción).
- Se establecerá el factor de seguridad de la excavación con ayuda de la modelación numérica, incluyendo parámetros de estabilidad del frente del túnel, por medio de la metodología Strength Reduction Factor.
- Los resultados se compararán con los modelos físicos presentados por Chambon e Corté (1989). Esto, con el propósito de verificar la precisión de los análisis y la veracidad de los resultados.

## 6. MARCO DE REFERENCIA

Se presentan los conceptos básicos y necesarios para comprender el objetivo de la investigación, los procesos realizados y términos desconocidos. En conjunto con otras definiciones importantes que, a continuación, se exponen en este capítulo.

### 6.1. MARCO TEÓRICO

#### 6.1.1. Estabilidad del frente de túneles

En el proceso de construcción de un túnel, existen variables mecánicas propias del suelo que influyen en la estabilidad del túnel en el frente de excavación, ya que, el medio de soporte de este, se ve sometido a presiones ocasionadas por las capas de suelo en el frente y en la cobertura (parte superior). Adicionalmente, se suman a estas las presiones producidas por el agua siempre y cuando el eje del túnel se encuentre por debajo del nivel freático, todas las presiones anteriores, (Ver Figura 6.1) contribuyendo a la desestabilización del material del terreno. [7]

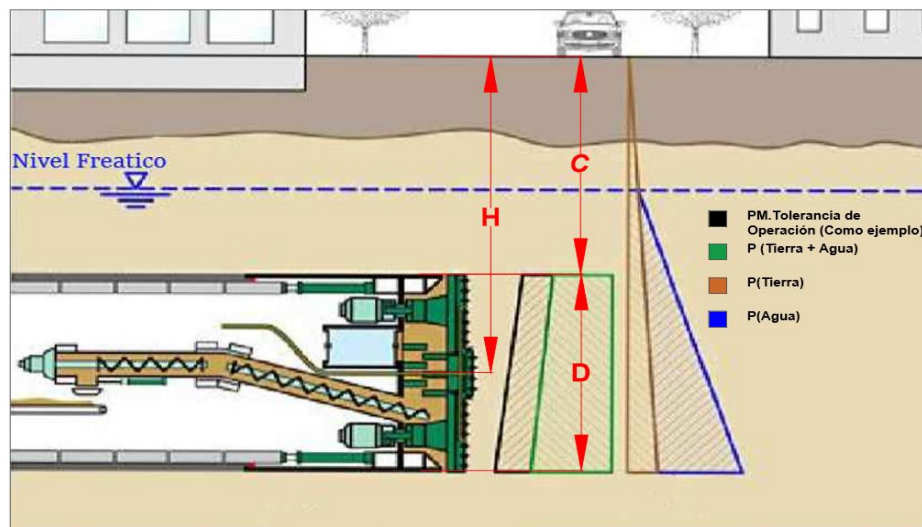


Figura 6.1. Presiones presentes en la estabilidad de un túnel.

Fuente: "Estudio teórico del mecanismo tridimensional de falla del frente de túneles poco profundos en suelo". [7] – Modificado por el autor.

#### 6.1.2. Definición de un túnel superficial

Inicialmente, para clasificar un túnel superficial se debe tener conocimiento del concepto de índice de resistencia geológica (GSI), propuesto por Hoek (1994) quien, clasifica los macizos rocosos en un rango entre 0 y 100, en función de las características que estos tienen en campo. En la Figura 6.2, se puede apreciar la versión al castellano de la clasificación de macizos rocosos propuesta por el geólogo Miguel Truzman. [8]

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE TÚNELES CIRCULARES SUPERFICIALES UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA

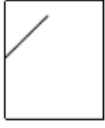


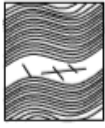
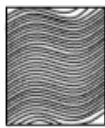

INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (GSI) PARA LAS ROCAS METAMORFICAS DE LA CORDILLERA DE LA COSTA DE VENEZUELA	CONDICIÓN DE LA SUPERFICIE				
	MUY BUENA Rugosa, superficies cerradas sin meteorización	BUENA Rugosa, ligeramente meteorizada, abertura < 1mm, rellenos duros	MEDIA Plana, moderadamente meteorizada, abertura 1.5 mm, rellenos duros y blandos	MALA Espejos de falla, superficies muy meteorizadas con aberturas > 5 mm, predominan los rellenos blandos	MUY MALA Espejos de falla, superficies muy meteorizadas y abiertas con rellenos blandos
ESTRUCTURA					
 <b>INTACTA O MASIVA</b> - macizo rocoso con pocas discontinuidades, carentes de planos de foliación Ej. Cuarzitas, anfibolitas o mármoles	90	80	N/A	N/A	N/A
 <b>POCO FOLIADA</b> - macizo rocoso parcialmente fracturado con hasta tres sistemas de discontinuidades. Puede contener intercalaciones delgadas de rocas foliadas Ej: Cuarzitas fracturadas intercalada ocasionalmente con esquistos y/o filitas		70			
 <b>MODERADAMENTE FOLIADA</b> - macizo rocoso fracturado, donde predominan las rocas foliadas, con ocasionales intercalaciones de rocas no foliadas Ej: Intercalaciones de esquistos y/o filitas con mármoles fracturados en proporción similar		60			
 <b>FOLIADA</b> - macizo rocoso plegado y/o fallado, muy fracturado, donde predominan las rocas foliadas, con ocasionales intercalaciones de rocas no foliadas Ej: Esquistos y/o filitas muy fracturadas intercaladas ocasionalmente con mármoles lenticulares		50	40	30	
 <b>MUY FOLIADA</b> - macizo rocoso plegado, altamente fracturado, constituido únicamente por rocas muy foliadas Ej: Esquistos y/o filitas muy fracturadas sin la presencia de mármoles, gneises o cuarzitas				20	
 <b>BRECHADA/CIZALLADA</b> - macizo rocoso muy plegado, alterado tectónicamente, con aspecto brechoide Ej: Brecha de falla o zona influenciada por fallas cercanas	N/A	N/A			10
					5

Figura 6.2. Índice de resistencia geológica, propuesto por Miguel Truzman. Fuente: “Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia (1999)”. [8]

La disminución de este índice de resistencia, representa un incremento en las características elástico-plásticas y una menor calidad del macizo rocoso. Por lo tanto, según el Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia (1999), un macizo rocoso se define mediante un GSI  $\geq 25$ . Mientras que, para un suelo, el índice GSI sería menor a 25. [8]

Perri (1999), caracteriza un túnel superficial por medio de la distancia comprendida desde la superficie del terreno hasta la corona del túnel circular, definición propia de lo que conocemos como cobertura (C). Haciendo uso del método de Terzaghi, define un ancho



equivalente (B) trazando dos líneas verticales, separadas por el diámetro del túnel (D), las cuales llegan hasta la base horizontal de la circunferencia. Seguidamente, desde los puntos donde terminaron las líneas verticales anteriores, se proyectan dos diagonales hasta la superficie, con un ángulo igual a  $45 + \phi/2$  desde la horizontal. Por último, se dibuja una línea tangencial horizontal desde la mitad de la corona del túnel hasta las diagonales, (Ver Figura 6.3) [8]

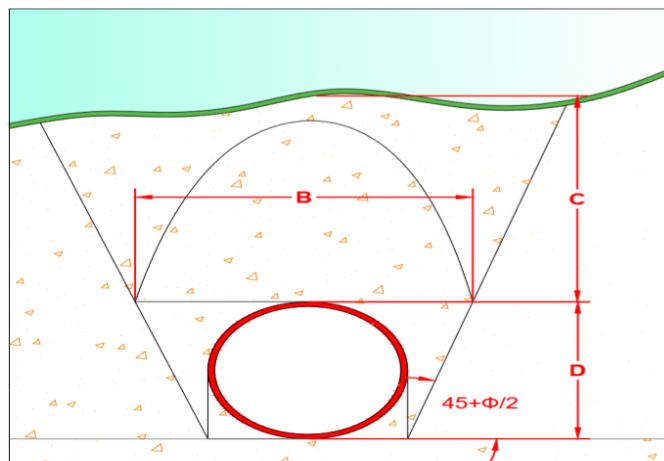


Figura 6.3. Definición ancho equivalente para un túnel superficial.  
Fuente: Autor.

La distancia de esta línea tangente, entre los dos puntos donde se intersecaron con las diagonales, será el ancho equivalente (B). Con él, Perri (1999) define unas relaciones entre cobertura, ancho equivalente y diámetro que permiten clasificar un túnel en: profundo, intermedio y superficial, para un suelo y para un macizo rocoso, (Ver Tabla 6.1). [8]

Tabla 6.1. Caracterización de un túnel.

CLASIFICACIÓN DE LA EXCAVACIÓN POR CAPA DE COBERTURA		
	<b>GSI <math>\geq 25</math></b>	<b>GSI <math>&lt; 25</math></b>
<b>Superficial</b>	$H \leq D_i$	$C \leq B$
<b>Intermedio</b>	$D_i < C \leq 2.5D_i$	$B < C \leq 2.5B$
<b>Profundo</b>	$C > 2.5 D_i$	$H > 2.5B$

Fuente: "Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia (1999)". [8]

Donde la cobertura del túnel está representada con la letra (C), El diámetro interno del túnel circular con (D<sub>i</sub>), la profundidad del túnel circular superficial con (H) y el ancho equivalente con la letra (B).

Por lo tanto, de la tabla anterior se puede definir a un túnel circular superficial, como aquel que tiene su cobertura menor o igual a su ancho equivalente y para macizos rocosos aquel que tiene su profundidad menor o igual al diámetro del túnel.

### 6.1.3. Sistemas constructivos

#### 6.1.3.1. Ejecución a cielo abierto

En el primer sistema se aplica el método “cut and cover”, que consiste en la construcción de un túnel con técnicas de los trabajos a cielo abierto, que como su nombre indica, consiste en abrir o cortar el terreno desde la superficie, construir lo que posteriormente será el túnel, tapas y cubrir el terreno excavado y restituirle como estaba en su estado original. [3]

#### 6.1.3.2. Ejecución subterránea

El primer planteamiento es la realización de la excavación a sección completa o a secciones parciales, para evitar el colapso del túnel debido a hundimientos o a falta de estabilidad del frente de excavación, criterios fundamentales para la selección de los métodos constructivos. [3]

### 6.1.4. Nuevo Método Austriaco de túneles (NATM)

Este es el método de ejecución subterránea más conocido y utilizado que, consiste en excavar grandes secciones de túnel permitiendo que el terreno se auto-sustente, es decir, que el terreno forme un anillo de descarga en el perímetro de la excavación (Ver Figura 6.4), permitiendo su deformación hasta un punto de equilibrio. Inmediatamente después, se coloca un revestimiento con el objetivo de proteger la superficie excavada y controlar dicha deformación. [3]



Figura 6.4. Esquema método constructivo Austriaco.

Fuente: Libro “Geotecnia aplicada a la construcción de túneles”. [9]

Este procedimiento exige una detallada auscultación de las tensiones y de las deformaciones del terreno, a partir de las cuales, se aplica el revestimiento más adecuado. Comenzó a utilizarse en los túneles en roca alpinos (1962), y se ha ido

aplicando poco a poco a suelos blandos, lo que ha provocado en numerosas ocasiones colapsos y hundimientos de gran magnitud. [3]

#### 6.1.5. Método de excavación mecánica con tuneladoras

La denominación genérica de un equipo de excavación mecánica de túneles a sección completa tiene dos acepciones: tuneladoras o TBM. [3]

La ingeniería de túneles ha progresado de forma significativa durante el siglo XX y el presente siglo XXI. Entre los principales factores que han contribuido decisivamente a este avance se encuentra en relación con la excavación, la mejora en las técnicas de voladuras, la introducción de nuevos equipamientos y maquinaria, como lo son las máquinas tuneladoras, apreciable en la Figura 6.5, las rozadoras o tuneladoras de ataque puntual, escudos, entre otros. [9]



Figura 6.5. Vista perspectiva de una moderna tuneladora que se utilizará para la construcción de la futura línea 9 del Metro en Barcelona.

Fuente: Libro “Geotecnia aplicada a la construcción de túneles”. [9]

##### 6.1.5.1. Tuneladoras para rocas blandas y suelos: escudos

El escudo es una máquina que incorpora siempre un sistema integral de protección, normalmente una carcasa metálica exterior, para trabajar en terrenos inestables. Este elemento sostiene provisionalmente el terreno desde el frente de avance hasta donde se coloca el sostenimiento definitivo, garantizando en todo momento la seguridad de los trabajadores y la estabilidad de la excavación del túnel. [3]

## 6.2. MARCO CONCEPTUAL

### 6.2.1. Tipo de soluciones a problemas geotécnicos

#### 6.2.1.1. Solución exacta

No se tiene conocimiento de una metodología o un método numérico con el cual se puedan obtener resultados exactos y precisos en relación con la vida real.

#### 6.2.1.2. Teorema análisis límite

El análisis establece la presión necesaria que deberá tener el frente de excavación para garantizar la estabilidad del túnel teniendo en cuenta la relación tenso-deformacional del suelo, proporcionando así la estimación de dos soluciones (Límite Superior y Límite Inferior) que especifiquen el valor real de la carga de colapso. [1]

Con el fin de determinar la presión superior o presión inferior de colapso, este teorema se apoya en estas dos soluciones. Por lo tanto, estos teoremas (Límite Superior y Límite Inferior) fueron establecidos teniendo en cuenta la admisibilidad de los campos de tensiones y campos de velocidades. [1]

#### 6.2.1.3. Teorema límite superior

En esta solución el suelo es modelado de tal manera que represente bloques rígidos que puedan deslizarse en contacto entre sí a través de una superficie. Por lo tanto, el trabajo de las fuerzas externas debe ser superior al producido por las fuerzas resistentes internas para que se produzca el deslizamiento. [1]

Las soluciones basadas en este teorema de límite superior dependen del nivel apropiado en el que el mecanismo de ruptura se ajusta para semejarse a la realidad de la problemática estudiada, debido a que el grado de precisión no es conciso. [1]

#### 6.2.1.4. Teorema de límite inferior

Este tipo de solución según (Wai-Fah Chen, 1975) el campo de tensiones se determina como estáticamente admisible y plásticamente admisible si cumple la condición de equilibrio en todos los puntos, satisface la condición de carga en el contorno y si la carga que se está ejerciendo no es mayor a la carga de colapso. [1]

Por lo tanto, si un estado de tensiones cumple con estas condiciones, el cuerpo se encuentra en un estado próximo de ruptura o aún no ha fallado. Para esto la carga actuante ( $P_e$ ), debe ser menor o igual a la carga de ruptura ( $P_c$ ). (Ver Ecuación 1)

$$P_e \leq P_c$$

Ecuación 1

La carga estabilizadora ( $P_i$ ) referente a la presión interna, debe ser mayor o igual a la carga actuante ( $P_e$ ). (Ver Ecuación 2)

$$P_i \geq P_e \quad \text{Ecuación 2}$$

La información relacionada con cada método para el diseño se presenta en la Tabla 6.2, proporcionada por (Potts y Zdravkovic, 1999) en la cual (S) representa la satisfacción de la condición y (NS) no satisface.

Tabla 6.2. Requerimientos de Diseño que satisfacen los diferentes métodos de análisis (modificado de Potts,2003)

Requerimientos en la solución					
Método de análisis	Equilibrio	Compatibilidad	Ley constitutiva	Condiciones de borde	
				Fuerzas	Desplazamientos
Solución Analítica	S	S	Elástico-Lineal	S	S
Equilibrio Límite	S	NS	Rígido con criterio de falla	S	NS
Campo Tensorial	S	NS	Rígido con criterio de falla	S	NS
Análisis Límite (Límite-Inferior)	S	NS	Plasticidad perfecta con ley de fluencia asociativa	S	NS
Análisis Límite (Límite-Superior)	NS	S		NS	S
Métodos Numérico	S	S	Cualquiera	S	S

Fuente: Libro "Finite element analysis in geotechnical engineering". [10]

#### 6.2.1.5. Modelos numéricos

Los métodos numéricos se recurren cuando las soluciones exactas no son totalmente aplicables debido a condiciones de contorno o de frontera. Los modelos numéricos reciben una parte de la información obtenida en el modelo geológico y el modelo geo mecánico. [11]

El objetivo de la aplicación de los modelos numéricos es el análisis tenso-deformacional, obtenidos una vez finalizadas las condiciones de contorno del problema [11], ejemplo de esto es la validación de soluciones analíticas existentes por medio de modelaciones numéricas. (Ver Figura 6.6)

En la actualidad, la ventaja del modelo numérico está fundamentada en la posibilidad de calcular las tensiones y deformaciones de una sección sometida a fuerzas externas. Esta formulación numérica permite obtener información no proporcionada por los métodos convencionales. [11]

De tal manera que, es posible estudiar los mecanismos de rotura del macizo rocoso, identificar las zonas de concentración de tensiones y posibles zonas de plastificación del macizo. [11]

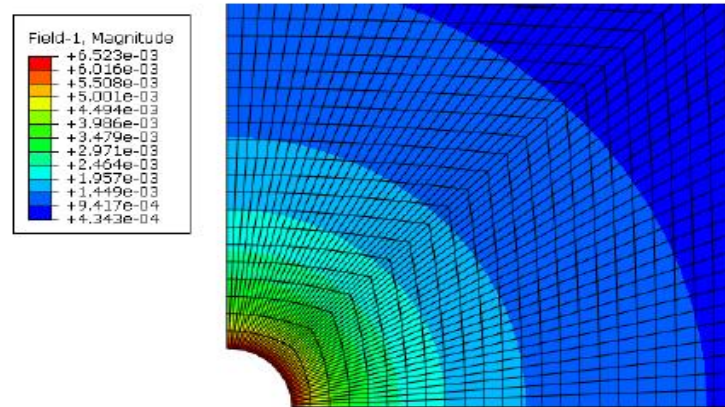


Figura 6.6. Modelación realizada en ABAQUS 6.14-2 para la validación de la solución analítica propuesta por Kirsch

Fuente: Disertación “Soluciones numéricas y analíticas para la estabilidad de excavaciones subterráneas”. [1]

#### 6.2.1.6. Método de elementos finitos (MEF)

El MEF consiste en la aproximación numérica y análisis matemático que conlleva a la discretización de modelos a contrapartes de pequeños elementos conservando las propiedades iniciales del medio, con el fin de resolver problemas específicos. [2]

La estructura a estudiar es sustituida por una malla físicamente equivalente dividida en elementos finitos de diferentes formas, ligados en puntos denominados nodos, esto con el fin de alcanzar una versatilidad en el momento de estudio de estructuras geométricas y comportamientos complejos de materiales físicos. [12]

Es el método numérico más usado en las ciencias de la ingeniería y debido a su capacidad para resolver problemas tenso-deformacional ha hecho que sea atractivo en las diversas ramas de la ingeniería.

La aplicación del MEF en el diseño de proyectos de Ingeniería Civil es principalmente un análisis de fuerzas que conduce a la estimación de tensiones, deformaciones y desplazamientos inducidos por los procesos de excavaciones, como por ejemplo los modelos seguidos por la ley de Hooke (Ver Ecuación 3), en donde  $\{F\}$  representa la matriz fuerza,  $\{u\}$  hace referencia a la matriz de deformaciones y  $[K]$  representa la relación tenso-deformacional. [2] Proporcionando así guías hacia la evaluación de la estabilidad, seguridad y economía del proyecto. [11]

$$\{F\} = [K]\{u\}$$

Ecuación 3

#### 6.2.1.7. Modelos Físicos

Los modelos físicos son utilizados en investigaciones experimentales, ya que mediante la implementación de estos se puede simplificar la realidad desde un sistema recreado por investigadores. (Ver Figura 6.7) Dando como resultado el reconocimiento de los factores y sucesos que se pueden llegar a presentar en campo para después ser reflejados en el análisis de resultados.

Una de las ventajas de los modelos físicos está en la representación de innumerables situaciones del mundo real con el fin de estudiar el comportamiento de un fenómeno y consecuencia que tienen sobre la estructura, aunque no siempre es utilizado debido a su alto costo de elaboración para un modelo representativo. [13]

De modo que, estos modelos deben representar lo más cercano posible a la realidad, dado que es un mecanismo utilizado para poder comprender los procesos geotécnicos del suelo. [13]



Figura 6.7. Modelo físico sistema mecánico de perforación avance de tuneladoras TBM-EPB en suelos blandos

Fuente: “Trabajo de grado Universidad de la Salle”. [13]

#### 6.2.2. Factor de Seguridad

Se tiene conocimiento de tres diferentes definiciones para la representación del FS; la primera, como el factor de reducción de la fuerza que, conlleva a ocasionar la ruptura del macizo ocasionado por un aumento de tensión significativo en un punto de interés. [1]

El segundo concepto el FS puede estar representado por el coeficiente entre la relación de la suma de las fuerzas resistentes y la suma de fuerzas desestabilizadoras. [14] Y para el tercer concepto, se asume que este factor de seguridad puede estar relacionado con la reducción de los parámetros de resistencia de Mohr Coulomb ( $c'$  y  $\phi'$ ), en donde los parámetros de resistencia del suelo se reducen hasta que el mecanismo de ruptura se haya establecido. [2]

La experiencia demuestra que en la geotecnia no se pueden asumir factores de seguridad ligeramente superiores a 1, y es necesario adoptar un factor de seguridad mucho mayor aun sabiendo que la rotura se da cuando el FS es inferior a 1. [14]

El factor de seguridad varia con cada tipología de rotura y cada problema geotécnico, de la geometría de la superficie de deslizamiento. Debido a que no se dispone de antecedentes previos sobre la confiabilidad del cálculo del FS en el frente de túnel con modelos numéricos se sugiere realizar un cálculo probabilístico de este factor. [14]

### 6.2.3. Strength Reduction Factor

El factor de reducción de la fuerza es un método que tiene como objetivo principal aplica un factor de reducción en los parámetros de resistencia de Mohr – Coulomb (cohesión  $c$ , y ángulo de fricción  $\phi$ ) y realizar el análisis de los elementos finitos. La ejecución es repetida iterativamente hasta que se llega al colapso, caracterizado por un fuerte aumento en el desplazamiento de un punto característico, o por la no convergencia del problema.

La resistencia al corte se reduce en un factor como se muestra a continuación. ( Ver Ecuación 4)

$$\frac{\tau}{FS} = \frac{c}{FS} + \frac{\tan\phi}{FS} \quad \text{Ecuación 4}$$

Que se puede escribir como. (Ver Ecuación 5)

$$\frac{\tau}{F} = c^* + \tan\phi^* \quad \text{Ecuación 5}$$

De tal manera que, la reducción de los parámetros de resistencia, se expresa como (Ver Ecuación 6 y Ecuación 7)

$$c^* = \frac{c}{FS} \quad \text{Ecuación 6} \quad \phi^* = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\phi}{FS}\right) \quad \text{Ecuación 7}$$

$c^*$  y  $\phi^*$  son los parámetros reducidos de Mohr - Coulomb para la resistencia al corte que se puede introducir en el análisis de elementos finitos.

El algoritmo básico para ejecutar este método se puede resumir en:

- Desarrollar el modelo para el análisis de elementos finitos usando las propiedades de los materiales fijados, realizando el análisis y verificando la deformación máxima;
- Aumentando el valor del factor de seguridad y calculando los parámetros reducidos de la cohesión  $c$  y fricción  $\phi$ , como se menciona anteriormente, insertando los nuevos parámetros en el modelo e iterando;



- Se repite el paso anterior, utilizando diferentes valores del factor de seguridad con el fin de buscar el momento en el que el modelo se vuelve inestable, evidenciado por un fuerte aumento en el desplazamiento de un punto característico.

### 6.3. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, se ha dado un impulso notable en investigadores cuya finalidad se basa en dar solución a la problemática relacionada con los factores que influyen a la estabilidad del frente de túnel, dado que la mecánica de suelos es una ciencia muy reciente, creada en el año 1925 por el ingeniero Kart Von Terzaghi involucrando las leyes de las ciencias naturales y de la física en los problemas relacionados con las cargas en la capa superficial de la corteza terrestre. [15]. En su libro “suelo” Mecánica Teórica (1943) se presenta uno de los primeros modelos para el cálculo de la estabilidad en las secciones de túneles excavados en suelos poco profundos, basada en el principio de arqueado del suelo.

Métodos para el cálculo de los requisitos mínimos de soporte para túneles superficiales y profundos (ambos de suelos y roca) fueron desarrollados a lo largo de los años en base al modelo original de Terzaghi, convirtiéndose así en uno de los métodos populares para el diseño de soportes de túneles en los EE.UU. [4]

Esta recopilación tiene como objetivo ofrecer un acercamiento a los temas que centran la atención de los investigadores del área y determinar así la magnitud real del problema, conociendo la existencia de alguna de las líneas de investigación más comunes.

Enrique Tamez (1997):

El método simplificado de la estabilidad de túneles propuesto por Enrique Tamez se fundamenta en el mecanismo de falla presente en la gran mayoría de túneles, el cual interpreta como un mecanismo de 3 prismas que mantienen un equilibrio en la sección parcialmente sin soporte del túnel, de tal manera que se pueda evaluar la estabilidad y seguridad en cada etapa del proceso de construcción; desde la excavación inicial, hasta la estabilización final. La cual se integra con un análisis de elementos finitos para establecer el estado de esfuerzos y deformaciones del suelo, con el fin de conocer los posibles asentamientos en la superficie y precisar el espesor del revestimiento. [16]

Pieter A. Vermeer (2002):

Surgiendo artículos como “Estabilidad de frente del túnel en suelo drenado” presentado por Pieter Vermeer en el año 2002, enfocado en suelos y rocas blandas sin macroestructura, los cuales se presentan en túneles pocos profundos en aéreas urbanas, en los cuales la estabilidad está establecida por los parámetros de resistencia al corte; también se considera la estabilidad del frente de túnel, tanto para túnel de cara abierta como se ve representado en NATM, como para túnel de escudo de cara cerrada. Dando como resultado que la distribución de tensiones alrededor del frente en suelos y rocas blandas está reflejada por arcos para los que presentan un ángulo de fricción mayor a  $20^\circ$ , en la cual se especifica que la estabilidad es independiente a la cobertura del suelo y de las cargas superficiales. [17]

Manuel Melis Maynar (2004):

El artículo “El colapso del túnel ferroviario por inestabilidad del frente en suelos y rocas blandas o muy diaclasadas” presentado por Manuel Maynar en el año 2004, enfocado en la estimación del coeficiente de seguridad mediante un método sencillo con el fin de dar frente a los posibles mecanismos de colapso más frecuentes como las roturas basadas en espirales logarítmicas y líneas circulares, mencionadas en las diferentes literaturas. Es así como el autor llega a la conclusión por medio del modelo presentado que los colapsos en un frente abierto como es representado en la utilización de NATM, conformado por suelos blandos o rocas blandas son más susceptibles a la inestabilidad, es por esto que la utilización del método NATM no se justifica para este tipo de suelos si se obtiene un factor de seguridad cercano o menor a uno. [18]

Carranza Torres (2013):

El modelo de Caquot-Kerisel (1956) integrado por Carranza Torres relacionado con la “Estabilidad de túneles circulares poco profundos utilizando modelos analíticos y numéricos” se basa en el análisis en los teoremas de límite inferior y superior de la plasticidad, en donde se mencionan las soluciones presentada por Caquot, las cuales se derivan para el análisis de un túnel circular bidimensional, ampliado fácilmente a geometrías esféricas (tridimensionales) del frente de excavación, de tal manera que considera el equilibrio inmediatamente antes de la movilización de ruptura alrededor del túnel y amplía la posibilidad de cinco diferentes condiciones de flujo de agua en la etapa de excavación. [7], [19]

De tal manera que, considera la condición de equilibrio de una zona ya definida con una cohesión  $c'$  y ángulo de fricción  $\phi'$  interno dado por los parámetros de Mohr-Coulomb, que falla arriba de la corona de una cavidad circular. Definiendo así la presión de soporte mínima necesaria para mantener la estabilidad de una sección de un túnel de poca profundidad. [19]

Nicholas Vlachopoulos (2014):

El artículo “Usos apropiados y limitaciones prácticas de análisis numéricos de túneles en 2D y respuestas de soporte de túnel” realizado por Vlachopoulos y presentado en el año 2014 a la Ingeniería Geotécnica y Geológica, estudia las relaciones de deformación plana, configuraciones de eje asimétrico y relaciones de efectos tridimensionales de un modelado bidimensional. Con el fin de simular la carga de soporte y los efectos de excavación, de tal manera que el modelo evidencie la respuesta del frente de túnel, la condición de desplazamiento, plasticidad en el frente y manifestación de la deformación. De esta manera se pudo llegar a la conclusión de que las condiciones de contorno son importantes para el análisis de problemas de compresión del terreno; de igual manera se pudo determinar que la modelación por etapas 2D arroja resultados aceptables siempre y cuando el aspecto de la geometría del túnel no sea extremo, dado que la forma del túnel es un factor influyente. [20]

Salvador Domínguez (2015):

Dando así lugar a antecedentes de investigaciones como “La estabilidad del frente de excavación de un túnel en terrenos heterogéneos o con un criterio de rotura no-lineal” presentado por el Ingeniero Salvador Senent Domínguez en el año 2015 a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos – Universidad Politécnica de Madrid como requisito para optar a el Título de Doctorado, cuya finalidad es el desarrollo de una herramienta sencilla (solución analítica) que permita analizar en un grado de factibilidad confiable, la estabilidad del frente del túnel en suelos estratificados y materiales con un criterio de rotura no-lineal, dando como resultado la validación de un nuevo mecanismo de rotura , en el marco de análisis límite, para la determinación de la presión de colapso y de la geometría de la rotura en el frente de excavación de un túnel. [4].

Argüello Vera (2017):

La Disertación “Soluciones numéricas y analíticas para la estabilidad de excavaciones subterráneas” realizada por el Ingeniero Sergio Enrique Argüello Vera en el año 2017, como parte de los requisitos para obtener el título de Maestría en Ciencias, presentada a la Facultad de Ingeniería de San Carlos, Universidad de Sao Paulo, cuya finalidad es evaluar el factor de seguridad del frente de la excavación de un túnel circular de poca profundidad en una masa homogénea de línea de suelo, elástico-plástico, a través de un modelamiento mediante un sistema numérico tridimensional con el fin de considerar diferentes valores y longitudes no compatibles durante el proceso de excavación. [1]  
Esta investigación demostró que soluciones analíticas como la presentada por Caquot y Kerisel (1949) y ampliado por Carranza-Torres (2013) presenta una discontinuidad en el factor de seguridad al cambiar el mecanismo de ruptura adoptado y validando así que en la actualidad hay pocas soluciones analíticas que describen el comportamiento del frente de excavación antes de la construcción de esta. [1]

## 7. METODOLOGÍA

Cada etapa tendrá una serie de actividades que contribuirán al cumplimiento de cada objetivo planteado. A continuación, se puede evidenciar un breve esquema de la metodología de este proyecto. (Ver Figura 7.1)

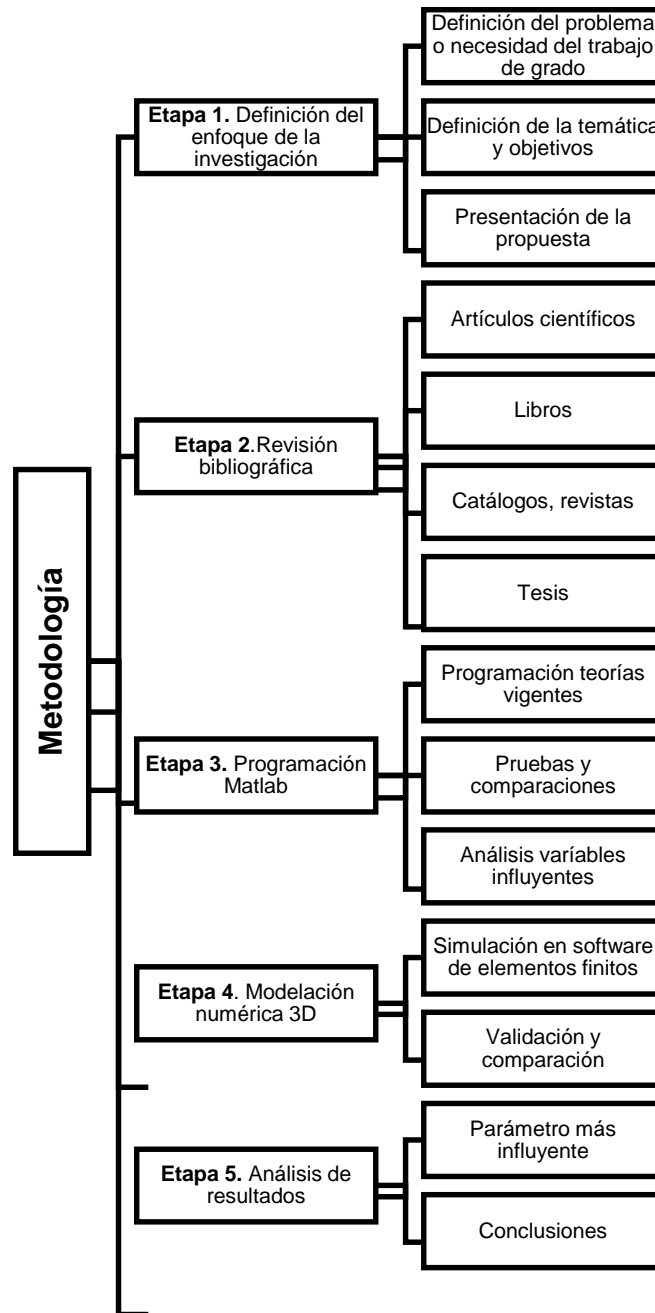


Figura 7.1. Metodología del proyecto de grado, etapas y tareas.

Fuente: Autor

## **7.1. DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS**

### **7.2. ETAPA 1: DEFINICIÓN DEL ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN**

En esta etapa, el proyecto tiene concentración especial en la búsqueda de un problema o una necesidad que pueda ser estudiada por medio de investigación teórica. En función del problema se define la temática principal, los objetivos a cumplir y alcance del proyecto culminada la presente investigación.

### **7.3. ETAPA 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

La revisión bibliográfica se enfoca básicamente en tres objetivos: recopilar las técnicas actuales de excavación de túneles; sintetizar diferentes soluciones (analíticas o numéricas) para evaluar el factor de seguridad del frente de una excavación; definir el procedimiento a seguir para simular un frente de excavación de un túnel y evaluar su FS.

### **7.4. ETAPA 3: SÍNTESIS DE SOLUCIONES ANALÍTICAS MEDIANTE UN PROGRAMA EJECUTABLE**

Luego, con ayuda de Matlab, se elabora una herramienta matemática que nos permite evaluar el FS del frente de excavación de acuerdo con las soluciones matemáticas de algunos autores existentes. Adicionalmente, es factible evaluar el comportamiento de los parámetros que se tienen en cuenta en estos modelos matemáticos de manera interactiva.

Con el fin de comprobar la correcta elaboración del código de las soluciones analíticas, se hace la comparación de los resultados con datos encontrados en la literatura proveniente de fuentes de información aceptables.

### **7.5. ETAPA 4: MODELACIÓN NUMÉRICA 3D**

Inicialmente, para desarrollar el modelo numérico en 3D y teniendo en cuenta el uso del método de elementos finitos, se debe ejecutar un refinamiento de malla con el fin de que se pueda analizar la precisión de los desplazamientos y el número de elementos o nodos de la malla. Para esto, también es de vital importancia la definición de las dimensiones iniciales del perfil geológico, buscando que las magnitudes de medición no permitan que los soportes del modelo afecten la naturaleza del comportamiento del mismo y por ende los resultados.

### **7.6. ETAPA 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Para el análisis en la modelación se hará uso del método SRF, por medio del cual se establecerá el factor de seguridad de la excavación. El método SRF funciona mediante la disminución de los parámetros de resistencia hasta el punto donde se produce un desplazamiento en el modelo de magnitud considerable (falla) y que, estudiado en una

gráfica se observa como un dato aislado. Luego de elaborado este procedimiento se procederá a hacer un análisis de sensibilidad de parámetros de resistencia Mohr Coulomb y por último se realizará una comparación con un modelo físico existente en la literatura para comprobar la veracidad de los resultados y verificar que el modelo numérico en el software es consistente.

## 8. ETAPA 3: SÍNTESIS DE SOLUCIONES ANALÍTICAS MEDIANTE UN PROGRAMA EJECUTABLE

Para la síntesis de las soluciones analíticas, se elabora un algoritmo en el software Matlab para la creación de un programa ejecutable, denominado “SHACIT” (Shallow Circular Tunnels). La interfaz gráfica del programa es presentada de la siguiente manera. (Ver Figura 8.1)

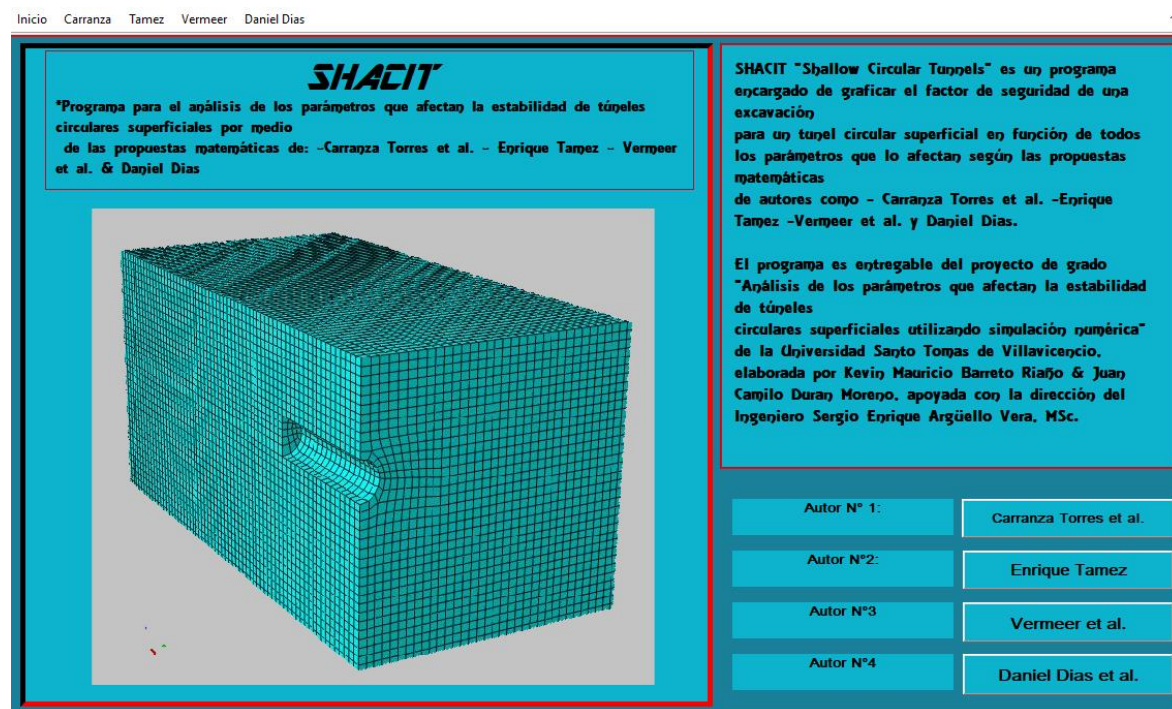


Figura 8.1. Interfaz gráfica del programa “SHACIT” elaborado con algoritmo de programación en Matlab.

Fuente: Autor.

Las soluciones disponibles dentro del programa son las correspondientes a cuatro autores, tal cual como se visualiza en la Figura 8.1 y las cuales, seguidamente, son expuestas más específicamente.

### 8.1. SOLUCIÓN ANALÍTICA PROPUESTA POR CARRANZA TORRES, T. REICH & D. SAFTNER (2013)

Para entender la solución propuesta por este autor, primero es necesario conocer lo estudiado y analizado por Caquot (1934) y Caquot & Kerisel (1949).

#### 8.1.1. Caquot (1934) Y Caquot & Kerisel (1949)

Caquot (Caquot 1934; Caquot & Kerisel 1949) presenta una de las primeras soluciones analíticas estáticamente admisibles para el análisis de la estabilidad de los túneles



superficiales. Esta solución clásica facilita conocer el campo de tensión alrededor de un túnel circular ubicado bajo una superficie plana, basada en la integración de la ecuación de equilibrio; fuerza alrededor de una zona circular de un túnel de igual geometría de excavación. (Ver Figura 0.1) [1]

El modelo propuesto por Caquot, al permitir la determinación del límite inferior de la presión de soporte requerida, brinda una estimación de seguridad en las cargas requeridas sin exceder condiciones de fluencia de un material para el equilibrio de la cavidad del frente de excavación. [19] Esto es posible, usando la condición de que el suelo alcanza el estado de plastificación en la corona del túnel (punto A) a lo largo de su cobertura hasta la superficie (punto B). (Ver Figura 0.1)

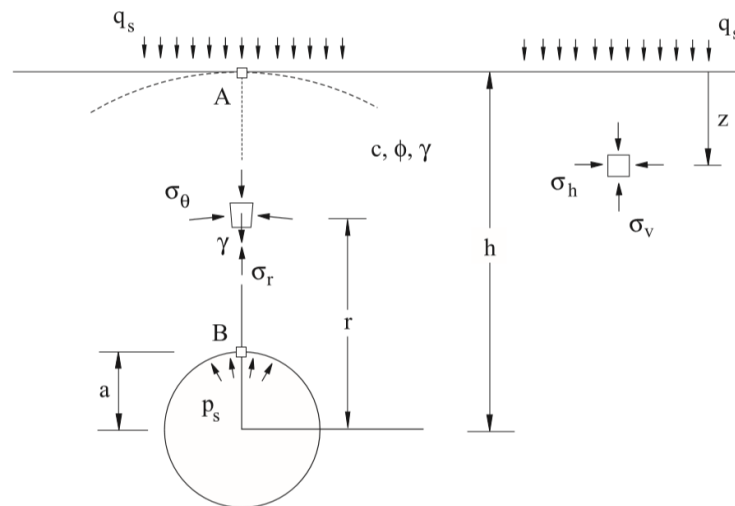


Figura 0.1. Solución estáticamente admisible propuesta por Caquot (1934).  
Fuente: Artículo “Estabilidad de túneles circulares superficiales en suelos usando modelos numéricos y analíticos”. [19]

Con base en la anterior información, la propuesta matemática y analítica de Caquot, relacionada con los parámetros de resistencia de Mohr Coulomb, es presentada con la siguiente ecuación. (Ver Ecuación 8) Esta ecuación solo es considerada válida cuando los parámetros de Mohr-Coulomb se encuentran en un estado de equilibrio límite para el túnel. [19]

$$\frac{p_s}{\gamma h} = \left( \frac{q_s}{\gamma h} + 2 \frac{c}{\gamma h N_\phi - 1} \frac{\sqrt{N_\phi}}{N_\phi} \right) \left( \frac{h}{a} \right)^{-k(N_\phi - 1)} - \frac{1}{k(N_\phi - 1) - 1} \left[ \left( \frac{h}{a} \right)^{-k(N_\phi - 1)} - \left( \frac{h}{a} \right)^{-1} \right] - 2 \frac{c}{\gamma h N_\phi - 1} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

- $N_\phi$ : coeficiente de reacción pasiva, propuesto por Broms & Bennemark (1967) y Peck (1969). [19]

$$N_{\phi} = \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

- $p_s$ : presión interna o presión del frente de excavación.
- $k$ : parámetro que indica el tipo de mecanismo considerado, cuando  $k=1$  túnel de cavidad cilíndrica y cuando  $k=2$  cavidad esférica.
- $a$ : radio de la excavación

Ecuaciones solamente aplicables en una situación donde la excavación está al borde del colapso. [19]

Sin embargo, a esta solución, se le implementa el concepto o definición de factor de seguridad para los túneles superficiales, el cual está definido por la relación existente entre los actuales parámetros de Mohr-Coulomb y los parámetros críticos de Mohr-Coulomb que conducen a la falla del túnel. (Ver Ecuación 10) [19]

$$FS = \frac{c}{c^{cr}} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi^{cr}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Adicionalmente a la implementación del factor de seguridad, el análisis propuesto por Davis et al. (1980) y Mühlhaus (1985), donde se analiza la estabilidad del frente de túnel por medio de una cavidad esférica en la longitud sin soporte, (ver Figura 0.2) también es considerado por la solución de Caquot por medio del coeficiente “ $k$ ” explicado anteriormente. [19]

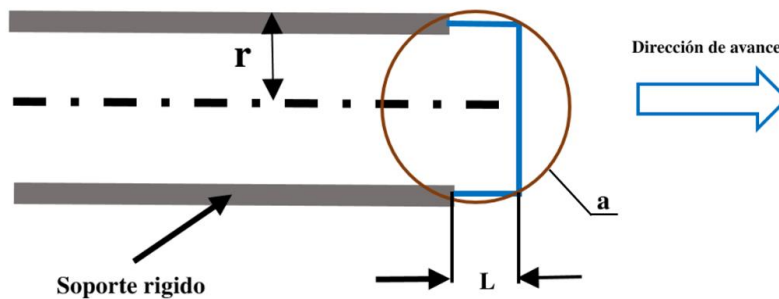


Figura 0.2. Vista lateral de la zona delantera del túnel cerrado por la superficie esférica para una proporción de longitud sin soporte y el radio de túnel ( $\frac{L}{2r} = 0.5$ ) asumido por la solución de Caquot y Kerisel (1949).

Fuente: Autor.

De esta manera, si la longitud de soporte se denota con la letra “ $L$ ”, y el túnel tiene un radio, con la letra “ $r$ ”, entonces el radio de la superficie esférica, letra “ $a$ ”, se puede calcular de acuerdo con la ecuación siguiente. (Ver Ecuación 11)

$$a = \sqrt{\frac{L^2}{4} + r^2} \quad \text{Ecuación 11}$$

### 8.1.2. Carranza Torres, T. Reich & D. Saftner (2013)

Con la definición de factor de seguridad mostrada en la ecuación 10, y la relación fundamental de Caquot en su ecuación 8, Carranza plantea una nueva forma de escribir la solución de la siguiente manera como la solución extendida de Caquot. (Ver Ecuación 12) [19]

$$\frac{p_s}{\gamma h} = \left( \frac{q_s}{\gamma h} + 2 \frac{c}{\gamma h} \frac{\sqrt{N_\varphi}}{N_\varphi - 1} \right) \left( \frac{h}{a} \right)^{-k(N_\varphi^{FS} - 1)} - \frac{1}{k(N_\varphi - 1) - 1} \left[ \left( \frac{h}{a} \right)^{-k(N_\varphi^{FS} - 1)} - \left( \frac{h}{a} \right)^{-1} \right] - 2 \frac{c}{\gamma h} \frac{\sqrt{N_\varphi}}{N_\varphi - 1}$$

Ecuación 12

Donde  $N_\varphi^{FS}$  es:

$$N_\varphi^{FS} = \frac{1 + \operatorname{sen}\left(\tan^{-1} \frac{\tan \varphi}{FS}\right)}{1 - \operatorname{sen}\left(\tan^{-1} \frac{\tan \varphi}{FS}\right)}$$

Ecuación 13

Carranza Torres et al, presenta soluciones numéricas para diferentes condiciones hidrostáticas como: suelo seco, suelo húmedo, suelo húmedo con túnel inundado, suelo húmedo con el nivel freático debajo del nivel del suelo y suelo húmedo con el nivel freático debajo del nivel del suelo con el túnel inundado. De acuerdo al alcance del proyecto se decidió programar únicamente la condición de suelo seco o primer caso (Caso A) descrito por Carranza Torres, donde la superficie freática está por debajo de la base del túnel. [19]

Al no considerarse el nivel freático, la ecuación 8, en conjunto con la ecuación 7 y 9, son las utilizadas en la programación del análisis de factor de seguridad por el método de “Carranza et al”.

Una de las primeras condiciones que se debieron implementar en la programación de la solución analítica de este autor fue la de la selección de la variable  $k$ .

Donde, inicialmente, se parte de la obtención de la variable de entrada, diámetro,  $D$ , ingresada por el usuario, la cual es inmediatamente involucrada para hallar el  $n$  número de valores de longitudes sin soporte,  $L$ , que se van a analizar. Luego de que se guardan esos diferentes valores de  $L$ , se programa el cálculo de los diferentes radios de las cavidades,  $a$ , para cada valor de longitud sin soporte anteriormente obtenidos. Al conocerse los valores de  $a$ , es posible determinar qué; si el valor  $a$  es mayor o igual a la profundidad,  $H$ , la variable  $k$  inmediatamente será definida con el número 1 (esférica) y si no se cumple esta condición entonces, la variable  $k$  será definida con el número 2 (cilíndrica).

Seguidamente, al tener las variables de entrada ingresadas por parte del usuario como: presión del frente de excavación ( $p_s$ ), carga superficial ( $q_s$ ), profundidad del túnel ( $H$ ),

diámetro (D) y los parámetros de resistencia del suelo seco. El código ejecuta la solución de la ecuación para el primer factor de seguridad (FS) con respecto al primer valor de a, consecutivamente ejecuta el mismo cálculo para los demás valores de FS en función de lo anteriores valores de a, ya calculados.

Por último, sencillamente se programa que los valores de FS, se grafiquen en el eje de las ordenadas y los valores de L/D en el eje de las abscisas de una gráfica.

## 8.2. VERIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE CARRANZA TORRES, C., T. REICH, & D. SAFTNER (2013)

En su artículo, Carranza Torres et al. demuestran, por medio de un ejemplo, la aplicación a un ejercicio de la solución para el caso A (suelo seco). En este, la geometría y las propiedades del material y consecutivamente los resultados estarán en función de una relación de  $L/D=1.0$ , siendo  $L=D$  y este último igual a 1.41 m. El ejercicio muestra un peso específico,  $\gamma$ , con valor de  $25 \text{ kN/m}^3$ , ángulo de fricción igual a  $30^\circ$  y cohesión de 4.69 kPa, además también define las variables de presión del frente y carga superficial,  $p_s$  y  $q_s$ , respectivamente, como nulas y una profundidad del túnel, H, de 3 m. (Ver Figura 0.3)

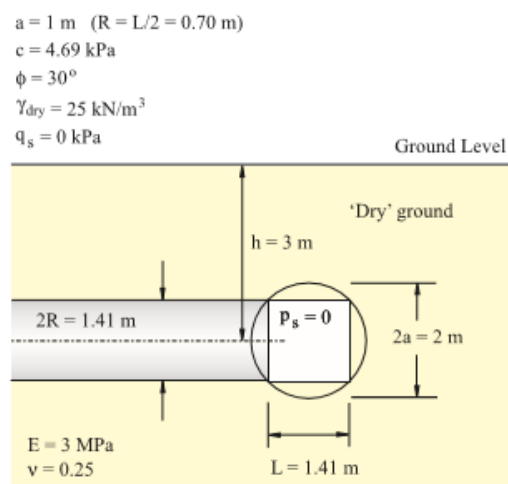


Figura 0.3. Ejemplo de longitud de excavación sin soporte del frente de túnel con consideración de una cavidad esférica.

Fuente: Artículo "Estabilidad de túneles circulares superficiales en suelos usando modelos numéricos y analíticos". [19]

Con estos valores Carranza et al. muestra un factor de seguridad igual a 1.0 como resultado para este caso seco. Y siendo así, para verificar una correcta programación de la solución de este autor, se ingresaron los mismos datos como datos de entrada para calcular la gráfica con el código y la interfaz gráfica elaborada.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE TÚNELES CIRCULARES SUPERFICIALES UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA

Presión del frente (Ps):	<input type="text" value="0"/>	kPa	<b>Parámetros de Resistencia del Suelo</b>	
Carga Superficial (Qs):	<input type="text" value="0"/>	kPa	Peso específico del suelo: <input type="text" value="25"/>	kN/m <sup>3</sup>
Profundidad del Túnel (H):	<input type="text" value="3"/>	m	Angulo de fricción: <input type="text" value="30"/>	Grados (°)
Diametro del Túnel (D):	<input type="text" value="1.41"/>	m	Cohesión: <input type="text" value="4.69"/>	kPa

**CALCULAR**

Figura 0.4. Interfaz gráfica de Carranza et al. y datos de entrada evaluados.  
Fuente: Autor.

Con estos datos, el programa calcula y ejecuta una serie de datos, los cuales permiten graficar la solución para los diferentes valores de FS en función de los valores de L/D. (Ver Figura 0.5)

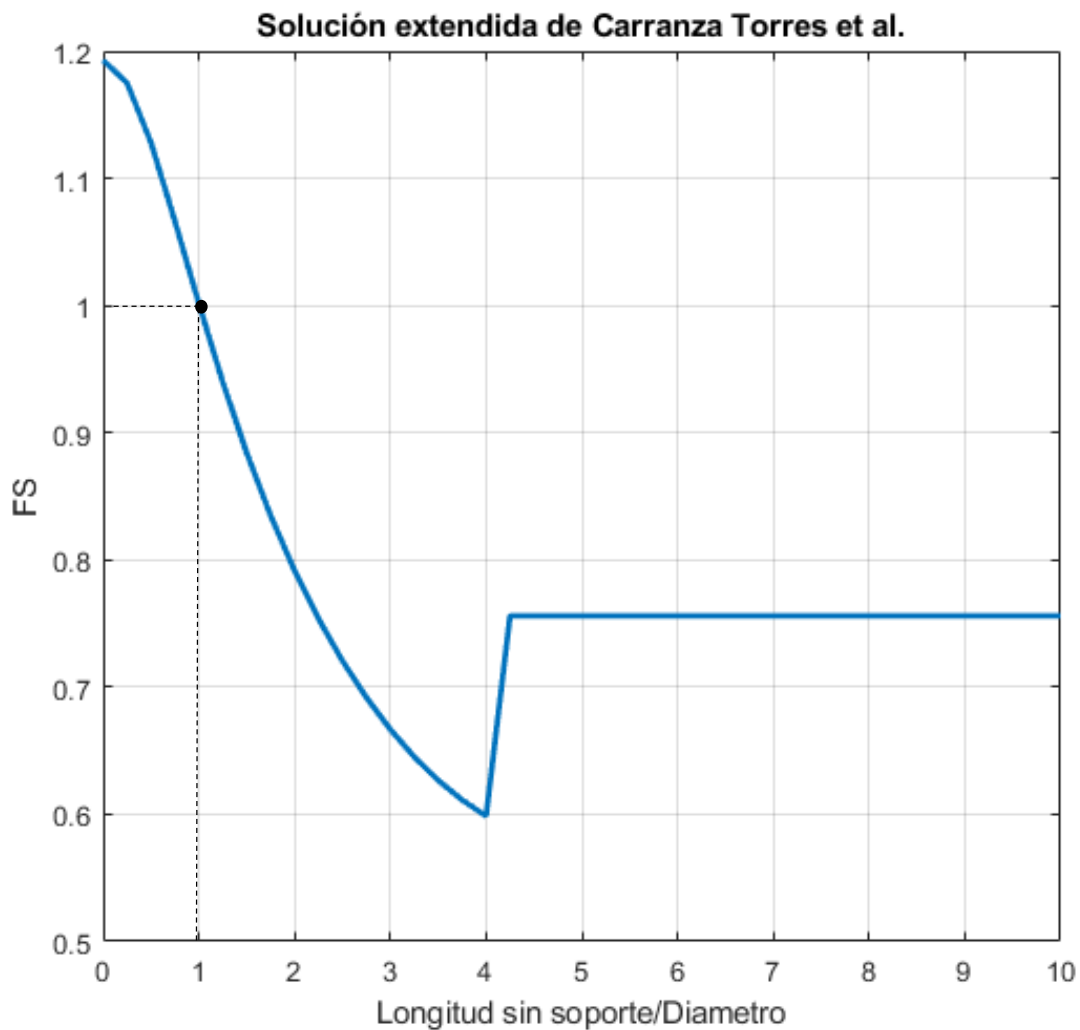
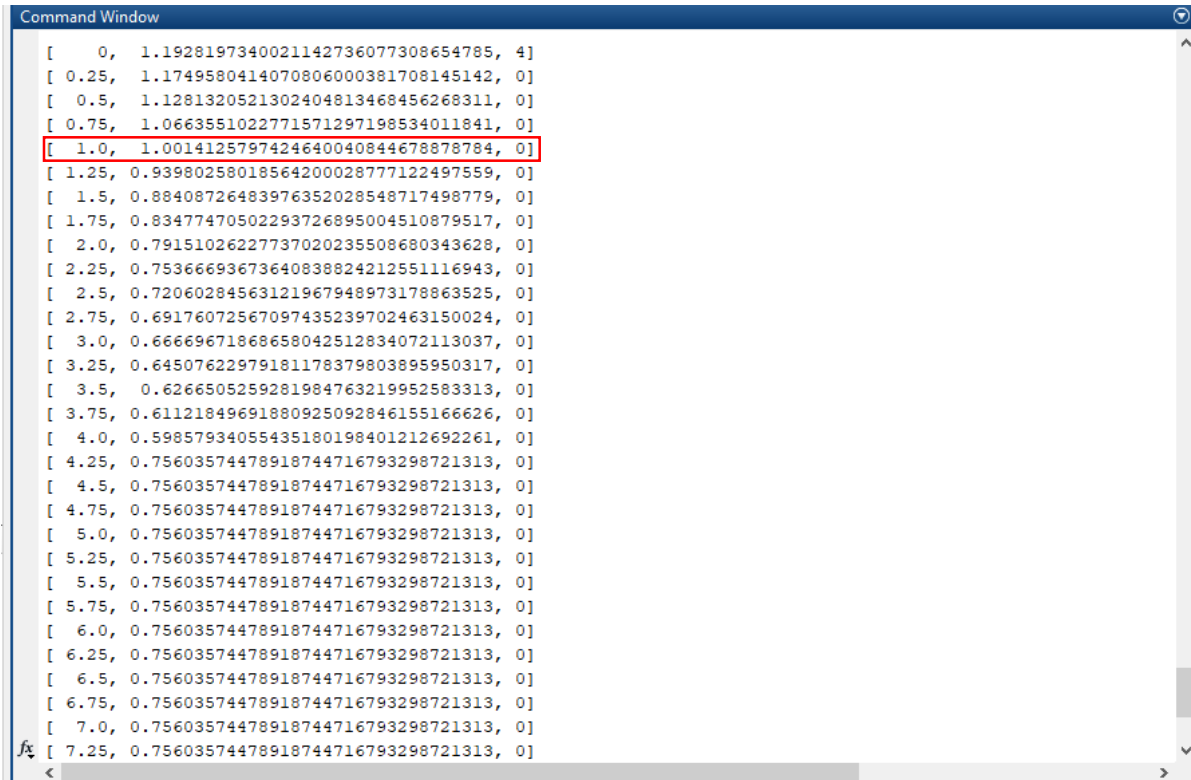


Figura 0.5. Gráfica de la solución propuesta por Carranza Torres et al.  
Fuente: Autor.

De esta grafica es posible visualizar que para un valor de  $L/D=1.0$  el factor de seguridad resultante, también es uno ( $FS=1.0$ ). (Ver Figura 0.5) Adicionalmente, para realizar una verificación más exigente se revisaron también los datos numéricos que resuelve el código, de donde también se visualizó un resultado de  $FS=1.0$  para  $L/D=1.0$ . (Ver Figura 0.6)



```
Command Window
[ 0, 1.1928197340021142736077308654785, 4]
[ 0.25, 1.1749580414070806000381708145142, 0]
[ 0.5, 1.1281320521302404813468456268311, 0]
[ 0.75, 1.0663551022771571297198534011841, 0]
[ 1.0, 1.0014125797424640040844678878784, 0]
[ 1.25, 0.93980258018564200028777122497559, 0]
[ 1.5, 0.88408726483976352028548717498779, 0]
[ 1.75, 0.83477470502293726895004510879517, 0]
[ 2.0, 0.79151026227737020235508680343628, 0]
[ 2.25, 0.75366693673640838824212551116943, 0]
[ 2.5, 0.72060284563121967948973178863525, 0]
[ 2.75, 0.69176072567097435239702463150024, 0]
[ 3.0, 0.66669671868658042512834072113037, 0]
[ 3.25, 0.64507622979181178379803895950317, 0]
[ 3.5, 0.6266505259281984763219952583313, 0]
[ 3.75, 0.61121849691880925092846155166626, 0]
[ 4.0, 0.59857934055435180198401212692261, 0]
[ 4.25, 0.75603574478918744716793298721313, 0]
[ 4.5, 0.75603574478918744716793298721313, 0]
[ 4.75, 0.75603574478918744716793298721313, 0]
[ 5.0, 0.75603574478918744716793298721313, 0]
[ 5.25, 0.75603574478918744716793298721313, 0]
[ 5.5, 0.75603574478918744716793298721313, 0]
[ 5.75, 0.75603574478918744716793298721313, 0]
[ 6.0, 0.75603574478918744716793298721313, 0]
[ 6.25, 0.75603574478918744716793298721313, 0]
[ 6.5, 0.75603574478918744716793298721313, 0]
[ 6.75, 0.75603574478918744716793298721313, 0]
[ 7.0, 0.75603574478918744716793298721313, 0]
[ 7.25, 0.75603574478918744716793298721313, 0]
```

Figura 0.6. Resultados obtenidos directamente de Matlab y el código elaborado,  $FS=1.0$  para un  $L/D=1.0$ .  
Fuente: Autor.

Con esto, para la solución de este autor, los resultados del código programado se han verificado satisfactoriamente y la validez de los cálculos ejecutados son confiables para el desarrollo de este trabajo de investigación.

### 8.3. SOLUCIÓN ANALÍTICA PROPUESTA POR ENRIQUE TAMEZ (1997)

Este autor, plantea el cálculo de la estabilidad del frente de excavación por medio del análisis del factor de seguridad del mecanismo de falla simplificado, el cual se encuentra formado por tres prismas (Ver Figura 0.8); el prisma 1 se forma delante del frente y tiene forma triangular de una cuña de Coulomb, el prisma 2 es rectangular y se apoya sobre el prisma 1, el prisma 3 también es rectangular y se localiza sobre la clave de la longitud excavada sin soporte. (Ver Figura 0.7) [21]

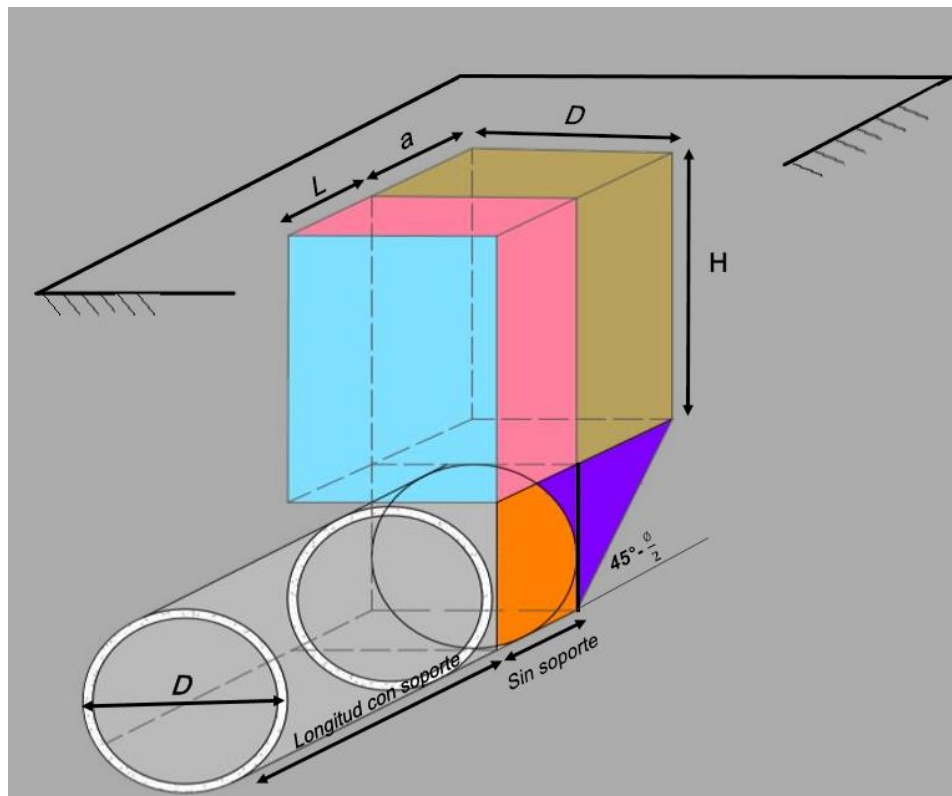


Figura 0.7. Equilibrio del mecanismo de falla simplificado del frente de excavación.  
Fuente: Autor.

Las dimensiones de los prismas están condicionadas, en primer lugar, por la geometría del túnel y por las propiedades mecánicas del suelo, al igual que por la longitud excavada sin soporte. En el equilibrio de este mecanismo de falla propuesto intervienen: las fuerzas actuantes que, se dividen en dos; las fuerzas internas dadas por los pesos de los prismas que tienden a producir el movimiento descendente del conjunto y por las fuerzas externas que pueden estar o no presentes como la sobrecarga superficial o la presión del frente. Y las fuerzas resistentes derivadas de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante. (Ver Figura 0.8) [21]

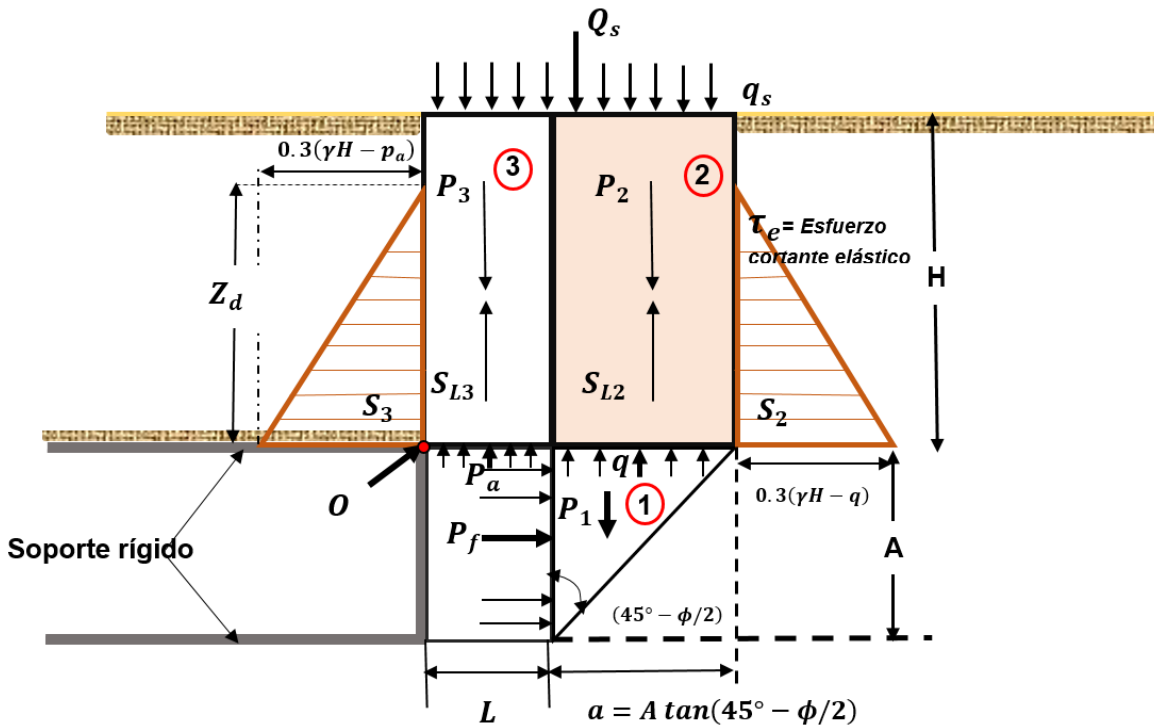


Figura 0.8. Fuerzas que intervienen en el mecanismo simplificado del equilibrio del frente.

Fuente: Libro “Diseño Geotécnico de Túneles”. [21] - Modificado por el autor.

Las fuerzas actuantes ( $P_1, P_2, P_3, Q_s, P_a, y P_f$ ). Se deben al peso de los tres prismas que integran el mecanismo de falla, a la sobrecarga superficial, a la presión radial interior y a la aplicada al frente, respectivamente. [21]

Las fuerzas resistentes del suelo ( $S_1, S_{L2}, S_3, S_{L3}, y Q$ ). Son las que se desarrollan en la superficie lateral de los dos primas, 2 y 3, considerando una no significativa interacción horizontal. La fuerza resistente  $Q$  es la capacidad de carga del prisma triangular del frente; estimada a partir de la solución de Meyerhof para la capacidad de carga de una zapata rectangular apoyada en la corona de un talud vertical. [21]

Para la aplicación en la programación realizada, la variable de la presión radial ejercida por el soporte temporal o un fluido a presión ( $P_a$ ) no es considerada, es decir, su valor inicial, para los casos que ejecuta el programa, siempre será cero. Adicionalmente, el valor mostrado,  $A$  en la Figura 0.8, para este caso será siempre igual al diámetro,  $D$ , (ver Figura 0.7) cumpliendo así, con el alcance de la investigación centrada en túneles circulares.

Con la relación entre las fuerzas actuantes y resistentes que se desarrollan en el frente del túnel es posible obtener un factor de seguridad de este mecanismo de falla simplificado. Esto es logrado, ya que el factor de seguridad se expresa matemáticamente como la relación entre la sumatoria de los momentos de las fuerzas resistentes y la sumatoria de los momentos de las fuerzas actuantes, tomados respecto a un eje



horizontal que pasa por el punto O y es perpendicular al eje del túnel. (Ver Figura 0.8) [21] Así, se puede expresar al factor de seguridad de la siguiente manera. (Ver Ecuación 14)

$$FS = \frac{\sum M_r}{\sum M_a} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

- $\sum M_r$  es la suma de los momentos de las fuerzas resistentes con respecto al punto O de la Figura 0.8
- $\sum M_a$  es la suma de los momentos de las fuerzas actuantes con respecto al punto O de la Figura 0.8

Elaborando procesos matemáticos, simplificando y agrupando términos, el factor de seguridad contra la falla general del frente de excavación del túnel es expresado por el autor de la siguiente manera. (Ver Ecuación 15)

$$FS = \frac{2S_{m2} \left[ \frac{D}{a} \left( 1 + \frac{L}{a} \right) + 1 + \frac{2L}{a} \right] \frac{Z_d}{D} + 2S_{m3} \left( \frac{L}{a} \right)^2 \frac{Z_d}{D} + 2.7c \sqrt{K_p} \left( 1 + \frac{2L}{a} \right) + p_f K_p \left( 1 + \frac{2L}{a} \right)}{\gamma H \left[ \frac{D}{H} \left( \frac{1}{3} + \frac{L}{a} \right) + \left( 1 + \frac{L}{a} \right)^2 \right] + q_s \left( 1 + \frac{L}{a} \right)^2 - p_a \left( \frac{L}{a} \right)^2 - p_f K_p} \quad \text{Ecuación 15}$$

La ecuación puede considerar dos casos particulares, meramente de interés práctico, según las características de su envolvente de resistencia: suelos puramente cohesivos y suelos cohesivo-friccionantes. Donde, el parámetro de la cohesión,  $c$ , en el caso de puramente cohesivo; será igual al promedio de las resistencias de los estratos de suelos,  $s_{m2}=s_{m3}=c$  y el factor de fricción  $\phi=0$ . [21]

Para el caso de suelos cohesivo-friccionantes la resistencia al corte estará dada por los parámetros de resistencia de Mohr-Coulomb. Así mismo, estas condiciones, tanto la totalmente cohesiva como la friccionante, son aplicables para túneles superficiales y con presión radial ejercida por el soporte temporal o un fluido a presión ( $P_a$ ) igual a cero. Basado en la anterior afirmación, los valores medios de las resistencias al corte,  $s_{m2}$  y  $s_{m3}$ , estarán definidos para túneles superficiales a partir de la siguiente condición. (Ver Ecuación 17 y Ecuación 18). [21]

Túnel superficial ( $H/D < 1.7$  y  $Z_d=H$ ) donde:

$$Z_d = 1.7D \quad \text{Ecuación 16}$$

Entonces:

$$S_{m2} = K_f c + 0.17q \quad \text{Ecuación 17}$$

$$S_{m3} = K_f c \quad \text{Ecuación 18}$$

De las anteriores ecuaciones, las variables  $K_f$  y  $q$ , están definidas como un coeficiente cuyo valor es una función del ángulo de fricción interna y la capacidad de carga del prisma 1, respectivamente. (Ver Ecuación 19 y Ecuación 20)

$$K_f = \frac{1 - \sin^2 \phi}{1 + \sin^2 \phi} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$q = 2.7c\sqrt{K_p} - 0.5\gamma D \quad \text{Ecuación 20}$$

Siendo  $K_p$  :

$$K_p = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{Ecuación 21}$$

Definidas las variables, el procedimiento de la programación se inicia con la obtención de los datos de entrada ingresados por el usuario ( $D$ ,  $H$ ,  $p_f$ ,  $p_s$ ,  $\gamma$ ,  $\phi$  y  $c$ ). A partir de ello, se logran ejecutar los cálculos de las ecuaciones menores que son complementos de la ecuación para el cálculo de factor de seguridad, procesos que se realizan consecutivamente para valores de longitud sin soporte,  $L$ , que van desde 0 hasta 5 veces el diámetro, cada  $0.15D$ . Con estos múltiples valores de FS se ejecuta la orden de graficar el FS en función de los diferentes valores de  $L$  divididos en el diámetro ( $L/D$ ). Finalmente, y adicionalmente la programación resulta en un dato de salida con una recomendación de la longitud de soporte máxima para un FS recomendado por Tamez de 2, para los valores requeridos por el usuario y además una nota en donde se le indica al usuario el tipo de suelo ingresado entre; suelo puramente cohesivo o suelo cohesivo friccionante.

#### 8.4. VERIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE ENRIQUE TAMEZ (1997)

Debido a que esta solución no fue posible corroborarla con un ejercicio aplicado directamente de algún documento elaborado por el autor Enrique Tamez para suelo seco, se procede a hacer la verificación comparando los resultados con la solución de Carranza Torres et al. de donde se obtuvieron resultados similares. Para el ejercicio aplicativo del caso seco del autor Carranza Torres et al., la geometría y las propiedades del material y consecutivamente los resultados estarán en función de una relación de  $L/D=1.0$ , siendo  $L=D$ . En la figura, (ver Figura 0.9) se pueden observar las variables consideradas por este autor para, posteriormente analizar el FS respectivo.

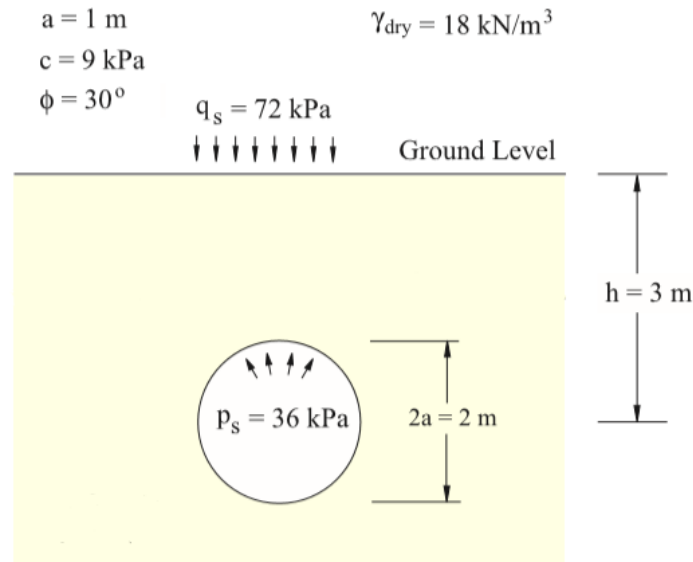


Figura 0.9. Variables aplicadas al caso de suelo seco, para un túnel circular superficial, analizado por medio de la solución de Carranza Torres et al.

Fuente: Artículo “Estabilidad de túneles circulares superficiales en suelos usando modelos numéricos y analíticos”. [19]

El resultado de FS, para el ejemplo mostrado en la Figura 0.9, según Carranza Torres et al. fue de un valor de 1.71 para el caso de suelo seco. En la tabla de factor de seguridad mostrada en su artículo que, analiza todos los casos del túnel, se soporta la anterior declaración. (Ver Figura 0.10)

Case Type	Caquot's extended (Spreadsheet)	Numerical (FLAC)
A- 'Dry' ground	1.71	2.01
B1- WL > GL; 'dry' tunnel	0.97	1.03
B2- WL > GL; 'flooded' tunnel	1.96	2.25
C1- PL < GL; 'dry' tunnel	1.61	1.74
C2- PL < GL; 'flooded' tunnel	1.76	2.02

Figura 0.10. Resultados de factor de seguridad para los diferentes casos de suelo con solución extendida de Caquot (propuesta por Carranza Torres) y resultados numéricos de una modelación con el software FLAC.

Fuente: Artículo “Estabilidad de túneles circulares superficiales en suelos usando modelos numéricos y analíticos”. [19]

De esta manera, es posible verificar dicho valor, analizando el ejercicio de suelo seco con la solución propuesta por el autor Enrique Tamez, con la misma relación  $L/D=1.0$  y con las mismas variables planteadas en la Figura 0.9 y así, comparar resultados de FS.

Por lo que, inicialmente se ingresan los datos al programa elaborado en el software Matlab, en su interfaz gráfica del usuario y se ingresan los datos de entrada para su posterior calculo. (Ver Figura 0.11)

Parámetros de Resistencia del Suelo					
Presión del frente (Pf):	<input type="text" value="36"/>	KPa	Peso específico del suelo:	<input type="text" value="18"/>	KN/m <sup>3</sup>
Carga Superficial (qs):	<input type="text" value="72"/>	KPa	Angulo de fricción:	<input type="text" value="30"/>	Grados (°)
Profundidad del Túnel (H):	<input type="text" value="2"/>	m	Cohesión:	<input type="text" value="9"/>	KPa
Diametro del Túnel (D):	<input type="text" value="2"/>	m	<input type="button" value="CALCULAR"/>		

Figura 0.11. Interfaz gráfica de Enrique Tamez y datos de entrada evaluados.  
Fuente: Autor.

De inmediato, el programa ejecuta la gráfica de FS en función de longitud sin soporte dividida en el diámetro, L/D. Y el dato a verificar, esta vez, en la gráfica será el correspondiente a L/D=1. (Ver Figura 0.12)

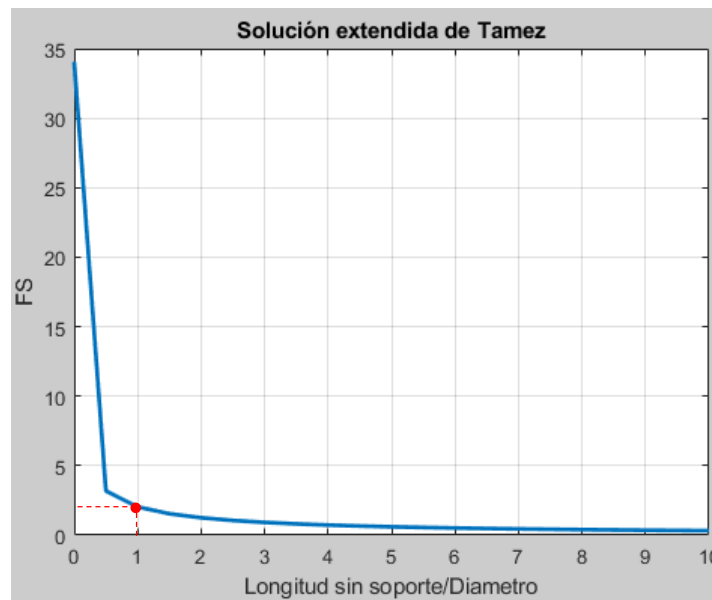
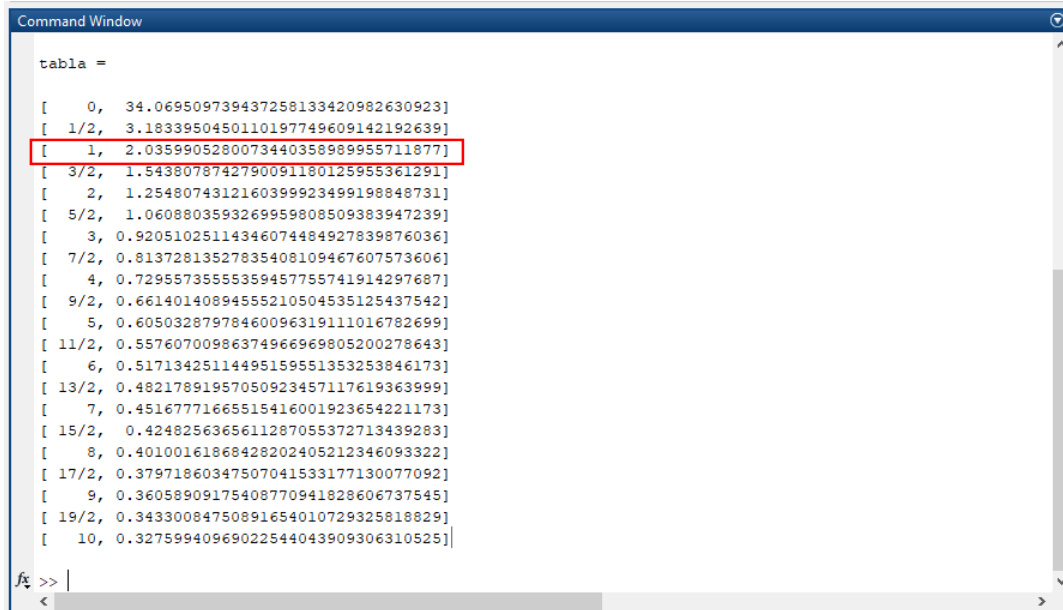


Figura 0.12. Gráfica de la solución propuesta por Enrique Tamez.  
Fuente: Autor.

En esta gráfica, el valor de FS no es visualmente claro y no sería adecuado suponerlo como un valor cercano al obtenido con la solución de Carranza Torres et al. (Ver Figura 0.12) Sin embargo, se ha situado para L/D=1.0 un FS muy por debajo de 5 y procurando siempre la mayor exactitud en la verificación de la validez de los resultados del programa, se muestra en la siguiente figura los resultados exactos obtenidos, dentro del cual se puede ver claramente el valor respectivo de FS para L/D=1.0 con la solución propuesta por Enrique Tamez. (Ver Figura 0.13)



```
Command Window

tabla =

[ 0, 34.069509739437258133420982630923]
[ 1/2, 3.1833950450110197749609142192639]
[ 1, 2.0359905280073440358989955711877]
[ 3/2, 1.5438078742790091180125955361291]
[ 2, 1.2548074312160399923499198848731]
[ 5/2, 1.0608803593269959808509383947239]
[ 3, 0.92051025114346074484927839876036]
[ 7/2, 0.81372813527835408109467607573606]
[ 4, 0.72955735555359457755741914297687]
[ 9/2, 0.66140140894555210504535125437542]
[ 5, 0.60503287978460096319111016782699]
[ 11/2, 0.55760700986374966969805200278643]
[ 6, 0.51713425114495159551353253846173]
[ 13/2, 0.48217891957050923457117619363999]
[ 7, 0.45167771665515416001923654221173]
[ 15/2, 0.4248256365611287055372713439283]
[ 8, 0.40100161868428202405212346093322]
[ 17/2, 0.37971860347507041533177130077092]
[ 9, 0.36058909175408770941828606737545]
[ 19/2, 0.34330084750891654010729325818829]
[ 10, 0.32759940969022544043909306310525]
```

Figura 0.13. Resultados obtenidos directamente de Matlab, FS=1.7815 para un L/D=1. Fuente: Autor.

De los resultados mostrados, es evidente que el FS=2.04 con la solución de Enrique Tamez es muy similar al FS=1.71 obtenido por la solución de Carranza Torres et al. Esta verificación se realiza para corroborar que no haya un desfase o una incongruencia exagerada en los resultados.

### 8.5. SOLUCIÓN ANALÍTICA PROPUESTA POR VERMEER, P.A., RUSE, N., MARCHER, T., (2002)

Vermeer et al. (2002) mediante modelos numéricos en 3D, utilizando la técnica de elementos finitos estudiaron la presión mínima requerida que se aplicaría al frente para garantizar la estabilidad de un túnel de cobertura 1.5D. [17], [1]

El estudio partió del punto de que, para obtener una equivalencia completa entre la presión de soporte inicial y el campo de tensión geostática inicial, la distribución de presión no es constante, sino que aumenta con la profundidad. [17] Significativo para nuestro caso de estudio, los túneles superficiales, pero este factor en el caso de túneles profundos se convertía casi en una constante. Entonces, la cantidad mínima de presión necesaria para soportar el túnel se logra determinar mediante la disminución gradual de la presión de soporte. [17] Estos datos pueden ser observados en la curva típica de desplazamiento de carga realizada por este autor. (Ver Figura 0.14)

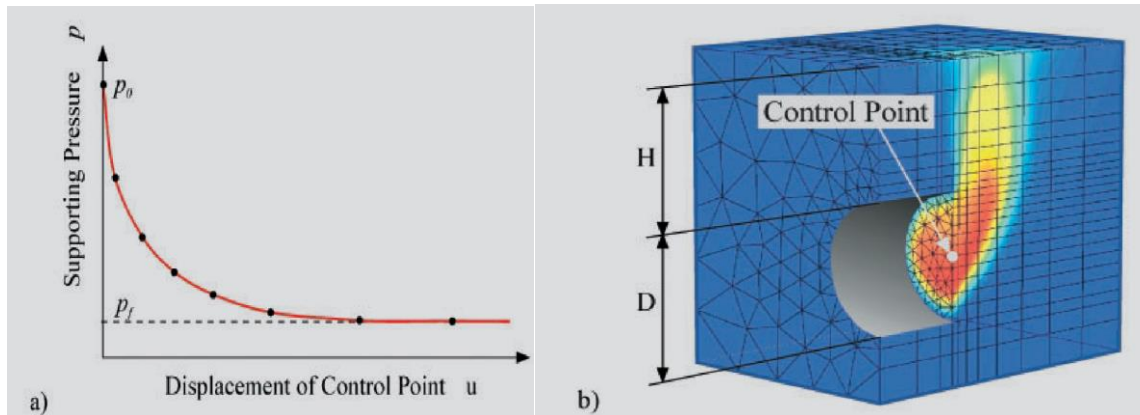


Figura 0.14. a) Curva típica de presión versus desplazamientos en el punto de control obtenido por Vermeer et al. (2002) b) Resultados de los desplazamientos en el modelo tridimensional estudiado por Vermeer et al. (2002)

Fuente: Artículo “Estabilidad del frente del túnel en terreno drenado”. [17]

Posteriormente, el autor elabora una serie de análisis variando el ángulo de fricción y la longitud de la excavación sin soporte, concluyendo en el trazado de una gráfica de la presión mínima en el frente que evita el colapso ( $N_\gamma$ ) versus la relación entre longitud sin soporte (definida por Vermeer et al. con la letra  $d$ ) y el diámetro,  $d/D$ . (Ver Figura 0.15)

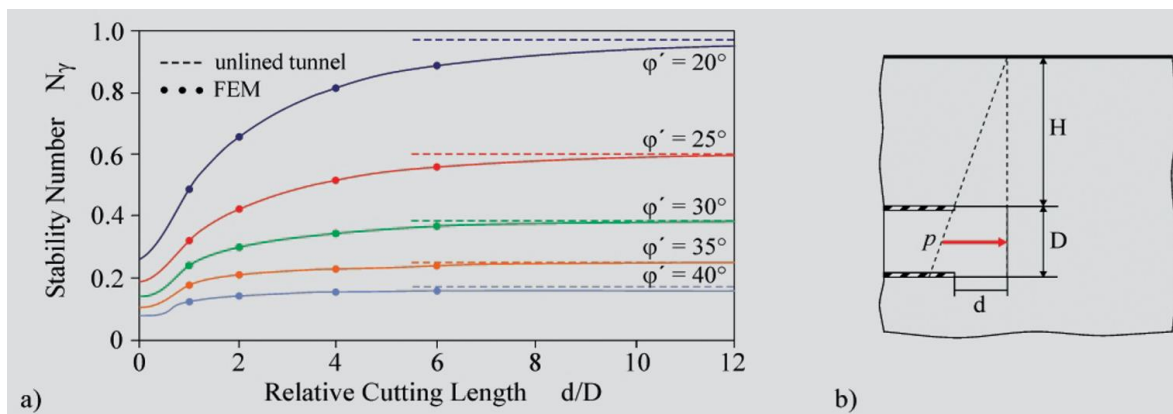


Figura 0.15. a) Gráfico  $N_\gamma$  versus  $d/D$  para túneles con  $H/D > 1$  variando el ángulo de fricción. b) Esquema general en dos dimensiones del problema estudiado por Vermeer et al. (2002).

Fuente: Artículo “Estabilidad del frente del túnel en terreno drenado”. [17]

A partir de la información mostrada en los resultados obtenidos en la Figura 0.15, Vermeer et al. 2002 estableció una expresión matemática para obtener el valor de la presión mínima que se le aplicara al frente de excavación. (Ver Ecuación 22)

$$N_\gamma = \gamma D \left[ \frac{2+3(d/D)^{6 \tan \phi}}{18 \tan \phi} - 0.05 \right] - \frac{c}{\tan \phi} \quad \text{Ecuación 22}$$

Luego, al considerar el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte  $\tau_f$  y la resistencia mobilizada  $\tau_{mob}$  que, simplemente, representa una variable lo suficientemente grande como para mantener el equilibrio, se hace la aplicación del concepto de FS de la técnica SRF utilizada por Vermeer et al (2002) a la ecuación 18, lográndose reescribir la ecuación en situaciones donde  $N_\gamma = 0$  para, finalmente obtener el FS de la excavación del frente. (Ver Ecuación 23) [17], [1]

$$FS = \frac{0.9 \tan \phi + 18 \frac{c}{\gamma D}}{2 + 3(d/D)^6 \tan \phi / FS} \quad \text{Ecuación 23}$$

En la situación donde  $d > 0$ , es necesario realizar un proceso iterativo para resolver el valor FS. Para la ejecución del cálculo se elabora su respectiva programación condicionada en Matlab, de donde se logra obtener una gráfica del FS versus los valores de L/D para las condiciones requeridas por el usuario.

### 8.6. VERIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE VERMEER, P.A., RUSE, N., MARCHER, T., (2002)

Vermeer et al. como caso de estudio de aplicación, considera la parte superior de la sección transversal del frente del túnel de Rennsteig en Turingia, excavado con NATM en terreno homogéneo, que con un área de  $44.2 \text{ m}^2$  tiene un diámetro equivalente de  $7.5 \text{ m}$  y su longitud sin soporte ( $d$ ) igual a  $1.5 \text{ m}$ . En cuanto a los parámetros de resistencia, el caso es evaluado para un suelo homogéneo con un  $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$ ,  $\phi = 30^\circ$  y cohesión de  $20 \text{ kN/m}^2$ . (Ver Figura 0.16)

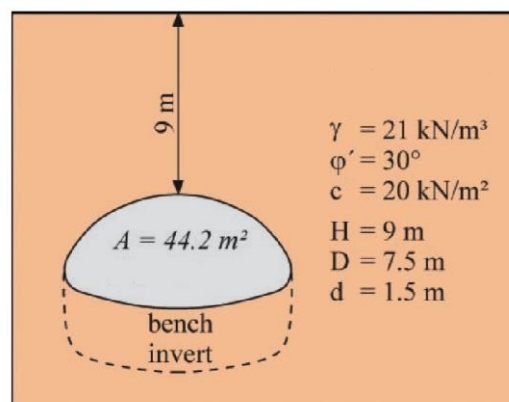


Figura 0.16. Ejercicio de aplicación de la parte superior del túnel Rennsteig en terreno homogéneo.

Fuente: Artículo "Estabilidad del frente del túnel en terreno drenado". [17]

Con la aplicación de la Ecuación 23 y los valores anteriormente vistos (Ver Figura 0.16) el factor de FS registrado en el artículo del autor Vermeer et al. es 1.36. Con base en estos datos se ejecuta el mismo ejercicio en el programa elaborado en Matlab. (Ver Figura 0.17)

Parámetros de Resistencia del Suelo					
Diametro del Túnel (D):	<input type="text" value="7.5"/>	m	Peso específico del suelo:	<input type="text" value="21"/>	kN/m <sup>3</sup>
<input type="button" value="CALCULAR"/>			Angulo de fricción:	<input type="text" value="30"/>	Grados (°)
			Cohesión:	<input type="text" value="20"/>	kPa

Figura 0.17. Interfaz gráfica de Vermeer et al. y datos de entrada evaluados.

Fuente: Autor.

El programa luego de procesar los datos arroja una serie de resultados de FS en función de longitud de excavación sin soporte sobre diámetro, variables definidas en la interfaz del programa con L/D.

Siendo así, se puede observar que en la Figura 0.16 el ejercicio aplicativo de Vermeer hace uso de una longitud sin soporte igual a 1.5 m (d= 1.5 m). Con el fin de realizar la comparación se entiende la expresión  $d/D=L/D$ , con un mismo significado, pero con simbología diferente.

Por lo tanto, para el caso a verificar, siendo  $L= 1.5$  m y  $D= 7.5$  m, la relación  $L/D$  a revisar en la gráfica será la correspondiente a  $L/D=0.2$ , la cual deberá evidenciar un  $FS=1.36$ . ( Ver Figura 0.18)

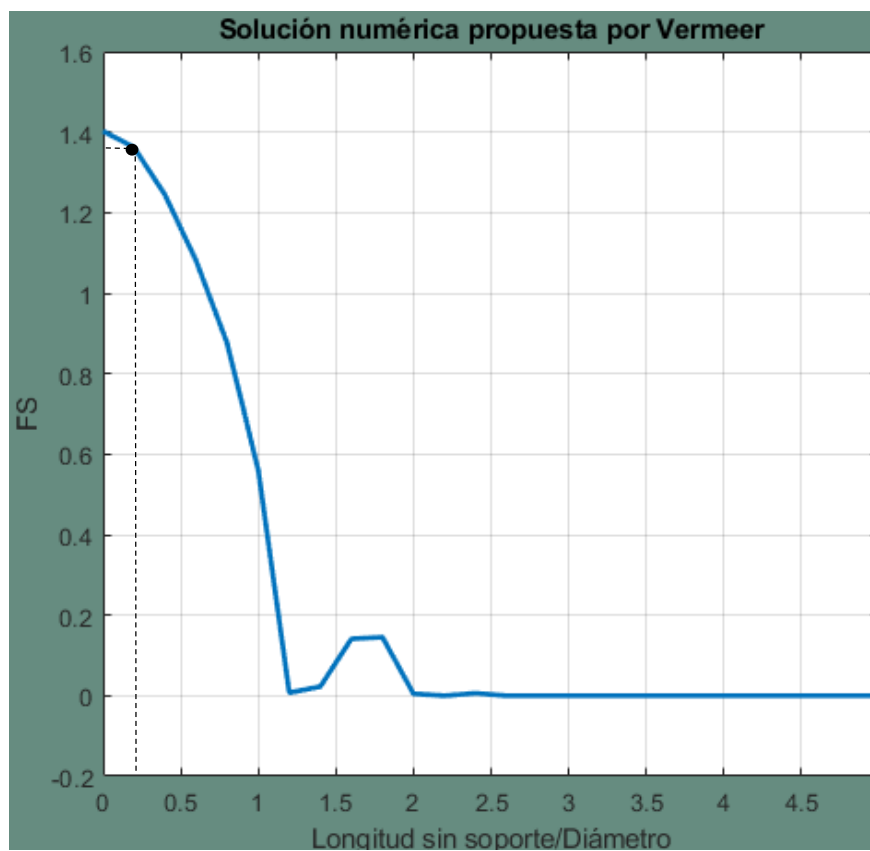


Figura 0.18. Gráfica de la solución propuesta por Vermeer et al.

Fuente: Autor.





Pan y Dias (2017) demostraron que los valores de FS obtenidos por Vermeer et al. (2002) eran mayores que los obtenidos con la definición analítica de FS, entonces ajustaron los coeficientes con la expresión de la Ecuación 25, debido a que estos valores eran más conservadores que los obtenidos con la Ecuación 23. (Ver Figura 0.20)

$$FS = \frac{1.23 \tan \phi + 15.46 c/\gamma D}{2 + 3 \left(\frac{d}{D}\right)^{6 \tan \phi / FS}} \quad \text{Ecuación 25}$$

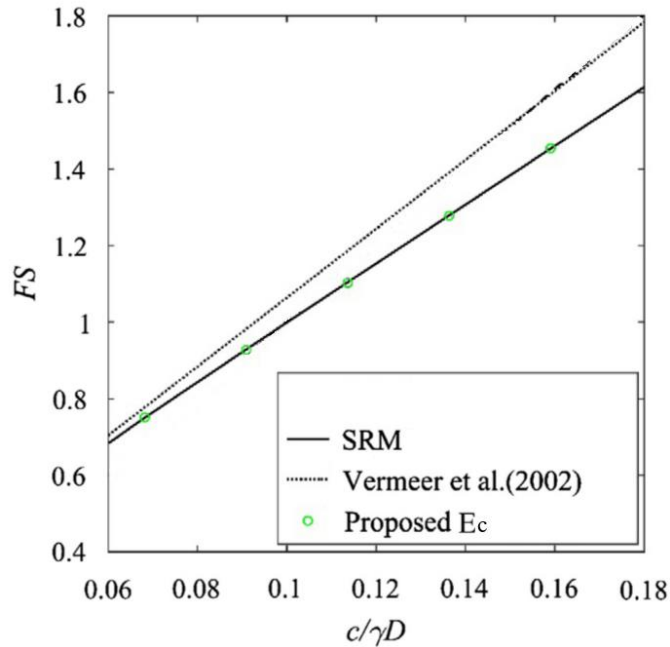


Figura 0.20. Comparación de las ecuaciones propuestas por Vermeer et al. (2002), Daniel Dias et al. (2017) y SRM (The strength reduction method) método realizado por Dias et al. (2017).

Fuente: Artículo “Análisis de límite superior en la estabilidad de la cara de un túnel no circular”. [22]-Modificado por el autor.

Es importante, tener en cuenta que esta ecuación (Ver Ecuación 21) solo es válida para un túnel de sección circular o un túnel de sección no circular con L/H cerca de 1.0. [22]

La programación de esta propuesta fue realizada con el mismo procedimiento de la propuesta matemática de Vermeer et al. (2002), por medio de la iteración para el cálculo de los diferentes valores de FS en función de los diferentes valores obtenidos de L, divididos en el diámetro (L/D).

El código de la programación de las propuestas, anteriormente expuestas, será dejado en los anexos. Con base en lo programado, es vital hacer la verificación de su efectividad, por lo que, se elaboraron una serie de pruebas de los valores de FS obtenidos con los encontrados en ejercicios resueltos en literatura de fuentes de información confiables.

## 8.8. VERIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE Q. PAN & D. DIAS.

Daniel Dias et al., al igual que Vermeer et al., para realizar el ejercicio aplicativo de su solución numérica, define inicialmente una longitud sin soporte,  $d$ , nula. Adicional a esta consideración, en cuanto a los parámetros de resistencia del suelo, elabora un análisis más amplio al aplicar la solución para diferentes valores de ángulo de fricción,  $\phi$ , los cuales van de  $10^\circ$  hasta los  $40^\circ$ , y para diferentes valores de cohesión,  $c$ . De esta manera al variar estas dos últimas variables el FS se incrementa o disminuye.

La demostración de la solución numérica de Daniel Dias et al. es presentada por medio de una gráfica de FS en función de la relación  $\frac{c}{\gamma D}$  y para diferentes valores de ángulo de fricción. (Ver Figura 0.21) Con el uso de esta grafica se realiza la verificación de la validez del código de programación para el autor Daniel Dias et al.

Sin embargo, para que esto fuera posible se seleccionó del eje de las abscisas el valor de  $\frac{c}{\gamma D} = 0.1$ , y se vinculó para un ángulo de fricción  $\phi = 40^\circ$ . Con base en estas dos consideraciones, entonces:  $c = 3.5 \text{ kN/m}^2$ ,  $\gamma = 17.5 \text{ kN/m}^3$  y  $D = 2 \text{ m}$ , y de esta manera, obtener finalmente de la relacion  $\frac{c}{\gamma D}$  el resultado requerido de 0.1.

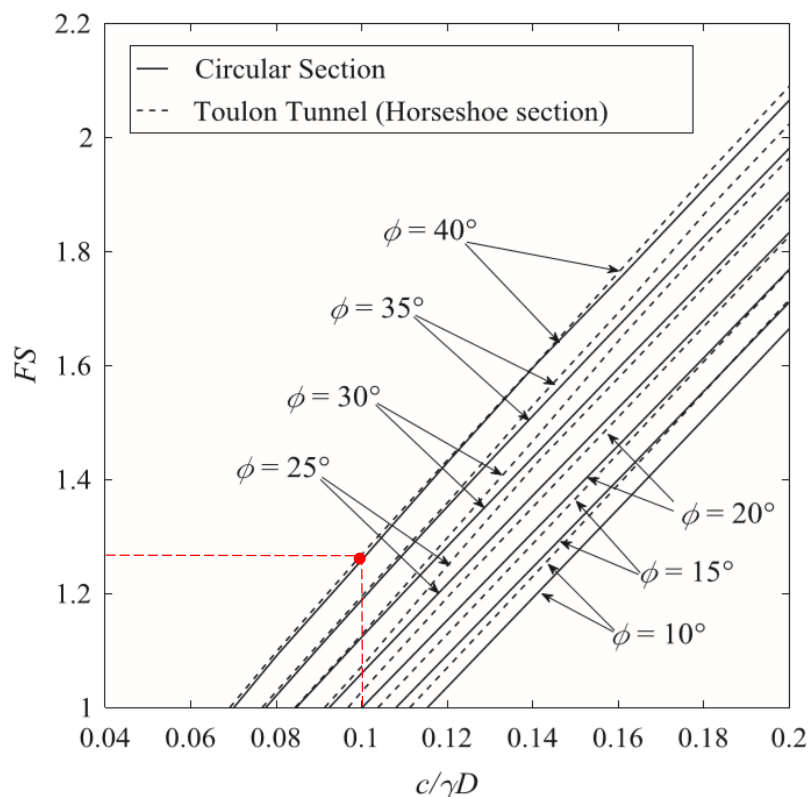


Figura 0.21. El factor de seguridad en función de cohesiones normalizadas con diferentes ángulos de fricción.

Fuente: Artículo "Análisis de límite superior en la estabilidad de la cara de un túnel no circular". [22]

Con los datos de entrada definidos y observando directamente de la gráfica de la Figura 0.21 que el FS, para una normalización de la cohesión de 0.1 y un ángulo de fricción de 40°, esta entre 1.2 y 1.4, es posible realizar la verificación por medio del programa elaborado en este trabajo. (Ver Figura 0.22)

Parámetros de Resistencia del Suelo					
Diametro del Túnel (D):	<input type="text" value="2"/>	m	Peso específico del suelo:	<input type="text" value="17.5"/>	KN/m <sup>3</sup>
<input type="button" value="CALCULAR"/>			Angulo de fricción:	<input type="text" value="40"/>	Grados (°)
			Cohesión:	<input type="text" value="3.5"/>	KPa

Figura 0.22. Interfaz gráfica de Daniel Dias et al. y datos de entrada evaluados.  
Fuente: Autor.

De inmediato, el programa ejecuta la gráfica de FS en función de longitud sin soporte dividida en el diámetro, L/D. Como se mencionó anteriormente, el dato a verificar será el correspondiente a una longitud sin soporte nula, es decir el FS para un L/D=0. (Ver Figura 0.23)

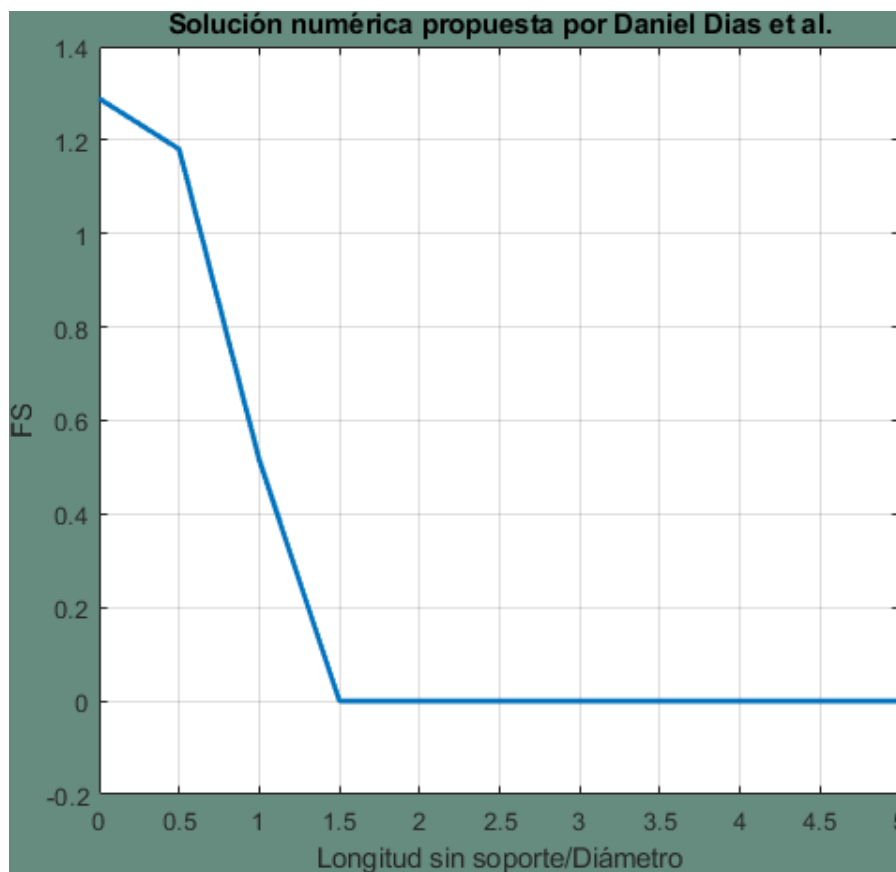


Figura 0.23. Gráfica de la solución propuesta por Daniel Dias et al.  
Fuente: Autor.



## 9. ETAPA 4: MODELACIÓN NUMÉRICA

### 9.1. VALIDACIÓN NUMÉRICA

Con objetivo de validar la veracidad de los resultados y la técnica de Método de Elementos Finitos (MEF), inicialmente se representan algunos de los problemas de excavación subterránea, en los cuales se tiene en cuenta las soluciones teóricas conocidas para hacer la comparación con los resultados obtenidos de la modelación en ABAQUS 6.14-2.

Estas simulaciones numéricas se realizaron con modelos elásticos y elástico-plástico, así como modelos de deformación plana y estados tridimensional.

### 9.2. SOLUCIÓN PANET PARA DESPLAZAMIENTOS LONGITUDINALES

Panet (1979) determina los desplazamientos radiales en las paredes de un túnel circular a lo largo de su eje en su solución propuesta, en donde la presencia del frente de excavación del macizo es considerado elástico y es sometido a una carga axisimétrica; lo anterior es expresado mediante las ecuaciones:

Para  $Z > 0$

$$U_r = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\|Z\|}{0.7R}\right) \right] \quad \text{Ecuación 26}$$

Para  $Z < 0$

$$U_r = C_0 - C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\|Z\|}{0.7R}\right) \right] \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde:

$$C_0 = -\frac{\sigma_0 R}{2G} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$C_1 = -\frac{\sigma_0 R}{2G} (1 - h_0) \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

$$h_0 \cong 1/3$$

$\sigma_0$  = Tensión inicial in situ

G = Módulo de cizallamiento del macizo

Z = Distancia al frente de excavación

#### 9.2.1. Validación numérica

De acuerdo a Gomes Pereira (2006) se establece la estabilización de desplazamiento cuando  $z < 0$  y  $z > 0$ , teniendo en cuenta que  $z = 0$  en el frente de excavación y los  $z < 0$  se encuentran en la parte del macizo no excavada.

El radio de excavación simulado es de 5 m. El modelo fue construido con una longitud total de 20 veces el radio de excavación, su ancho y altura es de 10 veces el radio y una longitud excavada de 5 veces el radio. (Figura 0.1).

Para esta simulación de la solución de Panet fue utilizada una malla de elementos finitos, la cual cuenta con 27873 nodos y un total de 24976 elementos tipo C3D8R (Figura 0.2)

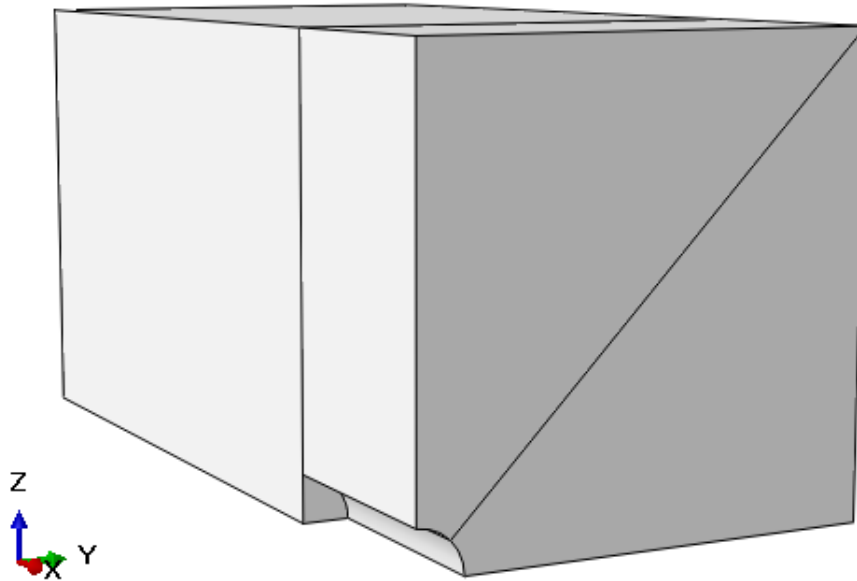


Figura 0.1. Geometría utilizada en la validación, Solución de Panet  
Fuente: Autor.

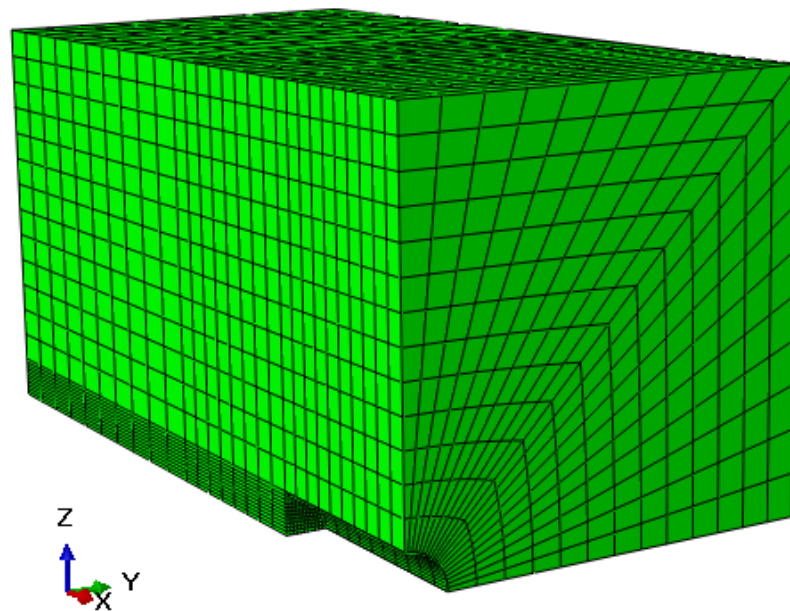


Figura 0.2. Malla de elementos finitos utilizada en la validación, Solución de Panet  
Fuente: Autor.

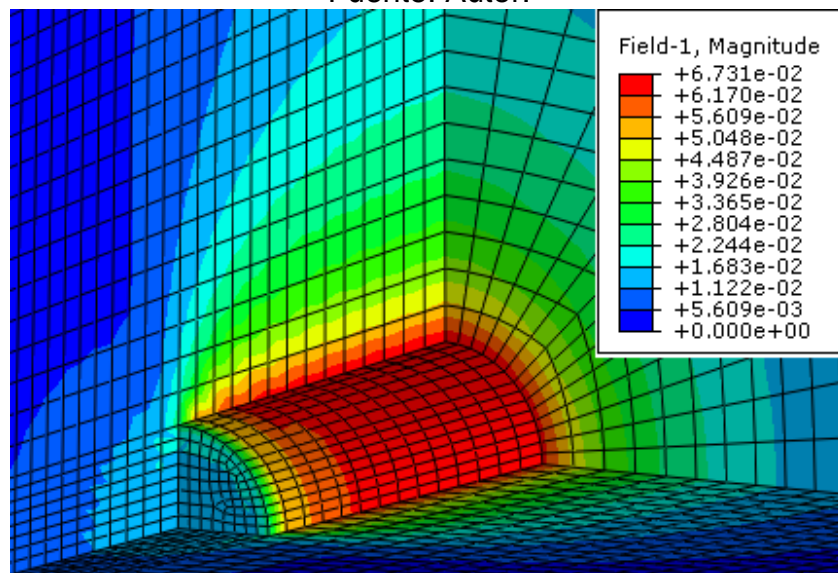


Figura 0.3. Distribución de desplazamientos para el modelo 3D, Solución de Panet  
Fuente: Autor.

- Comparación de los resultados obtenidos

Los desplazamientos radiales obtenidos en la simulación numérica (Gráfica 0.1), representan un modelo cercano a la solución de Panet (Figura 0.3), considerando para este caso:  $R= 5m$ ,  $\sigma_0 = 100KPa$ ,  $\nu= 0.3$  y  $E=10000KPa$ .

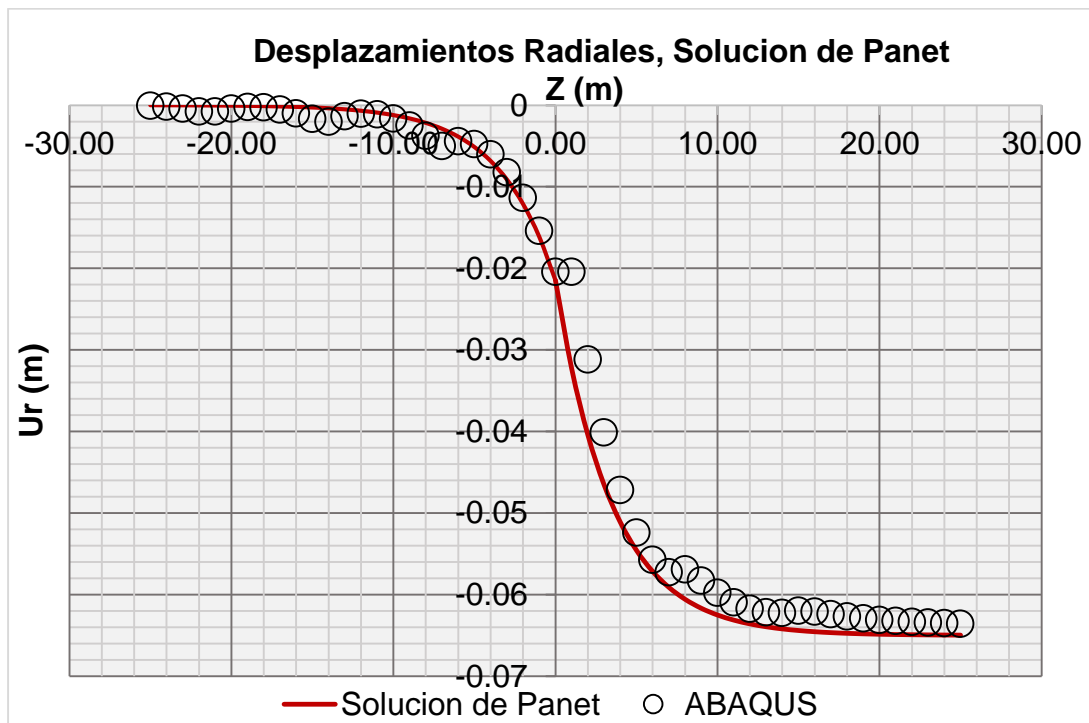


El porcentaje de error relativo ( $E_r$ ) entre las soluciones, podría entonces calcularse siguiendo la Ecuación 30, donde el error absoluto ( $E_a$ ) se considera como la resta entre el valor real (solución analítica) y el valor medido (solución numérica). Para los casos, se obtuvieron pequeñas diferencias entre la solución analítica y la modelación en ABAQUS 6.14-2; el cálculo del error relativo no supera el 5%, valor que se alcanzó gracias al refinamiento de la malla utilizada en las modelaciones.

$$E_r = \frac{E_a}{\bar{X}} * 100 \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde:

$E_r$  = Error relativo  
 $E_a$  = Error absoluto  
 $\bar{X}$  = Valor real



Gráfica 0.1 Comparativo de los desplazamientos radiales obtenidos en la solución teórica de Panet y Simulación numérica

Fuente: Autor.

### 9.3. SOLUCIÓN KIRSCH

La solución clásica de Kirsch para desplazamientos radiales, estados de tensión normal y estado de corte resultantes de la excavación de material, en forma de circunferencia con radio  $a$ , un estado homogéneo isotrópico, continuo y lineal para un estado de deformaciones planas y sometido a un estado inicial de tensiones  $P_1$  y  $P_2$ , según Goodman (1989) se puede representar mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_r = \frac{P_1+P_2}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{P_1-P_2}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad \text{Ecuación 31}$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_1+P_2}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{P_1-P_2}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad \text{Ecuación 32}$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{P_1-P_2}{2} \left(1 + \frac{4a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \quad \text{Ecuación 33}$$

$$u_r = \frac{P_1+P_2}{4G} \frac{a^2}{r} + \frac{P_1-P_2}{4G} \frac{a^2}{r} \left[4(1-\nu) - \frac{a^2}{r}\right] \cos 2\theta \quad \text{Ecuación 34}$$

$$u_\theta = \frac{P_1-P_2}{4G} \frac{a^2}{r} \left[2(1-\nu) + \frac{a^2}{r^2}\right] \sin 2\theta \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde:

G= Módulo de cizallamiento del macizo

r,θ= Coordenadas polares del punto de interés

u<sub>r</sub>, u<sub>θ</sub>= Desplazamiento radial y tangencial respectivamente

σ<sub>r</sub>, σ<sub>θ</sub>, τ<sub>rθ</sub>= Tensiones normales en dirección radial, tangencial y de corte en el plano respectivamente

### 9.3.1. Validación numérica

Para la validar la solución analítica de Kirsch se realizaron simulaciones para tres casos diferentes. (Tabla 0.1)

Tabla 0.1. Parámetros para la validación de la Solución de Kirsch

PARÁMETROS	CASO 1	CASO 2	CASO3
E (kPa)	10000	10000	10000
G (kPa)	3846.2	3846.2	3846.2
ν	0.3	0.3	0.3
a (m)	5	5	5
P1 (kPa)	10	10	10
P2 (kPa)	10	20	10
θ(°)	0	0	90

Fuente: Autor.

Cabe resaltar que los dos primeros casos fueron representados en un modelo de deformación plana y el último caso en un modelo en tres dimensiones.

### 9.3.1.1. Caso 1 y 2

- Geometría

Para la modelación bidimensional representada en ABAQUS 6.14-2 se decidió modelar una sección cuadrada cuya dimensión es 20 veces el radio de excavación, que compone una geometría de 100x100m. En el lado izquierdo, se considera una condición de contorno de primer grado para evitar los desplazamientos en las direcciones X y Y. Así como en el lado inferior con las mismas condiciones anteriores, en la superficie y el lado derecho fueron definidas las tensiones de compresión  $P_1 = 10 \text{ KPa}$  y  $P_2 = 10 \text{ KPa}$ . Cuyos valores se muestran en la (Figura 0.4).

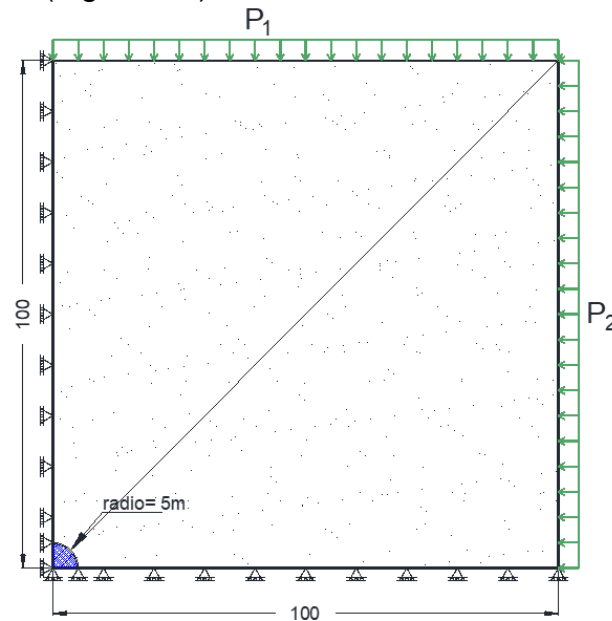


Figura 0.4 Características geométricas del modelo utilizado en ABAQUS 6.14-2 en representación de la solución de Kirsch

Fuente: Autor.

- Malla Utilizada

La malla utilizada en la modelación está compuesta por 10578 nodos en dos dimensiones con 2980 elementos finitos de tipo CPE8R (Figura 0.5), ejecutados de un orden de interpolación cuadrática y de manera estándar.

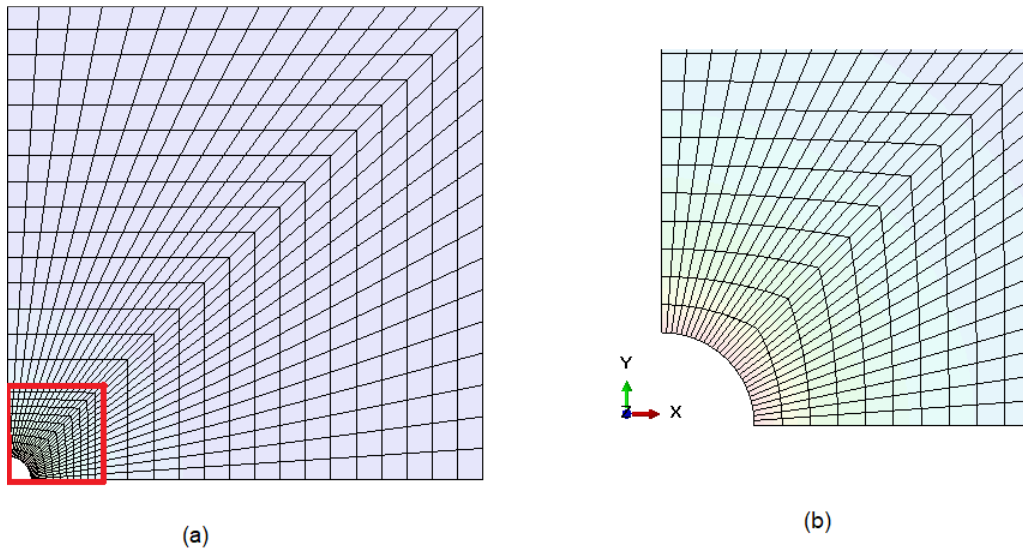


Figura 0.5 Malla de elementos finitos utilizada. (a) Malla completa (b) Zoom del área resaltada de excavación

Fuente: Autor.

- Comparación de los resultados obtenidos

Para los primeros dos casos que se establecieron en la (Tabla 0.1), se determinó que el error relativo, dado por la Ecuación 30, entre los resultados de las tensiones tangencial, radial y cortante, obtenidos analíticamente mediante la modelación y numéricamente, no excedió el 0.5%. Para desplazamientos radiales, hasta 4 veces el radio de perforación, el error relativo es del 2.0%, a partir de esta distancia el error aumenta debido al efecto de los contornos, pero representa el efecto del radio de excavación. Los desplazamientos tangenciales representan un error relativo casi igual a cero. Los gráficos de las comparaciones en la (Gráfica 0.2), (Gráfica 0.3), (Gráfica 0.4) y (Gráfica 0.5) y los contornos de los desplazamientos y tensiones obtenidos numéricamente en la (Figura 0.6) y la (Figura 0.7) se pueden ver a continuación.

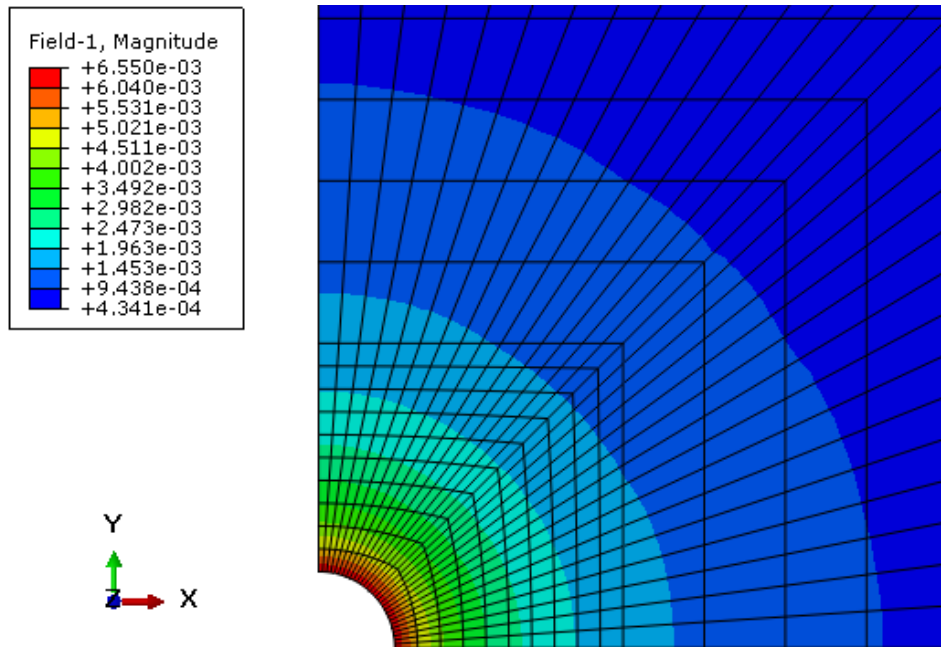
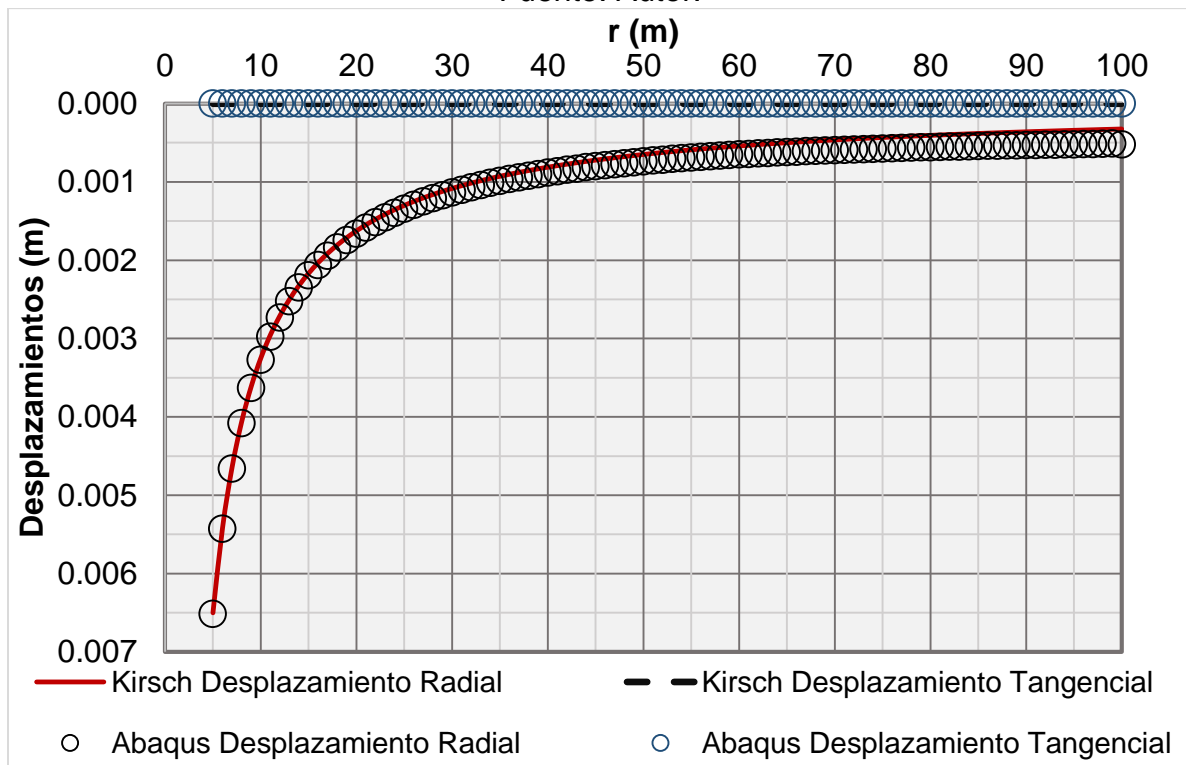


Figura 0.6 Resumen de los desplazamientos totales obtenidos en ABAQUS 6.14-2 para el primer estudio de caso al evaluar el rendimiento del software en relación con la solución analítica de Kirsch

Fuente: Autor.



Gráfica 0.2 Comparativo de los desplazamientos obtenidos por la solución de Kirsch y por la simulación numérica para el caso 1 (2D)

Fuente: Autor.

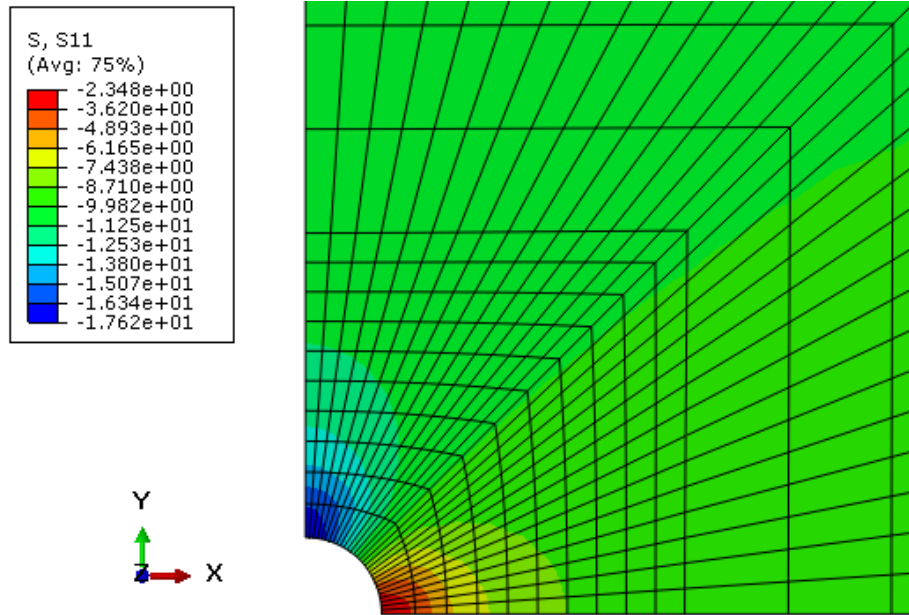
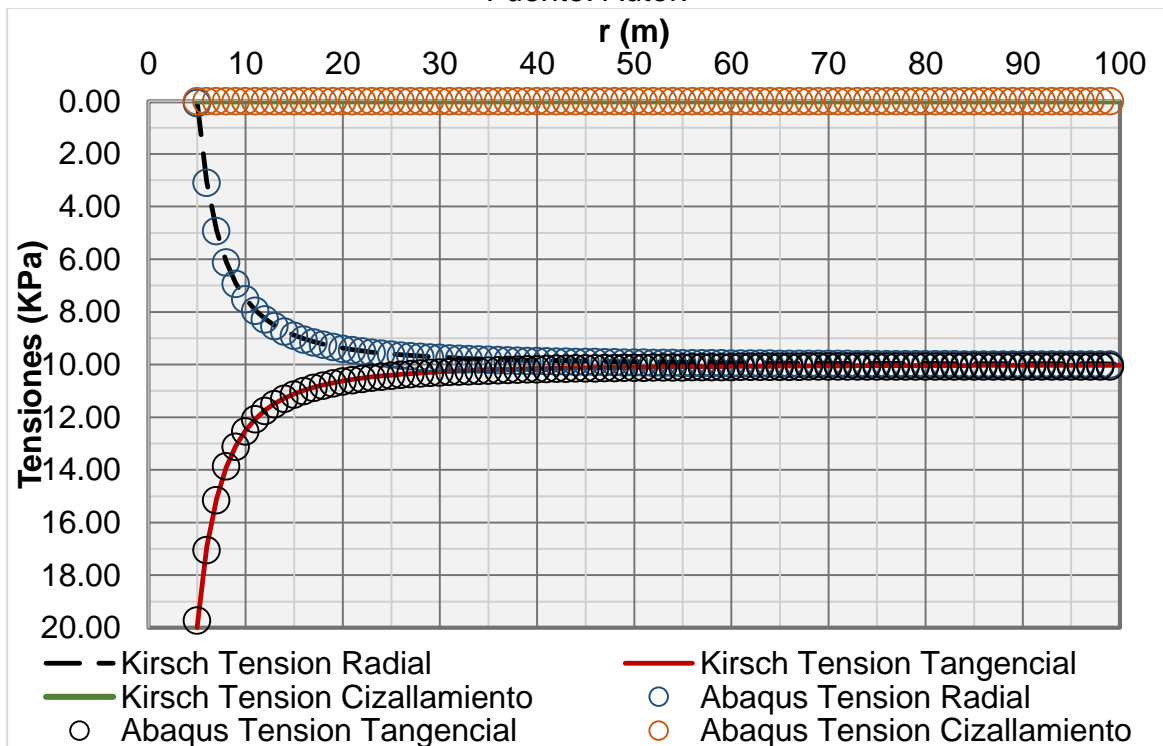
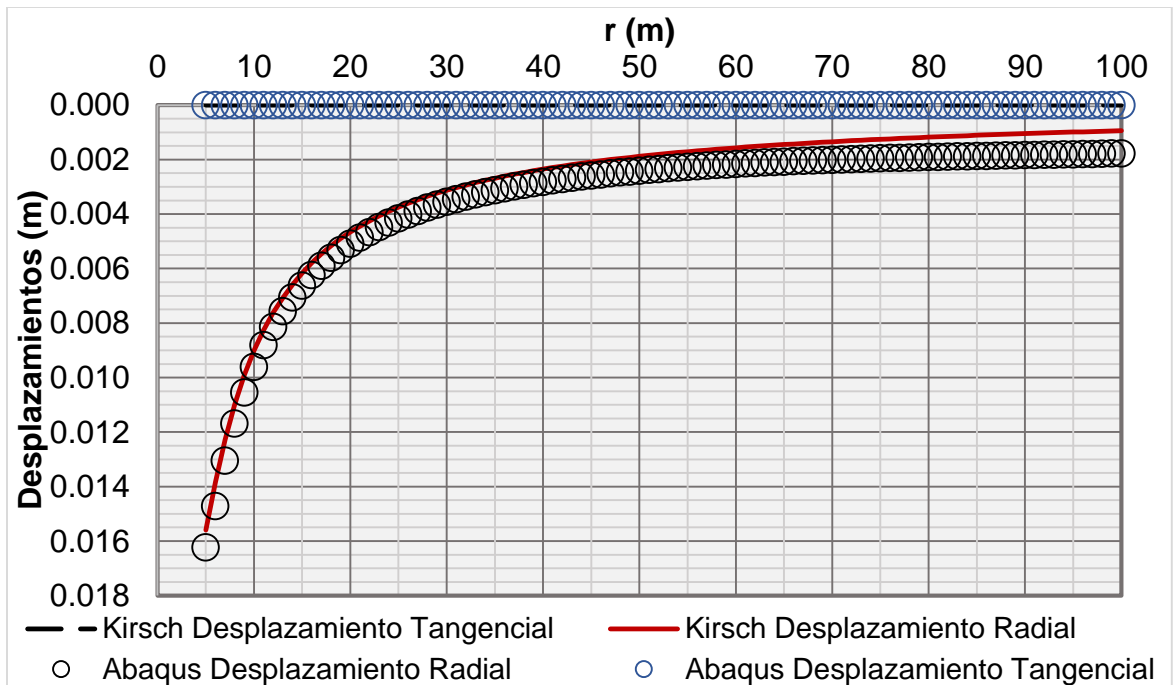


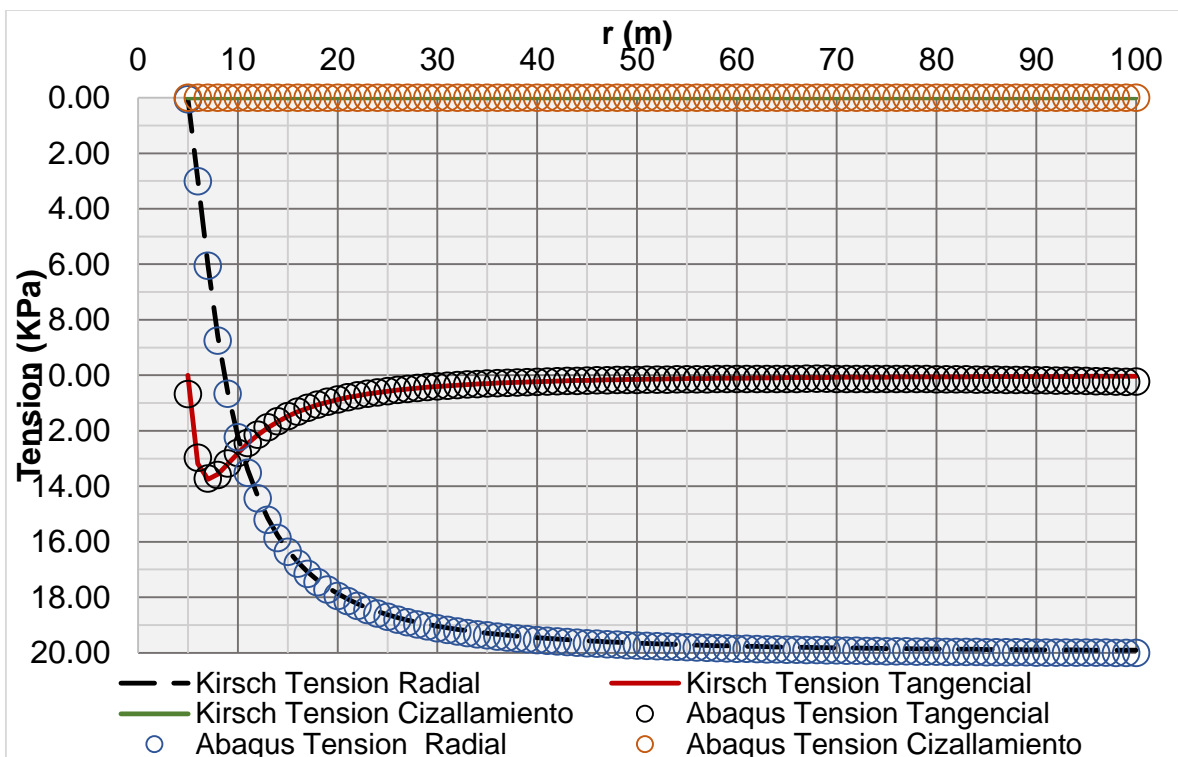
Figura 0.7 Contorno de tensiones radiales obtenidas en ABAQUS 6.14-2 para el primer estudio de caso al evaluar el rendimiento del software en relación con la solución analítica de Kirsch  
Fuente: Autor.



Gráfica 0.3 Comparativo de los esfuerzos obtenidos por la solución de Kirsch y por la simulación numérica para el caso 1 (2D)  
Fuente: Autor.



Gráfica 0.4 Comparativo de los desplazamientos obtenidos por la solución de Kirsch y por la simulación numérica para el caso 2 (2D)  
Fuente: Autor.



Gráfica 0.5 Comparativo de los esfuerzos obtenidos por la solución de Kirsch y por la simulación numérica para el caso 2 (2D)  
Fuente: Autor.

### 9.3.1.2. Caso 3

- Geometría

Para este caso, se repitieron los mismos pasos que en los dos casos anteriores, con la diferencia en que el modelo numérico ahora es tridimensional, donde los nodos contenidos en los planos de límite perpendiculares al eje z no podían moverse en esta dirección dada la condición de contorno establecida, simulando un estado de deformaciones planas.

- Malla Utilizada

La malla utilizada en la modelación está compuesta por 28463 nudos con 5375 elementos finitos del tipo C3D20R (Figura 0.8), ejecutada con un orden de interpolación cuadrática y de manera estándar.

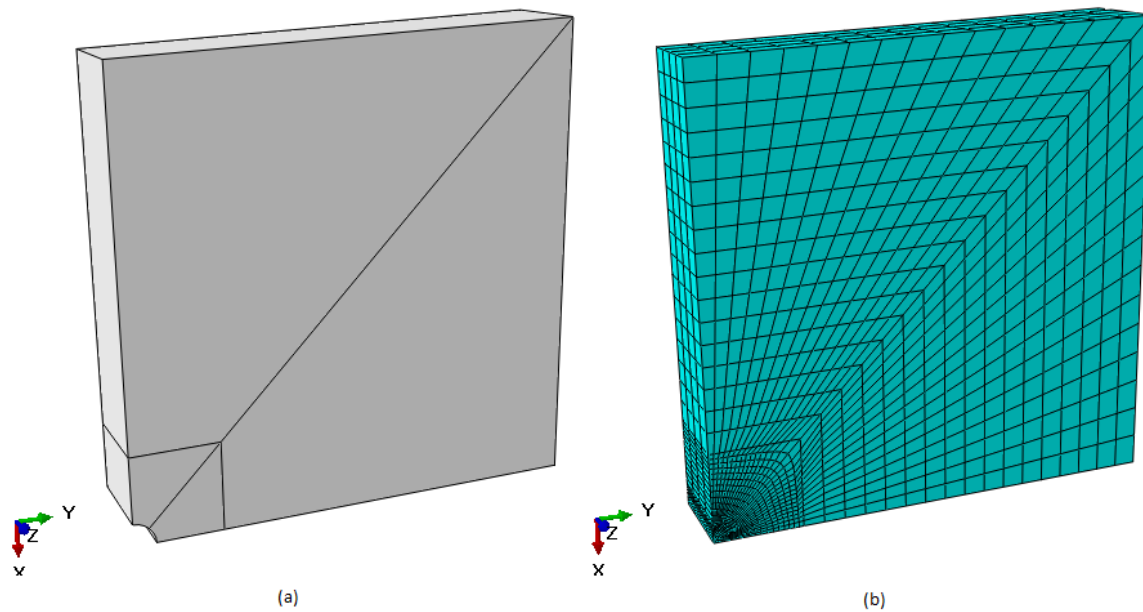


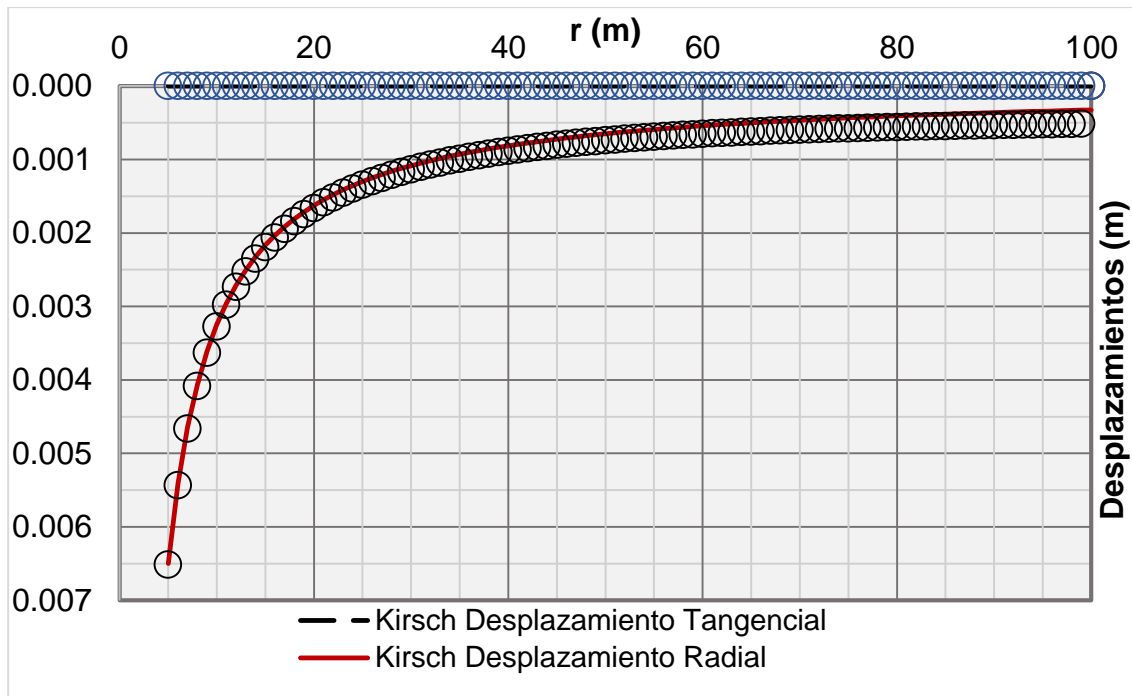
Figura 0.8 (a) Geometría utilizada en la modelación (b) Malla de elementos finito  
Fuente: Autor.

- Comparación de los resultados obtenidos

En este caso tridimensional, se determinó que el error relativo, dado por la  $Er = \frac{Ea}{\bar{x}} * 100$  Ecuación 30, entre los resultados de los esfuerzos tangenciales, radiales y de corte obtenidos analíticamente y numéricamente no excedió el 0.5%. Esta comparación se puede ver en la (Gráfica 0.7). Para desplazamientos radiales, hasta 4 veces el radio de perforación, el error relativo es 2.5%, a partir de esta distancia el error

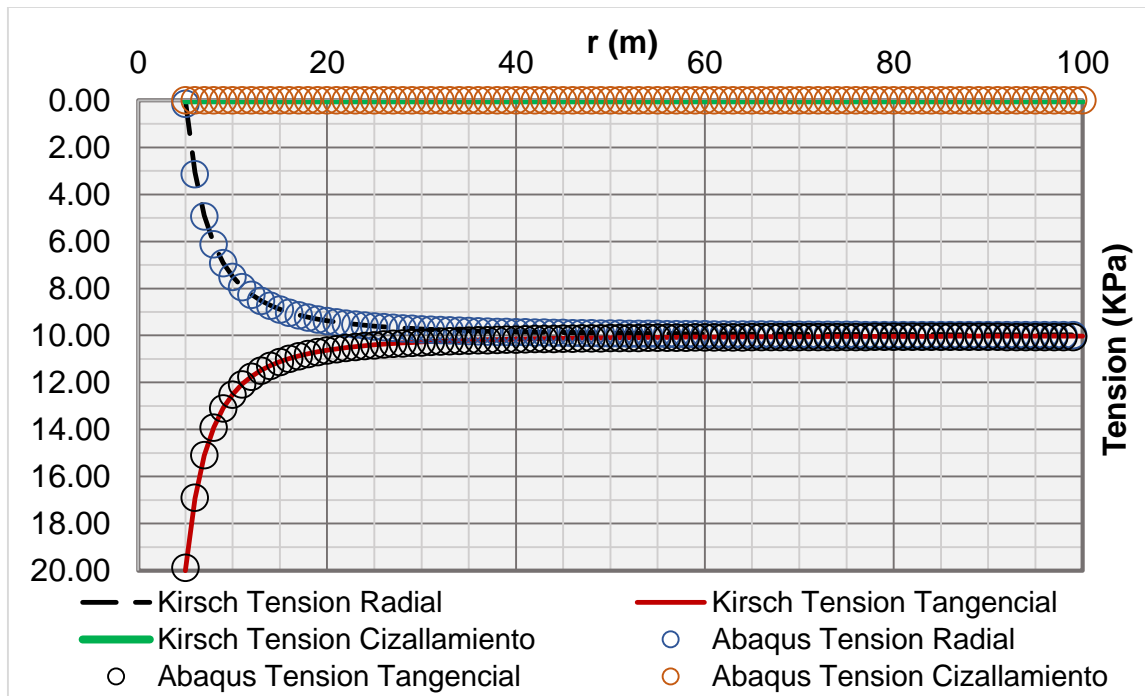


aumenta debido al efecto de los contornos, pero aún representa bien el efecto de la excavación (Gráfica 0.6).



Gráfica 0.6 Comparativo de los desplazamientos obtenidos por la solución de Kirsch y simulación numérica para el caso 3 (3D)

Fuente: Autor.



Gráfica 0.7 Comparativo de los esfuerzos obtenidos por la solución de Kirsch y por la simulación numérica para el caso 3

Fuente: Autor.

#### 9.4. SOLUCIÓN SALENÇON

Salençon (1969) en su solución analítica propone una solución analítica para estimar los desplazamientos y tensiones en las regiones plásticas y elásticas que ocurrieron en un medio plástico-elástico infinito con los parámetros de resistencia de Mohr-Coulomb y con un estado de tensiones dado por  $P_1 = P_2 = P_0$ , en otros términos, un eje asimétrico y estado de deformación plana, desde donde se realiza la excavación de geometría circular de radio  $a$ .

Estos desplazamientos radiales, desplazamientos tangenciales y las tensiones se determinan por las siguientes ecuaciones:

Desplazamientos radiales:

$$U_{rp} = -\frac{r}{2G}k \quad \text{Ecuación 36}$$

$$U_{re} = -\frac{1}{2} \frac{R_p^2}{Gr} (P_0 - \sigma_{ri}) \quad \text{Ecuación 37}$$

Tensión radial en la interfaz entre las regiones elástica y plástica:

$$\sigma_{ri} = -\frac{2P_0 - q}{K_p + 1} \quad \text{Ecuación 38}$$

Tensiones plásticas:

$$\sigma_{rp} = p - (P_i + p) \left(\frac{r}{a}\right)^{K_p-1} \quad \text{Ecuación 39} \quad \sigma_{\theta p} = p - K_p (P_i + p) \left(\frac{r}{a}\right)^{K_p-1} \quad \text{Ecuación 40}$$

Tensiones elásticas:

$$\sigma_{re} = -P_o + (P_o - \sigma_{ri}) \left(\frac{R_p}{r}\right)^2 \quad \text{Ecuación 41} \quad \sigma_{\theta e} = -P_o - (P_o - \sigma_{ri}) \left(\frac{R_p}{r}\right)^2 \quad \text{Ecuación 42}$$

Remplazadas en:

$$k = (2\nu - 1)(P_o + p) + \frac{(1-\nu)(K_p^2 - 1)}{K_p + K_{ps}} (P_i + p) \left(\frac{R_p}{a}\right)^{K_p-1} \left(\frac{R_p}{r}\right)^{K_{ps}-1} + \left[ (1 - \nu) \frac{K_p K_{ps} + 1}{K_p + K_{ps}} - \nu \right] (P_i + p) \left(\frac{r}{a}\right)^{K_p-1} \quad \text{Ecuación 43}$$

$$p = \frac{q}{K_p - 1}; \quad \text{Ecuación 44}$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}; \quad \text{Ecuación 45}$$

$$K_{ps} = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}; \quad \text{Ecuación 46}$$

$$q = 2c \tan \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{Ecuación 47}$$

Donde:

a= Radio de excavación

r = Distancia desde el centro hasta un punto determinado

Po= Presión in situ

Pi= Presión interna, para este caso igual a cero

El radio de la zona de plastificación está dado por:

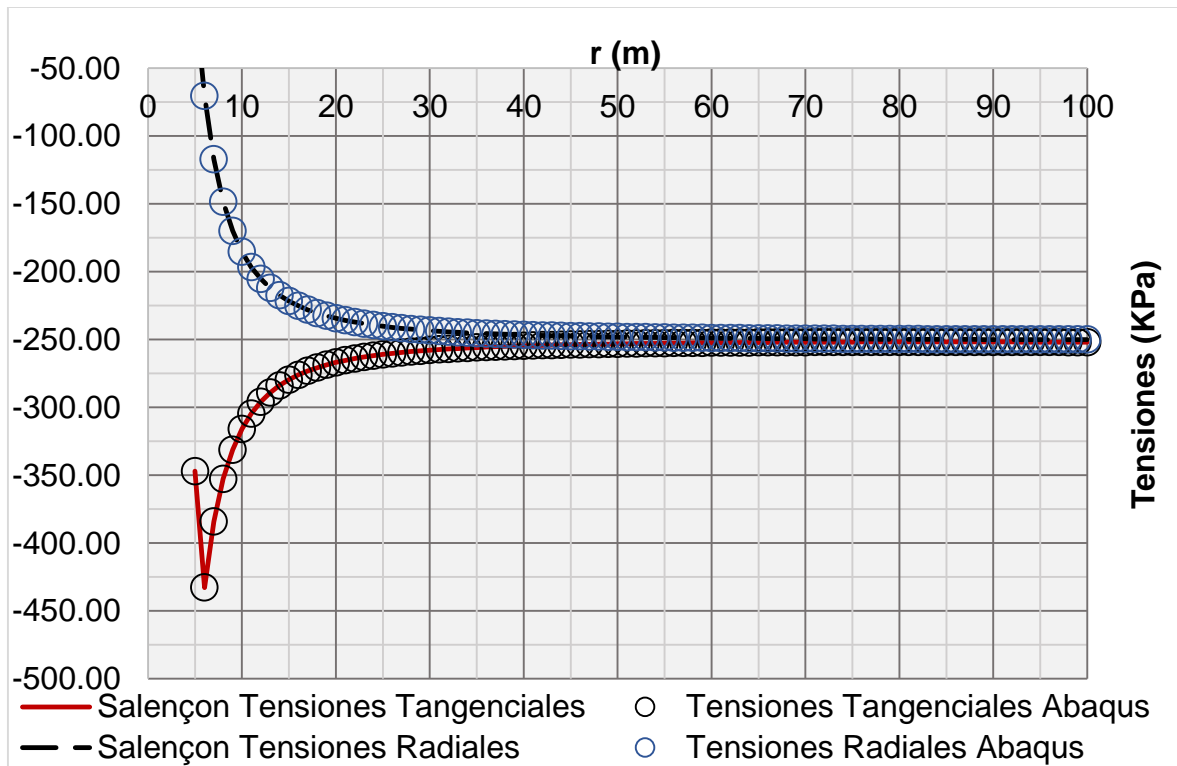
$$R_p = a \left[ \frac{2}{K_p + 1} \frac{(P_o + p)}{(P_i + p)} \right]^{\frac{1}{K_p - 1}} \quad \text{Ecuación 48}$$

#### 9.4.1. Validación numérica

Así como en las soluciones anteriores, para la solución de Salençon se busca replicar las condiciones establecidas analíticamente mediante el uso de ABAQUS 6.14-2 .

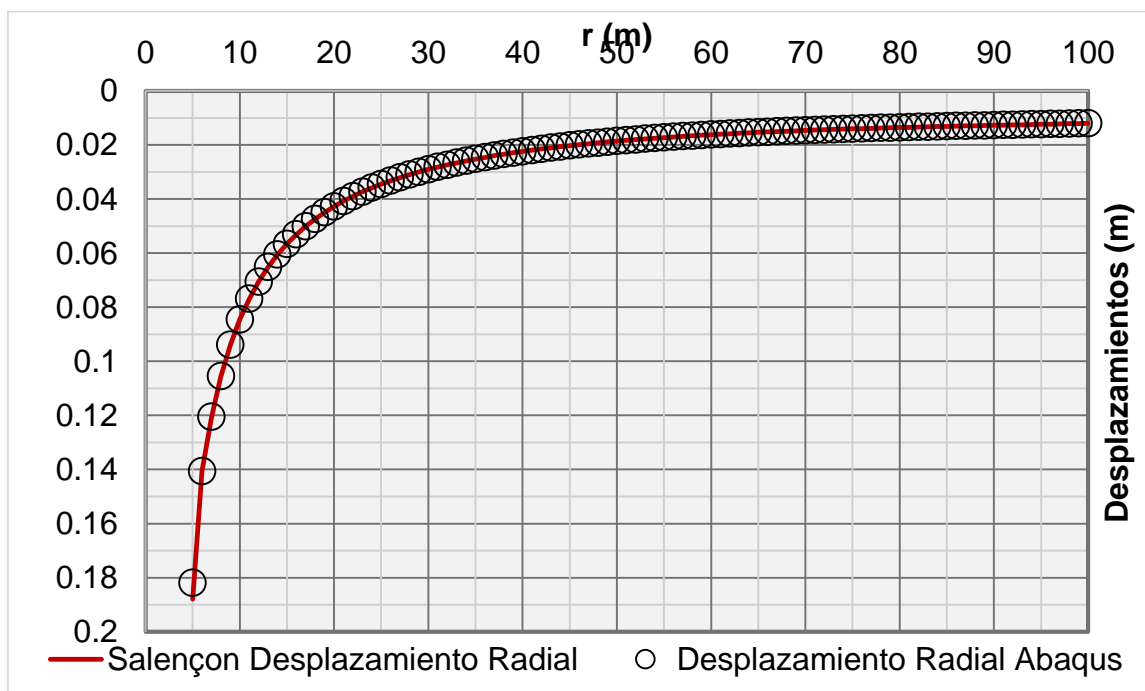
En este caso, considerando:  $P_o = 250\text{kPa}$ ,  $P_a = 0$ ,  $a = 5\text{m}$ ,  $\nu = 0.3$ ,  $E = 10000\text{kPa}$ ,  $c = 100\text{kPa}$ ,  $\phi = 30^\circ$ . Se compararon los desplazamientos radiales, dando como resultado que la diferencia entre la solución analítica y numérica no superó el 1% de error relativo.

Además, se puede verificar la magnitud y distribución de estos desplazamientos en la (Gráfica 0.8) (Gráfica 0.9).



Gráfica 0.8 Comparativo de los esfuerzos obtenidos por la solución de Salençon y por la simulación numérica

Fuente: Autor.



Gráfica 0.9 Comparativo de los desplazamientos obtenidos por la solución de Salençon y por la simulación numérica

Fuente: Autor.

## 10. ETAPA 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 10.1. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO EN 3D

Para corroborar la validez del modelo numérico de la presente investigación, se desarrolló una réplica de uno de los modelos presentados en la Disertación “Soluciones numéricas y analíticas para la estabilidad de excavaciones subterráneas” realizada por el Ingeniero Sergio Enrique Argüello Vera (2017).

El modelo escogido presenta una relación de longitud excavada sin soporte y Diámetro igual a uno ( $L/D=1$ ). Adicionalmente el resultado numérico fue comparado con el resultado analítico propuesto por Carranza-Torres et al. (2013).

#### 10.1.1. Definición del factor de seguridad utilizando la técnica Strength Redution Factor en ABAQUS 6.14-2

El factor de seguridad se define como el SRF que conlleva al establecimiento de la ruptura en el macizo, la ruptura está caracterizada por un aumento significativo de los desplazamientos en un punto específico (en la presente investigación, se adoptaron tres nodos de interés). (Ver Figura 0.1)

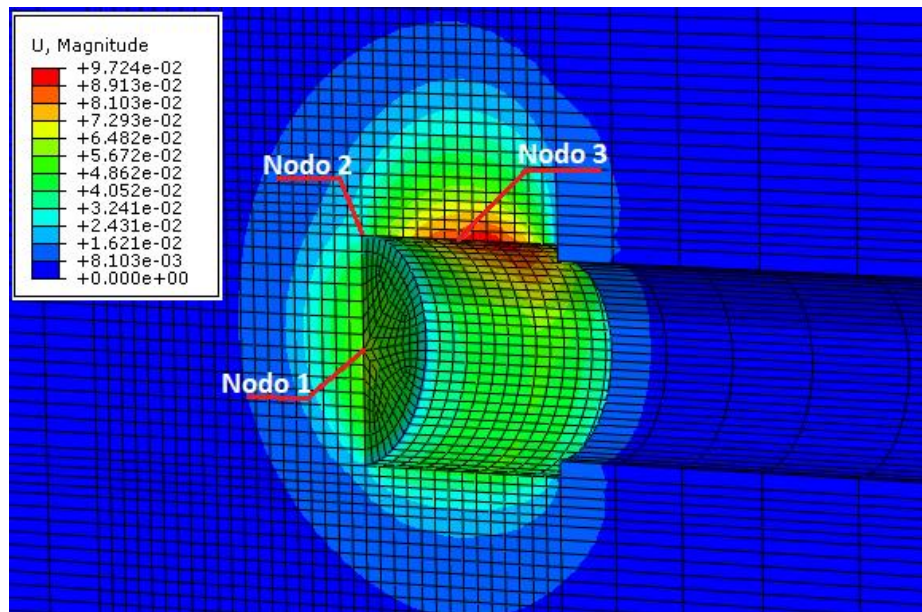


Figura 0.1 Localización de los nodos de interés  
Fuente: Autor.

Es importante tener en cuenta que, por defecto, ABAQUS 6.14-2 no tiene esta técnica (SRF), por lo que para obtener el FS fue necesario ejecutar la reducción de los parámetros de resistencia de Mohr – Coulomb (cohesión  $c$ , y ángulo de fricción  $\phi$ ) y realizar el análisis de elementos finitos iterativamente hasta que ocurre el colapso,

caracterizado normalmente por un fuerte aumento en el desplazamiento de un punto característico, o por la no convergencia del problema.

### 10.1.2. Modelo numérico para validar la condición $L = 1D$

A continuación, se muestran los parámetros y datos iniciales que se tuvieron en cuenta para un macizo presentado por Carranza Torres et al. (2013) y también desarrollado numéricamente por Sergio Enrique Argüello Vera (2017). (Ver Figura 0.2)

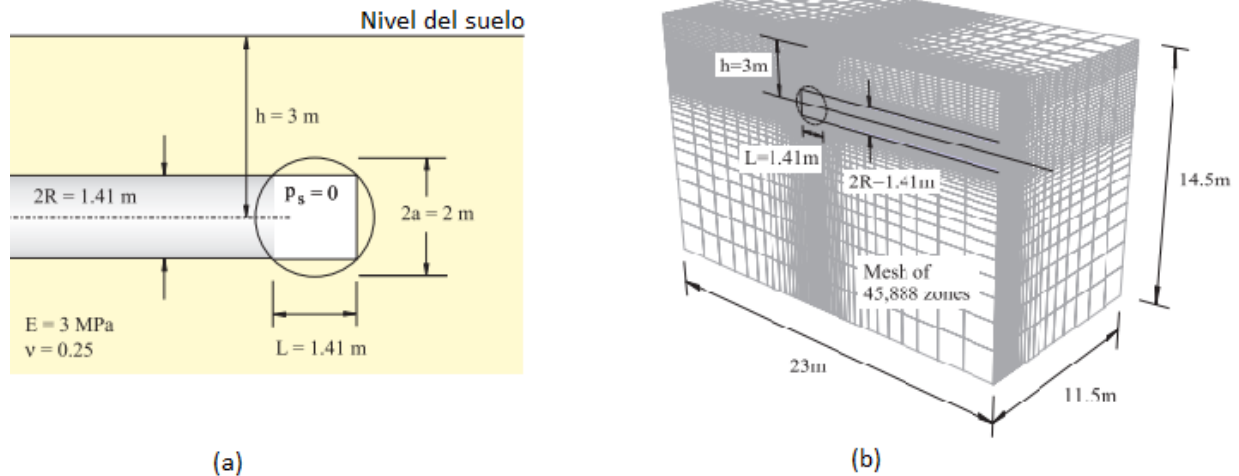


Figura 0.2 Datos utilizados en la modelacion inicial (a) Corte longitudinal de la geometria (b) Malla de elementos finitos y geometria del macizo (Carranza-Torres, et al. 2013)

Fuente: Carranza-Torres, C., T. Reich, and D. Saftner (2013). Stability of shallow circular tunnels in soils using analytical and numerical models. [19]

Los parámetros presentados se evidencian en la Tabla 0.1.

Tabla 0.1. Parametros utilizados en el macizo

$E(kPa)$	3000
$v$	0.25
$\phi(^{\circ})$	30
$c(kPa)$	4.69
$\gamma(kN/m^3)$	25

Fuente: Autor.

### 10.1.3. Geometría del modelo, malla de elementos y etapas de la excavación

Inicialmente, se tomó la geometría inicial del modelo y las dimensiones (Figura 0.2), se realizó una excavación en un primer tramo la cual se sostuvo con un material elástico de longitud 10 m y un espesor de 0.1 m, despreciando los desplazamientos producidos por este primer tramo de excavación. La propiedad correspondiente al material de soporte empleado para el tramo inicial se muestra en la Tabla 0.2:

A partir de este tramo inicial, se excavaron secciones de 0.5 veces el diámetro hasta que se obtuvo el valor de Longitud sin soporte (L) deseado, para el caso 1D.

Tabla 0.2. Propiedades de soporte simulado utilizado en ABAQUS 6.14-2

$\gamma(kN/m^3)$	25
$E_s(kPa)$	22000
$\nu_s$	0.22

Fuente: Autor

Para establecer las condiciones de contorno al modelo, se realizó mediante la simetría del problema. Este procedimiento se emplea especialmente en modelos tridimensionales, ya que se reduce el tiempo de procesamiento del modelo y el número de elementos sin afectar el resultado final. El campo predefinido para  $y = 11.5$ , plano ZX: se impidieron los desplazamientos en la dirección Y; para  $y = 0$ , plano ZX, la condición de simetría se asignó al eje Y al plano normal de la cara; en las cara frontal y posterior (planos ZY) se impidieron los desplazamientos en la dirección X; en la cara inferior (plano XY) se impidieron los desplazamientos en la dirección Z; en la cara superior (plano XY) no se impidió el desplazamiento de los nodos. En el diseño de la malla de elementos finitos se tuvo en cuenta una posible región de plastificación. Con el fin de buscar que la plastificación de las regiones cercanas a la excavación estuviese bien representada (Figura 0.3)

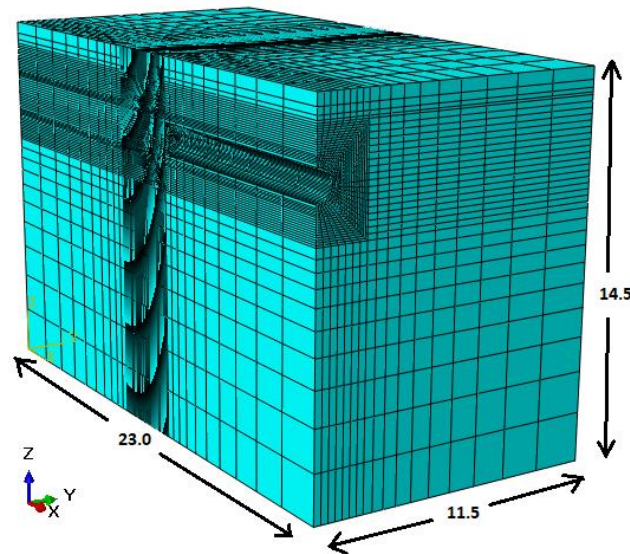
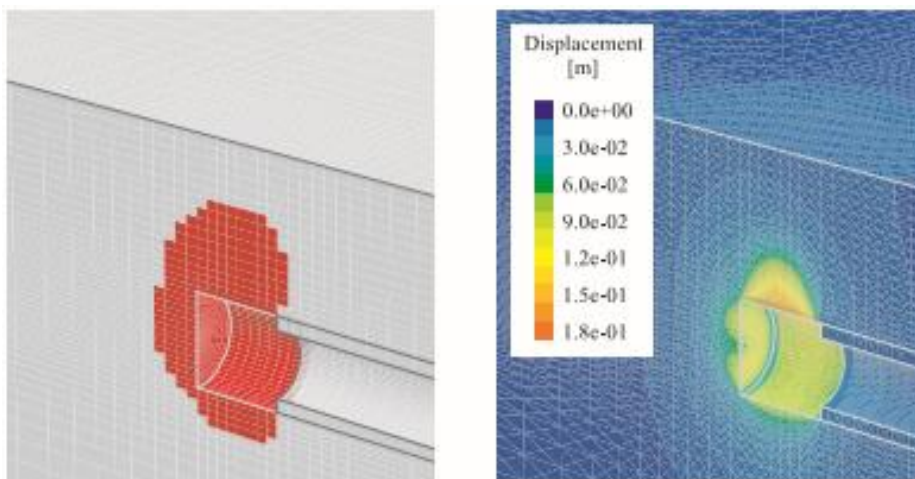


Figura 0.3 Malla de elementos finitos utilizada y dimensiones del modelo utilizadas  
Fuente: Autor.

## 10.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS OBTENIDOS NUMÉRICAMENTE

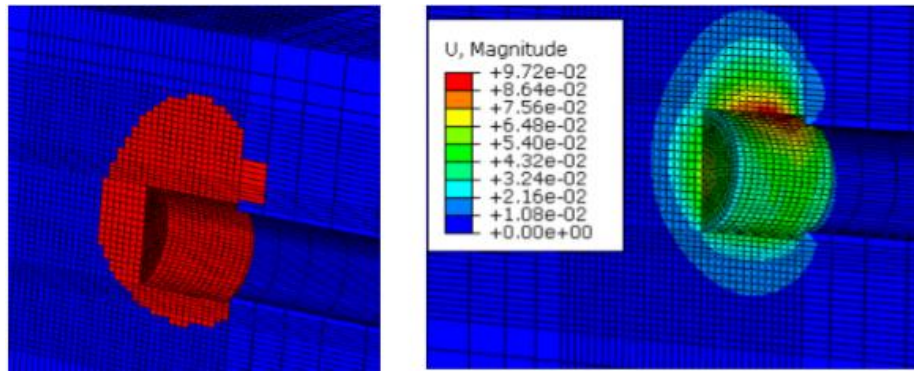
### 10.2.1. Para $L/D=1.0$

Para esta condición, Carranza-Torres et al. (2013) publicaron los resultados numéricos en el software FLAC 3D. Inicialmente, los contornos de los desplazamientos y las regiones de plastificación fueron comparadas inmediatamente antes de la falla. Se encontró una similitud importante entre los resultados obtenidos utilizando ABAQUS 6.14-2 y los resultados presentados por Carranza-Torres et al. 2013 y el ingeniero Sergio Arguello (2017). (Ver Figura 0.4)

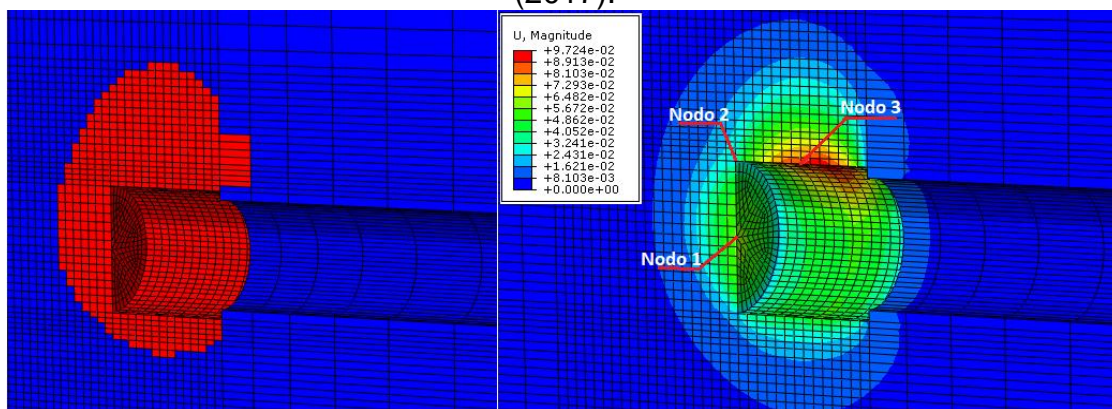


a) Región plástica a la izquierda y contorno de desplazamientos a la derecha con FLAC 3D obtenidos para el caso de estudio presentado por Carranza Torres et al. (2013).





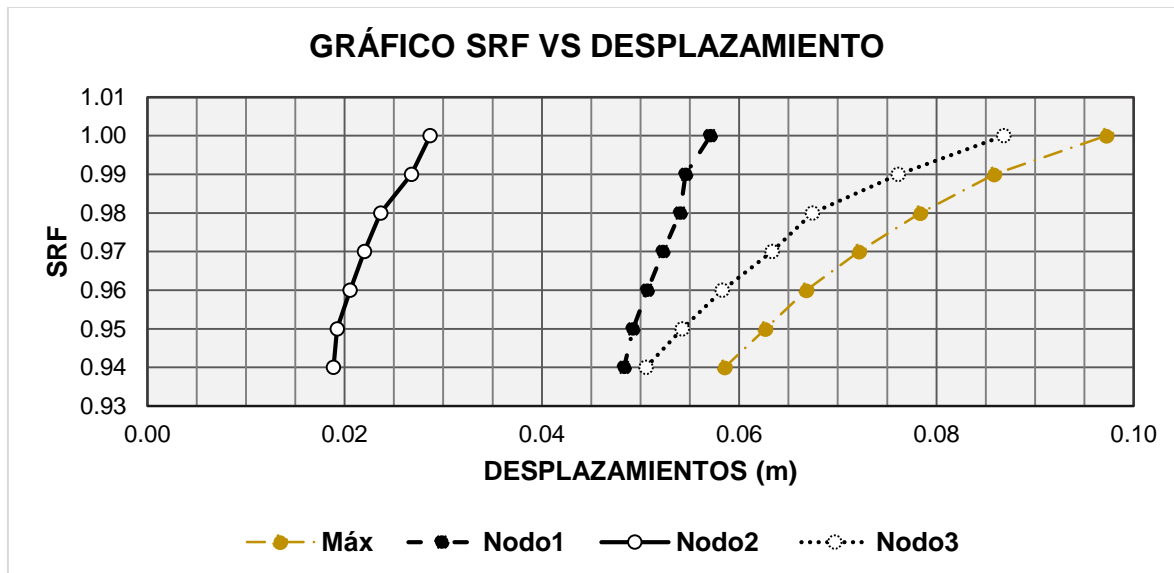
b) Región plástica a la izquierda y contorno de desplazamientos a la derecha con ABAQUS 6.14-2 obtenidos para el caso de estudio presentado por Sergio Arguello (2017).



c) Región plástica a la izquierda y contorno de desplazamientos a la derecha con ABAQUS 6.14-2 obtenidos para el caso de estudio presentado en este trabajo de investigación.

Figura 0.4. Comparación de la región plástica y los contornos de desplazamientos obtenidos inmediatamente antes de la falla para  $L/D=1.0$ .

La variación de SRF en función de los desplazamientos se muestra en la gráfica. (Ver Gráfica 0.1) Donde el factor de seguridad, para el caso propuesto por Carranza et al. (2013), se define por medio del punto, en el eje de la ordenada (SRF), donde la gráfica sufre un aplanamiento horizontal y se convierte en una constante. Definiendo así, para el caso numérico, el FS igual a 1.00 y para el caso analítico con el programa Matlab y con el autor Carranza Torres et al. un FS igual a 1.04.



Gráfica 0.1. SRF VS Deslizamientos para caso de estudio presentado por Carranza Torres et al. (2013) y ejecutado en este trabajo de investigación.  
Fuente: Autor.

Los valores analíticos y numéricos del FS para Carranza Torres et al. (2013) fueron 1.01 y 1.10, respectivamente. Y para el caso presentado por Sergio Arguello (2017) el valor de FS numérico fue de 1.0, lo que pueden considerarse unos resultados aceptables al compararlos.

### 10.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA

El análisis de sensibilidad de los parámetros de resistencia (cohesión y fricción), para el cálculo número de FS, se dividió en dos escenarios para diferentes casos de suelos cohesivos friccionantes.

Donde en el primer escenario, se establecen cinco casos variando la cohesión y con el ángulo de fricción constante. Esta variación de la cohesión se hizo en función de una tabla de valores de resistencia a compresión simple para suelos cohesivos de distinta plasticidad del Instituto Geológico y Minero de España. (Ver Tabla 0.3)

Tabla 0.3. Valores de la resistencia a compresión simple para suelos cohesivos de distinta plasticidad.

Soil Type and SPT Blow Counts	Undisturbed Soil	
	Cohesion (psf)	Friction angle (°)
Cohesive soils		
Very soft (<2)	250	0
Soft (2-4)	250-500	0
Firm (4-8)	500-1000	0
Stiff (8-15)	1000-2000	0
Very stiff (15-30)	2000-4000	0
Hard (>30)	4000	0
Cohesionless soils		
Loose (<10)	0	28
Medium (10-30)	0	28-30
Dense (>30)	0	32
Intermediate soils		
Loose (<10)	100	8
Medium (10-30)	100-1000	8-12
Dense (>30)	1000	12

Fuente: Instituto Geológico y Minero de España (1991). [23]

Para el segundo escenario, se establecieron otros cinco casos donde se varia el ángulo de fricción y la cohesión permanece constante, los ángulos de fricción se seleccionaron de acuerdo a la tabla de valores del ángulo de rozamiento interno en suelos granulares no plásticos en función de la granulometría y la compacidad. (Ver Tabla 0.4)

Tabla 0.4. Valores de ángulo de rozamiento interno en suelos granulares no plásticos en función de la granulometría.

Tipo de suelo	Ángulo de rozamiento interno en función de la densidad inicial (°)		
	Flojo	Medianamente denso	Denso
Limo no plástico	26 a 30	28 a 32	30 a 34
Arena uniforme fina a media	26 a 30	30 a 34	32 a 36
Arena bien gradada	30 a 34	34 a 40	38 a 46
Mezclas de arena y grava	32 a 36	36 a 42	40 a 48

Fuente: Libro "Ingeniería Geológica". [24]

Los escenarios, anteriormente mencionados, se pueden visualizar en la Tabla 0.5 donde se puede apreciar los casos de suelos que fueron desarrollados con el modelo numérico validado, haciendo uso de la metodología SRF. Es importante aclarar que el modelo numérico en ABAQUS 6.14-2 se ejecutó sin variar sus dimensiones originales (diámetro,

longitud de excavación sin soporte y profundidad) ni el peso específico del suelo del ejercicio propuesto por Carranza et al. (2013).

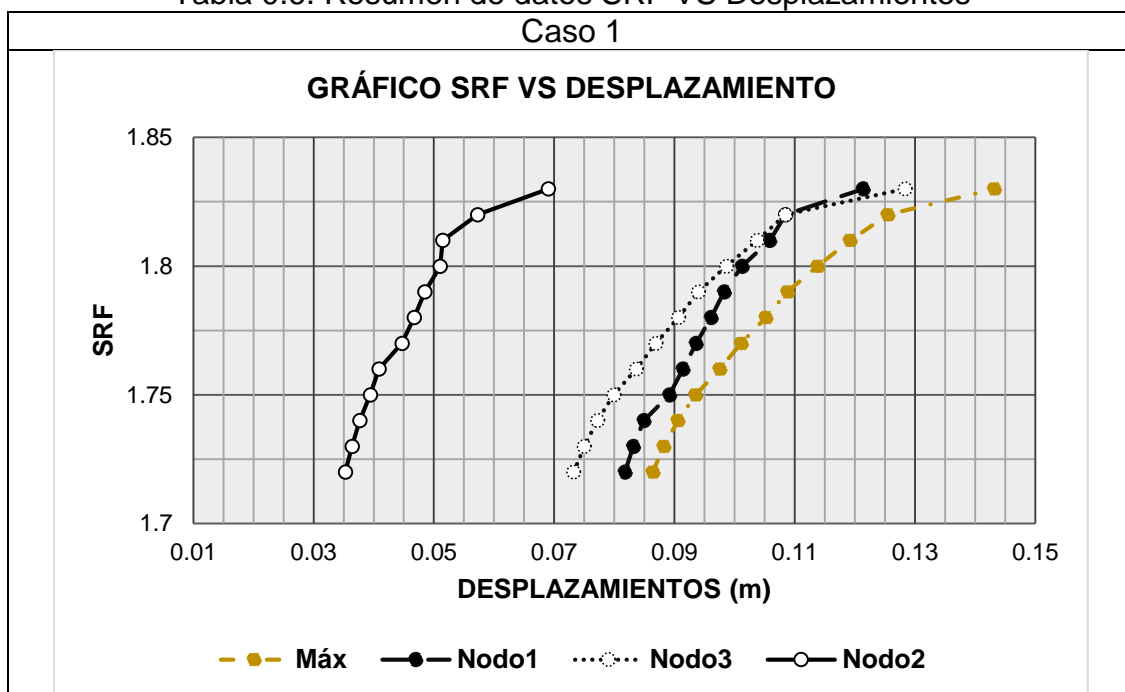
Tabla 0.5. Escenarios de suelos cohesivos-friccionantes modelados numéricamente

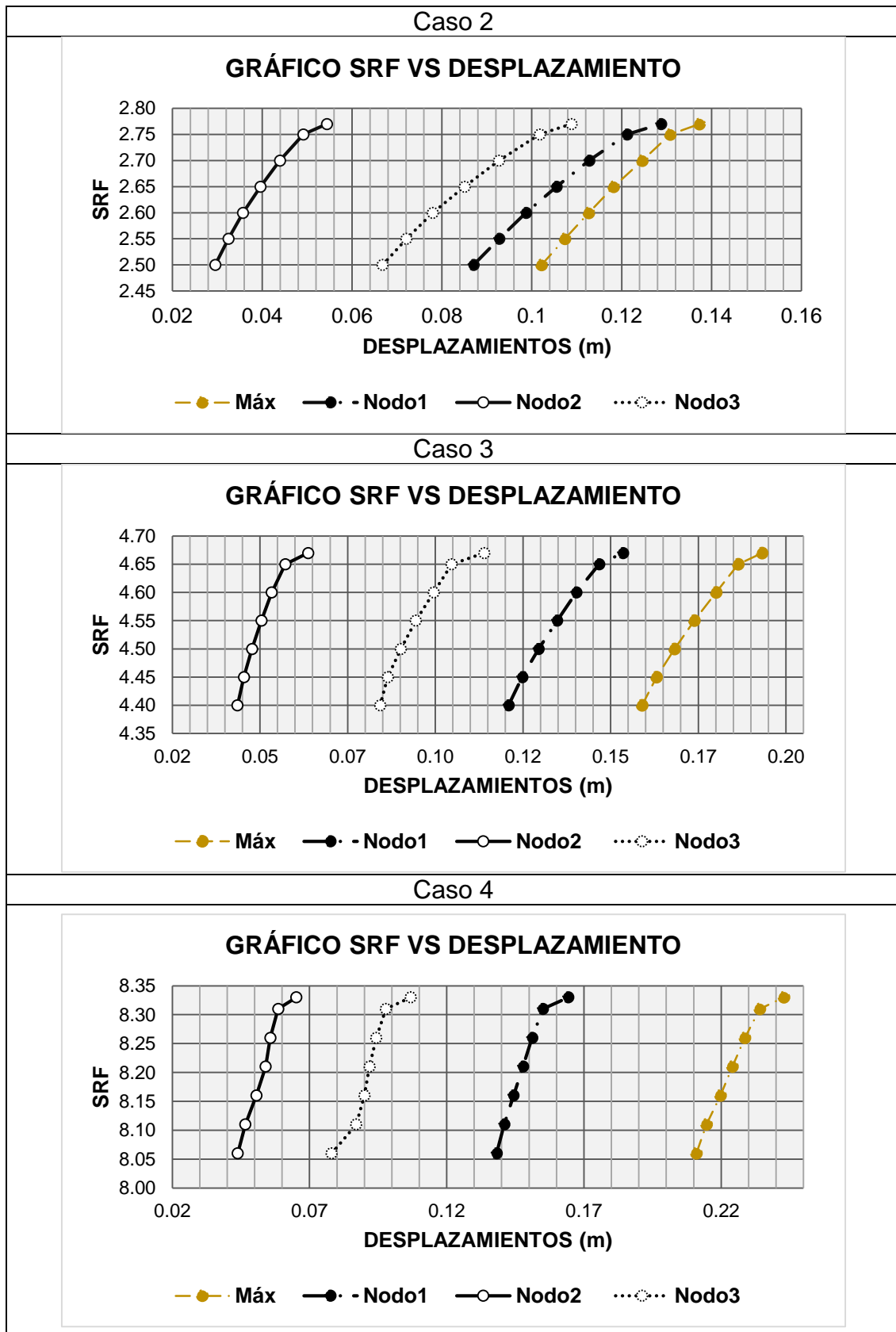
Escenario 1	CASO	Fricción ( $\phi$ )	Cohesión (kPa)
	1	30	11.97
	2	30	23.94
	3	30	47.88
	4	30	95.76
	5	30	191.52
Escenario 2	CASO	Fricción ( $\phi$ )	Cohesión (kPa)
	6	26	4.69
	7	28	4.69
	8	30	4.69
	9	32	4.69
	10	34	4.69

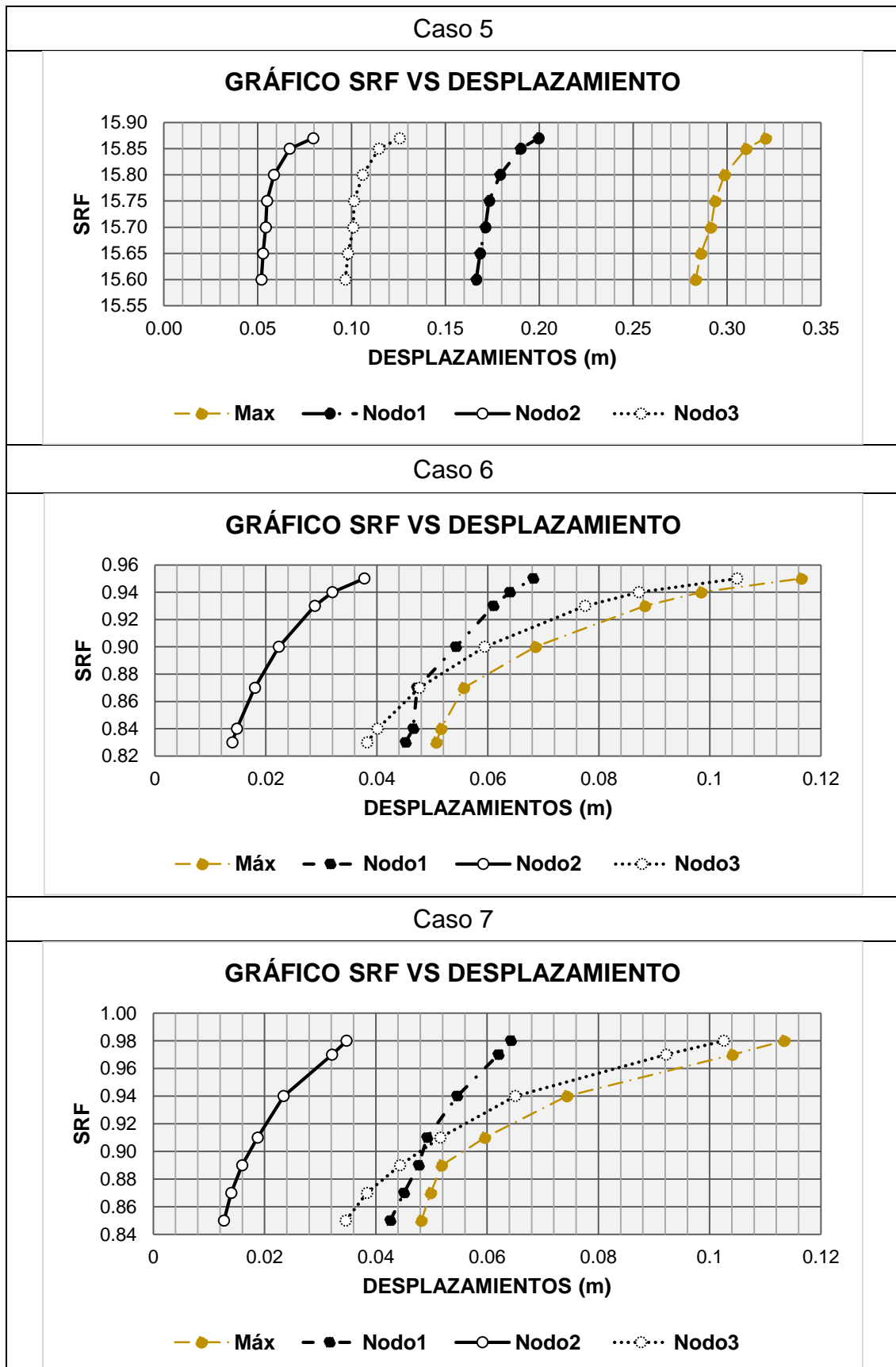
Fuente: Autor.

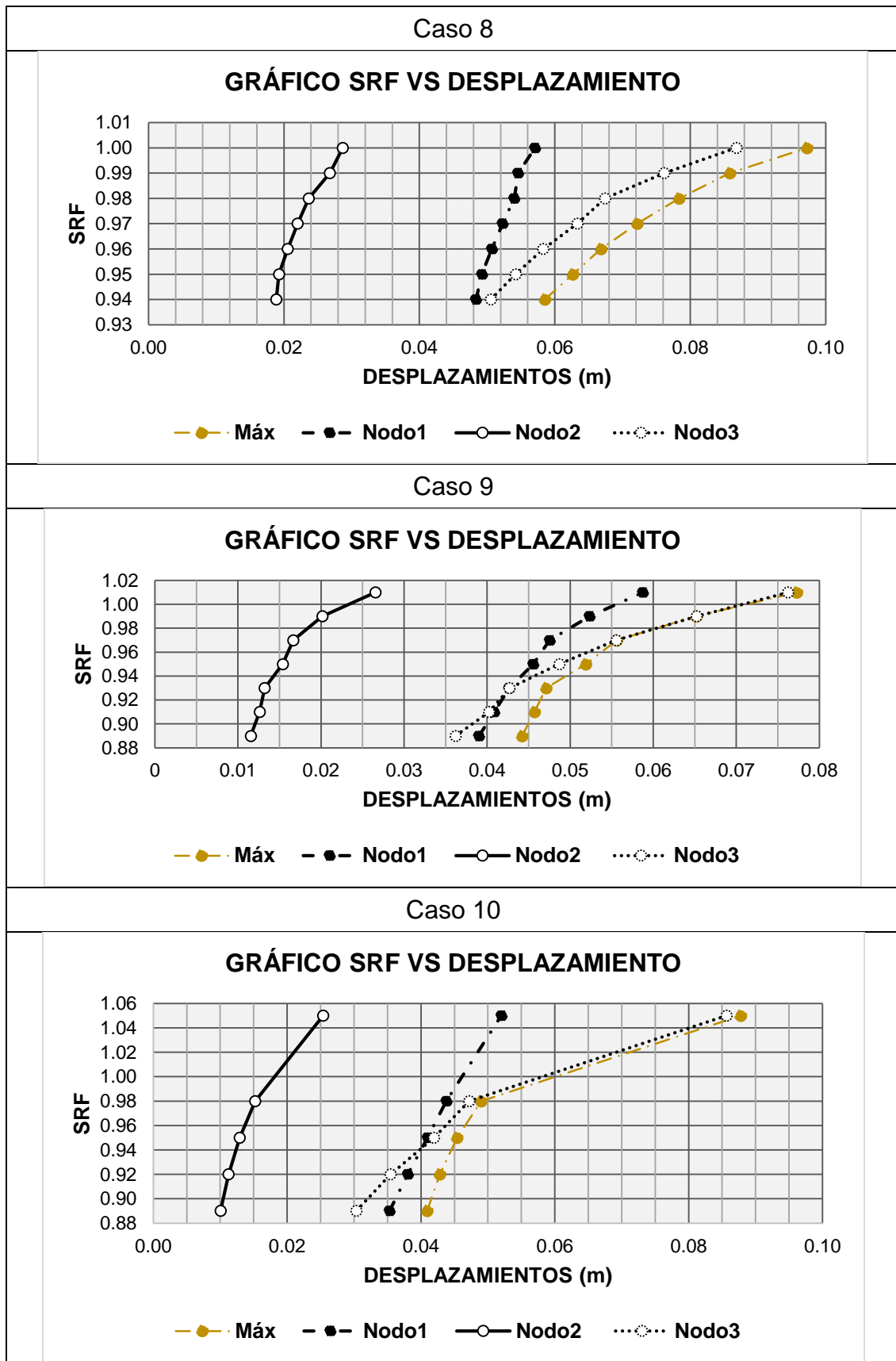
Como se ha expresado anteriormente, a continuación, se muestran los gráficos de SRF VS desplazamientos obtenidos en cada uno de los nodos de control. (Ver Tabla 0.6) Los modelos fueron rodados en el programa ABAQUS 6.14-2 hasta verificar la convergencia que en la mayoría de los casos coincidió con el aumento excesivo de los desplazamientos en los nodos de control y así, definir el FS numérico de cada caso.

Tabla 0.6. Resumen de datos SRF VS Desplazamientos



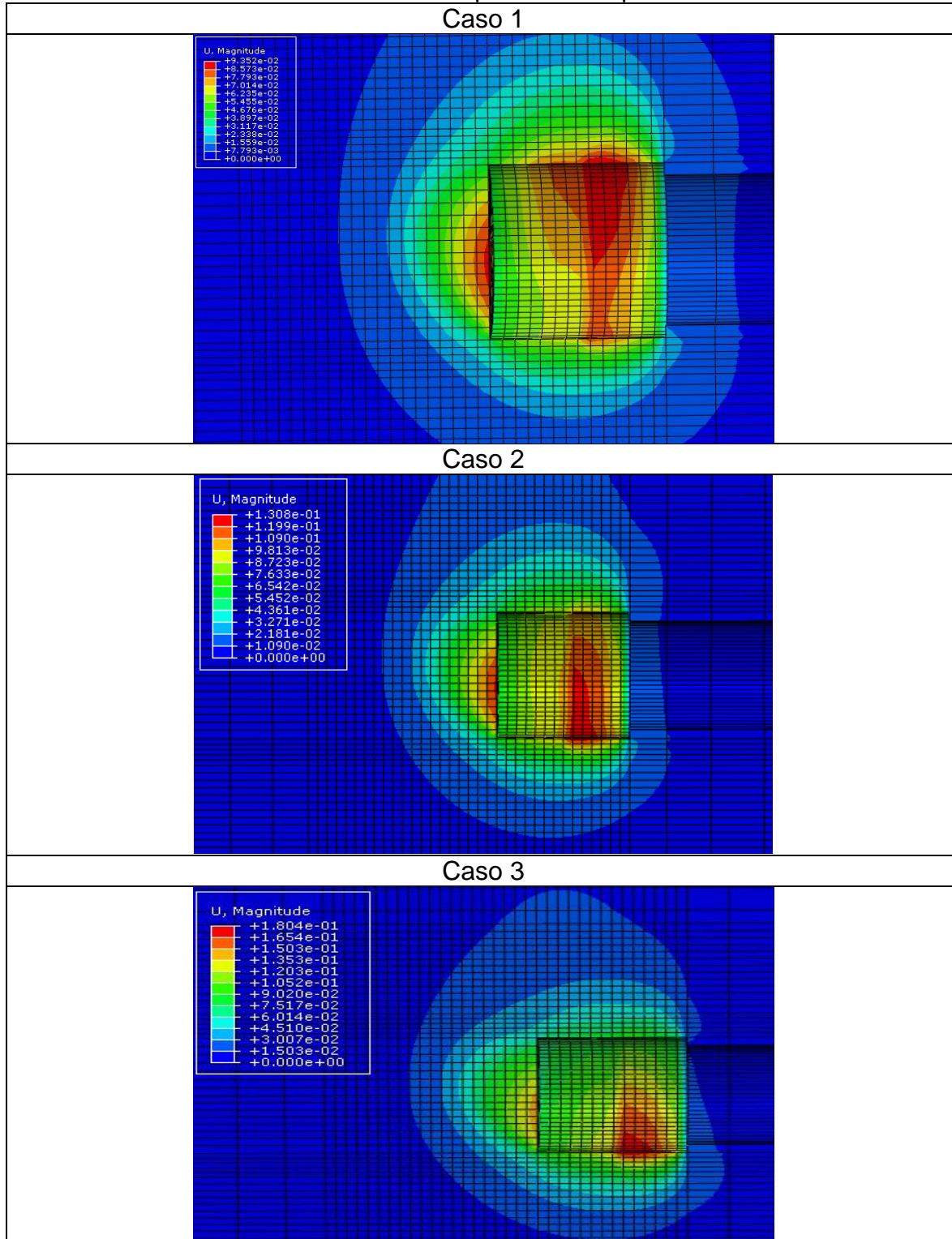




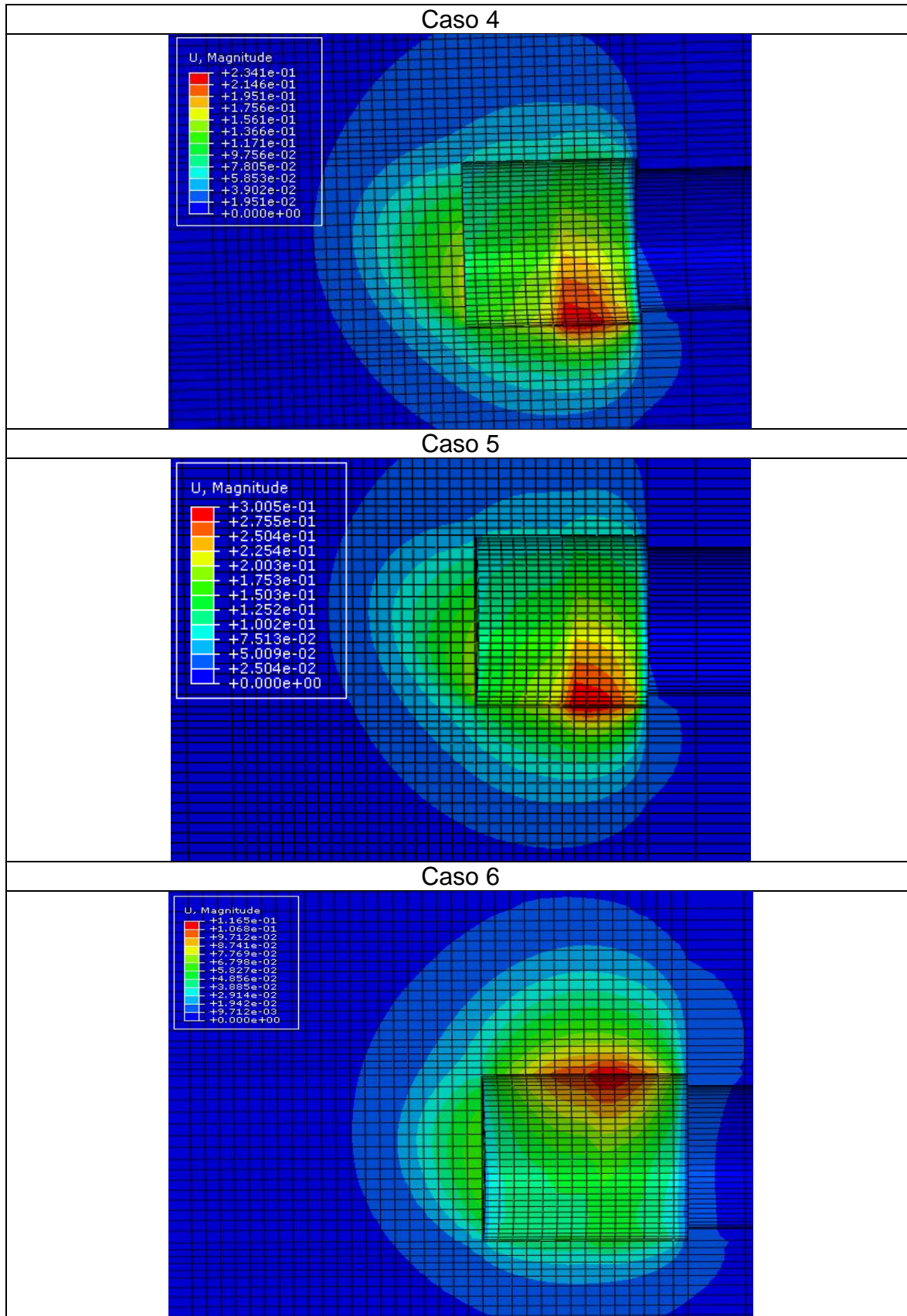


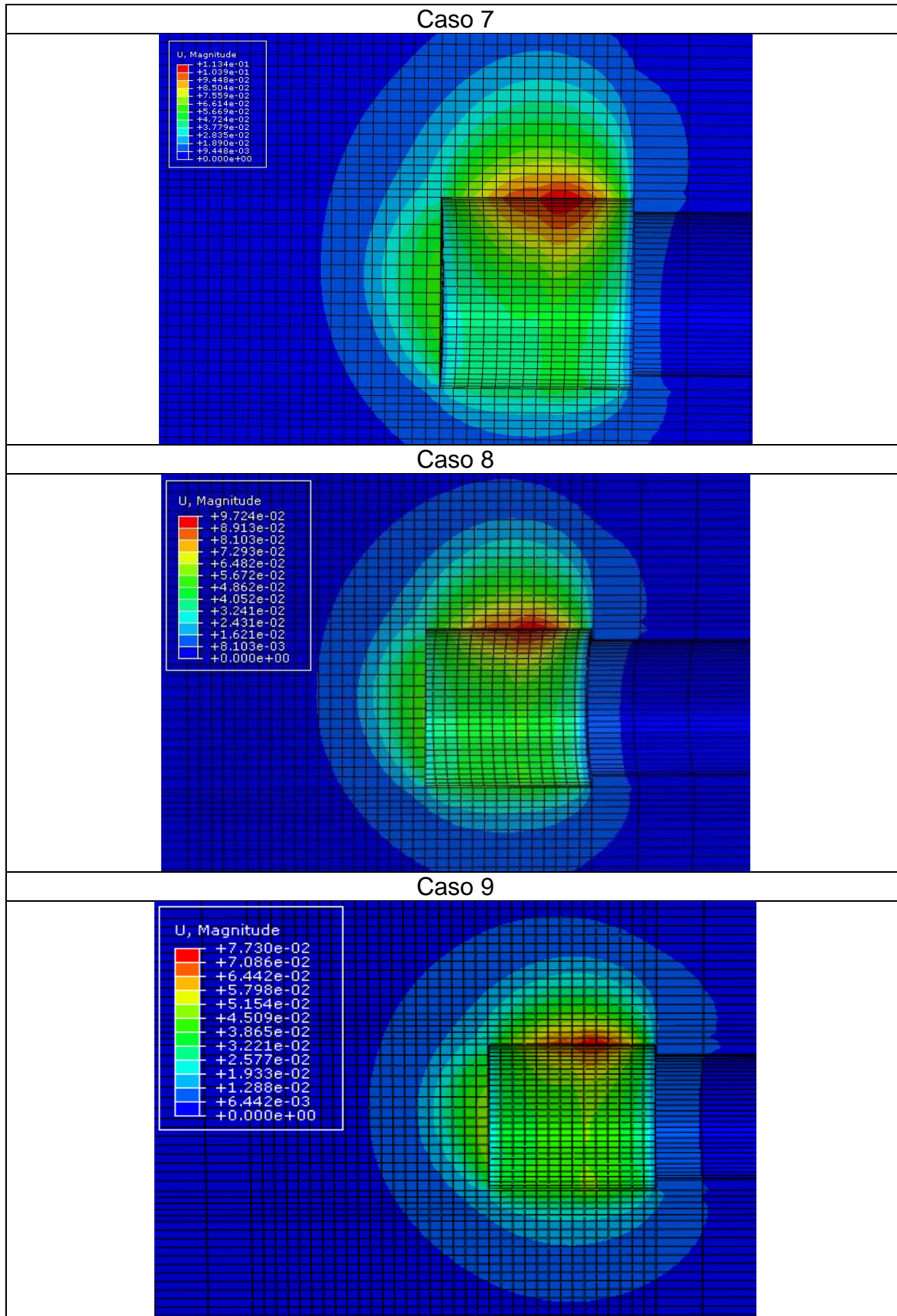
A continuación, se observarán los contornos de desplazamientos obtenidos para el último estado de convergencia verificado numéricamente de cada caso analizado. (Ver Tabla 0.7)

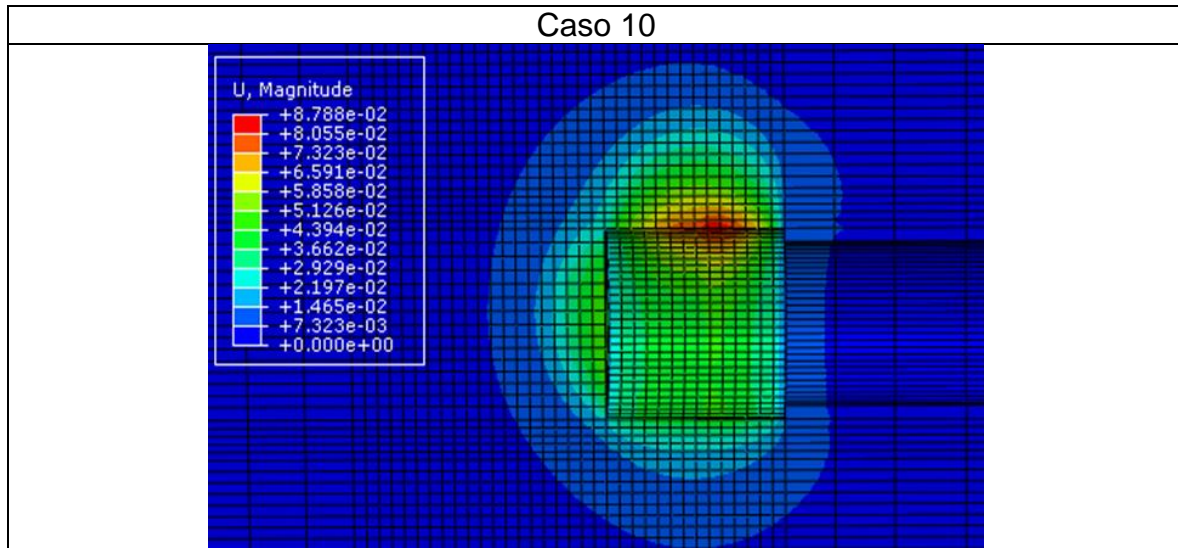
Tabla 0.7. Contornos de desplazamiento para casos de estudio











### 10.3.1. Análisis de resultados

En la siguiente tabla se pueden observar el resumen de los datos obtenidos de FS numéricos y analíticos para los dos escenarios presentados. (Ver Tabla 0.8)

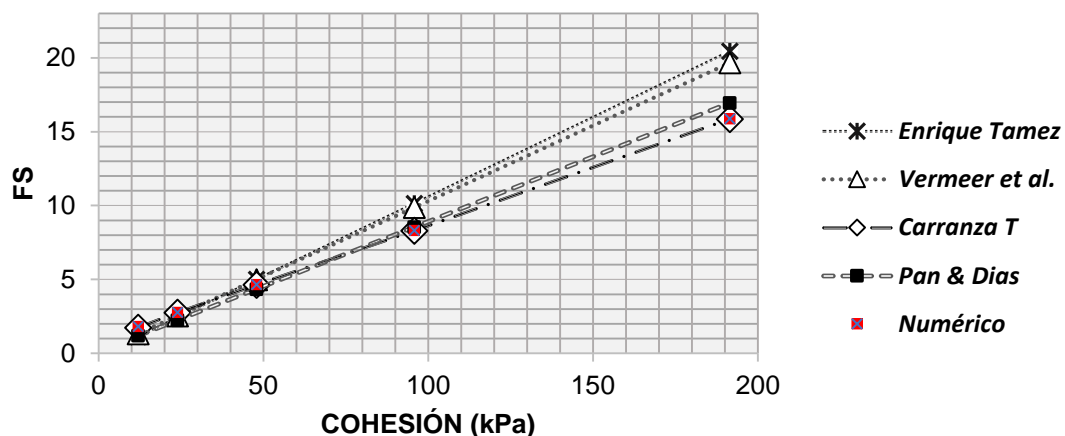
Tabla 0.8. Resumen de resultados de FS obtenidos numéricamente y los analíticos, obtenidos mediante la herramienta desarrollada en el programa de Matlab.

	CASO	Fricción ( $\phi$ )	Cohesión (kPa)	Factor de seguridad (FS)				
				Carranza T.	Enrique Tamez	Vermeer et al.	Pan & Dias	Numérico
Escenario 1	1	30	11.97	1.75	1.14	1.33	1.19	1.83
	2	30	23.94	2.75	2.43	2.55	2.24	2.77
	3	30	47.88	4.65	5.00	4.99	4.34	4.67
	4	30	95.76	8.31	10.15	9.88	8.54	8.33
	5	30	191.52	15.85	20.45	19.66	16.94	15.87
Escenario 2	6	26	4.69	0.96	0.3570	0.57	0.53	0.95
	7	28	4.69	1.004	0.3560	0.58	0.54	0.98
	8	30	4.69	1.043	0.3560	0.58	0.55	1.00
	9	32	4.69	1.084	0.3570	0.59	0.57	1.01
	10	34	4.69	1.124	0.3576	0.60	0.58	1.05

Fuete: Autor.

Para facilitar la visualización de los resultados presentados anteriormente, se realizó un gráfico para los dos escenarios planteados. Esto, con el fin de observar su comportamiento respecto a los valores de FS obtenidos. (Ver Gráfica 0.2)

GRÁFICA ESCENARIO 1



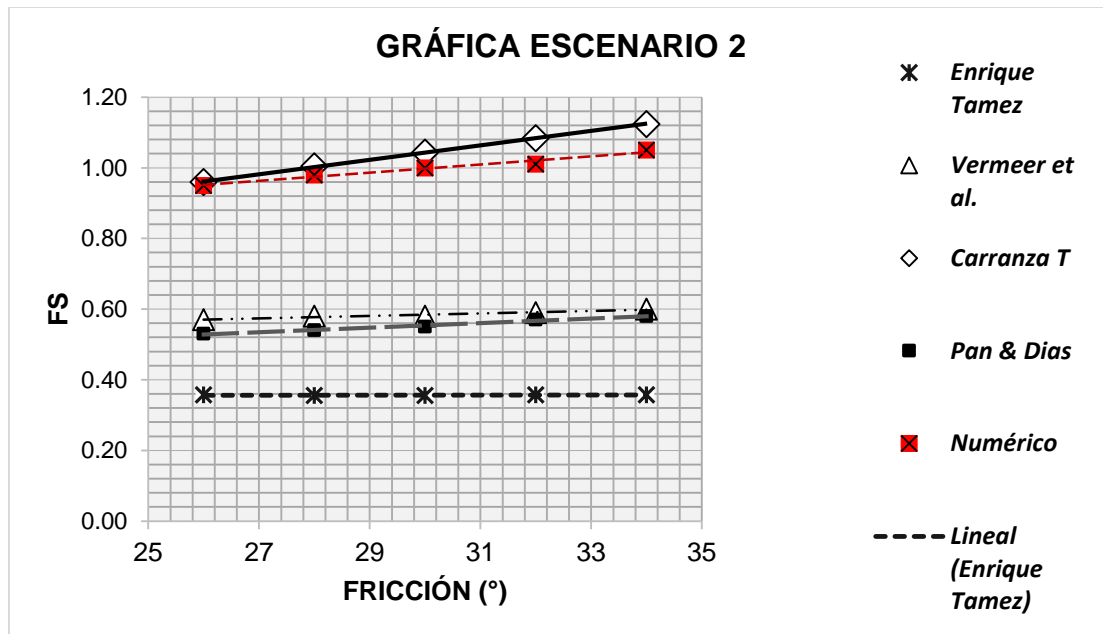
Gráfica 0.2. Escenario 1 de estudio para el FS en función de la cohesión.

Fuete: Autor.

De esta gráfica, se puede deducir por tanto que:

- Para las teorías analíticas y la metodología numérica, hay una relación directamente proporcional entre el FS y el parámetro de cohesión.
- La influencia de la cohesión en la magnitud de valor del FS es considerablemente alta.
- A medida que la cohesión aumenta los desplazamientos localizados en la corona del túnel, van disminuyendo, pasando de un color rojo (desplazamientos mayores) a un color verde (desplazamientos estables). Es decir, la inestabilidad en la longitud excavada sin soporte se disipa.
- La teoría analítica de Carranza Torres et al. (2013) y la metodología por elementos finitos en ABAQUS 6.14-2 reflejan resultados más conservadores que las teorías de los otros autores.
- Los resultados de FS numéricos presentan un margen de error relativo promedio igual a 24.29 % con respecto a los FS analíticos de Enrique Tamez (1997), obtenido por medio de la Ecuación 30. Siendo este el margen más alto para este escenario.
- Para este escenario con cohesiones altas, la teoría analítica de equilibrio límite de Enrique Tamez (1997), es la menos conservadora en relación al MEF obtenido de ABAQUS 6.14-2.
- Los resultados numéricos de FS presentan un margen de error relativo promedio de 17.52% y 18.76%, con teorías de límite superior de Vermeer et al. (2002) y Q. Pan & Daniel Dias (2017), respectivamente. Obtenido mediante la ecuación de error relativo. (Ver Ecuación 30)
- La teoría que presento resultados de FS con mayor similitud a los numéricos obtenidos en ABAQUS 6.14-2 fue la de límite inferior de Carranza et al. (2013) con un margen de error relativo promedio de 1.22%. Porcentaje resultado de la aplicación de la Ecuación 30.

Para el segundo escenario, se presenta la gráfica de agrupación de resultados obtenidos, donde se varía el ángulo de fricción. (Ver Gráfica 0.3)



Gráfica 0.3. Escenario 2 de estudio para el FS en función del ángulo de fricción.  
Fuente: Autor.

De esta gráfica, anteriormente mostrada, se puede analizar:

- Los resultados para la teoría analítica de Enrique Tamez (1997) presenta un valor de FS casi constante para pequeñas variaciones de fricción y valores de cohesión constante.
- Los resultados numéricos en ABAQUS 6.14-2 presentan un mayor error relativo con respecto a las teorías analíticas de límite superior de Q. Pan & Daniel Dias (2017) y Vermeer et al. (2002), con un 80.15% para el primero y 70.85% para el segundo. Estos porcentajes fueron obtenidos por medio de la Ecuación 30. Evidenciando para este segundo escenario que, del método de los elementos finitos y la teoría de límite superior, los datos de FS más conservadores provienen de la teoría analítica de límite superior.
- Los valores FS obtenidos por la solución de Carranza torres, para este escenario, son los menos conservadores de todas las metodologías usadas. Sin embargo, es el que tiene menor margen de error relativo con respecto a los resultados numéricos con un 4.19%. (Ver Ecuación 30) Resultando así que, de las teorías analíticas, la de límite inferior de Carranza Torres et al. (2013) es la que mayor similitud presenta en sus cálculos de FS en relación con los resultados numéricos provenientes del método de los elementos finitos de ABAQUS 6.14-2.
- En relación con la teoría analítica de equilibrio límite de Enrique Tamez (1997), los resultados numéricos de ABAQUS 6.14-2 presenta el mayor error relativo promedio de 179.76%, debido a que los datos numéricos son mayores a los calculados por la teoría analítica. Es decir, que para este escenario la teoría analítica más conservadora es la de equilibrio límite de Enrique Tamez.
- Los contornos de desplazamientos analizados numéricamente, mostraron que la falla ocurriría en la corona del segmento del túnel no revestida.

## 10.4. REPRODUCCIÓN DE MODELOS FÍSICOS

En la literatura se encuentran muy pocos modelos hechos en centrífuga que evalúen la estabilidad del frente en túneles rasos y que publiquen los parámetros de resistencia del suelo que permitan reproducir los mismos.

De la literatura revisada se decidió reproducir los elaborados por Chambon y Corté (1989) en suelos arenosos.

### 10.4.1. Chambon e Corté (1989)

Chambon e Corté (1989) ejecutaron ensayos en una arena fina llamada “Arena de Fontaineblau” que se caracteriza porque sus partículas tienen un tamaño medio de 200  $\mu\text{m}$ . De acuerdo con los autores, el suelo fue saturado permitiendo la existencia de cohesión por capilaridad. Fueron ejecutados ensayos utilizando dos escenarios del suelo (arena en estado suelto y compacto).

Las características del ensayo permitieron reproducir en una centrífuga con una aceleración igual a 50 g, un túnel con un diámetro igual a 5 m totalmente revestido. A continuación, se presentan los parámetros del suelo ensayado:

Tabla 0.9. Parámetros de Arena Fontaineblau

PARÁMETRO	ARENA SUELTA	ARENA COMPACTA
E (kPa)	30000	30000
$\nu$	0.3	0.3
$\phi$ (°)	35.2	38.3
c (kPa)	2.3	1.1
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.3	16.1
$K_0$	1	1

El ángulo de dilatancia  $\psi$  no fue registrado por los autores. Para dicho valor se adoptaron los valores adoptados por Dupla e Canou (1994) que realizaron la caracterización de la Arena Fontaineblau a partir de ensayos triaxiales. Para este caso el valor registrado fue de  $\psi$  igual a 12°.

#### 10.4.1.1. Validación numérica

##### i. Geometría

La geometría adoptada en los análisis hechos fue semejante, por la cual, se reprodujo un túnel de sección circular de 5 m de diámetro. La relación C/D varío entre 1.0 y 2.0, en función del resultado experimental que se estaba reproduciendo. La longitud de excavación soportada fue 50 m. El modelo geométrico puede ser visto en la Figura 0.5.

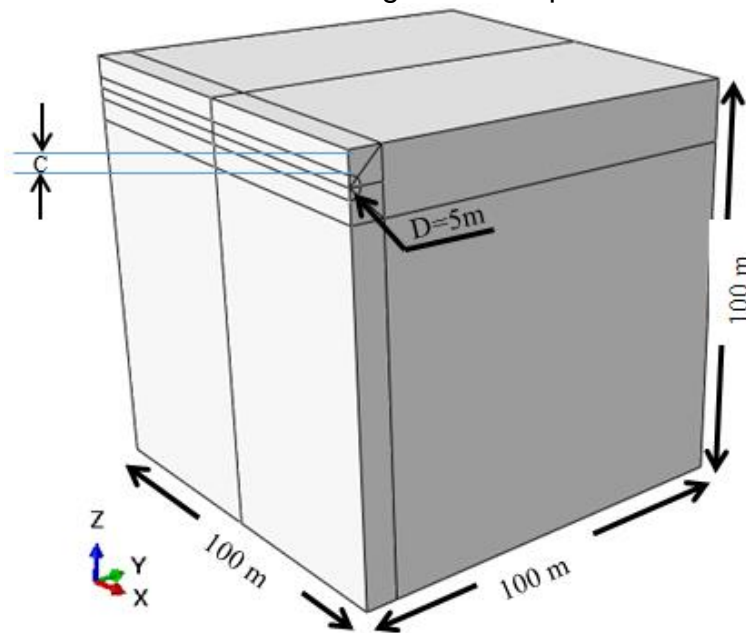


Figura 0.5– Geometría utilizada numéricamente representando los ensayos elaborados por Chambon e Corté (1989)

Las condiciones de contorno y malla utilizada fueron establecidas de acuerdo con la simetría del problema (es decir siendo la cara lateral izquierda del modelo un plano de simetría). La distribución de la malla fue similar a la descrita en el ítem 10.1

##### 10.4.1.2. Resultados

Los resultados obtenidos numéricamente para los dos estados de la arena son muy próximos de los resultados experimentales. En general se observó una diferencia de máximo 1,75%. (Ver Figura 0.7)

Adicionalmente, se compararon los mecanismos de ruptura obtenidos para la simulación de la arena densa con una relación  $C/D=1.0$  (Ver Figura 0.6). A partir de esta comparación se encontró que el mecanismo de ruptura encontrado numéricamente simula muy bien los resultados en modelos de centrífuga.



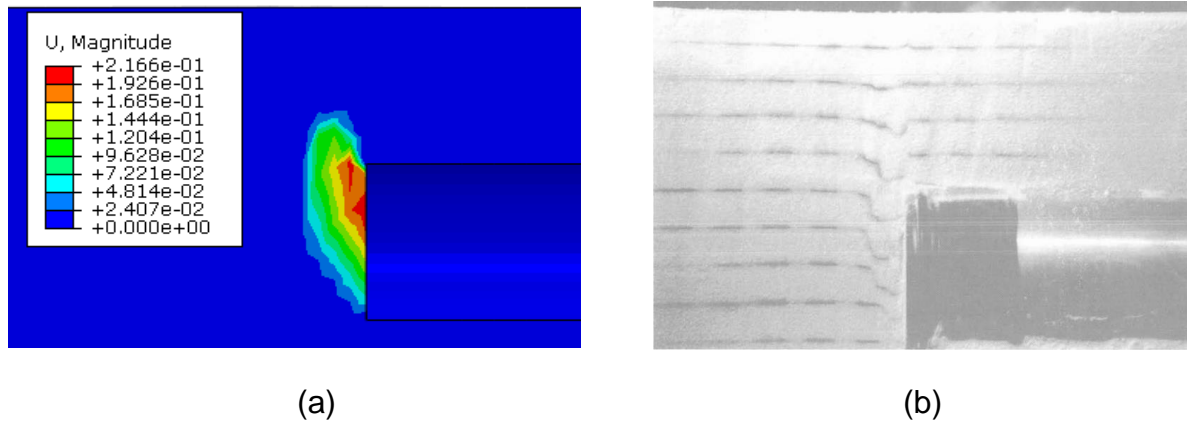
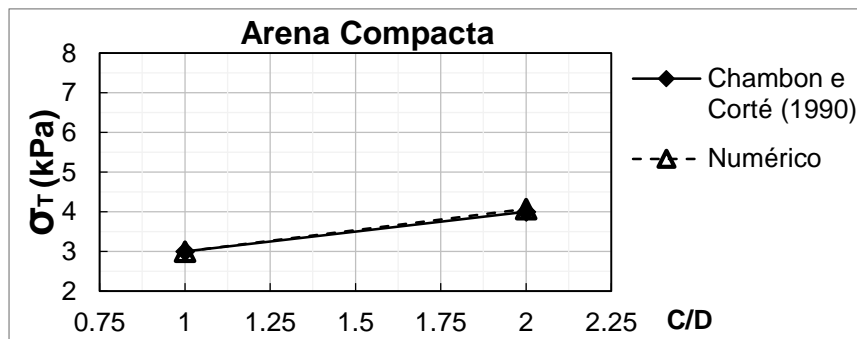
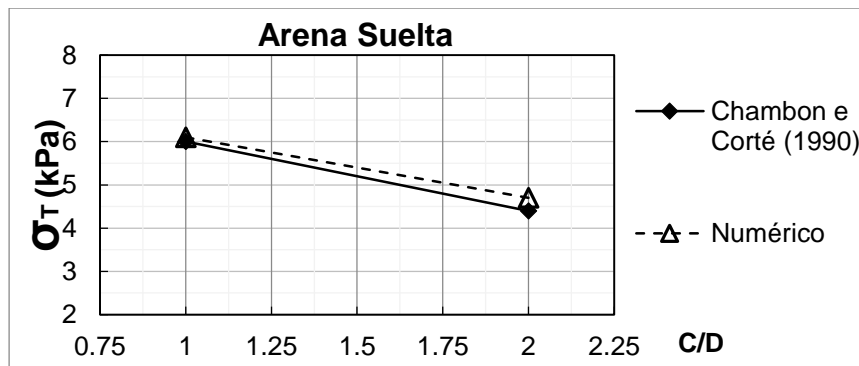


Figura 0.6 – Mecanismos de ruptura para un túnel excavado con relación  $C/D=1$  (a) Resultados numéricos (b) Modelo Físico  
Fuente: a. Autor. b. Chambon e Corté, 1990



(a)



(b)

Figura 0.7 – Presión necesaria para mantener la estabilidad del frente VS  $C/D$  (a) Arena Compacta (b) Arena Suelta

## 11. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 11.1. CONCLUSIONES

Mediante el desarrollo del presente trabajo de investigación fue posible llegar a las siguientes conclusiones:

- Realizado el análisis de sensibilidad de los parámetros de resistencia del suelo de acuerdo al criterio de Mohr Coulomb (cohesión y ángulo de fricción) es posible determinar que ante la variación del ángulo de fricción y una cohesión baja, los mayores desplazamientos se presentan en el nodo localizado en la corona del túnel, siendo esto un factor de inestabilidad en la longitud excavada sin soporte del túnel que a final podría llegar a ser representada por una falla global (extendida hasta la superficie). Por otro lado, cuando presentamos una variación en la cohesión y un ángulo de fricción estable es posible determinar que, a medida que la cohesión aumenta, la corona del túnel en la región excavada sin soporte va presentando mejor estabilidad. Evidenciando de esta manera que la cohesión es el factor más influyente dado que representa un alto grado de importancia en la estabilidad del frente de excavación más exactamente en la zona de longitud de excavación sin soporte.
- Una vez analizados cada uno de los resultados compilados en el algoritmo de programación en Matlab de las soluciones existentes en la literatura (Carranza Torres et al, Enrique Tamez, Vermeer et al y Daniel Dias et al.) se puede llegar a la conclusión que, las gráficas generadas por este algoritmo presentan una relación inversamente proporcional; a medida que la relación L/D aumenta los factores de seguridad disminuyen.
- Adicionalmente, se deduce que la teoría analítica de equilibrio límite de Enrique Tamez en los dos escenarios planteados es la que presenta un margen de error relativo promedio mayor en relación con los resultados obtenidos numéricamente de ABAQUS 6.14-2. Un 24.29% para el escenario uno y un 179.76% para el escenario dos. Este último porcentaje supera el 100% debido a que los resultados numéricos representaban el doble de los analíticos. (Ver Tabla 0.8) Para cada caso de estudio, el error relativo se opera mediante la Ecuación 30, tomando como valor real el resultado analítico y como dato de medición el resultado numérico de ABAQUS 6.14-2.
- Una vez reproducido el modelo numérico de Carranza Torres y el modelo numérico de Sergio Enrique Argüello Vera en ABAQUS 6.14-2, podemos encontrar que es posible reproducir los modelos, los factores de seguridad efectivamente son posibles de calcular a través del método SRF, siendo estos un reflejo de valores más conservadores. Mediante el análisis de los desplazamientos en los nodos de interés es posible notar un aumento excesivo en estos puntos característicos, localizando así el punto en el que se presenta la falla.

- A partir de los resultados obtenidos por los gráficos de los parámetros de resistencia de Mohr Coulomb (cohesión y ángulo de fricción) vs FS, se puede evidenciar los desplazamientos presentados a medida que los parámetros varían, llegando a la deducción que los dos parámetros de resistencia son directamente proporcionales al FS.
- Modelos hechos en centrífuga pueden ser representados numéricamente, lo que permite expandir la simulación numérica a situaciones del quehacer diario en ingeniería.

## **11.2. TRABAJOS FUTUROS**

- Realizar un análisis numérico y analítico que contemple diferentes condiciones hidráulicas o variaciones de posiciones del nivel freático.
- Realizar modelos físicos en centrífuga para comprobar la veracidad de los modelos numéricos con estos y poder concluir que tipo de solución se puede acercar más a la realidad.
- Buscar parámetros de túneles y suelos reales para simular estas situaciones.
- Variar la geometría de los túneles (Diámetro del túnel, longitud de excavación sin soporte) y verificar como esta influye en la estabilidad del mismo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. E. Argüello Vera, «Soluciones numéricas y analíticas para la estabilidad de estancaciones subterráneas,» Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil, 2017.
- [2] M. Rocha de Oliveira, «Estudio de la estabilidad del frente de excavación de túneles rasos en suelo,» Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- [3] E. Priego de los Santos, Tuneles y tuneladoras: nociones generales y topografía para su guiado, Mexico, D.F.: Limusa, S.A de C.V Grupo Noriega Editores, 2014, pp. 11-12.
- [4] S. Senent Dominguez, «La estabilidad del frente de excavacion de un tunel en terrenos heterogeneos o con un criterio de rotura no-lineal,» Madrid, España, 2015.
- [5] Wong, Kwai L; Chan, H H, «Civil Engineering and Development Department,» Abril 2015. [En línea]. Available: [https://www.cedd.gov.hk/eng/publications/geo/notable\\_tunnel.html](https://www.cedd.gov.hk/eng/publications/geo/notable_tunnel.html). [Último acceso: 21 Marzo 2019].
- [6] P. E. De Souza Gines, «Colapso de túnel excavado a través de TBM - EPB asociado con técnicas de congelación del suelo,» Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2017.
- [7] O. A. Melo Duque, «Estudio teórico del mecanismo tridimensional de falla del frente de túneles poco profundos en suelo.,» Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Bogota D.C, 2017.
- [8] G. Perri, «Contribucion a la caracterización geomecánica de los macizos rocosos en base al GSI de Hoek,» Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia, Caracas, 1999.
- [9] S. Navarro Carrasco, R. P. Ortiz Gomez y J. A. Ruiz Marin, Geotecnia aplicada a la construccion de tuneles, Civilgeeks.com-Ingenieria y construccion, 2011.
- [10] D. Zdravkovic, M. Potts y Lidija, Finite element analysis in geotechnical engineering, London: Thomas Telford Books, 1999.
- [11] H. Gavilanes J y B. Andrade Halo, Introduccion a la Ingenieria de Tuneles, Quito-Ecuador, 2004.
- [12] G. Perri, «Aplicacion del metodo de elementos finitos en las construcciones sobre suelos cohesivos suaves,» Sociedad ecuatoriana de mecanica de suelos y rocas y el instituto de investigacion y estudios avanzados de la universidad de guayaquil, Guayaquil, 1977.
- [13] D. A. Gonzalez Vernaza y J. B. Lombana Rincon, «Construccion de un modelo fisico para el estudio experimental de los efectos en superficie del avance de tuneles con tuneladora TBM-EPB en suelos blandos,» Universidad de la Salle, Bogota, 2009.
- [14] J. Gutierrez del Olmo y P. Velasco, «Análisis de la estabilidad de un frente de túnel superficial Factor de seguridad y Probabilidad de rotura,» Itasca Consultores S.L., 2016.
- [15] A. C. Sole, Instrumentación Industrial, Mexico: Alfaomega, 2006.
- [16] E. Santoyo, E. Bermudez y R. Contreras, «Evolucion de la construccion de tuneles urbanos,» pp. 1-23.
- [17] P. A. Vermeer, N. Ruse y T. Marcher, «Estabilidad del frente de tunel en suelo drenado,» *Felsbau*, vol. II, pp. 8-18, 2002.
- [18] M. M. Maynar, «El colapso del tunel ferroviario por inestabilidad del frente en suelos y rocas blandas o muy diaclasadas,» *Revista de obras publicas*, pp. 33-64, 2004.
- [19] C. Carranza Torres, T. Reich y D. Saftner, «Stability of shallow circular tunnels in soils using analytical and numerical models,» *Department of Civil Engineering, University of minnesota, Duluth Campus, Minnesota, USA*, pp. 2-3, 2013.
- [20] M. Diederichs y N. Vlachopoulos, «Usos apropiados y limitaciones practicas de analisis numericos de tuneles en 2D y respuestas de soporte de tunel,» *Springer*, pp. 1-22, 2014.
- [21] E. Tamez González, J. Rangel Núñez y E. Holguín, Diseño Geotécnico de Túneles, México: TGC Geotecnia, 1997.
- [22] Q. Pan y D. Dias, «Análisis de límite superior en la estabilidad de la cara de un túnel no circular,» *Tunnelling And Underground Space Technology*, 2017.

- [23] Instituto Geológico y Minero de España, «IGME,» Ministerio de Ciencia e Innovación de España, 1991. [En línea]. [Último acceso: 2020].
- [24] L. I. González de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño y C. Oteo, Ingeniería Geológica, Madrid: Pearson, 2002.
- [25] E. Tamez González, «Estabilidad de Túneles Excavados en Suelos,» Academia Mexicana de Ingeniería, México, D.F, 1984.

## ANEXOS

### ANEXO A

#### ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN DESARROLLADO PARA EL CALCULO DE FS CON DIFERENTES TEORÍAS ANALÍTICAS

- **Código para funcionamiento de la portada como interfaz gráfica:**

```
función varargout = untitled(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @untitled_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn',  @untitled_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn',  [], ...
    'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function untitled_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);
axes(handles.axes1);
imshow(imread('Imagen Modelo1.png'));
function varargout = untitled_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
--- Executes on button press in Carranza.
function Carranza_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;PRIMERINTENTO
function Tamez_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;TAMEZ
function Vermeer_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;Veermer
function Untitled_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;untitled
function Untitled_2_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;PRIMERINTENTO
function Untitled_3_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;TAMEZ
function Untitled_4_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;Veermer
function Untitled_5_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;DanielDias
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;DanielDias
function Carranza_ButtonDownFcn(hObject, eventdata, handles)
```

• **Código para funcionamiento de la teoría analítica de Carranza Torres et al. (2013):**

```
function varargout = PRIMERINTENTO(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @PRIMERINTENTO_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn',  @PRIMERINTENTO_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn',  [], ...
    'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function PRIMERINTENTO_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
set(handles.ps,'String','')
set(handles.qs,'String','')
set(handles.h,'String','')
set(handles.D,'String','')
set(handles.gamma,'String','')
set(handles.phi,'String','')
set(handles.c,'String','')
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
axes(handles.background);
imshow(imread('Imagen2.jpg'));
function varargout = PRIMERINTENTO_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

ps=handles.ps;
qs=handles.qs;
h=handles.h;
D=handles.D;
gamma=handles.gamma;
phi=handles.phi;
c=handles.c;
nfi=(tan((pi/4)+degtorad(phi/2)))^2;
termoa=ps/(gamma*h);
termob=qs/(gamma*h)+2*(c/(gamma*h))*((nfi^0.5)/(nfi-1));
%%definir el tamaño del vector
l=0:0.05*D:5*D;
%%%% CALCULO DE OPERACIONES%%
vec_a=[];
r=length(l);
for i=1:r
    laux=l(i);
    a=sqrt((0.25*(laux^2))+0.25*(D^2));
    vec_a=[vec_a a];
end
vec_a;
syms n;
vec_f=[];
for i=1:r
    aaux=vec_a(i);
    if aaux>=h;
        k=1;
        aaux=D/2;
    else
        k=2;
    end
    end
    nx=solve(termoa==(qs/(gamma*h)+2*(c/(gamma*h))*((nfi^0.5)/(nfi-1)))*((h/aaux)^(k*n))-(((k*n)-1)^-1)*((h/aaux)^(k*n))-(aaux/h)-
(2*(c/(gamma*h))*((nfi^0.5)/(nfi-1))),n);
    vec_f=[vec_f nx];
end
vec_fs=[];
```

# PROYECTO DE INVESTIGACIÓN ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE TÚNELES CIRCULARES SUPERFICIALES UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA

```
for i=1:r
    naux=vec_f(i);
    fs=vpa((tan(deg2rad(phi)))/tan(asin(naux/(naux+2))),4);
    vec_fs=[vec_fs fs];
end
tabla=[vpa(l/D) vec_fs,4]
plot(handles.axes1,l/D,vec_fs,'linewidth',2);
xlabel(handles.axes1,'Longitud sin soporte/Diametro');
ylabel(handles.axes1,'FS');
title(handles.axes1,'Solución extendida de Carranza Torres et al.')
set(handles.axes1,'XGrid','on','YGrid','on')
function ps_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.ps=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function ps_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function qs_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.qs=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function qs_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function h_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.h=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function h_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function D_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.D=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function D_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function gamma_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.gamma=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function gamma_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function phi_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.phi=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function phi_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function c_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.c=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function c_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
end
```



```
function background_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function uipanel1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function text19_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function text21_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function Untitled_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;untitled
function Carranza_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;PRIMERINTENTO
function Tamez_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;TAMEZ
function Vermeer_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;Veemer
function DanielDias_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;DanielDias
```

- **Código para funcionamiento de la teoría analítica de Enrique Tamez et al. (1997):**

```
function varargout = TAMEZ(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @TAMEZ_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn',  @TAMEZ_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn',  [], ...
    'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function TAMEZ_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
set(handles.pf,'String','')
set(handles.qs,'String','')
set(handles.H,'String','')
set(handles.D,'String','')
set(handles.gamma,'String','')
set(handles.phi,'String','')
set(handles.c,'String','')
guidata(hObject, handles);
axes(handles.background);
imshow(imread('Imagen3.png'));

function varargout = TAMEZ_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
pf=handles.pf;
qs=handles.qs;
H=handles.H;
D=handles.D;
gamma=handles.gamma;
phi=handles.phi;
c=handles.c;
if phi<=0
    zd=1.7*D;
    A=D;
    kf=1;
    kp=1;
%Tamaño del vector
L=[0:0.15*D:5*D];
vec_fs=[];
r=length(L);
for i=1:r
    Laux=L(i);
    fs=vpa((((2*((D/A*(1+(Laux/A)))+(1+(Laux/A))^2)*(zd/D)))+(2.7*(1+((2*Laux)/A))))*c+(pf*(1+((2*Laux)/A))))...
        /(((gamma*H)*((A/H*(1/3)+(Laux/A)))+(1+(Laux/A)^2)))+(qs*((1+(Laux/A))^2)-pf));
```

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE TÚNELES CIRCULARES SUPERFICIALES UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA

```

vec_fs=[vec_fs fs];
set(handles.text24,'String','El suelo ingresado es totalmente cohesivo');
end
syms Lmax;
fsrec=2;
pa=0;
a=(D*(tan(pi/4-degtorad(phi/2))));
kp=(tan(pi/4+degtorad(phi/2))^2);
kf=((1-(sin(degtorad(phi))^2))/(1+(sin(degtorad(phi))^2)));
A=D;
q=((2.7*c*((kp)^0.5)+(pf*kp)-(1/2*(gamma*A)));
zd=1.7*D;
sm2=((kf*c)+(0.17*(q)));
sm3=(kf*c);
Lmax1=solve(fsrec==(((2*sm2)*(((D/a)*(1+(Lmax/a)))+(1+((2*Lmax/a))))*(zd/D))+((2*sm3)*(Lmax/a)*(zd/D))+...
((2.7*c*((kp)^0.5)*(1+((2*Lmax/a)))+(pf*kp*(1+((2*Lmax/a)))))/((gamma*H)*((A/H)*(1/3+(Lmax/a)))+(1+(Lmax/a)^2)))+(qs*(1+(Lmax/a)^2
))-...
(pa*(Lmax/a)^2-(pf*kp))),Lmax);
Lmax1;
else
pa=0;
a=(D*(tan(pi/4-degtorad(phi/2))));
kp=(tan(pi/4+degtorad(phi/2))^2);
kf=((1-(sin(degtorad(phi))^2))/(1+(sin(degtorad(phi))^2)));
A=D;
q=((2.7*c*((kp)^0.5)+(pf*kp)-(1/2*(gamma*A)));
zd=1.7*D;
sm2=((kf*c)+(0.17*(q)));
sm3=(kf*c);
%Tamaño del vector
L=0.05*D:10*D;
vec_fs=[];
r=length(L);
for i=1:r
Laux=L(i);
fs=vpa((((2*sm2)*(((D/a)*(1+(Laux/a)))+(1+((2*Laux/a))))*(zd/D))+((2*sm3)*(Laux/a)*(zd/D))+...
((2.7*c*((kp)^0.5)*(1+((2*Laux/a)))+(pf*kp*(1+((2*Laux/a)))))/((gamma*H)*((A/H)*(1/3+(Laux/a)))+(1+(Laux/a)^2)))+(qs*(1+(Laux/a)^2))-...
(pa*(Laux/a)^2-(pf*kp))),Lmax);
vec_fs=[vec_fs fs];
end
syms Lmax;
fsrec=2;
Term1=((2*sm2)*(zd/D));
Term2=D/a;
Term3=Term2+1;
Term4=Term2+2;
Term5=(2*sm3*(zd/D));
Term6=(2.7*c*((kp)^0.5));
Term7=(pf*kp);
Term8=(gamma*H);
Lmax1=solve(0==((((Term1)*(Term3+(Term4*Lmax/a)))+(Term5*(Lmax/a)^2)+(Term6*(1+((2*Lmax/a)))+(Term7*(1+((2*Lmax/a)))))/((Ter
m8)*((A/H)*(1/3+(Lmax/a)))+(1+(Lmax/a)^2)))+(qs*(1+(Lmax/a)^2)-(pa*(Lmax/a)^2)-(Term7))-fsrec),Lmax)
y=eval(Lmax1)
y2=max(y)
set(handles.text24,'String','El suelo ingresado es cohesivo-friccionante');
set(handles.text22,'String',num2str(y2));
end
tabla=[(L/D) vec_fs]
plot(handles.axes1,L/D,vec_fs,'linewidth',2)
xlabel(handles.axes1,'Longitud sin soporte/Diámetro');
ylabel(handles.axes1,'FS');
title(handles.axes1,'Solución extendida de Tamez')
grid on
set(handles.axes1,'XGrid','on','YGrid','on')
function pf_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.pf=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function pf_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');

```

## PROYECTO DE INVESTIGACIÓN ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE TÚNELES CIRCULARES SUPERFICIALES UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA

```
end
function qs_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.qs=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function qs_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function H_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.H=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function H_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function D_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.D=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function D_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function gamma_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.gamma=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function gamma_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function phi_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.phi=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function phi_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function c_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.c=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function c_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function background_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function uipanel1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function Untitled_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
function Carranza_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;PRIMERINTENTO
function Tamez_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;TAMEZ
function Vermeer_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;Veerner
function DanielDias_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;DanielDias
```

- **Código para funcionamiento de la teoría analítica de Vermeer et al. (2002):**

```
function varargout = Veemer(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @Veemer_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @Veemer_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [] , ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function Veemer_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
set(handles.D,'String','')
set(handles.gamma,'String','')
set(handles.phi,'String','')
set(handles.c,'String','')

guidata(hObject, handles);
axes(handles.background);
imshow(imread('Imagen2.jpg'));
function varargout = Veemer_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
D=handles.D;
gamma=handles.gamma;
phi=handles.phi;
c=handles.c;
%%calculo de terminos auxiliares%%
d=[0:0.2*D:5*D];
termoa=(0.9*(tan(degrad(phi))));
termob=((18*c)/(gamma*D));
syms fs
vec=[];
r=length(d);
for i=1:r
dau=d(i);
n=(solve(fs-((termoa+termob)/(2+3*(dau/D)^(6*(tan((degrad(phi)/fs)))))))-=0,fs));
vec=[vec n];
end
tabla=[vpa(d/D,4) vpa(vec',4)]
plot(handles.axes1,d/D,vec,'linewidth',2);
xlabel(handles.axes1,'Longitud sin soporte/Diámetro');
ylabel(handles.axes1,'FS');
title(handles.axes1,'Solución numérica propuesta por Vermeer')
set(handles.axes1,'XGrid','on','YGrid','on')
function D_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.D=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function D_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function gamma_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.gamma=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function gamma_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function phi_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
```

## PROYECTO DE INVESTIGACIÓN ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE TÚNELES CIRCULARES SUPERFICIALES UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA

```
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.phi=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function phi_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function c_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.c=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function c_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function background_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function uipanel1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function Inicio_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;untitled
function Carranza_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;PRIMERINTENTO
function Tamez_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;TAMEZ
function Vermeer_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;Veerner
function DanielDias_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;DanielDias
```

### • **Codigo para funcionamiento de la teoria analitica de Daniel Dias et al. (2017):**

```
function varargout = DanielDias(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @DanielDias_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn',  @DanielDias_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn',  [], ...
    'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function DanielDias_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
set(handles.D,'String','')
set(handles.gamma,'String','')
set(handles.phi,'String','')
set(handles.c,'String','')
guidata(hObject, handles);
axes(handles.background);
imshow(imread('Imagen4.png'));
function varargout = DanielDias_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
D=handles.D;
gamma=handles.gamma;
phi=handles.phi;
c=handles.c;
%%calculo de terminos auxiliares%%
d=[0:0.5*D:5*D];
termoa=(1.23*(tan(deg2rad(phi))));
termob=((15.46*c)/(gamma*D));
syms fs
vec=[];
r=length(d);
for i=1:r
```

## PROYECTO DE INVESTIGACIÓN ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE TÚNELES CIRCULARES SUPERFICIALES UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA

```
daux=d(i);
n=(solve(fs-(termoa+termob)/(2+3*(daux/D)^(6*(tan((degtorad(phi)/fs))))))==0,fs);
vec=[vec n];
end
tabla=[vpa(d/D,4) vpa(vec',4)]
plot(handles.axes,d/D,vec,'linewidth',2);
xlabel(handles.axes,'Longitud sin soporte/Diámetro');
ylabel(handles.axes,'FS');
title(handles.axes,'Solución numérica propuesta por Daniel Dias et al.')
set(handles.axes,'XGrid','on','YGrid','on')
function D_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.D=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function D_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function gamma_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.gamma=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function gamma_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function phi_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.phi=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function phi_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function c_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');%Almacena valor ungresado
NewVal=str2double(Val);%Transforma a formato double
handles.c=NewVal;%Almacenar en identificador
guidata(hObject,handles);%Salvar datos
function c_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function uipanel1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function axes_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function Untitled_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;untitled
function Carranza_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;PRIMERINTENTO
function Tamez_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;TAMEZ
function Vermeer_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;Veemer
function DanielDias_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;close all;clc;DanielDias
```