



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS NUMÉRICO A MODELOS FÍSICOS DE DEFORMACIÓN DE TÚNELES,
SIMULANDO MACIZOS ROCOSOS ESTRATIFICADOS, CON BASE EN EL
PROGRAMA PLAXIS 2D**

PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

AUTORES:

Christian Ceccarelli N.

Jhonny A. De Agrela N.

PROFESOR GUÍA – TUTOR:

Ing. Roque García Ruiz

Caracas, junio 2021

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS NUMÉRICO A MODELOS FÍSICOS DE DEFORMACION DE
TÚNELES, SIMULANDO MACIZOS ROCOSOS ESTRATIFICADOS, CON
BASE EN EL PROGRAMA PLAXIS 2D**

Este jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: **VEINTE (20) PUNTOS, MENCIÓN PUBLICACIÓN.**

JURADO EXAMINADOR

Firma:



Nombre: Roque García Ruiz

N° C.I: V- 4.844.914

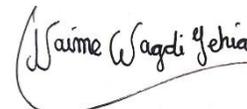
Firma:



Nombre: Álvaro Boiero

N° C.I: E-82.273.108

Firma:



Nombre: Naime Wagdi

N° C.I: V- 7.818.279

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

DEDICATORIA

Al universo, por llenar mi camino de oportunidades. Gracias por guiarme hacia mi propósito.

A mi madre, Pamela Navarro y mi padre, Claudio Ceccarelli, por estar para mí en todo momento.

A la nonna Aminta, por todo su amor.

A mi familia y amigos, por confiar y creer en mí.

In bocca al lupo

Christian

A mi madre, María Gisela Nunes y a mi padre, José Luis De Agrela, por creer en mí siempre,
apoyarme e impulsarme a ser la persona que soy hoy en día.

A mis abuelos, María Fernanda De Freitas y José Nunes, por sus buenos deseos y estar
pendientes de mí en todo momento.

A mis hermanos, Richard, Andrea y Daniel, por estar siempre presentes y apoyarme a lo largo de
mi carrera.

A cada uno de mis amigos, por confiar en mí y formar parte de esta experiencia extraordinaria.

A Gabriela Herrera, por siempre apoyarme, creer en mí y acompañarme durante gran parte de
este proceso.

Jhonny

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Católica Andrés Bello por brindar el espacio que formó parte de nuestro crecimiento profesional y personal.

A nuestros profesores guía, por su orientación, disposición y experiencia brindada durante todo el proceso. Gracias por confiar en nosotros para la realización del presente trabajo.

A todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Civil y profesionales que de una u otra manera nos transmitieron sus conocimientos para nuestra formación profesional.

A nuestros amigos, por apoyarnos, confiar en nosotros y formar parte de este camino desde el inicio.

A todas las personas que contribuyeron a la realización de este trabajo.

Christian y Jhonny

A mis padres, Pamela Navarro y Claudio Ceccarelli, por haberme formado con normas, valores y libertades, por su constante motivación, orientación y ejemplo para poder alcanzar mis metas; muchos de mis logros se los debo a ustedes.

A todos mis familiares, en especial a la nonna Aminta, por el amor que me has dado y por tu apoyo incondicional en mi vida. Gracias por siempre llevarme en tus oraciones.

A mi compañera Karlyana Chan, por tu apoyo, por creer en mí, por acompañarme durante esta etapa y motivarme a ser mejor cada vez. Siempre me decías que me iba a ir bien.

Christian

A mis padres, María Gisela Nunes y José Luis De Agrela por ser los principales guías de mis pasos y por el apoyo incondicional durante toda mi vida.

A Gabriela Herrera, mi compañera de vida, por impulsarme, inspirarme y ayudarme de forma incondicional, para seguir adelante cada día.

Jhonny

RESUMEN

Al excavar un túnel, se genera una alteración del estado de esfuerzos, lo que produce deformaciones, desplazamientos y eventualmente, la falla plástica en sectores del macizo rocoso cercanos a la excavación. De estos dependen los elementos estructurales para el sostenimiento de esta última. El conocimiento detallado de las condiciones geológicas y geotécnicas junto con el análisis de las deformaciones, permiten el cálculo adecuado para el sostenimiento y la selección del método de excavación. En este trabajo se presentan los análisis numéricos mediante elementos finitos, utilizando el programa PLAXIS 2D, para representar los modelos físicos realizados por Cortesi y Carestia en el año 1988, en los que se consideraron macizos rocosos estratificados o foliados, que constituyen planos continuos, con un sistema principal de diaclasas perpendicular a dichos planos, formando bloques individualizados. Los modelos numéricos lograron representar adecuadamente los resultados de los modelos físicos. Los resultados obtenidos significan un avance en el diseño del sostenimiento en túneles excavados en macizos estratificados o foliados, donde las deformaciones principales están controladas por flexión en las capas.

Palabras clave: Deformaciones en túneles, Diaclasas, Elementos finitos, Macizo estratificado, Modelos físicos.

ABSTRACT

When excavating a tunnel, an alteration in the state of stresses is generated, producing deformations, displacements and eventually, the plastic failure in sectors of the rock massif near the excavation. The structural elements depend on these for its support. The detailed knowledge of the geological and geotechnical conditions altogether with the analysis of the deformations, allow the adequate calculation of the support and the selection of the excavation method. In this paper we present the numerical analyses by means of finite elements, using the PLAXIS 2D software, to represent the physical models made by Cortesi and Carestia in 1988, in which stratified or foliated rock massifs were considered, constituted by continuous planes, with a main joint system perpendicular to these planes, forming individualized blocks. The results obtained, provide information on the deformations and displacements occurring in rock massif for the condition of horizontal and inclined layers, and, in addition, the influence of the use of support structures. The numerical models were able to adequately represent the results of the physical models. The results obtained represent an advancement in the design of support in tunnels excavated in stratified or foliated massifs, where the main deformations are controlled by the bending of the layers.

Keywords: Tunnel deformations, Joints, Finite elements, Stratified rock massifs, Physical models.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I- PROBLEMÁTICA	15
1.1. Planteamiento del Problema	15
1.2. Objetivos	15
1.1.1. General	16
1.1.2. Específicos	16
1.3. Justificación	16
1.4. Alcance y Limitaciones.....	17
CAPÍTULO II- MARCO TEÓRICO	18
2.1. Antecedentes	18
2.1.1. Resultados del Trabajo Especial de Grado Sobre Modelos Físicos de 1988.....	20
2.2. Aspectos Geológicos de las Excavaciones Subterráneas.....	24
2.2.1. Clasificación de las Rocas Según su Origen.....	24
2.2.2. Resistencia de la Roca Intacta y el Macizo Rocoso.....	25
2.2.3. Condiciones Estructurales del Macizo Según su Origen	27
2.2.4. Las Diaclasas y el Estado de Esfuerzos	29
2.2.5. Agua Subterránea.....	33
2.3. Métodos Geotécnicos de Análisis de Túneles	33
2.3.1. Empíricos	33
2.3.2. Matemáticos.....	34
2.4. Método de los Elementos Finitos.....	35
2.5. Resumen del Programa PLAXIS 2D	38
2.5.1. Subprograma <i>Input</i>	38
2.5.1.1. Modos de Geometría.....	42
2.5.1.2. Modos de Cálculo	49
2.5.2. Subprograma <i>Output</i>	53
CAPÍTULO III- MARCO METODOLÓGICO	55
3.1. Tipo de Investigación.....	55
3.2. Diseño de la Investigación.....	55
3.3. Modelo Físico	56
3.4. Descripción de los Modelos Numéricos	58
3.5. Diseño de los Modelos Numéricos	58

3.6. Modelado en PLAXIS 2D.....	59
3.6.1. Propiedades del Proyecto.....	59
3.6.2. Geometría de los Modelos.....	60
3.6.3. Condiciones de Borde.....	63
3.6.4. Creación y Asignación de Materiales.....	64
3.6.5. Malla de Elementos Finitos.....	66
3.6.6. Fases de construcción.....	66
3.7. Estructuras de Soporte.....	67
3.8. Zonificación del Macizo en Función del Fracturamiento.....	70
CAPÍTULO IV-ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	73
4.1. Introducción.....	73
4.2. Comparación Cualitativa de los Procesos de Deformación.....	74
4.2.1. Modelo con Capas Horizontales.....	74
4.2.2. Modelos con Capas Inclinas.....	76
4.2.2.1. Modelos con Capas Inclinas a 30°.....	76
4.2.2.2. Modelos con Capas Inclinas a 45°.....	78
4.2.2.3. Modelos con Capas Inclinas a 60°.....	79
4.2.3. Modelado Incluyendo Estructuras de Soporte.....	80
4.2.3.1. Modelo con Capas Horizontales con Revestimiento.....	81
4.2.3.2. Modelo con Capas Horizontales con Revestimiento y Anclajes.....	82
4.2.3.3. Modelo con Capas Horizontales con Anclajes y sin Revestimiento.....	83
4.2.3.4. Modelo con Capas Inclinas a 30° con Revestimiento.....	84
4.2.3.5. Modelo con Capas Inclinas a 45° con Revestimiento.....	85
4.2.3.6. Modelo con Capas Inclinas a 60° con Revestimiento.....	86
4.3. Comparación Cuantitativa de los Procesos de Deformación.....	87
4.4. Modelos con Macizo Zonificado en Función del Fracturamiento.....	92
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
ANEXOS.....	96
ANEXO A: IMÁGENES DE MODELOS NUMÉRICOS.....	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Arreglo de elementos de cerámica en modelos realizados	19
Figura 2.2: Modelos físicos 1988 deformados, horizontal e inclinado 30°	22
Figura 2.3: Modelos físicos 1988 deformados, inclinados 45° y 60°	22
Figura 2.4: Modelos físicos 1988 deformados con revestimiento y anclajes.....	23
Figura 2.5: Resistencia del macizo rocoso de acuerdo al tamaño de la muestra	26
Figura 2.6: Muestra de los efectos de la meteorización con la profundidad	27
Figura 2.7: Representación de la dilatación	29
Figura 2.8: Persistencia de las diaclasas de acuerdo al confinamiento del macizo rocoso.....	31
Figura 2.9: Zonificación del macizo rocoso de acuerdo al desarrollo de diaclasas y variación del fracturamiento.....	32
Figura 2.10: Propiedades del proyecto	39
Figura 2.11: Ejemplos del tipo de modelo	40
Figura 2.12: Posición de los nodos y puntos de esfuerzo en los elementos de la malla	41
Figura 2.13: Configuración del subprograma Input.....	41
Figura 2.14: Ventana Importar geometría	43
Figura 2.15: Configuración del modo estructuras	44
Figura 2.16: Creación y asignación de propiedades del material.....	46
Figura 2.17: Configuración del modo malla.....	49
Figura 2.18: Configuración del modo de fases de construcción.....	51
Figura 2.19: Ventana Tareas activas	52
Figura 2.20: Configuración del subprograma Output	53
Figura 3.1: Modelo físico 2021 con planos de estratificación horizontal	57
Figura 3.2: Polígonos de suelo.....	61
Figura 3.3: Ventana Diseñador de túneles.....	62
Figura 3.4: Interfaces negativas del túnel.....	62
Figura 3.5: Interfaces entre bloques del macizo	63
Figura 3.6: Asignación de materiales a los polígonos de suelo.....	65
Figura 3.7: Restricciones del contorno	67
Figura 3.8: Creación de revestimientos	68
Figura 3.9: Creación de anclajes	69

Figura 3.10: Modelos con macizo zonificado	71
Figura 4.1: Esquema de dimensiones medidas	73
Figura 4.2: Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico con capas horizontales.....	74
Figura 4.3: Zonas de deformación en modelos de capas inclinadas	76
Figura 4.4: Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico inclinado a 30°	77
Figura 4.5: Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico inclinado a 45°	78
Figura 4.6: Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico inclinado a 60°	79
Figura 4.7: Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico con capas horizontales usando revestimiento.....	81
Figura 4.8: Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico con capas horizontales, usando revestimiento y anclajes.....	82
Figura 4.9: Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico con capas horizontales, usando anclajes sin revestimiento.....	83
Figura 4.10: Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico con capas inclinadas 30°, usando revestimiento	84
Figura 4.11: Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico con capas inclinadas 45°, usando revestimiento	85
Figura 4.12: Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico con capas inclinadas 60°, usando revestimiento	86
Figura 4.13: Cuerdas en modelo con capas horizontales	87
Figura 4.14: Cuerdas en modelo con capas inclinadas 30°	88
Figura 4.15: Cuerdas en modelo con capas inclinadas 45°	89
Figura 4.16: Cuerdas en modelo con capas inclinadas 60°	90
Figura 4.17: Macizo zonificado y estratificado horizontalmente.....	92
Figura 4.18: Macizo zonificado y estratificado con inclinación a 30°	93
Figura A.1: Modelo con capas horizontales	98
Figura A.2: Modelo con capas horizontales y revestimiento.....	99
Figura A.3: Modelo con capas horizontales y anclajes	100
Figura A.4: Modelo con capas horizontales, revestimiento y anclajes	101
Figura A.5: Modelo con capas inclinadas a 30°	102

Figura A.6: <i>Modelo con capas inclinadas a 30° y revestimiento</i>	103
Figura A.7: <i>Modelo con capas inclinadas a 45°</i>	104
Figura A.8: <i>Modelo con capas inclinadas a 45° y revestimiento</i>	105
Figura A.9: <i>Modelo con capas inclinadas a 60°</i>	106
Figura A.10: <i>Modelo con capas inclinadas a 60° y revestimiento</i>	107
Figura A.11: <i>Modelo zonificado con capas horizontales</i>	108
Figura A.12: <i>Modelo zonificado con capas inclinadas a 30°</i>	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: <i>Características de modelos físicos ensayados en 1988</i>	20
Tabla 3.1: <i>Dimensiones de modelos numéricos</i>	58
Tabla 3.2: <i>Propiedades generales del proyecto</i>	60
Tabla 3.3: <i>Dimensiones de segmentos del túnel</i>	61
Tabla 3.4: <i>Características de los materiales</i>	64
Tabla 3.5: <i>Propiedades del revestimiento</i>	68
Tabla 3.6: <i>Propiedades del anclaje</i>	69
Tabla 3.7: <i>Dimensiones de modelos con macizo zonificado</i>	71
Tabla 3.8: <i>Dimensiones del túnel en modelos con macizo zonificado</i>	72
Tabla 3.9: <i>Características de los materiales en modelos con macizo zonificado</i>	72
Tabla 4.1: <i>Resultados de deformación de modelos con capas horizontales</i>	87
Tabla 4.2: <i>Resultados de deformaciones de modelos con capas inclinadas a 30°</i>	88
Tabla 4.3: <i>Resultados de deformación de modelos con capas inclinadas a 45°</i>	90
Tabla 4.4: <i>Resultados de deformación de modelos con capas inclinadas a 60°</i>	91

INTRODUCCIÓN

La excavación de un túnel genera una serie de movimientos en el macizo, ocasionando un desequilibrio del estado de esfuerzos en la roca, así como de los elementos estructurales cercanos a este, razón por la cual el diseño, análisis y ejecución de un túnel, requiere un conocimiento exhaustivo del comportamiento de la roca.

Existen diversos métodos para análisis de túneles, contándose con métodos empíricos, analíticos y modelado físico y numérico. Hoy en día, los métodos numéricos son de uso prácticamente obligatorio debido a su versatilidad, ya que ayudan a obtener información acerca de los procesos de deformación que ocurren en el macizo para condiciones complejas del contorno, permitiendo también modelar las distintas fases de ejecución y la interacción terreno-estructura con los elementos de soporte.

Un modelo para el análisis de un túnel en macizos rocosos debe ser representativo de las condiciones litológicas y de las estructuras geológicas. La presente investigación se refiere al modelado numérico, por medio de un análisis de elementos finitos con el programa PLAXIS 2D, de modelos físicos realizados por Cortesi y Carestia en 1988, que simulan excavaciones subterráneas donde el macizo se encuentra estratificado o foliado con un sistema principal de diaclasas perpendicular a dichos planos de estratificación.

Este trabajo de grado se divide en cinco capítulos presentados a continuación:

- Capítulo I: Problemática; sirve para informar al lector de los objetivos y motivos del planteamiento de este tema.

- Capítulo II: Marco Teórico; donde se presentan los principios fundamentales geotécnicos y manejo del programa PLAXIS 2D para la realización del modelado numérico.
- Capítulo III: Marco Metodológico; se define el tipo y enfoque de la investigación además de cómo se realizó el trabajo.
- Capítulo IV: Análisis de Resultados; se presentan y discuten los resultados obtenidos del análisis numérico.
- Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones; se presentan las conclusiones y recomendaciones del tema estudiado.

CAPÍTULO I- PROBLEMÁTICA

1.1. Planteamiento del Problema

García (2018) indica que en los últimos 40 años se han construido decenas de kilómetros de túneles, gran parte de ellos excavados en macizos rocosos, donde la clasificación de la roca se basa en los llamados métodos empíricos que requieren del conocimiento de parámetros tales como: características geológicas y geotécnicas, presencia de agua, características del material (suelo o roca), caracteres geomecánicos de las discontinuidades, influencia del tiempo (viscosidad), parámetros de deformabilidad, estado de esfuerzos y dimensiones de la excavación. Sin embargo, aunque estos son de gran utilidad, su uso tan generalizado ha hecho que en muchos casos no se hayan conseguido los resultados deseados, ya que las condiciones reales de respuesta del macizo rocoso en condiciones específicas, no se puede extrapolar a las situaciones utilizadas como base empírica de las clasificaciones mencionadas.

Además de la importancia de los métodos empíricos, hoy en día también se emplean, simultáneamente, diferentes métodos, tales como los numéricos o los analíticos e inclusive modelos físicos, con el fin de obtener la mayor cantidad de información posible durante el estudio.

Esta investigación se plantea con base en los resultados obtenidos en los modelos físicos realizados por Cortesi A. y Carestia L. en el año 1988, sobre deformación del macizo rocoso estratificado o foliado, sometido a esfuerzos por la abertura de un túnel. Las deformaciones observadas en los modelos físicos serán comparadas y representadas mediante el uso del programa PLAXIS 2D, sustentado en la construcción de una malla de elementos finitos.

1.2. Objetivos

Los objetivos planteados en el desarrollo del presente trabajo de grado, fueron los siguientes:

1.1.1. General

Obtener un modelo digital que relacione la deformación de los macizos rocosos estratificados o foliados, obtenida en los modelos físicos realizados en el año 1988 a través de ensayos, utilizando modelado numérico con el programa PLAXIS 2D.

1.1.2. Específicos

- Desarrollar las mallas de discretización para el modelado numérico, establecer las condiciones de contorno, estado de esfuerzos iniciales, acciones y etapas de análisis utilizando el programa PLAXIS 2D.
- Desarrollar modelos de deformación con el programa PLAXIS 2D, que reproduzcan los resultados obtenidos mediante ensayos físicos.
- Establecer condiciones dinámicas (fuerzas, desplazamientos y esfuerzos) con base en gráficos de iso-superficie.
- Realizar un modelo físico simulando un macizo rocoso con capas de estratificación horizontales.

1.3. Justificación

Los modelos físicos permitieron observar los comportamientos en macizos rocosos estratificados o foliados, con un sistema principal de diaclasas formando bloques individualizados, ante la excavación de un túnel. La obtención de un modelo digital, que se asemeje a lo obtenido en los modelos físicos que demostraron comportamientos esperados y confirmatorios de un grupo de hipótesis, permitirá modificar aspectos para estudiar las deformaciones del macizo bajo otro tipo de condiciones, sin necesidad de recurrir al uso de modelos físicos.

1.4. Alcance y Limitaciones

El alcance abarcó el desarrollo de modelos numéricos por medio de análisis de elementos finitos en 2D, donde se representaron condiciones homólogas a las de los modelos físicos, para verificar si los resultados de los modelos numéricos, son parecidos a los obtenidos con los modelos físicos. El trabajo se limita al modelado de excavaciones en macizos rocosos con planos de estratificación o foliación y un sistema principal de diaclasas perpendicular a dichos planos, generando un macizo conformado por bloques, sometidos únicamente a la fuerza de gravedad.

La dificultad principal de este estudio está en el modelado de los planos de contacto entre bloques, ya que las condiciones de trabajo de los modelos físicos no son usuales con mallas de elementos finitos, sino con mallas de elementos discretos. Aún así, los modelos numéricos se podrían acercar a la realidad, tal vez por encima de los modelos físicos, que, aunque tienen mucha aplicación y permiten obtener una idea clara del comportamiento general según ciertas condiciones, se encuentran muy limitados en comparación con los modelos numéricos, ya que en estos últimos se pueden modificar propiedades con mayor facilidad. Algunas de estas son: los modelos constitutivos de los materiales, las condiciones de contorno a modelar y la representación de la resistencia de los contactos entre los bloques.

CAPÍTULO II- MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Con base en los resultados de los modelos físicos del trabajo de grado realizado en la Universidad Católica Andrés Bello (UCAB), Caracas, en el año 1988, por los ingenieros Alicia Cortesi y Luciano Carestia, titulado: *Análisis de deformación en túneles a partir de ensayos sobre modelos en dos dimensiones*, se realizó un modelo físico de verificación junto con los modelos numéricos para realizar las comparaciones. Dicho trabajo de grado se basó en modelos físicos que simulaban macizos rocosos estratificados o foliados con un sistema de diaclasas perpendicular a dichas capas, sometidas únicamente a la acción de la fuerza de gravedad, por lo tanto, son representativos de excavaciones donde no existen esfuerzos horizontales importantes. En ellos se analizó cualitativamente la influencia de la inclinación de las capas con el diámetro del túnel y la deformación generada en el macizo, así como la contribución de elementos de anclajes y revestimientos, evaluando los principales factores que afectan la estabilidad de una excavación.

Dichos ensayos fueron hechos mediante una “máquina de modelos de fricción base” similar a la del Colegio Imperial de Londres descrita por Goodman (1976). La máquina consistió en una mesa de 1,5 x 2,0 m sobre la que se colocó una cinta continua de tela. Mediante un rodillo conectado a un eje y montado sobre chumaceras, se deslizaba la tela con una velocidad constante, proporcionando la fricción a los elementos de cerámica en los modelos. Para poder simular el confinamiento vertical de la excavación, se restringió el movimiento del modelo utilizando una barra horizontal fijada en la parte inferior del mismo.

Los modelos se realizaron con elementos cuadrados de cerámica de 2,0 x 2,0 x 0,4 cm, con los que se simulaban planos continuos, pudiendo representar las capas o la foliación respectivamente, de macizos de rocas sedimentarias o metamórficas. El arreglo de los cuadros

Tabla 2.1*Características de modelos físicos ensayados en 1988*

Modelo	Inclinación	Relación (D/d)	Características	Modelo	Inclinación	Relación (D/d)	Características
I-A	Horizontal	25	Sin revestimiento ni anclaje	III-C	45°	25	Con revestimiento y 8 anclajes
I-B	Horizontal	25	Con revestimiento y sin anclaje	III-D	45°	25	Con revestimiento y 11 anclajes
I-C	Horizontal	25	Con revestimiento y 4 anclajes	III-E	45°	17	Sin revestimiento ni anclaje
I-D	Horizontal	25	Sin revestimiento y 4 anclajes	III-F	45°	17	Con revestimiento y sin anclaje
I-E	Horizontal	20	Sin revestimiento ni anclaje	III-G	45°	12.5	Sin revestimiento ni anclaje
I-F	Horizontal	17	Sin revestimiento ni anclaje	IV-A	60°	25	Sin revestimiento ni anclaje
I-G	Horizontal	15.5	Sin revestimiento ni anclaje	IV-B	60°	25	Con revestimiento y sin anclaje
I-H	Horizontal	14	Sin revestimiento ni anclaje	IV-C	60°	25	Con revestimiento y 10 anclajes
I-I	Horizontal	12.5	Sin revestimiento ni anclaje	IV-D	60°	25	Con revestimiento y 13 anclajes
II-A	30°	25	Sin revestimiento ni anclaje	IV-E	60°	20	Sin revestimiento ni anclaje
II-B	30°	25	Con revestimiento y sin anclaje	IV-F	60°	17	Sin revestimiento ni anclaje
II-C	30°	25	Con revestimiento y 6 anclajes	IV-G	60°	14	Sin revestimiento ni anclaje
II-D	30°	20	Sin revestimiento ni anclaje	IV-H	60°	12.5	Sin revestimiento ni anclaje
II-E	30°	17	Sin revestimiento ni anclaje	V-A	Vertical	25	Sin revestimiento ni anclaje
II-F	30°	14	Sin revestimiento ni anclaje	V-B	Vertical	25	Con revestimiento y sin anclaje
II-G	30°	12.5	Sin revestimiento ni anclaje	V-C	Vertical	25	Con revestimiento y 15 anclajes
III-A	45°	25	Sin revestimiento ni anclaje	V-C	Vertical	12.5	Sin revestimiento ni anclaje
III-B	45°	25	Con revestimiento y sin anclaje				

Adaptada de: *Cantidad y características de modelos ensayados*, Cortesi y Carestia, 1988.

2.1.1. Resultados del Trabajo Especial de Grado Sobre Modelos Físicos de 1988

Se sabe que es poco probable reproducir las condiciones reales bajo las cuales se encuentra un macizo, sin embargo, los resultados obtenidos en los modelos físicos de dicho trabajo de grado, permitieron observar los procesos de deformación en macizos estratificados, una vez realizada la excavación, así como el uso de las estructuras de soporte.

Tal y como indican Cortesi y Carestia (1988), se pudo concluir que en túneles realizados en macizos rocosos estratificados o foliados, de condiciones similares a los modelos ensayados, los procesos de deformación dependen fundamentalmente de los siguientes factores:

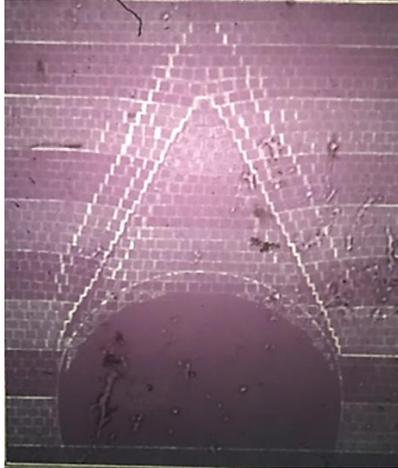
- La relación entre el diámetro de la excavación y el tamaño de los bloques (D/d).
- La orientación de las estructuras geológicas.

La variación de la relación D/d permitió observar que, a medida que se disminuye, de igual forma lo hacen las deformaciones producidas. Los procesos de deformación se atenuaron simulando macizos rocosos con menor fracturamiento.

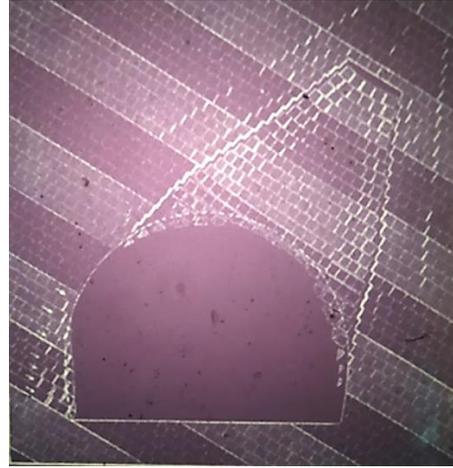
En los estratos horizontales, las deformaciones se deben a la flexión de las capas sobre el techo del túnel, este proceso es debido a la acción de las fuerzas que actúan perpendicularmente a las capas, produciendo la separación de las mismas y apertura de las diaclasas hasta cierta altura sobre el techo, resultando en una superficie de falla de forma trapecial (Figura 2.2 a). En cambio, con los estratos inclinados, Cortesi y Carestia (1988) mencionan que aparecen dos zonas con diferentes procesos de deformación. En la primera zona donde las capas adyacentes son aproximadamente tangentes al contorno de la excavación, se producen fenómenos de flexión, que generan el desprendimiento de un volumen de roca de forma trapecial simétrico con respecto a una línea normal a las capas que pasan por el centro de la zona de falla, al aumentar la inclinación de las capas, el volumen de roca que se desprende es menor (Figura 2.3). En la segunda zona se producen deslizamientos donde las capas buzan hacia el interior de la excavación, esto ocurre cuando los esfuerzos de corte son mayores que la resistencia entre los planos principales de discontinuidad.

Figura 2.2

Modelos físicos 1988 deformados, horizontal e inclinado 30°



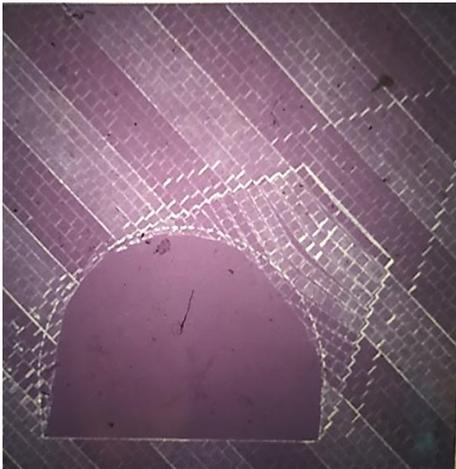
a. Modelo I-A



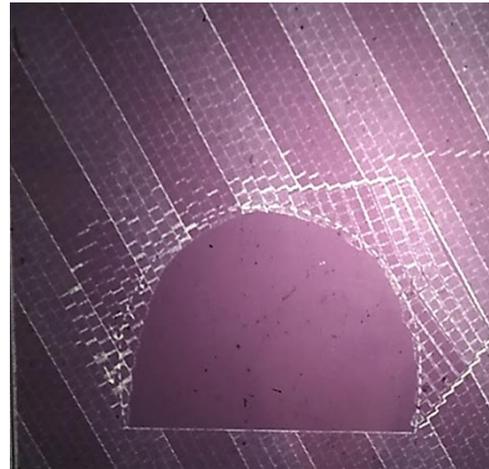
b. Modelo II-A

Figura 2.3

Modelos físicos 1988 deformados, inclinados 45° y 60°



a. Modelo III-A



b. Modelo IV-A

En los ensayos donde se usaron estructuras de soporte, se aprecia el mejoramiento en la estabilidad de la excavación (Figura 2.4). El revestimiento evita el desprendimiento de los bloques y aumenta las reacciones de contacto entre ellos en el contorno de la excavación, sin embargo, a medida que aumenta el diámetro de la excavación el uso solamente de revestimiento es insuficiente, por lo que la combinación de anclajes es importante, ya que estos, al colocarlos de forma correcta, interceptando las posibles zonas de falla y de deslizamientos cruzando la mayor cantidad de capas, son capaces de reforzar el macizo rocoso y mejorar su comportamiento cuando tienden a generarse movimientos relativos entre bloques o zonas del medio separadas por discontinuidades.

Figura 2.4

Modelos físicos 1988 deformados con revestimiento y anclajes.



a. Modelo III-B



b. Modelo III-C

2.2. Aspectos Geológicos de las Excavaciones Subterráneas

Las condiciones geológicas de un macizo rocoso son las que determinan la estabilidad y el diseño de las excavaciones subterráneas. Según Ramírez y Alejano (2004), los macizos rocosos son clasificados geomecánicamente para hacer una primera predicción de su comportamiento ante excavaciones subterráneas y a cielo abierto, e indican que las clasificaciones mayormente utilizadas son las de Bieniawski (1973), el sistema Q de Barton, Lien y Lunde (1974) y la de Hoek-Brown (1997), estando estas clasificaciones basadas básicamente en la asignación de un puntaje relativo que determina el estado de la roca. Los parámetros utilizados para la asignación de este puntaje, tal y como indica García (2014) dependen de la simple clasificación de las rocas según su origen, asociado con las estructuras geológicas, destacando que las condiciones más importantes serían las que a continuación se describen:

- Clasificación de las rocas según su origen.
- Resistencia de la roca intacta y el macizo rocoso.
- Condiciones estructurales del macizo según su origen.
- Las diaclasas y el estado de esfuerzos.
- Agua subterránea.

2.2.1. Clasificación de las Rocas Según su Origen

Las rocas pueden clasificarse como Ígneas, Sedimentarias y Metamórficas y cada una de ellas tiene sus propias características principales, a saber:

- **Ígneas:** son aquellas que se originan debido a la solidificación de un material líquido extremadamente caliente y móvil llamado magma, que se encuentra en el subsuelo. Estas poseen una variedad muy amplia que depende de la velocidad de enfriamiento y de la composición del magma. Su textura es maciza.

- ***Sedimentarias:*** se originan principalmente por la compactación o cementación de sedimentos de origen clástico, constituidos por fragmentos de otros tipos de rocas. Se caracterizan en general por estar formadas por capas, cuyos planos definen la estratificación de la misma. La resistencia en dichos planos, es muy baja comparada con la roca intacta.
- ***Metamórficas:*** son el resultado de procesos de altas temperaturas y presión en rocas existentes, ya sean ígneas, sedimentarias o ellas mismas. Pueden ser macizas o foliadas, desarrollándose estas últimas por la orientación de los minerales durante el proceso de metamorfismo. Estos planos de foliación presentan gran continuidad, similares a los planos que limitan las capas en rocas sedimentarias.

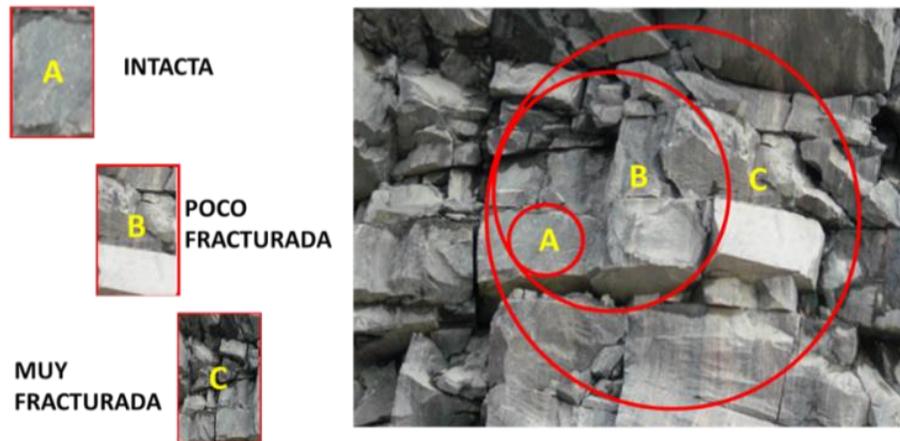
Cada uno de los tipos de roca mencionados anteriormente, posee características diferentes de resistencia cohesiva, textura, microestructura y macroestructura, lo cual hace que al realizar una excavación sea necesario conocer el perfil litológico de la región, y así prever algunos aspectos del comportamiento del macizo rocoso (Cortesi y Carestia, 1988).

2.2.2. Resistencia de la Roca Intacta y el Macizo Rcoso

La resistencia de la roca intacta es muy diferente a la del macizo rocoso, el cual integra la roca con los planos estructurales. A medida que la muestra del macizo aumenta de tamaño (Figura 2.5) la resistencia disminuye, debido a que incorpora mayor número de planos estructurales. A lo anterior hay que agregarle el efecto de meteorización, que según Ramírez y Alejano (2004), son las modificaciones experimentadas en la composición o estructura de las rocas por acción de los agentes atmosféricos, e indican que existen dos tipos, la meteorización física y la química.

Figura 2.5

Resistencia del macizo rocoso de acuerdo al tamaño de la muestra



Adaptado de: Sistemas de fractura desarrollados en el frente excavación del canal de descarga de la presa Tocomá. García, R. (2018) *Revista Tekhné Volumen 21*.

Debido a la alteración química de los minerales que componen las rocas, algunas de sus propiedades son perturbadas, tales como: peso específico, densidad seca y resistencia a los esfuerzos. Según García (2014), el proceso químico de alteración de minerales es más acentuado en la superficie y va disminuyendo hacia el interior del macizo rocoso, lo que permite delimitar las distintas zonas de meteorización de acuerdo al porcentaje de minerales alterados, denominadas: suelo residual (Sr), roca descompuesta (RD), roca meteorizada (RM) y roca fresca (RF). El efecto de meteorización afecta los primeros metros de profundidad (Figura 2.6), generalmente no siendo mayor a los 100 metros, dependiendo de las condiciones climáticas (García R. comunicación personal). Estos primeros metros se observan oxidados, con manchas de alteración de minerales, generalmente relacionados con variación en el nivel de agua subterránea, originando materiales de relleno constituidos por materiales limosos.

Figura 2.6

Muestra de los efectos de la meteorización con la profundidad



Tomado de: *Muestras de perforación durante la exploración de la presa Cuira, Edo. Miranda, Venezuela.*

Apuntes de clase, García, R.

Un aspecto muy importante de destacar es que el macizo rocoso está afectado por diaclasas, las cuales según su definición son fracturas sin movimiento, que se generan por la liberación o alivio de esfuerzos, ya sea por efectos de la meteorización o por eventos tectónicos que producen un cambio en las tensiones del macizo rocoso (García, 2014). A mayor profundidad, las fracturas que generan las diaclasas se encuentran confinadas, por lo que las mismas se desarrollan con menor frecuencia.

2.2.3. Condiciones Estructurales del Macizo Según su Origen

En la estabilidad de una excavación, tienen gran influencia las estructuras geológicas de un macizo, que son producto de los procesos geológicos que han actuado sobre las rocas durante su formación. Tal y como indican García, R. y García, E. (2004), la sollicitación de las estructuras

geológicas o planos estructurales en los macizos rocosos, como son: planos de capas o de foliación, diaclasas, fallas y fracturas, formarán de acuerdo al estado de esfuerzo un patrón de fracturamiento, del cual dependerá la resistencia del macizo. Estos planos estructurales, constituyen superficies de debilidad que imparten a la roca una condición de anisotropía, cuya posición con respecto a la sollicitación varía su resistencia (García, 2014). A su vez, en estos planos, la resistencia al corte es menor que la resistencia de la roca intacta que constituye al macizo, por lo que la presencia de estos, hace que la resistencia del macizo rocoso en sí, sea menor que la de la roca intacta y que las deformaciones estén influenciadas por la geometría y orientación de los planos.

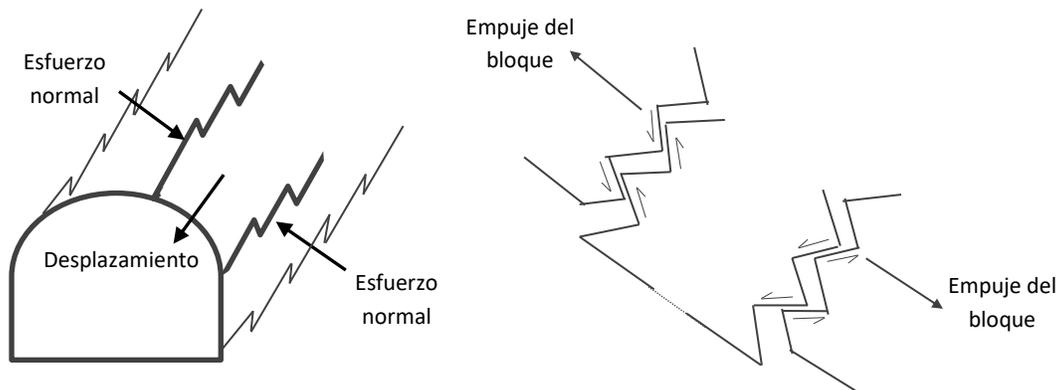
Debido a lo mencionado anteriormente, es importante diferenciar de forma apropiada los distintos planos que afectan el macizo rocoso, abarcando adecuadamente los planos de estratificación, planos de foliación y diaclasas. Según García (2014), los dos primeros, constituyen planos de origen de formación de las rocas, asociados con las rocas sedimentarias y metamórficas, respectivamente. Las rocas ígneas, en general, forman un conjunto de rocas masivas, donde sus efectos estructurales se limitan a las diaclasas. La resistencia del macizo rocoso dependerá además de la sollicitación generada por las excavaciones requeridas para la obra, donde se combina la posición de las distintas estructuras geológicas, diferenciando en los sistemas de diaclasas su frecuencia y desarrollo con el confinamiento (García, 2014).

Otro factor importante de mencionar respecto al comportamiento mecánico de las discontinuidades es la dilatancia, que consiste en el incremento de volumen en las masas del subsuelo después de la falla, debido a la separación de las paredes de las discontinuidades durante el deslizamiento. Según Ramírez y Alejano (2004) en excavaciones subterráneas, si se tiene un bloque sometido a confinamiento, al comenzar el bloque a desplazarse hacia la cavidad, este se acuña (encaja), por efecto de la dilatancia, por lo que parte de la energía potencial se invierte en

incrementar el esfuerzo normal sobre la discontinuidad, lo que a su vez aumentará su capacidad resistente. Este efecto logra que cavidades de grandes dimensiones sean estables, mientras que túneles de pequeño diámetro se caigan.

Figura 2.7

Representación de la dilatancia



Adaptado de: *Dilatancia: efectos y representación gráfica en los ejes correspondientes*, Ramírez y Alejano (2004), *Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*.

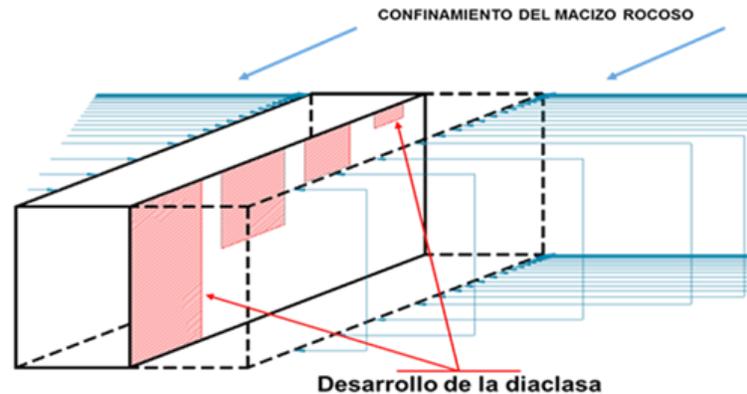
2.2.4. Las Diaclasas y el Estado de Esfuerzos

Como se mencionó en el apartado 2.2.2, las diaclasas son fracturas sin movimiento en las rocas, las cuales dentro de la aplicación geotécnica se consideran un parámetro importante para valorar la resistencia de un macizo rocoso, donde es interesante destacar que las observaciones en afloramientos y excavaciones son representativas de un estado de esfuerzos (García, 2014). En estudios geotécnicos, las diaclasas se asocian a una serie de términos como: la persistencia, frecuencia, abertura, rugosidad y relleno, estando cada uno relacionado con su formación, lo cual facilita el entendimiento de las propiedades mecánicas que se deben tener en cuenta para su aplicación. Dichos términos se explican a continuación:

- **Persistencia:** se relaciona con el área del plano de diaclasas, teniendo mayor desarrollo en rocas uniformes, en capas gruesas y en zonas menos confinadas. En rocas estratificadas y foliadas, las diaclasas se encuentran más limitadas en extensión (Figura 2.8).
- **Frecuencia:** se define como la cantidad de diaclasas en un ancho determinado, pudiendo medirse en un ancho de 1 a 3 metros, siendo una medición de frecuencia de diaclasas, por ejemplo, una en 2 metros (1:2). Se espera que en macizos rocosos la frecuencia sea inversamente proporcional al volumen de masa homogénea.
- **Abertura:** se define como la distancia perpendicular entre los planos de diaclasas. La abertura de una diaclasa o fisura está relacionada con un fenómeno de descompresión, el cual es el producto del cambio de la aplicación un estado de esfuerzo.
- **Rugosidad:** se define como la irregularidad que tienen los planos que delimitan las diaclasas. Se puede diferenciar entre: lisa, ligeramente rugosa y muy rugosa, cuya superficie de corte tendrá respectivamente baja, mediana y alta resistencia.
- **Relleno:** como se mencionó antes, los efectos de descompresión debido a fenómenos tectónicos pueden originar separación de los planos que definen las diaclasas, originando rellenos debido a la meteorización de la propia roca o el cambio de volumen en la misma. También, la variación de flujo subterráneo, produce oxidación en las paredes.

Figura 2.8

Persistencia de las diaclasas de acuerdo al confinamiento del macizo rocoso



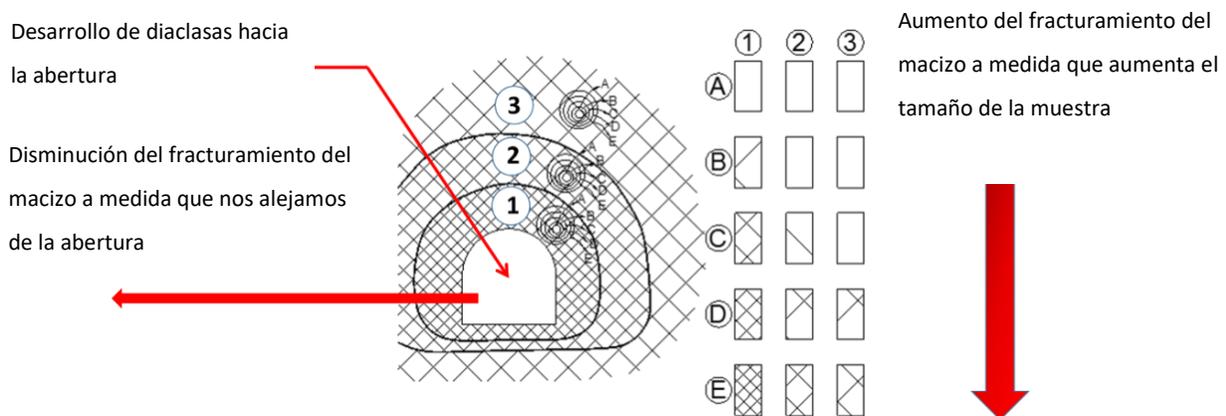
Tomado de: *Desarrollo de la diaclasa de acuerdo al confinamiento del macizo*. García, R. (2018)

Los parámetros anteriores dependen de las condiciones iniciales de esfuerzo y, de acuerdo al tipo de roca en el macizo, desarrollará una serie de fisuras y microfisuras que, con efectos posteriores, tectónicos o cambio de carga geostática, podrían desarrollar planos de mayor extensión, como también abertura en dichos planos debido a la descompresión por efectos de los esfuerzos. En ausencia de toda actividad tectónica, el esfuerzo vertical en un punto está determinado por el peso de la columna de roca en dicho punto y, en tales condiciones, dependiendo de las características mecánicas de deformación de la roca, habrá un empuje lateral relacionado con el esfuerzo vertical a través de un coeficiente llamado “Coeficiente de empuje lateral” (K), el cual, con base en consideraciones teóricas, debería ser menor que uno, pero tal y como indican Krynine y Judd (1961), es posible encontrar esfuerzos horizontales mayores que los verticales, lo que demuestra la existencia de tensiones residuales producto de algún fenómeno geológico o topográfico ocurrido con anterioridad, que modifica el estado geostático de esfuerzos.

Al momento de excavar un túnel, el estado inicial de esfuerzos se modifica bruscamente, ocurriendo una distribución de tensiones en el contorno excavado, las cuales dependen fundamentalmente de las condiciones estructurales del macizo. Al crear un vacío, el contorno de la excavación queda liberado de los esfuerzos existentes. Esto, se va transmitiendo hacia el macizo con efectos de descompresión, siendo este mayor en las cercanías del túnel y disipándose hacia dentro de la masa de roca a medida en que se aleja de la excavación. Es por esto que las juntas preexistentes se pueden abrir y aparecen nuevos planos de fracturamiento relacionados con el nuevo estado de esfuerzo (Figura 2.9).

Figura 2.9

Zonificación del macizo rocoso de acuerdo al desarrollo de diaclasas y variación del fracturamiento



Adaptada de: *Variación de la resistencia del macizo rocoso en un túnel de acuerdo al factor de escala a medida que nos alejamos de los hastiales*. García, R. (2018).

2.2.5. Agua Subterránea

La presencia de agua por infiltración es un efecto negativo en la estabilidad de un macizo rocoso, debido a que la presión de agua disminuye los esfuerzos efectivos produciendo una reducción en la resistencia al corte de las discontinuidades, fallas o diaclasas. El flujo de agua ocurre principalmente a través de las superficies de dichas discontinuidades, pudiendo ocasionar ablandamiento y lavado de los materiales de relleno. Otro efecto de las aguas, descrito por Ramírez y Alejano (2004), es su acción degradante en diversas zonas del macizo, produciendo un deterioro significativo de sus propiedades mecánicas (menor resistencia y mayor deformabilidad). Proceso que puede ser determinante con el tiempo.

La presencia de agua aún sin presión de poros en la roca, puede disminuir la resistencia a la compresión uniaxial de algunos tipos de roca, como lo son las lutitas o las areniscas, pudiendo estas quebrarse o disolver al sumergirse en agua. Existen estudios en los que se demuestra que en los esquistos y gneises (roca metamórfica foliada en bandas, compuesta típicamente de capas alternas de colores claros y oscuros) altamente meteorizados, la variación en la masa de agua disminuye la cohesión y el valor del módulo de deformación.

2.3. Métodos Geotécnicos de Análisis de Túneles

En el siguiente apartado se presenta una recopilación de los principales métodos de análisis de túneles, los cuales se pueden organizar de la siguiente forma:

2.3.1. Empíricos

Se basan en la experiencia y en la observación del comportamiento real de las estructuras. Mediante criterios sencillos, clasifican al subsuelo, definen en forma aproximada las características y necesidades de las estructuras de sostenimiento. Entre los más importantes, Ramírez y Alejano (2004), indican el índice RMR de Bieniawski (1976,1989), el índice Q de Barton (Barton *et al.*,

1974-1994), el cual tiene un alto grado de fiabilidad, ya que está basado en un elevado número de casos que comprenden diversos tamaños de túneles, tipos de excavación, profundidades y calidades de macizos rocosos y, por último, el índice GSI de Hoek-Brown (1997), el cual es totalmente visual, combina los dos aspectos fundamentales del comportamiento de los macizos rocosos: fracturamiento y resistencia al corte de las discontinuidades.

2.3.2. Matemáticos

Se basan en la formulación teórica del comportamiento mecánico del subsuelo, que permite determinar el estado de esfuerzos alrededor de una excavación, y en algunos casos se puede lograr el dimensionamiento estructural de la obra. Estos métodos se dividen en:

- **Analíticos:** se basan en hipótesis muy simplificadas del comportamiento mecánico entre el subsuelo y el sostenimiento, tomando en cuenta las características geométricas y condiciones del contorno. Navarro (2004) explica algunos de estos métodos, como lo son: el de Terzaghi, Panet, Protodyakonov, entre otros.
- **Numéricos:** se basan en modelos matemáticos y superan las restricciones impuestas por los otros métodos, ya que permiten analizar situaciones muy complejas pudiendo seleccionar los modelos constitutivos de los materiales, las condiciones de contorno a modelar y la representación de la resistencia de los contactos entre los bloques. Dentro de este tipo de métodos encontramos algunos como: diferencias finitas, elementos de contorno, elementos discretos y el método de los elementos finitos.

Hoy en día los avances tecnológicos, en especial en el área de la computación, nos permiten desarrollar diferentes técnicas numéricas que posibilitan la solución de grandes sistemas de

ecuaciones diferenciales. Dada la relevancia en este trabajo, a continuación, se desarrollan algunos aspectos conceptuales sobre el método de los elementos finitos.

2.4. Método de los Elementos Finitos

El Método de los Elementos Finitos (MEF) puede entenderse como un procedimiento numérico para resolver problemas planteados mediante ecuaciones diferenciales por medio de aproximaciones discretas, en el cual se divide un medio continuo (dominio) en un conjunto de sub zonas denominadas elementos finitos. Estos elementos están interconectados por una serie de puntos llamados nodos, Goodman (1976) los define como las variables de un grupo de ecuaciones simultáneas que describen las propiedades físicas y geométricas del elemento (matriz de rigidez), al conocer esta última, la relación esfuerzo-desplazamiento queda definida para el elemento en términos de desplazamientos unitarios. De acuerdo con Pereiro (2006), las ecuaciones que rigen el comportamiento del medio continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema con infinitos grados de libertad, que es regido por un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones algebraicas.

Díaz y López (2008) describen las características que rigen el comportamiento de cualquier sistema de ecuaciones diferenciales a analizar como: dominio, condiciones de borde e incógnitas. El dominio representa el espacio geométrico en el cual se analizará el objeto, las condiciones de borde se refieren a las variables conocidas en los extremos del dominio, que condicionan los cambios en el sistema, como lo son: las cargas, temperaturas, confinamientos, potenciales hidráulicos, etc. Por último, las incógnitas son aquellas variables del sistema que se desean conocer, entre ellas pueden estar: deformaciones, desplazamientos, tensiones, fuerzas, etc.

Para analizar situaciones que se aproximan a la compleja realidad de las estructuras geotécnicas Potts y Zdravković (1999) presentan una serie de consideraciones teóricas con respecto a los objetivos y requerimientos del problema. En cualquier problema geotécnico, el ingeniero debe asegurar la estabilidad de todas las estructuras del sistema, se deben estudiar las cargas que serán aplicadas y los posibles movimientos que han de ocurrir. Antes de iniciar el modelado, es importante tener claro el objetivo del proyecto y recolectar la información necesaria como la estratigrafía y propiedades del suelo en el sitio, la ubicación del nivel freático y los datos necesarios para establecer las limitantes del modelado. En general, una solución teórica debe satisfacer cuatro conceptos:

- **Equilibrio:** es la relación entre los esfuerzos externos y las reacciones internas para satisfacer que la sumatoria de esfuerzos en las dimensiones de estudio sea cero.
- **Compatibilidad:** es la relación entre las deformaciones y los desplazamientos nodales. Al introducir esta relación en las ecuaciones del modelo constitutivo relacionamos las fuerzas en los extremos con los desplazamientos nodales.
- **Modelo constitutivo:** es el comportamiento esfuerzo vs deformación del suelo o roca descrito de forma matricial.
- **Condiciones de borde:** son las condiciones impuestas al modelo que se deben satisfacer a lo largo del análisis.

La resolución de este sistema de ecuaciones nos permite obtener el valor de las incógnitas: esfuerzos, deformaciones y desplazamientos.

Para poder aplicar los conceptos antes mencionados a un problema en la realidad, se deben hacer ciertas suposiciones e idealizaciones. Lees (2016) comenta que es necesario especificar el

2.5. Resumen del Programa PLAXIS 2D

PLAXIS 2D CE V20 es un programa de elementos finitos bidimensional, diseñado para el análisis de deformaciones, estabilidad y flujo de agua subterráneo en problemas geotécnicos (Brinkgreve *et al.*, 2019a).

El programa se divide en dos. El subprograma *Input* es el preprocesador, utilizado para definir la geometría del problema, condiciones de borde, la malla de elementos finitos y las fases de cálculo. El subprograma *Output* es el post procesador, en donde se inspeccionan los resultados de los cálculos realizados.

2.5.1. Subprograma *Input*

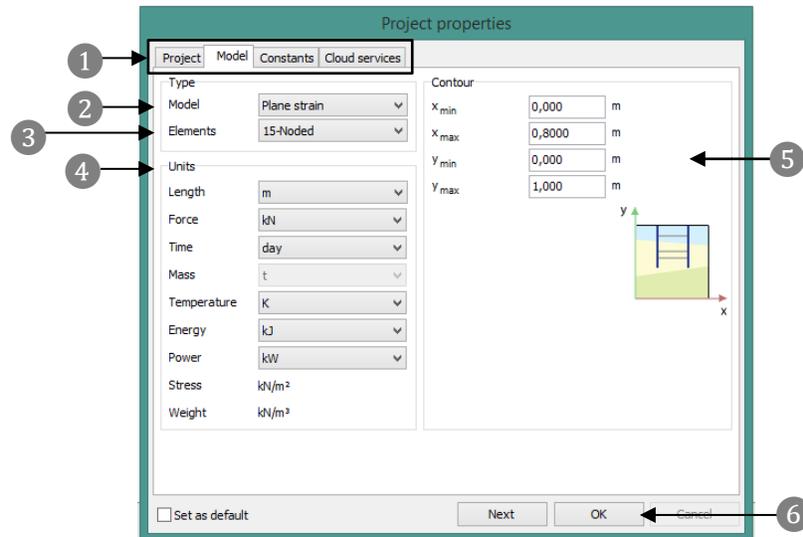
Para poder llevar a cabo un análisis de elementos finitos en el programa PLAXIS 2D es fundamental separarlo en seis pasos:

1. Configuración general del proyecto.
2. Creación de la geometría del problema.
3. Establecer las condiciones de borde.
4. Creación y asignación de los materiales.
5. Generar la malla de elementos finitos.
6. Definir las condiciones iniciales del problema y las fases de construcción.

Al iniciar el subprograma *Input* se despliega la ventana *Project properties* (Propiedades del proyecto) (Figura 2.10).

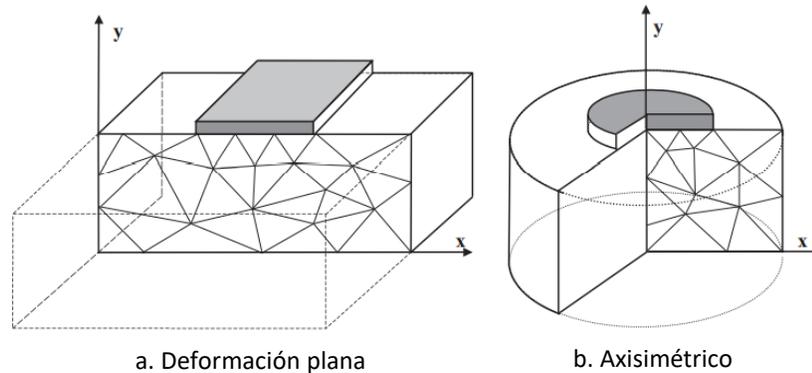
Figura 2.10

Propiedades del proyecto



El primer paso es la configuración general del proyecto manejado en las pestañas de la ventana ①, en donde se define el nombre y propiedades como: tipo de modelo ②, tipo de elementos ③, unidades ④ y límites geométricos ⑤.

Los modelos ② (Figura 2.10) son dos, el primero *Plane strain* (Deformación plana), es utilizado para geometrías con una sección más o menos uniforme, con correspondientes estados de esfuerzos y esquemas de carga en una cierta longitud perpendicular a la sección transversal. El segundo tipo de modelo, *Axisymmetric* (Axisimétrico), se utiliza para representar estructuras circulares con una sección radial uniforme y un esquema de carga alrededor del eje central, donde las deformaciones y esfuerzos se asumen idénticos en cualquier dirección radial (Figura 2.11).

Figura 2.11*Ejemplos del tipo de modelo*

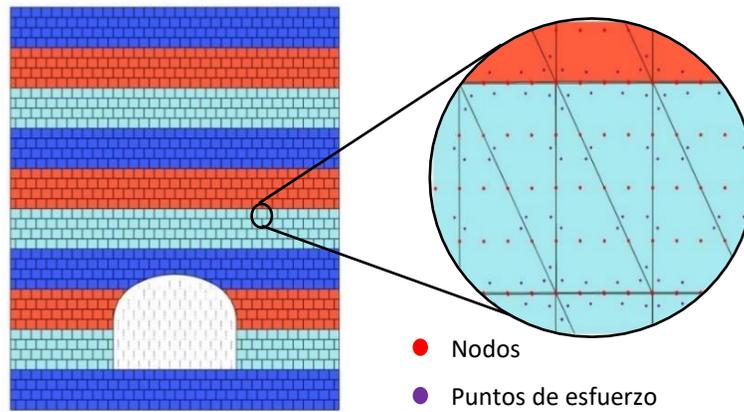
Tomado de: *Example of a plane strain (left) and axisymmetric problem (right)*, PLAXIS 2D Reference Manual CONNECT Edition V20, Brinkgreve *et al.* (2019b).

El tipo de elemento ③ (Figura 2.10) de la malla se separa de forma triangular en 6 o 15 nodos. El primero proporciona una interpolación de segundo orden para los desplazamientos y una integración numérica que involucra tres puntos de esfuerzo o puntos de Gauss, puntos óptimos para la evaluación de tensiones y deformaciones (o cualquier otra variable a despejar). El segundo, es el elemento predeterminado por el programa y proporciona una interpolación del cuarto orden para los desplazamientos y la integración numérica e involucra 12 puntos de Gauss (Figura 2.12).

Las unidades ④ (Figura 2.10) predeterminadas son: m (metros) para longitud, kN (kilonewton) para fuerza, días para tiempo, K (kelvin) para la temperatura, kJ (kilojule) para energía, kW (kilowatt) para la potencia y t (tonelada) para la masa. Todos los valores de entrada deben ser dados de forma consistente. Se deben asignar los límites geométricos ⑤ del modelo indicando bordes máximos y mínimos tanto en X como en Y.

Figura 2.12

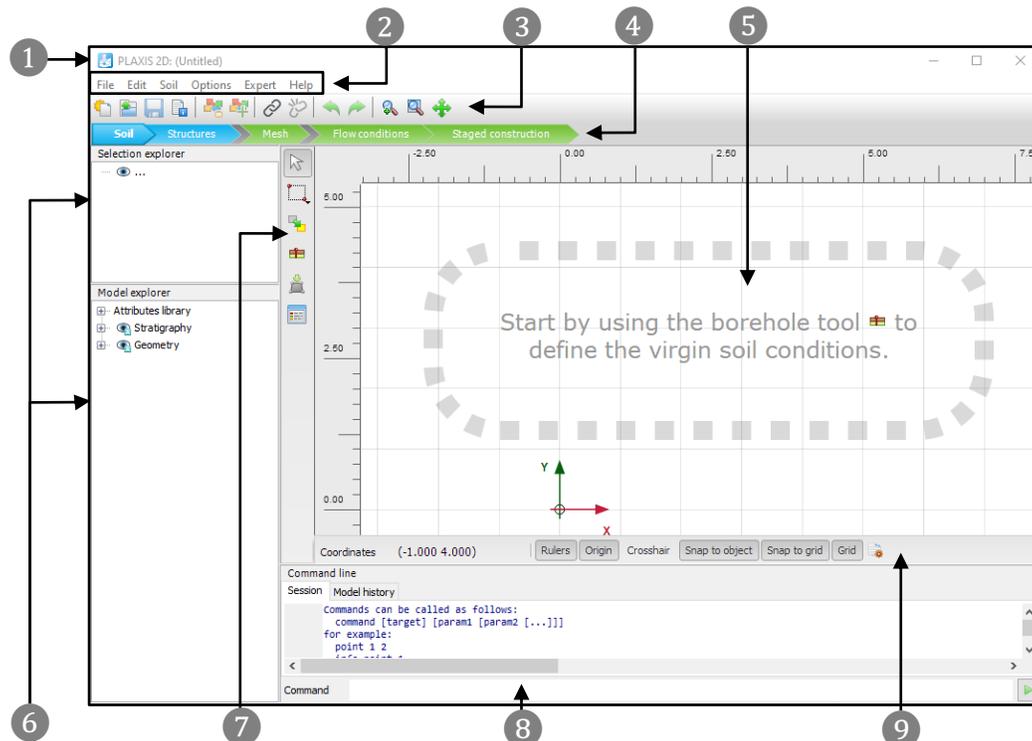
Posición de los nodos y puntos de esfuerzo en los elementos de la malla



Se finaliza la configuración general del proyecto seleccionando **OK** 6 (Figura 2.10), automáticamente se entra en la ventana general de *Input* (Figura 2.13) comprendida por:

Figura 2.13

Configuración del subprograma Input



- ① **Título de proyecto:** nombre del programa y del proyecto son mostrados
- ② **Barra de menú:** contiene menús desplegables abarcando las opciones disponibles en el subprograma *Input*.
- ③ **Herramientas generales:** contiene botones para acciones generales como el manejo del archivo y tipos de visualización.
- ④ **Modos:** son pestañas utilizadas para separar diferentes etapas del modelado.
- ⑤ **Área de dibujo:** zona donde se crea y modifica la geometría del modelo.
- ⑥ **Exploradores:** contienen información acerca del proyecto, la disponibilidad y funcionalidad y dependen del modo que se encuentre activo.
- ⑦ **Herramientas del modo:** botones disponibles en el modo activo.
- ⑧ **Línea de comando:** para escribir comandos y realizar acciones por medio del teclado.
- ⑨ **Barra de estatus:** muestra información acerca de la ubicación del cursor en el área de dibujo. Permite activar: reglas, origen y cuadrícula.

Esta configuración está presente a lo largo del modelado. Las herramientas del modo ⑦ varían dependiendo del modo que se encuentra activo. La barra de modos ④ está conformada por 5 pestañas, las azules corresponden a los modos de geometría, donde se realizan los pasos 2, 3 y 4 del modelado. Mientras que los pasos 5 y 6 se realizan en las pestañas verdes llamadas modos de cálculo (Figura 2.13).

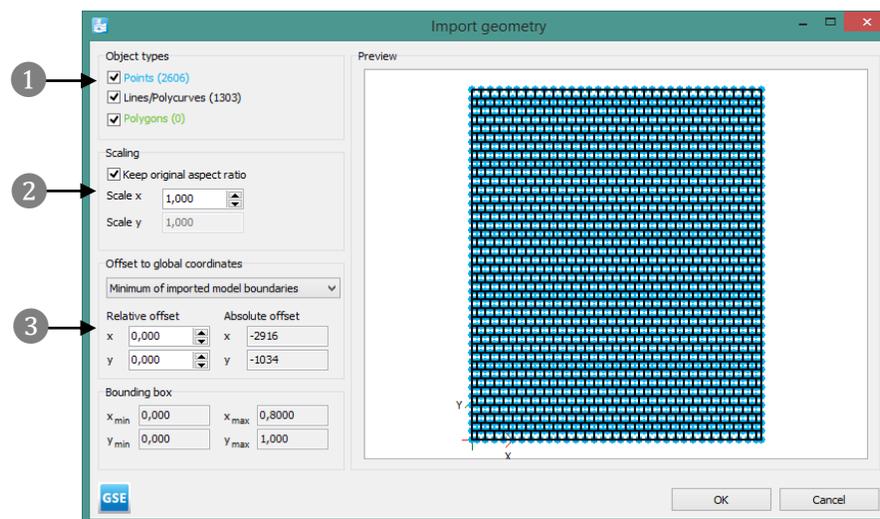
2.5.1.1. Modos de Geometría

Soil (Suelo): en este modo se empieza el segundo paso, definir la geometría del modelo, creando la estratigrafía de las capas de suelo o roca. Las herramientas del modo ⑦ (Figura 2.13) permiten asistir en el dibujo y crear la estratigrafía del proyecto, ya sea mediante la herramienta

🏠 “Crear perforación”, en donde se proporciona la información sobre profundidad y espesor de las capas, o con la herramienta 🖨️ “Importar suelo”. Importar una geometría creada previamente en una fuente externa al programa PLAXIS 2D debe tomar en cuenta el formato del archivo aceptado por el programa. Después de seleccionar el archivo se abre la ventana *Import geometry* (Importar geometría) (Figura 2.14).

Figura 2.14

Ventana Importar geometría



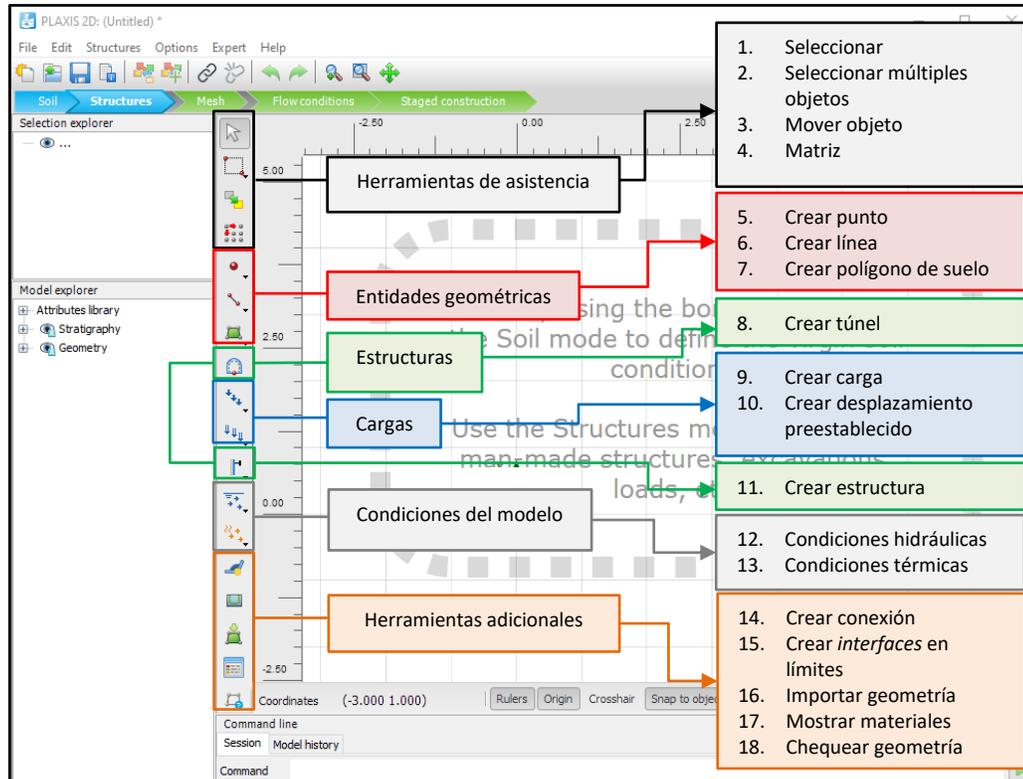
Aquí se seleccionan los tipos de objetos ① (puntos, líneas y polígonos) a importar. En caso de ser necesario escalar la geometría ②, se asigna un factor en “X” o “Y”. Finalmente, se establecen las coordenadas del punto de inserción ③. Una vez definida la geometría del suelo se puede pasar al siguiente modo.

Structures (Estructuras): en este modo se termina el paso dos del modelado, definir las entidades geométricas de los elementos estructurales. A su vez se realiza el paso tres, la asignación de las condiciones de borde del proyecto. Solo en este modo pueden ser creados elementos como

las *interfaces*, túneles, revestimientos, placas, cargas, entre otros. Las herramientas del modo se pueden dividir en seis grupos (Figura 2.15).

Figura 2.15

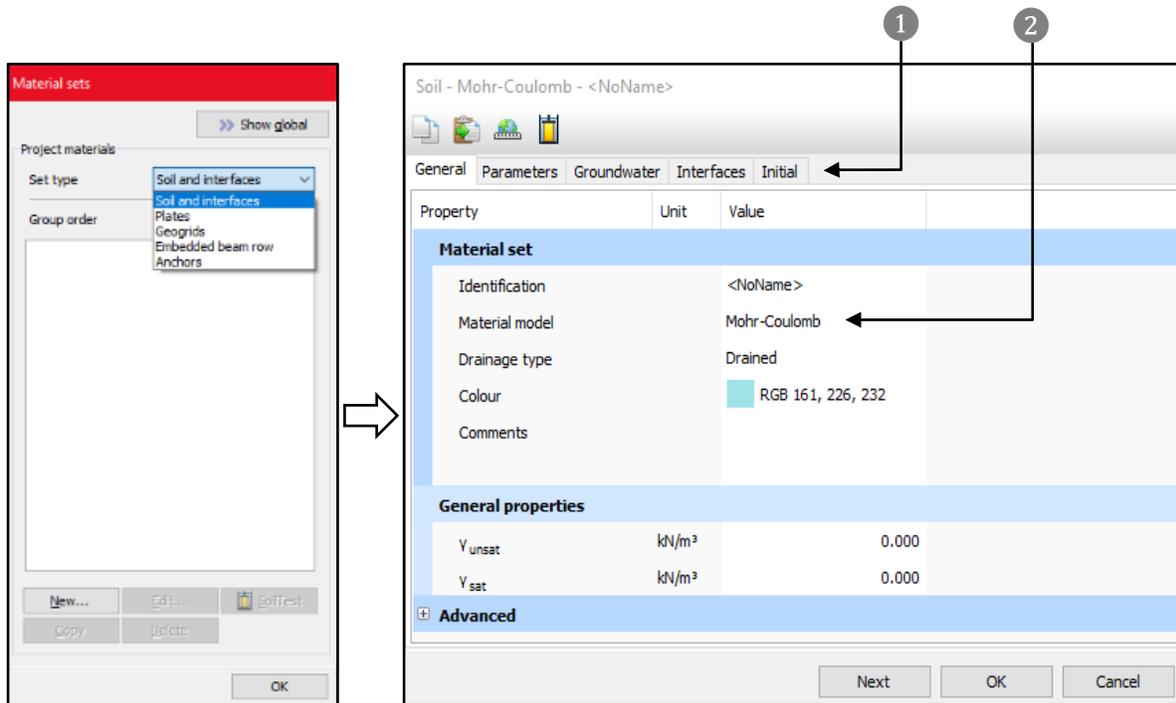
Configuración del modo estructuras



- **Herramientas de asistencia:** utilizadas para modificar la geometría cambiando de posición los objetos en el modelo.
- **Entidades geométricas:** son los componentes básicos del modelo, tales como puntos, líneas y polígonos. Estos pueden ser creados con características especiales en las opciones del menú que se despliega al seleccionarlo.

- **Estructuras:** con este grupo se crean estructuras como túneles, anclajes, revestimientos y otras, con las herramientas 8 y 11 (Figura 2.15). Ambas tienen diferentes opciones dentro de su propio menú desplegable.
- **Cargas:** con las herramientas 9 y 10 se asignan cargas o desplazamientos a las entidades geométricas ya creadas.
- **Condiciones del modelo:** con estas herramientas se asignan al modelo condiciones hidráulicas y térmicas
- **Herramientas adicionales:** aquí se muestran herramientas explicadas anteriormente con excepción de la 13,14 y 17 (Figura 2.15). La primera sirve para crear una conexión rígida entre dos estructuras, la segunda para crear *interfaces* en los límites geométricos del modelo y, la última, para revisar inconsistencias en la geometría.

Una vez definida la geometría y las condiciones de borde, el cuarto paso es la creación y asignación de las propiedades del suelo y los materiales de las estructuras. Estos se guardan en una base de datos que se activa con la herramienta  “Mostrar materiales”, los cuales se agrupan en 4 categorías: suelo e *interfaces*, placas, geomallas, “vigas incrustadas” y anclajes (Figura 2.16 a).

Figura 2.16*Creación y asignación de propiedades del material*

a. Base de datos de materiales

b. Propiedades del material

Las propiedades del material se separan en cinco pestañas ① (Figura 2.16 b):

- **General:** contiene la identificación del material, el tipo de modelo constitutivo, condiciones de drenaje y las propiedades generales del material como el peso específico.
- **Parámetros:** contiene los parámetros de rigidez y resistencia del modelo constitutivo seleccionado.
- **Agua subterránea:** son los parámetros requeridos para modelar el flujo de agua.

- **Interfaces:** se asignan los valores que simulan el contacto entre suelos, rocas y estructuras. Pueden ser utilizadas para representar, por ejemplo, la resistencia al corte en la delgada zona de contacto entre discontinuidades.
- **Inicial:** se ocupa de los parámetros que generan los estados de esfuerzos iniciales.

El suelo y la roca tienden a comportarse de manera no lineal ante la aplicación de una carga. PLAXIS 2D soporta diferentes modelos constitutivos de materiales ② (Figura 2.16 b) para simular el comportamiento del suelo o roca, que son alimentados con parámetros representativos de la caracterización físico-mecánica del material, el cual puede ser modelado con varios niveles de sofisticación y claramente el número de parámetros incrementa con esto último. Un resumen de algunos modelos disponibles según Brinkgreve *et al.* (2019c) se da a continuación:

Elástico lineal: este modelo representa la ley de Hooke de la elasticidad lineal isotrópica. Los parámetros requeridos son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, este modelo no se recomienda para modelar suelos, pero sí para representar estructuras de concreto.

Mohr-Coulomb: es un modelo con comportamiento de plasticidad perfecta y es utilizado como una primera aproximación al comportamiento del suelo, en general, está basado en la ley de Hooke hasta la parte plástica, la cual después sigue el contorno de rotura de Mohr-Coulomb. Requiere de cinco parámetros en total, los cuales son familiares para los ingenieros geotécnicos y que pueden ser obtenidos a través de ensayos básicos de laboratorio.

Hardening Soil: es un modelo avanzado para simular el comportamiento del suelo. Es un tipo de modelo elastoplástico hiperbólico, formulado en el marco del endurecimiento plástico por corte.

Soft Soil: este tipo de modelo es utilizado para reproducir el comportamiento de suelos blandos como arcillas y turbas, el modelo se desempeña mejor en situaciones de compresión primaria.

Jointed Rock: se caracteriza por representar el comportamiento anisotrópico de la roca estratificada o fracturada.

Modified Cam-Clay: es un modelo de estado crítico el cual puede ser utilizado para simular el comportamiento de suelos blandos normalmente consolidados, el modelo asume una relación logarítmica entre la relación de vacíos y el esfuerzo efectivo promedio.

Hoek-Brown: es un modelo elástico perfectamente plástico muy conocido, utilizado para simular el comportamiento isotrópico de una roca. La tensión y falla por corte están descritas por una curva de fuerza no lineal.

En principio, todos los modelos representan la respuesta efectiva del suelo o la roca, pero sabemos que una variable importante es la presencia de agua en los poros, por lo que en PLAXIS existen diferentes formas de incorporar la interacción del agua con el suelo:

- **Drenado:** esta configuración garantiza que no se generen presiones de poro, es utilizado para simular suelos secos o de alta permeabilidad (arenas).
- **No drenado A:** comportamiento del suelo no drenado a breve periodo de tiempo donde las características del suelo están en función de tensiones efectivas.
- **No drenado B:** comportamiento de suelo no drenado a breve periodo de tiempo donde el parámetro de resistencia está definido como la resistencia al corte no drenado.
- **No Drenado C:** comportamiento no drenado con parámetros de rigidez y resistencia analizados como no drenados. Las presiones de poros no están explícitamente calculadas, pero son incluidos en las tensiones efectivas.

- **No poroso:** comportamiento que no considera las presiones de poros.

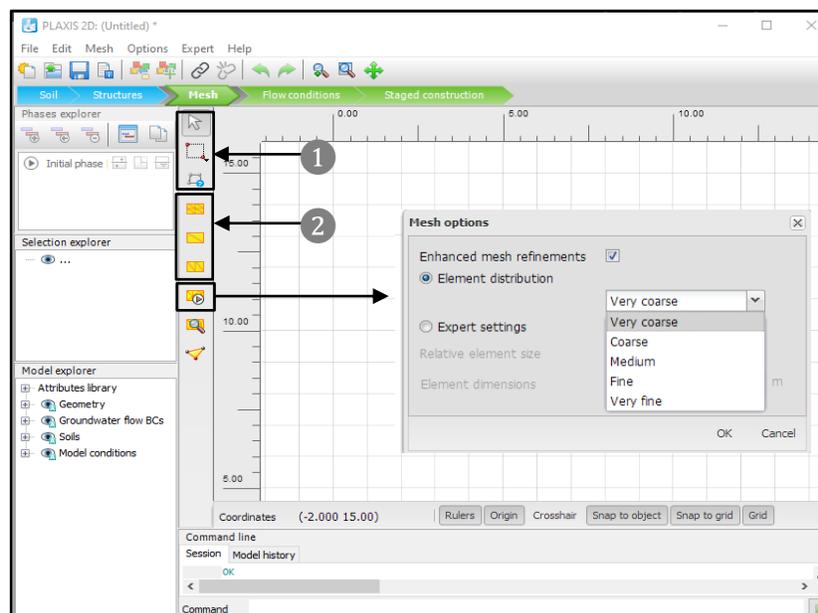
Una vez finalizada la asignación de los materiales, se continúa al paso cinco y seis, ambos realizados en los modos de cálculo.

2.5.1.2. Modos de Cálculo

Mesh (Malla): en este modo, se divide la geometría ya definitiva en elementos finitos para poder realizar los cálculos. A su vez, el término malla se refiere a una composición de elementos finitos. La generación de la malla en PLAXIS es completamente automática y toma en consideración los datos introducidos en los modos anteriores (estratigrafía, estructuras, cargas y condiciones de bordes). La configuración de este modo (Figura 2.17) está compuesta por:

Figura 2.17

Configuración del modo malla



Las herramientas de asistencia ① (Figura 2.17) permiten modificar la geometría del modelo al cambiar la ubicación de los objetos. Una vez definida completamente la geometría, se crea la malla con la herramienta  “Generar malla”, se despliega la ventana *Mesh options* (Opciones de malla) (Figura 2.17) donde se definen las propiedades de la misma. Esta debería ser lo suficientemente fina para obtener resultados precisos, pero no es aconsejable refinarla en exceso ya que lleva a un elevado tiempo de cálculo. En las áreas del modelo donde se espere una mayor concentración de esfuerzos es aconsejable tener una malla más fina, en cambio en zonas alejadas de elementos estructurales se puede engrosar, cuando ocurre esta situación se utilizan las herramientas de refinación local de la malla ② (Figura 2.17).

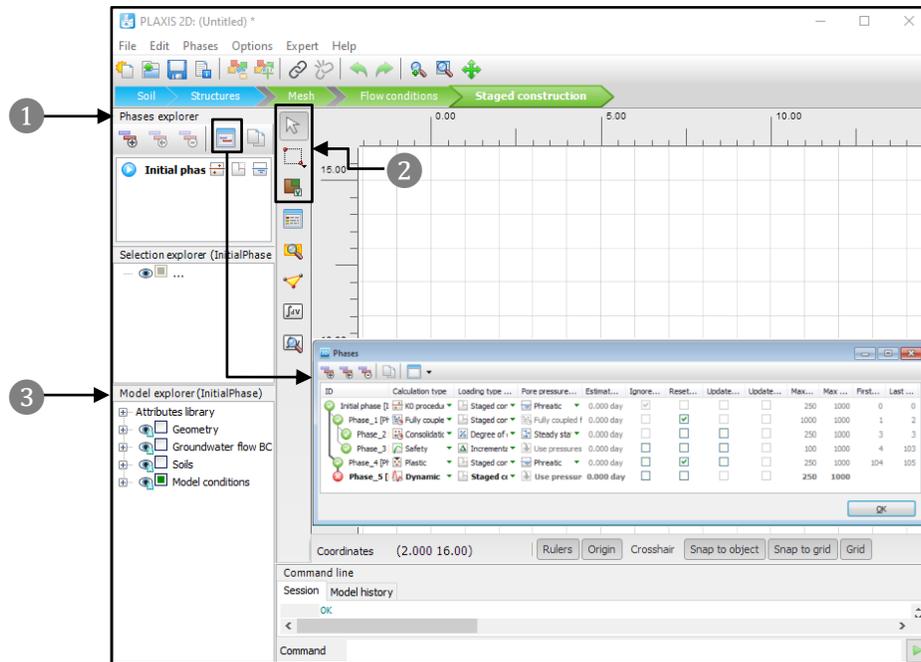
Para visualizar la malla generada y verificar que todo esté en orden, se utiliza la herramienta  “Ver malla” (Figura 2.17). Previo al cálculo, se pueden seleccionar nodos o puntos de esfuerzo, haciendo uso de la herramienta  “Seleccionar nodos”, para realizar gráficos con información relevante de las fuerzas, desplazamientos, tensiones y otros valores que se obtengan una vez realizado el cálculo.

En la práctica, los proyectos de ingeniería están divididos en fases. Similarmente, el proceso de cálculo en el programa también lo está. Una vez generada la malla estos procesos se pueden definir en los últimos dos modos (Condiciones de flujo o Fases de construcción).

Staged construction (Fases de construcción): en este modo se realiza el último paso. Se deben asignar las condiciones iniciales del problema, en donde se especifican las presiones iniciales y los esfuerzos efectivos. De igual manera se definen las fases de construcción del proyecto. La configuración de este modo se presenta a continuación (Figura 2.18):

Figura 2.18

Configuración del modo de fases de construcción



La primera fase por defecto, es la fase inicial. Esta se encarga del cálculo de los estados de esfuerzo iniciales por medio del método gravitacional o K0. Luego, en el explorador de fases ① (Figura 2.18), los cálculos pueden dividirse en fases secuenciales en las que cada una corresponde a una carga particular o paso en el proceso de construcción. Para agregar una fase se utiliza la herramienta  “Agregar fase” y sus condiciones (tipo de cálculo, tipo de carga, presiones de poros, etc.) se definen en la herramienta  “Editar fase”, esto abre la ventana *Phases* (Figura 2.18).

Con ayuda de las herramientas de selección ② o en el explorador del modelo ③ (Figura 2.18), se activan y desactivan los diferentes componentes (materiales, estructuras, *interfaces*, condiciones de borde, etc.) en la respectiva fase, una vez completadas todas las fases de construcción pueden ser revisadas antes de realizar el cálculo con la herramienta

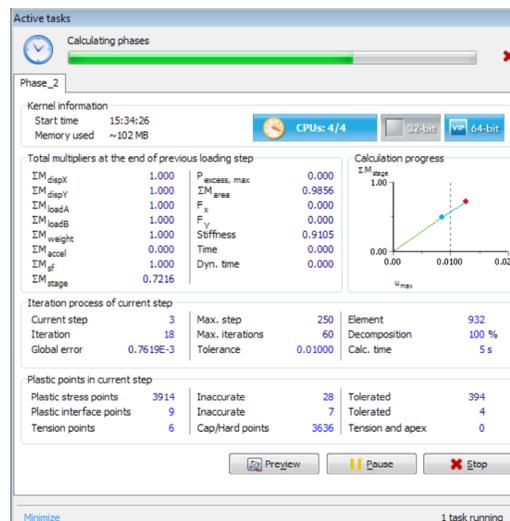
 “Previsualizar fase”. Luego de que el proyecto haya sido revisado y se hayan seleccionado los nodos para los gráficos, se puede ejecutar el proceso de cálculo con la herramienta  “Calcular” (Figura 2.18). Como resultado el programa hace una revisión del orden y consistencia del proyecto. Antes y después del cálculo, se puede visualizar en el explorador de fases el estatus de cada una de ellas y obtener información relevante al proceso, indicado con los siguientes símbolos:

-  La fase esta lista para el cálculo.
-  La fase no será calculada.
-  La fase fue calculada. No hubo error durante el proceso.
-  La fase fue calculada pero una suposición fue hecha permitiendo seguir el cálculo.
-  El cálculo falló.
-  El cálculo falló, pero el cálculo de sub fases todavía es posible.

Durante el análisis del modelo la información relevante del proceso de cálculo se muestra en la ventana *Active tasks* (Tareas activas) (Figura 2.19). Aquí se ve el estatus sobre el tiempo de cálculo transcurrido, memoria utilizada, el proceso de iteración, entre otros.

Figura 2.19

Ventana Tareas activas



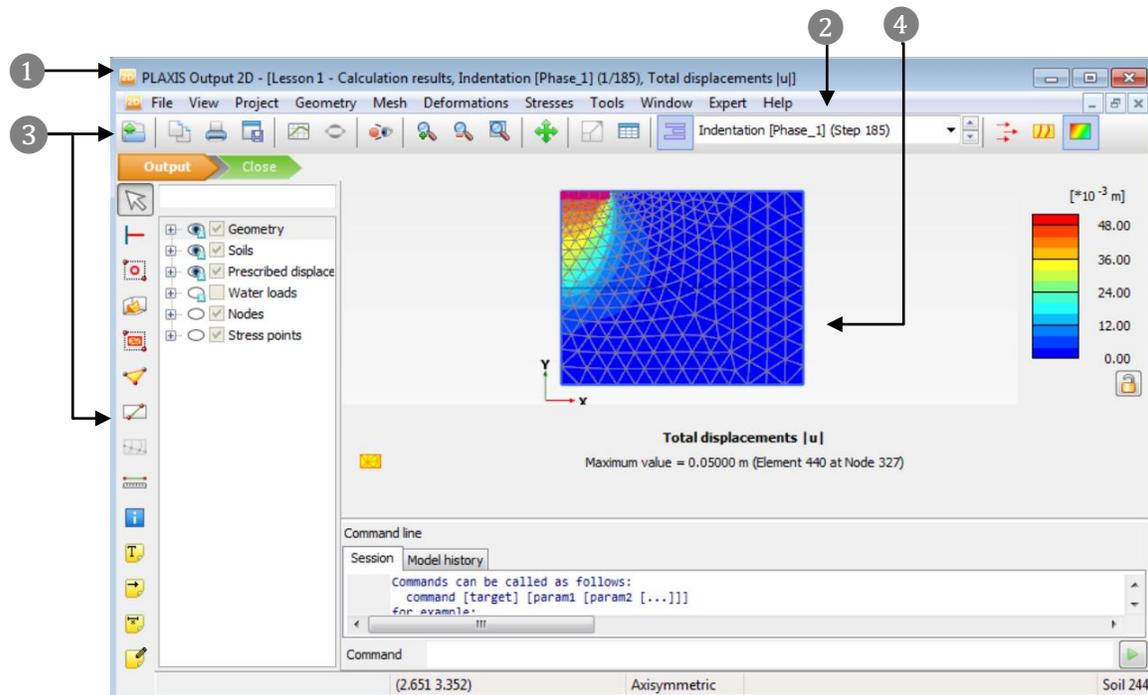
Una vez finalizado el proceso de cálculo y que todas las fases hayan sido calculadas exitosamente, se da inicio al subprograma *Output* con la herramienta  “Ver resultados” (Figura 2.18).

2.5.2. Subprograma *Output*

Los resultados primarios del análisis de elementos finitos son los desplazamientos y esfuerzos obtenidos en cada etapa de construcción. Adicionalmente, cuando el modelo involucra elementos estructurales, se calculan las fuerzas resultantes de estos. La configuración de este subprograma (Figura 2.20) es similar a la del anterior, principalmente está compuesta por:

Figura 2.20

Configuración del subprograma Output



- ① **Título:** muestra el nombre del proyecto, fase de cálculo y el tipo de información/resultado.
- ② **Barra de menú:** se navega entre los menús desplegables que permiten obtener información de la fase de cálculo (deformaciones, esfuerzos, etc).
- ③ **Herramientas:** contiene las acciones generales para el manejo del archivo, modos de visualización y herramientas para la medición.
- ④ **Área de ploteado:** zona donde se muestran los resultados del cálculo, de forma gráfica o tabulada.

Este subprograma tiene una amplia gama de presentación de resultados, en los cuales se puede visualizar la malla deformada o los desplazamientos ocurridos, se pueden escalar las deformaciones del modelo, visualizar secciones transversales y la acciones de los desplazamientos y esfuerzos. Si se quiere saber el resultado de estos últimos en cualquier punto del modelo, solo se debe conocer el número del nodo asignado por el programa.

De esta manera quedan descritas las herramientas básicas y los pasos a seguir para el modelado de cualquier análisis geotécnico, en el programa PLAXIS 2D.

CAPÍTULO III- MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de Investigación.

Sampieri *et al.* (2014) indican que un estudio correlacional tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto en particular, su utilidad principal, es saber cómo se puede comportar un concepto o una variable al conocer el comportamiento de otras variables vinculadas.

Por otra parte, Echegoyen J. (2019) menciona que el método hipotético-deductivo es el procedimiento o camino que sigue el investigador para hacer de su actividad una práctica científica. Este, tiene varios pasos esenciales: observación del fenómeno a estudiar, creación de una hipótesis para explicar dicho fenómeno, deducción de consecuencias o proposiciones más elementales que la propia hipótesis, y verificación o comprobación de la verdad de los enunciados deducidos comparándolos con la experiencia. Este método obliga al científico a combinar la reflexión racional (la formación de hipótesis y la deducción) con la observación de la realidad (la observación y la verificación).

Con base en los objetivos del trabajo de grado y lo expuesto en los párrafos anteriores, este trabajo se define como un estudio correlacional con una metodología de modelado numérico hipotético-deductivo.

3.2. Diseño de la Investigación

El término diseño, se refiere al plan o la metodología a seguir para obtener la información que se desea, con el fin de responder al planteamiento del problema (Sampieri *et al.*, 2014).

Este trabajo de grado consta de las siguientes fases:

1. Estudio y revisión de bibliografía y antecedentes.
2. Estudio y manejo del programa PLAXIS 2D.
3. Realización de un modelo físico.
4. Proceso de ajustes de modelos numéricos por aproximaciones sucesivas.
5. Realización de modelos numéricos finales.
6. Análisis de los resultados obtenidos.

La primera fase, se encuentra ampliamente explicada en el capítulo dos. La segunda fase consistió en la lectura de manuales, videos y finalmente la realización de prácticas utilizando los tutoriales del programa (Brinkgreve *et al.*, 2019d). La fase de realización de un modelo físico y el diseño de los modelos numéricos se explica en el presente capítulo.

3.3. Modelo Físico

Para profundizar los conocimientos adquiridos durante el proceso de revisión bibliográfica y visualizar por experiencia propia los procesos de deformación, se realizó un modelo físico basado en los modelos estudiados en 1988. Se utilizaron cuadros de cerámica de 2,5 x 2,5 cm colocados encima de una tela y dentro de un marco de madera de 1,0 x 1,2 m. La tela, al ser halada lentamente, simulaba el efecto de la gravedad y, a su vez, proporcionaba la fricción a los elementos del modelo, mientras que el marco restringía el movimiento de las piezas en el perímetro, principalmente en la parte inferior.

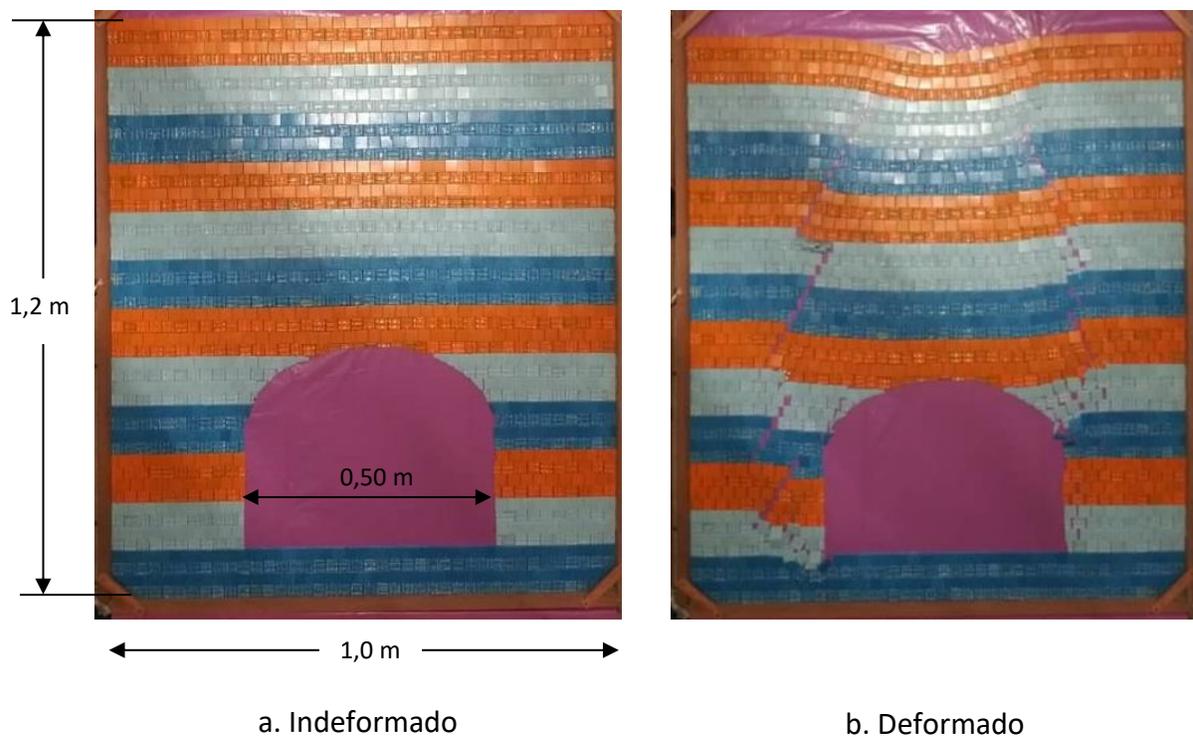
Tal y como se hizo en el modelo físico de 1988, los planos de estratificación fueron representados colocando los cuadros de cerámica uno al lado del otro en el sentido horizontal, obteniendo discontinuidades principales de gran desarrollo. El sistema principal de diaclasas, fue

representado colocando los cuadros de cerámica desfasados entre ellos, de forma que perpendicular a los planos, el desarrollo longitudinal de las mismas estuviese limitado por el ancho de los cuadros.

Las dimensiones del túnel se determinaron a partir de la relación D/d , realizando una plantilla y una vez colocadas las cerámicas dentro del marco de madera, se marcó el borde del túnel. Las piezas que forman parte del borde se limaron para dar la forma final de la abertura. Se utilizó una relación $D/d = 20$, siendo $D = 50$ cm, la altura del túnel $h = 40$ cm y $d = 2,5$ cm

Figura 3.1

Modelo físico 2021 con planos de estratificación horizontal



3.4. Descripción de los Modelos Numéricos

Los modelos de elementos finitos en dos dimensiones nos permiten analizar desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo, los procesos de deformación y rotura que ocurren una vez realizada la excavación en un macizo rocoso. Estos procesos, como se mencionó en el capítulo dos, dependerán de la posición de los sistemas principales de discontinuidades (planos de estratificación y diaclasas). Los modelos realizados en el programa PLAXIS 2D buscan representar el comportamiento de los modelos físicos del trabajo de grado de 1988. Uno de ellos simula capas de estratificación horizontales y el resto simulan capas de estratificación con una inclinación respecto a la horizontal de 30, 45 y 60 grados. La fuerza actuante en los modelos corresponde a la gravedad.

3.5. Diseño de los Modelos Numéricos

Al utilizar en el programa las dimensiones de los modelos físicos de 1988, la cantidad de entidades geométricas no permitía la creación de la geometría. Las dimensiones de la geometría de los modelos numéricos (Tabla 3.1) son el resultado de un proceso de aproximaciones sucesivas.

Tabla 3.1

Dimensiones de modelos numéricos

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Ancho	a	0,80	m
Alto	h	1,00	m
Diámetro abertura	D	0,30	m
Tamaño del bloque	d	0,025	m
Relación D/d		12	

Este proceso, envolvió los seis pasos del modelado numérico, presentados en el capítulo anterior, en los que, con cada corrida del modelo, se ajustaron los valores que permitieron determinar las dimensiones del modelo con relación al tamaño de los bloques y la abertura del túnel, para representar lo ocurrido en los modelos físicos, aunque no sea con una escala exacta. De igual manera, permitió identificar los parámetros que caracterizan los materiales (roca y estructuras de soporte), haciendo que el modelo por elementos finitos tuviese un comportamiento similar a uno de elementos discretos, de manera que los bloques tendieran a comportarse de forma individual. Este ajuste contribuyó a que en el programa se redujera de forma considerable la cantidad de entidades geométricas generadas.

La relación D/d en los modelos físicos utilizados para hacer la comparación es de 25, mientras que en los modelos numéricos dicha relación fue de 12, lo cual lo asemeja a un macizo rocoso con menor fracturamiento y mayor resistencia.

A continuación, se presenta la construcción de los modelos en PLAXIS 2D, en función de los pasos expuestos en el capítulo anterior, detallando los procesos implicados dentro del programa para su realización.

3.6. Modelado en PLAXIS 2D

3.6.1. Propiedades del Proyecto

El primer paso para iniciar cada modelo, fue la asignación de las propiedades del proyecto. Como la geometría de los modelos realizados tiene una sección uniforme, y además se asumen similares los estados de esfuerzo y esquemas de carga en una cierta longitud perpendicular a la sección transversal, el tipo de modelo utilizado fue el de deformación plana, con elementos de la malla de 15 nodos. El resto de las propiedades se presentan a continuación (Tabla 3.2).

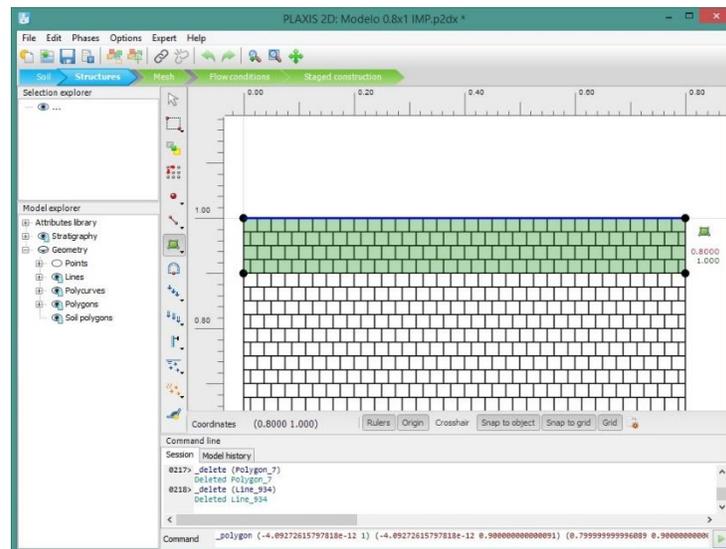
Tabla 3.2*Propiedades generales del proyecto*

Parámetro	Símbolo	Valor
Modelo		Deformación plana
Elementos		15-nodos
Unidades		Predeterminadas
Contorno	x_{\min}	0,00 m
	x_{\max}	0,80 m
	y_{\min}	0,00 m
	y_{\max}	1,00 m

3.6.2. Geometría de los Modelos

Previamente en el programa AutoCAD se dibujó la geometría de los macizos horizontal e inclinados a 30°, 45° y 60°. De esta manera se evitó el duplicado de líneas y la ubicación de puntos muy cercanos entre sí en el dibujo, ya que traen problemas a la hora de generar la malla de elementos finitos en el programa. Se definió el formato del archivo en “.dxf”, de manera que el programa PLAXIS 2D lo reconociera. Es importante resaltar que solo se dibujó el macizo rocoso (planos de estratificación conformados por bloques) sin incluir el contorno del túnel.

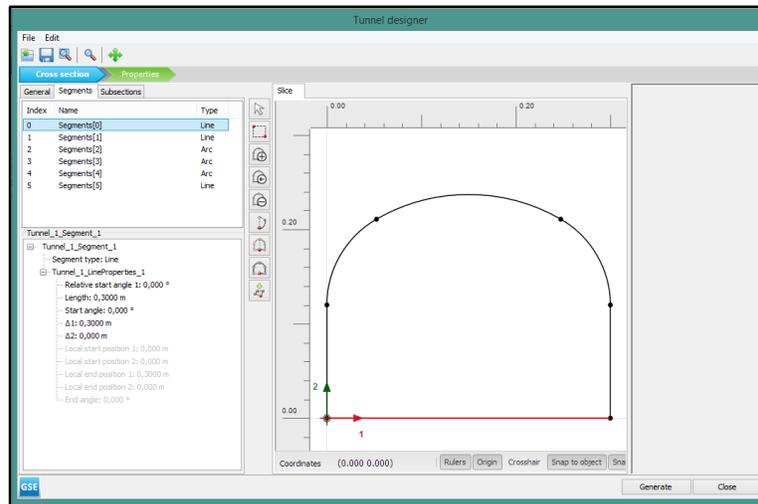
Una vez definidas las propiedades del proyecto, el siguiente paso fue importar la geometría de cada uno de los modelos, para esto se utilizó la herramienta  “Importar suelo” en el modo Suelo. Posteriormente, se pasó al modo Estructuras, en donde se agruparon planos de estratificación (en grupos de cuatro filas de bloques) para visualizar mejor las deformaciones. Esto se realizó con la herramienta  “Crear polígono de suelo” (Figura 3.2) marcando los puntos correspondientes en el área de dibujo.

Figura 3.2*Polígonos de suelo*

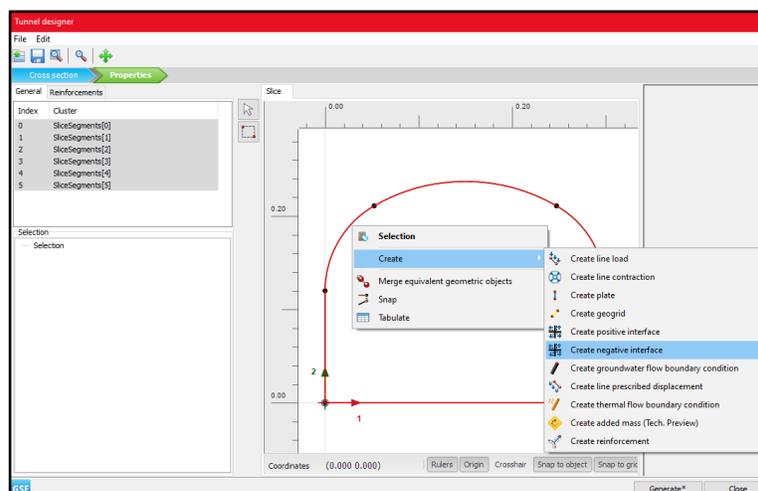
Para finalizar la construcción de la geometría de los modelos, se creó el túnel y las *interfaces* entre los contactos de los bloques de roca. Lo primero, se hizo con la herramienta  “Crear túnel” (Figura 3.2), al seleccionar en el área de dibujo la ubicación del túnel, se desplegó la ventana *Tunnel designer* (Diseñador de túneles) (Figura 3.3), en la cual existen dos pestañas principales. En la primera, *Cross section* (Sección transversal), se definió la geometría de la sección transversal del túnel (Tabla 3.3) por segmentos en la subpestaña *Segments*.

Tabla 3.3*Dimensiones de segmentos del túnel*

Segmento	Tipo	Ángulo inicio	Longitud/ Radio	Ángulo del segmento
0	Línea	0°	0,30 m	-
1	Línea	90°	0,12 m	-
2	Arco	90°	0,105 m	60°
3	Arco	150°	0,195 m	60°
4	Arco	210°	0,105 m	60°
5	Línea	270°	0,12 m	-

Figura 3.3*Ventana Diseñador de túneles*

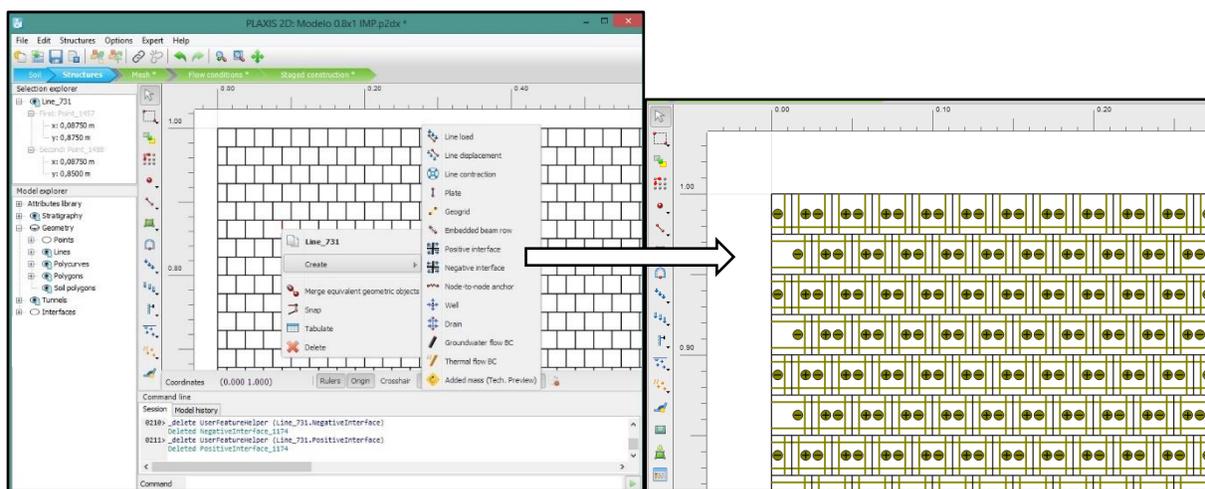
En la segunda pestaña, *Properties*, se seleccionaron los segmentos del túnel y se crearon las *interfaces* negativas con la herramienta  “Crear *interface* negativa” (Figura 3.4). Se finalizó la construcción del túnel con el botón *Generate* (Generar).

Figura 3.4*Interfaces negativas del túnel*

Para la creación de las *interfaces* en los contactos de los bloques, se seleccionaron todas las líneas presentes en el modelo (excepto las líneas del contorno de la geometría), con la herramienta  “Seleccionar múltiples objetos”. Una vez seleccionadas, con la herramienta  “Crear *interface*” (Figura 3.5 a) se crearon las positivas y negativas, las cuales son las *interfaces* de cada lado de la línea de contacto entre los bloques (Figura 3.5 b), con el objetivo de controlar la interacción entre ellos.

Figura 3.5

Interfaces entre bloques del macizo



a. Creación de *interfaces*

b. *Interfaces* entre bloques del macizo

3.6.3. Condiciones de Borde

En estos modelos, el tercer paso respecto a la definición de las condiciones de borde solo corresponde a la asignación de cargas. Esto se realizó indirectamente, debido a que la única fuerza actuante sobre los modelos es la fuerza de gravedad, que en el programa ya se encuentra predeterminada. Las restricciones generales del contorno se asignaron en el modo Fases de construcción (3.6.6).

3.6.4. Creación y Asignación de Materiales

Una vez finalizada la geometría total de los modelos, se inició el cuarto paso. Se crearon tres materiales iguales, pero con distintos colores para así observar de manera más clara las deformaciones. Se asignó un nombre, un modelo constitutivo y los demás parámetros que lo definen (Tabla 3.4) y con las opciones *Soil > Set material* (Figura 3.6), se asignó el material al polígono de suelo creado en el paso dos.

Tabla 3.4

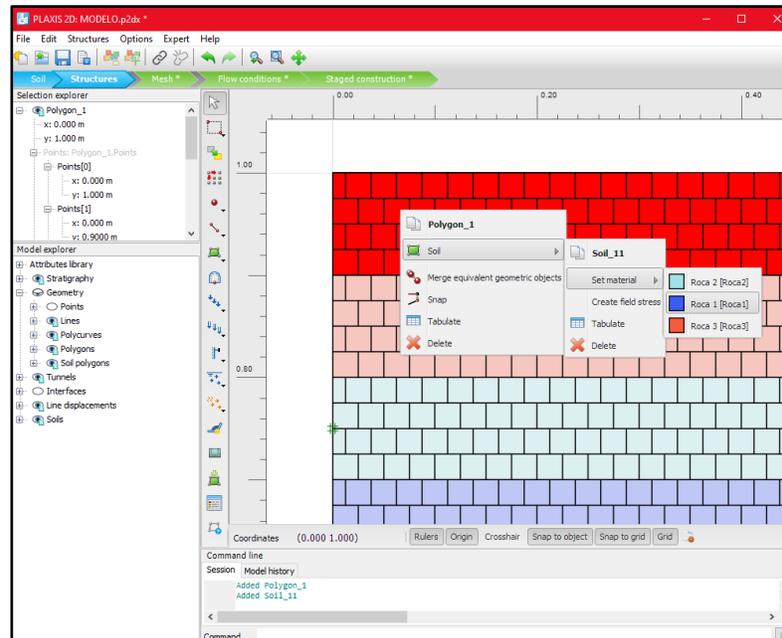
Características de los materiales

Parámetro	Símbolo	Valor				Unidad
Modelo	-	Horizontal	30°	45°	60°	-
Modelo constitutivo	-	Mohr Coulomb				-
Peso específico	γ_{unsat}	22	40	22	30	kN/m ³
	γ_{sat}	22	40	22	30	kN/m ³
Módulo de Young	E'	5,00E ⁵	2,50E ⁵	6,50E ⁵	3,50E ⁵	kN/m ²
Relación de Poisson	ν'	0,25	0,25	0,25	0,25	-
Cohesión	c'	500	100	400	400	kN/m ²
Ángulo de fricción	ϕ'	45	30	30	30	°
Ángulo de dilatación	ψ	0	0	0	0	°
<i>Interfaces</i>	R_{inter}	0,01	0,05	0,01	0,05	-

Nota: el resto de los parámetros son los predeterminados por el programa.

Figura 3.6

Asignación de materiales a los polígonos de suelo



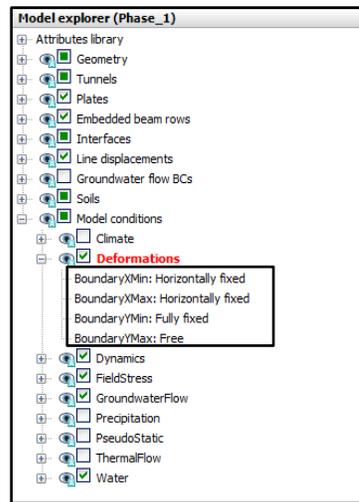
Para lograr el comportamiento esperado, y la interacción entre los contactos que modelan los bloques de cerámica utilizados en el modelo físico, se ajustó el parámetro llamado “ R_{inter} ” en la pestaña *Interfaces* de la ventana Propiedades del material. Este, es un factor de reducción de la resistencia del material en las *interfaces* creadas en el segundo paso de modelado. Su valor varía entre 0,01 y 1,00, siendo 0,01 el valor que representa la resistencia mínima y 1,00 la máxima, lo que indica que las *interfaces* con un valor en el parámetro “ R_{inter} ” de 1,00, tendrían la misma resistencia que el material.

3.6.5. Malla de Elementos Finitos

Una vez asignados los materiales se realizó el quinto paso, la generación de la malla de elementos finitos. Se seleccionó la herramienta  “Generar malla” en el modo Malla y se indicó la distribución de elementos deseada. En cada uno de los modelos se eligió una distribución de elementos *very coarse* (muy gruesa) (Figura 2.17), debido a que proporcionaba la menor cantidad de elementos y nodos, además, el arreglo de los bloques ya es en sí una discretización del macizo rocoso.

3.6.6. Fases de construcción

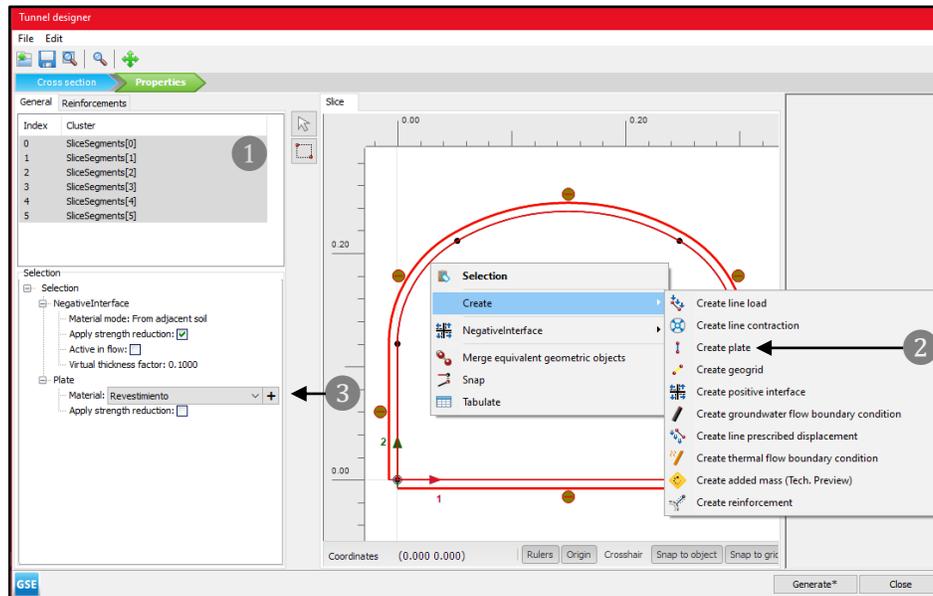
El sexto y último paso, una vez generada la malla, fue la creación de las fases de construcción. Para esto, se ingresó al modo “Fases de construcción”. Allí solo se implementaron dos fases, en la primera, *Initial Phase*, creada por defecto en el programa, el macizo rocoso se encontraba formado e inalterado. La segunda fase *Phase 1*, se creó con la herramienta  “Agregar fase” dentro del explorador de fases, aquí se modeló la excavación del túnel. Se seleccionaron y desactivaron todos los bloques, líneas e *interfaces* ubicadas en el interior para crear el vacío del túnel. Fue importante asignar las restricciones a los contornos de los modelos. Esto se realizó en *Model explorer > Model conditions > Deformations*, fijando horizontalmente ambos bordes de X, fijando totalmente para Y_{Min} y dejando libre el movimiento en Y_{Max} (Figura 3.7).

Figura 3.7*Restricciones del contorno*

Una vez creadas las fases de cálculo, se usó el ícono  “Calcular”. En este trabajo no fue necesario la realización de gráficos avanzados por lo que no se escogieron nodos.

3.7. Estructuras de Soporte

En los modelos donde se estudió el uso de estructuras de soporte, el proceso de diseño comienza dentro del Diseñador de túneles, donde se crearon los revestimientos y anclajes. Esto se hizo en la subpestaña *General* bajo *Properties* (Figura 3.8), luego de seleccionar los segmentos en los que se requiere del revestimiento ①, se creó mediante la opción *Create plate* ②. En la ventana *Selection* bajo la opción *Plate*, se estableció un nuevo material llamado “Revestimiento” ③ especificando sus parámetros (Tabla 3.5). Una vez terminado, se incluyó el revestimiento al túnel mediante el botón *Generate*. Es importante tomar en cuenta que, una vez generada la malla, cualquier ajuste de la geometría del modelo requiere de la nueva generación de la malla.

Figura 3.8*Creación de revestimientos***Tabla 3.5***Propiedades del revestimiento*

Parámetro	Símbolo	Valor				Unidad
Modelo		Horizontal	30°	45°	60°	-
Tipo de material	-	Elástico; Isotrópico				-
Rigidez Normal	EA	690,0	105,0	25,25 E ³	7500	kN/m
Rigidez a Flexión	EI	3,23 E ⁻³	0,492 E ⁻³	0,1230	3,52 E ⁻²	kNm ² /m
Espesor	d_{eq}	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075	m
Peso	w	0,0736	0,0736	0,0736	0,0736	kN/m/m
Relación de Poisson	ν	0,49	0,49	0,49	0,49	-

Nota: el resto de los parámetros son los predeterminados por el programa.

Para el caso de los anclajes, solo se realizó en el modelo horizontal. El proceso es similar al realizado anteriormente. En la pestaña *Reinforcements* (Refuerzos) (Figura 3.9), se seleccionaron los segmentos donde se requiere la estructura, y luego se definieron con la

herramienta  “Definir refuerzo”. Para simular el comportamiento del anclaje, primero se creó el material “Anclajes” (Tabla 3.6) y se asignó en la ventana de propiedades **1** (Figura 3.9), donde también se introdujo la longitud, el tipo de distribución y la cantidad de anclajes.

Tabla 3.6

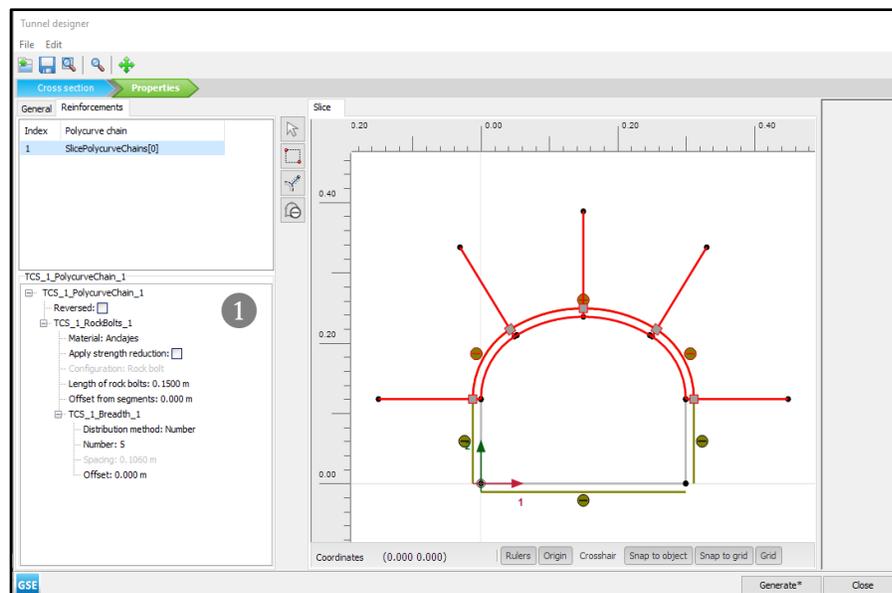
Propiedades del anclaje

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Tipo de material		Elástico	-
Módulo de Young	E	10,00E ⁶	kN/m ²
Peso específico	γ	1	kN/m ³
Forma	-	Predefinida; circular	-
Diámetro	-	6,00 E ⁻³	m
Resistencia	$T_{skin,start,max}$	60	kN/m
	$T_{skin,end,max}$	60	kN/m

Nota: el resto de los parámetros son los predeterminados por el programa.

Figura 3.9

Creación de anclajes

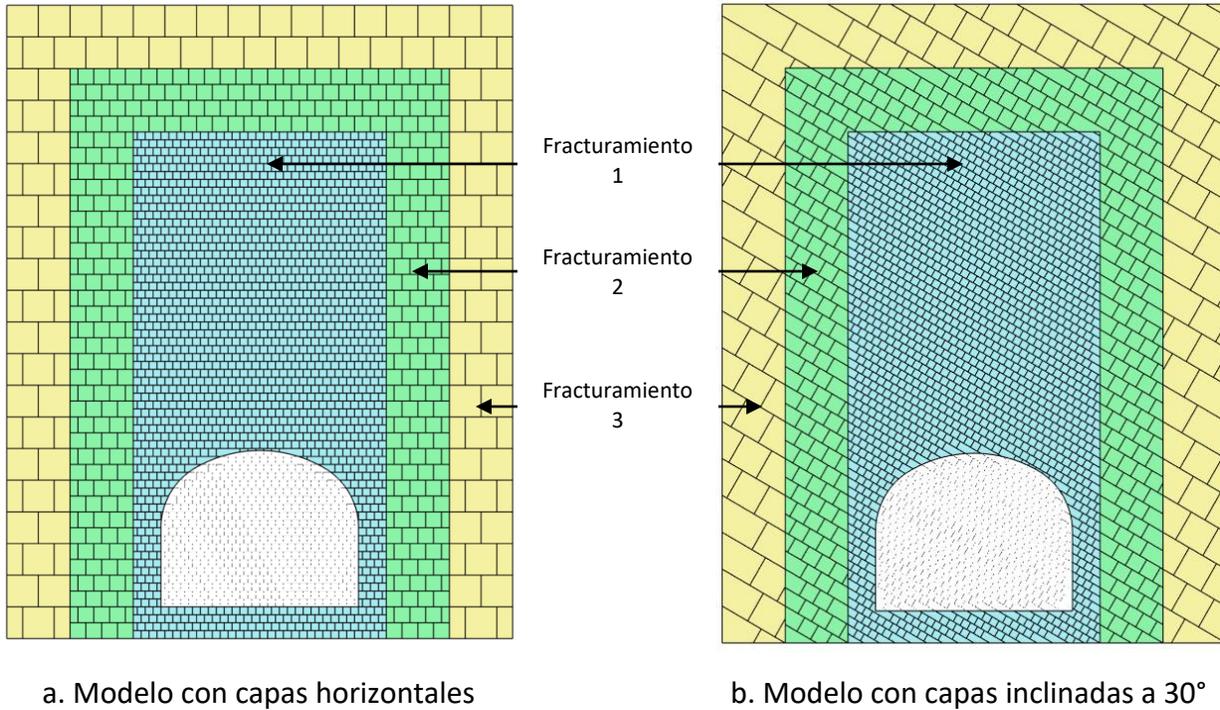


Los modelos físicos de 1988 utilizaron silicón y alambre para simular el revestimiento y anclajes en la excavación de los túneles, por lo que se crearon los materiales “Revestimiento” y “Anclaje” en los modelos numéricos con propiedades que homologaran el comportamiento de los modelos físicos. El modelo numérico se encuentra a una escala de 1:20, así pues, se representó un revestimiento con un espesor de 0,15 m y anclajes de 3 m de longitud en la realidad.

3.8. Zonificación del Macizo en Función del Fracturamiento

Como parte adicional en este trabajo, se realizaron dos modelos donde se disminuye el fracturamiento en el macizo rocoso a medida que nos alejamos de la abertura del túnel. Esto permitió ampliar el tamaño del modelo numérico y disminuir la cantidad de entidades geométricas cargadas en el programa. Los modelos estudiados fueron: uno con capas de estratificación horizontal y otro con estas inclinadas a 30°.

Para esto, se diseñó una nueva geometría conformada por dos aumentos en las dimensiones de los bloques (Figura 3.10). El primer aumento fue del doble y el segundo de cuatro veces el tamaño original (Tabla 3.7). Estos se colocaron alrededor de una geometría extendida verticalmente, similar a la de los modelos numéricos anteriores, zonificando el macizo con tres polígonos de roca. Uno rectangular de 0,8 x 1,6 m donde se encuentra ubicado el túnel y dos en forma de herradura, con espesor de 0,20 m, quedando el modelo completo de 1,6 metros en X por 2 metros en Y.

Figura 3.10*Modelos con macizo zonificado*

En cada uno de los polígonos, se disminuyó la resistencia en los contactos de los bloques progresivamente hacia el interior de la excavación (Tabla 3.7). También se aumentó el diámetro de la excavación (Tabla 3.8), modelando una relación $D/d = 25$. Las propiedades de los materiales de los modelos se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.7*Dimensiones de modelos con macizo zonificado*

Parámetro	Fracturamiento			Unidad
	1	2	3	
Tamaño de bloques	2,5 x 2,5	5 x 5	10 x 10	cm
Dimensiones /Espesor	0,8 x 1,6	0,2	0,2	m
R_{inter}	0,01	0,5	1	-

Tabla 3.8*Dimensiones del túnel en modelos con macizo zonificado*

Segmento	Tipo	Ángulo inicio	Longitud/ Radio	Ángulo del segmento
0	Línea	0°	0,625 m	-
1	Línea	90°	0,25 m	-
2	Arco	90°	0,219 m	60°
3	Arco	150°	0,406 m	60°
4	Arco	210°	0,219 m	60°
5	Línea	270°	0,25 m	-

Tabla 3.9*Características de los materiales en modelos con macizo zonificado*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Modelo	-	Horizontal	30°
Modelo constitutivo	-	Morh Coulmb	-
Peso específico	γ_{unsat}	22	22 kN/m ³
	γ_{sat}	22	22 kN/m ³
Módulo de Young	E'	7,00E ⁵	7,50E ⁵ kN/m ²
Relación de Poisson	ν'	0,25	0,25
Cohesión	c'	500	500 kN/m ²
Ángulo de fricción	ϕ'	45	45 °
Ángulo de dilatación	ψ	0	0 °

CAPÍTULO IV-ANÁLISIS DE RESULTADOS

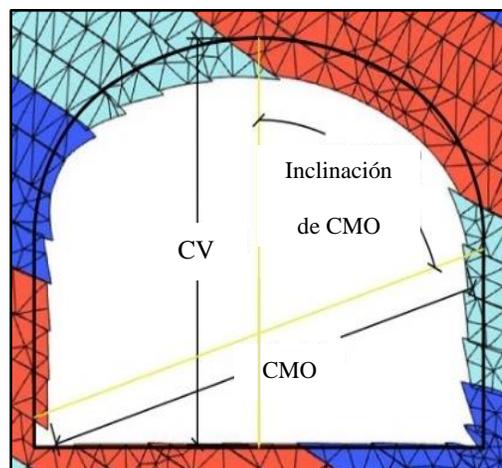
4.1. Introducción

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos de las corridas de los modelos basados en elementos finitos para cada configuración de planos de estratificación. Las variables evaluadas son los desplazamientos y deformaciones, comparando modelos físicos y numéricos cualitativa y cuantitativamente.

El análisis comparativo se distribuye en dos secciones a lo largo del capítulo. En la primera, se hace referencia a los resultados cualitativos, comparando físicamente a través de imágenes, los procesos de deformación que ocurren en ambos tipos de modelo. En la segunda sección, se presenta el análisis comparativo de forma cuantitativa de las magnitudes de las deformaciones y los desplazamientos de ambos tipos de modelo (en %), medidos mediante el acortamiento de la altura del túnel o cuerda vertical (CV) y la cuerda oblicua donde ocurre la mayor deformación llamada cuerda máxima oblicua (CMO) (Figura 4.1).

Figura 4.1

Esquema de dimensiones medidas



Este tipo de análisis permite determinar si existen diferencias significativas que conduzcan a conclusiones objetivas sobre la capacidad del programa de simular el comportamiento observado en los modelos físicos. Las tablas y figuras presentadas, muestran los valores de los resultados y procesos de deformación obtenidos.

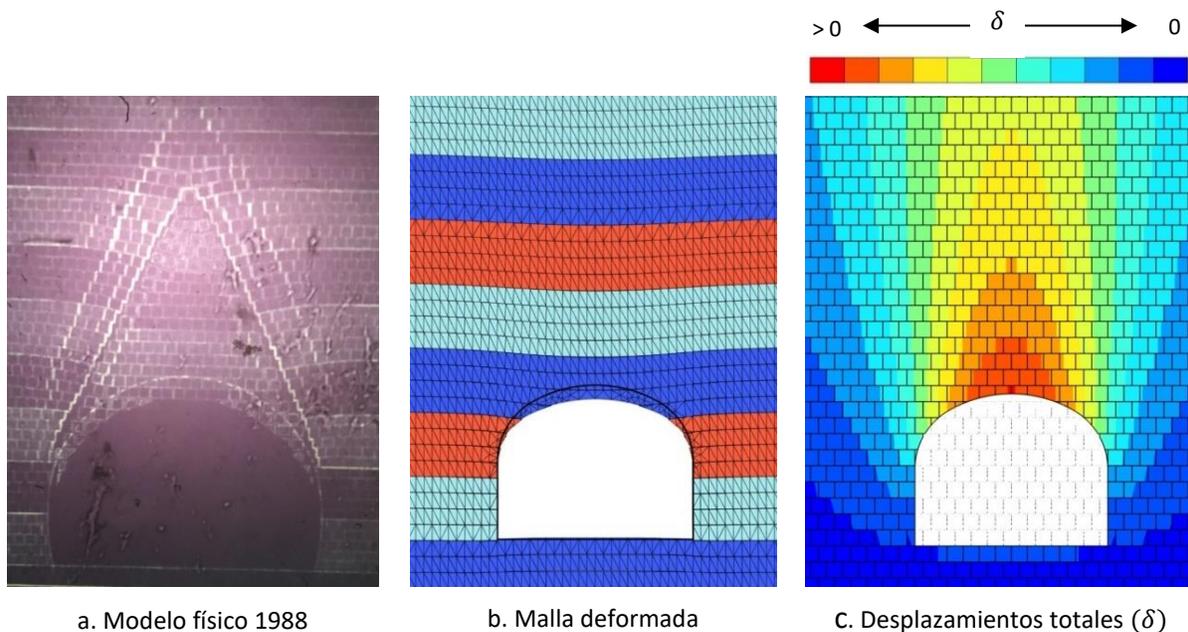
4.2. Comparación Cualitativa de los Procesos de Deformación.

4.2.1. Modelo con Capas Horizontales

Como se mencionó en el Capítulo 2, los procesos de deformación en los modelos físicos asimilando capas horizontales, se deben a la flexión de las mismas sobre la bóveda, producido por la acción de las fuerzas que actúan perpendicularmente a ellas, generando una superficie de falla trapecial, con desplazamiento lateral de los bloques hacia dicha área de mayor deformación.

Figura 4.2

Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico con capas horizontales



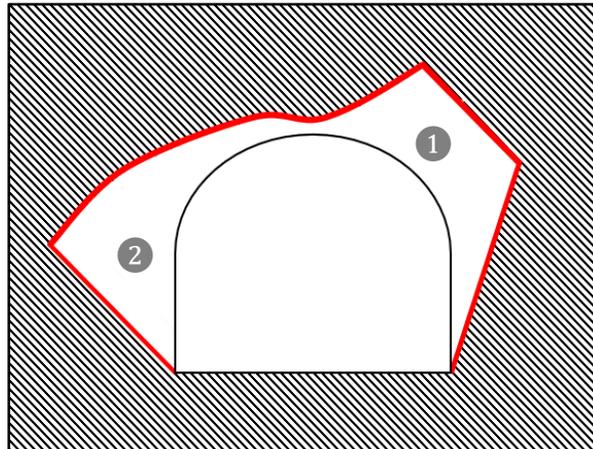
- En el modelo numérico, las deformaciones están más concentradas en la bóveda del túnel, siendo más amplia en el modelo físico, posiblemente debido a la relación D/d .
- Hacia los costados del trapecio formado por la deformación, hay una tendencia de los elementos a desplazarse hacia dentro del túnel produciendo en los cuadros adyacentes deformaciones con componentes horizontales, las cuales no se aprecian en el modelo físico en la zona cercana al techo del túnel, pero sí se observa en los modelos físicos hacia los bordes de la parte superior del trapecio de deformación.
- Se observa como ocurre un proceso de flexión en las capas separadas por los planos de estratificación. Esto sugiere, que en la medida que el espesor de las capas sea menor, por reducción de la rigidez en dichas capas, la flexión deberá ser mayor.
- Aunque en el modelo numérico no hay evidencia de la falla (desprendimiento del área trapecial), en el Anexo A (Figura A.1), se muestran los desplazamientos totales del modelo numérico, donde se observa la tendencia de la deformación a formar un área trapecial.

4.2.2. Modelos con Capas Inclinadas

En la Figura 4.3, se muestran las zonas de deformación en los modelos con capas inclinadas. Al igual que en los modelos físicos, en los modelos numéricos se evidencian las dos áreas de deformación formadas por los fenómenos de flexión y deslizamiento. La primera zona ①, donde los planos de estratificación adyacentes son tangentes al contorno de la excavación y la segunda ②, donde los planos buzan hacia el interior de la excavación.

Figura 4.3

Zonas de deformación en modelos de capas inclinadas

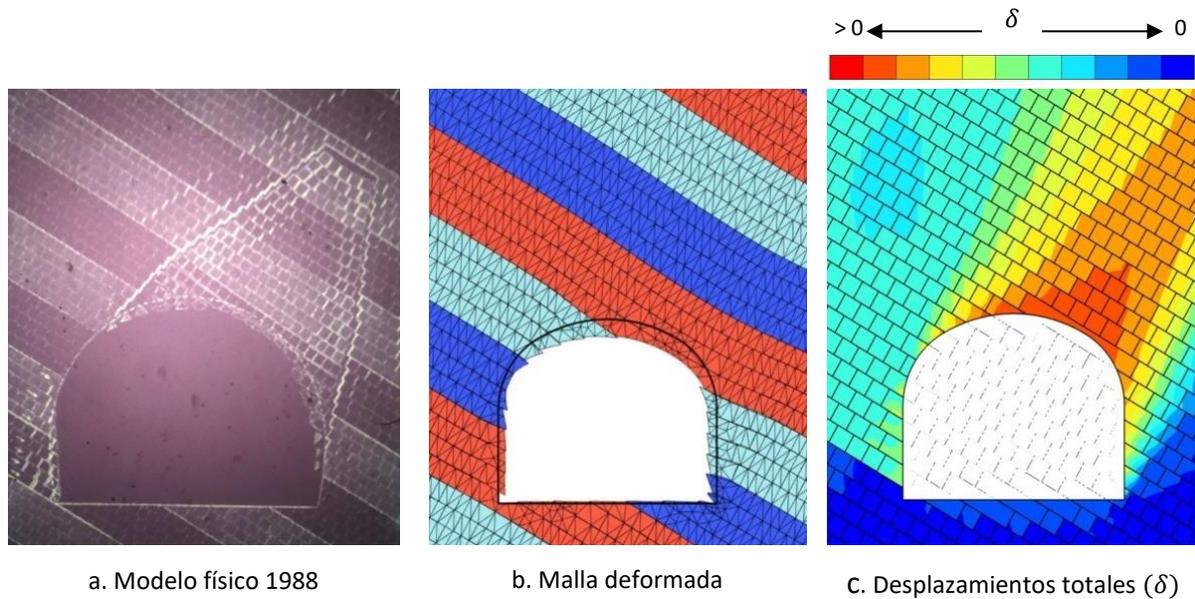


4.2.2.1. Modelos con Capas Inclinadas a 30°

El modelo representa un túnel excavado en un macizo rocoso con planos de estratificación inclinados 30° hacia la derecha y sistema de diaclasas perpendicular a dichos planos con desarrollo igual al ancho de los bloques.

Figura 4.4

Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico inclinado a 30°



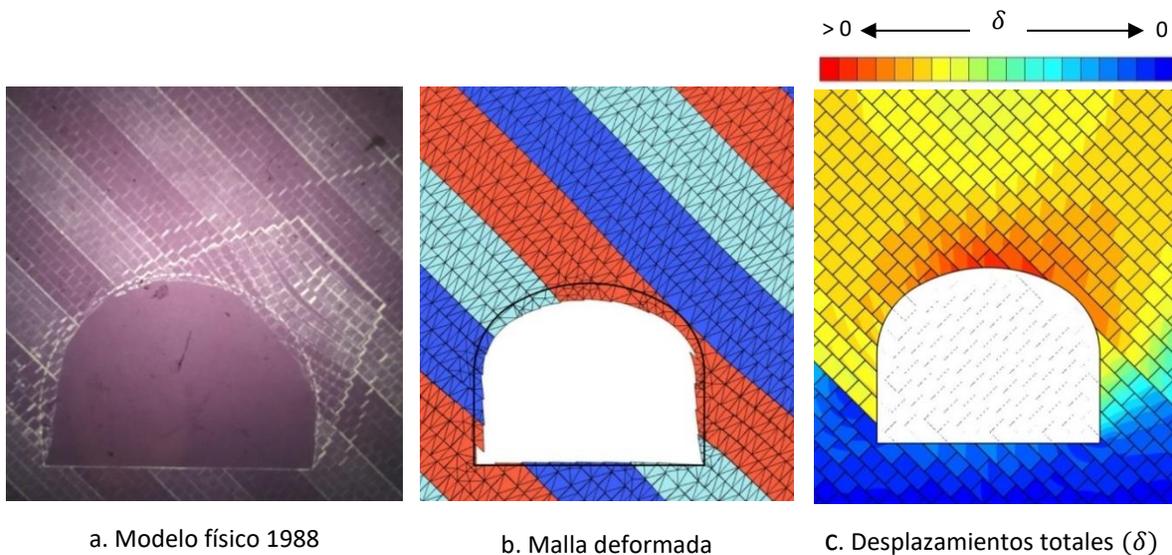
- En la zona superior derecha del techo los planos de estratificación flectaron, permitiendo la apertura de las diaclasas resultando en una falla trapecial, en el modelo numérico no se aprecia la apertura de las diaclasas, pero sí la tendencia a la flexión (Figura 4.4b) formando el área trapezoidal (Figura 4.4c).
- En la zona inferior izquierda de ambos modelos, los bloques en los hastiales se desplazan hacia dentro del túnel siguiendo la inclinación de los planos de estratificación.
- En la Figura 4.4c se observa mediante el cambio de color, el deslizamiento en el hastial izquierdo, lo cual podría ocurrir debido a que los esfuerzos cortantes son mayores que la resistencia en los contactos entre las capas de estratificación.
- La mayor deformación de ambos modelos se presenta en la zona superior derecha perpendicular a la inclinación de las capas.
- No se percibe el desprendimiento de los bloques en el modelo numérico.

4.2.2.2. Modelos con Capas Inclinadas a 45°

El modelo representa un túnel excavado en un macizo rocoso con planos de estratificación inclinados a 45° hacia la derecha y sistema de diaclasas perpendicular a dichos planos con desarrollo igual al ancho de los bloques. El comportamiento de deformación observado es similar al modelo inclinado 30°.

Figura 4.5

Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico inclinado a 45°



Nota: la deformación en el modelo numérico tiene una escala de 3:1

- Hacia el lado derecho del techo del túnel se producen deformaciones debido a la flexión de las capas generando una zona de deformación con forma trapezoidal, de un tamaño menor al generado en el modelo anterior. En el modelo numérico no se observa la abertura de las diaclasas, pero sí se observa la tendencia a la flexión generando el área trapezoidal. Se aprecia este comportamiento en la zona rojo-naranja (Figura 4.5 c).

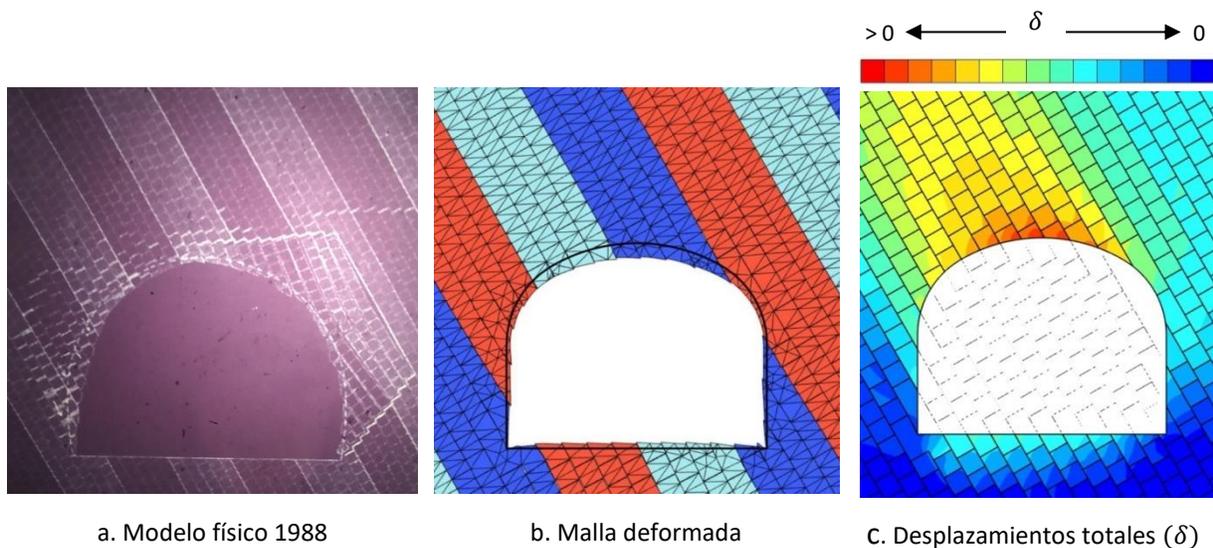
- En el lado izquierdo de la excavación tiene lugar el deslizamiento de los bloques delimitados por las diaclasas hacia la abertura del túnel, lo que podría indicar que la resistencia al corte en los planos de contacto es superada al igual que en el modelo físico.
- Como ocurre en el modelo físico, en el modelo numerico la zona de falla trapezoidal tiene forma simétrica y se aleja más del eje del túnel que en el modelo a 30°.

4.2.2.3. Modelos con Capas Inclinas a 60°

En el modelo descrito a continuación, las capas de estratificación se encuentran inclinadas a 60° hacia la derecha y el sistema de diaclasas perpendicular a dichas capas a 30° hacia la izquierda, con desarrollo igual al ancho de los bloques. El comportamiento de la deformación observado en el presente modelo, es similar a los modelos inclinados a 30° y 45°.

Figura 4.6

Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico inclinado a 60°



Nota: la deformación en el modelo numérico tiene una escala de 3:1

- En el modelo físico se presentan dos zonas con procesos de deformación bien definidos, una desde el centro del techo hacia el pie del hastial derecho, producida por la flexión de

las capas y la zona de deslizamiento desde el centro del techo del túnel hasta el pie del hastial izquierdo (Figura 4.6 a).

- Como se puede observar en la Figura 4.6 b, en el modelo numérico las deformaciones del lado izquierdo de la excavación se ven atenuadas, mientras que, en la parte central del techo del túnel, aumentan los desplazamientos por deslizamiento.
- En el modelo numérico, la zona de flexión de las capas tangentes al contorno del túnel, en la zona superior del hastial derecho, es menor que la formada en el modelo físico.

Se puede observar que en los modelos con capas horizontales y a 30° , se logró representar el comportamiento de los modelos físicos, y aunque esto no ocurre con los modelos de 45° y 60° , se sabe que es posible reformular un modelo numérico que represente el mismo comportamiento en estos últimos, realizando modificaciones, principalmente en la relación entre el diámetro de la excavación y el tamaño de los bloques (D/d), como también en los parámetros introducidos para modelar los materiales.

4.2.3. Modelado Incluyendo Estructuras de Soporte

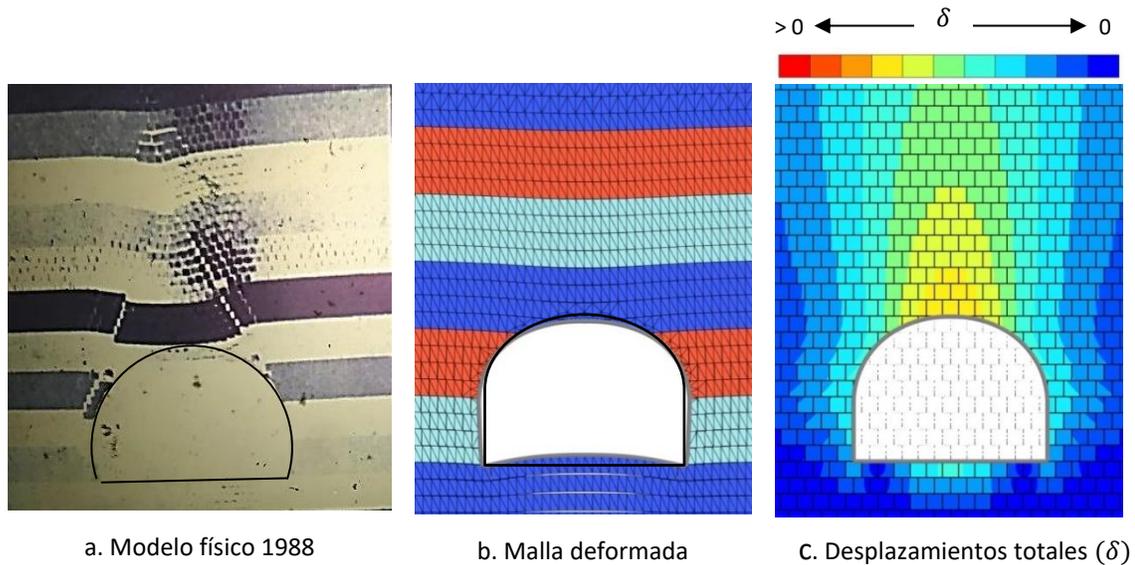
Para la presente comparación solo se realizaron los modelos numéricos con las siguientes configuraciones:

- Modelo con capas horizontales con revestimiento
- Modelo con capas horizontales con revestimiento y anclajes
- Modelo con capas horizontales con anclajes y sin revestimiento
- Modelo con capas inclinadas a 30° con revestimiento
- Modelo con capas inclinadas a 45° con revestimiento
- Modelo con capas inclinadas a 60° con revestimiento

4.2.3.1. Modelo con Capas Horizontales con Revestimiento

Figura 4.7

Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico con capas horizontales usando revestimiento



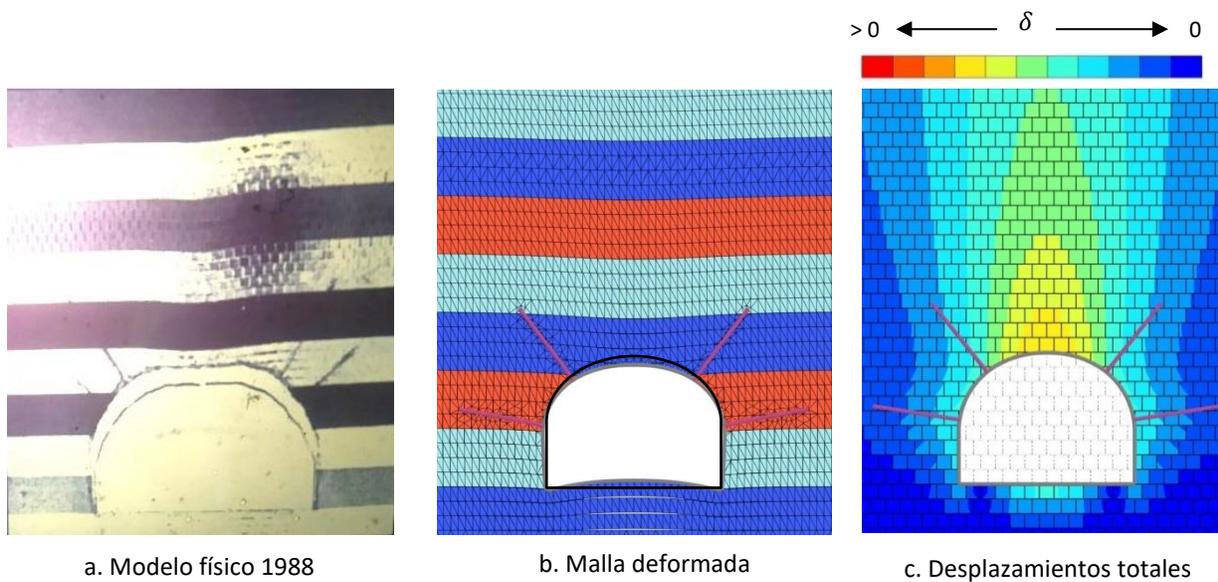
- En el modelo numérico se observa, igual que en el modelo físico, la flexión de las capas que limitan el techo del túnel, generando la zona de falla trapezoidal.
- El revestimiento se moldea con el movimiento de los bloques, produciéndose un reacomodo de los mismos hacia los costados del túnel.
- En el modelo numérico, se genera una concentración de esfuerzos de compresión hacia la parte baja de los hastiales, haciendo que los bloques de la base del túnel tiendan a empujar el revestimiento hacia arriba.

4.2.3.2. Modelo con Capas Horizontales con Revestimiento y Anclajes

En este modelo se simuló el uso de cuatro anclajes, colocados en forma simétrica en la parte superior del túnel (Figura 4.8), de manera tal que se interceptara la zona de falla trapecial que se formó en el modelo en el que no se utilizaron estructuras de soporte.

Figura 4.8

Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico con capas horizontales, usando revestimiento y anclajes

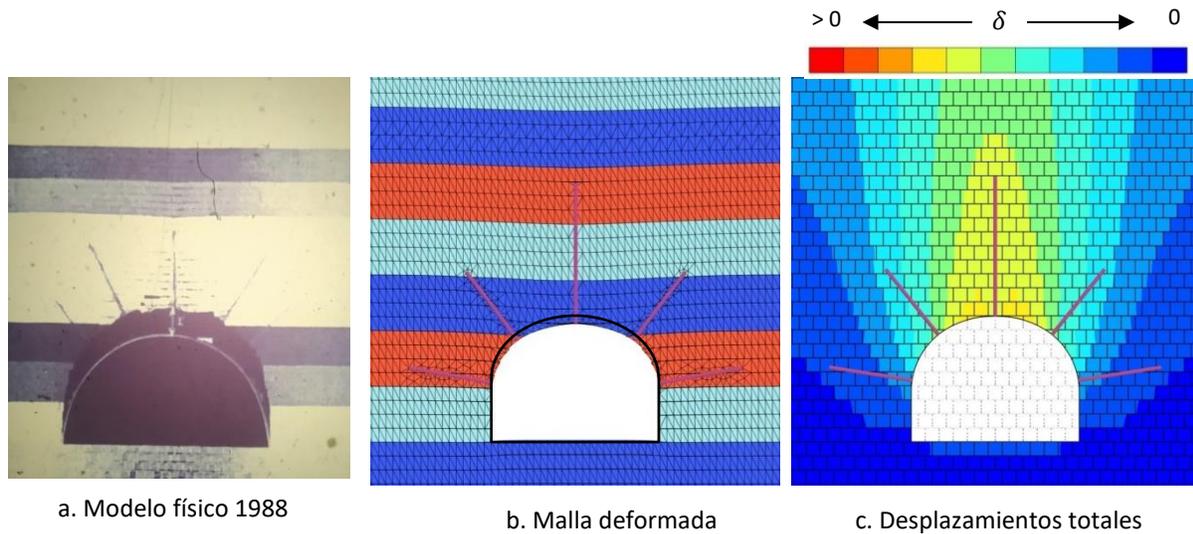


- En ambos modelos la geometría permanece estable. Se observa una pequeña deformación por flexión de las capas en la parte central del techo, debido a que los anclajes se encuentran ubicados a los lados del mismo.
- No se presenta falla en el macizo.

4.2.3.3. Modelo con Capas Horizontales con Anclajes y sin Revestimiento

Figura 4.9

Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico con capas horizontales, usando anclajes sin revestimiento

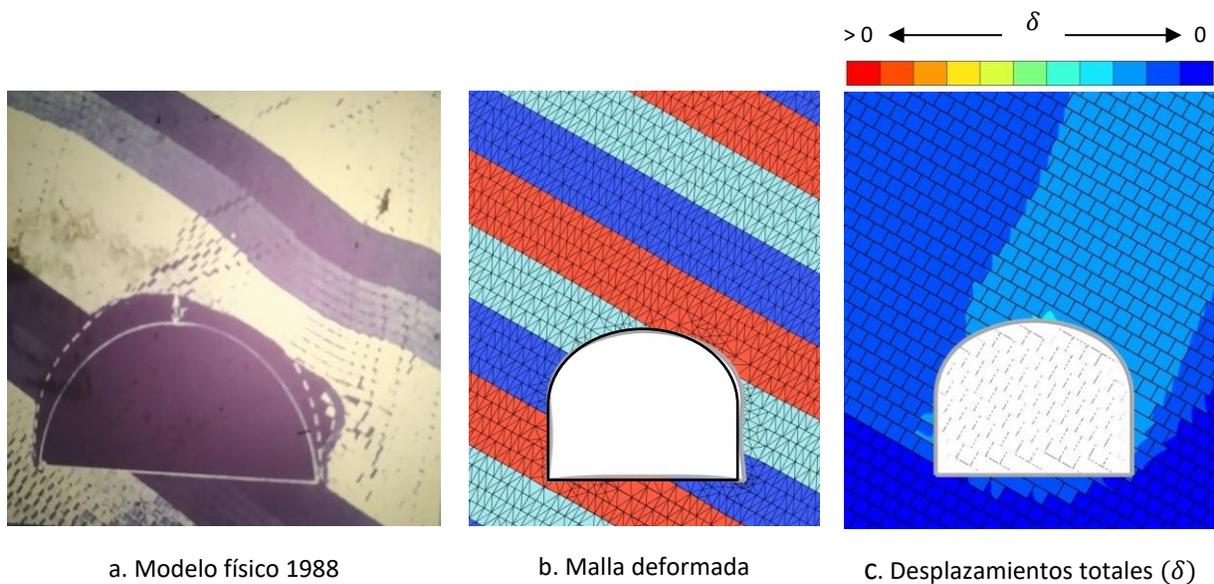


- Se genera una zona de flexión reducida en las capas de la parte superior del túnel en ambos modelos (físico y numérico).
- Los anclajes evitan la separación de las capas en la parte superior del túnel, aportando estabilidad al macizo rocoso.
- No se presenta falla en el macizo.

4.2.3.4. Modelo con Capas Inclinadas a 30° con Revestimiento

Figura 4.10

Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico con capas inclinadas 30°, usando revestimiento

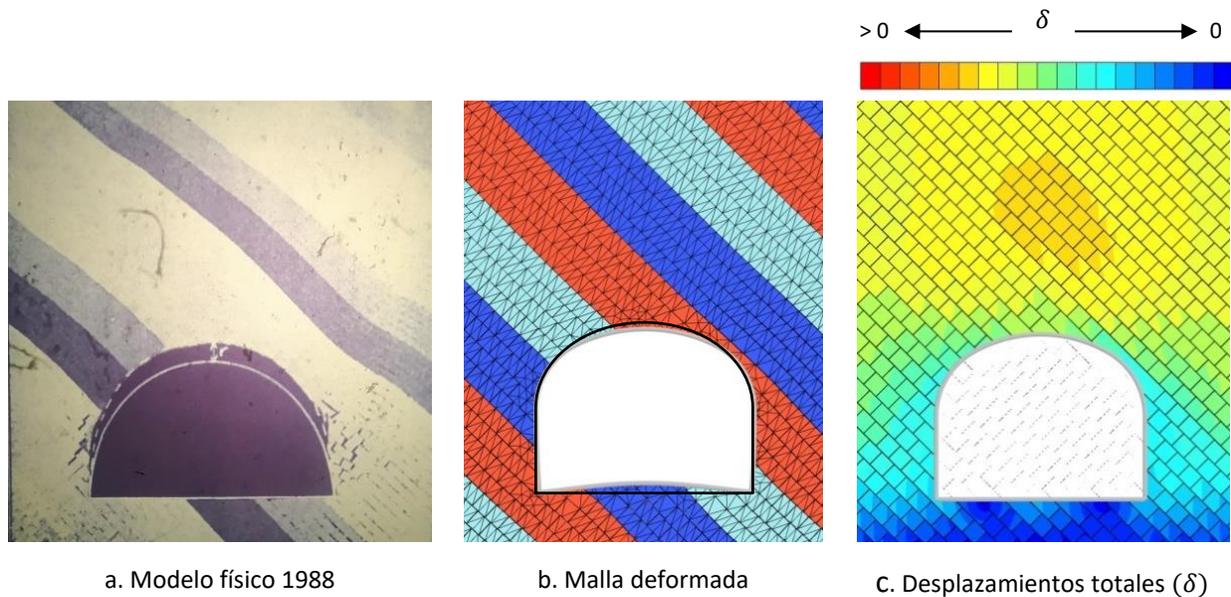


- En el modelo numérico, se observan más atenuados que en el modelo físico, los efectos de la flexión en las capas de la parte superior derecha.
- En ambos modelos (físico y numérico) no ocurre el deslizamiento de los bloques hacia la cavidad del túnel, lo cual es impedido por el revestimiento.
- Las deformaciones observadas en el hastial derecho del modelo físico, pueden deberse al levantamiento de los bloques debido a una concentración de esfuerzos sobre los mismos y la falta de confinamiento, lo cual no ocurre en el modelo numérico.

4.2.3.5. Modelo con Capas Inclinas a 45° con Revestimiento

Figura 4.11

Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico con capas inclinadas 45°, usando revestimiento

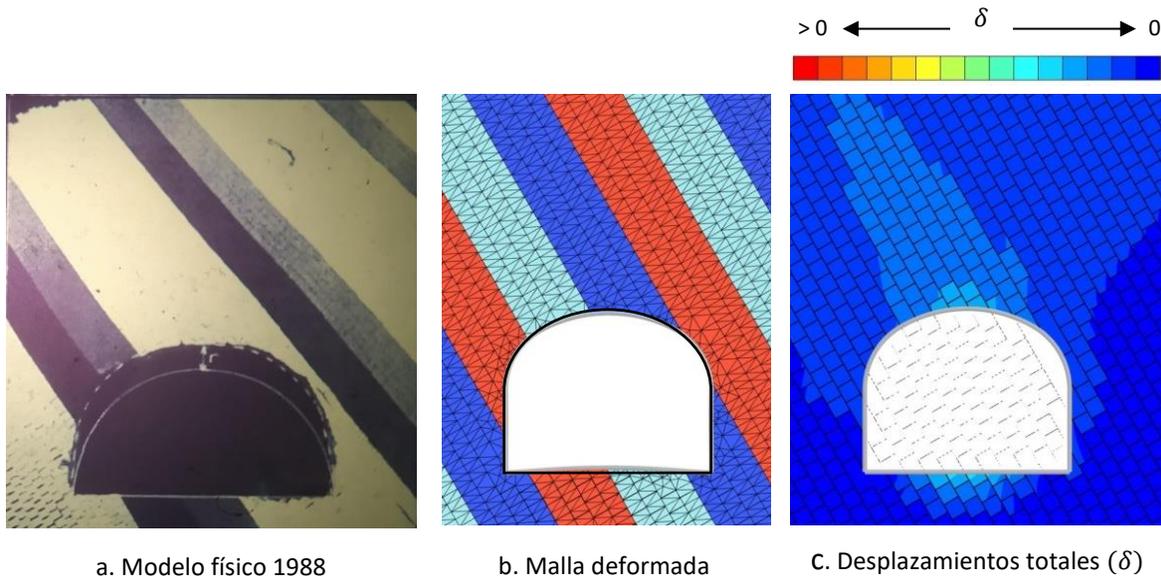


- En el modelo numérico, se genera una concentración de esfuerzos de compresión hacia la parte baja de los hastiales, haciendo que los bloques de la base del túnel tiendan a empujar el revestimiento hacia arriba.
- El revestimiento impide que se forme la zona de falla trapecial y de igual forma impide el deslizamiento de los bloques en el lado del hastial izquierdo del túnel.
- En el modelo numérico no se observa la separación o movimiento de los bloques en los hastiales del túnel como ocurre en el modelo físico.

4.2.3.6. Modelo con Capas Inclizadas a 60° con Revestimiento

Figura 4.12

Comparación de deformaciones entre modelo físico y numérico con capas inclinadas 60°, usando revestimiento.



- En ambos modelos se observa movimiento de los bloques sobre el techo del túnel, entre el hastial izquierdo y el eje del mismo, empujando el revestimiento hacia la abertura.
- En el modelo numérico, se genera una concentración de esfuerzos de compresión hacia la parte baja de los hastiales, haciendo que los bloques de la base del túnel tiendan a empujar el revestimiento hacia arriba, pero en menor medida que en el modelo con capas inclinadas a 45°.
- Tanto en el modelo físico como en el numérico, no se producen los fenómenos de flexión en las capas que limitan el lado derecho del túnel, que ocurrirían en los modelos sin el uso de revestimiento.

Cada modelo numérico, de las figuras mostradas anteriormente, se encuentra presentado de forma detallada en el Anexo A.

4.3. Comparación Cuantitativa de los Procesos de Deformación.

Figura 4.13

Cuerdas en modelo con capas horizontales

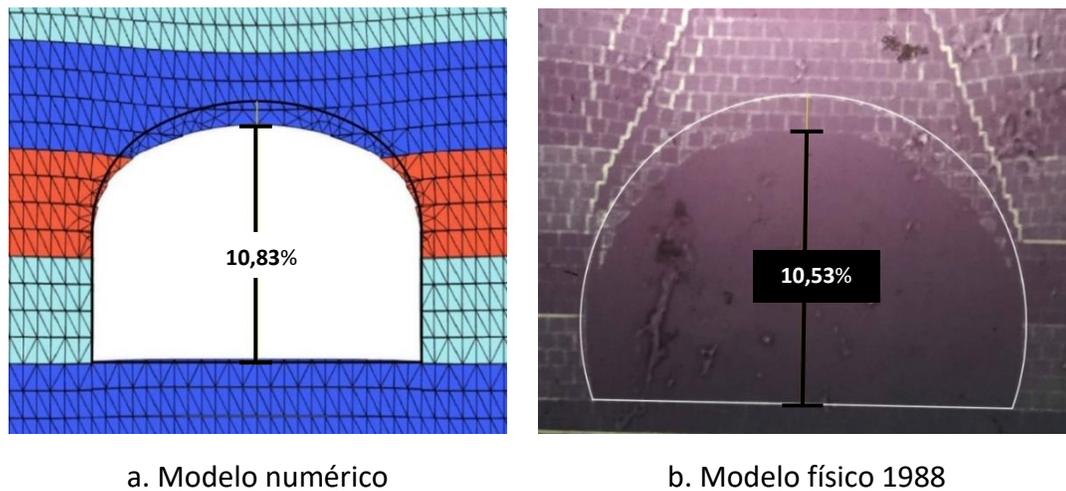
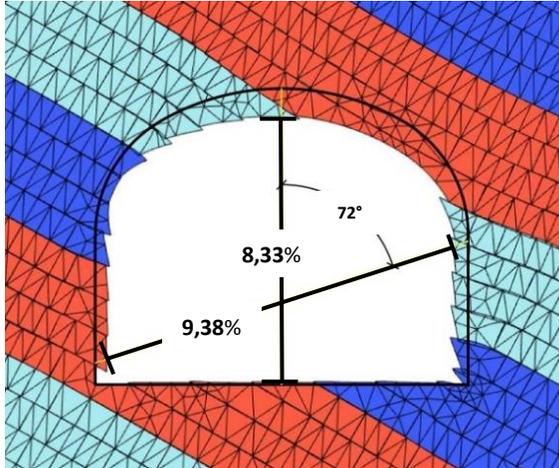


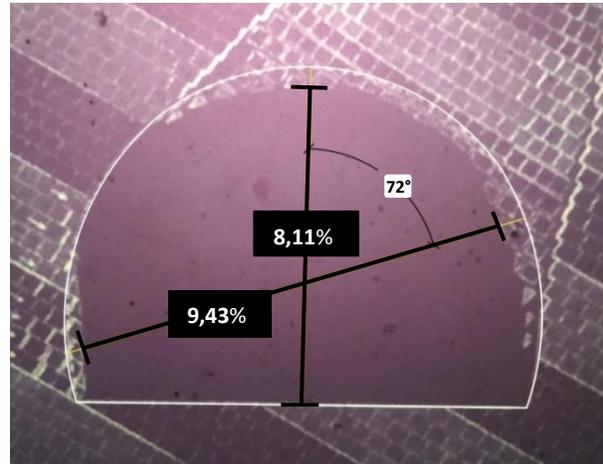
Tabla 4.1

Resultados de deformación de modelos con capas horizontales

Parámetro	Valor		Unidad
	Numérico	Físico	
Tipo de modelo	Numérico	Físico	
Cuerda vertical inicial	0,240	0,38	m
Cuerda vertical acortada	0,214	0,34	m
Acortamiento	0,026	0,04	m
Deformación unitaria equivalente	10,83	10,53	%

Figura 4.14*Cuerdas en modelo con capas inclinadas 30°*

a. Modelo numérico



b. Modelo físico 1988

Tabla 4.2*Resultados de deformaciones de modelos con capas inclinadas a 30°*

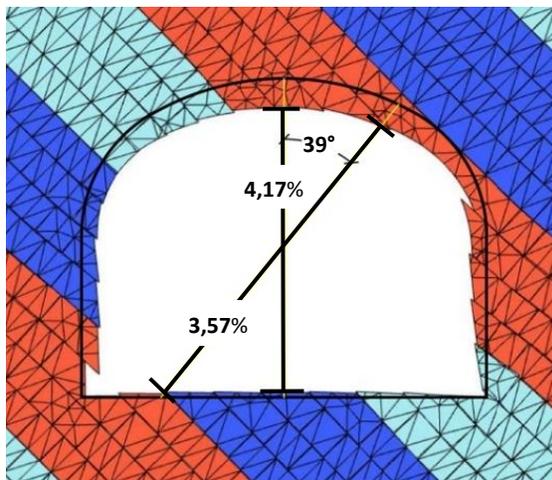
Parámetro	Valor		Unidad
	Numérico	Físico	
Tipo de modelo	Numérico	Físico	
Cuerda vertical inicial	0,24	0,37	m
Cuerda vertical acortada	0,22	0,34	m
Acortamiento	0,02	0,03	m
Deformación unitaria equivalente	8,33	8,11	%
Máxima oblicua inicial	0,32	0,53	m
Máxima oblicua acortada	0,29	0,48	m
Acortamiento	0,03	0,05	m
Deformación unitaria equivalente	9,38	9,43	%
Ángulo respecto vertical	72°	72°	

Tal y como se refleja en las Tablas 4.1 y 4.2, los modelos numéricos simulando capas horizontales e inclinadas a 30° , son los que mejor representan los comportamientos observados en los modelos físicos. En el modelo horizontal, los porcentajes de deformación unitaria equivalente en la cuerda vertical, difieren por 0,3%, mientras en el modelo inclinado a 30° la variación de la deformación unitaria equivalente en la cuerda vertical es de 0,22% y para la cuerda máxima oblicua es de 0,05%.

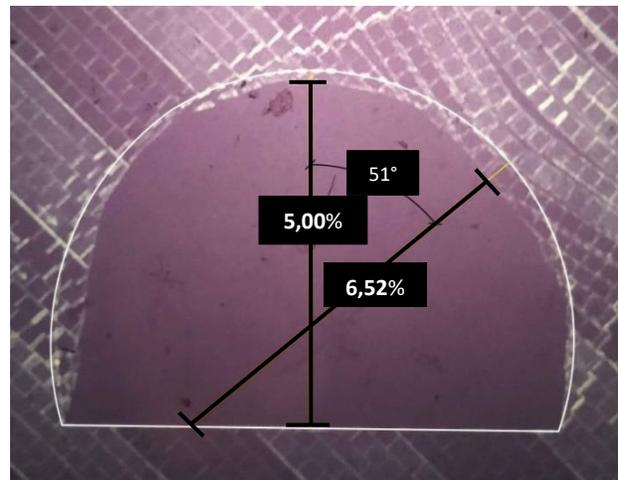
El ángulo de inclinación de la cuerda máxima oblicua en el modelo con capas inclinadas a 30° , nos permite deducir que la zona donde tiende a ocurrir la deformación es igual para el modelo físico y numérico. En las figuras 4.13 y 4.14 se muestran las cuerdas correspondientes al modelo con capas horizontales y al modelo con capas inclinadas a 30° , respectivamente.

Figura 4.15

Cuerdas en modelo con capas inclinadas 45°



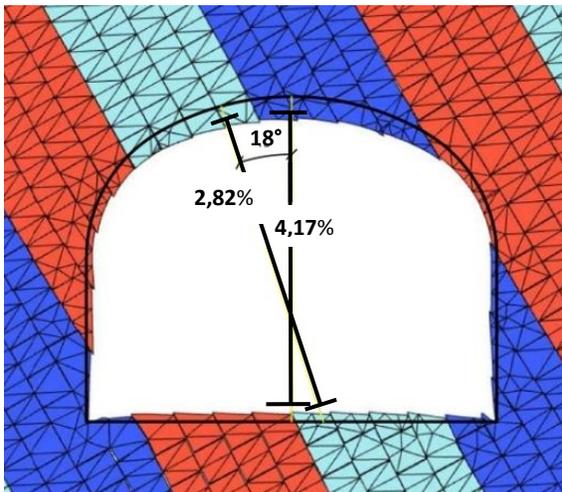
a. Modelo numérico



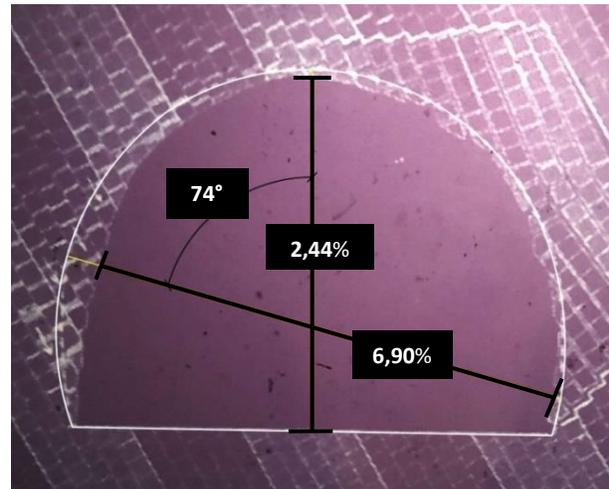
b. Modelo físico 1988

Tabla 4.3*Resultados de deformación de modelos con capas inclinadas a 45°*

Parámetro	Valor		Unidad
	Numérico	Físico	
Tipo de modelo	Numérico	Físico	
Cuerda vertical inicial	0,24	0,40	m
Cuerda vertical acortada	0,23	0,38	m
Acortamiento	0,01	0,02	m
Deformación unitaria equivalente	4,17	5,00	%
Máxima oblicua inicial	0,28	0,46	m
Máxima oblicua acortada	0,27	0,43	m
Acortamiento	0,01	0,03	m
Deformación unitaria equivalente	3,57	6,52	%
Ángulo respecto vertical	39°	51°	

Figura 4.16*Cuerdas en modelo con capas inclinadas 60°*

a. Modelo numérico



b. Modelo físico 1988

Tabla 4.4*Resultados de deformación de modelos con capas inclinadas a 60°*

Parámetro	Valor		Unidad
	Numérico	Físico	
Tipo de modelo			
Cuerda vertical inicial	0,24	0,41	m
Cuerda vertical acortada	0,23	0,40	m
Acortamiento	0,01	0,01	m
Deformación unitaria equivalente	4,17	2,44	%
Máxima oblicua inicial	0,242	0,58	m
Máxima oblicua acortada	0,235	0,54	m
Acortamiento	0,007	0,04	m
Deformación unitaria equivalente	2,89	6,90	%
Ángulo respecto vertical	18°	74°	

Los dos últimos modelos, son los que presentaron las mayores diferencias entre modelo físico y numérico, principalmente en lo que corresponde a la cuerda máxima oblicua. En el modelo con capas inclinadas a 45°, la diferencia de la deformación unitaria equivalente en la cuerda vertical es de 0,83%, y en la cuerda máxima oblicua, esta diferencia es de 2,95%. En el modelo con capas inclinadas a 60°, esta diferencia en la deformación unitaria equivalente es de 1,73% para la cuerda vertical y 4,01% para la cuerda máxima oblicua.

En lo que respecta al ángulo de inclinación de la cuerda máxima oblicua, se observa que la diferencia de este ángulo en los modelos con capas inclinadas a 45°, es de 12°, y en el modelo con capas inclinadas a 60°, esta diferencia es de 56°, lo cual indica que las áreas donde ocurren las deformaciones máximas son diferentes. En las figuras 4.15 y 4.16 se muestran las cuerdas correspondientes a los modelos con capas inclinadas a 45° y 60°, respectivamente.

Para facilitar la comprensión de los resultados numéricos y procesos de deformación que ocurren, se presentan en el Anexo A las figuras de los modelos basados en elementos finitos antes y después de la deformación.

4.4. Modelos con Macizo Zonificado en Función del Fracturamiento

Estos modelos buscan representar el comportamiento de las deformaciones ante la excavación de un túnel, en un macizo rocoso zonificado en función del fracturamiento. Se estudiaron los casos con capas de estratificación horizontales e inclinadas a 30°.

Figura 4.17

Macizo zonificado y estratificado horizontalmente

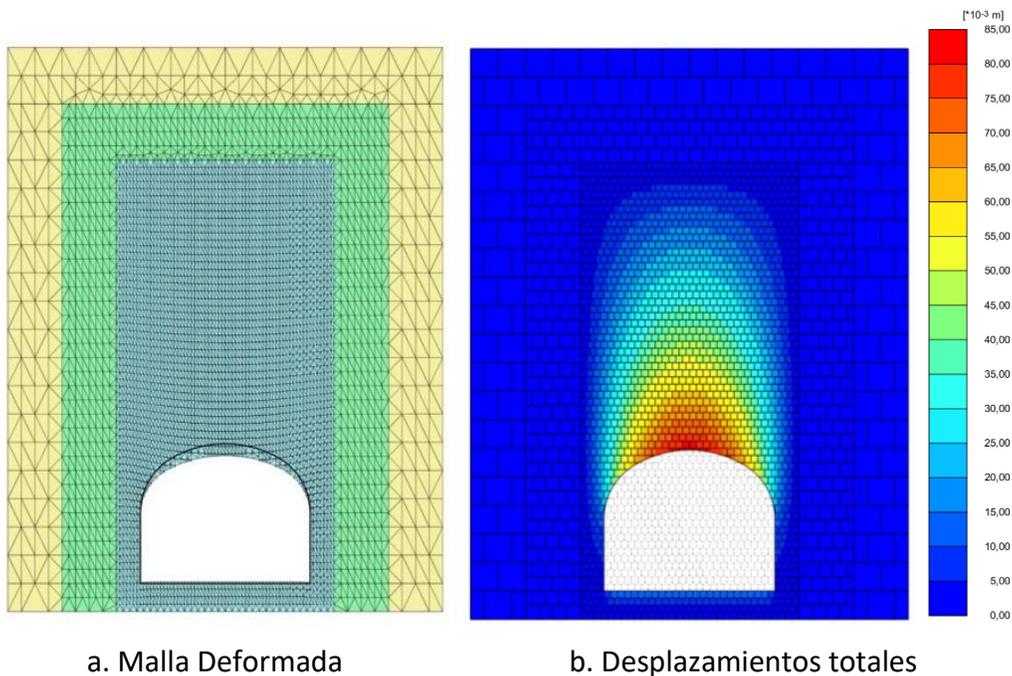
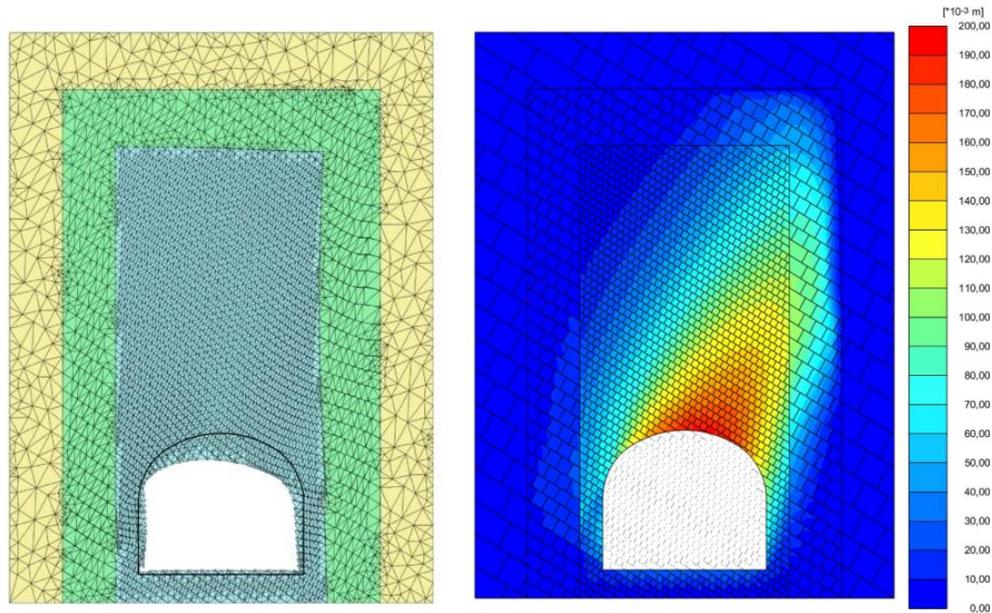


Figura 4.18

Macizo zonificado y estratificado con inclinación a 30°



a. Malla Deformada

b. Desplazamientos totales

En estos modelos se pueden observar los siguientes comportamientos:

- El incremento del tamaño de los bloques, hace que se generen unas reacciones de contacto entre ellos, que implican mayor dificultad de movimiento relativo y por lo tanto menores flexiones en las capas de estratificación a medida que nos alejamos de la excavación.
- Disminución del efecto de deformación en el macizo en las zonas más alejadas de la abertura, limitándose dichas deformaciones a las zonas del modelo con mayor fracturamiento.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A través del modelado numérico utilizando el programa PLAXIS 2D, se lograron reproducir los resultados de los modelos físicos realizados por Cortesi y Carestia en el año 1988. Se modelaron excavaciones bajo condiciones de estratificación con planos horizontales e inclinados a 30°, 45° y 60°, con y sin estructuras de soporte y una relación entre el diámetro de la excavación y el tamaño del bloque (D/d) de 12. Las principales conclusiones obtenidas son las siguientes:

1. Por medio de los modelos numéricos se logró reproducir las mismas condiciones de deformaciones obtenidas en los modelos físicos de 1988.
2. A través de gráficos tipo iso-superficie se plasmaron los resultados de estados de esfuerzo y deformaciones de los modelos numéricos, que, al ser comparados con lo observado en los modelos físicos, presentan una notable coincidencia, cualitativa y cuantitativamente.
3. Se ejecutó un modelo físico equivalente al realizado en 1988 con planos de estratificación horizontales, cuyos resultados de deformación son semejantes.
4. En los modelos donde se utilizaron estructuras de soporte, se obtuvo coincidencia en el estado de deformaciones respecto a lo obtenido mediante los modelos físicos.
5. El uso de revestimientos aumenta las reacciones de contacto entre bloques, evitando el desprendimiento de los mismos en el contorno de la excavación.
6. Los anclajes unen las capas de estratificación, creando una capa de mayor espesor que evita los desplazamientos relativos entre bloques de roca, formando una estructura autoportante alrededor de la excavación.

A través de los modelos numéricos en los que se zonificó el macizo rocoso en función del fracturamiento, se concluye que: las deformaciones se producen en las zonas de mayor fracturamiento y los desplazamientos no llegan a los contornos del modelo.

Por último, para ampliar la investigación, se plantean algunas recomendaciones:

1. Dentro del marco de la presente línea de investigación, se recomienda el planteamiento de modelos con diversas relaciones entre el tamaño de la excavación y el tamaño de los bloques (D/d), donde el macizo sea modelado bajo condiciones de mayor o menor fracturamiento.
2. Así mismo, se recomienda realizar otro tema de investigación donde se plantee la variación de las condiciones del macizo rocoso, disminuyendo su fracturamiento o aumentando su calidad, a mayor distancia de la abertura del túnel, para poder evaluar las condiciones de las debilidades estructurales del macizo en función del cambio en el estado de esfuerzos, y no suponer condiciones uniformes asumidas según observaciones realizadas en el macizo desconfinado.

ANEXOS

ANEXO A: IMÁGENES DE MODELOS NUMÉRICOS

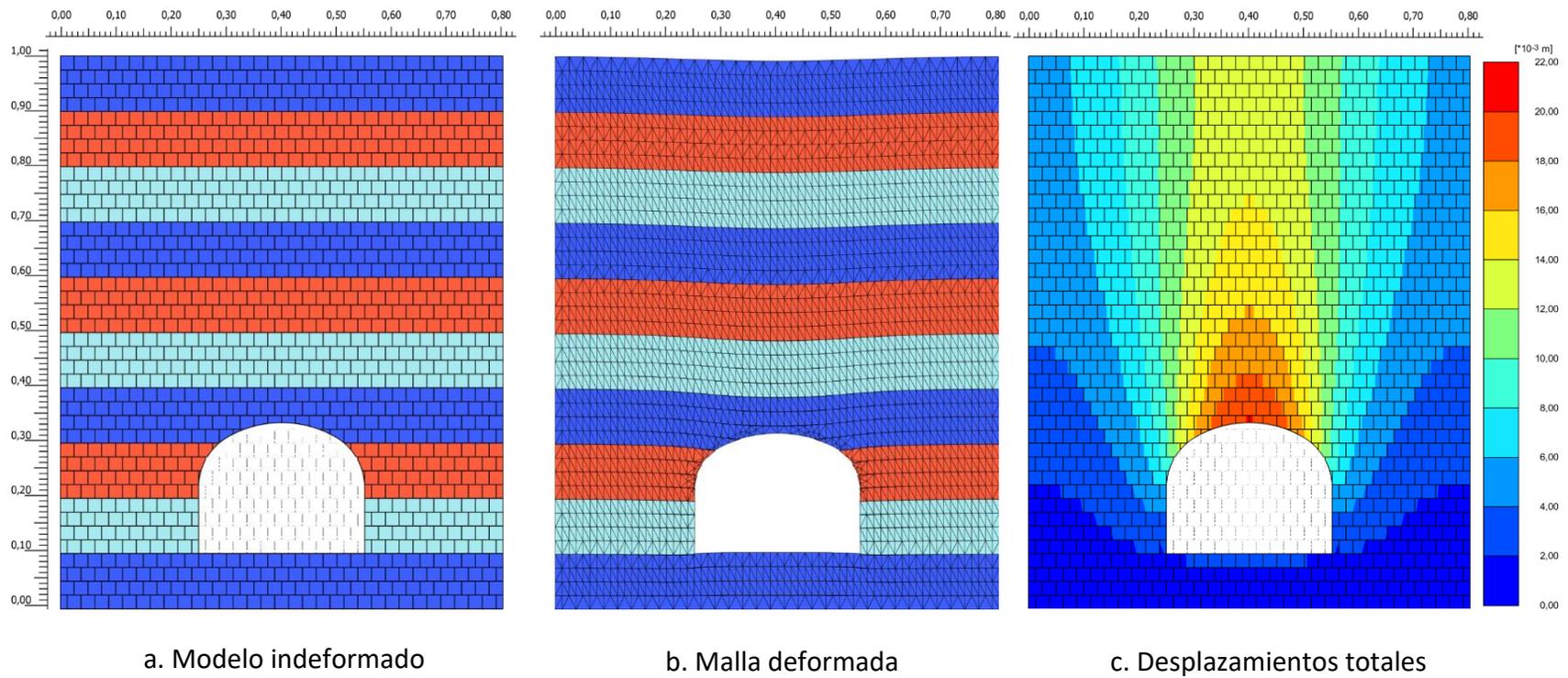
Figura A.1*Modelo con capas horizontales*

Figura A.2

Modelo con capas horizontales y revestimiento

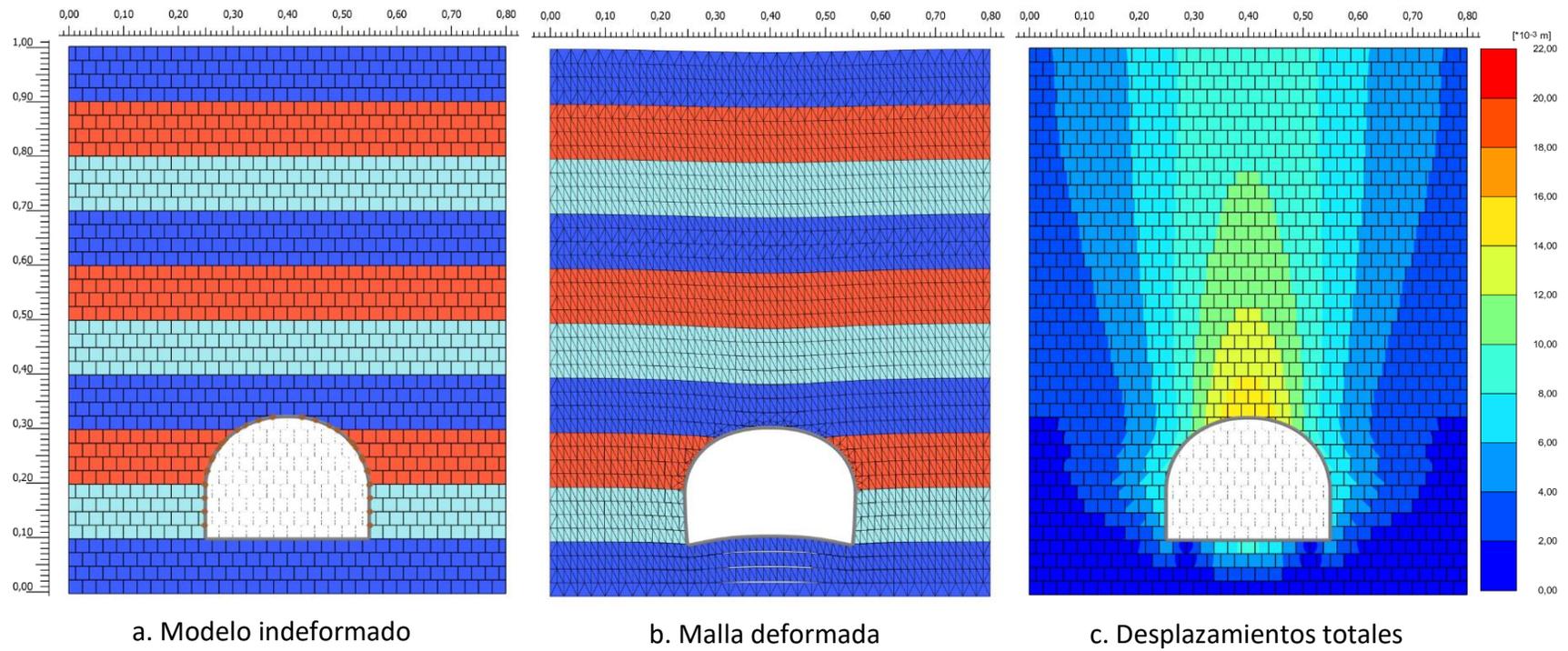


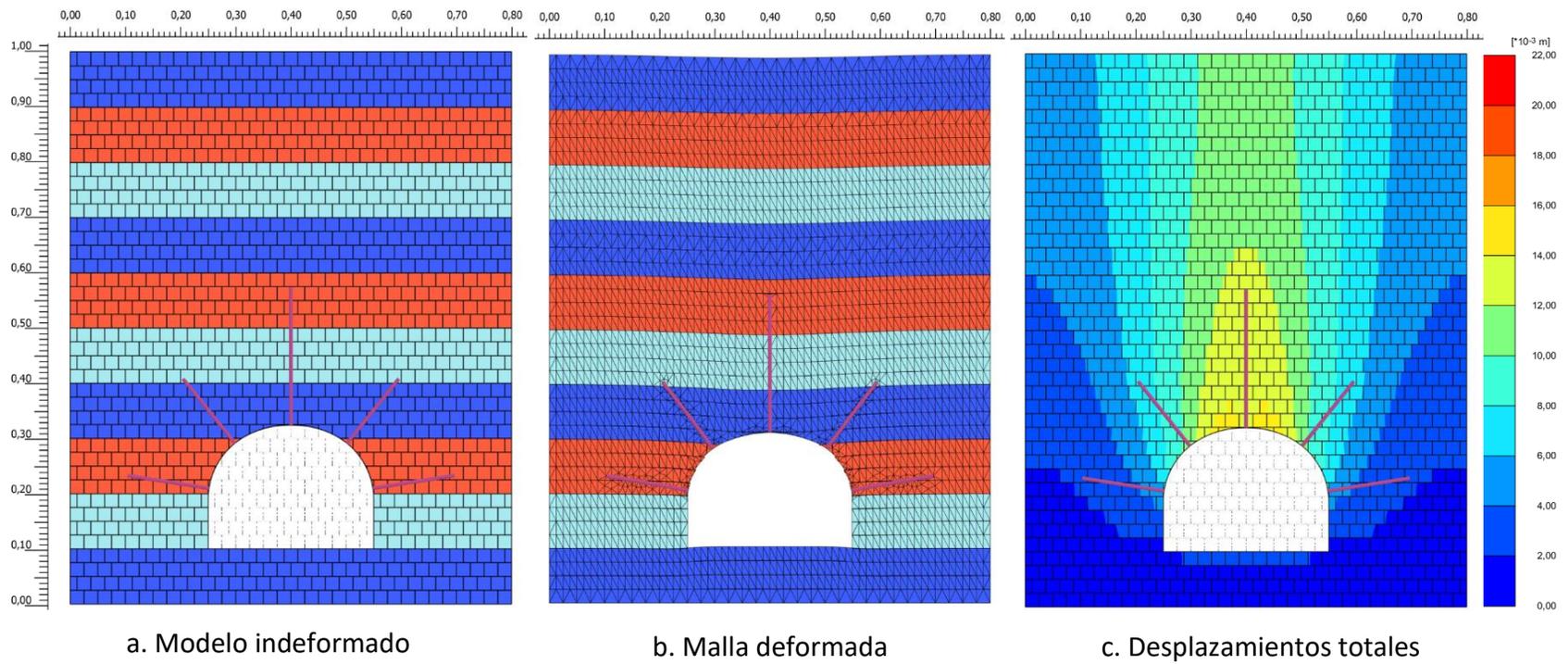
Figura A.3*Modelo con capas horizontales y anclajes*

Figura A.4

Modelo con capas horizontales, revestimiento y anclajes

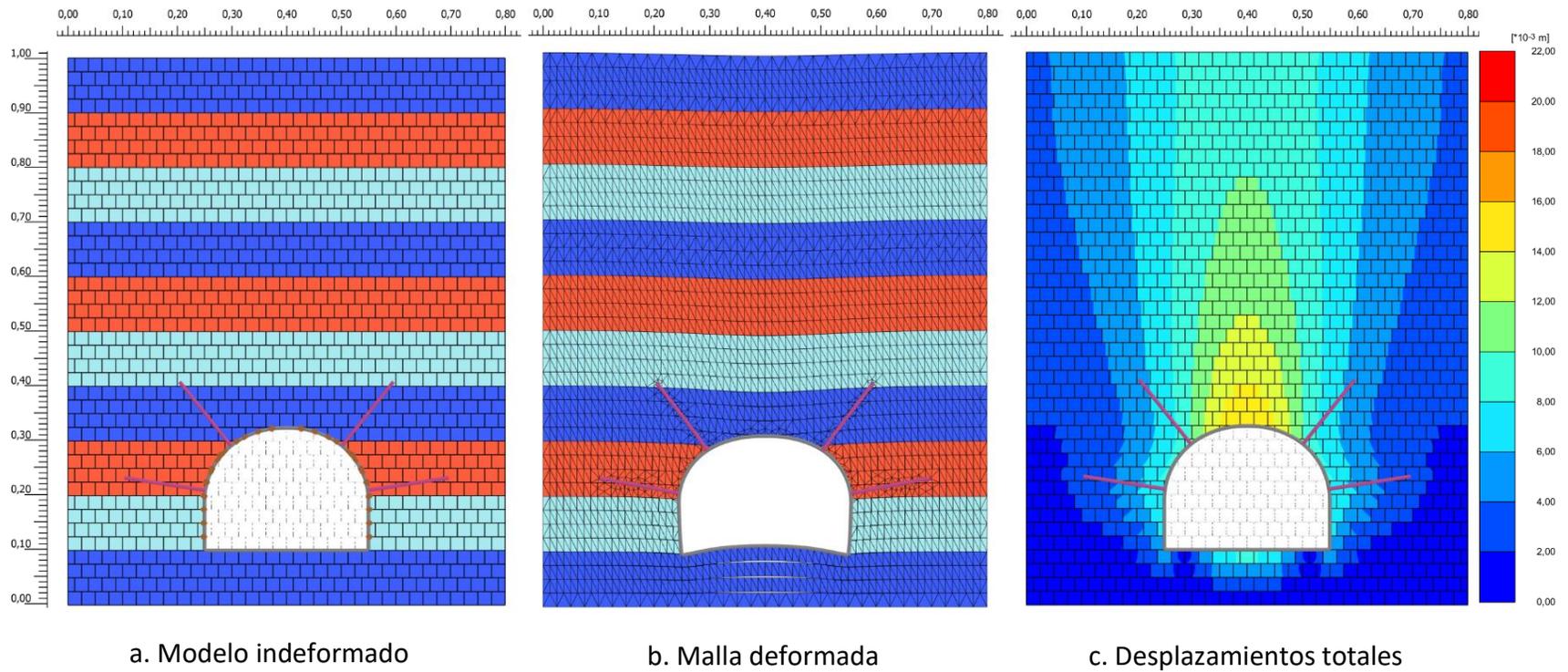


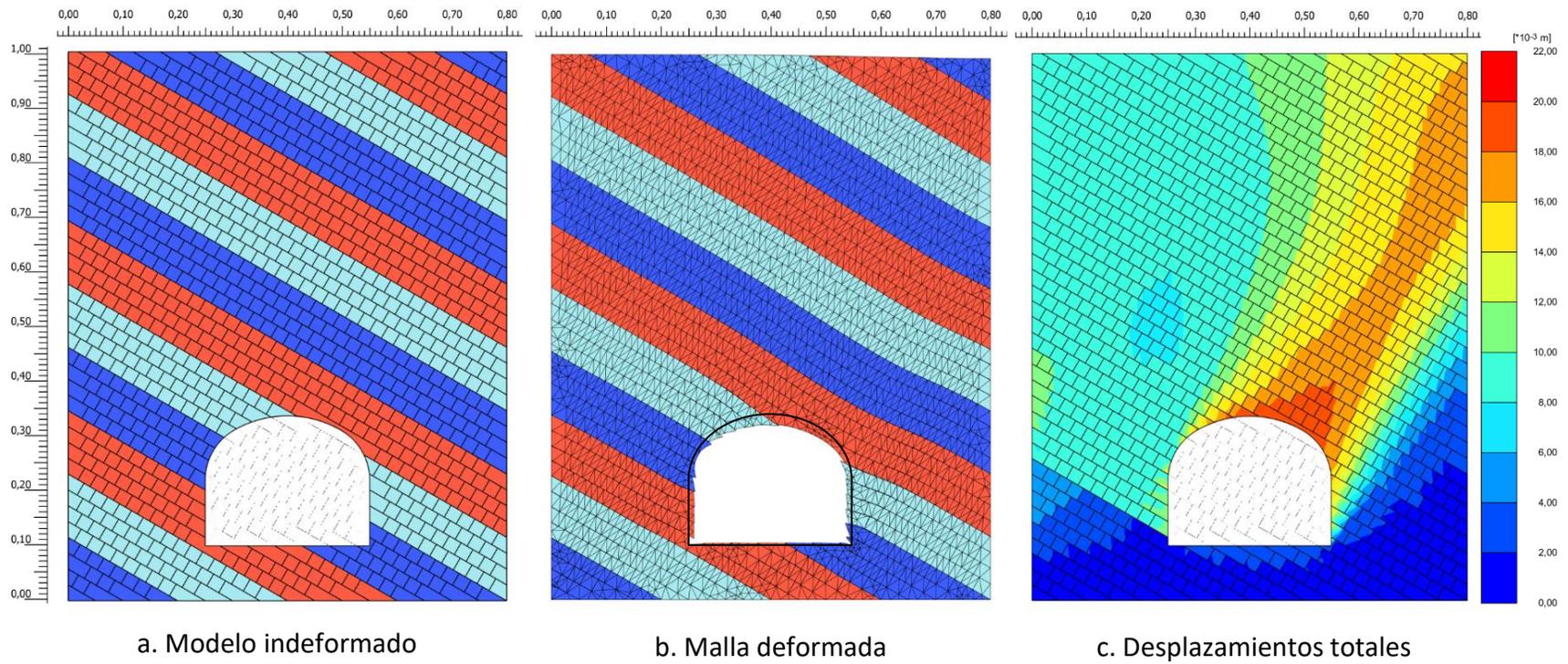
Figura A.5*Modelo con capas inclinadas a 30°*

Figura A.6

Modelo con capas inclinadas a 30° y revestimiento

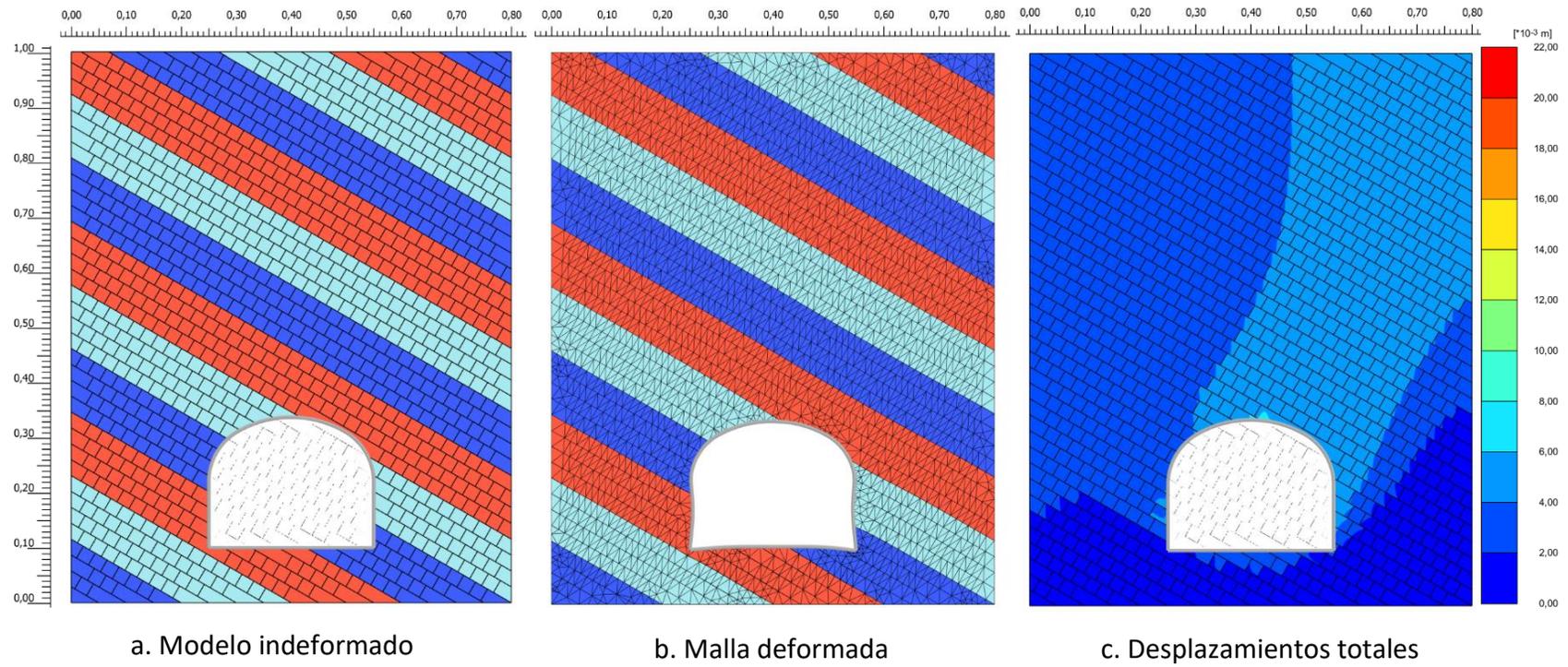
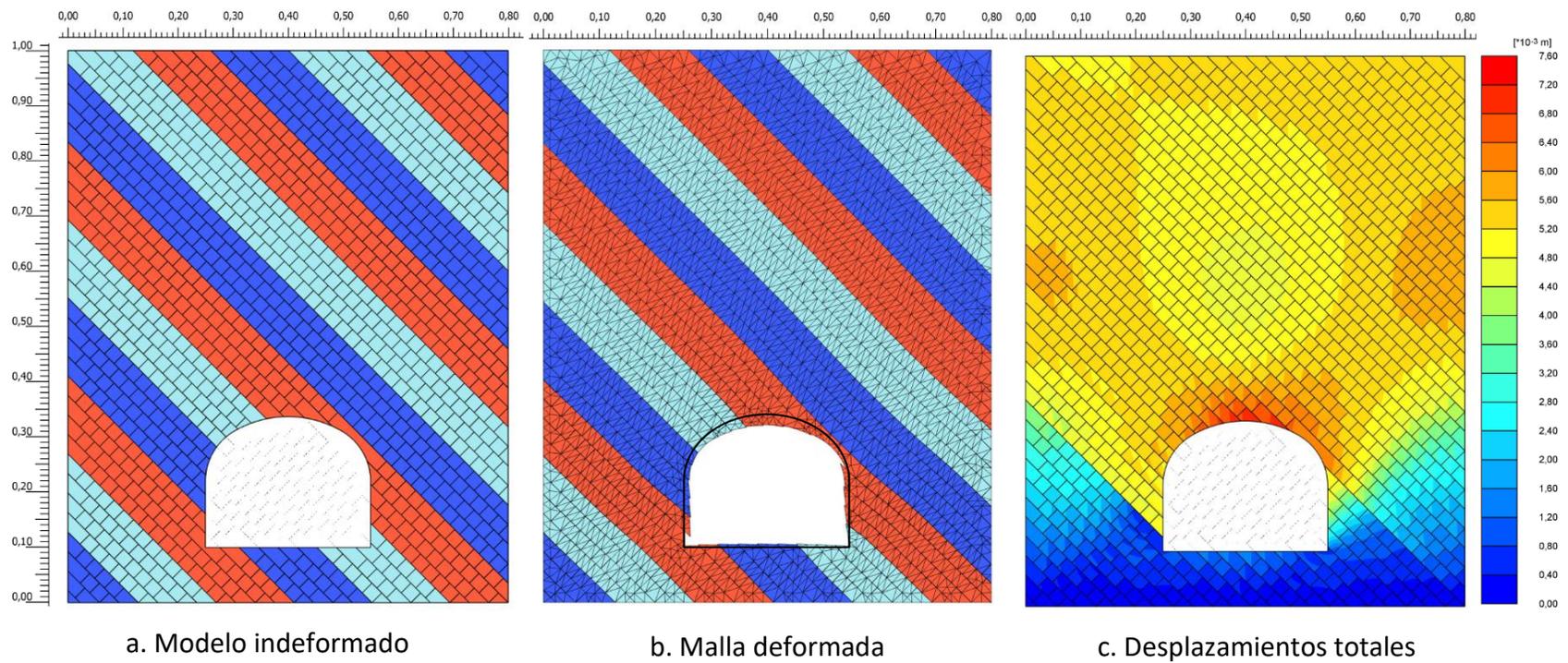


Figura A.7

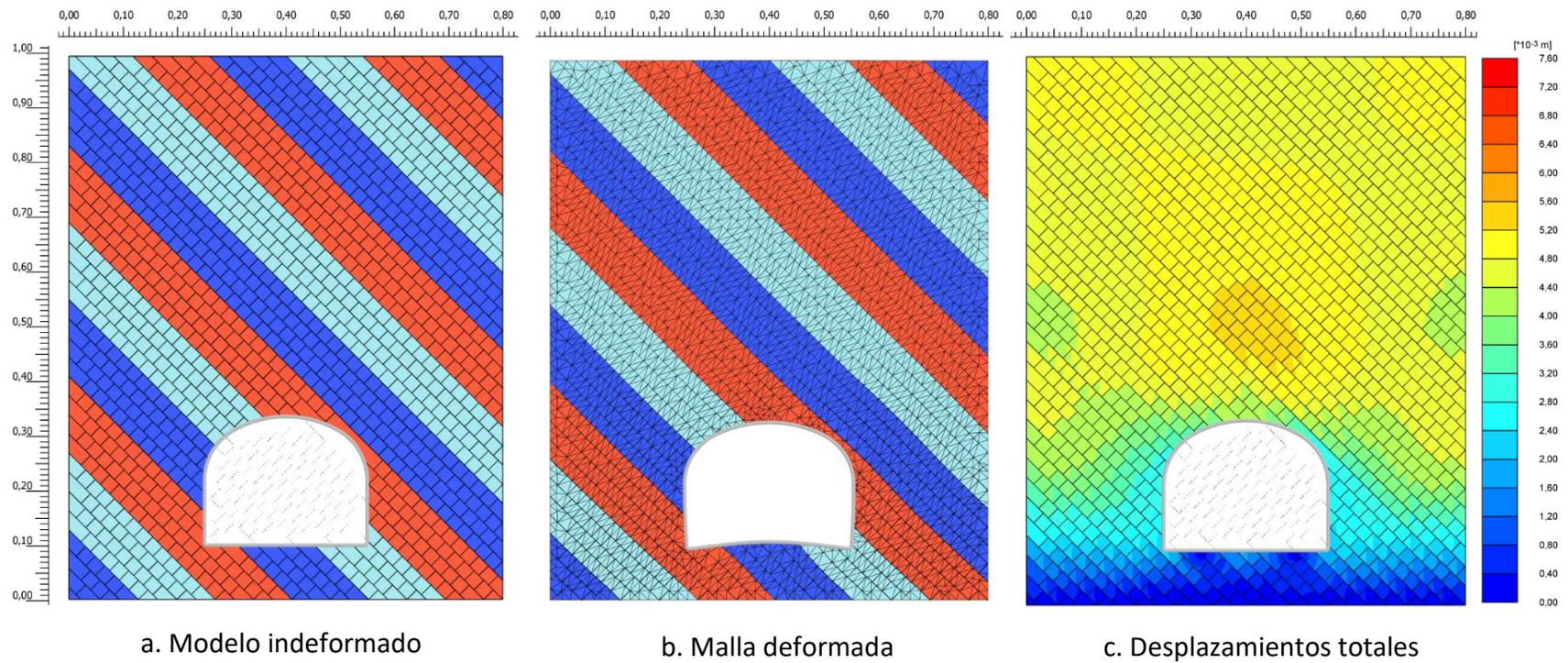
Modelo con capas inclinadas a 45°



Nota: La figura de la malla deformada tiene una escala de 3:1

Figura A.8

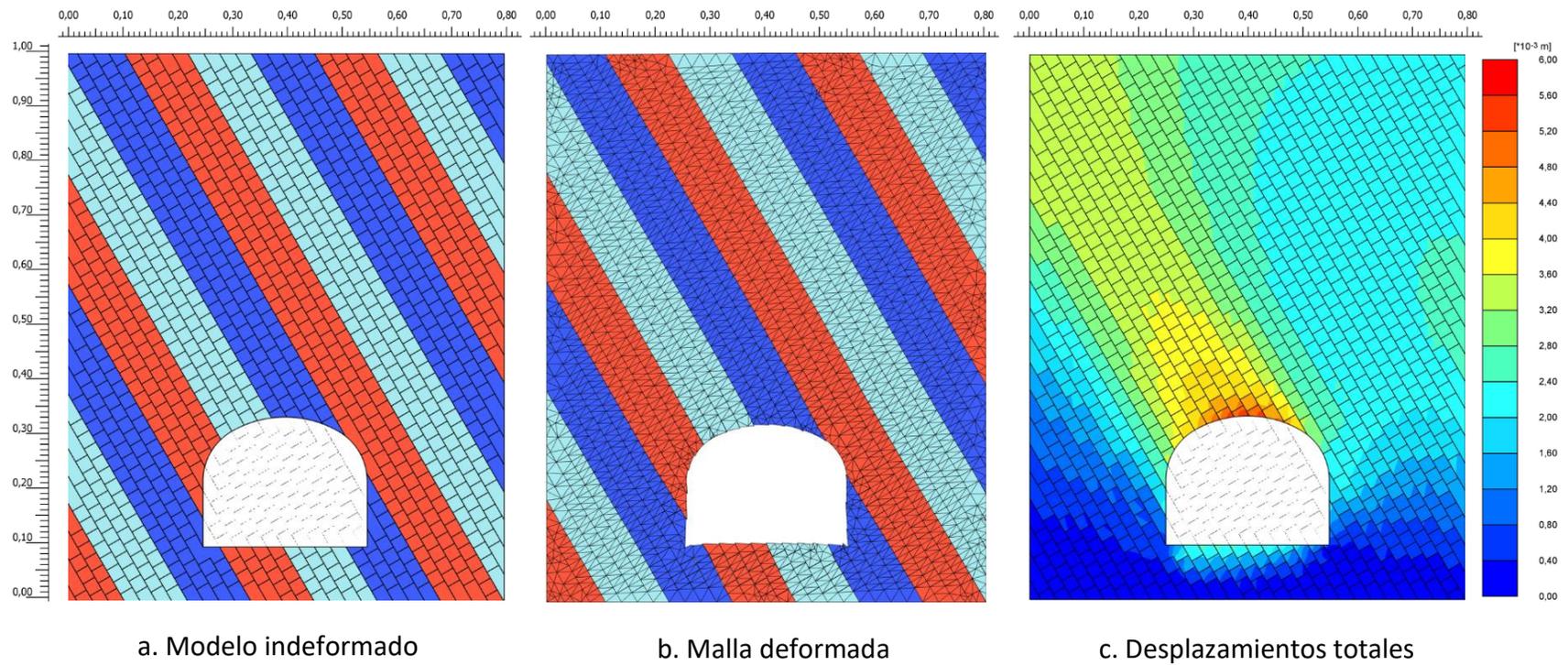
Modelo con capas inclinadas a 45° y revestimiento



Nota: La figura de la malla deformada tiene una escala de 3:1

Figura A.9

Modelo con capas inclinadas a 60°



Nota: La figura de la malla deformada tiene una escala de 3:1

Figura A.10

Modelo con capas inclinadas a 60° y revestimiento

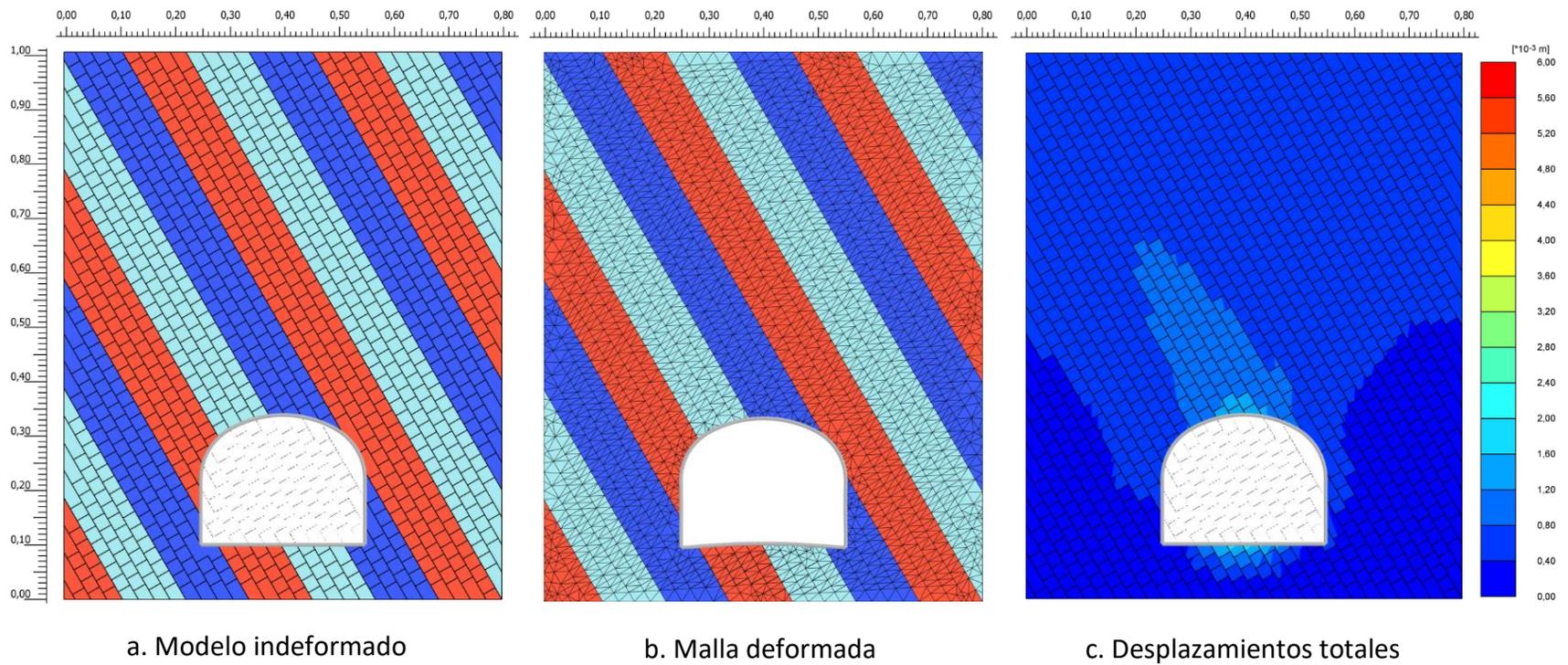


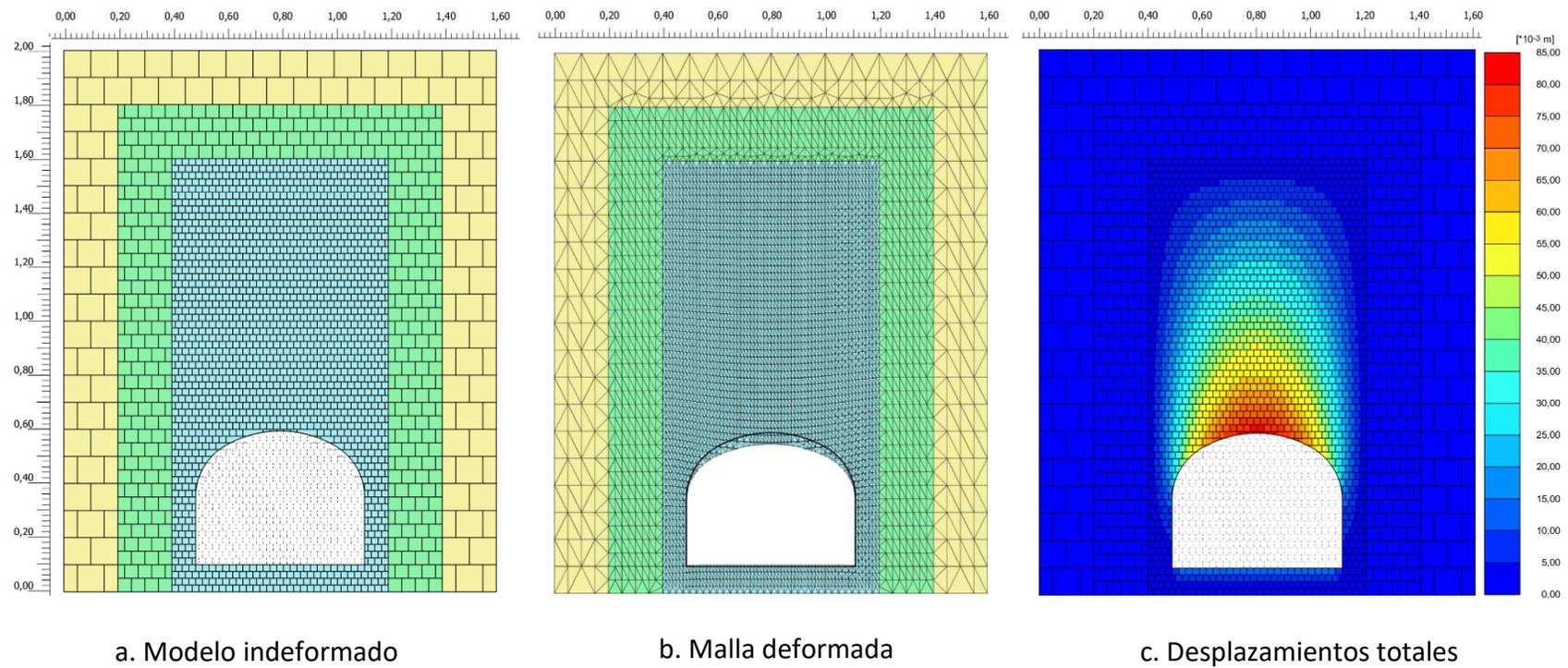
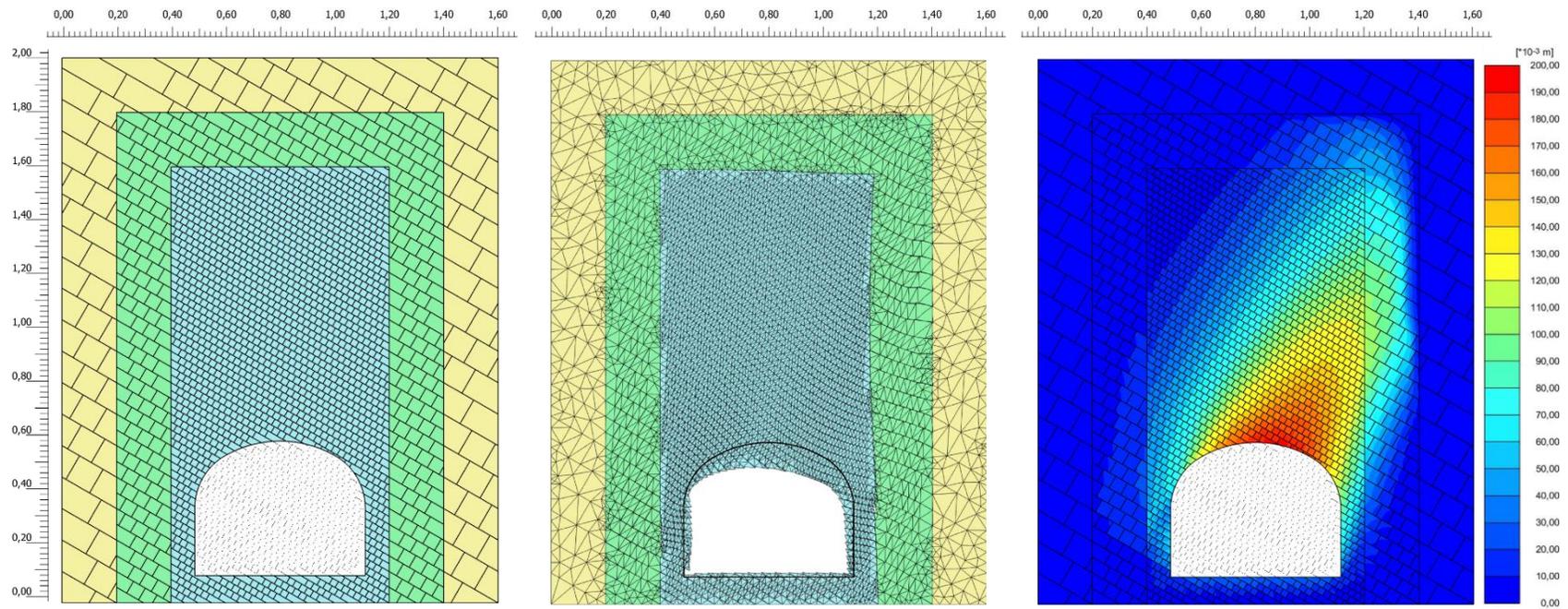
Figura A.11*Modelo zonificado con capas horizontales*

Figura A.12

Modelo zonificado con capas inclinadas a 30°



a. Modelo indeformado

b. Malla deformada

c. Desplazamientos totales

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barton, N. y Grimstad, E. (1994): "The Q-System following 20 years of application in NAMT support selection". 43rd Colloquy, Salzburgo (Austria). Felsbau. 6/94. pp 428-436.
- Barton, N., Lien, R., y Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics. Springer Verlag. Vol. 6. pp. 189-236.
- Bieniawski, Z.T. (1973). Engineering Classification of Jointed Rock Masses. Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng., 15. pp. 335-344.
- Bieniawski, Z.T. (1976): "Rock Mass Classification in Rock Engineering". Actas del Simp. Int. Exploration for Rock Engineering, pp 97-106, Ciudad del Cabo, ed. Z.T. Bieniawski. Balkema.
- Bieniawski, Z.T. (1989): "Engineering Rock Mass Classifications -A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering-". J.Wiley, Nueva York.
- Brinkgreve, R., Zampich, L.M. y Ragi Manoj, N. (2019a). *PLAXIS CONNECT Edition V20 General Information*. Países Bajos. Delft University of Technology & Plaxis.
- Brinkgreve, R. B. J., Zampich, L.M. y Ragi Manoj, N. (2019b). *PLAXIS 2D Reference manual CONNECT edition V20*. Países Bajos. Delft University of Technology & Plaxis.
- Brinkgreve, R., Zampich, L.M. y Ragi Manoj, N. (2019c). *PLAXIS Material Models CONNECT Edition V20*. Países Bajos. Delft University of Technology & Plaxis.
- Brinkgreve, R., Zampich, L.M. y Ragi Manoj, N. (2019d). *PLAXIS 2D Tutorial Manual CONNECT Edition V20*. Países Bajos. Delft University of Technology & Plaxis.

-
- Cortesi, A. y Carestia, L. (1988). *Análisis de deformación en túneles a partir de ensayos sobre modelos en dos dimensiones*. Edición del autor.
- Díaz, Y., López, E. y Cárcamo, J. (2008). *Plaxis como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad de Punta Arenas*. Punta Arenas, Chile: Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería en Construcción Universidad de Magallanes.
- Echegoyen, J. (2019). Método hipotético deductivo. Diccionario de Psicología Científica y Filosófica. <https://www.e-torredebabel.com/Psicologia/Vocabulario/Metodo-Hipotetico-Deductivo.htm>
- Fernández Collado, C., Baptista Lucio, P., y Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación*. Editorial McGraw Hill.
- García R. (1998), “Análisis de Deformación en Túneles a partir de Ensayos sobre Modelos en dos Dimensiones”. Sociedad Venezolana de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Boletín N°58.
- García, E. y García, R. (2004). El origen de las diaclasas en macizos rocosos y su consideración en obras de ingeniería. Sociedad Venezolana de Geotecnia (SVDG). XVIII Seminario.
- García, R. (2014). *Geología aplicada a la Ingeniería Civil*. Caracas. Publicaciones UCAB.
- García, R. (2018). Criterios geológico geotécnicos para un adecuado diseño de túneles en rocas. *Revista Tekhné*, 21, 72-79.

-
- Goodman, R. E. (1976). *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rock*. St. Paul, Minnesota, USA. West Publishing Company.
- Hoek, E. y Brown, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 34:1165-1186.
- Krynine, D.P. y Judd, W.R. (1961), *Principio de Geología y Geotecnia*. Editorial Omega, Barcelona, España.
- Lees, A. (2016). *Geotechnical Finite Element Analysis: A Practical Guide*. Institution of Civil Engineers Publishing.
- Navarro, R. U. (2004). *Manual de Anclajes en Ingeniería Civil*. U.D. Proyectos, E.T.S.I. Minas, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Pereiro, L. O. (2006). Aprendiendo sobre el Método de los Elementos Finitos. *Ingeniería Mecánica*, 9 (3).
- Potts, D. M. y Zdravković, L. (1999). *Finite element analysis in geotechnical engineering* (Vol. 1). Heron Quay, Londres, Reino Unido. Thomas Telford Publishing.
- Ramírez Oyanguren, P. y Alejano Monge, L. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid. Red DESIR.