



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Estudio paramétrico de las deformaciones plásticas para el diseño de túneles usando MEF

Tesis que para obtener el grado de

MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE
EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES

presenta:

Ing. José Emmanuel Álvarez Cornejo

Asesora:

Dra. Luisa Nicté Equihua Anguiano

Morelia, Michoacán, Diciembre del 2020.



Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a la **Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres** por abrirme las puertas de la institución y permitirme cumplir este logro personal.

Agradecer al **CONACYT** que apoyo mis estudios durante los últimos dos años.

También quiero agradecer a mi asesora, la **Doctora Luisa Nicté Equihua Anguiano** por permitirme desarrollar este tema y hacer nacer en mi el gusto por la Geotecnia y el Modelado Computacional. Agradecerle por la confianza, por atender de la mejor manera todas mis consultas y sobre todo por las pláticas siempre tan amenas.

Un agradecimiento para mis **Sinodales** que se han tomado el tiempo de revisar está tesis y las aportaciones que han realizado para mejorar esté trabajo.

Quiero agradecer a mis **Profesores** por compartir sus conocimientos conmigo durante estos dos años de Maestría.

Quiero hacer un agradecimiento muy especial a mis padres: **José Álvarez Piñón** y **Ana María Cornejo Piñón** y hermano **Daniel Michel** que me han impulsado y apoyado desde el inició en toda mi formación y me han ayudado a convertirme en la persona que soy el día de hoy. Los quiero.

Finalmente un enorme agradecimiento a mi esposa **Karla Mishell Salgado Pérez** que me motivo desde el inicio a ingresar a la maestría y ha estado conmigo estos dos años de estrés y desvelos, que me ha levantado en los tropiezos y me brindado todo su cariño para poder sacar esto adelante.

*El éxito nunca es definitivo. El fracaso nunca es fatal. Lo que cuenta es el valor
para continuar - Winston Churchill.*

Resumen

Los túneles han cobrado más importancia en años recientes ya que nos permiten reducir tiempos de traslado entre dos poblaciones, además, favorecen al desahogo vehicular en grandes zonas urbanas. Su diseño es una tarea que por naturaleza requiere de un análisis en tres dimensiones (3D), para garantizar la seguridad de los trabajadores y de los usuarios al transitar por estas obras subterráneas. En ese sentido, las propuestas de diseño se realizan para casos específicos debido a su importancia, el comportamiento complejo del suelo y los altos costos que requieren en tiempo y memoria computacional. Dentro del diseño, existen diversos métodos para el cálculo de las respuestas en el material. Los métodos de análisis utilizados en la práctica son los métodos analíticos y en dos dimensiones, los cuales en su concepción más simple se basan en la teoría elástica. Sin embargo, para tener mayor aproximación a la realidad se requiere considerar la condición elasto-plástica del material con ayuda de los métodos numéricos actuales. El presente trabajo propone una solución numérica para el diseño de túneles a través del método de elementos finitos (MEF) con ayuda del software RS3®. Se considera un material en condiciones elásticas y elasto-plásticas perfectas usando el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. Se realiza una comparación y análisis de los desplazamientos calculados con los modelos elásticos y plásticos a partir de los cuales se propone una normalización de los resultados. Finalmente, con las gráficas normalizadas se proponen ecuaciones que permiten generalizar el cálculo de desplazamientos en la periferia de cualquier túnel circular construido en material blando o arenoso, considerando su peso específico y módulo de elasticidad.

Palabras Clave: Túnel, Modelo, MEF, Plasticidad, Suelo.

Abstract

Tunnels have gained importance in recent years as they allow us to reduce travel times between two towns, and also favor vehicular relief in large urban areas. Its design is a task that by nature requires a three-dimensional (3D) analysis to guarantee the safety of workers and users when passing through these underground works. In this sense, the design proposals are made for specific cases due to their importance, the complex behavior of the soil and the high costs that they require in time and computational memory. Within the design, there are various methods for calculating the responses in the material. The analytical methods used in practice are analytical methods, which in their simplest conception are based on elastic theory. However, to have a closer approximation to reality, it is necessary to consider the elasto-plastic condition of the material with the help of existing numerical methods. This work proposes a numerical solution for tunnel design through the finite element method (FEM) with the help of RS3® software. It is considered a material with perfect elastic and elasto-plastic conditions using the constitutive Mohr-Coulomb model. A comparison and analysis of the displacements calculated with the elastic and plastic models is carried out from which a normalization of the results is proposed. Finally, with the normalized graphs equations are proposed that allow to generalize the calculation of displacements in the periphery of any circular tunnel built in soft or sandy material, considering only its specific weight and modulus of elasticity.

Key Words: Tunnel, Model, FEM, Plasticity, Soil.

Índice general

Agracedimientos	I
Índice general	VI
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XIII
Notación	XIV
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	4
1.1.1. Objetivo general	4
1.1.2. Objetivos específicos	4
1.2. Metodología	4
1.3. Resultados y aportaciones	5
2. Marco teórico	6
2.1. Elasticidad	6
2.2. Plasticidad	7
2.2.1. Modelo constitutivo de Mohr-Coulomb	7
2.3. Método de elementos finitos (MEF)	9
2.4. Interpolación polinómica	10
2.5. Efecto arco	11

3. Trabajo relacionado	13
3.1. Métodos analíticos	14
3.2. Métodos numéricos	14
3.3. Trabajos previos	17
4. Condiciones iniciales	19
4.1. Propiedades del material	19
4.2. Descripción del modelo empleado	20
4.2.1. Propiedades geométricas del modelo	21
4.2.2. Restricciones de desplazamiento del modelo	23
4.2.3. Malla generada por los modelos	24
5. Curva característica	26
5.1. Definición de la curva	26
5.2. Curva característica del modelo	27
5.2.1. Curva característica en RS2®	29
5.2.2. Revestimiento teórico y presión interna	30
6. Desplazamientos y normalización de los resultados	33
6.1. Distribución de esfuerzos	33
6.2. Desplazamientos totales.	34
6.2.1. Desplazamientos elásticos totales	34
6.2.2. Desplazamientos plásticos totales	37
6.3. Modelos numéricos con presión interna Pa	40
7. Modelo matemático para el cálculo de desplazamientos	44
7.1. Normalización de los desplazamientos	44
7.2. Obtención de ecuaciones de desplazamiento	53
8. La validación del Modelo	61
8.1. Validación de ecuaciones	61

9. Conclusiones y comentarios	73
9.1. Conclusiones	73
9.2. Trabajo futuro	74
10. Anexos	75
10.1. Gráficas R3 con Pa	75
10.2. Calculo de ecuaciones mediante Wolfram Mathematica	76
10.3. Gráficas de validación de ecuaciones	79
Bibliografía	81

Índice de figuras

2.1. Gráfica de deformación elástica lineal.	6
2.2. Gráfica Plasticidad Perfecta.	7
2.3. Envolvente de falla de Mohr-Coulomb	9
2.4. Modelo de elementos finitos.	10
2.5. Reacción a la excavación.	11
2.6. Reacción del material debido a la excavación.	12
3.1. ábaco de desplazamientos de Iván Rubio.	18
4.1. Representación de la condición de esfuerzos Geoestática.	19
4.2. Dimensiones y segmentación del modelo.	22
4.3. Restricciones desplazamientos del modelo.	24
4.4. Tipo de mallado empleado.	25
5.1. Curva Característica del comportamiento del material por el efecto de la excavación en túneles.	27
5.2. Dimensiones geométricas del modelo en 2D generado en RS2®.	28
5.3. Reducción de la presión Pa a partir de la geoestática <i>in situ</i>	29
5.4. Gráfica de Curva Característica en RS2®.	29
6.1. Modelos numéricos mostrando las cinemáticas para a) Concentra- ción de los desplazamientos. b) Distribución de esfuerzos.	33

6.2. Desplazamientos totales para túnel con radio de 3m en comportamiento elástico.	35
6.3. Desplazamientos totales para túnel con radio de 5m en comportamiento elástico.	36
6.4. Desplazamientos totales para túnel con radio de 7m en comportamiento elástico.	36
6.5. Desplazamientos con comportamiento elástico en la entrada del túnel para todos los radios, caso de estudio.	37
6.6. Desplazamientos totales para túnel con radio de 3m en comportamiento plástico.	38
6.7. Desplazamientos totales para túnel con radio de 5m en comportamiento plástico.	38
6.8. Desplazamientos totales para túnel con radio de 7m en comportamiento plástico.	39
6.9. Desplazamientos con comportamiento plástico en la entrada del túnel para todos los radios, caso crítico.	40
6.10. Modelo con presión radial interna $P_a=300\text{kPa}$	41
6.11. Desplazamientos totales para $r=3\text{m}$ con presión $P_a=300\text{kPa}$	42
6.12. Desplazamientos totales para $r=5\text{m}$ con presión $P_a=300\text{kPa}$	42
6.13. Desplazamientos totales para $r=7\text{m}$ con presión $P_a=300\text{kPa}$	43
6.14. Desplazamientos totales con presión $P_a=300\text{kPa}$	43
7.1. Desplazamientos normalizados para túnel con radio de 3m en comportamiento elástico.	46
7.2. Desplazamientos normalizados para túnel con radio de 5m en comportamiento elástico.	46
7.3. Desplazamientos normalizados para túnel con radio de 7m en comportamiento elástico.	47

7.4. Desplazamientos normalizado en comportamiento elástico, caso de estudio.	48
7.5. Desplazamientos normalizados para túnel con radio de 3m en comportamiento plástico.	49
7.6. Desplazamientos normalizados para túnel con radio de 5m en comportamiento plástico.	49
7.7. Desplazamientos normalizados para túnel con radio de 7m en comportamiento plástico.	50
7.8. Desplazamientos normalizados en comportamiento plástico, caso crítico.	50
7.9. Desplazamientos normalizados para r=3m con presión Pa=300kPa.	51
7.10. Desplazamientos normalizados para r=5m con presión Pa=300kPa.	51
7.11. Desplazamientos normalizados para r=7m con presión Pa=300kPa.	52
7.12. Normalización de desplazamientos en comportamiento plástico con presión Pa=300kPa.	52
7.13. Obtención de ecuaciones	54
7.14. Comparación para un radio de 3m de desplazamientos totales entre los valores del modelo y las ecuaciones.	58
7.15. Comparación para un radio de 5m de desplazamientos totales entre los valores del modelo y las ecuaciones.	59
7.16. Comparación para un radio de 7m de desplazamientos totales entre los valores del modelo y las ecuaciones.	60
8.1. Comparación con el caso real de todos los desplazamientos obtenidos.	68
8.2. Comparación de ecuación elástica y plástica con los casos reales. .	69
8.3. Comparación caso real con ecuaciones plásticas R3, R5 y R7 con radios distintos.	70
8.4. Comparación caso real con ecuaciones plásticas y ecuación para R7.	71
8.5. Comparación caso real con ecuaciones elásticas y ecuación para R7.	72

10.1. R3 con distintos valores de Pa	75
10.2. Calculo de ecuación R3 elástica.	76
10.3. Calculo de ecuación R5 elástica.	76
10.4. Calculo de ecuación R7 elástica.	77
10.5. Calculo de ecuación R3 plástica.	77
10.6. Calculo de ecuación R5 plástica.	78
10.7. Calculo de ecuación R7 plástica.	78
10.8. Comparación de Ecuación Elástica con caso real.	79
10.9. Comparación de Ecuación Plástica con caso real.	79
10.10Comparación de Ecuación R3 con caso real.	80
10.11Comparación de Ecuación R5 con caso real.	80

Índice de tablas

1.	Notación general	XIV
4.1.	Propiedades del Material	20
4.2.	Resumen de los modelos realizados.	22
4.3.	Propiedades del mallado de los modelos.	25
5.1.	Revestimiento teórico de concreto.	31
7.1.	Valores seleccionados para el cálculo de las ecuaciones elásticas.	55
7.2.	Valores seleccionados para el cálculo de ecuaciones plásticas con Pa=300kpa.	55
8.1.	Propiedades geométricas y de material utilizadas para la validación de ecuaciones.	63
8.2.	Criterio para la elección de las ecuaciones a usar.	63
8.3.	Factor de cálculo Y obtenido de las ecuaciones.	65
8.4.	Desplazamientos obtenidos con las ecuaciones propuestas.	66

Notación

La notación empleada en este documento se resume en la Tabla 1.

Tabla 1: Notación general

Símbolo	Significado
MEF	Método de Elementos Finitos
2D	Dos Dimensiones
3D	Tres Dimensiones
X	Avance de Excavación
Y	Factor de Cálculo
δ	Desplazamiento
R3	Radio de 3 metros
R5	Radio de 5 metros
R7	Radio de 7 metros
γ	Peso Específico
H _o	Profundidad al centro de la sección
r	Radio del Túnel
r_{max}	Radio Máximo

Símbolo	Significado
E	Módulo de Elasticidad
E_{max}	Módulo de Elasticidad Máximo
EL	Comportamiento Elástico
PL	Comportamiento Plástico
Pa	Presión Radial Interna
LDP	Loading Displacement Profile
TBM	Tunnel Boring Machine
EPB	Earth Pressure Balance

Capítulo 1

Introducción

Los túneles son obras que a través de los años se han construido para que cumplan con diversas funciones [1]. En el área de la hidráulica suelen construirse cuando se requiere facilitar el flujo de agua en centrales hidroeléctricas o para realizar grandes obras de drenaje. En las vías terrestres, los túneles se han empleado para acortar distancias entre poblaciones ya que nos permiten librar obstáculos topográficos de gran magnitud. Además, en años recientes, se han convertido en una excelente alternativa para disminuir la congestión vehicular en áreas urbanas y crear espacios más funcionales [2].

El diseño de un túnel es una tarea que por naturaleza requiere del modelado en tres dimensiones [3]. Al realizar un diseño, se busca encontrar la respuesta que tendrá el material al ser excavado. El tipo de respuesta depende de las propiedades del material que se encuentra en el área de construcción y del método que se use para realizar la excavación. Sin embargo, el comportamiento del suelo es complejo por lo que es inevitable que se presenten desplazamientos al momento de la excavación [4]. Estos desplazamientos pueden presentarse en la periferia del túnel o en el frente de la excavación y ser de tipo elástico (recuperables) o tipo plástico (permanentes) generando diferentes condiciones de estabilidad.

Sin embargo, las propuestas de diseño sufren demoras debido la gran cantidad de pruebas y estudios que deben realizarse para conocer las propiedades de los materiales a excavar. Aunado a esto, es necesario que el ingeniero tenga un amplio conocimiento geotécnico que le permita interpretar los resultados de las pruebas

y a partir de esto hacer uso de los diversos modelos constitutivos que existen para el cálculo de las respuestas.

Una alternativa de solución a las demoras e incrementar la seguridad en los túneles se encuentra en el modelado numérico computacional [5]. El modelado computacional, a través del método de elementos finitos, ha cobrado importancia en años recientes [6] ya que nos permite realizar una representación de la realidad y obtener resultados de manera eficiente. Los modelos que se realizan a través del MEF pueden ser en dos dimensiones o tres dimensiones según la complejidad del problema e incluyen todas las propiedades de material y excavación necesarias para el cálculo de las respuestas.

A pesar de la popularidad que han adquirido modelos numéricos, el cálculo de las diferentes variables en un modelo tridimensional suele tener tiempos computacionales muy elevados. Por consiguiente, el diseñador asume el riesgo de simplificar sus propuestas de diseño y realizar modelos bidimensionales, ya que conocer una respuesta rápida de los desplazamientos y del comportamiento del túnel es primordial para no detener la construcción, a causa de los altos costos que esto representa y de lo apremiante que resulta la realización de una obra [7], obteniendo valores que le den solo una idea del comportamiento del suelo al momento de realizar la excavación. Además, los métodos que realizan para sus diseños son aplicables solo los para casos específicos de material y tipo de túnel. Lo anterior ha contribuido a la falta de propuestas 3D que generalicen el cálculo de los desplazamientos del suelo de manera rápida y segura.

A partir de la necesidad de un método que agilice y facilite la obtención de desplazamientos al diseñar un túnel. En el presente trabajo, se propone el estudio del comportamiento plástico en dos dimensiones (2D) y tres dimensiones (3D) de los túneles, usando el método de elementos finitos. Se empleó el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb en su parte elasto-plástica perfecta para realizar las simulaciones. Con los resultados de los modelos computacionales se obtuvieron gráficas de desplazamientos totales

y normalizados. A partir de las normalizaciones se plantearon ecuaciones que agilizan el proceso de cálculo de desplazamientos para diversos tipos de suelo. Las ecuaciones fueron probadas al comparar los desplazamientos que se obtienen contra los que se presentan en los trabajos de diferentes autores. Además, se hizo un análisis para identificar las diferencias entre el comportamiento elástico y plástico y observar si alguna de las ecuaciones planteadas funciona en cualquier situación.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Proponer un modelo matemático para el cálculo de los desplazamientos en el diseño de túneles, considerando el comportamiento elástico y plástico del suelo.

1.1.2. Objetivos específicos

- Analizar el comportamiento de los desplazamientos del suelo, para entender la influencia de los parámetros del suelo y geométricos del túnel en los resultados.
- Observar las diferencias entre las deformaciones obtenidas por efectos de la excavación para el comportamiento elástico y plástico en la periferia del túnel, e identificar cual presenta mayor aproximación con la realidad.
- Comparar las ecuaciones plásticas y elásticas obtenidas en este trabajo con otros autores para la validación de los resultados.

1.2. Metodología

1. Caracterización de los parámetros y variables del suelo así como de la geometría del túnel, para simular el comportamiento numérico de la obra real.
2. Realizar el modelado de túneles, mediante el Método de Elementos Finitos, en dos dimensiones (2D) y tres dimensiones (3D) y obtener sus desplazamientos plásticos y elásticos.
3. Parametrizar los desplazamientos calculados y obtener gráficas normalizadas que permitan observar la tendencia de los resultados obtenidos, comparando las diferencias entre ambos comportamientos elástico y plástico.

4. Del análisis de las gráficas normalizadas, proponer ecuaciones para el cálculo de los desplazamientos en 3D a partir de modelos numéricos.

1.3. Resultados y aportaciones

- Modelo numérico elasto-plástico de túneles para la obtención de desplazamientos en la periferia de túneles de diferentes secciones.
- Estudio paramétrico para comparar los desplazamientos con comportamiento elástico y plástico del material.
- Uso de los modelos en dos dimensiones (2D) para la obtención de la curva característica.
- Ecuaciones polinomiales para el cálculo tridimensional de desplazamientos en la periferia.
- Validación de las ecuaciones por medio de la comparación de las ecuaciones con trabajos que presentan casos reales de túneles.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Elasticidad

Una estructura se deforma cuando está sujeta a cargas externas, si esta deformación es reversible, es decir, si la deformación se recupera instantáneamente al remover las cargas externas se dice que es una deformación elástica. La relación entre carga-desplazamiento y esfuerzo-deformación es lineal (Linea O-A fig. 2.1). Se asume que la estructura del material elástico es homogénea y continua, de acuerdo a la teoría de la elasticidad y es considerada la más simple para la modelación de los materiales. Por lo tanto, se considera que la estructura del material es isotrópica, es decir, sus propiedades son las mismas en todas las direcciones. [8]

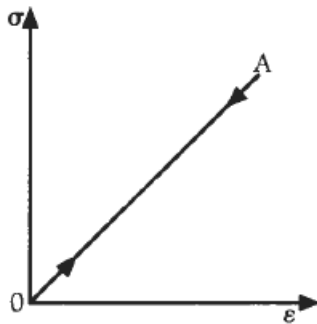


Figura 2.1: Gráfica de deformación elástica lineal.

2.2. Plasticidad

La teoría de la plasticidad estudia las deformaciones plásticas y los estados límite de carga de los materiales y estructuras. Esta teoría nos dice que la deformación de un material es plástica si esta es irreversible, es decir, cuando un material es sometido por primera vez a una carga máxima, la deformación no se recuperará al remover la carga (Curva O-A fig. 2.2). Si el material es cargado de nuevo con cargas menores a la máxima previa se observará un respuesta elástica inicial, es decir existirá una relación lineal entre la carga y la deformación (tramo B-C fig. 2.2). Sin embargo, en cuanto la carga máxima previa sea excedida el material volverá a sufrir deformaciones permanentes al ser descargado. [8]

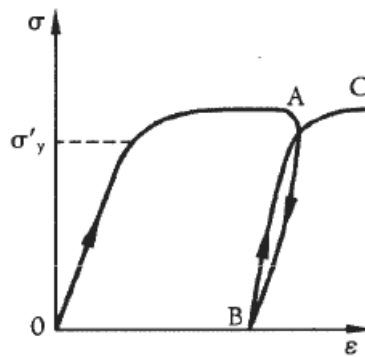


Figura 2.2: Gráfica Plasticidad Perfecta.

2.2.1. Modelo constitutivo de Mohr-Coulomb

Esfuerzo Normal: Relación entre la fuerza aplicada y el área sobre la que actúa. El esfuerzo normal actúa sobre los ejes de simetría o de manera axial a la sección.

Esfuerzo Cortante: Es la resistencia interna por unidad de área que la masa del suelo puede ofrecer a la falla y al deslizamiento a lo largo de cualquier plano

en su interior. [9]

El modelo de falla de Mohr-Coulomb indica que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y no solo por la presencia de un esfuerzo máximo normal o bien de un esfuerzo máximo cortante (Mohr 1900).

$$\tau_f = f(\sigma') \quad (2.1)$$

La ecuación anterior (ec: 2.1) representa una curva, sin embargo para la mayoría de los problemas de mecánica de suelos, es suficiente aproximar el esfuerzo cortante sobre el plano de falla como una función lineal del esfuerzo normal, esto se realiza al combinarla con los parámetros establecidos en la teoría Coulomb (1776). Esta relación se describe como:

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi' \quad (2.2)$$

donde τ_f corresponde al esfuerzo cortante sobre el plano de falla, el cual es igual a la suma de la cohesión (c) y el producto del esfuerzo efectivo normal sobre el plano de falla σ' por la tangente del ángulo de fricción interna ϕ' . [9]

De manera gráfica, el criterio de falla de Mohr-Coulomb (fig. 2.3) se representa a través de una envolvente de falla tangencial al círculo de Mohr. El diámetro de este círculo será el formado por los esfuerzos mínimo (σ_{min}) y máximo (σ_{max}) obtenidos por medio de pruebas triaxiales en la geotecnia. El valor donde hacen contacto con la envolvente de falla será el esfuerzo cortante máximo (τ_f).

La Teoría considera que los materiales en estudio son ideales, esto quiere decir, que se encuentran en un estado de continuidad, uniformidad, isotropía, y que son homogéneos. Este modelo tiene aplicación en el área de la geotecnia para conocer la

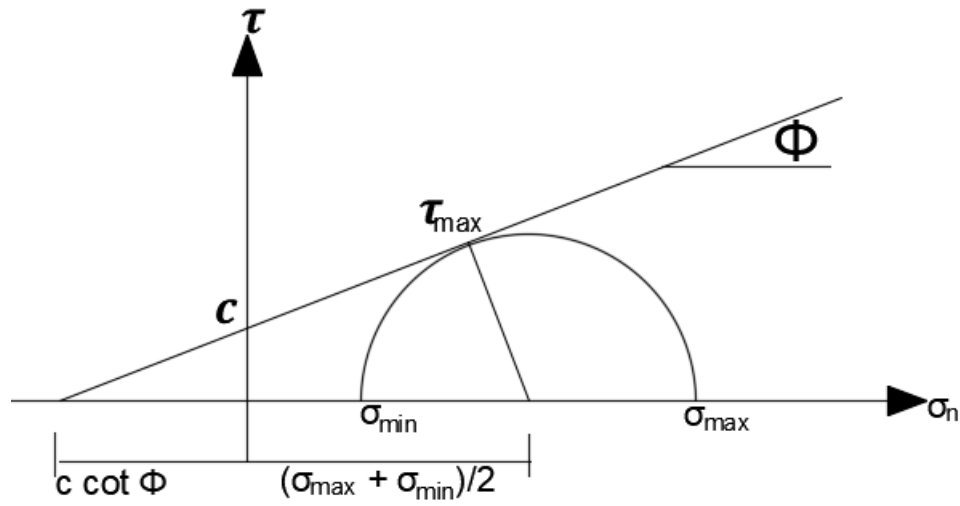


Figura 2.3: Envolvente de falla de Mohr-Coulomb

resistencia de las partículas de suelos y rocas, encontradas en el terreno destinado a obras de infraestructura civil [10].

2.3. Método de elementos finitos (MEF)

Es uno de los métodos más usados en la actualidad para la solución de problemas prácticos. Se basa en principios algorítmicos básicos para llevar a cabo procesos de cálculo sencillos. Es decir, discretiza o subdivide un problema complejo en elementos más simples para facilitar el análisis. Cada uno de los elementos del medio tiene un comportamiento ante distintas condiciones, que depende también de los elementos vecinos, ya que están unidos por puntos llamados nodos en cada uno de sus vértices [10].

El MEF realiza sus cálculos con la ayuda de un sistema global de ecuaciones (ec. 2.3) conformado por una matriz de rigidez $[K]$, un vector de fuerzas $\{f\}$ y un vector de desplazamientos $\{\delta\}$, lo cual se expresa: [11]

$$[K] * \{\delta\} = \{f\} \quad (2.3)$$

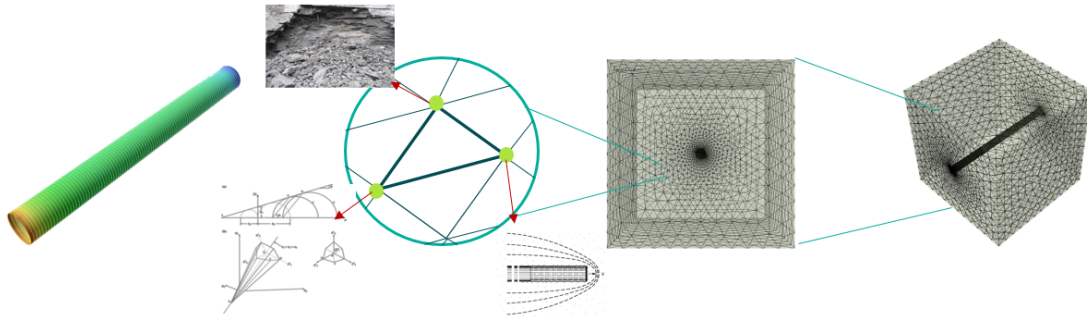


Figura 2.4: Modelo de elementos finitos.

2.4. Interpolación polinómica

La interpolación es el proceso de determinar una función que represente exactamente una colección de datos [12]. Es decir, sea $f(x)$ un polinomio de n -ésimo grado tal que:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (2.4)$$

La interpolación polinomial consiste en determinar el polinomio único de n -ésimo grado que se ajuste a $n+1$ puntos. Además, este polinomio proporciona una fórmula para calcular valores intermedios [13].

En algunos problemas solo tendremos valores en un conjunto de datos, mientras que en otros, buscaremos representar una función mediante otra más simple. En el primer caso hablaremos de interpolación de datos, y en el segundo de interpolación de funciones. En ambos casos el objetivo es obtener estimaciones de la función en puntos intermedios, aproximar la derivada o la integral de la función en cuestión o, simplemente, obtener una representación continua o suave de las variables del problema [12].

2.5. Efecto arco

Al momento de diseñar un túnel es importante conocer los efectos que se producirán al realizar la excavación, a lo que llamaremos *Reacción*. La reacción es la respuesta a la deformación producto de la acción (método de excavación) el cual, a su vez, se elige dependiendo del medio o material en el cual se vaya a construir el túnel. De manera general, ambos factores pueden clasificarse, en su máxima expresión, como se muestra en la figura 2.5 [3].

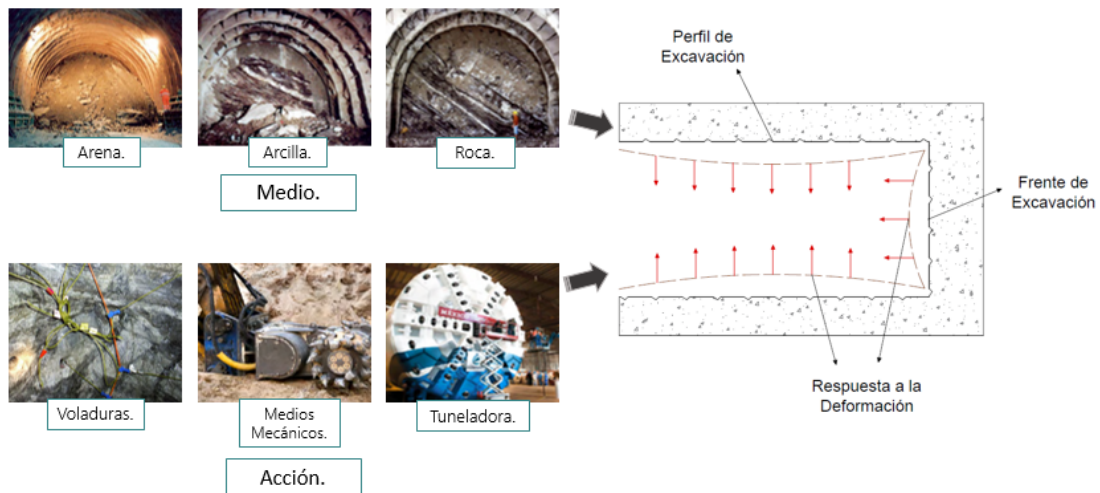


Figura 2.5: Reacción a la excavación.

Por otra parte, la respuesta a la deformación se presenta en el frente del túnel y/o en su perímetro (bóveda y contrabóveda) debido a una alteración del estado de esfuerzos (Figura 2.6), el cual se encuentra en principio en equilibrio, sin embargo al extraer material al momento de la excavación el esfuerzo principal menor se reduce a cero. Esto genera que los esfuerzos busquen el medio para encontrar nuevamente el equilibrio, por lo que se redistribuyen al rededor de la sección excavada generando lo que se conoce como **Efecto Arco**.

Existen tres tipos de efecto arco: *Natural*, en el cual los esfuerzos se redistribuyen alrededor del túnel generando un estado de equilibrio; *Desviado*, donde los esfuerzos se redistribuyen lejos de la excavación ocasionando desplazamientos ha-

cia el interior de la sección del túnel antes de lograr su equilibrio; y *Nulo*, en el que el material no soporta la nueva distribución de los esfuerzos desembocando en el colapso del túnel. Por su parte, el frente de la excavación sufre deformaciones por efectos del reacomodo de los esfuerzos y del material, presentándose abultamiento o incluso la falla del frente.

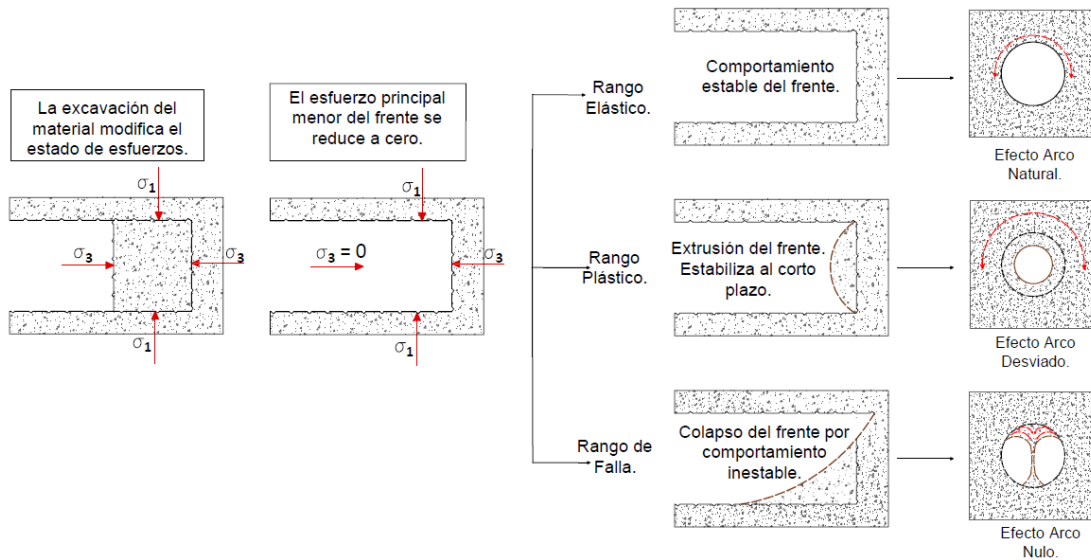


Figura 2.6: Reacción del material debido a la excavación.

Por otra parte, en la figura 2.6 se observa que tipo de efecto arco representa a su vez un comportamiento diferente del suelo. Para el efecto arco natural tendremos presencia de desplazamientos recuperables, hasta cierto punto, dentro de un comportamiento elástico del material. Si los desplazamientos son visibles y es necesario aplicar un método de estabilización para controlarlos, estaremos presencia de un comportamiento plástico del suelo. Finalmente, el intervalo de falla se presenta cuando el material colapsa al momento de la excavación.

Capítulo 3

Trabajo relacionado

En la actualidad, es indispensable que las obras subterráneas se analicen y diseñen empleando programas de cómputo avanzado [14]. Diversos autores han dedicado tiempo a la investigación del comportamiento del suelo con el fin de reducir los tiempos computacionales y ofrecer respuestas inmediatas y certeras que atiendan a las necesidades del constructor. Debido a esto han surgido diferentes métodos para el diseño de túneles los cuales se han adaptado a las necesidades de cada caso en particular. Estos métodos se dividen en [10]:

- **Empíricos:** Arrojan generalmente soluciones rápidas y sencillas basado en la experiencia de casos particulares. Son antecesores de los métodos analíticos y numéricos.
- **Analíticos:** Estudian los estados de esfuerzo a los que se encuentran sometidos los materiales de excavación.
- **Numéricos:** Se basan en el modelado computacional y la predicción de fenómenos de deformación en las obras. Los métodos numérico usan el modelado de elementos finitos como herramienta de cálculo entre otras metodologías que hay en la práctica.

A continuación, se presentan algunas investigaciones donde los autores emplean estos métodos para realizar sus trabajos.

3.1. Métodos analíticos

Naotoshi Yasuda (2017) [15] Propone la solución elástica de un túnel circular en 2D con vacíos entre el revestimiento y el suelo producto de una mala práctica constructiva. Estos vacíos provocan deformaciones no deseadas en el revestimiento. Yasuda analiza el comportamiento del suelo aplicando su modelo bajo dos condiciones: sin considerar un recubrimiento del túnel y considerando vacíos entre el revestimiento y el material en la periferia. Realiza la obtención de momentos flexionantes por medio del cálculo de momentos esfuerzos axiales.

Elaine Ibrahim (2015) [16] Presenta un mecanismo de falla en tres dimensiones de un túnel circular, considerando un escudo de aire y un suelo friccionante multicapa. El análisis de los esfuerzos y deformaciones se realiza en el frente de la excavación. El mecanismo no es aplicable para suelos con diferentes valores de cohesión del material. Su método permite realizar diseños preliminares reduciendo el tiempo computacional.

Raúl Fuentes (2015) [17] Llevó a cabo un análisis elástico en dos dimensiones del suelo con la obtención de momentos flexionantes y cargas axiales en la periferia del túnel. La sección considerada en su investigación es circular con revestimiento monolítico. Como dato interesante, Fuentes aplica su método no solo al diseño de túneles si no también a la medición de desplazamientos en pilotes y muros de contención.

3.2. Métodos numéricos

Vlachopoulos y Diederich (2014) [18] realizan una comparación entre los métodos más comunes de modelado en 2D con los efectos producidos en los mo-

delos 3D. Para hacer esta comparación, se basan en un perfil longitudinal de desplazamientos (LDP, por sus siglas en inglés) en donde los resultados obtenidos se grafican de manera normalizada. Las simulaciones se realizaron considerando una masa de roca y el criterio de falla elasto-plástico de Mohr-Coulomb. La finalidad de esta investigación consiste en revisar las limitaciones del modelado 2D. Además proponen una serie de recomendaciones para la colocación adecuada del revestimiento; para ello proponen una versión de la ecuación de Sigmoid (ec. 3.1):

$$\frac{u}{u_{max}} = \frac{1}{1 + e^{0,6(1-0,1\frac{S}{R})(\frac{S}{R}-5\frac{X}{R}-1)}} \quad (3.1)$$

en donde X es la distancia a partir del frente, R es el radio del túnel, S es la distancia entre el frente y el soporte y u_{max} es el desplazamiento máximo del soporte.

Oriol Anau y Climent Molins (2012) [19]. Analizan la interacción que existe entre los anillos estructurales del revestimiento del túnel. En su trabajo observan los desplazamientos y momentos que se producen en la unión de varios anillos, y la forma en que trabajan en conjunto, así como el comportamiento de un anillo aislado. Además, hacen una revisión de las deformaciones que sufre el revestimiento al incrementar la carga longitudinal y hacer variaciones en los valores de k_0 .

Amadou Jallow et al. (2019) [4]. Realizan un modelo elasto-plástico de túneles gemelos en un suelo multicapa. Jallow mide los asentamientos del suelo generados por consolidación así como los generados por la presencia de agua. Aplican las teorías de Soft soil y Hardening soil para el cálculo de las deformaciones y la presión de poro. Dentro de la metodología seguida por Jallow, se realizó en primer lugar el modelo correspondiente al túnel con profundidad mayor, siendo los resultados de este los que tuvieron mayor utilidad para su investigación. Por otra parte, el segundo túnel analizado en Jallow et. al. fue considerado solo para

los desplazamientos generados por consolidación. Para la validación del trabajo se realizó un modelo considerando un suelo homogéneo de arcilla.

H. Katebi et al. (2015) [20]. Katebi et al. presentan un estudio paramétrico de un túnel construido en un suelo arenoso para el cálculo de carga axial y momento flexionante. Para parametrizar su estudio, Katebi hace variaciones en propiedades geométricas del túnel como la profundidad, diámetro, distancia con construcciones cercanas etcétera. Además, con su modelo mide la convergencia (deformación) del túnel, esta deformación es comparada con los resultados de Davarphana (2011) [21] para un túnel construido en limo, con el cual Katebi valida su modelo.

S. Miro et al. (2013) [22]. Los autores realizan un análisis estadístico de sensibilidad para detectar los parámetros del material que más influyen en la respuesta del subsuelo a la excavación de un túnel. Para calibrar su análisis, realizan un modelo 3D con los parámetros del suelo en estudio y observan los asentamientos que se presentan en la superficie y en la parte inferior del túnel.

Xing-Tao Lin et al. (2019) [6]. Lin et al. realizan el modelo de un túnel circular excavado en un suelo multicapa. Este modelo es validado usando resultados medidos en campo. Posteriormente simplifican el modelo usando un suelo arenoso de grano medio, con el cual obtienen los asentamientos producidos a causa de la excavación. Lin et al. añaden presión interna en el túnel para estabilizar tanto el frente de excavación como la bóveda. Xin-Tao estima el efecto arco que se produce al rededor de la excavación a través de los esfuerzos generados en la periferia del túnel.

3.3. Trabajos previos

Fernando Viveros, Luisa Equihua et. al. (2017) [23] Presentan un nomograma de desplazamientos obtenido a través de mallas equivalentes entre modelos 2D y 3D. Viveros et al. usa el método de reducción de presión interna del túnel para el cálculo de los desplazamientos. La sección de túnel utilizada para este estudio fue circular. Se realizaron variaciones en las dimensiones de la sección y en el módulo de elasticidad del suelo, con el fin de conocer la influencia que tienen estos parámetros en los desplazamientos de la periferia, observándose una misma tendencia en las gráficas normalizadas de los desplazamientos.

Equihua Anguiano, Rubio Saldaña, et. al. [24], establecen un nomograma de desplazamientos para túneles con secciones circular y herradura. Los modelos se realizaron en 2D y 3D con los programas RS2® y RS3® respectivamente. Se utilizaron áreas equivalentes para el cálculo de las secciones en herradura con respecto a las áreas de los túneles circulares. Los resultados obtenidos permiten obtener desplazamientos en la periferia del túnel para secciones circulares, así como en la clave y la contraboveda de la sección en herradura. La aportación más importante realizada por Equihua Anguiano et al. es el cálculo de desplazamientos sin la necesidad de ejecutar un modelo 3D.

Iván Rubio (2018) [10], realizó la propuesta de un ábaco de desplazamientos, considerando el comportamiento elástico del suelo. Rubio (2018) realiza una extrapolación de los desplazamientos obtenidos por medio de MEF en tres dimensiones a un modelo en dos dimensiones. Propone una solución en la cual los parámetros del suelo como la cohesión y el ángulo de fricción interna no son necesarios para el cálculo de los desplazamientos facilitando así la obtención de los mismos y reduciendo los tiempos computacionales.

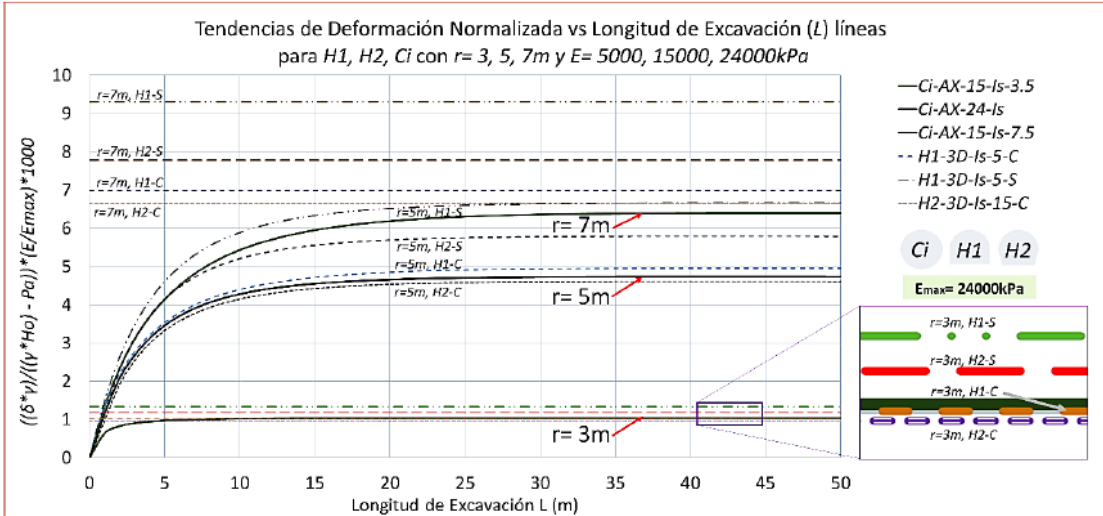


Figura 3.1: ábaco de desplazamientos de Iván Rubio.

Capítulo 4

Condiciones iniciales

4.1. Propiedades del material

El material utilizado para el modelo es una arcilla típica de la ciudad de Morelia, Michoacán, sus propiedades se muestran en la Tabla 4.1. Se considera un estado de esfuerzos isotrópico homogéneo con un coeficiente de presión lateral $k=1$, es decir, los esfuerzos se aplican de manera constante en todas las direcciones ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$). Los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 se calcularon a partir de la condición inicial geostática a través de la siguiente expresión (ecuación: 4.1)

$$\sigma_n = \gamma * H_o \quad (4.1)$$

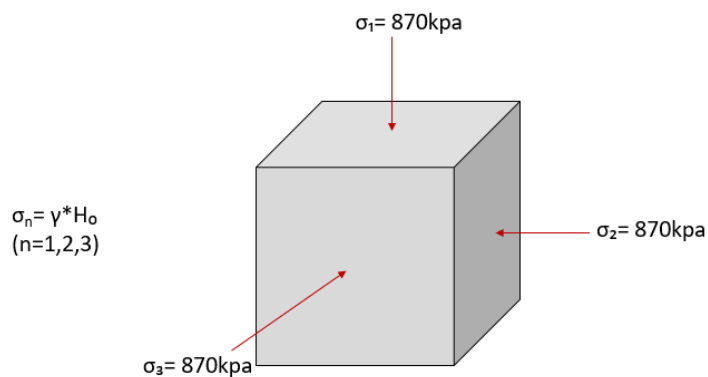


Figura 4.1: Representación de la condición de esfuerzos Geoestática.

donde γ es el peso específico del suelo, H_o es la profundidad de excavación medida al centro de la sección y σ_n los esfuerzos principales. Además, se tomarán

en cuenta solo los esfuerzos presentes en el medio, dejando de lado el peso propio del material, para evitar hundimientos debidos al peso por el tamaño del modelo, así como la obtención de resultados numéricamente incorrectos.

Tabla 4.1: Propiedades del Material

Material	Arcilla
Cohesión (c)	12 kpa
Ángulo de fricción interna (ϕ)	22°
Modulo de Elasticidad (E)	15000 kN/m ²
Peso Específico (γ)	17.4 kN/m ³
Modulo Poisson (ν)	0.35
Estado de Esfuerzos	Isotrópico
σ_n (n=1,2,3)	870 kpa

Cabe mencionar que además de las propiedades plasmadas en la tabla 4.1, se utilizará un módulo de elasticidad máximo de 24 000 kN/m² que servirá para realizar la normalización de los resultados (Sección 7.1).

4.2. Descripción del modelo empleado

Se realizaron modelos en tres dimensiones para la obtención de los desplazamientos en la periferia del túnel con ayuda del software computacional Rocscience 3D (RS3® [25]). Se consideraron condiciones de esfuerzos isotrópicas con las propiedades de material descritas en la tabla 4.1. Se utilizaron variaciones en el

comportamiento del material para la obtención de desplazamientos elásticos y plásticos. Cabe mencionar que los modelos de comportamiento elástico se realizaron con el fin de dar continuidad al trabajo planteado por el Ing. Iván Rubio (2018) [10], trabajo del cual parte esta investigación, y con ello poder realizar una comparativa entre ambos. Además, los resultados generados por Rubio (2018) sirvieron de referencia para la calibración del modelo.

En las siguientes secciones se describen las propiedades geométricas del modelo así como las restricciones usadas y la malla generada.

4.2.1. Propiedades geométricas del modelo

El modelo numérico es cubico con dimensiones de 100m en cada una de sus caras donde se desplanta un túnel de sección circular a una profundidad H_o de 50m (Figura 4.2). Esta profundidad H_o se eligió para brindarle homogeneidad al modelo; además, para fines de este trabajo la profundidad de desplante tendrá participación únicamente en la normalización de los resultados ya que se con las dimensiones del modelo se elimina la influencia de sus fronteras en la obtención de los desplazamientos, es decir, los resultados se concentrarán solo en la periferia del túnel la cual es el área de interes de esta investigación.

Los distintos radios utilizados fueron de 3, 5 y 7 metros para los cuales se elaboraron modelos con los distintos comportamientos del material (Tabla 4.2). Además, en cada uno de los modelos se dividió la longitud total del túnel en segmentos de 1 metro de longitud (Figura 4.2). Estos segmentos servirán para simular etapas de 1 metro de excavación dejando, a su vez, la etapa inicial para las condiciones *in situ* (previo a realizar la excavación) por lo que para simular la longitud total de excavación del túnel se requerirán de 101 etapas.

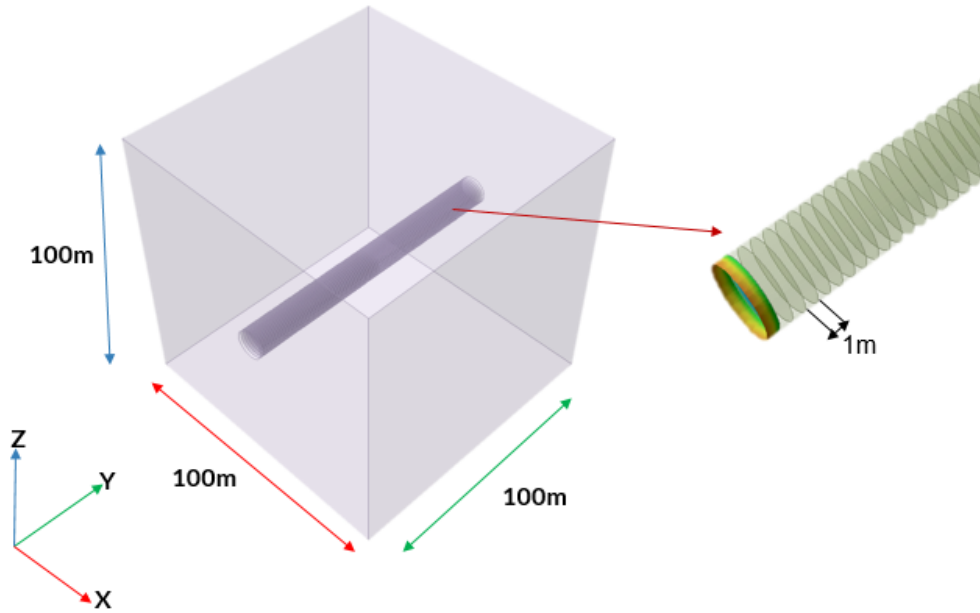


Figura 4.2: Dimensiones y segmentación del modelo.

Tabla 4.2: Resumen de los modelos realizados.

r (m)	H_o (m)	Longitud (m)	Análisis	Estado de Esfuerzos	Clave
3	50	100	Elástico	Isotrópico	$R3_{EL}$
5	50	100	Elástico	Isotrópico	$R5_{EL}$
7	50	100	Elástico	Isotrópico	$R7_{EL}$
3	50	100	Plástico	Isotrópico	$R3_{PL}$
5	50	100	Plástico	Isotrópico	$R5_{PL}$
7	50	100	Plástico	Isotrópico	$R7_{PL}$
3	50	100	Pa	Isotrópico	$R3_{Pa}$
5	50	100	Pa	Isotrópico	$R5_{Pa}$
7	50	100	Pa	Isotrópico	$R7_{Pa}$

En la tabla 4.2 se muestra un resumen de los modelos realizados. En ella se observa la clave que se utilizó para nombrar a cada modelo. La clave cuenta con

el radio del túnel representado por la letra R y el número 3, 5 o 7 según sea el caso; además, se menciona el tipo de análisis con el que se realizó el modelo siendo EL para elástico, PL para plástico y Pa para los casos con presión interna. Estos últimos modelos serán descritos a detalle en el capítulo 5 y la sección 6.3.

4.2.2. Restricciones de desplazamiento del modelo

Las restricciones del modelo nos permitirán evitar desplazamientos no deseados en las fronteras de los modelos y con ello concentrar los resultados en la zona de interés, siendo para nuestro caso el perímetro del túnel. Para efectos de esta investigación se emplearon las siguientes restricciones (Figura 4.3)

- **Perímetro del modelo:** Se usaron restricciones en todas las direcciones (x , y , z) ya que no es tema de esta investigación observar desplazamientos que simulen hundimientos en la superficie (Figura 4.3 inciso a).
- **Cara frontal y Posterior del modelo:** Las restricciones en estas caras del modelo se colocaron en el sentido y para simular solo los desplazamientos que ocurren en la periferia en los portales de entrada y salida del túnel (Figura 4.3 inciso b).
- **Modelo del túnel:** Las restricciones para el modelo del túnel se colocaron en la dirección y con el fin de estabilizar el frente de la excavación. En consecuencia, los desplazamientos se concentrarán en todo el perímetro del túnel generados como respuesta a los efectos de la excavación y al reacomodo del estado de esfuerzos (Figura 4.3 inciso c).

Es de mencionar, que con estas restricciones estamos simulando un efecto arco en el perímetro del túnel, es decir, los esfuerzos generarán desplazamientos similares en toda la circunferencia del túnel, en ese sentido, será posible tomar únicamente los resultados de los desplazamientos generados en la clave del túnel para su análisis.

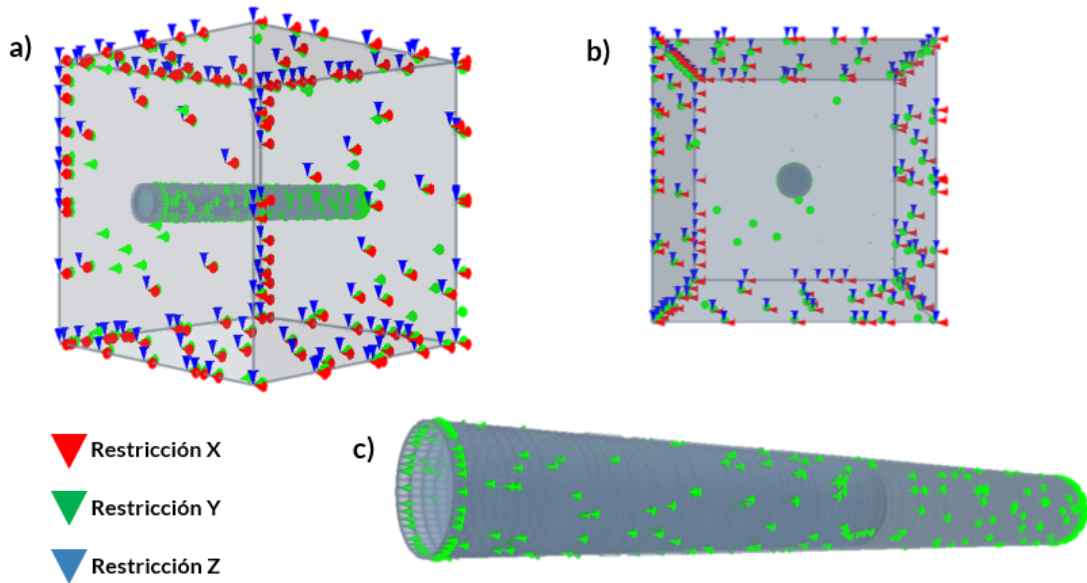


Figura 4.3: Restricciones desplazamientos del modelo.

4.2.3. Malla generada por los modelos

Antes de realizar el cálculo de los desplazamientos, es necesario generar la malla de elementos finitos que nos ayudarán a encontrar las respuestas del material excavado. En la tabla 4.3 se encuentra un resumen de los modelos realizados con el tipo de malla generada. Asimismo, se muestra el número de nodos y elementos que produce el mallado. En ese sentido, se observa que los modelos con radios menores generan mayor número de elementos y por consiguiente un mayor número de nodos, esto se debe al tipo de malla seleccionada para los modelos la cual es de tipo "Graduada". La malla graduada genera una mayor concentración de elementos en el área de estudio que en nuestro caso es la excavación del túnel. Por su parte, la cantidad de elementos se reduce conforme se aleja de la zona de interés, además el tamaño de los elementos aumenta, como se observa en la figura 4.4.

Tabla 4.3: Propiedades del mallado de los modelos.

Modelo	Malla	Tipo de elemento	Número nodos	Número elementos
$R3_{EL}$	Graduada	Tetraedro de 4-Nodos	130297	769587
$R5_{EL}$	Graduada	Tetraedro de 4-Nodos	79292	466079
$R7_{EL}$	Graduada	Tetraedro de 4-Nodos	61168	358762
$R3_{PL}$	Graduada	Tetraedro de 4-Nodos	130297	769587
$R5_{PL}$	Graduada	Tetraedro de 4-Nodos	79292	466079
$R7_{PL}$	Graduada	Tetraedro de 4-Nodos	61168	358762
$R3_{Pa}$	Graduada	Tetraedro de 4-Nodos	130297	769587
$R5_{Pa}$	Graduada	Tetraedro de 4-Nodos	79292	466079
$R7_{Pa}$	Graduada	Tetraedro de 4-Nodos	61168	358762

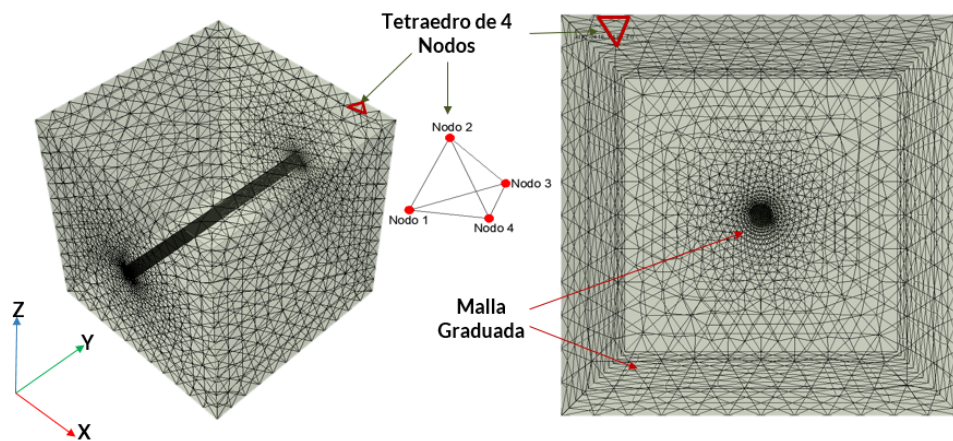


Figura 4.4: Tipo de mallado empleado.

Capítulo 5

Curva característica

5.1. Definición de la curva

La curva característica o curva de respuesta del suelo define el comportamiento de la presión de soporte contra la deformación en la periferia del túnel desde la etapa previa a la excavación, hasta la redistribución total de los esfuerzos por el efecto de excavación [26].

La curva característica se genera al graficar la presión interna P_a contra el desplazamiento (δ) generado por la excavación del material. La curva parte de la presión geostática obtenida con la ecuación 4.1, la cual simula la relajación gradual del suelo producto de la excavación [27]. A medida que la presión geostática disminuye, los desplazamientos generados en la periferia o el frente de la excavación (según sea el caso) van aumentando hasta generar un efecto arco natural, es decir, se logra la estabilización sin necesidad de alguna medida de soporte. Además, la curva característica está formada por tres zonas.

- Zona de Comportamiento Elástico, en donde la reducción gradual del esfuerzo geostático genera desplazamientos elásticos (tramo 0-1 figura 5.1).
- Zona de Comportamiento Plástico ocasionada por desplazamientos plásticos que se generan por diversos factores como la geometría del túnel, las condiciones del medio (suelo) o la magnitud de los esfuerzos geostáticos (tramo 1-2 figura 5.1).

- Finalmente, la Zona de Aflojamiento a partir de la cual el suelo ha distribuido sus esfuerzos de tal manera que el efecto arco produce desplazamientos máximos. Por consecuencia se puede producir un efecto arco nulo que ocasiona inestabilidad o colapso del túnel.

La curva característica es comúnmente empleada para el diseño de medidas de soporte en túneles, las cuales se diseñan para desplazamientos que se encuentren previo a la zona de aflojamiento.

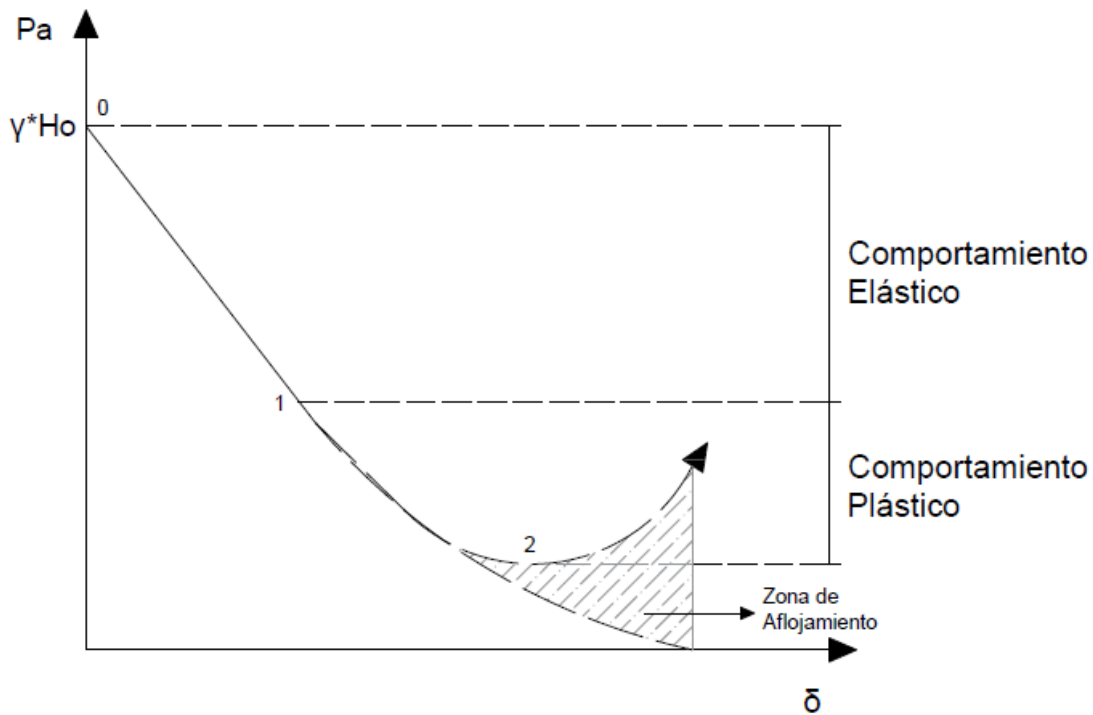


Figura 5.1: Curva Característica del comportamiento del material por el efecto de la excavación en túneles.

5.2. Curva característica del modelo

La construcción del modelo numérico para la obtención de la curva característica se realizó en dos dimensiones con la ayuda del software RS2® [28], considerando un comportamiento elástico y plástico del material. El modelo cuenta con

100m de longitud por lado. Se colocó el túnel a una profundidad H_o de 50m con sección circular de radio igual a 5m, figura 5.2.

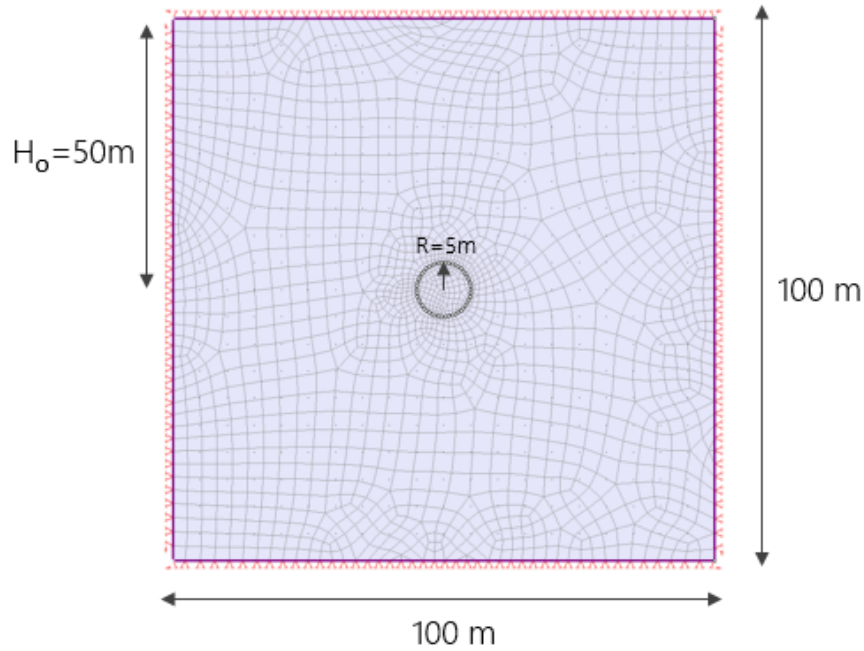


Figura 5.2: Dimensiones geométricas del modelo en 2D generado en RS2®.

Se consideró, para ambos comportamientos, una etapa inicial con condiciones *in situ*, (etapa en estado natural) antes de realizar la excavación del túnel (inciso a figura 5.3). Posteriormente se colocó una presión geoestática P_a inicial igual a 870 kN/m^2 obtenida con la ecuación 4.1 (inciso b figura 5.3) y que corresponde al estado de esfuerzos equivalente a la profundidad modelada. Esta presión se fue reduciendo en cada etapa con el fin de simular la relajación gradual del suelo y controlar desplazamientos numéricamente excesivos hasta llegar a un valor igual a cero (inciso c figura 5.3).

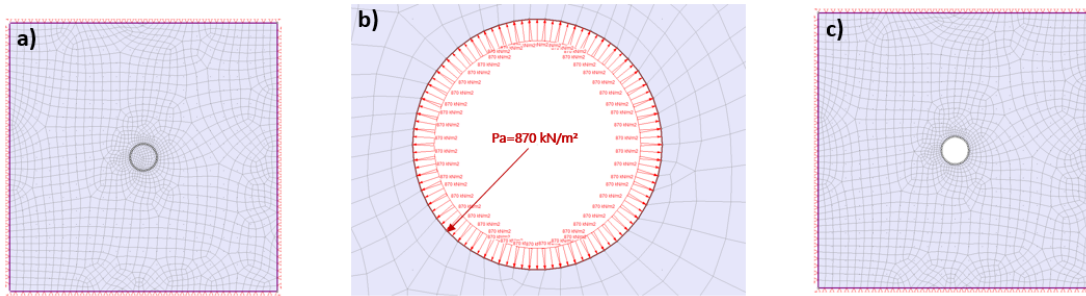


Figura 5.3: Reducción de la presión P_a a partir de la geostática *in situ*.

5.2.1. Curva característica en RS2®

Los desplazamientos obtenidos, a partir del modelo planteado en la sección anterior, se graficaron contra la presión P_a para los casos elástico y plástico, como se muestra en la Figura 5.4.

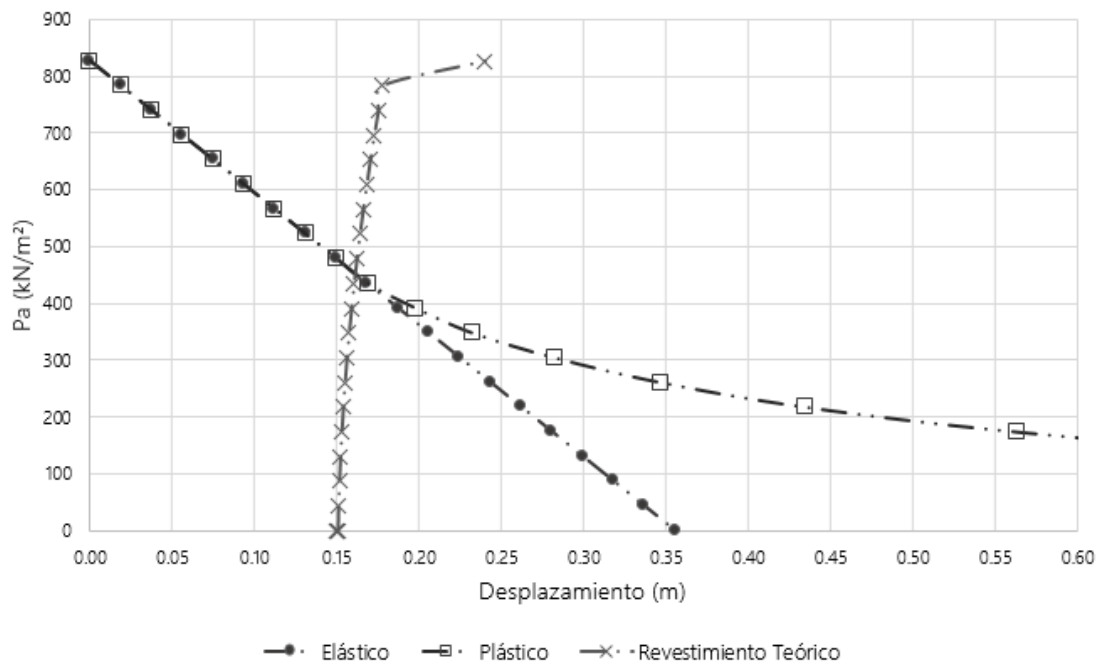


Figura 5.4: Gráfica de Curva Característica en RS2®.

En la figura 5.4 se observa la tendencia típica de una curva característica, en la cual los desplazamientos generados (eje abscisas) aumentan a medida que se reduce la presión interna P_a (eje ordenadas). Para el caso del comportamiento elástico,

la gráfica forma una recta a medida que la presión disminuye, cuya tendencia se mantiene hasta interceptar con el eje de las abscisas. En este punto se puede suponer la estabilización del material sin necesidad de un soporte adicional.

Para el caso del comportamiento plástico, la curva tiende al eje de las abscisas, lo que representa una estabilización del material en un periodo de tiempo mayor, a diferencia del comportamiento elástico, y un efecto arco desviado. Además, como se vio en la sección anterior, la curva característica generada permite observar de manera clara el punto en el cual los desplazamientos cambian de comportamiento elástico a plástico. Asimismo, el punto en que se presenta la separación entre ambos comportamientos permite establecer el momento en el cual es necesario colocar el revestimiento y la presión interna necesaria para brindarle estabilidad a la excavación. Para este caso de estudio se planteo un revestimiento teórico que servirá para determinar la presión interna necesaria para estabilizar el modelo, lo cual se analizará en la siguiente sección.

5.2.2. Revestimiento teórico y presión interna

Como se verá en la Sección 6.2.2, el comportamiento plástico presenta desplazamientos numéricamente excesivos. Por consiguiente, con el fin de controlar estos desplazamientos se colocó una presión interna P_a para simular el acomodo gradual del suelo por efectos de la excavación y con ello controlar los desplazamientos excesivos.

Para la selección de la P_a a utilizar, fue necesario proponer un revestimiento teórico para lo cual se empleó la ecuación de *compresión elástica* (u_c) obtenida de Enrique Tamez et al. [26]. La *compresión elástica* nos indica el desplazamiento de un anillo de concreto sometido a una presión radial interna P_a mediante la siguiente expresión (ecuación: 5.1):

$$u_c = \frac{P_a D_m^2}{4tE_c} \quad (5.1)$$

donde P_a es la presión radial interna, D_m es el diámetro medio del anillo de concreto, t el espesor del anillo de concreto y E_c el módulo de elasticidad del concreto.

Para fines de esta investigación se consideraron los siguientes valores de un revestimiento de concreto teórico (Tabla 5.1):

Tabla 5.1: Revestimiento teórico de concreto.

Diámetro medio (D_m)	10 m
Resistencia a compresión (f'_c)	400 kg/cm ²
Módulo de Elasticidad (E_c)	2.75x10 ⁷ kPa
Espesor (t)	0.3 m

Cabe mencionar que los valores empleados para P_a en la ecuación 5.1 son los obtenidos a partir de la presión geostática reducida en un 5 % para cada etapa a partir de su valor inicial hasta llegar a cero.

Una vez obtenidos los desplazamientos u_c del anillo de concreto se graficaron en conjunto con los valores obtenidos para la curva característica. Se consideró un desplazamiento inicial u_o de 15 cm para simular la relajación natural producido por material al ser excavado. La curva del revestimiento teórico interseca, como se muestra en la figura 5.4, a la curva característica del suelo en un valor de presión de 435 kPa. Es de observar que en este punto los desplazamientos generados con dicha presión se encuentran dentro del comportamiento elástico de la curva, de modo que, el empleo de esta presión para el modelo en tres dimensiones limitaría los resultados a desplazamientos elásticos. Por consiguiente, se optó por considerar una presión interna P_a igual a 300 kPa la cual generaría desplazamientos plásticos y controlaría la obtención de valores excesivos de los mismos. La P_a seleccionada

se empleará en la sección 6.3 para la obtención de los desplazamientos plásticos en tres dimensiones.

Capítulo 6

Desplazamientos y normalización de los resultados

6.1. Distribución de esfuerzos

Como resultado de la modelación realizada en la figura 6.1 observamos un ejemplo de la concentración de los desplazamientos y uno de la distribución de los esfuerzos (incisos a y b respectivamente).

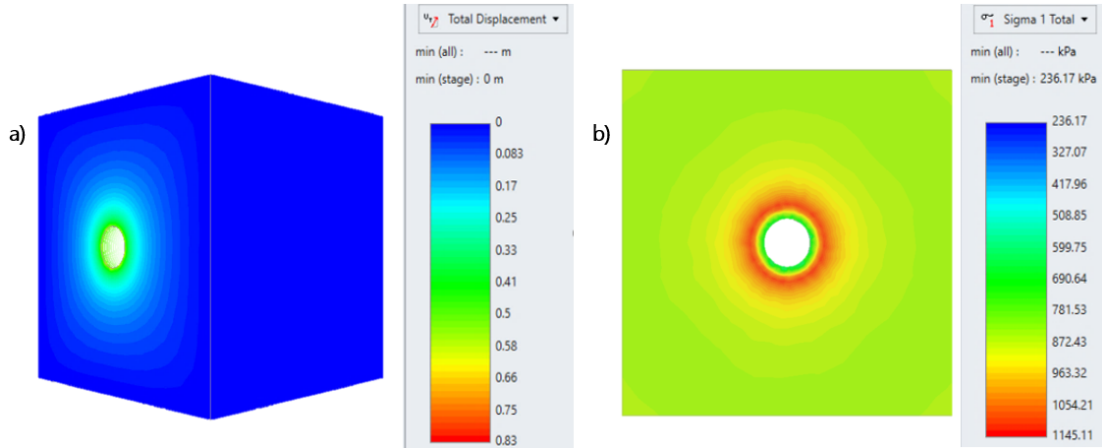


Figura 6.1: Modelos numéricos mostrando las cinemáticas para a) Concentración de los desplazamientos. b) Distribución de esfuerzos.

Referente a la concentración de desplazamientos (representados con color verde), observamos que en las fronteras del modelo no se producen alteraciones por lo cual estas no contribuyen a los resultados obtenidos. Además, los desplazamientos

se presentan cerca de la periferia del túnel la cual es la zona de interés en este trabajo.

Por su parte, en la figura 6.1b se observan los esfuerzos generados en la periferia. Estos esfuerzos se generan cuando se extrae el suelo producto de la excavación ocasionando se relaje y se genere una la alteración del equilibrio en el estado inicial de esfuerzos [3]. La alteración del estado inicial de esfuerzos produce que los esfuerzos se redistribuyan en la periferia del túnel buscando un nuevo equilibrio. Si hacemos un análisis de la forma en que se presenta la distribución de los esfuerzos (representados con color rojo), apreciamos que esta distribución se realiza alejada de la zona excavada generando un efecto de arco desviado. Así pues, el efecto arco y la nueva distribución de esfuerzos son característicos de un comportamiento plástico del material (véase sección 2.5) como se esperaba al realizar la modelación.

6.2. Desplazamientos totales.

6.2.1. Desplazamientos elásticos totales

Cuando hablemos de desplazamientos totales nos referiremos a la respuesta del material al ser excavado obtenida a partir de la simulación con el modelo de elementos finitos.

En primer lugar se revisarán los desplazamientos obtenidos de los modelos de túneles con comportamiento elástico del material. Como producto de la modelación numérica se obtuvieron los desplazamientos totales (δ) por cada segmento de excavación de un metro de longitud. Los desplazamientos δ obtenidos en cada una de las etapas de excavación se muestra en las gráficas de la *figura ??*. En estas gráficas cada curva representa una sección de un metro de excavación del túnel, e indican los desplazamientos δ que sufre (eje y) conforme la distancia entre esta sección y el frente de excavación aumenta (eje x). Como se puede apreciar

en cada una de las curvas, los desplazamientos δ se presentan en los primeros metros posteriores a la sección excavada, los cuales incrementan gradualmente hasta alcanzar un valor de desplazamiento máximo. En este punto se podría considerar que los esfuerzos del material circundante al túnel se han distribuido de forma que los desplazamientos se estabilizan en el interior de la sección, lo que gráficamente se demuestra con la tendencia horizontal de la curva donde los desplazamientos máximos son constantes. Cabe mencionar que con fines prácticos en las *figura 6.2*, *6.3* y *6.4* se muestran solo algunos de los resultados de las 100 etapas analizadas en cada uno de los modelos, sin embargo se puede apreciar que en cada sección excavada el comportamiento de los desplazamientos es el mismo.

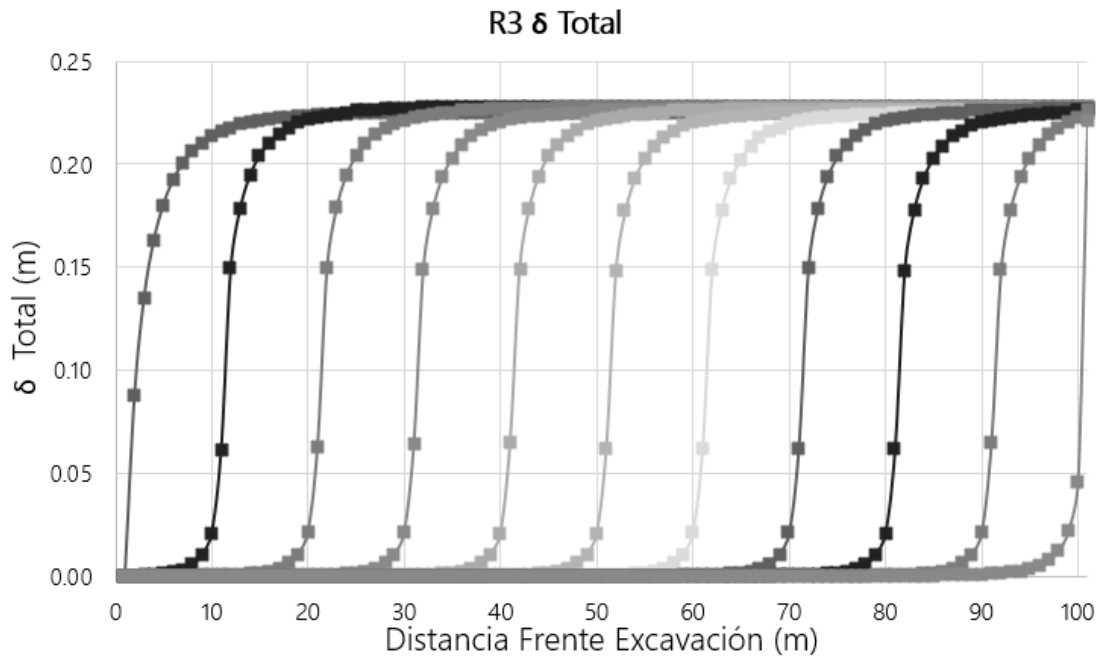


Figura 6.2: Desplazamientos totales para túnel con radio de 3m en comportamiento elástico.

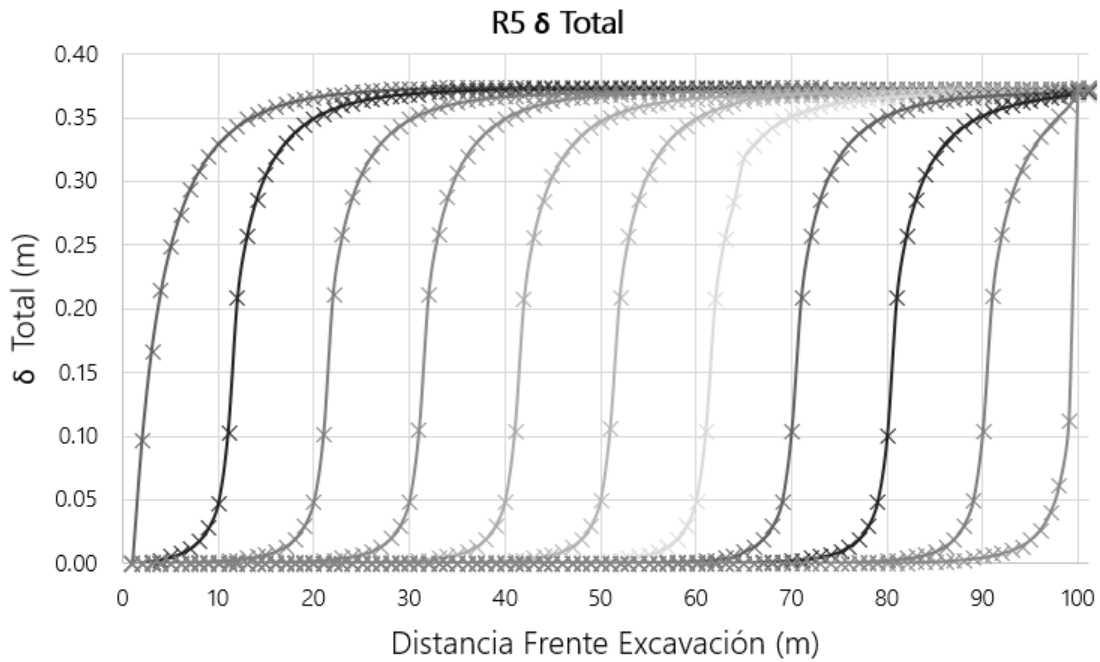


Figura 6.3: Desplazamientos totales para túnel con radio de 5m en comportamiento elástico.

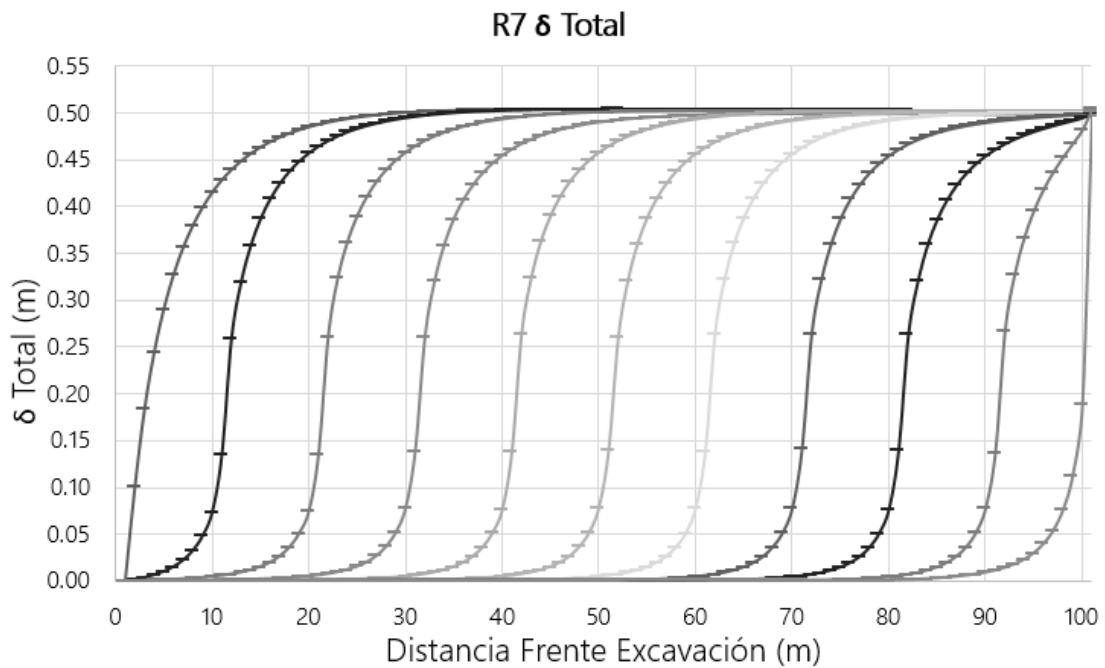


Figura 6.4: Desplazamientos totales para túnel con radio de 7m en comportamiento elástico.

Como observamos en los tres casos, las curvas presentan la misma tendencia una vez que se alcanza su desplazamiento máximo sin importar la etapa de ex-

cavación en la que nos encontremos, además, este desplazamiento máximo es el mismo durante toda la excavación. Por lo tanto, para los siguientes análisis se usarán solo los desplazamientos obtenidos en primera etapa excavada, es decir, los desplazamientos en la entrada del túnel como se muestra en la gráfica de la figura 6.5.

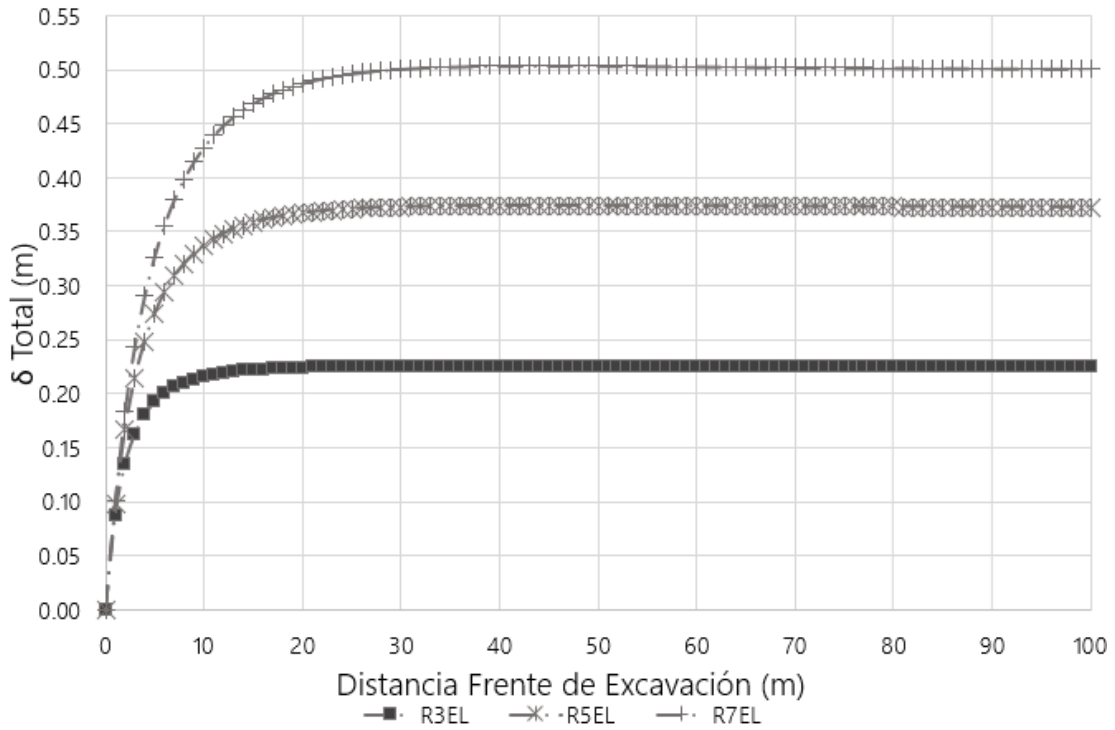


Figura 6.5: Desplazamientos con comportamiento elástico en la entrada del túnel para todos los radios, caso de estudio.

6.2.2. Desplazamientos plásticos totales

De la misma manera que para el caso elástico, y como se mencionó en el capítulo 4, se modelaron túneles con radios de 3, 5 y 7 metros en comportamiento plástico de los cuales se obtuvieron desplazamientos totales. Con los resultados del modelo, se realizaron las gráficas mostradas en las figuras 6.6, 6.7 y 6.8 de distancia al frente de excavación versus desplazamiento total δ . En estas, se aprecia que los desplazamientos en el caso plástico son numéricamente mayores a los que

se presentaban para el caso elástico. A pesar de lo anterior, las curvas en todos los casos presentan un comportamiento similar al del caso elástico. En el cual la curva mantiene una tendencia ascendente hasta alcanzar un desplazamiento máximo que se mantiene constante hasta el final de la excavación del túnel.

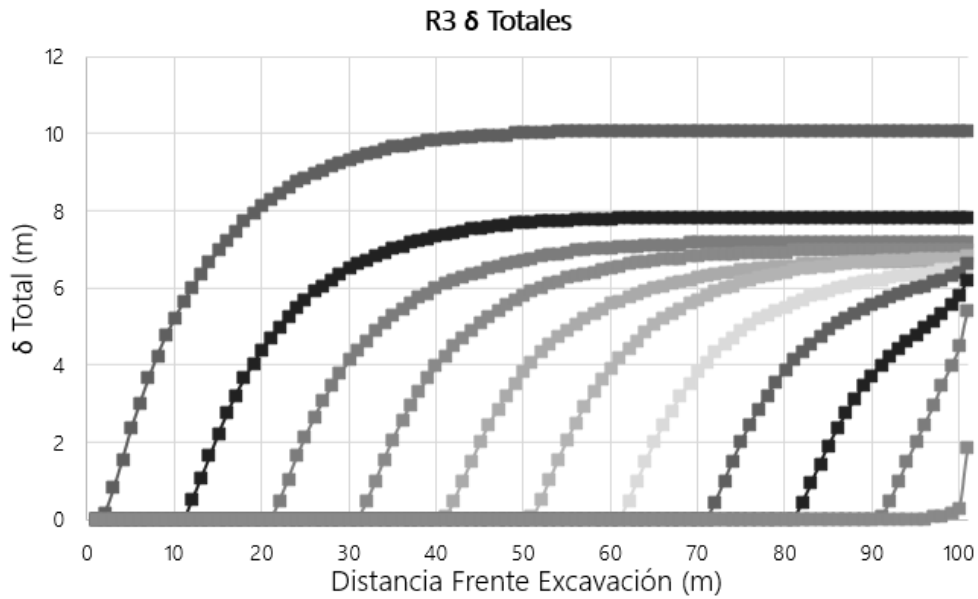


Figura 6.6: Desplazamientos totales para túnel con radio de 3m en comportamiento plástico.

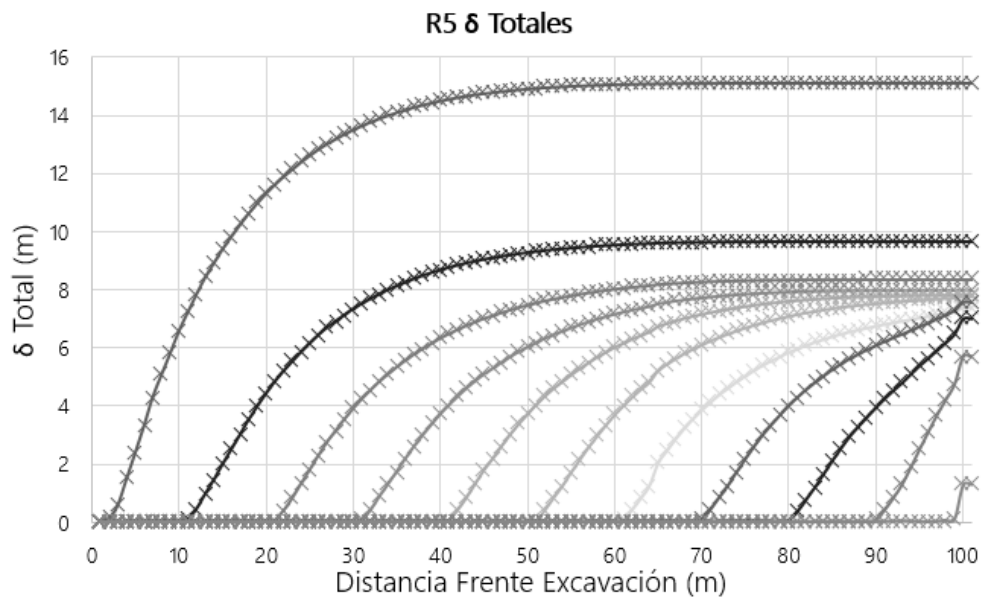


Figura 6.7: Desplazamientos totales para túnel con radio de 5m en comportamiento plástico.

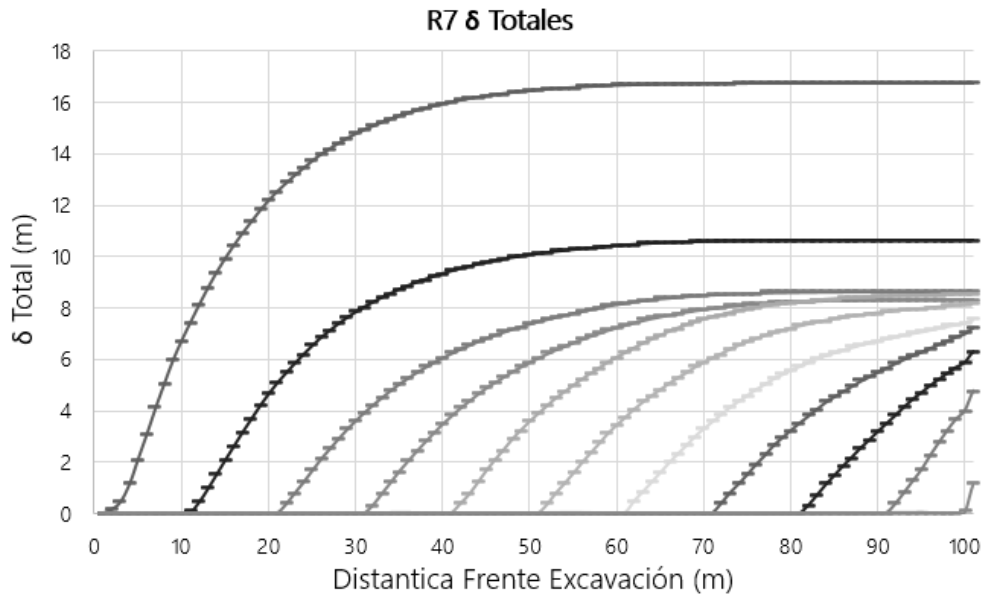


Figura 6.8: Desplazamientos totales para túnel con radio de 7m en comportamiento plástico.

Cabe resaltar que para todos los casos plásticos analizados, el desplazamiento máximo en cada etapa de excavación del modelo disminuye respecto a la sección previa excavada y a medida que la excavación se aproxima al final del túnel. Por lo tanto se podría simplificar el análisis considerando la sección de la entrada del túnel (primera etapa del modelo) como la parte crítica en cuanto sus desplazamientos, lo cual se resume en la *figura 6.9* donde se muestran los desplazamientos en la primera sección del túnel para los tres radios propuestos ($r=3, 5$ y 7 metros).

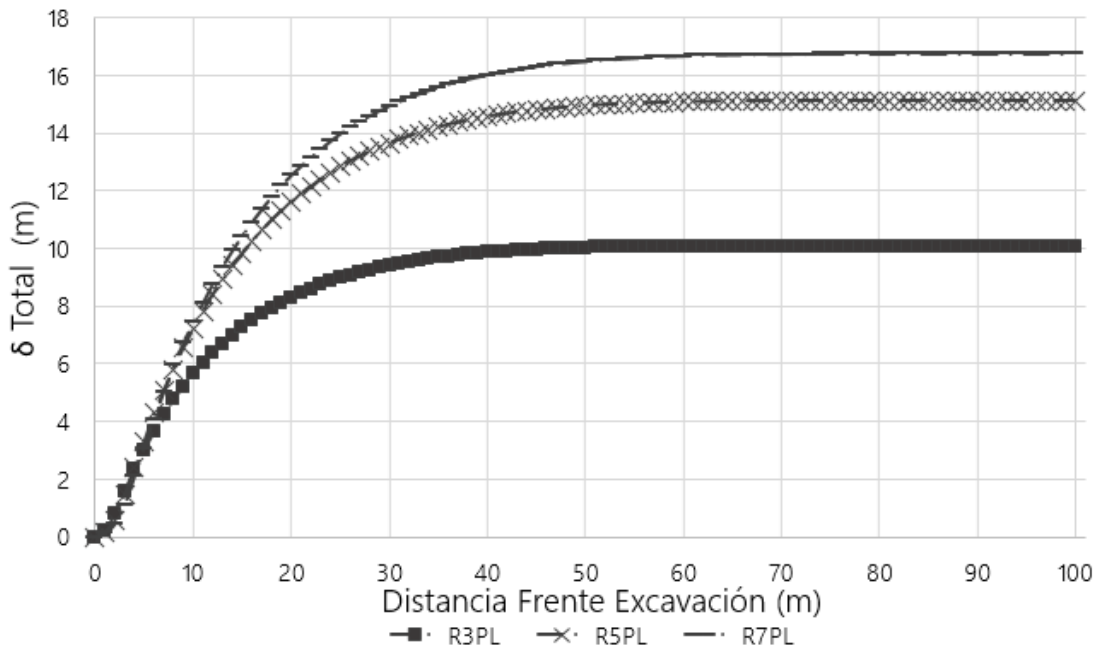


Figura 6.9: Desplazamientos con comportamiento plástico en la entrada del túnel para todos los radios, caso crítico.

6.3. Modelos numéricos con presión interna Pa

La presión Pa ayuda a brindar estabilidad al túnel en su periferia y con ello disminuir los desplazamientos por lo que es una medida de la cantidad de resistencia de soporte requerida para evitar un mayor desplazamiento en ese punto en el modelo de túnel [27]. En ese sentido, se decidió incluir una Pa con una magnitud de 300kPa en los modelos de comportamiento plástico (6.10), ya que, como vimos en la sección 6.2.2, los desplazamientos producidos por este comportamiento fueron numéricamente excesivos y es necesario aplicar este método para disminuirlos como ocurre en la realidad. Esta presión se obtuvo por medio de la curva característica vista en el capítulo 5.

Con los resultados de los desplazamientos totales del modelo con Pa se realizó la gráfica mostrada en las figuras 6.11, 6.12 y 6.13, donde muestran los desplazamientos para R3, R5 y R7. Analizando las curvas, se sigue apreciando una

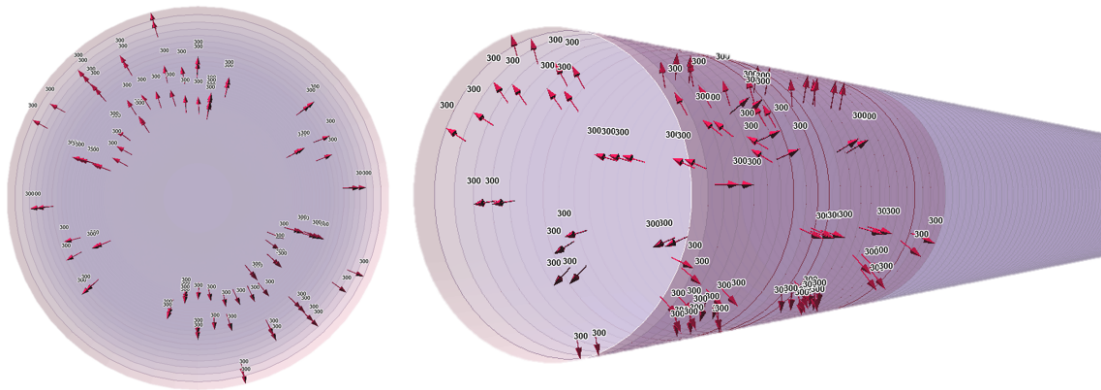


Figura 6.10: Modelo con presión radial interna $P_a=300\text{kPa}$.

continuidad en la tendencia de las curvas, es decir, estas aumentan gradualmente su desplazamiento en la primera parte de la curva y posteriormente, al alcanzar se valor máximo de desplazamiento, se mantiene constante hasta el final de la excavación. Además, como se tenía previsto, se redujeron notablemente los desplazamientos totales. Por otro lado, observamos que la presión P_a elegida tiene menor influencia es proporcional al radio del túnel, ya que como se aprecia los desplazamientos generados en el modelo con R7 los valores son mayores al resto. Además, en la curva para el caso del túnel con radio de $r=3\text{m}$ (R3), se presenta un ligero salto en la parte inicial de la curva, lo cual se debe a la forma en que se realizó la modelación. En este sentido, la introducción de P_a se hizo de la siguiente manera: en primer lugar se simuló una etapa de excavación en la cual no se colocó presión interna, posteriormente se realizó la excavación de la segunda etapa y se colocó la presión interna P_a en la etapa anterior es decir la primera etapa, después se simuló la excavación de la tercera etapa y se incluyó P_a en la segunda etapa, y así sucesivamente hasta llegar al final de la excavación. Este proceso se realizó para simular la relajación natural del suelo al ser excavado previo a colocarse algún método de estabilización. Cabe mencionar que se realizaron modelos con presiones distintas a 300kPa pero se observó que si bien se eliminaba este salto,

los desplazamientos que se generaban comenzaban a ser excesivos por lo que se decidió descartar este caso para los siguientes análisis (Anexos 10.1).

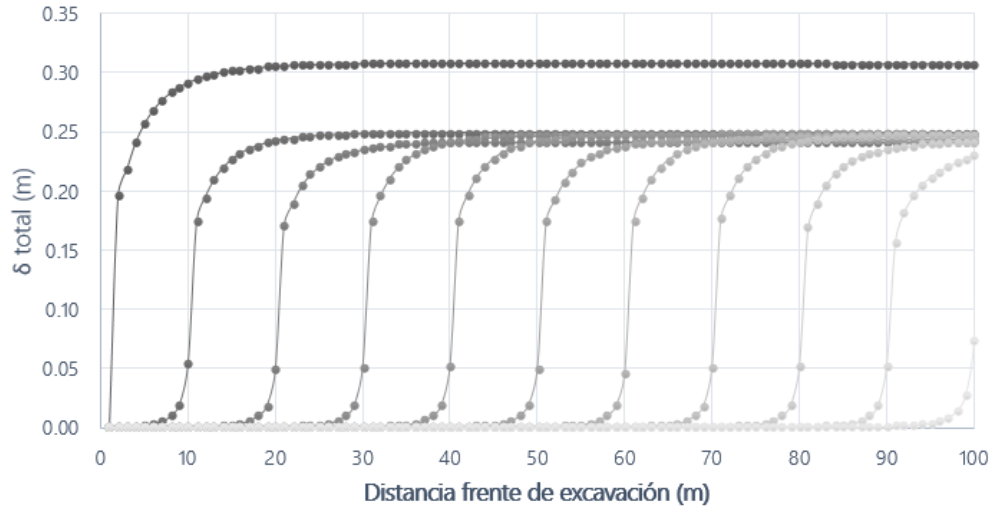


Figura 6.11: Desplazamientos totales para $r=3\text{m}$ con presión $P_a=300\text{kPa}$.

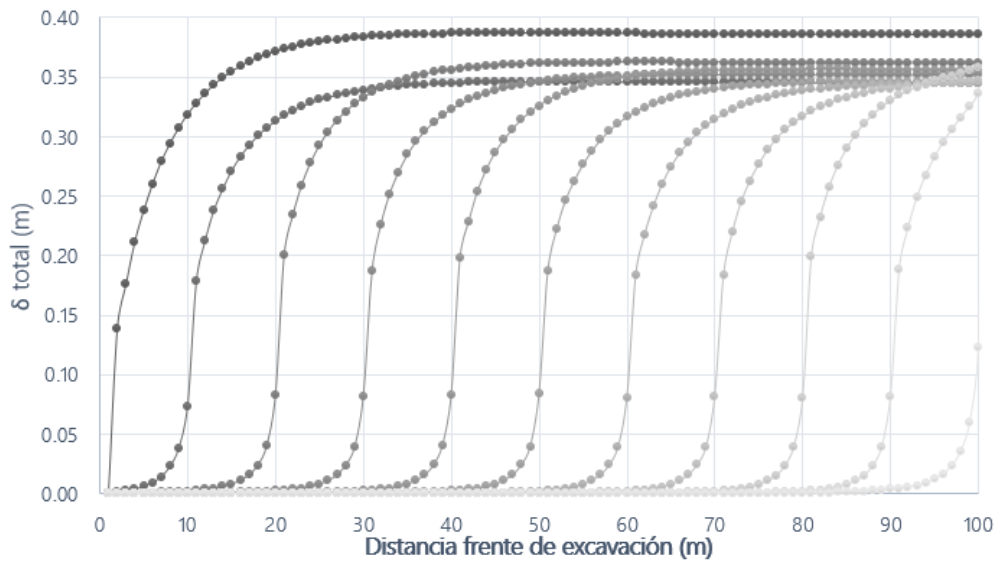


Figura 6.12: Desplazamientos totales para $r=5\text{m}$ con presión $P_a=300\text{kPa}$.

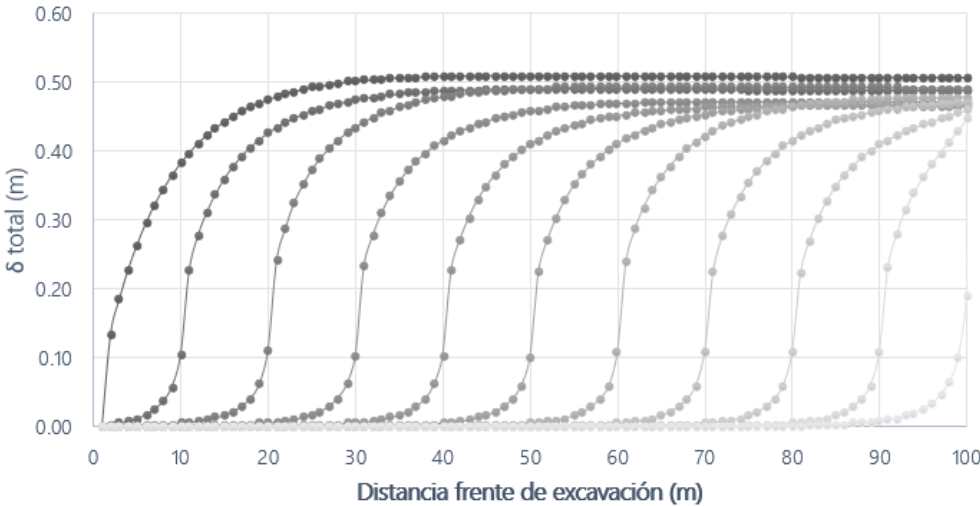


Figura 6.13: Desplazamientos totales para $r=7m$ con presión $P_a=300kPa$.

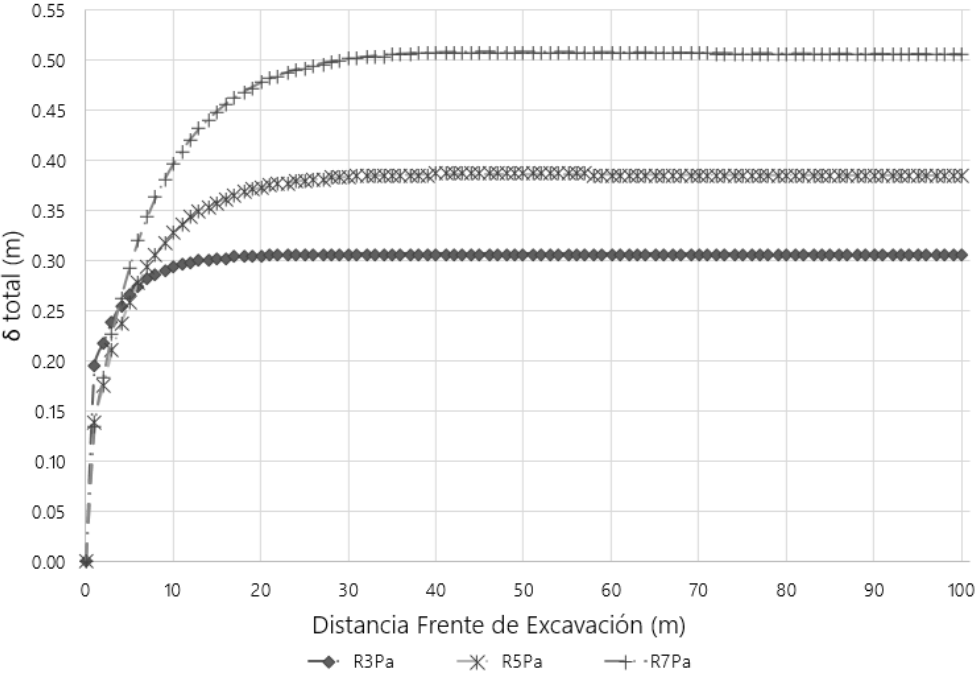


Figura 6.14: Desplazamientos totales con presión $P_a=300kPa$.

Capítulo 7

Modelo matemático para el cálculo de desplazamientos

7.1. Normalización de los desplazamientos

Los resultados obtenidos en las secciones 6.2.1 y 6.2.2 representan un valor numérico para cada caso en particular con propiedades y características de material específicas. Sin embargo es intención de este trabajo aportar una solución que generalice el cálculo de desplazamientos en túneles circulares. Por tal motivo se propondrá normalizar los resultados de tal manera que sea factible observar la influencia que tienen los parámetros en la tendencia de las curvas y que a su vez sea posible encontrar desplazamientos con parámetros de suelo distintos a los casos aquí analizados.

Para proponer la ecuación que normalice los resultados obtenidos del modelo numérico, se observó que las dimensiones del radio del túnel es un factor que influye en la magnitud de los desplazamientos y en la forma en que se distribuyen los esfuerzos al rededor de la sección excavada. Posteriormente, se revisó la necesidad de incluir parámetros del suelo como es su peso específico y modulo de elasticidad que en la ecuación nos ayudaran a distinguir entre distintos tipos de suelo. Además, el modulo de elasticidad en compresión nos permite diferenciar entre el comportamiento elástico y el comportamiento plástico del suelo siendo el causante de generar situaciones de estabilidad o inestabilidad durante la excavación. En este sentido, cuando se generan situaciones de inestabilidad, es necesario propor-

cionar un método estabilización representado por la presión radial interna P_a . La presión P_a es opuesta a la presión geostática ($\gamma \cdot H_0$) con el fin de equilibrar los esfuerzos y controlar las deformaciones hacia el interior del túnel.

Cabe mencionar que parte de esta normalización se incluye dentro de los trabajos realizados por el Mto. Ivan Rubio [10], pero fue modificada para fines de esta investigación. Por lo tanto, la normalización propuesta se da mediante la ecuación 7.1 mostrada a continuación:

$$Y = \frac{\delta \gamma}{(\gamma H_0) - P_a} * \frac{E}{E_{max}} * \frac{r_{max}}{r} * 1000 \quad (7.1)$$

donde δ es el desplazamiento total obtenido en el modelo en metros, γ el peso específico del material en kN/m^3 , H_0 la profundidad de desplante del túnel en metros, P_a la presión interna en kN/m^2 , E es el módulo de elasticidad en kN/m^2 , r el radio de la sección en metros, E_{max} y r_{max} módulo de elasticidad en kN/m^2 y radio máximo en metros respectivamente. Es de notar que en este estudio se tomó como valor de radio máximo r_{max} el del túnel de 7 metros y como módulo de elasticidad máximo E_{max} 24 000 kN/m^2 . Además, las primeras normalizaciones se obtuvieron con una presión radial interna P_a de 0 kN/m^2 . Como vemos, en la normalización propuesta, los parámetros que más influyen son los valores propios del material como son el peso específico y el módulo de elasticidad, los cuales se pueden obtener fácilmente de pruebas de laboratorio o ensayos *in situ*. El resto de las variables son propios del túnel para el que se requiera obtener su desplazamiento δ , para lo cual es necesario obtener el factor de cálculo Y con ayuda de las gráficas siguientes o a través de las ecuaciones que se mostrarán en el capítulo 8.

En las figuras 7.1 a 7.3 y 7.5 a 7.7 siguientes, se muestran las gráficas obtenidas para cada radio con base a la normalización propuesta de los desplazamientos totales. Por su parte, las figuras 7.4 y 7.8 presentan las gráficas de la normalización

de los desplazamientos en la entrada del túnel para cada comportamiento del material.

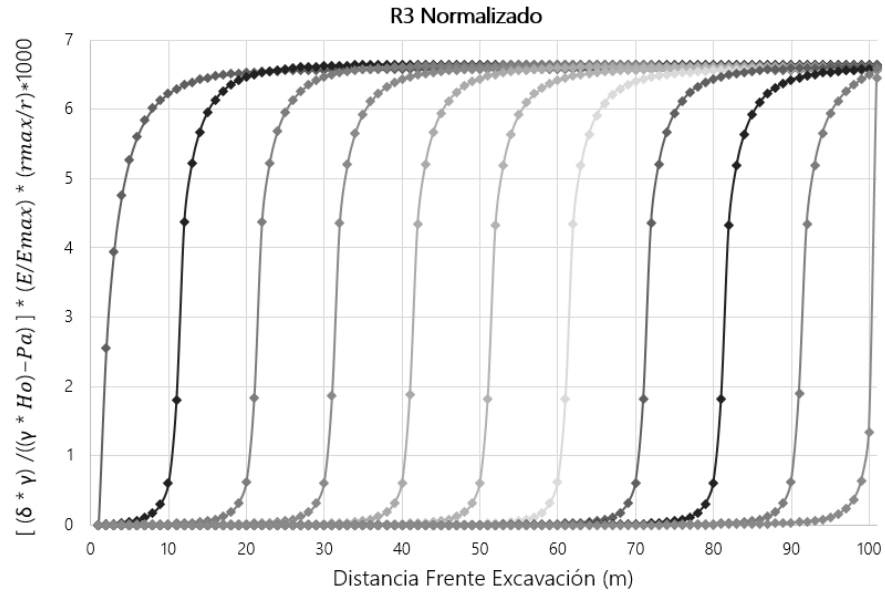


Figura 7.1: Desplazamientos normalizados para túnel con radio de 3m en comportamiento elástico.

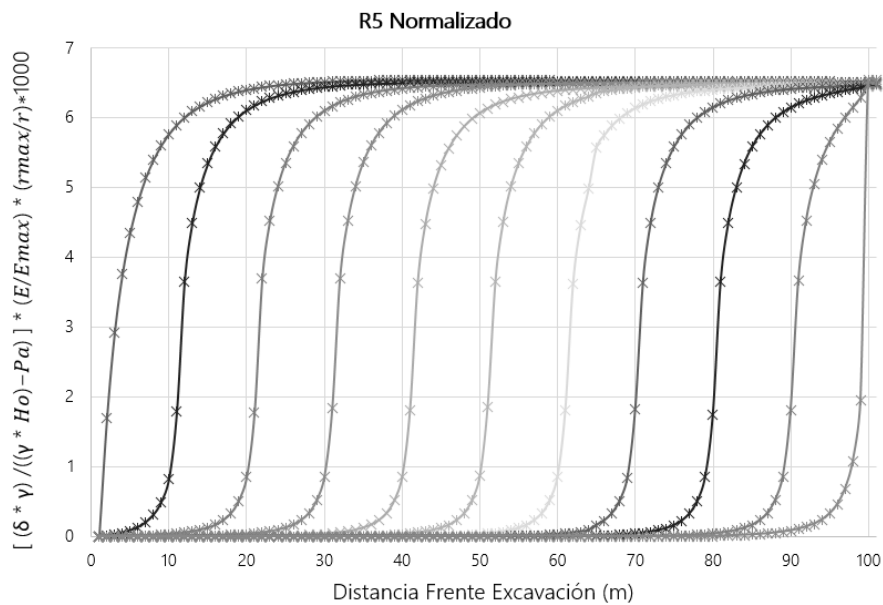


Figura 7.2: Desplazamientos normalizados para túnel con radio de 5m en comportamiento elástico.

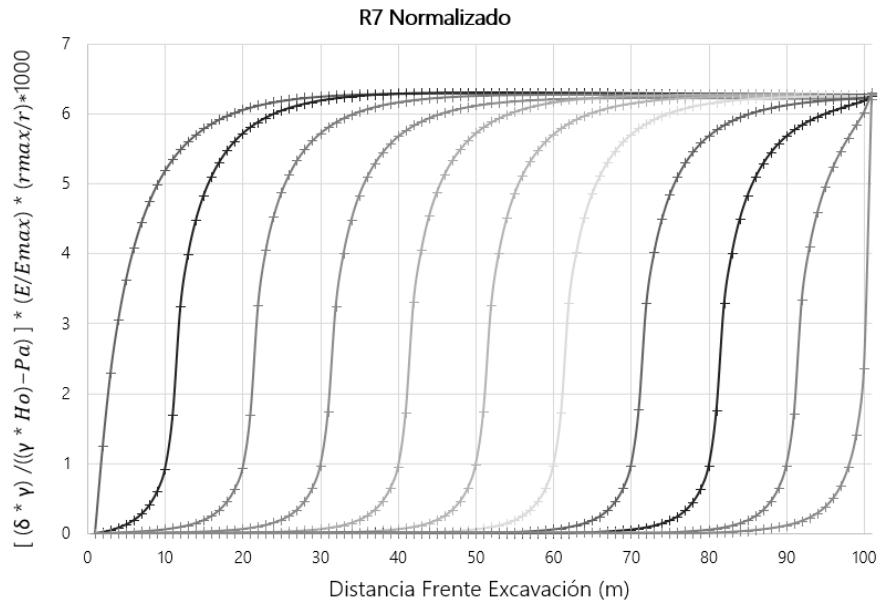


Figura 7.3: Desplazamientos normalizados para túnel con radio de 7m en comportamiento elástico.

En las gráficas de la figura 6.2 para el radio de 3 metros en comportamiento elástico, las curvas para cada uno de los túneles presenta un comportamiento similar al mostrado en la figura 7.1 para los desplazamientos totales, es decir, a partir de cierta distancia con respecto al frente de excavación los resultados comienzan a ser constantes, de igual manera sucede para los radios de 5 y 7 metros. Esto nos indica que con los parámetros de suelo y geometría seleccionados para la normalización es posible conocer los desplazamientos del túnel con ayuda de la gráfica para cada radio diferente del túnel, ya que el valor que se obtiene con la ecuación 7.1 así como con el eje y de las gráficas es adimensional.

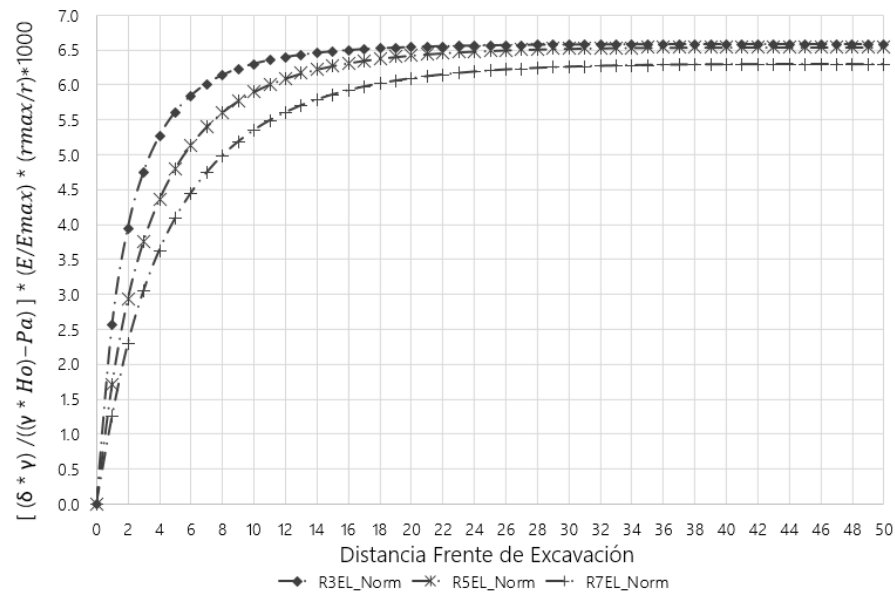


Figura 7.4: Desplazamientos normalizado en comportamiento elástico, caso de estudio.

Para el caso plástico la normalización genera la misma tendencia de curvas respecto a los desplazamientos totales, incluso se observa la separación de los resultados entre la primera etapa de excavación y el resto. Por otra parte, al comparar las curvas de los desplazamientos en la entrada del túnel para ambos casos se aprecia que los resultados en comportamiento elástico (figura 7.4) se estabilizan dentro de los primeros metros de excavación, a diferencia del caso plástico (figura 7.8) donde la estabilización de la curva se da de manera gradual, requiriendo gran parte del tramo excavado para el reacomodo de los esfuerzos internos del suelo. Estos desplazamientos están en función de la P_a la cual se ha mantenido en cero para estos resultados.

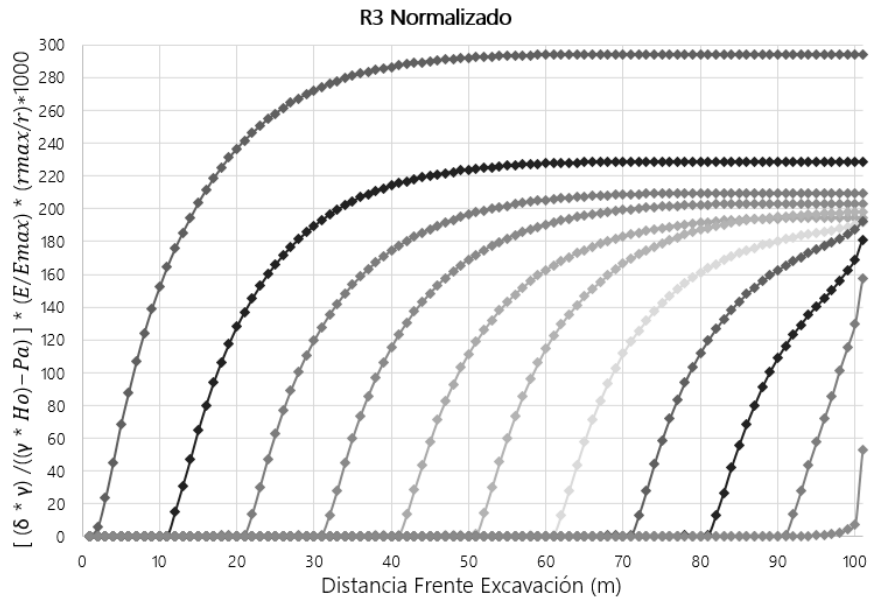


Figura 7.5: Desplazamientos normalizados para túnel con radio de 3m en comportamiento plástico.

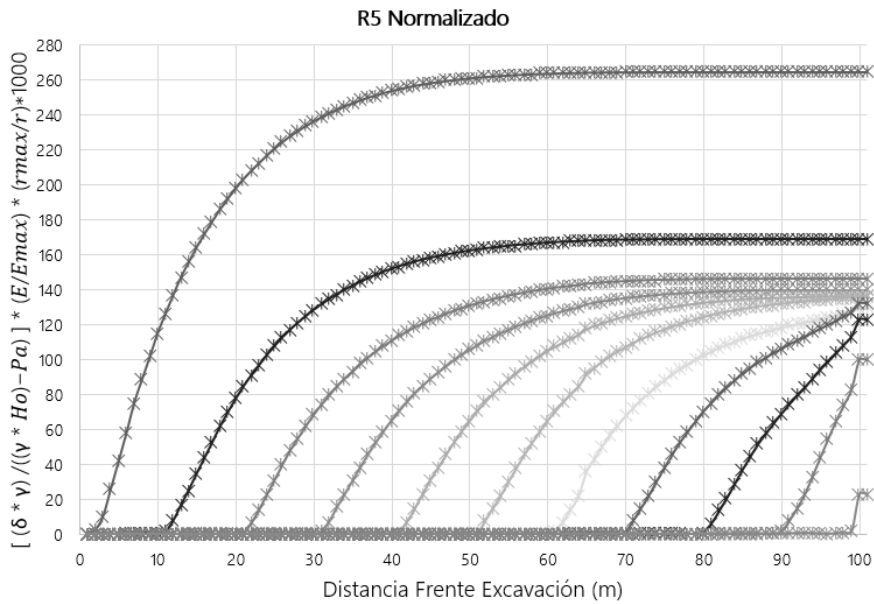


Figura 7.6: Desplazamientos normalizados para túnel con radio de 5m en comportamiento plástico.

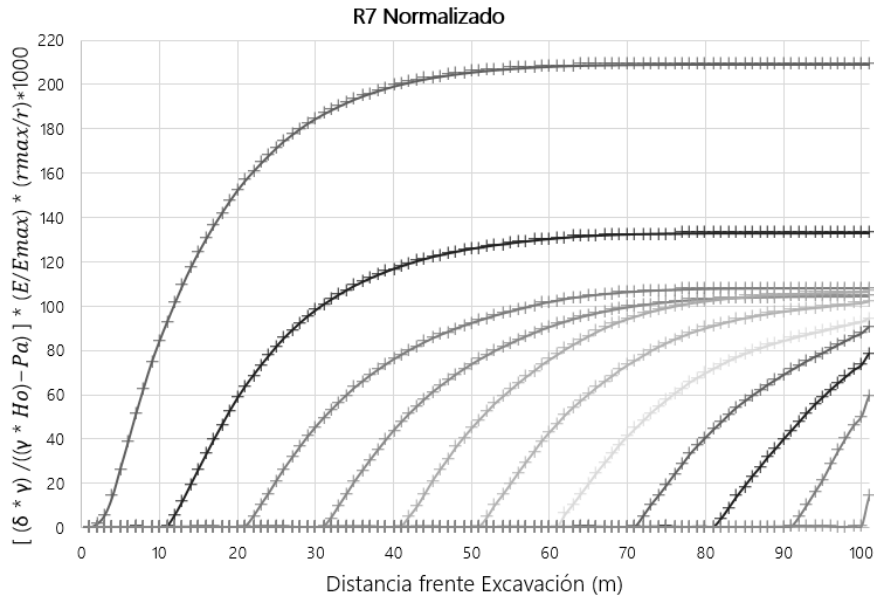


Figura 7.7: Desplazamientos normalizados para túnel con radio de 7m en comportamiento plástico.

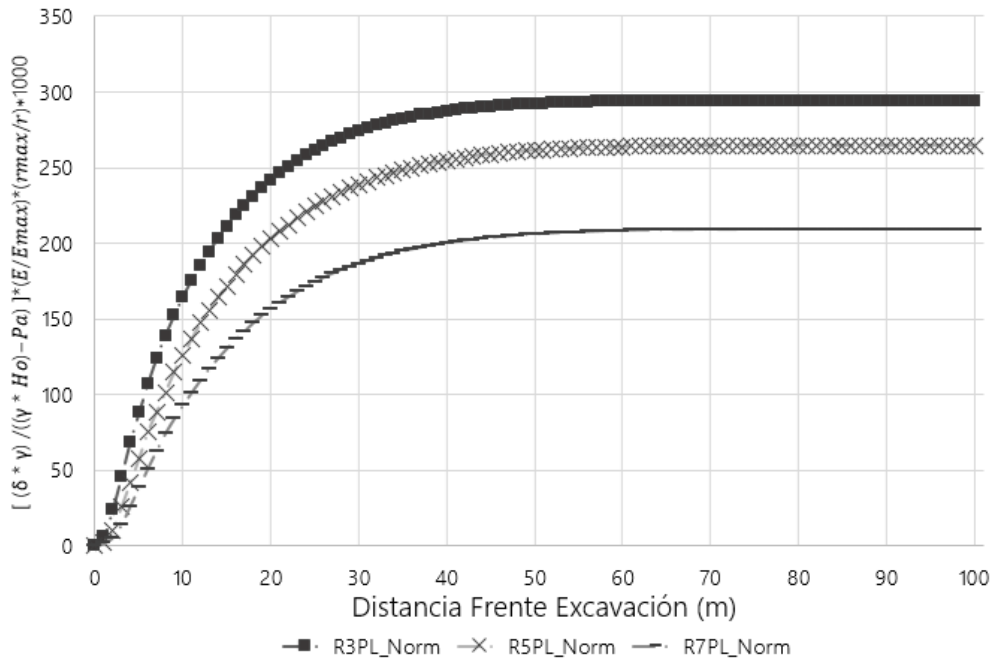


Figura 7.8: Desplazamientos normalizados en comportamiento plástico, caso crítico.

Asimismo, se normalizaron los desplazamientos de las modelaciones con Pa aplicando la ecuación 7.1. Posteriormente se realizó la gráfica correspondiente co-

mo se muestra en la figura 7.12. Al analizar las curvas, observamos que éstas siguen manteniendo la tendencia de las gráficas de los desplazamientos totales. Además, se aprecia que los resultados se estabilizan a partir de $L=30\text{m}$ de excavación como sucede con los desplazamientos totales.

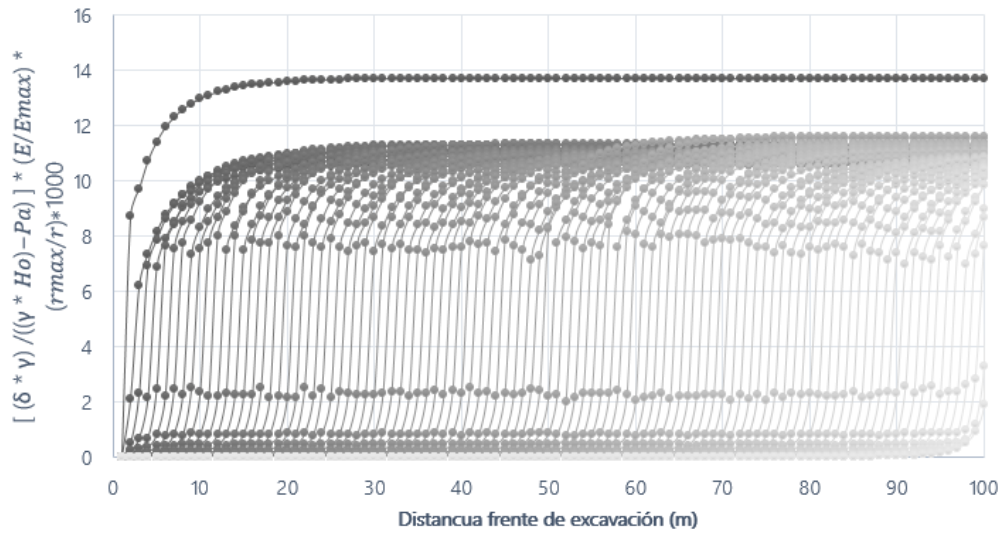


Figura 7.9: Desplazamientos normalizados para $r=3\text{m}$ con presión $P_a=300\text{kPa}$.

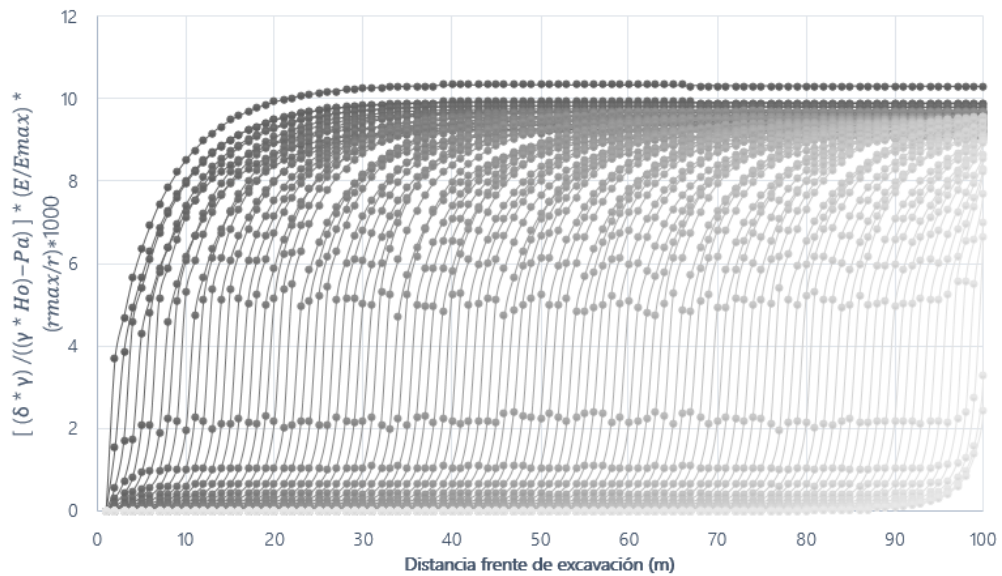


Figura 7.10: Desplazamientos normalizados para $r=5\text{m}$ con presión $P_a=300\text{kPa}$.

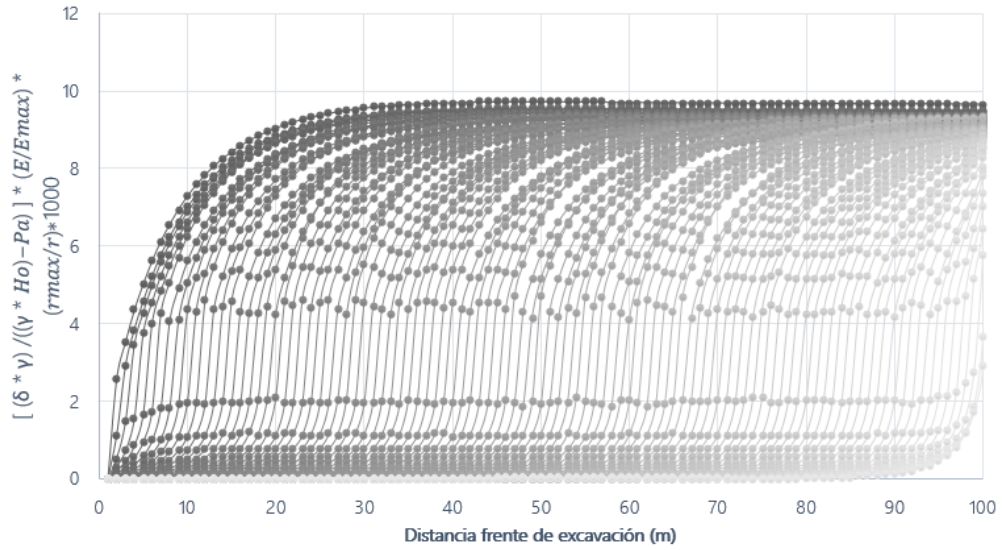


Figura 7.11: Desplazamientos normalizados para r=7m con presión Pa=300kPa.

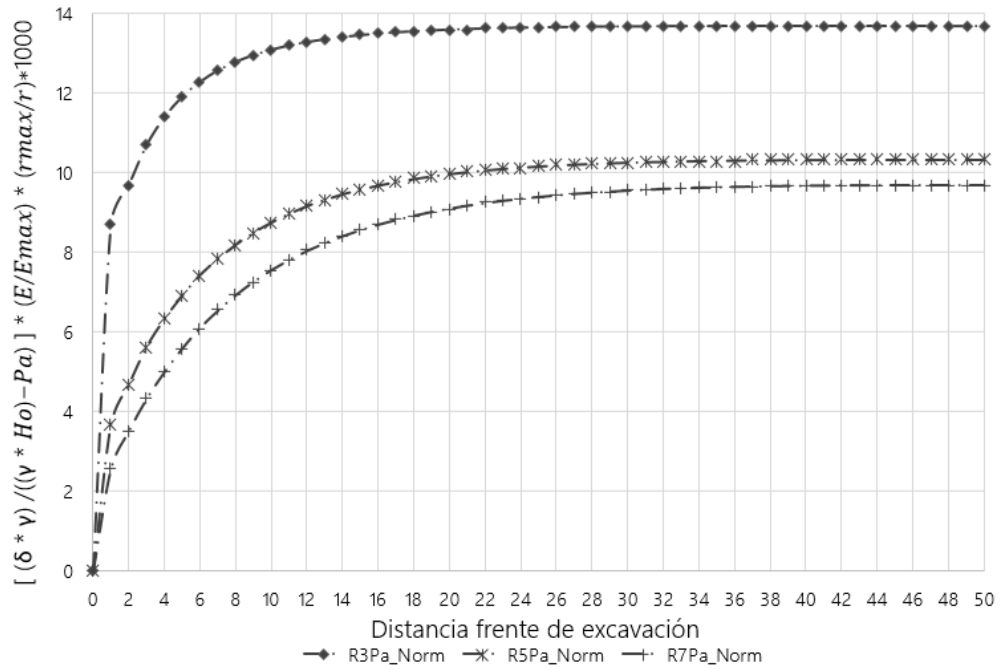


Figura 7.12: Normalización de desplazamientos en comportamiento plástico con presión Pa=300kPa.

Los resultados de las normalización de los desplazamientos para comportamiento elástico y el caso plástico con Pa se utilizarán para plantear las ecuaciones que se muestran en la siguiente sección.

7.2. Obtención de ecuaciones de desplazamiento

En la sección 7.1 vimos que las gráficas de los desplazamientos ocurridos al interior del túnel mantienen su tendencia al ser normalizados. Sin embargo, la normalización propuesta solo nos permite observar la influencia de los distintos parámetros en el comportamiento del túnel. Además, si se requiere calcular los desplazamientos de un túnel cualquiera por medio de las gráficas generadas éste tendría que considerar las mismas variables que se han considerado para esta investigación. Por consiguiente, para poder obtener los desplazamientos que se generan por efectos de la excavación en cualquier túnel de manera sencilla es necesario incluir la distancia del frente de excavación como parte del modelo para que su influencia permita generalizar los resultados.

Para incluir la excavación en el modelo es necesario analizar las gráficas normalizadas (figura 7.13) en donde se muestra sobre el eje de las abscisas la distancia respecto al frente de excavación \mathbf{X} , por su parte sobre el eje de las ordenadas se observa el valor calculado con la normalización, es decir el valor de \mathbf{Y} , por lo tanto cada punto de las curvas contiene un valor de distancia de excavación y un valor de la normalización. En ese sentido, es posible calcular el valor de \mathbf{Y} de la normalización a partir de la gráfica en cualquier etapa de la excavación. Sin embargo, como se mencionó anteriormente de esta manera solo obtendríamos los desplazamientos obtenidos con las propiedades geométricas y de material planteadas en el capítulo 4. A pesar de lo anterior, es posible representar las curvas de las gráficas por medio de una expresión matemática sencilla con ayuda de la interpolación matemática.

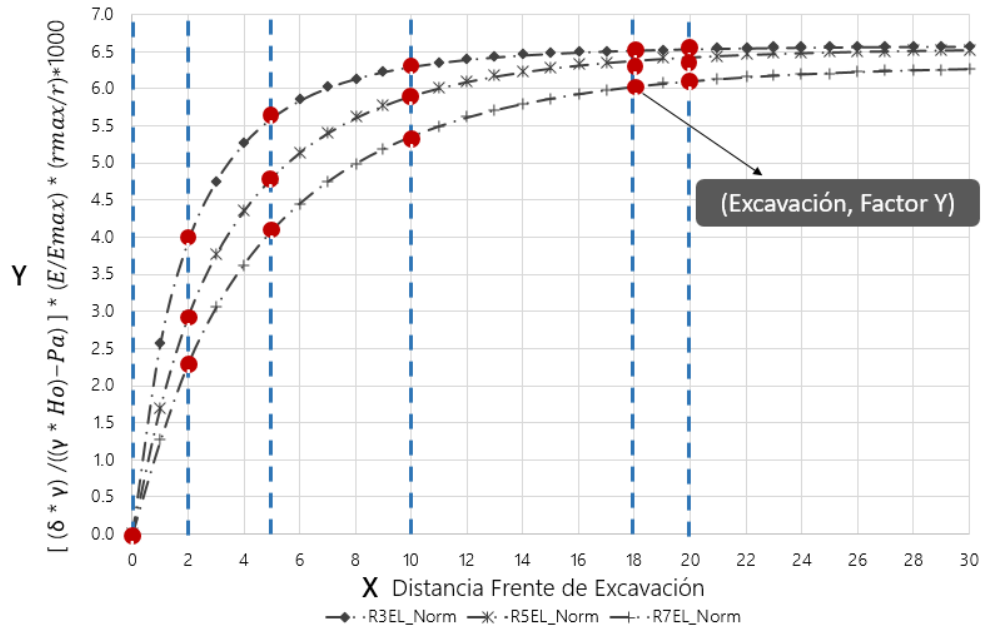


Figura 7.13: Obtención de ecuaciones

Para poder obtener las ecuaciones que representen las curvas normalizadas, se seleccionaron los seis valores que representen de manera óptima la tendencia de la curva, mostrado con los puntos rojos de la figura 7.13. La selección de los valores se hizo para los tres distintos radios R3, R5 y R7. Los valores seleccionados en las curvas se muestran en las tablas 7.2 y 7.1 para los casos elásticos y plásticos con Pa respectivamente.

Con los valores seleccionados (Tablas 7.2 y 7.1), se utilizó el método de interpolación polinómica para el cálculo de las ecuaciones. Para facilitar el cálculo, se empleó el software Wolfram Mathematica en su versión 10.0.1.0 (Anexos 10.2), con la ayuda de la función *Interpolate* incluida dentro del programa, obteniendo las siguientes ecuaciones (Ecuaciones 7.2 - 7.7):

Tabla 7.1: Valores seleccionados para el cálculo de las ecuaciones elásticas.

Distancia Frente excavación, X (m)						
r (m)	0.0	2.0	5.0	10.0	18.0	20.0
3	0.0	3.95	5.61	6.30	6.52	6.54
5	0.0	2.93	4.80	5.90	6.38	6.43
7	0.0	2.29	4.09	5.35	6.02	6.09

Tabla 7.2: Valores seleccionados para el cálculo de ecuaciones plásticas con Pa=300kpa.

Distancia Frente excavación, X (m)						
r (m)	0.0	5.0	12.0	20.0	26.0	30.0
3	0.0	11.92	13.29	13.60	13.67	13.68
5	0.0	6.93	9.18	9.98	10.19	10.27
7	0.0	5.60	8.05	9.11	9.45	9.57

Ecuaciones para comportamiento elástico:

$$Y = 2,9814X - 0,6164X^2 + 0,0622X^3 - 0,00290X^4 + 5,10 * 10^{-5} X^5 \quad (7.2)$$

$$Y = 2,0099X - 0,3253X^2 + 0,0288X^3 - 0,00130X^4 + 2,10 * 10^{-5} X^5 \quad (7.3)$$

$$Y = 1,4706X - 0,1894X^2 + 0,0144X^3 - 0,00057X^4 + 9,01 * 10^{-6} X^5 \quad (7.4)$$

siendo la ecuación 7.2 para R3, la ecuación 7.3 para R5 y la ecuación 7.4 para R7.

Ecuaciones para comportamiento plástico:

$$Y = 4,5024X - 0,5708X^2 + 0,0339X^3 - 0,00095X^4 + 1,003 * 10^{-5}X^5 \quad (7.5)$$

$$Y = 2,3157X - 0,2441X^2 + 0,0133X^3 - 0,00036X^4 + 3,71 * 10^{-6}X^5 \quad (7.6)$$

$$Y = 1,7549X - 0,1641X^2 + 0,0085X^3 - 0,00022X^4 + 2,26 * 10^{-6}X^5 \quad (7.7)$$

siendo la ecuación 7.5 para R3, la ecuación 7.6 para R5 y la ecuación 7.7 para R7.

Asimismo, el valor de \mathbf{X} representa la distancia respecto al frente de excavación en metros para todos los casos anteriores. Además, el valor \mathbf{Y} que se obtiene es el factor de cálculo \mathbf{Y} de la normalización de los desplazamientos. Por consecuencia, con ayuda de estas ecuaciones es posible realizar el cálculo de los desplazamientos de un túnel en la etapa de excavación que se requiera o el desplazamiento que se genera respecto al avance del frente de excavación. En este sentido, es necesario sustituir el valor de \mathbf{Y} obtenido de las ecuaciones en la ecuación de normalización 7.1 y realizar el despeje correspondiente de δ como se muestra en la ecuación 7.8:

$$\delta = \frac{Y(\gamma H_0 - P_a)}{1000\gamma} * \frac{E_{max}}{E} * \frac{r}{r_{max}} \quad (7.8)$$

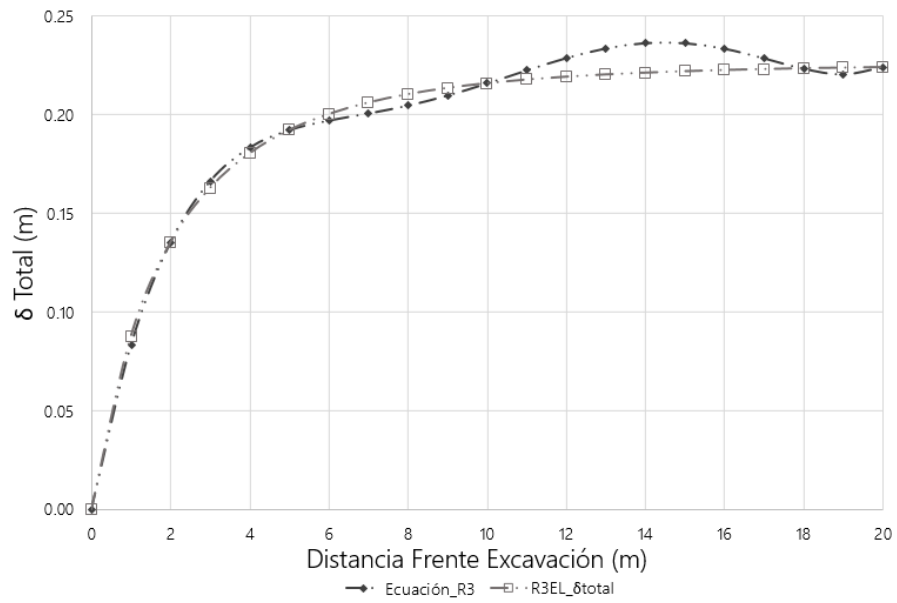
donde δ es el desplazamiento total obtenido en el modelo en metros, γ el peso específico del material en kN/m^3 , H_0 la profundidad de desplante medida al centro del túnel en metros, P_a la presión interna en kN/m^2 , E el módulo de elasticidad en kN/m^2 , r el radio de la sección en metros, E_{max} y r_{max} módulo de elasticidad en kN/m^2 y radio máximo en metros respectivamente.

Para revisar la aproximación de las ecuaciones, se realizó el cálculo de los desplazamientos considerando el valor de \mathbf{X} como el avance en cada etapa de del frente de excavación y las propiedades de del material dado para los modelos. Posteriormente, Los desplazamientos obtenidos con las ecuaciones (7.2 - 7.7) fueron comparados con los desplazamientos totales obtenidos de los modelo en

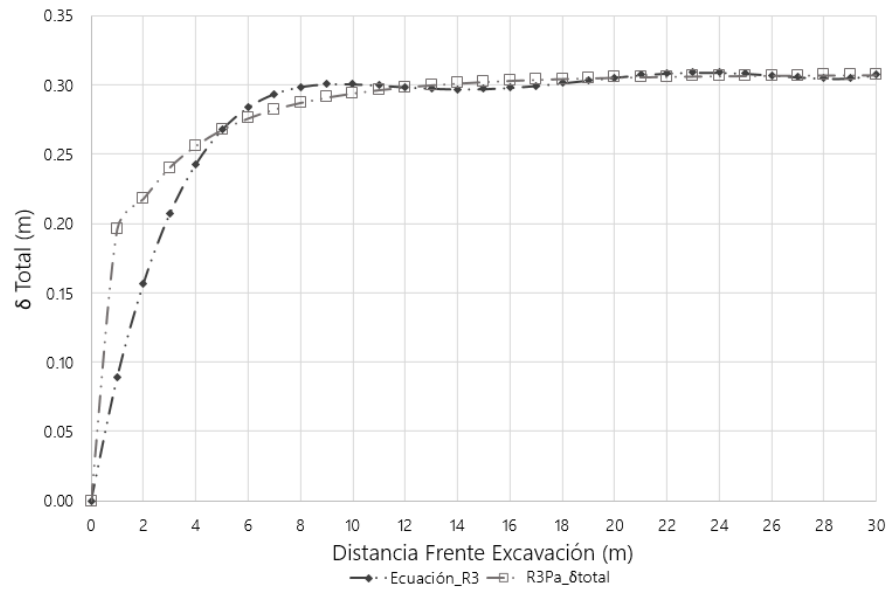
RS3®. Los resultados de esta comparación fueron graficados como se muestra en las figuras 7.14, 7.15 y 7.16.

Al analizar las curvas de las figuras 7.14, 7.15 y 7.16 notamos que las tres ecuaciones para ambos comportamientos generan resultados muy similares a los obtenidos con el modelo computacional, presentando diferencias mínimas entre ambos resultados, además, las curvas generadas se empalman de buena manera en todos los casos. De la misma forma, las ecuaciones para túneles con radios de 5 y 7 metros presentan una mayor aproximación a los resultados del modelo, esto en ambos comportamientos (figuras 7.15 y 7.16). En ese sentido, las curvas para R7 se empalman prácticamente de manera exacta. Por su parte, en el caso de los túneles con radio de $r=3$ metros, la curva del análisis elástico (7.14a) tiene un mejor ajuste que la curva plástica (7.14b) al inicio de la misma. En esta zona de la curva, se aprecia una diferencia entre los resultados obtenidos con el modelo y los que se obtienen por medio de la ecuación plástica. Esta diferencia es consecuencia de la presión P_a seleccionada como se mencionó en la sección 6.3. Sin embargo, a partir de que los desplazamientos alcanzan su valor máximo, se presenta un mejor empalme de las curvas para el comportamiento plástico lo que significa que esta ecuación debería de calcular desplazamientos máximos con mayor precisión que su contra parte elástica.

En resumen, las ecuaciones 7.2 - 7.7 nos permiten el cálculo de desplazamientos máximos en la excavación de túneles con distintos diámetros y métodos de excavación. En la sección 8.1 se tocará con mayor detalle los usos y limitaciones de las ecuaciones propuestas.

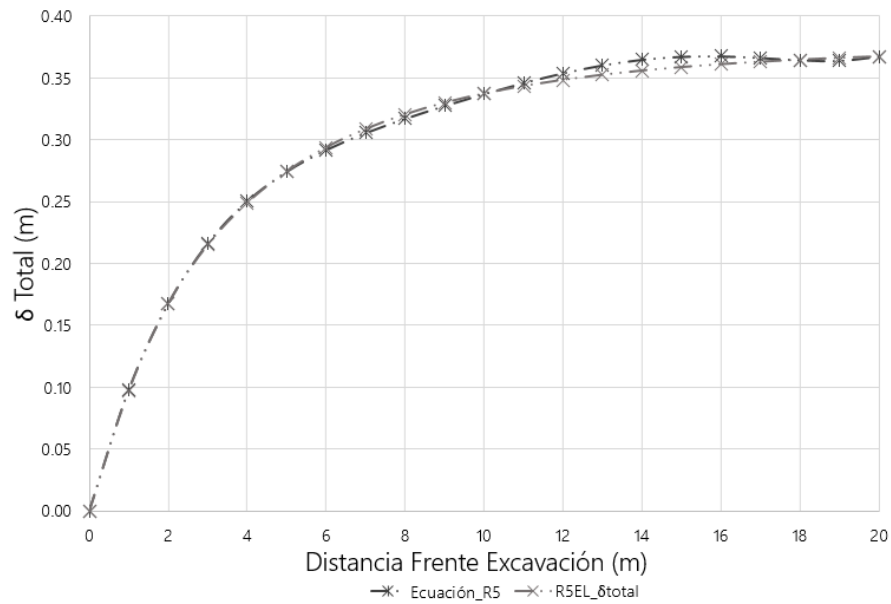


(a) Comportamiento elástico R3.



(b) Comportamiento plástico R3 con Pa.

Figura 7.14: Comparación para un radio de 3m de desplazamientos totales entre los valores del modelo y las ecuaciones.



(a) Comportamiento elástico R5.

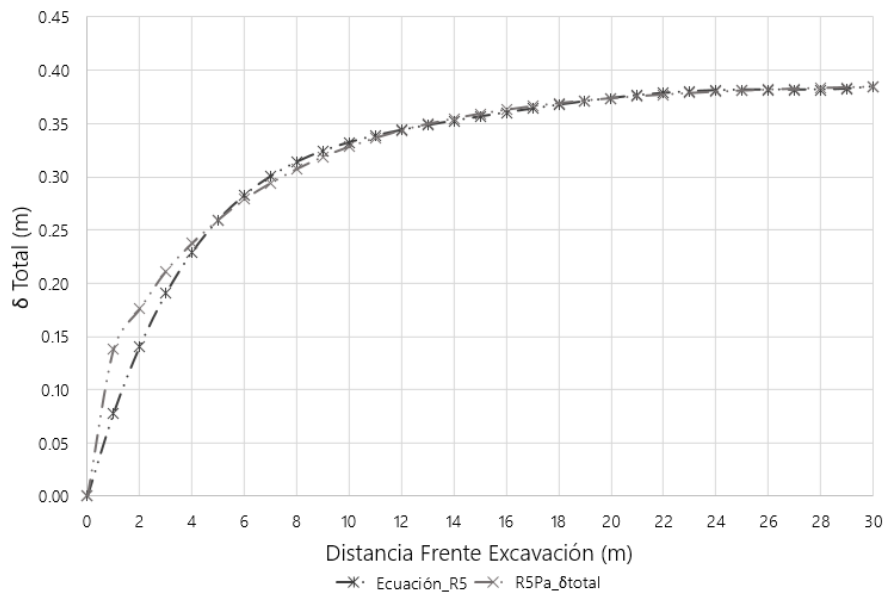
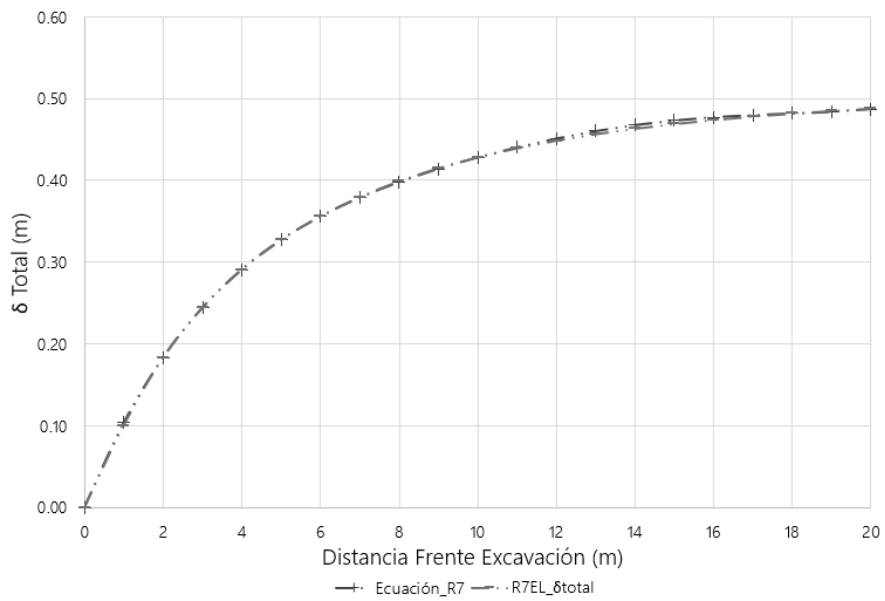
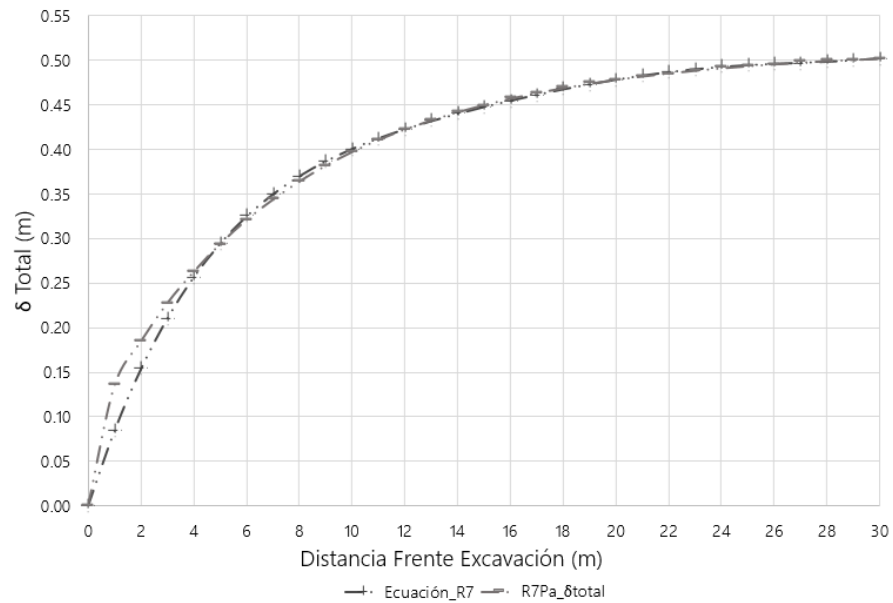
(b) Comportamiento plástico R5 con P_a .

Figura 7.15: Comparación para un radio de 5m de desplazamientos totales entre los valores del modelo y las ecuaciones.



(a) Comportamiento elástico R7.



(b) Comportamiento plástico R7 con Pa.

Figura 7.16: Comparación para un radio de 7m de desplazamientos totales entre los valores del modelo y las ecuaciones.

Capítulo 8

La validación del Modelo

8.1. Validación de ecuaciones

Como se vio en la sección 7.2 las ecuaciones planteadas permiten calcular los desplazamientos en túneles circulares excavados en arcilla. Estas se obtuvieron a partir de modelos con propiedades geométricas y de material particulares. Para probar su validez se aplicaron las ecuaciones para diversos casos, en los cuales se hace uso de distintos materiales, profundidades y diámetros de los túneles.

Haciendo una revisión de las validaciones usadas para otros trabajos en el estado del arte [29], se decidió que en este trabajo se tomarán como validos los resultados que tengan como máximo un centímetro de diferencia con los trabajos comparados. Las propiedades del material, condiciones geométricas y desplazamientos usados para ésta comparación fueron tomados de los los autores Oriol Arnau et al. [19], Amadou Jallow et al. [4], H. Katebi et al. [20], s. Miro et al. [22] y Xing Tao Lin et al. [6], de los cuales se realizó una breve descripción en el capítulo 3 de este trabajo. Las propiedades geométricas y de material sacadas de estos artículos son: tipo de material (*Mat.*), peso específico (γ), módulo de elasticidad (E), profundidad del túnel (Ho), radio (r), presión interna (Pa), tipo de excavación (*Excav.*) y distancia del avance de excavación (X). Las propiedades anteriores se muestran en la tabla 8.1, cuyas unidades se han mencionado anteriormente.

Como se puede observar, el tipo de material usado en los trabajos seleccionados es distinto al de los modelos numéricos de ésta investigación, teniendo materiales

como limo (ML), arenas (SM) y arenas de grano medio (MCS) [6]. Además, en algunos de los casos los autores no especifican el tipo de material con el cual se está trabajando. En el caso del módulo de elasticidad, vemos que los valores usados por los autores difieren del valor de E_{max} seleccionado en la normalización planteada (ecuación 7.1), sin embargo se decidió usar estos valores de módulos para comprobar los alcances de las ecuaciones y revisar si funcionan para cualquier material. Por su parte, la columna *Excavación* se refiere al tipo de excavación simulada en cada uno de los artículos, en donde apreciamos que todos los casos son por los medios mecanizados más actuales como son las túneladoras. A su vez, la columna X se refiere al avance que se tiene al frente de la excavación en cada etapa del modelo o en su defecto se consideraba como el ancho de los anillos de recubrimiento que coloca la TBM o EPB según sea el caso. En ese sentido, en todos los casos la medición de los desplazamientos se realizaba de forma puntual ya sea en una etapa de excavación, en algún punto de interés o en una estación de monitoreo *in situ*. Asimismo, por definición el H_o se mide desde la superficie hasta el centro de la sección. Por lo que, para su cálculo, en todos los casos, fue necesario sumar la profundidad total mostrada por el autor (desde la superficie a la clave del túnel) más el valor del radio; con excepción del caso de Miro et al. que realiza su análisis en el piso del túnel por lo tanto el valor del radio se restó a la profundidad total.

Una vez definidas las propiedades usadas por otros autores, se hizo uso de las ecuaciones propuestas en la sección 7.2 para el cálculo de los desplazamientos. En primer lugar, se realizó la sustitución del avance del frente de excavación \mathbf{X} en cada ecuación, con lo que se obtuvo el factor de cálculo \mathbf{Y} para cada caso. Para seleccionar la ecuación para cada caso, se hizo uso de los intervalos mostrados en la tabla 8.2 que nos indica que ecuación usar dependiendo las dimensiones del radio del túnel y el comportamiento deseado.

Tabla 8.1: Propiedades geométricas y de material utilizadas para la validación de ecuaciones.

Autor	Mat.	γ	E	Ho	r	Pa	Excav.	X
Arnau (a)	-	18.00	25000	30.80	5.80	0.00	TBM	1.80
Arnau (b)	-	18.00	25000	30.80	5.80	0.00	TBM	1.80
Arnau (a)	-	18.00	25000	30.80	5.80	0.00	TBM	1.80
Jallow (a)	ML	18.94	16199	28.50	3.05	473.00	TBM	5.00
Jallow (b)	SM	18.74	15033	26.50	3.05	473.00	TBM	5.00
Katebi (a)	ML	20.35	25000	18.98	4.75	0.00	EPB	1.50
Katebi (b)	SM	20.00	23000	23.44	3.44	0.00	EPB	1.00
Miro (a)	-	16.00	25000	12.75	4.25	187.50	TBM	1.50
Xin Tao (a)	MCS	19.50	37800	12.00	3.00	147.30	EPB	1.50
Xin Tao (b)	MCS	19.50	37800	15.00	3.00	128.70	EPB	1.50

Tabla 8.2: Criterio para la elección de las ecuaciones a usar.

Ecuación empleada		
Radio	Elástica	Plástica
De 2 a 4m	7.2	7.5
De 4 a 6m	7.3	7.6
Mayor a 6m	7.4	7.7

Posteriormente, el valor de \mathbf{Y} se sustituyó en la ecuación 7.8 junto con todas las propiedades geométricas y de material mostradas en la tabla 8.1 obteniendo así los desplazamientos que se muestran en la tabla 8.4. Donde δ_{max} simboliza el desplazamiento máximo calculado por el autor del trabajo, δ_{EL} representa el

desplazamiento obtenido con la ecuación elástica correspondiente a las dimensiones de su radio de túnel, del mismo modo, δ_{Pa} que representa el desplazamiento obtenido con las ecuaciones de desplazamiento plástico con Pa.

Por otro lado, para tener una idea más clara sobre cuál de las ecuaciones se adapta de mejor manera a todos los casos, se utilizaron las distintas ecuaciones de comportamiento plástico con Pa para todos los casos comparados, es decir, δ_{R3} representa los desplazamientos que se obtienen al emplear la ecuación 7.5 sin tomar en cuenta que la magnitud del radio propuesto sea distinto a 3 metros ni considerar los intervalos propuestos en la tabla 8.2 para la selección de la ecuación correspondiente. Lo mismo ocurre con δ_{R5} y δ_{R7} que muestran los desplazamientos que se obtienen a partir de las ecuaciones 7.6 y 7.7, respectivamente, para todos los radios planteados. Nótese que en la tabla 8.3 se muestran los factores de cálculo \mathbf{Y} para estos casos.

Tabla 8.3: Factor de cálculo Y obtenido de las ecuaciones.

Autor	Y_{EL}	Y_{Pa}	Y_{R3}	Y_{R5}	Y_{R7}
Arnau (a)	2.7186	3.4512	6.4429	3.4514	2.6742
Arnau (b)	2.7186	3.4512	6.4429	3.4514	2.6742
Arnau (c)	2.7186	3.4512	6.4429	3.4514	2.6742
Jallow (a)	5.6189	11.9179	11.9200	6.9300	5.6000
Jallow (b)	5.6189	11.9179	11.9200	6.9300	5.6000
Katebi (a)	2.3737	2.9674	5.5790	2.9675	2.2906
Katebi (b)	2.4244	3.9646	3.9646	2.0846	1.5990
Miro (a)	2.3737	2.9674	5.5790	2.9675	2.2907
Xin Tao (a)	3.2808	5.5790	5.5790	2.9675	2.2906
Xin Tao (b)	3.2808	5.5790	5.5790	2.9675	2.2906

En la tabla 8.4 se muestran los desplazamientos obtenidos con cada ecuación. En ella se observan valores resaltados con negrita los cuales representan aquellos casos en los que el desplazamiento calculado presenta una diferencia menor a 1 centímetro con respecto al caso real comparado. Por otra parte, para la mayoría del resto de casos, la diferencia máxima con el autor correspondiente es de 3 centímetros, indicado con el valor subrayado, lo que nos da un buen panorama de la precisión de las ecuaciones planteadas.

Tabla 8.4: Desplazamientos obtenidos con las ecuaciones propuestas.

Autor	δ_{max}	δ_{EL}	δ_{Pa}	δ_{R3}	δ_{R5}	δ_{R7}
Arnau (a)	0.0500	<u>0.0666</u>	0.0846	0.1578	0.0846	<u>0.0655</u>
Arnau (b)	0.0590	0.0666	<u>0.0846</u>	0.1578	<u>0.0846</u>	0.0655
Arnau (c)	0.0650	0.0666	<u>0.0846</u>	0.1578	<u>0.0846</u>	0.0655
Jallow (a)	0.0054	0.0128	<u>0.0271</u>	<u>0.0271</u>	<u>0.0158</u>	0.0127
Jallow (b)	0.0190	<u>0.0049</u>	0.0104	0.0104	<u>0.0061</u>	<u>0.0049</u>
Katebi (a)	0.0275	0.0293	0.0367	0.0689	0.0367	0.0283
Katebi (b)	0.0400	<u>0.0291</u>	0.0477	0.0477	<u>0.0251</u>	<u>0.0192</u>
Miro (a)	0.0080	0.0014	0.0018	0.0034	0.0018	0.0014
Xin Tao (a)	0.0010	0.0040	0.0067	0.0067	0.0036	0.0028
Xin Tao (b)	0.0020	0.0075	<u>0.0128</u>	<u>0.0128</u>	0.0068	0.0052

A partir de estos resultados es posible realizar gráficas que plasmen de manera más clara la aproximación de los resultados. En las figuras 8.1 a 8.5 se observa una comparación entre los casos reales y los desplazamientos calculados con las ecuaciones a través de gráficas radiales. En estas gráficas cada polígono representa el desplazamiento de uno o dos centímetros, según sea el caso. Los vértices de estos polígonos indican el autor respecto al cual se está comparando. Los puntos de la gráfica simbolizan los desplazamientos calculados con las ecuaciones, mostrados en la tabla 8.4, estos puntos se encuentran situados en dirección al vértice que corresponde a cada autor. En cada gráfica los cuadrados vacíos representan los

desplazamientos de los autores, el cuadrado y círculo de color negro los desplazamientos elásticos y plásticos, respectivamente, calculados con los criterios de la tabla 8.3, mientras que el rombo, la equis y la cruz simbolizan los desplazamientos calculados con las ecuaciones para todos los radios. Conforme los puntos se alejan del centro de la gráfica representan un desplazamiento mayor, mientras que al aproximarse a los cuadrados vacíos significa que el valor es más cercano al caso comparado. Los casos de comparaciones no mostrados a continuación se encuentran en la sección 10.3 de los anexos.

En la figura 8.1 se muestra la gráfica radial donde se comparan todos los resultados con el caso real de los autores. En ella se aprecia que la mayoría de los resultados se encuentran próximos al resultado de los artículos. Sin embargo, analizando el comportamiento de la ecuación R3 observamos que los resultados de esta difieren en gran medida a los casos reales analizados por lo que esta ecuación no es apta para usarse con cualquier radio.

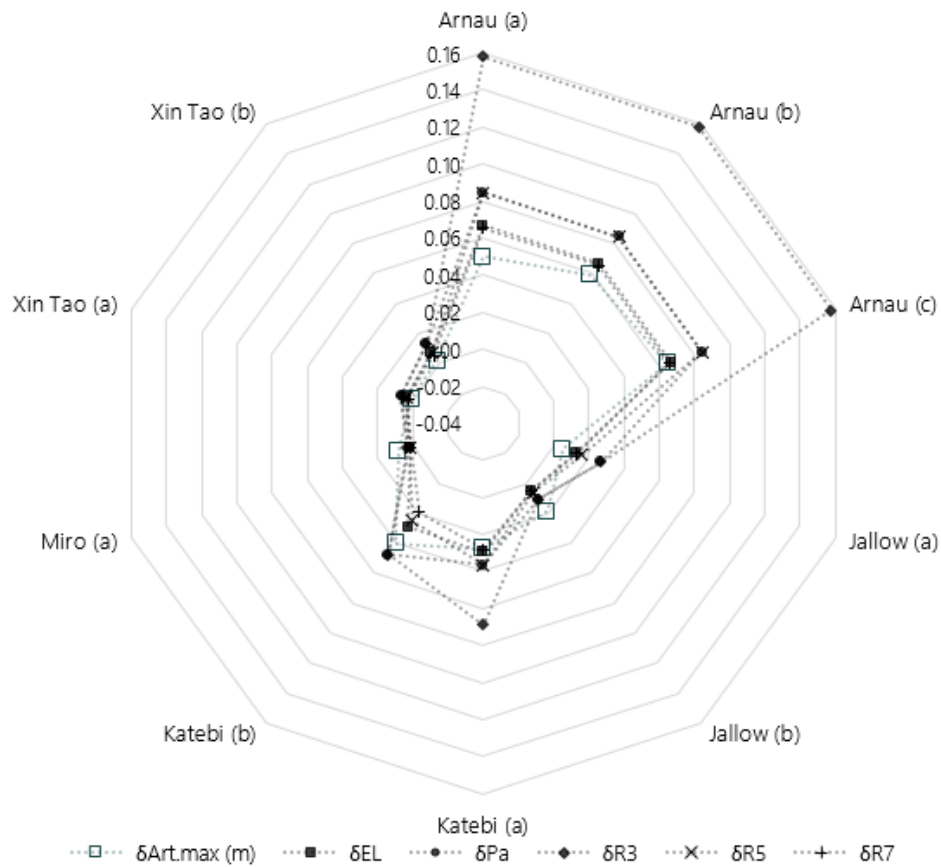


Figura 8.1: Comparación con el caso real de todos los desplazamientos obtenidos.

En la siguiente gráfica (figura 8.2) se realiza una comparación de los desplazamientos obtenidos con las ecuaciones elásticas y plásticas usando los criterios de la tabla 8.3. En esta se observa que los resultados obtenidos con las ecuaciones elásticas tienen un mejor ajuste respecto a su contra parte plástica, teniendo la mayor diferencia en los desplazamientos en comparación con Arnau (a) con 2 centímetros aproximadamente, mientras que el caso plástico es de 3 centímetros aproximadamente.

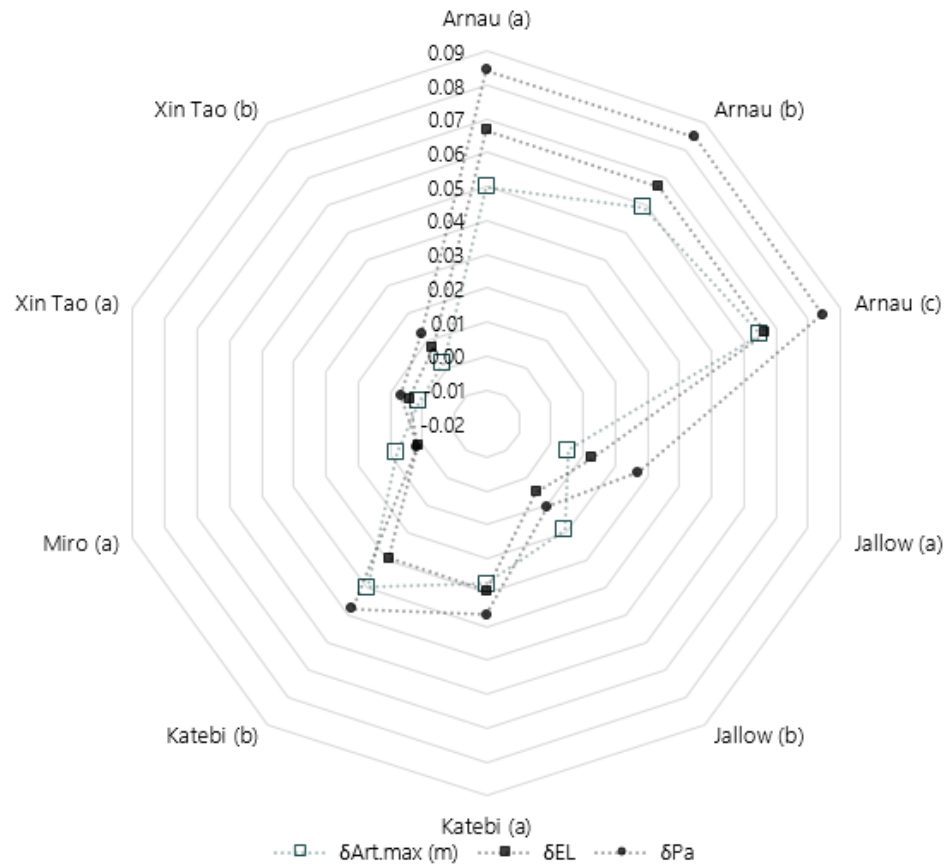


Figura 8.2: Comparación de ecuación elástica y plástica con los casos reales.

Debido a lo anterior, se revisó la opción de observar cuál de las ecuaciones plásticas funciona para todos los casos. En la gráfica de la figura 8.3 tenemos los desplazamientos calculados con las ecuaciones 7.5 para R3, 7.6 para R5 y 7.4 para R7. En esta se reitera que la ecuación 7.5 para R3 dista mucho de los desplazamientos de los artículos en análisis al considerarse radios que sean distintos de 3 metros, teniendo buen ajuste cuando se trata de esta dimensión de radio (véase Jallow (a;b) y Katebi (b)). Por su parte, al revisar los resultados que se obtienen al utilizar la ecuación 7.6 para R5 se vemos que estos tienen buena aproximación respecto a los artículos usados para la comparación. Sin embargo, al analizar los desplazamientos de ecuación 7.7 para R7 vemos que estos presentan mejor ajuste que los que se obtienen con la ecuación para R5 en la mayoría de los casos analizados, por lo que los resultados con la ecuación para R7 presentan un buen

panorama en el intento de encontrar una ecuación general que facilite la obtención de desplazamientos.

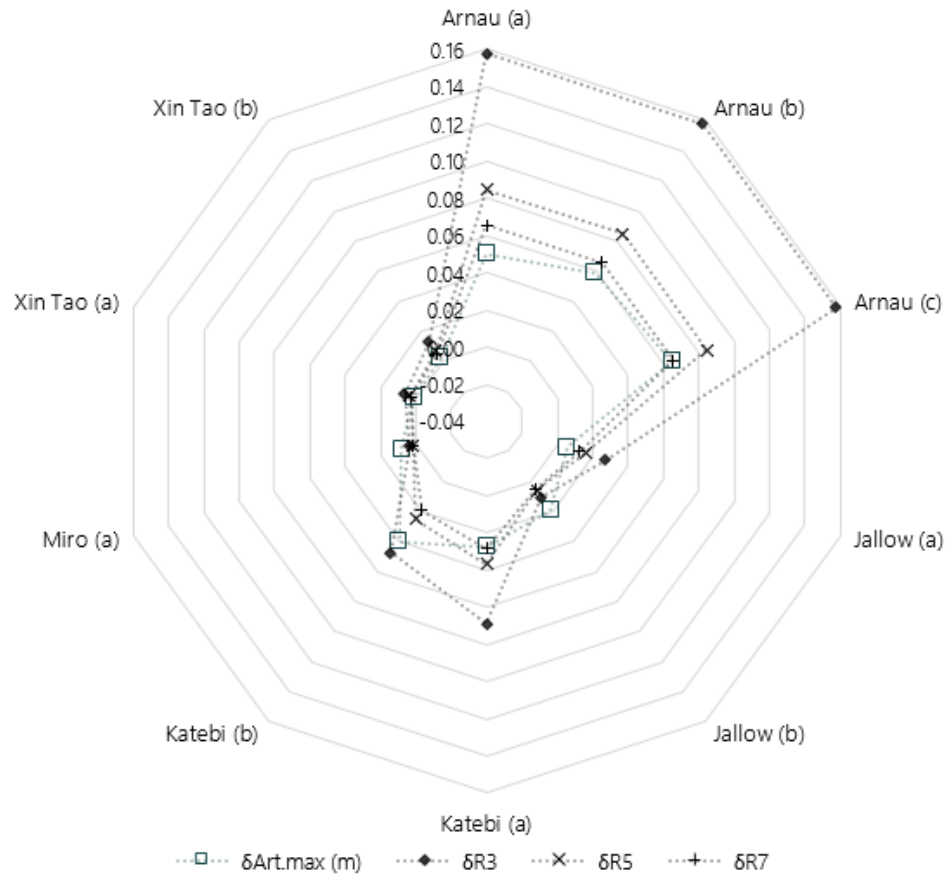


Figura 8.3: Comparación caso real con ecuaciones plásticas R3, R5 y R7 con radios distintos.

A partir de esto es necesario realizar una comparación entre los resultados plásticos y elásticos con la ecuación para R7. En primer lugar se analizará el caso plástico. En la gráfica de la figura 8.4 se muestran los desplazamientos que se obtienen a partir de las ecuaciones plásticas considerando los intervalos establecidos en la tabla 8.3 y aquellos obtenidos con la ecuación 7.7 para R7. En este gráfico vemos que los desplazamientos entre las ecuaciones plásticas y la ecuación para R7 difieren en muchos de los artículos comparados. Esto se debe a que considerando los intervalos establecidos en la tabla 8.3 no se llega a utilizar la ecuación 7.7 para R7 en ninguno de los artículos con los que se está llevando esta comparación (revi-

sar tabla 8.1). Sin embargo esta diferencia sigue siendo favorable para la ecuación 7.7.

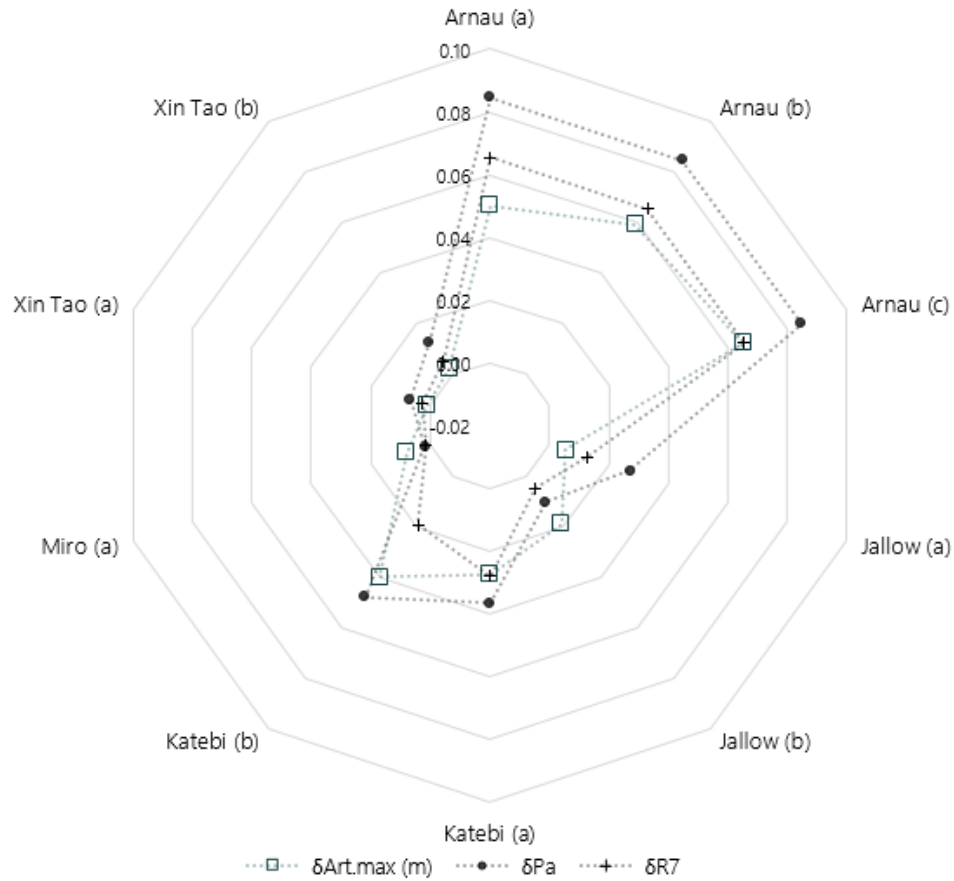


Figura 8.4: Comparación caso real con ecuaciones plásticas y ecuación para R7.

Por otro lado, al realizar la comparación de los desplazamientos elásticos y los obtenidos para R7 (ecuación 7.7), como se muestra en la figura 8.5, se aprecia que ambos casos tienen un ajuste similar a los resultados que muestran los autores en sus trabajos. A pesar de esto, existe una mínima diferencia entre ambos casos, siendo la ecuación para R7 la que presenta mayor aproximación con los casos reales. Además, cabe recordar que en el caso elástico se requiere más de una ecuación para cumplir con esta aproximación, por lo que se podría considerar que la ecuación 7.7 para R7 es la mejor opción en el intento de generalizar el cálculo de desplazamientos al diseñar un túnel.

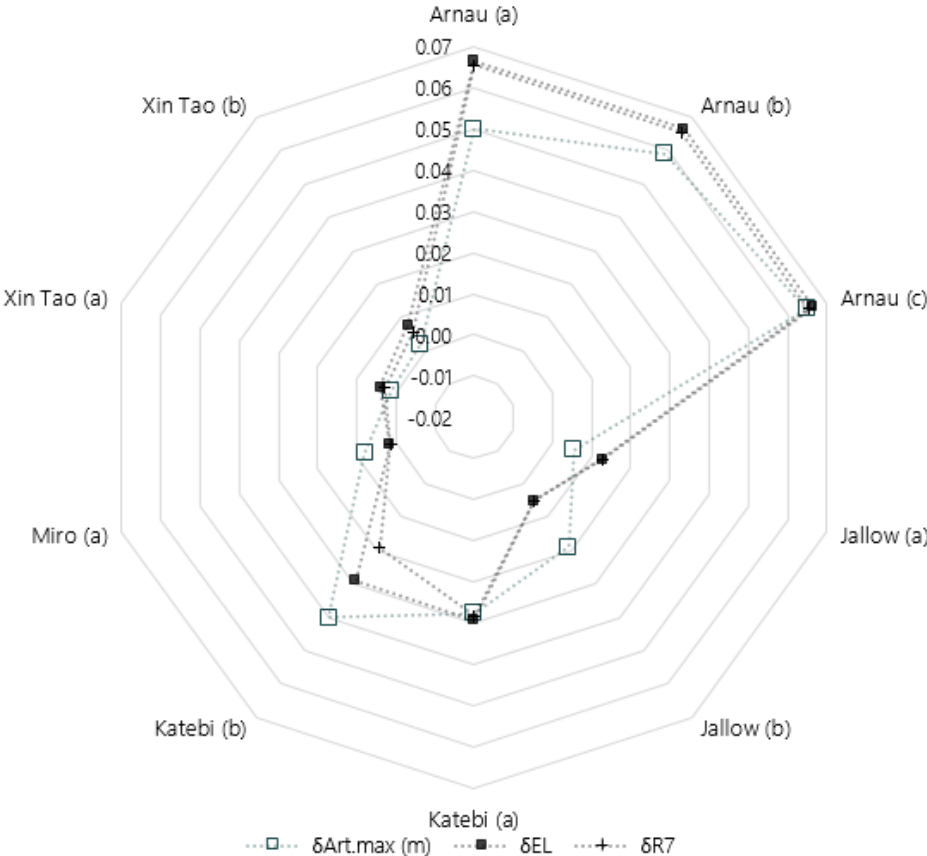


Figura 8.5: Comparación caso real con ecuaciones elásticas y ecuación para R7.

Capítulo 9

Conclusiones y comentarios

9.1. Conclusiones

Se realizaron modelos de túneles en elementos finitos para el cálculo de los desplazamientos plásticos y elásticos.

Se propone una normalización de los desplazamientos en función de los parámetros del material con los que se alimentó el modelo de elementos finitos. Para el caso elástico y plástico al comparar los resultados de la normalización de los tres túneles, las curvas se ajustan entre ellas, considerándose o no la presión interna P_a , lo que favorece a la generalización de las ecuaciones.

Además, el incluir una presión radial P_a ayuda a estabilizar los desplazamientos de la periferia hacia el interior del túnel, esto en un corto periodo de tiempo lo que nos garantiza seguridad al momento de realizar la excavación y disminuye tiempos de construcción.

Se proponen ecuaciones a partir de la normalización, las que nos permiten obtener desplazamientos en cualquier punto del túnel. Las ecuaciones se plantearon en función de los parámetros del material y el avance de la excavación.

Al realizar una comparación entre los resultados de las ecuaciones elásticas y elasto-plásticas con los casos reales, se observó que aquellos desplazamientos obtenidos con las ecuaciones elásticas tuvieron una mejor aproximación con el caso real. Por otro lado, se observa que las ecuaciones para R5 y R7 presentan un

buen ajuste en la mayoría de los casos, a diferencia de la ecuación para R3 que difiere en gran medida con los trabajos comparados.

Por su parte, la ecuación de R7 al usarla para cualquier radio mostró resultados favorables al ser comparada con los casos reales. Así mismo, presento un buen comportamiento al compararse contra el comportamiento elástico, por lo que podemos decir que la ecuación 7.7 es la que mejor se ajusta a todos los casos.

Además, las ecuaciones planteadas funcionan correctamente a pesar de que los módulos de elasticidad fueran mayores al planteado. Por lo tanto es posible usarlas en materiales blandos y arenosos.

Al usar la presión Geoestática los desplazamientos obtenidos con la ecuación se convierten en cero, lo que significa que se logró una estabilización del suelo. Por lo que una limitante de nuestras ecuaciones es cuando se aplican presiones mayores a la geoestática para estabilizar una obra real ya que se obtienen desplazamientos negativos a partir de las ecuaciones.

Las ecuaciones propuestas ayudan a reducir tiempo de cálculo de los desplazamientos generados al diseñar un túnel y pueden usarse para generalizar la obtención de los mismos en cualquier suelo blando o arenoso, por lo que se cumple el objetivo principal de esta tesis.

9.2. Trabajo futuro

Es necesario realizar trabajos que consideren la anisotropía del suelo. Además se requieren modelos de túneles en presencia de agua que pongan en riesgo su estabilización. Así mismo, con el fin de redondear el trabajo, se podrían considerar los desplazamientos en el frente de excavación para observar el comportamiento de las ecuaciones aquí planteadas y realizarles mejoras de ser necesario.

Capítulo 10

Anexos

10.1. Gráficas R3 con Pa

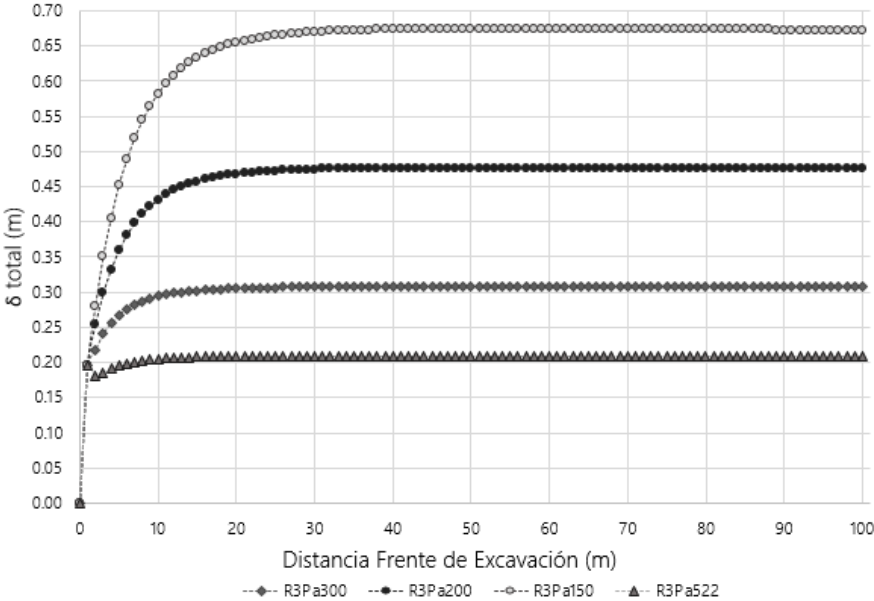


Figura 10.1: R3 con distintos valores de Pa

10.2. Calculo de ecuaciones mediante Wolfram Mathematica

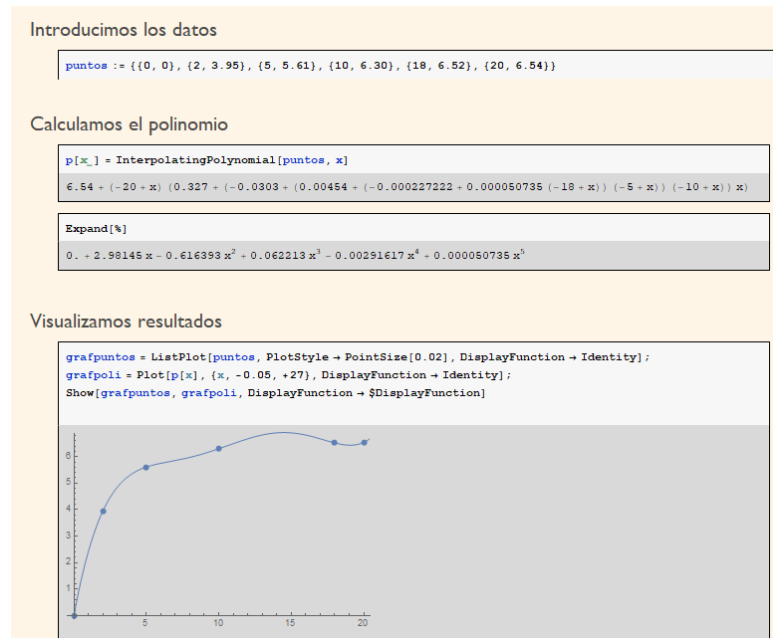


Figura 10.2: Calculo de ecuación R3 elástica.

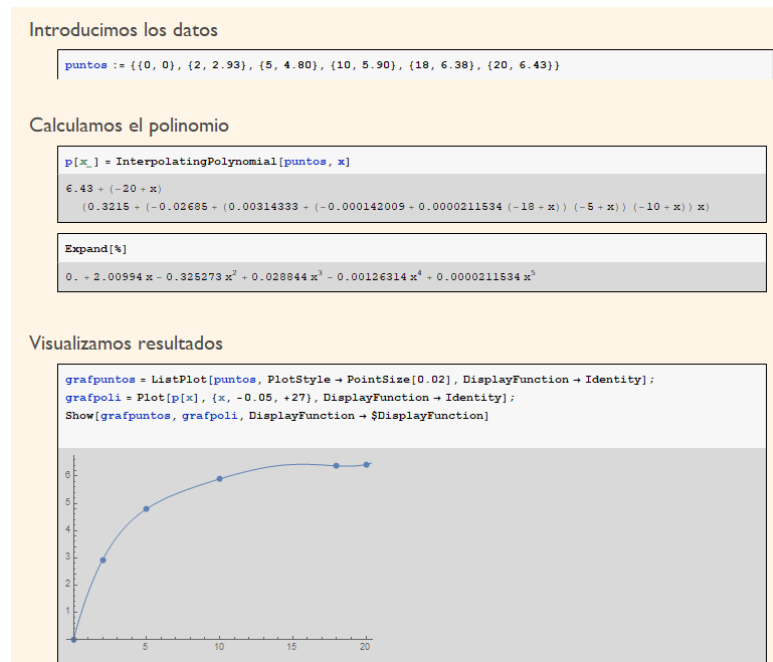


Figura 10.3: Calculo de ecuación R5 elástica.

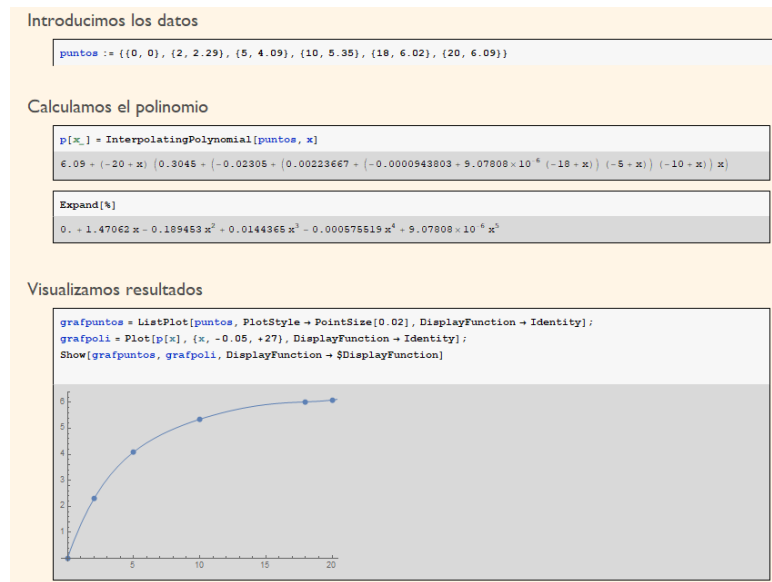


Figura 10.4: Cálculo de ecuación R7 elástica.

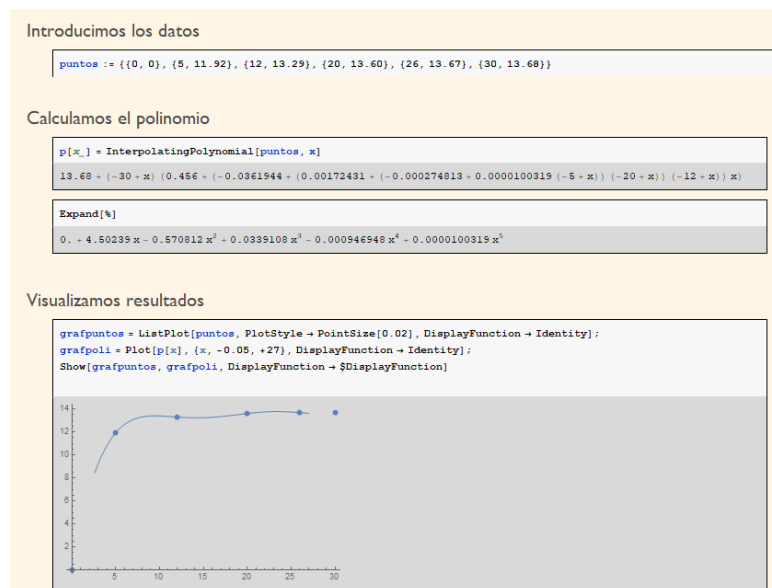


Figura 10.5: Cálculo de ecuación R3 plástica.

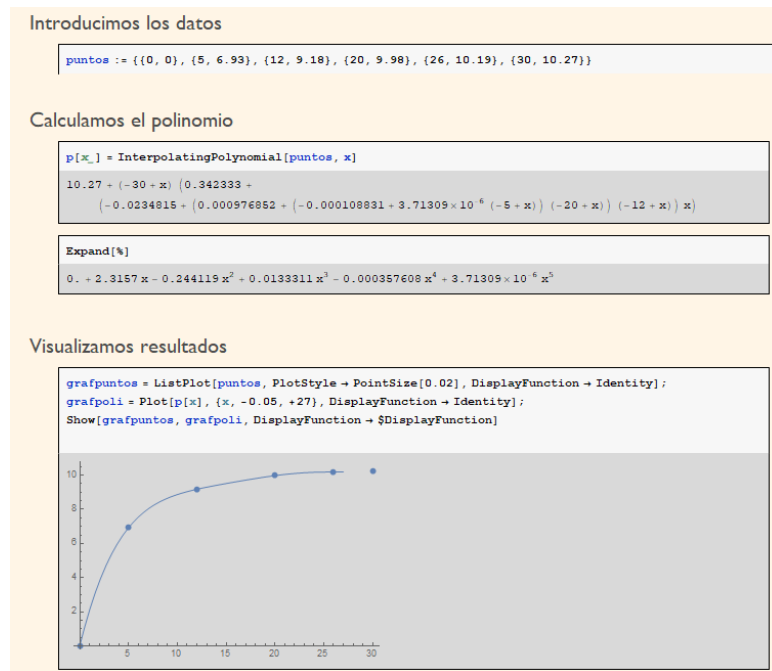


Figura 10.6: Cálculo de ecuación R5 plástica.

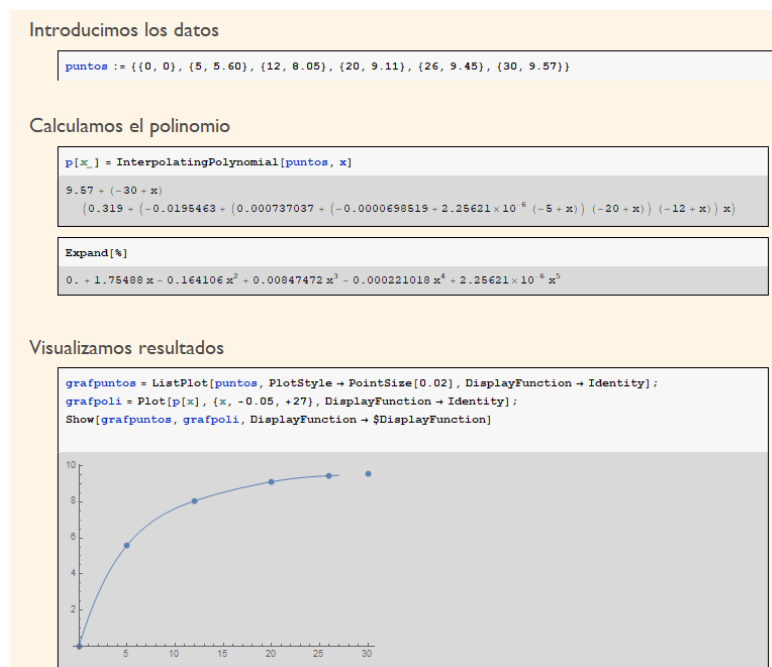


Figura 10.7: Cálculo de ecuación R7 plástica.

10.3. Gráficas de validación de ecuaciones

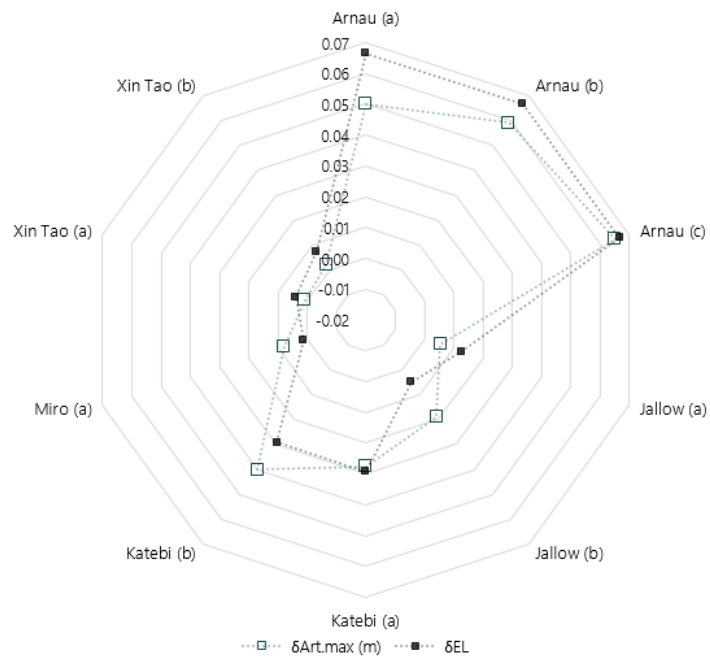


Figura 10.8: Comparación de Ecuación Elástica con caso real.

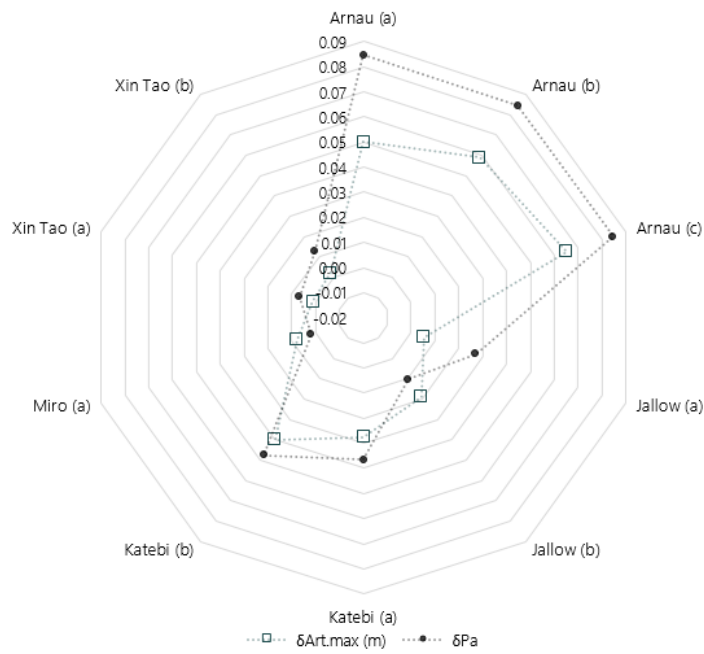


Figura 10.9: Comparación de Ecuación Plástica con caso real.

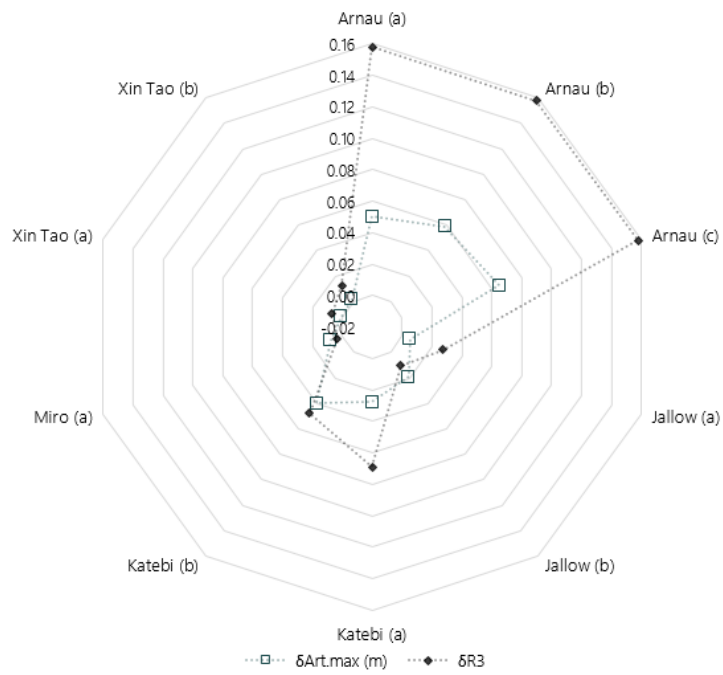


Figura 10.10: Comparación de Ecuación R3 con caso real.

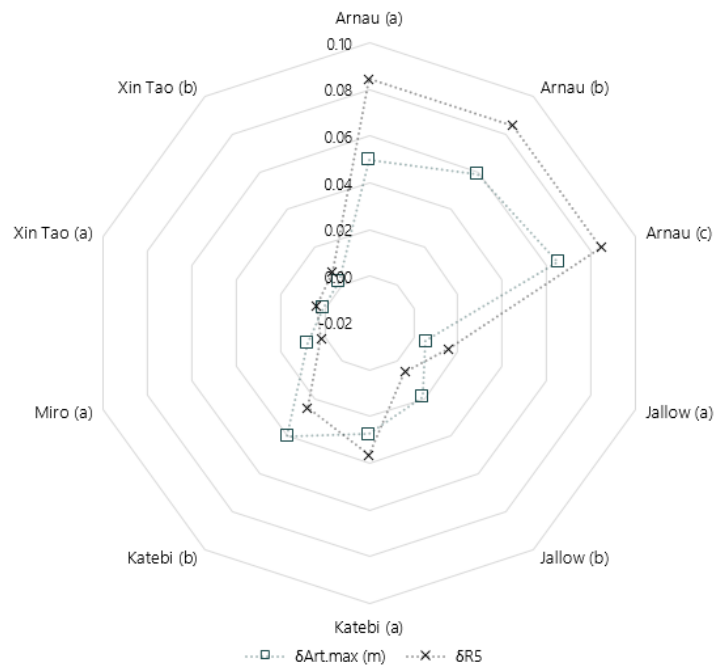


Figura 10.11: Comparación de Ecuación R5 con caso real.

Bibliografía

- [1] Bibhash Kumar and Jagdish Prasad Sahoo. Support pressure for circular tunnels in two layered undrained clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(1):135–148, 2020.
- [2] Liqiang Cao, Dingli Zhang, Qian Fang, and Lin Yu. Movements of ground and existing structures induced by slurry pressure-balance tunnel boring machine (spb tbm) tunnelling in clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 97:103278, 2020.
- [3] Pietro Lunardi. *Design and construction of tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils (ADECO-RS)*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [4] Amadou Jallow, Chang-Yu Ou, and Aswin Lim. Three-dimensional numerical study of long-term settlement induced in shield tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88:221–236, 2019.
- [5] Jin Dalong, Shen Xiang, and Yuan Dajun. Theoretical analysis of three-dimensional ground displacements induced by shield tunneling. *Applied Mathematical Modelling*, 79:85–105, 2020.
- [6] Xing-Tao Lin, Ren-Peng Chen, Huai-Na Wu, and Hong-Zhan Cheng. Three-dimensional stress-transfer mechanism and soil arching evolution induced by shield tunneling in sandy ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 93:103104, 2019.

-
- [7] Luisa Equihua-Anguiano, Marcos Orozco-Calderón, and Emmanuel Álvarez-Cornejo. Diseño de túneles usando elementos finitos 2d y 3d y la influencia de los parámetros mecánicos y geométricos para el diseño. *Revista Mexicana de Métodos Numéricos*, 4, 2020.
- [8] M.H. Yu, G.W. Ma, H.F. Qiang, and Y.Q. Zhang. *Generalized Plasticity*. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [9] Braja M. Das. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Thomson learning, 1999.
- [10] Iván Rubio Saldaña. Ábaco de desplazamientos 3d para túneles en herradura a partir de una simulación axisimétrica usando el método de elementos finitos (fem). Master's thesis, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2018.
- [11] Alain Leonel Conrado Palafox. Análisis del comportamiento mecánico en terrenos cársticos en presencia de agua y aplicación de cargas estáticas. Master's thesis, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2018.
- [12] José Antonio Ezquerro Fernández. *Iniciación a los métodos numéricos*. Universidad de La Rioja, Servicio de Publicaciones, 2012.
- [13] Steven C.Chapra; Raymond P. Canale. *Métodos numéricos para ingenieros*. Mc Graw Hill Interamericana, 2007.
- [14] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. *Manual de diseño y construcción de túneles de carretera*. 2016.
- [15] Naotoshi Yasuda, Kazuhiko Tsukada, and Toshihiro Asakura. Elastic solutions for circular tunnel with void behind lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 70:274–285, 11 2017.

- [16] Eliane Ibrahim, Abdul-Hamid Soubra, Guilhem Mollon, Wassim Raphael, Daniel Dias, and Ali Reda. Three-dimensional face stability analysis of pressurized tunnels driven in a multilayered purely frictional medium. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49:18 – 34, 2015.
- [17] Raul Fuentes. Internal forces of underground structures from observed displacements. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49:50 – 66, 2015.
- [18] Nicholas Vlachopoulos and Mark S Diederichs. Appropriate uses and practical limitations of 2d numerical analysis of tunnels and tunnel support response. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(2):469–488, 2014.
- [19] Oriol Arnau and Climent Molins. Three dimensional structural response of segmental tunnel linings. *Engineering structures*, 44:210–221, 2012.
- [20] H Katebi, AH Rezaei, M Hajialilue-Bonab, and A Tarifard. Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specifications on shield tunnel lining loads (by fem). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49:67–78, 2015.
- [21] M Davarpanah. *Assessment of the effect of full face excavation of the Tabriz subway tunnels on adjacent structures*. PhD thesis, M. Sc. thesis, 2011.
- [22] S Miro, D Hartmann, and T Schanz. Global sensitivity analysis for subsoil parameter estimation in mechanized tunneling. *Computers and Geotechnics*, 56:80–88, 2014.
- [23] Luisa N.Equihua Anguiano; Fernando Vivero Viveros; J. Roberto Pérez Cruz; Carlos Chávez Negrete; Eleazar Arreygue Rocha; Marcos Orozco Calderón. Displacement nomograph from two (2d) to three (3d) dimensions applied to circular tunnels in clay using finite element. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017, 2017.

- [24] Luisa Equihua, Iván Rubio-Saldaña, Marcos Orozco-Calderón, Eleazar Arreygue-Rocha, and Carlos Negrete. *Equivalent FEM Meshes from Axisymmetric (AXID) to Three (3D) Dimensions Applied to Tunnels in Clay: Proceedings of the 5th GeoChina International Conference 2018 – Civil Infrastructures Confronting Severe Weathers and Climate Changes: From Failure to Sustainability, held on July 23 to 25, 2018 in HangZhou, China*, pages 11–22. 01 2019.
- [25] Rocscience Inc. Copyright (C) (2020). Rs3 version 4.006, 64bits, 2020, Toronto, Ontario, Canadá.
- [26] E Tamez, JL Rangel, and E Holguín. Diseño geotécnico de túneles. *México: TGC Geotecnia*, 1997.
- [27] N Vlachopoulos and MS Diederichs. Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels. *Rock mechanics and rock engineering*, 42(2):131–146, 2009.
- [28] Rocscience Inc. Copyright (C) (2020). Rs2 version 4.006, 64bits, 2020, Toronto, Ontario, Canadá.
- [29] Ahmed SN Alagha and David N Chapman. Numerical modelling of tunnel face stability in homogeneous and layered soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 94:103096, 2019.