

**Análisis de la evolución de esfuerzos alrededor de un túnel debido a la recarga de un
acuífero subyacente**

Nilson Oveiman girón López

Gabriel Ricardo Téllez Quintero

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Jorge Alejandro Mendoza Rizo

PhD en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

El presente trabajo investigativo lo dedicamos principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A nuestros padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos. Ha sido el orgullo y el privilegio de ser sus hijos, son los mejores padres.

A nuestros hermanos (as) por estar siempre presentes, acompañándonos y por el apoyo moral, que nos brindaron a lo largo de esta etapa de nuestras vidas.

A nuestro director de proyecto el profesor Jorge Alejandro Mendoza Rizo por brindarnos las bases para que el proyecto se llevase a cabo y guiarnos durante el desarrollo del mismo.

A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Marco Teórico.....	16
1.1 Esfuerzo total y efectivo	16
1.1.1 Esfuerzo efectivo.	17
1.1.2 Esfuerzo total.	17
1.2 Isotropía	17
1.3 Permeabilidad	17
1.4 PLAXIS 2D.....	18
1.5 Modelos utilizados en el análisis:	18
1.5.1 Mohr Coulomb.....	18
1.5.1.1 Parámetros del modelo.....	19
1.5.1.1.1 Resistencia al cortante.....	19
1.5.1.1.2 Cohesión.	19
1.5.1.1.3 Angulo de fricción.	19
1.5.2 Hardening-soil.....	20
1.5.3 Modelo Cam-Clay modificado.	20
1.5.3.1 Propiedades elásticas.	21
1.5.3.2 Superficie de fluencia.	21

1.5.3.3 Potencial Plástico.....	22
1.5.3.4 Ley de endurecimiento.....	23
2. Metodología	24
2.1 Consideraciones del modelo	24
2.1.1 Arcilla de Londres.....	24
2.1.1.1 Permeabilidad.	26
2.1.2 Tiza.	26
2.1.2.1 Permeabilidad.	27
2.1.3 Concreto.....	27
2.2 Limitaciones.....	28
2.3 PLAXIS 2D.....	28
2.3.1 Fase inicial.	29
2.3.2 Fase I.....	30
2.3.3 Fase II.....	31
2.3.4 Fase III.	33
3. Análisis e interpretación de resultados	33
3.1 Puntos 1B y 2B.	35
4. Conclusiones.....	43
Referencias Bibliográficas	45
Apéndices.....	47

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esfuerzos totales y efectivos. $\sigma'(\text{efectivo}) = \sigma(\text{total}) - \mu$	16
Figura 2. Superficie de fluencia del modelo Cam-Clay	22
Figura 3. Fases creadas el software para el modelo	29
Figura 4. Configuración de la fase inicial establecida en PLAXIS 2D	29
Figura 5. Modelo creado para la fase inicial en PLAXIS 2D	30
Figura 6. Modelo creado para la fase I en PLAXIS 2D	31
Figura 7. Configuración de la fase I establecida en PLAXIS 2D	31
Figura 8. Modelo creado para la fase II en PLAXIS 2D	32
Figura 9. Configuración de la fase II establecida en PLAXIS 2D	32
Figura 10. Configuración de la fase III establecida en PLAXIS 2D	33
Figura 11. Puntos de estudios del modelo	34
Figura 12. Gráfica de esfuerzos efectivos en el modelo	35
Figura 13. Gráfica de esfuerzos totales en el modelo	35
Figura 14. Gráfica esfuerzo efectivo vs step en el punto 1B	36
Figura 15. Gráfica esfuerzo total vs step en el punto 1B	36
Figura 16. Gráfica de presión de poros vs step en el punto 1B	36
Figura 17. Gráfica esfuerzo efectivo vs step en el punto 2B	37
Figura 18. Gráfica esfuerzo total vs step en el punto 2B	37

Figura 19. Gráfica de presión de poros vs step en el punto 2B	37
Figura 20. Gráfica cortante vs step en el punto 1A.....	38
Figura 21. Gráfica momento vs step en el punto 1A.....	38
Figura 22. Gráfica cortante vs step en el punto 2A.....	38
Figura 23. Gráfica momento vs step en el punto 2A.....	39
Figura 24. Gráfica de la distribución de cortante de la sección del túnel para el modelo Cam- Clay modificado obtenidos por PLAXIS 2D	39
Figura 25. Gráfica de la distribución de momento de la sección del túnel para el modelo Cam- Clay modificado obtenidos por PLAXIS 2D	40
Figura 26. Distribución de esfuerzo principal y momento obtenidos de PLAXIS 2D utilizando en la arcilla el modelo constitutivo Cam-Clay modificado A) Distribución del esfuerzo principal alrededor del túnel en la fase I. B) Gráfica de momento en el túnel para la fase I. C) Distribución del esfuerzo principal alrededor del túnel en la fase II. D) Gráfica de momento alrededor del túnel en la fase II.....	41
Figura 27. Gráfica del cambio en la dirección del esfuerzo principal en el punto 1B.	42

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Parámetros del modelo Mohr Coulomb</i>	19
Tabla 2. <i>Parámetros del modelo Hardening soil</i>	20
Tabla 3. <i>Parámetros del modelo Cam-Clay modificado</i>	23
Tabla 4. <i>Valores de entrada para el modelo Mohr-Coulomb</i>	24
Tabla 5. <i>Valores de entrada para el modelo Hardening soil</i>	25
Tabla 6. <i>Valores de entrada para el modelo Cam-Clay modificado</i>	25
Tabla 7. <i>Valores de entrada para el modelo Mohr-Coulomb de la tiza</i>	26
Tabla 8. <i>Valores de entrada de las propiedades mecánicas del concreto</i>	28

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Distribución de cortante y momento en el túnel por Mohr coulomb obtenidos por PLAXIS 2D.	47
Apéndice B. Distribución de cortante y momento en el túnel por Hardening soil obtenidos por PLAXIS 2D.	49
Apéndice C. A) Distribución del esfuerzo principal alrededor del túnel en la fase I. B) Gráfica de momento en el túnel para la fase I. C) Distribución del esfuerzo principal alrededor del túnel en la fase II. D) Gráfica de momento alrededor del túnel en la fase II. Resultados obtenidos de PLAXIS 2D utilizando en la arcilla el modelo constitutivo Mohr Coulomb.	51
Apéndice D. A) Distribución del esfuerzo principal alrededor del túnel en la fase I. B) Gráfica de momento en el túnel para la fase I. C) Distribución del esfuerzo principal alrededor del túnel en la fase II. D) Gráfica de momento alrededor del túnel en la fase II. Resultados obtenidos de PLAXIS 2D utilizando en la arcilla el modelo constitutivo Hardening soil.	52
Apéndice E. Tabla de momento y cortante correspondientes a cada punto para cada modelo constitutivo, valores obtenidos por PLAXIS 2D.	53
Apéndice F. Tabla de esfuerzos efectivos y totales correspondiente al modelo constitutivo Mohr Coulomb, valores obtenidos por PLAXIS 2D.	54
Apéndice G. Tabla de esfuerzos efectivos y totales correspondiente al modelo constitutivo Hardening soil, valores obtenidos por PLAXIS 2D.	55

Apéndice H. Tabla de esfuerzos efectivos y totales correspondiente al modelo constitutivo Cam-Clay modificado, valores obtenidos por PLAXIS 2D.....	56
---	----

Resumen

Título: Análisis de la evolución de esfuerzos alrededor de un túnel debido a la recarga de un acuífero subyacente *.

Autores: Nilson Oveimar Girón López
Gabriel Ricardo Tellez Quintero**

Palabras Clave: Arcilla, Tiza, Mohr coulomb, Cam-Clay modificado, Hardening soil, Esfuerzo efectivo, Esfuerzo total, PLAXIS 2D, Túnel.

En este estudio se realiza el análisis de la evolución de estados de esfuerzos alrededor de un túnel, ubicado en un estrato de arcilla, por la recarga de un acuífero subyacente. Tomando como referencia la recarga del acuífero de la tiza y la arcilla que se encuentra ubicado en la ciudad de Londres; los suelos se caracterizan con estudios y antecedentes recopilados de la literatura tanto para la tiza y la arcilla, el proceso se modela en el software PLAXIS 2D, además de la explicación de cada fase y sus parámetros. En el caso de la arcilla, se utilizan tres modelos constitutivos para el modelado en el software PLAXIS 2D (Mohr Coulomb, Hardening soil y Cam-Clay modificado) para analizar los cambios de esfuerzos totales, efectivos, esfuerzo principal, dirección del esfuerzo principal y presión de poros en puntos ubicados arriba y abajo del túnel, mientras que en la tiza se modela por Mohr Coulomb debido a que la arcilla es el estrato de interés. También, se escogieron dos puntos ubicados en el túnel, uno en la parte de arriba y otro en la parte de abajo donde se evalúan las fuerzas cortantes y momentos que actúan, se evalúa como cambian en el tiempo.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo

Abstract

Title: Analysis of the evolution of efforts around a tunnel due to recharge of an underlying aquifer*.

Authors: Nilson Oveimar Girón López
Gabriel Ricardo Tellez Quintero**

KEY WORDS: Clay, Chalk, Mohr Coulomb, Modified Cam-Clay, Hardening Soil, Effective Effort, Total Effort, PLAXIS 2D, tunnel.

This study analyses the evolution of states of stress around a tunnel, located in a layer of clay, by recharging an underlying aquifer. Taking as a reference the recharge of the aquifer of the chalk and clay that is located in the city of London; the soils are characterized by studies and collected background of the literature for both chalk and clay, the process is modeled in the software PLAXIS 2D, in addition to the explanation of each phase and its parameters. In the case of clay, three constituent models are used for modeling in the PLAXIS 2D software (Mohr Coulomb, Hardening Soil and Cam-Clay modified) to analyse changes in total effort, effectiveness, main effort, direction of main effort and pore pressure at points above and below the tunnel, while in chalk is modeled by Mohr Coulomb because clay is the stratum of interest. Also, two points were chosen located in the tunnel, one at the top and the other at the bottom where the sharp forces and acting moments are evaluated, being evaluated as they change over time.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo

Introducción

Al momento de diseñar las estructuras se tienen en cuenta muchos factores, uno de ellos es la naturaleza actuante, los cuales determinan muchas de las características, su proceso constructivo y demás. La vida útil es propuesta por el diseñador o la norma que rige en el lugar donde se vaya a construir, pero es necesario tener en cuenta que los factores varían conforme va pasando el tiempo, estos factores externos cambian ya sean por influencias humanas o naturales.

En este caso la influencia es humana, el proyecto tiene como marco de referencia lo que ocurre en Londres con el acuífero que se encuentra en la tiza, donde en los años 1800 y 1940 la ciudad se proveía de agua, por lo que el nivel freático descendió sustancialmente. En estas condiciones se diseñó el primer túnel subterráneo que está construido en el estrato de arcilla del cual se funda la ciudad. Se tuvieron en cuenta medidas de nivel freático para ese momento que determinó las fuerzas actuantes en la estructura. Pero conforme paso el tiempo la ciudad disminuyó la extracción de agua en el acuífero y este empezó paulatinamente a recargarse; por lo cual las condiciones de diseño del túnel pueden haber variado y comprometer su estabilidad, además de afectar otras estructuras como sótanos, fundaciones de los edificios y parqueaderos; Situación que debe ser tomada en cuenta y motivo de estudio para evitar afectaciones y en el peor de los casos colapsos. Ante esta situación nos lleva a formularnos la siguiente pregunta ¿Este aumento del nivel en el acuífero puede influir en el túnel de Londres?, dicha respuesta está relacionada con la solución de la siguiente pregunta ¿Cómo varían los estados de esfuerzo alrededor del túnel por la recarga del acuífero?

Para este proyecto se propone dicha situación y su análisis, donde primeramente se caracterizan los estratos de arcilla y tiza con la literatura, se realiza un modelo en PLAXIS 2D representando la situación mencionada, dividida en cuatro fases que describen el proceso; La arcilla se modela utilizando tres modelos constitutivos, Mohr Coulomb, Hardening soil y Cam-Clay modificado. Por otra parte, La tiza se modela con Mohr coulomb. Se obtienen valores en puntos específicos donde se evalúan los esfuerzos para la arcilla alrededor del túnel, antes y después del aumento del nivel freático en la tiza, igualmente los valores de cortante y momento para la estructura.

1. Marco Teórico

1.1 Esfuerzo total y efectivo

Una masa de suelo saturada está compuesta por dos fases distintas: el esqueleto de partículas y los poros entre partículas llenos de agua. Cualquier esfuerzo impuesto sobre el suelo, es soportado por el esqueleto de partículas y también, por la presión del agua (Suarez, 2009).

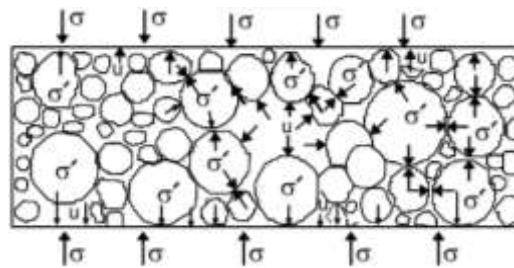


Figura 1. Esfuerzos totales y efectivos. $\sigma'(\text{efectivo}) = \sigma (\text{total}) - u$. Adaptado de: (Suarez, 2009)

1.1.1 Esfuerzo efectivo. Los esfuerzos ejercidos por el esqueleto solamente se conocen como esfuerzos efectivos y los esfuerzos hidrostáticos del agua se les denomina “presión de poros”. Los esfuerzos efectivos son los que controlan el comportamiento del suelo al cortante y no los esfuerzos totales (Suarez, 2009).

1.1.2 Esfuerzo total. El esfuerzo total es la suma de todas las fuerzas, incluyendo aquellas transmitidas a través de contactos entre partículas, aquellas transmitidas a través de la presión de poros en el agua (divididas por el área total) e incluyendo el área de sólidos y el área de vacíos (Suarez, 2009).

1.2 Isotropía

Distribución homogénea de las partículas materiales en un sólido por la que cualquier línea o plano que se considere contendrá siempre, estadísticamente, el mismo número de partículas y de la misma naturaleza (Díaz, 1992).

1.3 Permeabilidad

Cuando un material contiene vacíos continuos se dice que es permeable y existen en todos los suelos, incluyendo las arcillas más compactadas, y en todos los materiales de construcción no metálicos, incluido el granito sano y la pasta de cemento, por lo tanto, dichos materiales son permeables. La permeabilidad de los suelos, es decir la facultad con la que el agua pasa a través de los poros, tiene un efecto decisivo sobre el costo y las dificultades a encontrar en muchas

operaciones constructivas, como los son, la velocidad de consolidación de un estrato de arcilla bajo el peso de un terraplén. (Angelone, Garibay, & Cauhapé C., 2006)

1.4 PLAXIS 2D

PLAXIS es un programa de elementos finitos para aplicaciones geotécnicas en las que se utilizan modelos de suelo para simular el comportamiento del suelo. El código PLAXIS y sus modelos de suelo han sido desarrollados con gran cuidado. Aunque se han realizado muchas pruebas y validaciones, no se puede garantizar que el código PLAXIS esté libre de errores (Brinkgreve, y otros, 2010).

1.5 Modelos utilizados en el análisis:

1.5.1 Mohr Coulomb. Fue el primer criterio de falla utilizado para describir la respuesta mecánica del suelo, este considera que la falla del suelo se produce cuando:

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

Donde: τ – resistencia cortante; c – cohesión; σ_n – esfuerzo normal en el plano de falla; φ – ángulo de fricción interna. Cuando este criterio de falla es utilizado como una superficie de fluencia junto con comportamiento elástico lineal en cálculos elasto-plástico este modelo se conoce como el modelo constitutivo de Mohr Coulomb (González-Cueto, Herrera Suárez, Iglesias Coronel, & López Bravo, 2013).

1.5.1.1 Parámetros del modelo

1.5.1.1.1 Resistencia al cortante. La resistencia al cortante se define como el máximo valor de esfuerzo cortante que el suelo puede soportar. Los dos tipos de resistencia al cortante utilizados para un análisis de estabilidad son: la resistencia no-drenada y la resistencia drenada (Suarez, 2009).

1.5.1.1.2 Cohesión. La cohesión es una medida aparente de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en la mecánica de suelos, es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cimentación entre las partículas, mientras que, en la física, este término se utiliza para representar la resistencia a la tensión (Suarez, 2009).

1.5.1.1.3 Angulo de fricción. El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento (Suarez, 2009).

Tabla 1.

Parámetros del modelo Mohr Coulomb

Parámetro	Descripción
E	Módulo de Young [kN/m ²]
<i>v</i>	Coeficiente de Poisson
<i>c</i>	Cohesión [kN/m ²]
<i>φ</i>	Angulo de fricción [°]
<i>ψ</i>	Angulo de dilatación [°]

1.5.2 Hardening-soil. El modelo de endurecimiento del suelo es un modelo avanzado para la simulación del comportamiento del suelo. En cuanto al modelo de Mohr-Coulomb, los estados limitantes de tensión se describen por medio del ángulo de fricción φ , la cohesión c y el ángulo de dilatancia ψ . Sin embargo, la rigidez del suelo se describe de manera mucho más precisa utilizando tres rigideces de entrada diferentes: la rigidez triaxial E_{50} , la rigidez triaxial de descarga E_{ur} y la rigidez de carga del edómetro E_{oed} . En contraste con el modelo de Mohr-Coulomb, el modelo de endurecimiento del suelo también considera la dependencia entre los esfuerzos y los módulos de rigidez. En este estudio, la rigidez de los suelos aumenta con la presión. Por lo tanto, las tres rigideces de entrada se relacionan con una tensión de referencia, generalmente tomada como 100 kPa (1 bar) (PLAXIS, 2011).

Tabla 2.

Parámetros del modelo Hardening soil

Parámetro	Descripción
c	Cohesión [kN/m ²]
ν	Coeficiente de Poisson
φ	Angulo de fricción [°]
ψ	Angulo de dilatación [°]
E_{50}	la rigidez triaxial
E_{ur}	Rigidez triaxial de descarga
E_{oed}	Rigidez de carga del edómetro
m	Potencia para la dependencia del nivel de esfuerzo de la rigidez.

1.5.3 Modelo Cam-Clay modificado. El modelo constitutivo Cam-Clay fue desarrollado en los años sesenta en la universidad de Cambridge (Schofield & Wroth, 1968). Este modelo está

basado en la teoría de estado crítico y pensado originalmente para simular el comportamiento de las arcillas normalmente consolidadas en condiciones de prueba de compresión triaxial. (Brinkgreve, 2005)

En (Roscoe & Burland, 1968) desarrollaron un nuevo modelo constitutivo a partir de modelo constitutivo Cam-Clay y lo denominaron Cam-Clay Modificado, este modelo constitutivo se puede utilizar cuando la influencia del volumen cambia por el módulo volumétrico y la resistencia cortante necesita ser considerada (Itasca, 2008).

Este modelo se basa en cuatro principios: propiedades elásticas, potencial plástico, superficie de fluencia y ley de endurecimiento (Tauta, Ortiz, & Pumarejo, 2004).

1.5.3.1 Propiedades elásticas. Son la relación entre el incremento en los esfuerzos efectivos ($\delta p'$ y δq) y los incrementos en deformaciones elásticas del material ($\delta \varepsilon p^e$ y $\delta \varepsilon q^e$) Esta relación se representa en forma matricial en la ecuación (2). La matriz diagonal indica la ausencia de relación entre los efectos distorsionales y volumétricos. (Tauta, Ortiz, & Pumarejo, 2004).

$$\begin{bmatrix} \delta \varepsilon p^e \\ \delta \varepsilon q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k/vp' & 0 \\ 0 & 1/3G' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.5.3.2 Superficie de fluencia. Es el lugar geométrico en el espacio de esfuerzo $p' - q$ que delimita la combinación de esfuerzos (p' y q) que produce o no deformaciones plásticas. La superficie de fluencia tiene forma de elipse, la cual está centrada en el eje de coordenadas p' y la ecuación que la representa es: (Tauta, Ortiz, & Pumarejo, 2004).

$$\frac{p'}{p'_0} = \frac{M^2}{M^2 + \eta^2} \quad (3)$$

η : Cociente entre los esfuerzos p' y q

P'_0 : Esfuerzo que controla el tamaño de la superficie de fluencia

M es la pendiente de la línea de estado crítico (CSL) que controla la forma de la superficie de fluencia. En la Figura 2 se representa la superficie de fluencia. Cuando la pareja de datos p' y q se localiza en un punto dentro de esta superficie, únicamente se presentan deformaciones elásticas; por el contrario, una vez la trayectoria alcanza a la elipse, se presenta fluencia y además de las deformaciones elásticas se empiezan a presentar deformaciones plásticas (Tauta, Ortiz, & Pumarejo, 2004).

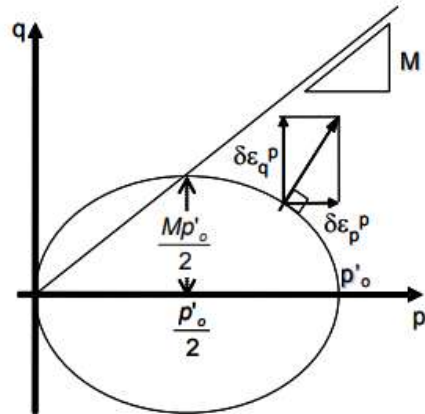


Figura 2. Superficie de fluencia del modelo Cam-Clay modificado (Itasca, 2008)

1.5.3.3 Potencial Plástico. Expresa cómo es el mecanismo mediante el cual se presentan las deformaciones plásticas y la relación entre las componentes volumétrica ($\delta\epsilon_p^p$) y cortante ($\delta\epsilon_q^p$). El modelo asume una condición de normalidad, es decir que existe una estrecha relación entre la superficie de fluencia y el potencial plástico. En la Figura 2 se representa mediante un vector la magnitud de deformación plástica. La componente vertical de este vector es el incremento en la deformación cortante plástica ($\delta\epsilon_q^p$) y la componente horizontal es el incremento en la deformación la volumétrica plástica ($\delta\epsilon_p^p$). Este vector siempre es perpendicular a la superficie

de fluencia, así que, si se conoce la ecuación de la superficie de fluencia, se puede conocer la dirección del vector. Realizando las derivaciones correspondientes, se encuentra la relación entre las deformaciones plásticas (Tauta, Ortiz, & Pumarejo, 2004):

$$\frac{\delta \varepsilon p^p}{\delta \varepsilon q^p} = \frac{M^2 - \eta^2}{2\eta} \quad (4)$$

1.5.3.4 Ley de endurecimiento. Esta ley indica cuáles son las magnitudes de las deformaciones plásticas y qué tanto puede cambiar la superficie de fluencia. El tamaño de la superficie de fluencia depende de p'_o , pero este valor no es constante, pues a su vez depende de la variación en la deformación volumétrica plástica (Tauta, Ortiz, & Pumarejo, 2004):

$$\frac{\partial p'_o}{\partial \varepsilon'_o} = \frac{v \cdot p'_o}{\lambda - k} \quad (5)$$

Tabla 3.

Parámetros del modelo Cam-Clay modificado

Parámetro	Descripción
M	Tangente a la línea de esto crítico
λ	Índice de compresión Cam-Clay
k	Índice de hinchazón Cam-Clay
v_{ur}	Coefficiente de Poisson
e_{init}	Proporción de vacíos iniciales

2. Metodología

2.1 Consideraciones del modelo

Para realizar el diseño del modelo en el software PLAXIS 2D es necesario describir las características de los suelos a utilizar, En el caso de este estudio, los elementos a definir son:

2.1.1 Arcilla de Londres. La Arcilla de Londres es una formación geológica marina de edad que aflora en el sureste de Inglaterra.

Por otra parte, las propiedades mecánicas de este material están planteadas en las siguientes tablas para cada modelo constitutivo.

- Mohr-Coulomb

Tabla 4.

Valores de entrada para el modelo Mohr-Coulomb

Parámetro	Valor
E [kN/m ²]	60,000
ν	0.2
c [kN/m ²]	20
φ [°]	23
ψ [°]	0
γ_{unsat} [kN/m ³]	10
γ_{sat} [kN/m ³]	18.5

Los datos de la tabla 4 fueron obtenidos a partir de (Sandström, 2016).

- Hardening soil

Tabla 5.

Valores de entrada para el modelo Hardening soil

Parámetro	Valor
ν	0.2
c [kN/m ²]	20
φ [°]	23
ψ [°]	0
Yunsat [kN/m ³]	10
Ysat [kN/m ³]	18.5
E_{50} [kN/m ²]	9000
E_{ur} [kN/m ²]	9000
E_{oed} [kN/m ²]	26000
m	0.95

Los datos de la tabla 5 fueron obtenidos a partir de (Sandström, 2016).

- Cam-Clay modificado

Tabla 6.

Valores de entrada para el modelo Cam-Clay modificado

Parámetro	Valor
M	0.85
λ	0.168
k	0.064
ν_{ur}	0.2
e_{init}	2.78

Los datos de la tabla 6 fueron obtenidos a partir de (Gasparre, 2005).

Para los datos de densidad saturada e insaturada se tomaron los valores de la tabla 4, ya que las densidades son independientes del modelo constitutivo que se trabaje.

2.1.1.1 Permeabilidad. Se ha encontrado que la permeabilidad de la arcilla de Londres está fuertemente asociada con sus unidades litológicas (Gasparre, 2005), además su disposición molecular son factores que modifican la permeabilidad en un suelo. En (Standing & Burland, 2005) encontraron que la erosión de la arcilla de Londres podría aumentar su permeabilidad en masa. Los autores observaron en el parque de St. James, en el centro de Londres, un valor de permeabilidad de alrededor de $1 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ (Gasparre, 2005), Por lo tanto, $k=0.000000864$ (m/día) para la arcilla. Este valor será utilizado para todos los modelos a utilizar.

2.1.2 Tiza. La tiza es una formación de carbonato blanco de grano fino de finales de la edad del Cretácico. En Inglaterra su afloramiento se extiende desde Yorkshire en el norte a través de Lincolnshire y East Anglia en el sur de Inglaterra. En términos generales, la Tiza consiste principalmente en coccolitos y algunas conchas foraminiferales con macrofósiles ocasionales. (Bell, Culshaw, & Cripps, 1999). Para el modelamiento de dicho material se utilizó el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb.

- Mohr-Coulomb

Tabla 7.

Valores de entrada para el modelo Mohr-Coulomb de la tiza

Parámetro	Valor
E [kN/m ²]	5.7×10^6

Parámetro	Valor
ν	0.32
c [kN/m ²]	2270
ϕ [°]	19.4
ψ [°]	0
Yunsat [kN/m ³]	14.1
Ysat [kN/m ³]	18.7

Los datos de la tabla 7 fueron obtenidos a partir de (Bell, Culshaw, & Cripps, 1999), donde se realizaron estudios en diferentes sitios de Inglaterra, se escogieron los valores para Kent debido a su cercanía al centro de Londres.

2.1.2.1 Permeabilidad. La permeabilidad de la tiza se rige fundamentalmente por su patrón de discontinuidad en lugar de por el flujo intergranular, la tiza tiene una alta porosidad, pero cuando los valores se comparan con la permeabilidad intergranular obtenida de las pruebas de laboratorio, se obtienen coeficientes de baja correlación (Bell, Culshaw, & Cripps, 1999).

Igualmente, en (Bell, Culshaw, & Cripps, 1999) se realizaron estudios en diferentes sitios de Inglaterra, se escogieron los valores para Kent debido a su cercanía al centro de Londres, se le asocia un valor k en (m/s) $=27.7 \times 10^{-9}$, Por lo tanto, $k=0.00239328$ (m/día) para la tiza. Este valor será utilizado para todos los modelos a utilizar.

2.1.3 Concreto. El concreto es una mezcla de cemento Portland, agregado fino, agregado grueso, aire y agua en proporciones adecuadas para obtener ciertas propiedades prefijadas, especialmente la resistencia (De Guzmán, 2001).

Tabla 8.

Valores de entrada de las propiedades mecánicas del concreto.

Parámetro	Nombre	Revestimiento	Unidad
Tipo de material	Tipo	Elástico; isotrópico	-
Rigidez normal	EA	600000	kN/m
Rigidez a flexión	EI	20000	kNm ² /m
Peso	w	5	kN/m/m
Coefficiente de Poisson	v	0,15	-

Los datos de la tabla 8 fueron obtenidos a partir de (PLAXIS , 2017).

Fue necesario especificar estos datos ya que se creó un plate alrededor del túnel para simular el perfil de concreto.

2.2 Limitaciones

En el modelo los materiales anteriormente mencionados se están considerando como isotrópicos; es decir que sus propiedades son las mismas en todas las direcciones; además, en el caso de la tiza y arcilla se considera que las permeabilidades en X y Y son iguales por lo tanto $k_x = k_y$. Por otro lado, se está restringiendo la infiltración de agua en el túnel.

2.3 PLAXIS 2D

Para simular en el software el proceso que está en estudio es necesario dividirlo en fases, cada fase se le asigna el tipo de análisis, el nivel freático y las condiciones de flujo que describan cada una.



Figura 3. Fases creadas el software para el modelo

2.3.1 Fase inicial. Es necesario generar el estado de tensión inicial del suelo, por lo tanto, para esta fase se le asignó al software la configuración mostrada en la figura 4, por otro lado, el túnel no está activado esto lo podemos observar en la figura 5

Name	Value
General	
ID	Initial phase [InitialPhase]
Calculation type	K0 procedure
Loading type	Staged construction
ΣM_{weight}	1.000
Pore pressure calculation type	Phreatic
Thermal calculation type	Ignore temperature
First step	0
Last step	0
Design approach	(None)

Figura 4. Configuración de la fase inicial establecida en PLAXIS 2D

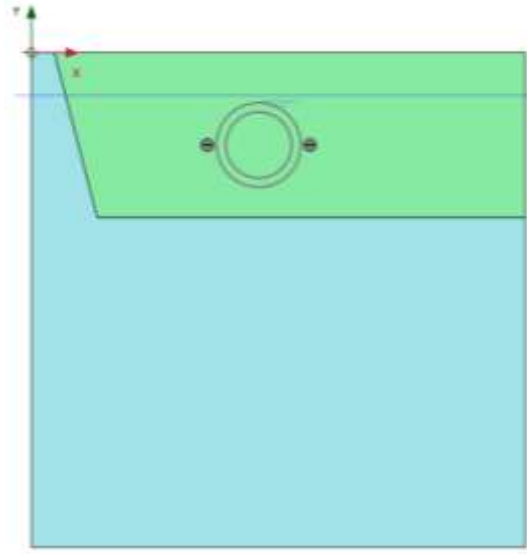


Figura 5. Modelo creado para la fase inicial en PLAXIS 2D

2.3.2 Fase I. En esta fase se activa el túnel en el suelo como lo muestra la figura 6, no se describe el proceso constructivo, se asigna el nivel freático inicial y se realiza un análisis plástico, por lo tanto, hay generación directa de presiones de poro en estado estacionario a partir del nivel freático y condiciones relacionadas con los grupos. Las configuraciones de esta fase son ilustradas en la figura 7.

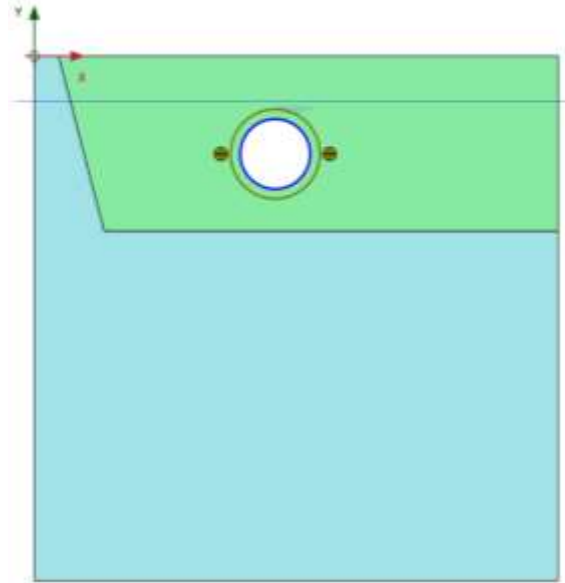


Figura 6. Modelo creado para la fase I en PLAXIS 2D

Name	Value
General	
ID	Phase_1
Start from phase	Initial phase
Calculation type	Plastic
Loading type	Staged construction
ΣM_{stage}	1.000
ΣM_{weight}	1.000
Pore pressure calculation type	Phreatic
Thermal calculation type	Ignore temperature
Time interval	0.000 day
First step	4
Last step	6
Design approach	(None)

Figura 7. Configuración de la fase I establecida en PLAXIS 2D

2.3.3 Fase II. En esta fase se configura el flujo en el modelo para simular el cambio del nivel freático de la posición 1 (figura 6) a la posición 2 resaltada en la figura 8, donde se observa que el nivel freático en la tiza aumenta debido a la recarga de agua, simulando la recarga del acuífero, además es requerido utilizar un intervalo de tiempo diferente a 0, se estableció 365 días.

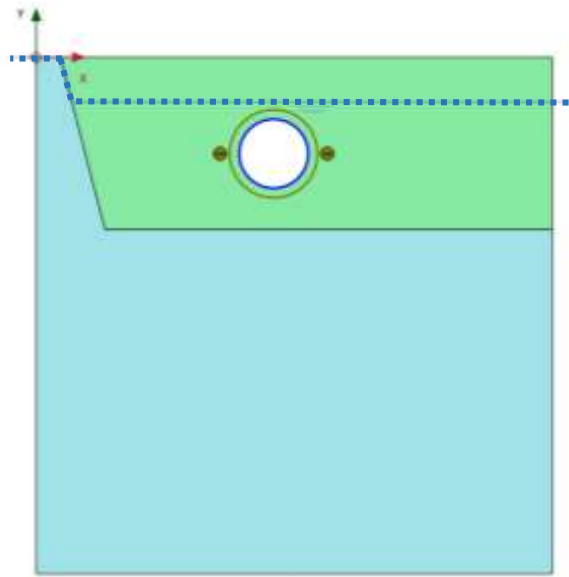


Figura 8. Modelo creado para la fase II en PLAXIS 2D

Las configuraciones establecidas para esta fase se ilustran en la figura 9.

Name	Value
General	
ID	Phase_2
Start from phase	Phase_1
Calculation type	Plastic
Loading type	Staged construction
ΣM_{stage}	1.000
ΣM_{weight}	1.000
Pore pressure calculation type	Steady state ground
Thermal calculation type	Ignore temperature
Time interval	365.0 day
First step	1
Last step	3
Design approach	(None)

Figura 9. Configuración de la fase II establecida en PLAXIS 2D

2.3.4 Fase III. En esta última se calculan las presiones de poro de estado estable de la fase principal como entrada (fase anterior, en nuestro caso Fase II) para el análisis de deformación actual.

Las configuraciones establecidas se ilustran en la figura 10

Name	Value
General	
ID	Phase_3
Start from phase	Phase_2 ▼
Calculation type	Plastic ▼
Loading type	Staged construction ▼
ΣM_{stage}	1.000
ΣM_{weight}	1.000
Pore pressure calculation type	Use pressures from p ▼
Thermal calculation type	Ignore temperature ▼
Time interval	0.000 day
First step	7
Last step	16
Design approach	(None) ▼

Figura 10. Configuración de la fase III establecida en PLAXIS 2D

3. Análisis e interpretación de resultados

En primera instancia es necesario establecer puntos de interés, donde se analizarán los resultados que se obtendrán por el software. Se escogieron cuatro puntos en el modelo, con el fin de estudiar como varían los estados tensionales en diferentes partes del túnel, Por otro lado, en el software PLAXIS 2D además de realizar cálculos para obtener valores tensionales y deformacionales del suelo, también se pueden calcular valores de fuerzas que actúan sobre los elementos de la

estructura, podemos obtener valores de cortante, momento y fuerza axial. con lo anteriormente descrito los puntos escogidos están ilustrados sobre la figura 11.

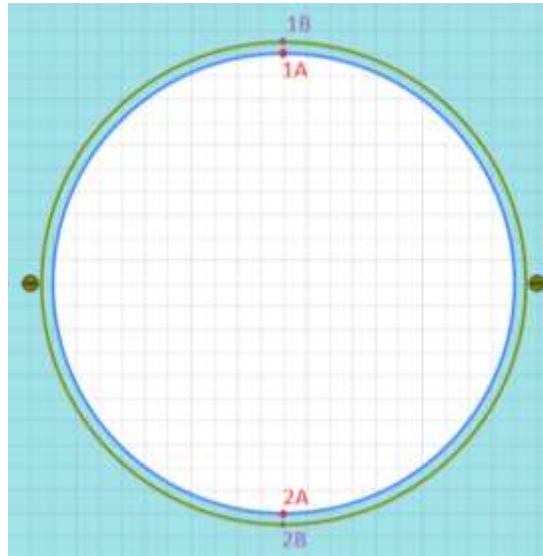


Figura 11. Puntos de estudios del modelo

Donde 1A y 2A son puntos que están sobre los elementos del túnel esto con el fin de extraer las fuerzas que actúan sobre dichos elementos. Los puntos 1B y 2B están orientados para evaluar los estados tensionales del suelo muy cerca de los puntos establecidos para la estructura.

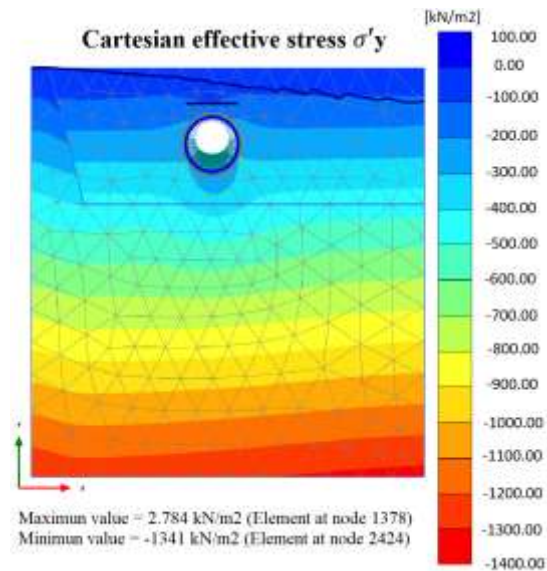


Figura 12. Gráfica de esfuerzos efectivos en el modelo

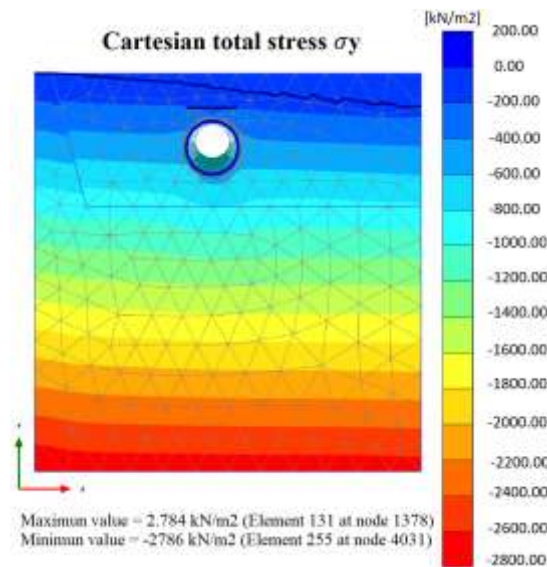


Figura 13. Gráfica de esfuerzos totales en el modelo

3.1 Puntos 1B y 2B.

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas, donde en el eje x están los pasos, los cuales representan las etapas que subdividen las fases, por tanto, la etapa 2 representa el

momento justo después de la construcción del túnel, y la etapa 7 corresponde al momento después del aumento del nivel freático en la tiza.



Figura 14. Gráfica esfuerzo efectivo vs step en el punto 1B



Figura 15. Gráfica esfuerzo total vs step en el punto 1B



Figura 16. Gráfica de presión de poros vs step en el punto 1B

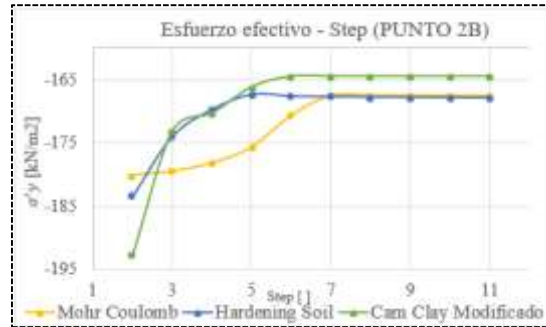


Figura 17. Gráfica esfuerzo efectivo vs step en el punto 2B

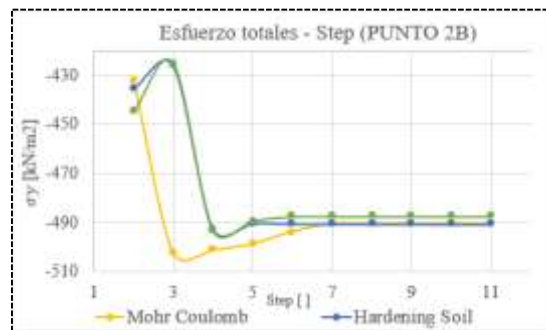


Figura 18. Gráfica esfuerzo total vs step en el punto 2B



Figura 19. Gráfica de presión de poros vs step en el punto 2B

3.2 Puntos 1A y 2A

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas.

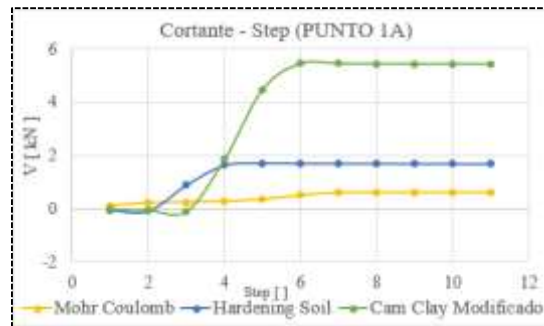


Figura 20. Gráfica cortante vs step en el punto 1A

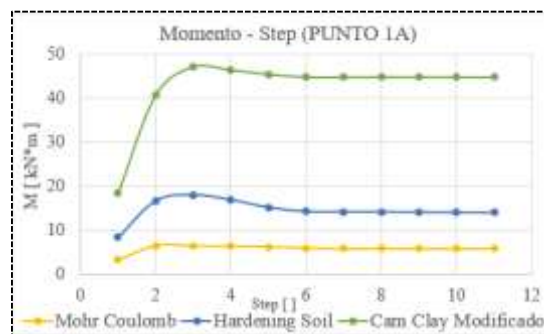


Figura 21. Gráfica momento vs step en el punto 1A

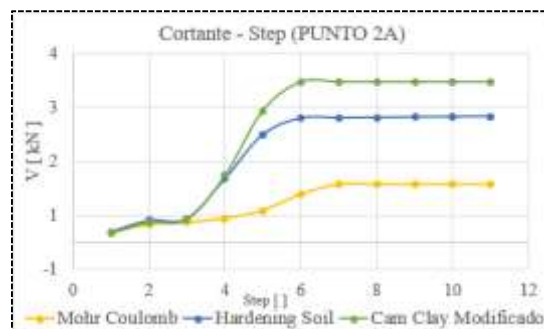


Figura 22. Gráfica cortante vs step en el punto 2A

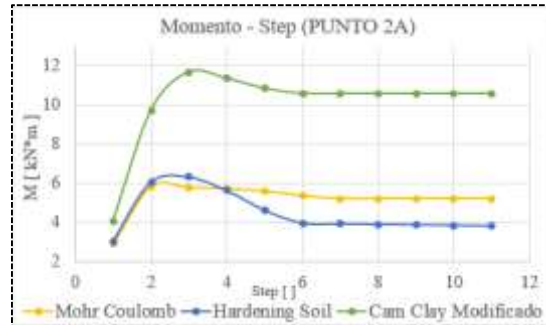


Figura 23. Gráfica momento vs step en el punto 2A

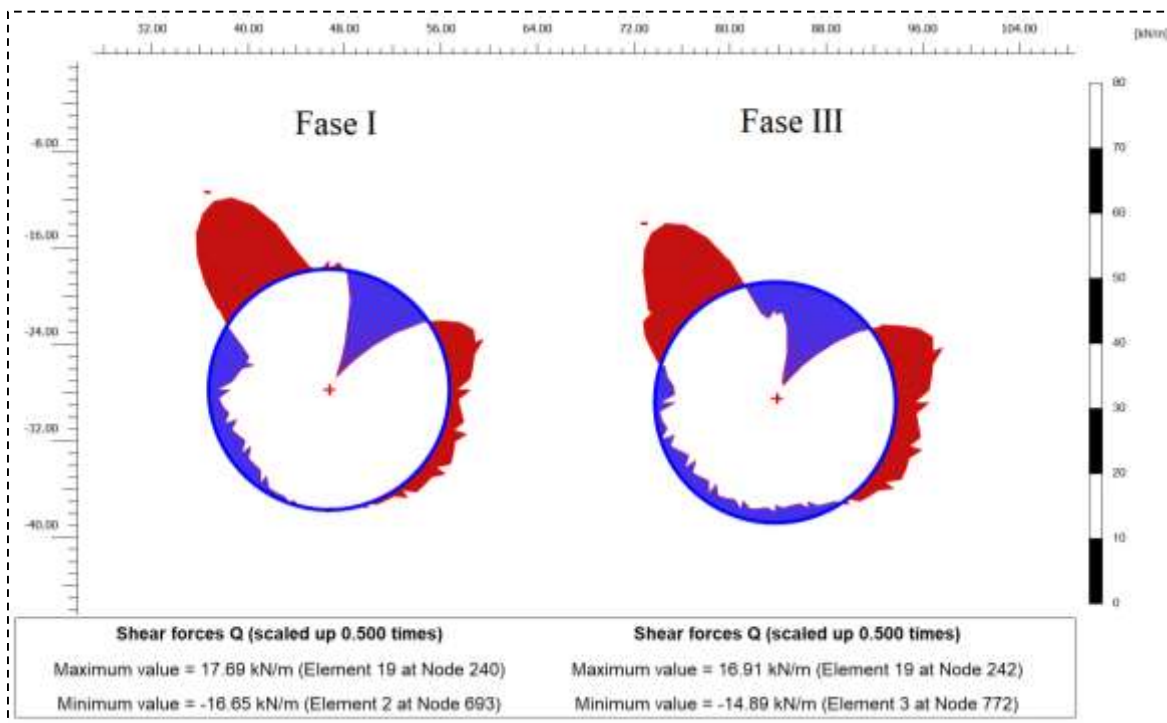


Figura 24. Gráfica de la distribución de cortante de la sección del túnel para el modelo Cam-Clay modificado obtenidos por PLAXIS 2D

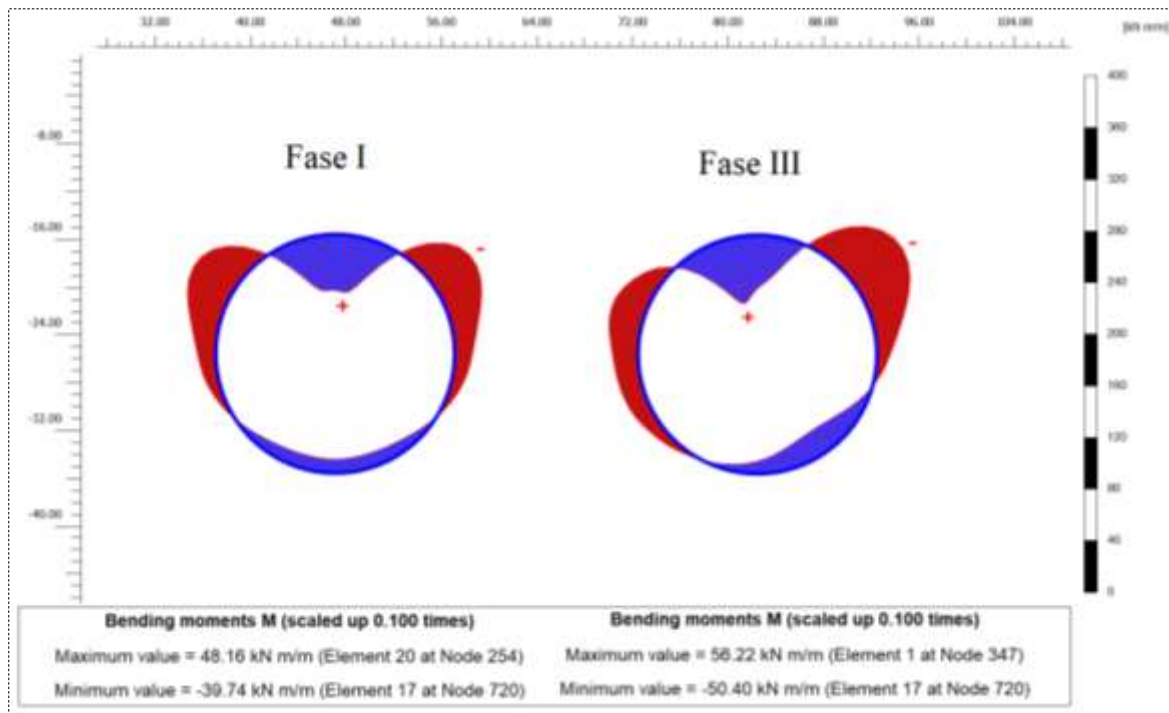


Figura 25. Gráfica de la distribución de momento de la sección del túnel para el modelo Cam-Clay modificado obtenidos por PLAXIS 2D

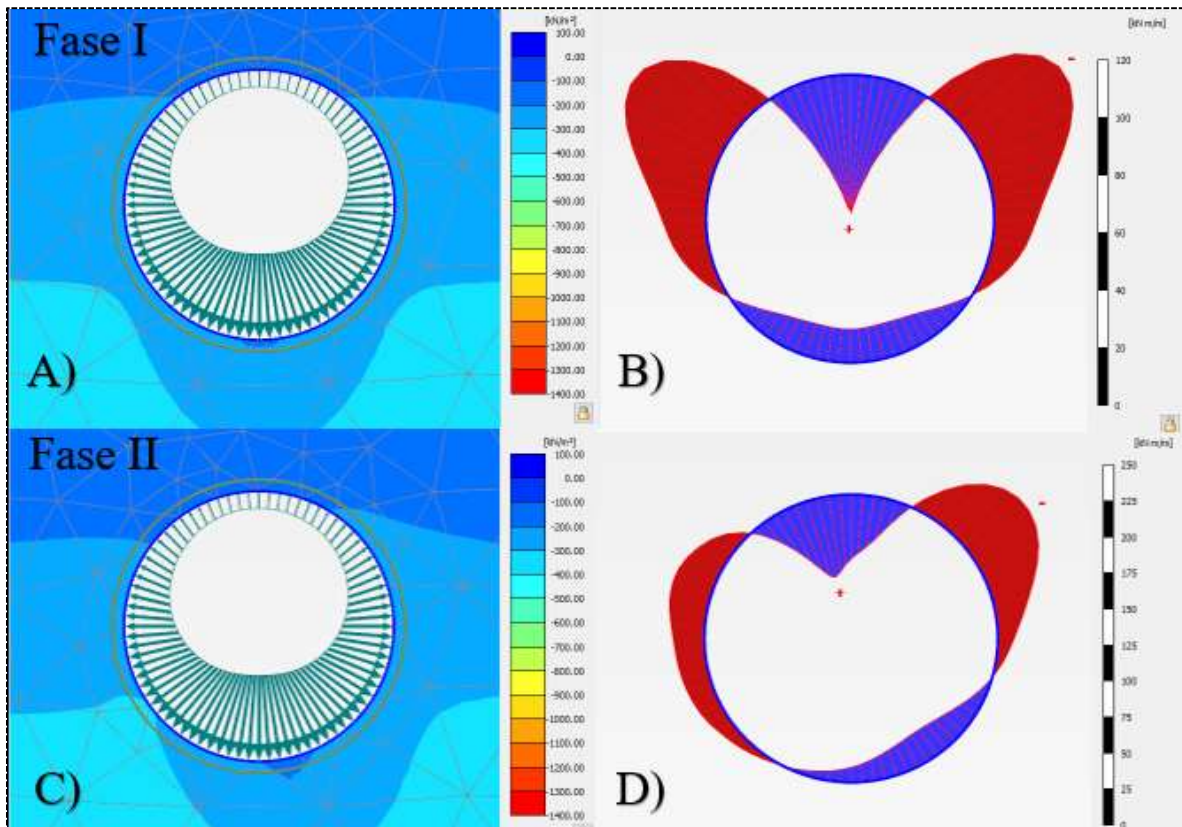


Figura 26. Distribución de esfuerzo principal y momento obtenidos de PLAXIS 2D utilizando en la arcilla el modelo constitutivo Cam-Clay modificado A) Distribución del esfuerzo principal alrededor del túnel en la fase I. B) Gráfica de momento en el túnel para la fase I. C) Distribución del esfuerzo principal alrededor del túnel en la fase II. D) Gráfica de momento alrededor del túnel en la fase II

Como podemos observar los resultados en los puntos 1B (gráficas 15 y 16) y 2B (gráficas 18 y 19) hubo un aumento en los esfuerzos totales y de presión de poros en los tres modelos constitutivos utilizados, esto se debe al cambio del nivel freático luego que se aumentara en la tiza; por otro lado, se presenta disminución de los esfuerzos efectivos, graficas 14 y 17, como consecuencia del aumento de la presión de poros que intenta separar las partículas. Paralelamente en los puntos 1A (gráficas 20 y 21) y 2B (gráficas 22 y 23) se observan aumentos en los momentos y cortantes de los elementos en dichos puntos. De hecho, el cortante en ambos puntos aumenta

significativamente para los tres modelos constitutivos empleados en la arcilla (exceptuando en el punto 1A con Mohr-Coulomb), a diferencia de los resultados para momento donde los aumentos no son tan significativos, pero igualmente el modelo Cam-Clay modificado presenta valores más altos.

El modelo Cam-Clay modificado es el que presenta resultados más alto que los demás, tanto para los elementos del túnel como los esfuerzos en la arcilla.

El modelo Mohr-Coulomb a pesar de sus limitaciones puede utilizarse para tener resultados de primera instancia, aunque los valores difieran de los otros modelos, puede mostrar las tendencias de los esfuerzos en la arcilla y las fuerzas que actúan sobre los elementos del túnel

En la figura 24 se puede observar la distribución de momento y en la figura 25 el cortante en toda la sección del túnel para la segunda y última fase, calculadas por PLAXIS 2D con Cam-Clay modificado, dejando en evidencia el aumento de las fuerzas que actúan en el túnel en ciertos puntos; por otra parte se percibe una rotación en dichas fuerzas, más notoria en la gráfica de momento (figura 25) esto se constata en las gráficas de los demás modelos (Mohr Coulomb Anexo 1 y Hardening soil Anexo 2) tratándose de una rotación de los esfuerzos principales en la arcilla, en la figura 27 se observa la variación de la dirección con respecto al paso.

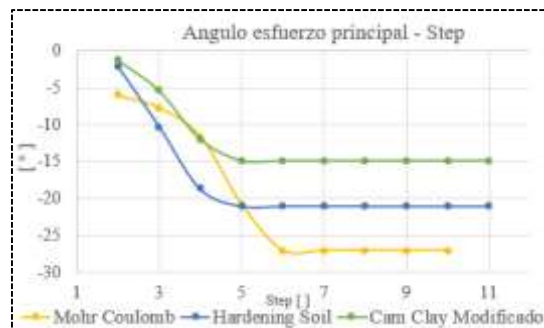


Figura 27. Gráfica del cambio en la dirección del esfuerzo principal en el punto 1B.

De hecho, si se compara A) y B) (resultados de la fase I) con respecto a C) y D) (resultados de la fase II) de la figura 26, se evidencia la relación en el esfuerzo principal y la distribución de momento del túnel, donde la variación del ángulo del esfuerzo principal afecta la distribución del momento en el túnel. Este fenómeno ocurre para todos los modelos utilizados; Mohr Coulomb Anexo 3 y Hardening soil Anexo 4. El cambio en la dirección de los esfuerzos principales, distribución de momento y cortante sucede entre la fase I y fase II, siendo consecuencia del flujo de agua que hay por el cambio en el nivel freático del estrato de arcilla.

4. Conclusiones

El cambio en los esfuerzos en la arcilla y a su vez en las fuerzas que inciden sobre el túnel son causados en su mayoría por el aumento del nivel freático que hace que las presiones de poros aumenten y a su vez los esfuerzos totales, y no por la recarga del acuífero presionando desde abajo al estrato de arcilla.

Los elementos del túnel pueden requerir refuerzo o volver a diseñarse, ya que las fuerzas que interactúan en él aumentaron significativamente debido al aumento del nivel freático en el estrato de la arcilla comprometiendo la estabilidad de la estructura; por otro lado, puede realizarse un reacondicionamiento en los componentes del túnel para adaptarlo al cambio generados en los puntos requeridos.

El aumento del nivel freático en el estrato de la tiza género cambios en los esfuerzos principales de la arcilla, en este caso haciéndolos rotar, dicha rotación está relacionada con la distribución de momento y cortante, generando cambios afectando la estabilidad del túnel.

La importancia de la publicación, acceso a la información y datos de los suelos en estudio facilitó el desarrollo del proyecto, ya que sin estos hubiese sido más complejo, debido a que tendríamos que realizar estudios geotécnicos para obtener los parámetros necesarios para el análisis. Recalcando que la situación de estudio sucede en Londres, por lo tanto, ir al campo y realizar los estudios geotécnicos puede ser motivo de impedimento para el desarrollo del proyecto debido a su lejanía.

Referencias Bibliográficas

- Angelone, S., Garibay, M. T., & Cauhapé C., M. (2006). *Geología y Geotecnia*. Univ. Nac. Rosario.
- Bell, F. G., Culshaw, M. G., & Cripps, J. C. (1999). A review of selected engineering geological characteristics of English Chalk. *Engineering geology*, 54(3-4), 237-269.
- Brinkgreve, R. B. (2005). *Selection of Soil Models and Parameters for Geotechnical Engineering Application*". ASCE. Pp 69-98. Obtenido de [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40771\(169\)4](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40771(169)4).
- Brinkgreve, R. B., Swolfs, W. M., Engin, E. W., Chesaru, A., Bonnier, P. G., & Galavi, V. (2010). *PLAXIS 2D 2010. User manual*, PLAXIS bv.
- De Guzmán, D. S. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Díaz, J. A. (1992). Errores conceptuales en Geología: los conceptos isotropía-anisotropía y propiedad escalar-propiedad vectorial. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 10(2), 159-164.
- Gasparre, A. (2005). *Advanced laboratory characterisation of London Clay*. London: (Tesis doctoral). Imperial College London,.
- González-Cueto, O., Herrera Suárez, M., Iglesias Coronel, C. E., & López Bravo, E. (2013). Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(3), 75-80.
- Itasca. (2008). *FLAC 2D V6. Manual de Usuario*, Minneapolis, USA. 12 tomos del manual. *Licencia de programa SVS-2010*.

J., B. R. (2005). *Selection of Soil Models and Parameters for Geotechnical Engineering Application*". ASCE. Pp 69-98 . Obtenido de [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40771\(169\)4](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40771(169)4).

PLAXIS . (2 de mayo de 2017). *PLAXIS 2D Reference Manual 2018: PLAXIS*. Obtenido de <https://www.plaxis.com/support/manuals/plaxis-modeto-manual/>

PLAXIS. (2 de mayo de 2011). *Hardening Soil Model: PLAXIS*. Obtenido de <https://www.plaxis.com/support/models/hardening-soil-model/>

Roscoe, K., & Burland, J. B. (1968). *On the generalized stress-strain behaviour of wet clay*. .

Sandström, M. (2016). *Numerical Modelling and Sensitivity Analysis of Tunnel Deformations in London Clay*. . Estocolmo, Suecia: (Tesis de pregrado). Kungliga Tekniska Högskolan.

Schofield, A., & Wroth, P. (1968). *Critical state soil mechanics (Vol. 310)*. London: McGraw-Hill.

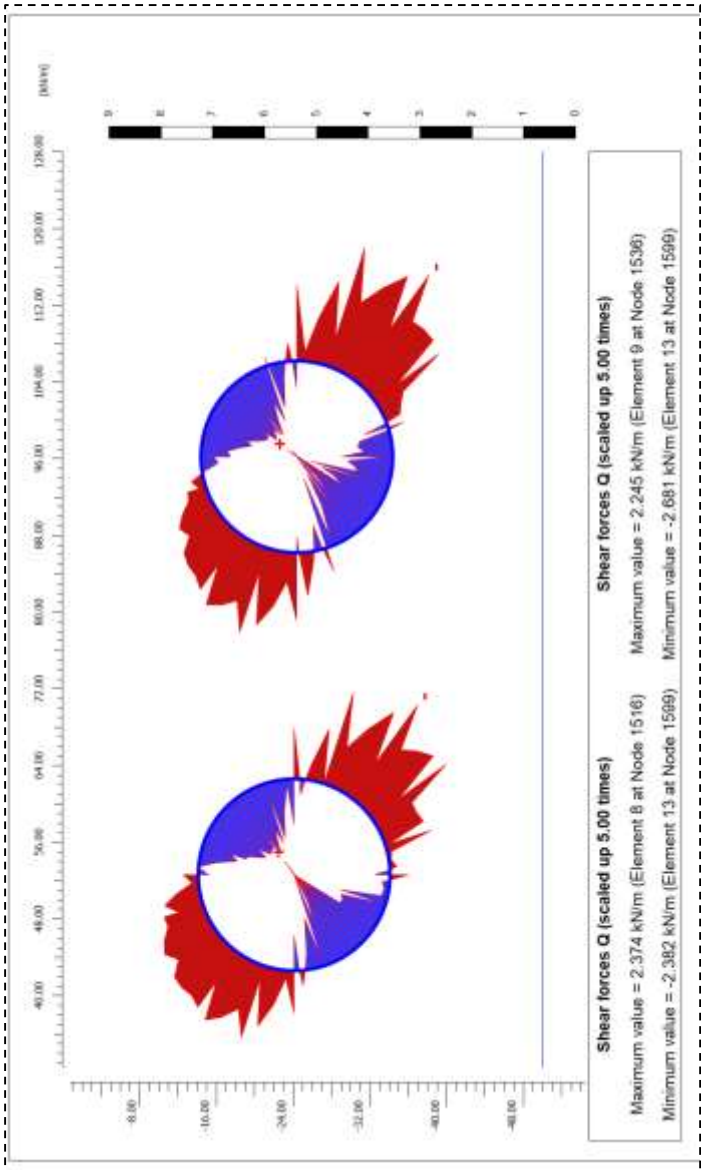
Standing, J. R., & Burland, J. B. (2005). *Investigating variations in tunnelling volume loss—a case study. In Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Proceedings of the 5th International Symposium TC28*. Amsterdam: the Netherlands, 15-17 (p. 305). CRC Press.

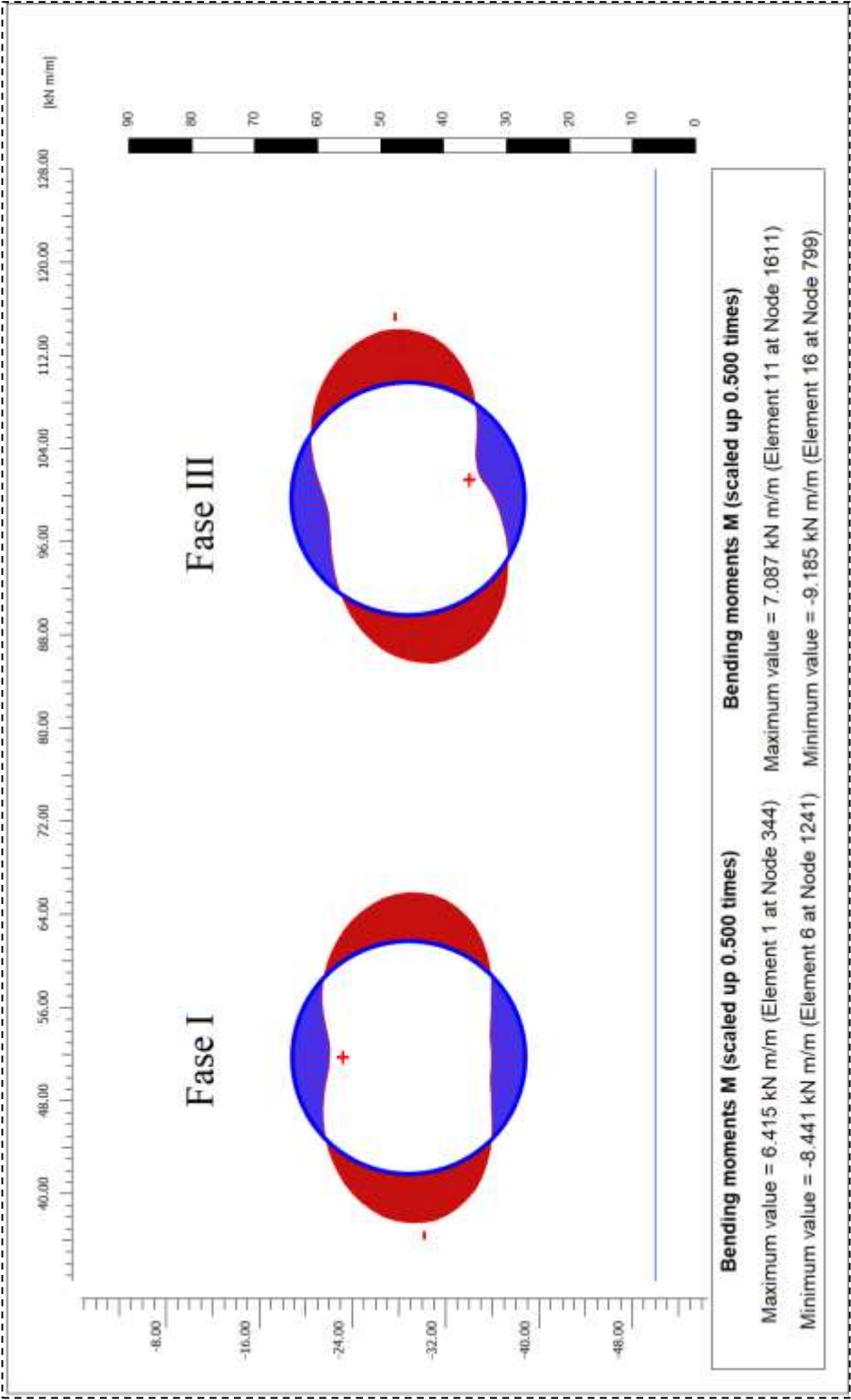
Suarez, J. (2009). *Análisis Geotécnico*. Bucaramanga: Publicaciones UIS.

Tauta, J. F., Ortiz, Ó. J., & Pumarejo, P. B. (2004). Utilización del modelo CAM-CLAY modificado en suelos cohesivos de la Sabana de Bogotá. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, (14), 1-13.

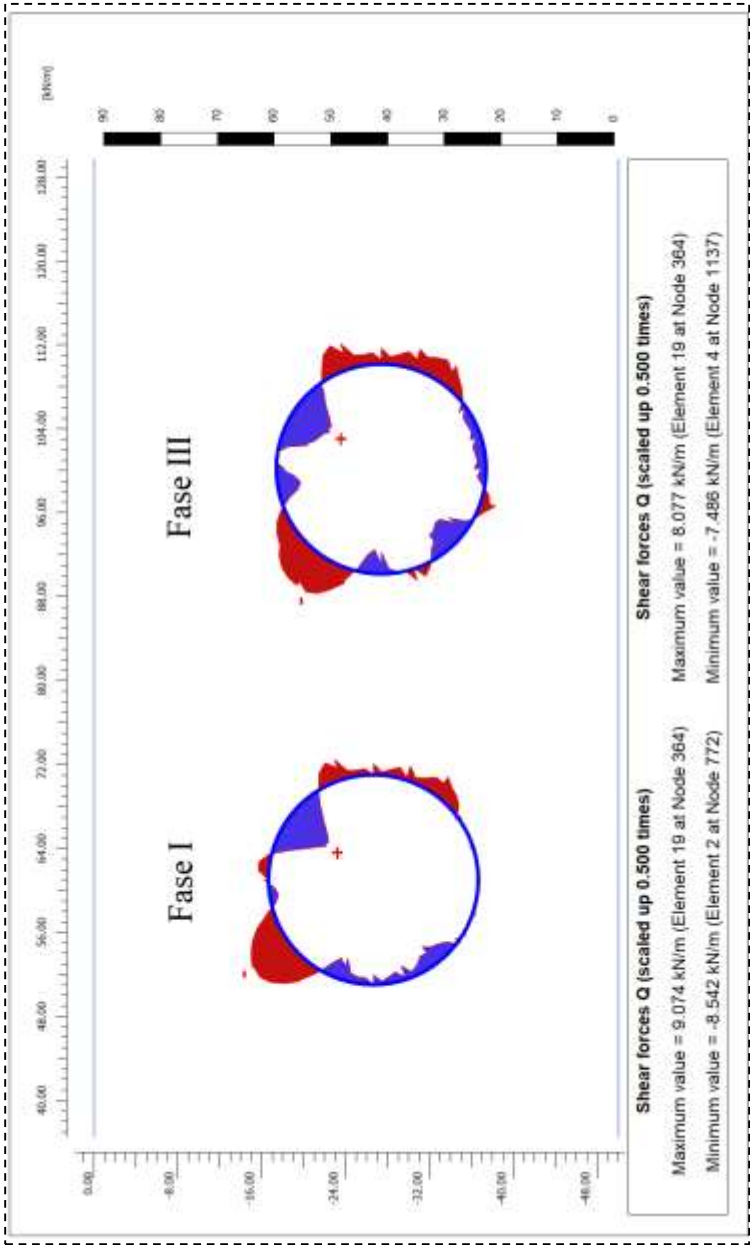
Apéndices

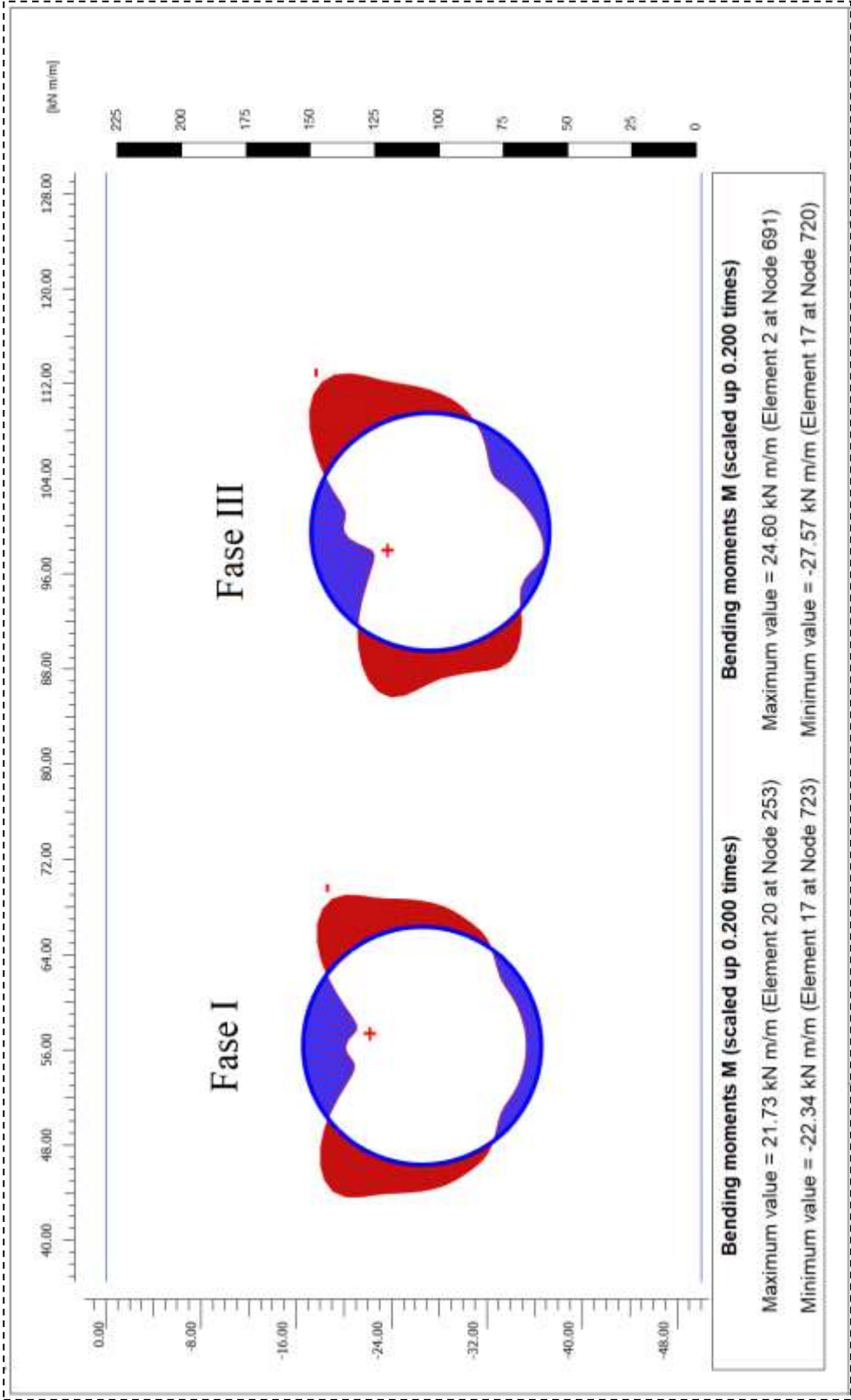
Apéndice A. Distribución de cortante y momento en el túnel por Mohr coulomb obtenidos por PLAXIS 2D.



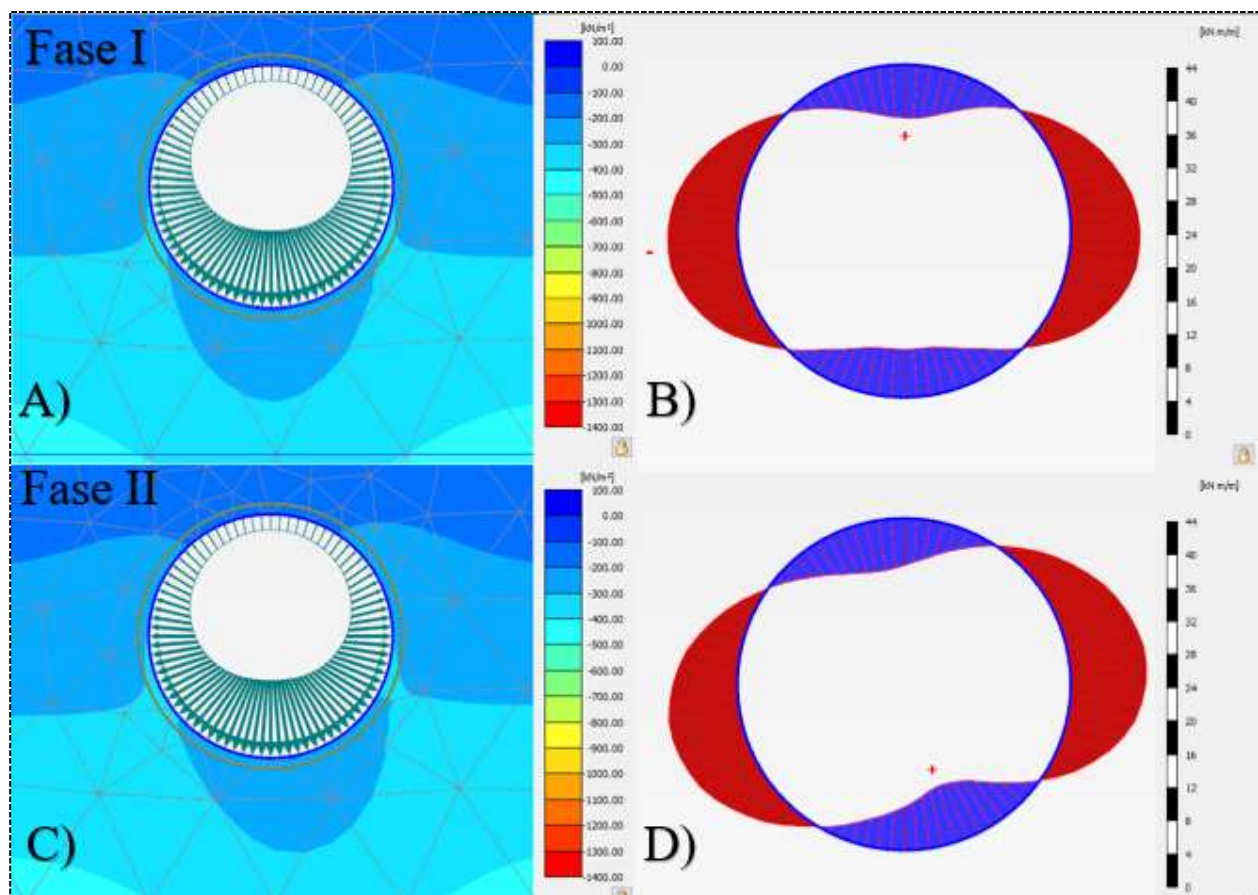


Apéndice B. Distribución de cortante y momento en el túnel por Hardening soil obtenidos por PLAXIS 2D.

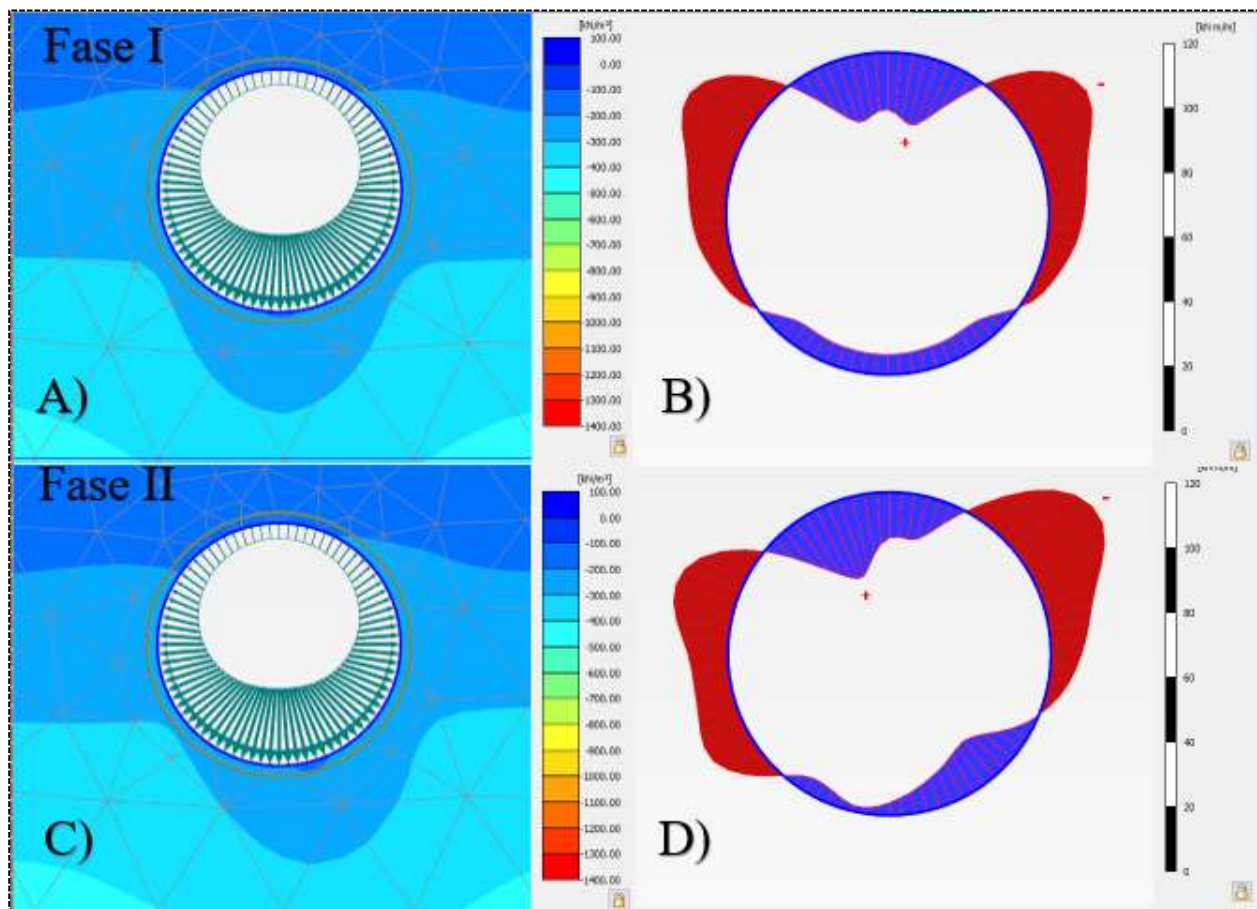




Apéndice C. A) Distribución del esfuerzo principal alrededor del túnel en la fase I. B) Gráfica de momento en el túnel para la fase I. C) Distribución del esfuerzo principal alrededor del túnel en la fase II. D) Gráfica de momento alrededor del túnel en la fase II. Resultados obtenidos de PLAXIS 2D utilizando en la arcilla el modelo constitutivo Mohr Coulomb.



Apéndice D. A) Distribución del esfuerzo principal alrededor del túnel en la fase I. B) Gráfica de momento en el túnel para la fase I. C) Distribución del esfuerzo principal alrededor del túnel en la fase II. D) Gráfica de momento alrededor del túnel en la fase II. Resultados obtenidos de PLAXIS 2D utilizando en la arcilla el modelo constitutivo Hardening soil.



Apéndice E. Tabla de momento y cortante correspondientes a cada punto para cada modelo constitutivo, valores obtenidos por PLAXIS 2D

[] de S	Mohr Coulomb				Hardening Soil				Cam Clay Modific			
	V[kN]		M[kN*m]		V[kN]		M[kN*m]		V[kN]		M[kN*m]	
	1A	2A	1A	2A	1A	2A	1A	2A	1A	2A	1A	2A
1	0.110	0.161	3.189	2.907	-0.051	0.189	8.345	3.044	-0.030	0.173	18.310	4.086
2	0.222	0.323	6.415	5.814	-0.073	0.401	16.568	6.083	-0.072	0.366	40.665	9.741
3	0.240	0.360	6.379	5.782	0.901	0.432	17.913	6.334	-0.105	0.421	47.103	11.697
4	0.277	0.434	6.309	5.719	1.642	1.173	16.789	5.648	1.848	1.231	46.374	11.366
5	0.353	0.583	6.168	5.594	1.718	1.987	15.101	4.622	4.486	2.437	45.382	10.853
6	0.513	0.881	5.880	5.356	1.714	2.293	14.186	3.965	5.456	2.965	44.769	10.599
7	0.622	1.067	5.702	5.218	1.709	2.301	14.135	3.937	5.452	2.965	44.770	10.599
8	0.622	1.067	5.702	5.218	1.705	2.308	14.083	3.910	5.447	2.965	44.771	10.599
9	0.622	1.067	5.703	5.218	1.701	2.315	14.026	3.884	5.444	2.965	44.770	10.599
10	0.622	1.067	5.704	5.218	1.697	2.321	13.966	3.857	5.440	2.965	44.769	10.599
11	0.622	1.067	5.705	5.218	1.695	2.328	13.904	3.829	5.436	2.965	44.768	10.599

Apéndice F. Tabla de esfuerzos efectivos y totales correspondiente al modelo constitutivo**Mohr Coulomb, valores obtenidos por PLAXIS 2D**

Step []	Mohr Coulomb						Principal stress directions [°]
	$\sigma'y$ [kN/m2]		σ_y [kN/m2]		U [kN/m2]		
	1B	2B	1B	2B	1B	2B	
2	-125.512	-180.076	-173.745	-432.141	-48.233	-252.065	-5.992
3	-124.832	-179.438	-249.050	-502.491	-124.218	-323.053	-7.690
4	-123.472	-178.159	-247.690	-501.212	-124.218	-323.053	-11.552
5	-120.781	-175.607	-244.999	-498.660	-124.218	-323.053	-20.855
6	-115.525	-170.543	-239.743	-493.596	-124.218	-323.053	-27.051
7	-112.408	-167.446	-236.626	-490.499	-124.218	-323.053	-27.052
8	-112.408	-167.446	-236.626	-490.499	-124.218	-323.053	-27.053
9	-112.409	-167.446	-236.627	-490.499	-124.218	-323.053	-27.055
10	-112.409	-167.445	-236.627	-490.499	-124.218	-323.053	-27.055
11	-112.409	-167.445	-236.627	-490.498	-124.218	-323.053	

Apéndice G. Tabla de esfuerzos efectivos y totales correspondiente al modelo constitutivo**Hardening soil, valores obtenidos por PLAXIS 2D**

Step []	Hardening Soil						Principal stress directions [°]
	$\sigma'y$ [kN/m2]		σy [kN/m2]		U [kN/m2]		
	1B	2B	1B	2B	1B	2B	
2	-141.286	-183.323	-189.518	-435.388	-48.233	-252.065	-2.001
3	-139.629	-173.922	-187.861	-425.987	-48.233	-252.065	-10.183
4	-135.757	-169.664	-259.975	-492.717	-124.218	-323.053	-18.693
5	-134.237	-167.296	-258.454	-490.349	-124.218	-323.053	-21.015
6	-135.457	-167.582	-259.674	-490.636	-124.218	-323.053	-21.022
7	-135.608	-167.636	-259.826	-490.690	-124.218	-323.053	-21.025
8	-135.763	-167.681	-259.980	-490.735	-124.218	-323.053	-21.029
9	-135.924	-167.722	-260.142	-490.776	-124.218	-323.053	-21.033
10	-136.092	-167.762	-260.310	-490.816	-124.218	-323.053	-21.038
11	-136.263	-167.802	-260.481	-490.856	-124.218	-323.053	-21.043

Apéndice H. Tabla de esfuerzos efectivos y totales correspondiente al modelo constitutivo**Cam-Clay modificado, valores obtenidos por PLAXIS 2D**

Step []	Cam Clay Modific						Principal stress directions [°]
	$\sigma'y$ [kN/m2]		σ_y [kN/m2]		U [kN/m2]		
	1B	2B	1B	2B	1B	2B	
2	-148.368	-192.620	-196.601	-444.685	-48.233	-252.065	-1.223
3	-145.596	-173.107	-193.828	-425.172	-48.233	-252.065	-5.320
4	-142.851	-170.285	-267.069	-493.338	-124.218	-323.053	-11.929
5	-139.370	-166.146	-263.588	-489.200	-124.218	-323.053	-14.812
6	-138.759	-164.461	-262.977	-487.515	-124.218	-323.053	-14.811
7	-138.779	-164.460	-262.997	-487.514	-124.218	-323.053	-14.810
8	-138.800	-164.459	-263.018	-487.512	-124.218	-323.053	-14.810
9	-138.819	-164.458	-263.036	-487.511	-124.218	-323.053	-14.810
10	-138.838	-164.457	-263.055	-487.510	-124.218	-323.053	-14.810
11	-138.856	-164.456	-263.074	-487.509	-124.218	-323.053	-14.810