



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

EQUIVALENCIAS 2D – 3D EN ANÁLISIS TENSO – DEFORMACIONALES DE
TÚNELES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOSEPH ANDREW SORIA MEDINA

TUTOR PRINCIPAL:
FERMÍN ANTONIO SÁNCHEZ REYES, M.I.

CIUDAD DE MÉXICO, ENERO 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Deméneghi Colina Agustín
Secretario: Dra. Ossa López Alexandra
1 er. Vocal: M.I. Sánchez Reyes Fermín Antonio
2 do. Vocal: M. en I. Suárez Fino José Francisco
3 er. Vocal: M. en I. López Molina Jorge A.

Lugar donde se realizó la tesis: GEOSA Geología, Geotecnia y Obras Subterráneas S de RL de CV

TUTOR DE TESIS:

M.I. FERMÍN ANTONIO SÁNCHEZ REYES

FIRMA

RESUMEN

Por lo general, los análisis de excavaciones subterráneas se siguen haciendo en dos dimensiones por razones prácticas y de costos, pues los análisis en tres dimensiones suelen ser muy costosos en tiempo para el diseño y potencia para el cálculo.

El objetivo principal del presente trabajo es encontrar un método de calibración para establecer equivalencias de los modelos bidimensionales con respecto a los tridimensionales, de manera que permitan representar la realidad tridimensional de una excavación subterránea, y asimismo desarrollar nomogramas o tablas de equivalencia para contribuir a mejorar el nivel de precisión de los modelos bidimensionales.

Para el desarrollo de la investigación se realizaron análisis tridimensionales en modelos con secciones circulares y de tipo carretera de un túnel, en los cuales se variaron los valores del campo de esfuerzos iniciales (*field stress*), el coeficiente de esfuerzo horizontal (k_0), las profundidades y las longitudes de avance con y sin sostenimiento. Los análisis tridimensionales se realizaron con el programa de cómputo de elementos finitos Plaxis 3D.

El resultado de la investigación fue exitoso respecto a su objetivo principal: se logró establecer un método de calibración que permite simular el comportamiento de la realidad tridimensional con modelos bidimensionales, con sus respectivas gráficas y tablas de equivalencia para los casos estudiados.

ABSTRACT

Generally, analyses of underground excavations are still done in two dimensions for practical and cost reasons, since analyses in three dimensions are usually very costly in terms of design time and computational power.

The main objective of this research is to find a calibration method to establish equivalences of two-dimensional models with regard to the three-dimensional models. So that they can represent the three-dimensional reality of an underground excavation, and also to develop nomograms or equivalence tables to help improve the level of accuracy of the bidimensional models.

For the development of the research, three-dimensional analyses were carried out on models with circular and road type sections of a tunnel, in which the values of the initial stress field, the horizontal stress coefficient (k_0), the depths and the advance lengths with and without support were varied. The three-dimensional analyses were performed with the finite element computation program Plaxis 3D.

The research result was successful respect to its main objective: it was possible to establish a calibration method that allows simulating the behavior of the three-dimensional reality with two-dimensional models, with their corresponding graphs and equivalence tables for the cases studied.

DEDICATORIA

A la memoria de mi padre, Asunción Soria Ríos, que no pudo llegar hasta aquí, a la culminación de este sueño. Valió la pena, PAPÁ.

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

A mi madre Delia y a mi hermana Belmira, siempre conmigo, siempre con ellas.

A mi amada esposa Tania, a su incondicional apoyo, comprensión y amor.

Al gobierno mexicano, UNAM y CONACYT, a su noble propósito de igualdad de oportunidades de desarrollo en Latinoamérica.

A mi asesor de tesis, M.I. Fermín Sánchez Reyes, a su magisterio, solvencia profesional y humana.

A la Dra. Alexandra Ossa, a su apoyo en la maestría desde el primer día de clase, a su generosidad y ubérrimo corazón.

A los maestros, Francisco Suárez, Jorge López y Agustín Deméneghi, a su desprendimiento y ayuda en este trabajo.

Al editor Nerit Olaya, a su paciente apoyo en el cuidado de esta tesis.

A Martín Castillo, a su entusiasta y motivadora amistad.

A mis compañeros de la maestría y a las personas que conocí en México, a su grata acogida y afecto.

A todas las personas que de alguna u otra forma me apoyaron desde Perú para culminar la tesis.

Gracias a todos.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2	OBJETIVOS	1
1.3	JUSTIFICACIÓN	1
1.4	ALCANCE.....	2
1.5	CONTENIDO Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	2
2	MARCO TEÓRICO	3
2.1	DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE ESFUERZOS EN TORNO A UNA CAVIDAD CIRCULAR.....	3
2.1.1	Fuerzas de excavación.....	4
2.1.2	Ejemplo	5
2.2	MÉTODO DE CONVERGENCIA - CONFINAMIENTO.....	7
2.3	EFECTO DEL FRENTE.....	8
2.4	PERFIL DE DESPLAZAMIENTO LONGITUDINAL	10
2.5	MODELOS DE CÁLCULOS TENSO-DEFORMACIONALES	12
2.5.1	Introducción	12
2.5.2	Simulación del estado inicial de esfuerzos	14
2.5.2.1	Campo de esfuerzos iniciales (<i>field stress</i>)	14
2.5.2.2	Método k_0	14
2.5.2.3	Método del peso propio (<i>gravity loading</i>).....	14
2.5.3	Método de relajación de esfuerzos	15
2.5.4	Comportamiento tridimensional real de excavaciones subterráneas	16
3	CURVAS CARACTERÍSTICAS OBTENIDAS CON MÉTODOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS	18
3.1	INTRODUCCIÓN	18
3.2	LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS ANALÍTICOS	18
3.3	CASO DE ESTUDIO.....	18
3.3.1	Caso I.....	19
3.3.1.1	Campo de esfuerzos iniciales 4050 kN/m ² (equivalente a 150 m. de profundidad) por el método de la curva característica.....	19
3.3.1.2	Caso $k_0=1.00$ a una profundidad de 150 m por MEF.	20
3.3.2	Caso II	23
3.3.2.1	Caso $k_0=0.50$ a una profundidad de 150 m.....	23
3.3.3	Conclusiones	27
4	ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL DE LOS MODELOS DE INVESTIGACIÓN	28
4.1	INTRODUCCIÓN	28
4.2	CONDICIONES GENERALES DE ANÁLISIS	28

4.3	MODELO CON SECCIÓN DE TÚNEL CIRCULAR	31
4.3.1	Campos de esfuerzos iniciales	31
4.3.1.1	Modelo elástico lineal	33
4.3.1.2	Modelo de Mohr-Coulomb	35
4.3.1.3	Conclusiones	39
4.3.2	Variación del coeficiente de esfuerzo horizontal k_0 en terreno elastoplástico	40
4.3.2.1	Caso $k_0=0.50$	42
4.3.2.2	Caso $k_0=0.35$	52
4.3.2.3	Caso $k_0=0.75$	54
4.3.2.4	Caso $k_0=1.00$	56
4.3.2.5	Caso $k_0=1.25$	58
4.3.2.6	Conclusiones	60
4.4	MODELO CON SECCIÓN DE TÚNEL CARRTERO	62
4.4.1	Campos de esfuerzos iniciales	62
4.4.1.1	Modelo elástico lineal	62
4.4.1.2	Modelo elastoplástico de Mohr-Coulomb	64
4.4.1.3	Conclusiones	68
4.4.2	Variación del coeficiente de esfuerzo horizontal k_0 en terreno elastoplástico	69
4.4.2.1	Caso $k_0=0.50$	71
4.4.2.2	Caso $k_0=0.35$	73
4.4.2.3	Caso $k_0=0.75$	74
4.4.2.4	Caso $k_0=1.00$	76
4.4.2.5	Caso $k_0=1.25$	78
4.4.2.6	Conclusiones	80
4.5	COMPARACIÓN DE LOS CASOS DE TÚNEL CIRCULAR Y TÚNEL DE CARRETERA	82
4.5.1	Campos de esfuerzos iniciales	82
4.5.2	Variación del coeficiente del esfuerzo horizontal, k_0	82
4.5.2.1	Caso $k_0=0.35$	84
4.5.2.2	Caso $k_0=0.50$	84
4.5.2.3	Caso $k_0=0.75$	84
4.5.2.4	Caso $k_0=1.00$	84
4.5.2.5	Caso $k_0=1.25$	84
4.5.3	Conclusiones	85
5	CALIBRACIÓN DEL MODELO BIDIMENSIONAL CON EL TRIDIMENSIONAL	86
5.1	MÉTODO DE CALIBRACIÓN	86
5.2	CASOS DE ESTUDIO	91
5.2.1	Túnel circular	91

5.2.1.1	Caso $k_0=0.50$	92
5.2.1.2	Caso $k_0=0.35$	100
5.2.1.3	Caso $k_0=0.75$	103
5.2.1.4	Caso $k_0=1.00$	106
5.2.1.5	Caso $k_0=1.25$	109
5.2.1.6	Resultados del túnel circular	112
5.2.1.7	Conclusiones del túnel circular	114
5.2.2	Túnel de carretera	115
5.2.2.1	Caso $k_0=0.50$	115
5.2.2.2	Caso $k_0=0.35$	119
5.2.2.3	Caso $k_0=0.75$	122
5.2.2.4	Caso $k_0=1.00$	125
5.2.2.5	Caso $k_0=1.25$	128
5.2.2.6	Resultados del túnel de carretera.....	131
5.2.2.7	Conclusiones del túnel de carretera.....	133
5.2.3	Conclusiones del capítulo.....	134
6	CONCLUSIONES Y PROPUESTAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	135
	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	138
	ANEXO 1	140
	A.1. MODELO CON SECCIÓN DE TÚNEL CIRCULAR	140
	A.1.1 Campos de esfuerzos iniciales	140
	A.1.1.1 Modelo elástico lineal.....	140
	A.1.1.2. Modelo de Mohr-Coulomb	142
	A.1.2. Variación del coeficiente de esfuerzo horizontal, k_0	148
	A.1.2.1. Caso $k_0=0.50$	148
	A.1.2.2. Caso $k_0=0.35$	154
	A.1.2.3. Caso $k_0=0.75$	156
	A.1.2.4. Caso $k_0=1.00$	158
	A.1.2.5. Caso $k_0=1.25$	160
	A.2. MODELO CON SECCIÓN DE TÚNEL CARRTERO	162
	A.2.1 Campos de esfuerzos iniciales	162
	A.2.1.1 Modelo elástico lineal.....	162
	A.2.1.2. Modelo de Mohr-Coulomb	163
	A.2.2. Variación del coeficiente de esfuerzo horizontal, k_0	165
	A.2.2.1. Caso $k_0=0.50$	165
	A.2.2.2. Caso $k_0=0.35$	167
	A.2.2.3. Caso $k_0=0.75$	169

A.2.2.4. Caso $k_0=1.00$	171
A.1.2.5. Caso $k_0=1.25$	173

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1	Componentes de los esfuerzos en el punto (r, θ) (Modificado de Kirsch, 1898).	3
Figura 2. 2	Esquema de fuerzas de excavación en un modelo bidimensional.	5
Figura 2. 3	Problema de un túnel circular en un medio continuo.	5
Figura 2. 4	Distribución del esfuerzo principal mayor σ_1 para una relajación de esfuerzos de 0%.	6
Figura 2. 5	Distribución del esfuerzo principal mayor σ_1 para una relajación de esfuerzos de 30%.	6
Figura 2. 6	Distribución del esfuerzo principal mayor σ_1 para una relajación de esfuerzos de 100%.	7
Figura 2. 7.	Curva convergencia-confinamiento (Modificado de Pannet, 1995).	8
Figura 2. 8	Deformaciones que sufren los frentes de avance de excavación (Lunardi, 2000).	9
Figura 2. 9	Patrón de deformación en el macizo rocoso que rodea el avance de un túnel (Hoek, 2007).	9
Figura 2. 10	Esquemas de deformaciones en el sentido longitudinal asociadas distintos eventos constructivos (Sánchez, 2014).	10
Figura 2. 11	Uso del perfil de desplazamiento longitudinal, que relaciona la ubicación de la instalación del soporte con el desplazamiento en las paredes del túnel usando el método de convergencia-confinamiento. (Vlachopoulos, 2009).	11
Figura 2. 12	Comparación del perfil de desplazamiento longitudinal reportado en la literatura (Chern et al., 1998). 11	
Figura 2. 13	Perfil del desplazamiento radial usado como alternativa a los métodos analíticos (Vlachopoulos y Diederichs, 2009).....	12
Figura 2.14	Modelo tridimensional para discretización.....	13
Figura 2.15	Modelos bidimensionales para discretización.	14
Figura 2. 16	Esquema de relajación de esfuerzos en un modelo bidimensional.	15
Figura 2. 17	Distribución de esfuerzos principales en una sección longitudinal en el plano de la clave de la excavación (Sánchez, 2014).	16
Figura 2. 18	Esquema de los esfuerzos verticales en una línea paralela al avance y a la altura de la clave (Sánchez, 2014).	17
Figura 2. 19	Distribución de esfuerzos verticales durante el avance de excavación.....	17
Figura 3. 1	Curva característica obtenida de forma analítica.	19
Figura 3. 2	Radio plástico del túnel obtenida de forma analítica.	20
Figura 3. 3	Desplazamientos debido a la excavación del túnel en distintas etapas de relajación de esfuerzos.	21
Figura 3. 4	Curvas características obtenidas con método analítico (RocSupport) y método numérico (RS ₂).	22
Figura 3. 5	Radio plástico del túnel obtenidos por métodos numéricos.....	23
Figura 3. 6	Desplazamientos en la bóveda y hastial del túnel para diferentes etapas de relajación con k_0 0.50.	24
Figura 3. 7	Desplazamientos en la bóveda y hastial del túnel para distintas etapas de relajación	25
Figura 3. 8	Zona de plasticidad en los hastiales conforme avanza la relajación de esfuerzos.	26
Figura 3. 9	Curvas características de los casos estudiados.	27
Figura 4. 1.	Vista isométrica del túnel del modelo circular.	29
Figura 4. 2.	Vista isométrica del túnel del modelo carretero.	29
Figura 4. 3.	Avance de excavación de 1 m.	30
Figura 4. 4.	Avance de excavación de 3 m.	30
Figura 4. 5.	Avance de excavación de 5 m.	31
Figura 4. 6	Casos analizados para los campos de esfuerzos iniciales en el modelo de túnel circular.	32
Figura 4. 7	Relación de esfuerzos vs desplazamientos en la clave del túnel para un campo de esfuerzos de 720 y 3600 kN/m ² . Modelo elástico lineal con avances de 1 m. sin y con soporte.	33
Figura 4. 8.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un campo de esfuerzos de 720 y 3600 kN/m ² . Modelo elástico lineal con avances de 1 m. sin y con soporte.....	34
Figura 4.9.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un campo de esfuerzos de 720 kN/m ² . Modelo Mohr-Coulomb.	36

Figura 4. 10.	Relación de esfuerzos vs distancia a frente para un campo de esfuerzos de 720 kN/m ² . Modelo Mohr-Coulomb.	37
Figura 4. 11.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un campo de esfuerzos de 3600 kN/m ² . Modelo Mohr-Coulomb.	38
Figura 4. 12.	Relación de esfuerzos vs distancia a frente para un campo de esfuerzos de 3600 kN/m ² . Modelo Mohr-Coulomb.	39
Figura 4. 13.	Casos analizados para los coeficientes de esfuerzo horizontal k_0 en el modelo túnel circular.	41
Figura 4.14.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 1 m. con soporte.	43
Figura 4. 15.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 1 m. con soporte.	44
Figura 4. 16.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	44
Figura 4. 17.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	45
Figura 4. 18.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 5 m. con soporte.	46
Figura 4. 19	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 5 m. con soporte.	46
Figura 4.20.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a 30 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.	47
Figura 4.21.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a 30 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.	48
Figura 4.22.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a 75 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.	48
Figura 4. 23.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a 75 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.	49
Figura 4.24.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a 150 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.	50
Figura 4.25.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a 150 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.	50
Figura 4.26.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a 200 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.	51
Figura 4. 27.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a 200 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.	52
Figura 4.28.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.35$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	53
Figura 4.29.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.35$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3m. con soporte.	54
Figura 4. 30.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.75$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	55
Figura 4. 31.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.75$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	56
Figura 4.32.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=1.00$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	57
Figura 4.33.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=1.00$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	58
Figura 4. 34.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=1.25$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	59
Figura 4. 35.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=1.25$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	60
Figura 4. 36	Casos analizados para los campos de esfuerzos iniciales en el modelo de túnel carretero.	62

Figura 4. 37.	Relación de esfuerzos vs desplazamientos en la clave del túnel para un campo de esfuerzos de 720 y 3600 kN/m ² . Modelo elástico lineal con avances de 3 m. con soporte.	63
Figura 4. 38.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un campo de esfuerzos de 720 y 3600 kN/m ² . Modelo elástico lineal con avances de 3 m. con soporte.	64
Figura 4. 39.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un campo de esfuerzos de 720 kN/m ² . Modelo Mohr-Coulomb.	65
Figura 4. 40.	Relación de esfuerzos vs distancia a frente para un campo de esfuerzos de 720 kN/m ² . Modelos Mohr-Coulomb.	66
Figura 4. 41.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un campo de esfuerzos de 3600 kN/m ² . Modelos Mohr-Coulomb.	67
Figura 4. 42.	Relación de esfuerzos vs distancia a frente para un campo de esfuerzos de 3600 kN/m ² . Modelos Mohr-Coulomb.	68
Figura 4. 43.	Casos analizados para los coeficientes de esfuerzo horizontal k_0 en el modelo túnel carretero.	70
Figura 4. 44.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	72
Figura 4. 45.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	72
Figura 4. 46.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.35$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	73
Figura 4. 47.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.35$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	74
Figura 4. 48.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.75$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	75
Figura 4. 49.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.75$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	76
Figura 4. 50.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=1.00$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	77
Figura 4. 51.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=1.00$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	77
Figura 4. 52.	Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=1.25$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	79
Figura 4. 53.	Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=1.25$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.	79
Figura 5. 1.	Fase inicial se definen las condiciones iniciales del modelo.	87
Figura 5. 2.	Fase 1, se disminuye el módulo de Young del material a excavar.	87
Figura 5. 3.	Aplicación de la deformación volumétrica al material que no será excavado.	88
Figura 5. 4.	Calibración de las curvas características en la fase 1.	88
Figura 5. 5.	Aplicación de la relajación de esfuerzos al 89% y excavación del túnel.	89
Figura 5. 6.	Calibración de las curvas características en la fase 2.	89
Figura 5. 7.	Aplicación de la relajación de esfuerzos al 91.5%.	90
Figura 5. 8.	Calibración de las curvas características en la fase 5.	90
Figura 5. 9.	Instalación del sostenimiento y aplicación de la relajación de esfuerzos al 100%.	91
Figura 5. 10.	Calibración de las curvas características en la fase 6.	91
Figura 5. 11.	Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 1 m., con soporte.	92
Figura 5. 12.	Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.	92
Figura 5. 13.	Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 5 m., con soporte.	93
Figura 5. 14.	Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 1 m., con soporte.	93

Figura 5. 15. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	94
Figura 5. 16. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 5 m., con soporte.....	94
Figura 5. 17. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 1 m., con soporte.....	95
Figura 5. 18. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	95
Figura 5. 19. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 5 m., con soporte.....	96
Figura 5. 20. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 1 m., con soporte.....	96
Figura 5. 21. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	97
Figura 5. 22. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 5 m., con soporte.....	97
Figura 5. 23. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	100
Figura 5. 24. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	100
Figura 5. 25. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	101
Figura 5. 26. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	101
Figura 5. 27. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	103
Figura 5. 28. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	103
Figura 5. 29. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	104
Figura 5. 30. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	104
Figura 5. 31. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	106
Figura 5. 32. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	106
Figura 5. 33. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	107
Figura 5. 34. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	107
Figura 5. 35. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	109
Figura 5. 36. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	109
Figura 5. 37. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	110
Figura 5. 38. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	110
Figura 5. 39. Deformación volumétrica vs k_0 a distintas profundidades en el modelo circular.....	112
Figura 5. 40. Deformación volumétrica vs profundidad a distintos k_0 en modelo circular.....	113
Figura 5. 41. Δ Módulo de Young vs k_0 a distintas profundidades en modelo circular.....	113
Figura 5. 42. Δ Módulo de Young vs profundidad a distintos k_0 en modelo circular.....	114

Figura 5. 43. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	115
Figura 5. 44. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	116
Figura 5. 45. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	116
Figura 5. 46. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	117
Figura 5. 47. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	119
Figura 5. 48. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	119
Figura 5. 49. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	120
Figura 5. 50. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	120
Figura 5. 51. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	122
Figura 5. 52. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	122
Figura 5. 53. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	123
Figura 5. 54. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	123
Figura 5. 55. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	125
Figura 5. 56. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	125
Figura 5. 57. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	126
Figura 5. 58. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	126
Figura 5. 59. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	128
Figura 5. 60. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	128
Figura 5. 61. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	129
Figura 5. 62. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.....	129
Figura 5. 63. Deformación volumétrica vs k_0 a distintas profundidades en modelo carretero.....	131
Figura 5. 64. Deformación volumétrica vs profundidad a distintos k_0 en modelo carretero.....	132
Figura 5. 65. Δ Módulo de Young vs k_0 a distintas profundidades en modelo carretero.....	132
Figura 5. 66. Δ Módulo de Young vs profundidad a distintos k_0 en modelo carretero.....	133

LISTA DE TABLAS

Tabla 4. 1. Propiedades del suelo.	28
Tabla 4. 2. Propiedades del soporte.	30
Tabla 4. 3. Resultado de análisis para diferentes campos iniciales con el modelo elástico lineal.	33
Tabla 4. 4. Resultados de análisis para diferentes campos de esfuerzos con el modelo de Mohr-Coulomb.	35
Tabla 4. 5. Resultados de análisis para $k_0=0.50$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.	42
Tabla 4. 6. Resultados de análisis para $k_0=0.35$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.	53
Tabla 4.7. Resultados de análisis para $k_0=0.75$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.	55
Tabla 4. 8. Resultados de análisis para $k_0=1.00$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.	56
Tabla 4.9. Resultados de análisis para $k_0=1.25$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.	58
Tabla 4. 10. Resultado de análisis para distintos valores de k_0 en el túnel circular con avances de 3 m.	61
Tabla 4. 11. Resultado de análisis para diferentes campos iniciales con el modelo elástico lineal.	62
Tabla 4. 12. Resultados de análisis para diferentes campos de esfuerzos con el modelo Mohr-Coulomb.	64
Tabla 4. 13. Resultados de análisis para $k_0=0.50$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.	71
Tabla 4. 14. Resultados de análisis para $k_0=0.35$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.	73
Tabla 4. 15. Resultados de análisis para $k_0=0.75$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.	74
Tabla 4. 16. Resultados de análisis para $k_0=1.00$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.	76
Tabla 4. 17. Resultados de análisis para $k_0=1.25$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.	78
Tabla 4. 18. Resultado de análisis para distintos valores de k_0 en el túnel de carretera con avances de 3 m.	81
Tabla 4. 19. Comparación de los casos de túnel circular y túnel de carretera con campos de esfuerzos iniciales.	82
Tabla 4. 20. Comparación de los casos de túnel circular y túnel de carretera con variación del coeficiente de esfuerzo horizontal k_0 con avances de 3 m.	83
Tabla 5. 1. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=0.50$ en modelos Mohr-Coulomb en modelo de túnel circular.	98
Tabla 5. 2. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=0.35$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en modelo de túnel circular.	102
Tabla 5. 3. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=0.75$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en modelo de túnel circular.	105
Tabla 5. 4. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=1.00$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en modelo de túnel circular.	108
Tabla 5. 5. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=1.25$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en modelo de túnel circular.	111
Tabla 5. 6. Rangos de deformaciones volumétricas con su respectiva profundidad. Túnel circular.	112
Tabla 5. 7. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=0.50$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en túnel de carretera.	118
Tabla 5. 8. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=0.35$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en túnel de carretera.	121
Tabla 5. 9. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=0.75$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en túnel de carretera.	124
Tabla 5. 10. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=1.00$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en túnel de carretera.	127
Tabla 5.11. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=1.25$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en túnel de carretera.	130
Tabla 5. 12. Rangos de deformaciones volumétricas con su respectiva profundidad en modelo de túnel de carretera.	131

SIMBOLOGÍA

D	=	Diámetro de la excavación.
d	=	Distancia hacia el frente de excavación.
E_0	=	Módulo de Young inicial.
ΔE_0	=	Variación del módulo de Young inicial en porcentaje.
E_m	=	Módulo de Young modificado.
E	=	Módulo de Young.
f_a	=	Nivel de relajación del medio.
G	=	Módulo de rigidez al corte.
k	=	Rigidez del sostenimiento.
k_0	=	Coefficiente de empuje al reposo.
P_{eq}	=	Presión equivalente.
P_i	=	Presión ficticia interna.
P_0	=	Presión inicial.
R	=	Radio.
r_i	=	Radio inicial.
u	=	Desplazamiento unitario
u_i	=	Desplazamiento hacia el interior.
U_{eq}	=	Desplazamiento equivalente.
$U_{máximo}$	=	Desplazamiento máximo.
z	=	Profundidad.
β	=	Porcentaje de carga de terreno que actúa sobre el sostenimiento.
∂	=	Diferencial
ε	=	Deformación unitaria axial
γ	=	Peso específico.
γ_{xy}	=	Deformación transversal unitaria
λ	=	Complemento de β .
λ_0	=	1/3 aproximadamente según Panet.
σ_1	=	Esfuerzo principal mayor.
σ_3	=	Esfuerzo principal menor.
σ_v	=	Esfuerzo vertical.
σ_h	=	Esfuerzo horizontal.
σ_r	=	Esfuerzo radial.
σ_θ	=	Esfuerzo en sistema polar definido.
τ_r	=	Esfuerzo cortante.
ν	=	Coefficiente de Poisson
$\Delta \varepsilon_v$	=	Deformación volumétrica.
θ	=	Ángulo en sistema polar definido.
Δ	=	Variación

1 INTRODUCCIÓN

A pesar de los grandes avances tecnológicos en potencia y velocidad de cómputo de las últimas décadas, la resolución de problemas tenso-deformacionales en tres dimensiones mediante técnicas numéricas continúa siendo muy costosa en términos de tiempo y capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos. En este sentido, el análisis geotécnico de obras subterráneas representa un caso particular debido a que, en muchas ocasiones, el terreno a simular posee configuraciones y propiedades complejas, tanto geométricas como constitutivas, además de que los procesos constructivos bajo tierra suelen incluir una cantidad importante de particularidades que, a su vez, generan comportamientos que requieren de una gran carga matemática para ser representados adecuadamente.

Debido a lo anterior, hoy en día los cálculos en dos dimensiones continúan predominando en el ámbito del diseño de este tipo de obras y, más aún, los cálculos analíticos siguen siendo de uso frecuente en el medio de la ingeniería geotécnica. Uno de los procedimientos de cálculo analítico más recurridos es el llamado Método de Convergencia-Confinamiento y la formulación más empleada es la propuesta por Panet (1995). Los promotores de esta teoría y de otras similares, comúnmente abogan por su simplicidad y robustez teórica, asumiendo que es suficientemente aproximada para fines de pre-dimensionamiento de túneles y la razón por la que dicho argumento es pocas veces cuestionado radica en que rara vez es contrastado con técnicas avanzadas o con resultados de instrumentación, no solamente en cuanto al comportamiento que exhibe una excavación subterránea, sino en términos económicos y/o de seguridad en la obra.

La realidad es que los métodos analíticos, a fin de poder ser resueltos de forma cerrada, es decir, sin iteraciones y proporcionando un resultado único, requieren del establecimiento de una serie de hipótesis y simplificaciones que al final, terminan obviando o ignorando factores y fenómenos importantísimos en el comportamiento de las obras subterráneas que pueden alejar el resultado completamente de la realidad y que suelen ser determinantes para un diseño adecuado, económico y seguro.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A partir de lo expresado en esta introducción, el planteamiento del problema consiste en definir, analizar y discutir, en primer lugar, las limitaciones de los métodos analíticos de cálculo de túneles a través del empleo de técnicas numéricas; en segundo lugar, desarrollar un estudio similar comparando las posibilidades que brindan los análisis numéricos bidimensionales respecto a los tridimensionales, asumiendo que estos últimos son los que proporcionan las mayores posibilidades de acercarse a la realidad de este tipo de obras y, finalmente, poder establecer una serie de conclusiones que permitan al lector tener un juicio objetivo y crítico sobre los distintos métodos, en términos de su complejidad, carga computacional, nivel de aproximación, costo temporal y económico, nivel de especialización, etc.

1.2 OBJETIVOS

- Desarrollar una metodología de calibración que permita establecer equivalencias entre los modelos bidimensionales y tridimensionales de una excavación subterránea, así como definir adecuadamente las distancias entre las posibilidades que brindan las soluciones analíticas y las numéricas.
- Desarrollar algunos nomogramas o tablas de equivalencia, que permitan simular el comportamiento real tenso-deformacional (deformación plana) en modelos 2D.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, el llamado Método de Relajación de Esfuerzos es el más utilizado en los análisis tenso-deformacionales en túneles; sin embargo, los factores de redistribución tensional necesarios en su

aplicación continúan sin contar con bases sólidas para su definición; una posibilidad que brinda buenos resultados es su calibración con modelos tridimensionales. Esto implica el uso de técnicas que, en principio, tratan de evitarse. Por otro lado, cuando se cuenta con buenos resultados de instrumentación, también es posible llegar a valores representativos; sin embargo, para esto la obra ya debe estar en marcha, con lo que no es posible usarlos en un prediseño.

Además, una de las fórmulas más difundidas para determinar la relajación de esfuerzos es la propuesta por Panet (1995), la cual se basa en el método de convergencia-confinamiento que presenta muchas limitaciones al tratarse de un método de resolución analítica. Entre las principales limitaciones se tiene que: únicamente pueden simularse túneles circulares o cavidades esféricas, se parte de un estado tensional homogéneo y constante ($k_0=1$), no es posible simular la excavación por etapas, entre otras.

Dada las limitaciones que presenta el método de propuesto por Panet (1995) el presente trabajo pretende desarrollar algunas simulaciones comparativas cuyos resultados permitan estimar los valores de los coeficientes de relajación evitando dichas limitaciones y que, a su vez, se asemejen a la realidad.

1.4 ALCANCE

En el presente trabajo desarrollan casos de análisis variando la geometría de la excavación de un túnel para secciones tipo circular y carretero (herradura), el campo de esfuerzos iniciales (720 y 3600 kN/m²), el coeficiente de esfuerzo horizontal k_0 (0.35; 0.50; 0.75; 1.00 y 1.25) y las profundidades donde se encuentra el túnel (30,75, 150 y 200 m.).

1.5 CONTENIDO Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En el capítulo 2 se presenta el marco teórico de los métodos analíticos para el análisis de excavaciones subterráneas, los modelos de cálculo tenso-deformacional, y se expone el comportamiento real de las excavaciones subterráneas.

En el capítulo 3 se compara, a través de casos de estudio, los métodos analíticos y numéricos para obtener la curva característica, y se muestran las limitaciones de los métodos analíticos.

En el capítulo 4 se realiza el análisis tridimensional para los modelos circulares y carreteros de la investigación, en los cuales se variaron los valores del campo de esfuerzos iniciales (*field stress*), el coeficiente de esfuerzo horizontal (k_0) y las profundidades. Los valores de campo de esfuerzos iniciales fueron de 720 y 3600 kN/m² en σ_1 , σ_2 y σ_3 ; los valores del coeficiente de k_0 fueron de 0.35, 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25; las profundidades, de 30, 75, 150 y 200 m.; y los avances de excavación, de 1, 2, 3 y 5 m. También se presentan las condiciones generales del análisis tridimensional. Los análisis tridimensionales se realizaron a través del programa de cómputo de elementos finitos Plaxis 3D.

En el capítulo 5 se desarrolla el método de calibración con el que se logró simular el comportamiento de las curvas características 2D respecto a las 3D, a través del programa de cómputo de elementos finitos Plaxis 2D. Una vez establecido el método se realizó la calibración para los coeficientes de $k_0=0.35$, 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25, con avances de excavación de 3 m., a profundidades de 30, 75, 150 y 200 m. para ambos modelos circular y carretero.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones derivadas de la presente tesis y propuestas para futuras investigaciones.

2 MARCO TEÓRICO

La presente investigación se inscribe en el marco teórico del comportamiento tensodeformacional de excavaciones de túneles. Para su desarrollo se estudia el efecto del frente, el perfil de desplazamientos longitudinales, los estados iniciales de esfuerzos, los procesos de redistribución tensional y generación de deformaciones. Todos estos procesos y fenómenos se analizan mediante técnicas analíticas y numéricas (estas últimas en dos y tres dimensiones), cada una con sus correspondientes hipótesis y simplificaciones.

2.1 DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE ESFUERZOS EN TORNO A UNA CAVIDAD CIRCULAR

Una de las primeras soluciones que aparecieron para definir la distribución bidimensional de los esfuerzos alrededor de una cavidad circular en un cuerpo elástico fue publicada en 1898 por Kirsch. Casi un siglo después, en 1979, Jaeger y Cook derivaron las ecuaciones de Kirsch en un estudio completo de su obra. Las variables de las ecuaciones finales se presentan en la Figura 2. 1, utilizando un sistema de coordenadas polares donde los esfuerzos se definen en términos de los esfuerzos que actúan sobre las caras de un elemento, ubicado en un radio r y un ángulo polar θ .

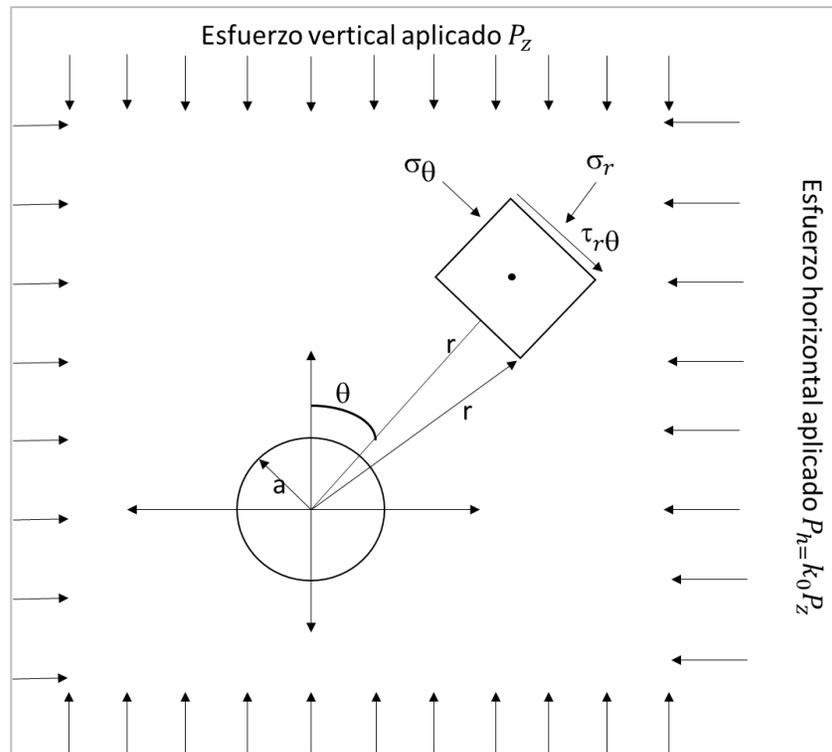


Figura 2. 1. Componentes de los esfuerzos en el punto (r, θ) (Modificado de Kirsch, 1898).

Las componentes de esfuerzo radial y tangencial en el punto (r, θ) del continuo se escriben como:

$$\sigma_r = \frac{1}{2} P_z \left[(1 + k_0) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + (1 - k_0) \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) \right] \quad (2.1)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{2}P_z \left[(1 + k_0) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - (1 - k_0) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \text{Cos}(2\theta) \right]$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}P_z \left[-(1 - k_0) \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \text{Sen}(2\theta) \right]$$

A partir de estas expresiones pueden calcularse los esfuerzos principales en el plano del papel, en un punto arbitrario (r, θ) del continuo:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_{\theta}) + \left[\frac{1}{4}(\sigma_r - \sigma_{\theta})^2 + (\tau_{r\theta})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_{\theta}) - \left[\frac{1}{4}(\sigma_r - \sigma_{\theta})^2 + (\tau_{r\theta})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Esta solución de Kirsch fue extendida para el caso bidimensional por Obert y Duval, en 1967, presentando las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \text{Cos}(2\theta)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \text{Cos}(2\theta) \quad (2.3)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \text{Sen}(2\theta)$$

2.1.1 Fuerzas de excavación

“Las fuerzas de excavación son un artificio matemático utilizado usualmente en programas de cálculo numérico para activar el proceso de cómputo al retirar una porción de la malla.” (Sánchez, 2014)

Estas fuerzas de excavación vienen definidas por la resultante de una presión geostática P_0 con una presión ficticia P_i (opuesta en dirección a la P_0).

Inicialmente esta presión P_i tiene la misma magnitud que la presión P_0 ; esto quiere decir que en el momento inicial las fuerzas de excavación son P_0 , y conforme se va relajando el terreno el valor de P_i llega a ser 0, o sea que las fuerzas de excavación llegan a ser P_0 . A este proceso de la disminución gradual de P_i le llama relajación de esfuerzos.

En la Figura 2. 2, se muestran las fuerzas de excavación en un modelo bidimensional.

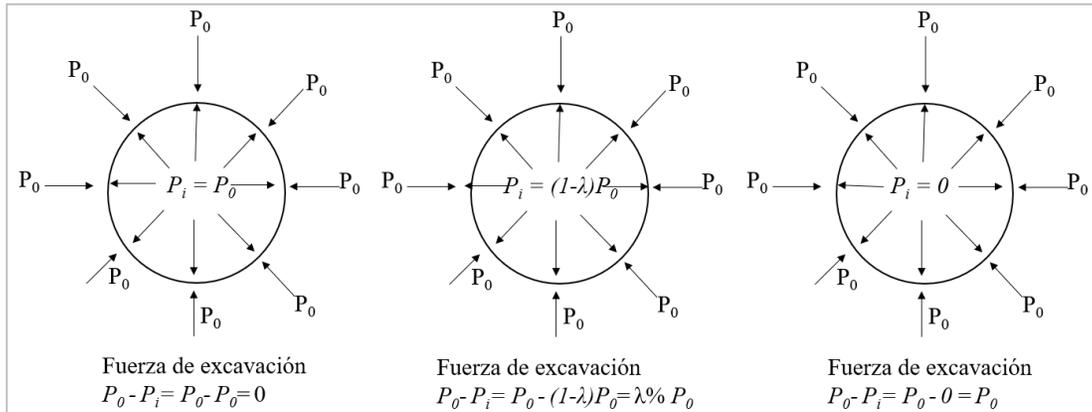


Figura 2. 2. Esquema de fuerzas de excavación en un modelo bidimensional.

2.1.2 Ejemplo

A partir del modelo de la Figura 2. 3 se determina el estado de esfuerzos principales mayores (σ_1) para un porcentaje de relajación de esfuerzos de 0, 30 y 100%.

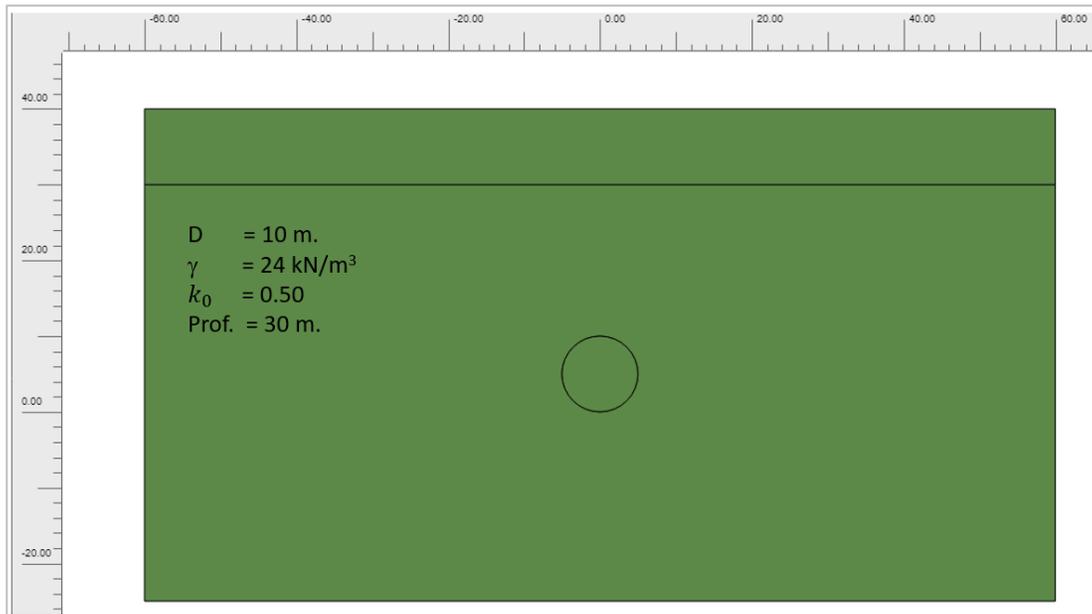


Figura 2. 3 Problema de un túnel circular en un medio continuo.

En la Figura 2. 4 se muestran los resultados del esfuerzo principal mayor σ_1 para una relajación de esfuerzos de 0%.

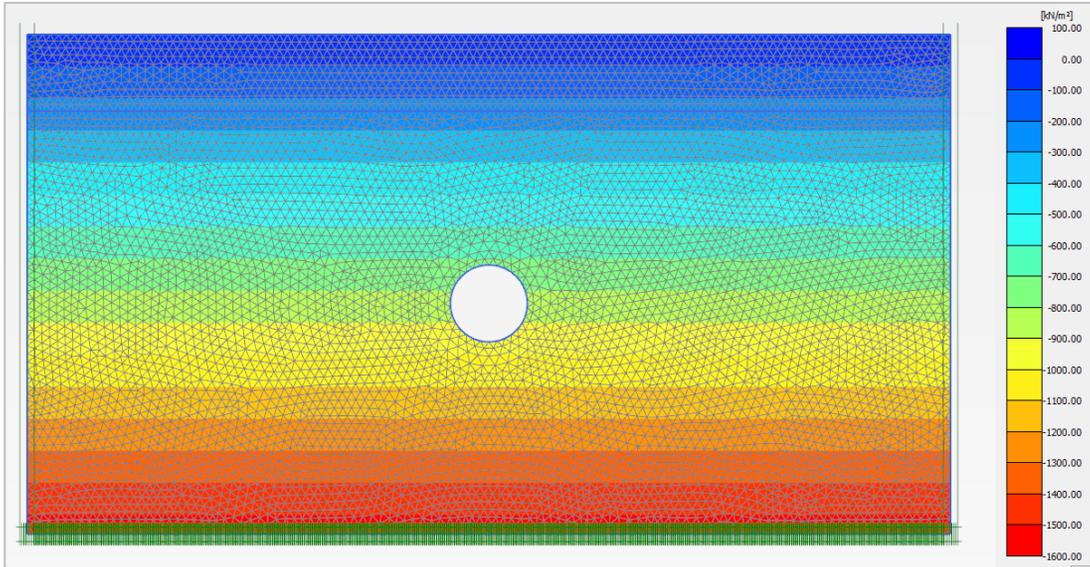


Figura 2. 4. Distribución del esfuerzo principal mayor σ_1 para una relajación de esfuerzos de 0%.

En la Figura 2. 5 se muestran los resultados del esfuerzo principal mayor σ_1 para una relajación de esfuerzos de 30%.

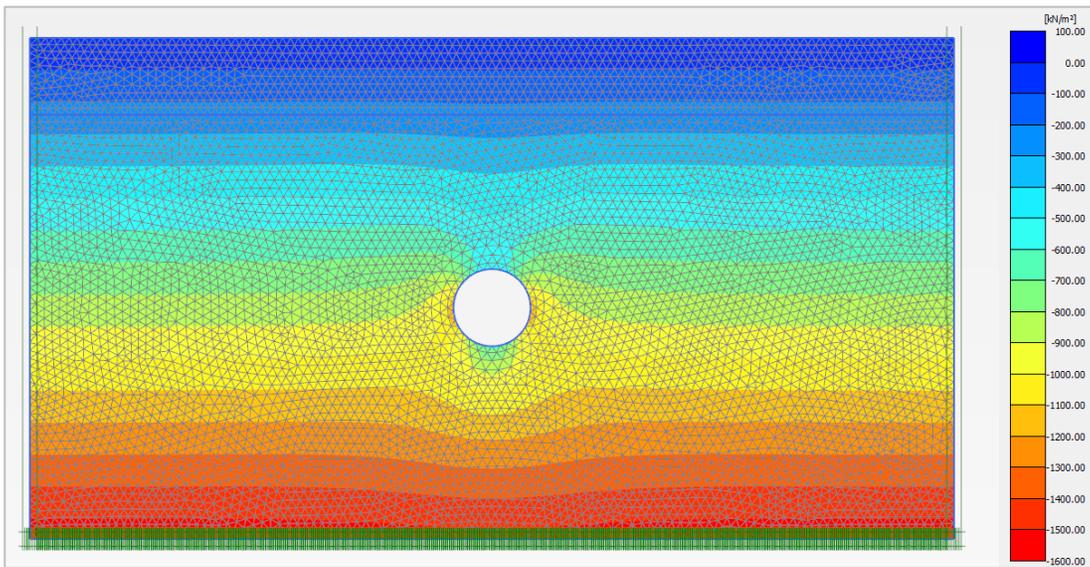


Figura 2. 5. Distribución del esfuerzo principal mayor σ_1 para una relajación de esfuerzos de 30%.

Finalmente, en la Figura 2. 6 se muestran los resultados del esfuerzo principal mayor σ_1 para una relajación de esfuerzos de 100%.

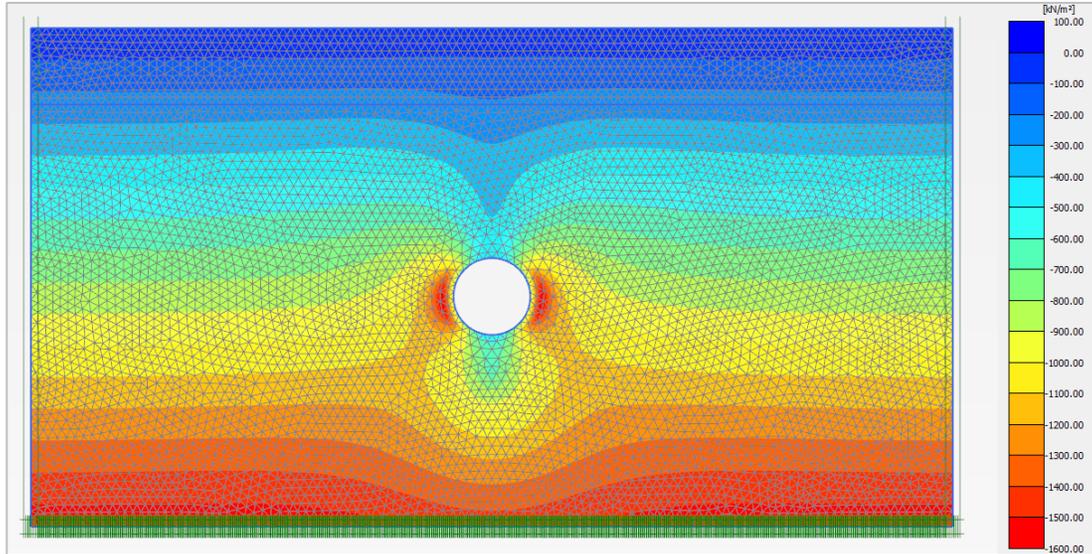


Figura 2. 6. Distribución del esfuerzo principal mayor σ_1 para una relajación de esfuerzos de 100%.

2.2 MÉTODO DE CONVERGENCIA - CONFINAMIENTO

El método de convergencia-confinamiento es un procedimiento de cálculo analítico que se utiliza para realizar un análisis simplificado de la interacción del suelo con el soporte en la excavación de un túnel. Permite la modelación de los soportes bajo las hipótesis siguientes:

- Túnel profundo (profundidad superior a 5 veces el diámetro del túnel, de tal manera que se desprecia la variación del esfuerzo geostático alrededor de la excavación).
- Sección circular.
- Longitud infinita.
- Material continuo, homogéneo e isótropo. ($k_0=1.00$)
- Problemas bidimensionales y con deformación plana.

Su aplicación se basa en la determinación de:

- La curva de convergencia (curva del terreno que sólo depende de las propiedades y del radio de excavación).
- La curva de confinamiento (caracteriza el comportamiento del soporte en función de su rigidez k).
- El desplazamiento radial en torno a la excavación (u_r) al momento de instalar el soporte.

La curva convergencia-confinamiento describe la relación de esfuerzo sobre el terreno y los desplazamientos radiales (u_i) en torno a la excavación. En la Figura 2. 7 se muestra la curva de convergencia-confinamiento propuesta por Pannet en 1995.

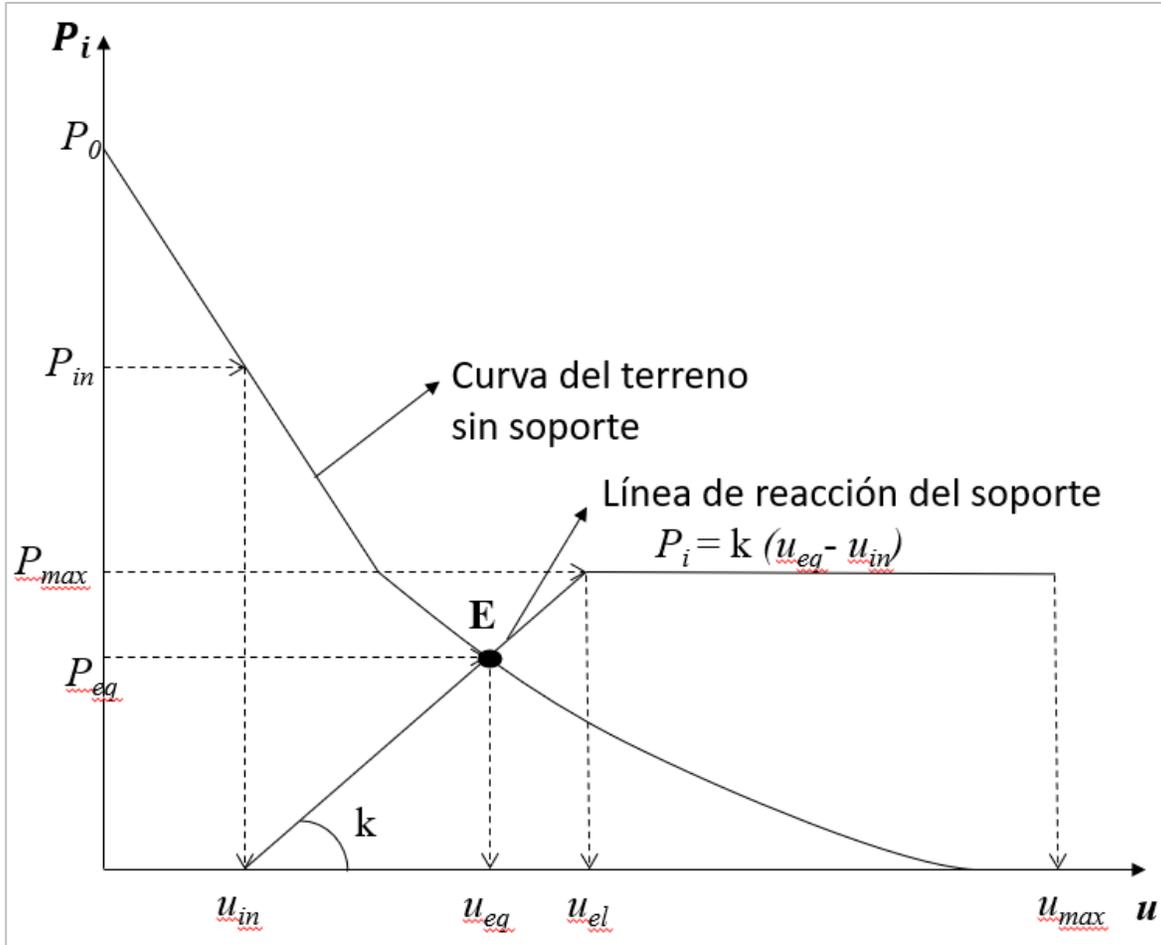


Figura 2. 7. Curva convergencia-confinamiento (Modificado de Pannet, 1995).

En la Figura 2. 7, P_{in} y u_{in} son la presión interna y el desplazamiento radial al momento de instalar el soporte; P_{eq} y u_{eq} son la presión sobre el soporte y el desplazamiento radial en la condición final de equilibrio final; P_{max} es la presión máxima que puede soportar el soporte dentro del rango elástico; u_{el} es el desplazamiento radial cuando los soportes alcanzan el límite elástico; u_{max} es el desplazamiento radial que provoca la rotura del soporte; k es el módulo de rigidez del soporte.

Se observa en la Figura 2. 7 que la intersección entre la curva del terreno y la línea de reacción del soporte (punto E) permite obtener la presión de equilibrio (P_{eq}) que actúa sobre el soporte y del desplazamiento radial de equilibrio (u_{eq}) de la excavación en la situación final de equilibrio.

2.3 EFECTO DEL FRENTE

El efecto frente indica que el terreno se deforma por delante del frente de excavación; es decir que antes de que el frente de excavación llegue a la sección de control se han producido deformaciones, fundamentalmente longitudinales, pero también de convergencias, tal como se puede ver en la Figura 2. 8.

El terreno por delante del frente ayuda al sostenimiento del túnel excavado, y este efecto desaparece según se aleja el frente de excavación.

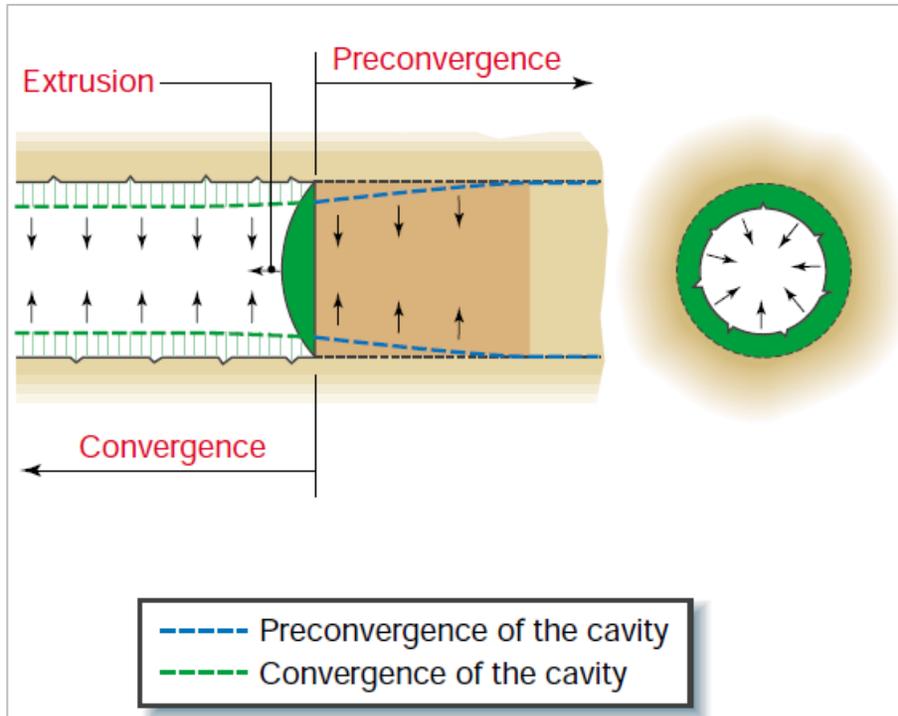


Figura 2. 8. Deformaciones que sufren los frentes de avance de excavación (Lunardi, 2000).

Con la ilustración que aparece en la Figura 2.9 el profesor Hoek (2007) explica cómo se va produciendo las deformaciones en el avance de un túnel.

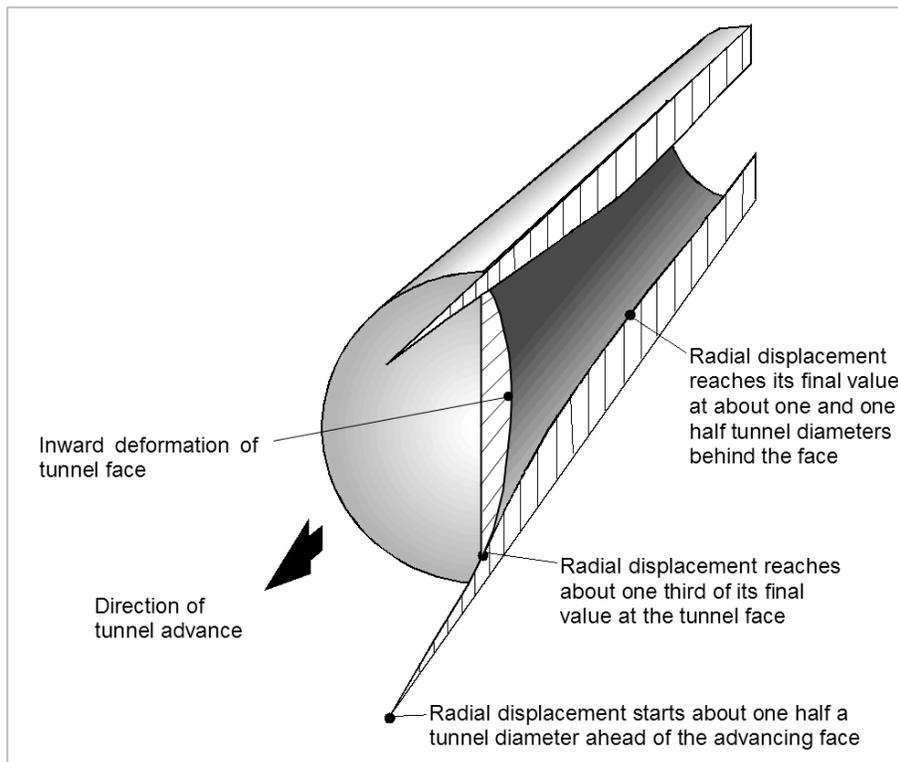


Figura 2. 9. Patrón de deformación en el macizo rocoso que rodea el avance de un túnel (Hoek, 2007).

El profesor Sánchez (2014) grafica una secuencia de excavación y la distribución de las deformaciones verticales producidas por el frente de excavación en una ilustración que se presenta en la Figura 2.10.

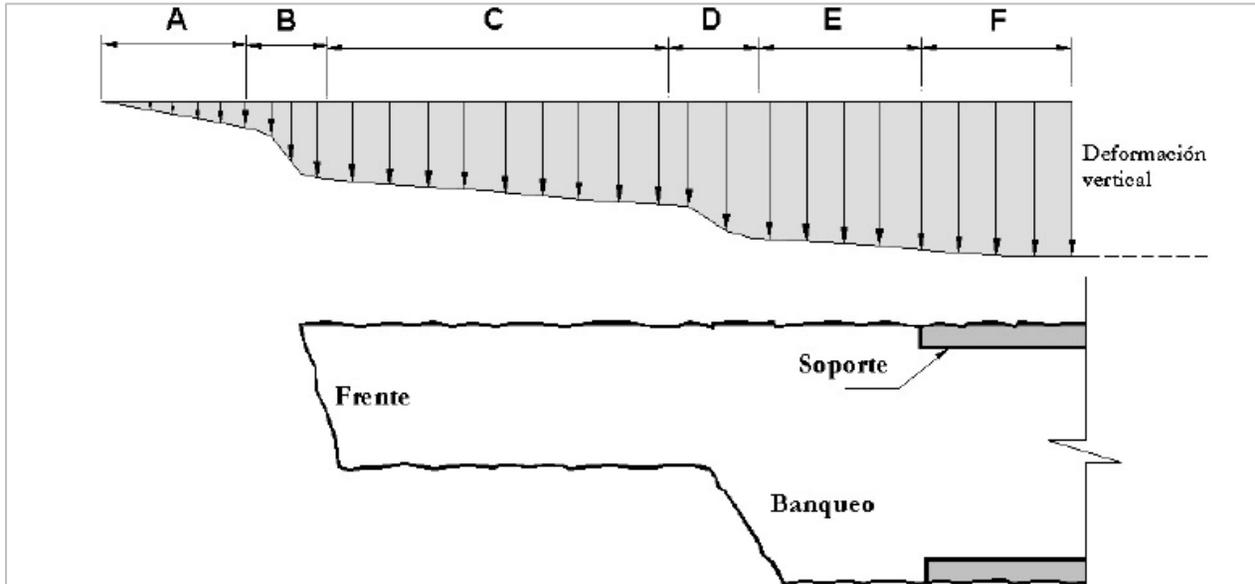


Figura 2. 10. Esquemas de deformaciones en el sentido longitudinal asociadas distintos eventos constructivos (Sánchez, 2014).

2.4 PERFIL DE DESPLAZAMIENTO LONGITUDINAL

Para determinar el momento adecuado de la instalación de un soporte, o cuando se requiere optimizar la selección del tipo de soporte para distintos propósitos de diseño, es necesario establecer el perfil de desplazamiento longitudinal del túnel.

Si se analiza una sección de control del túnel, una parte del desplazamiento radial tendrá lugar en el túnel antes de que el frente de excavación llegue a la sección de control. El desplazamiento radial continuará conforme el avance se aleja de la sección hasta que se estabiliza.

A la relación del perfil de desplazamiento radial versus la distancia al frente de excavación del túnel se le denomina “Perfil de desplazamiento longitudinal” (LPD).

En la Figura 2.11 se puede observar un ejemplo para un túnel específico de 5 m de radio.

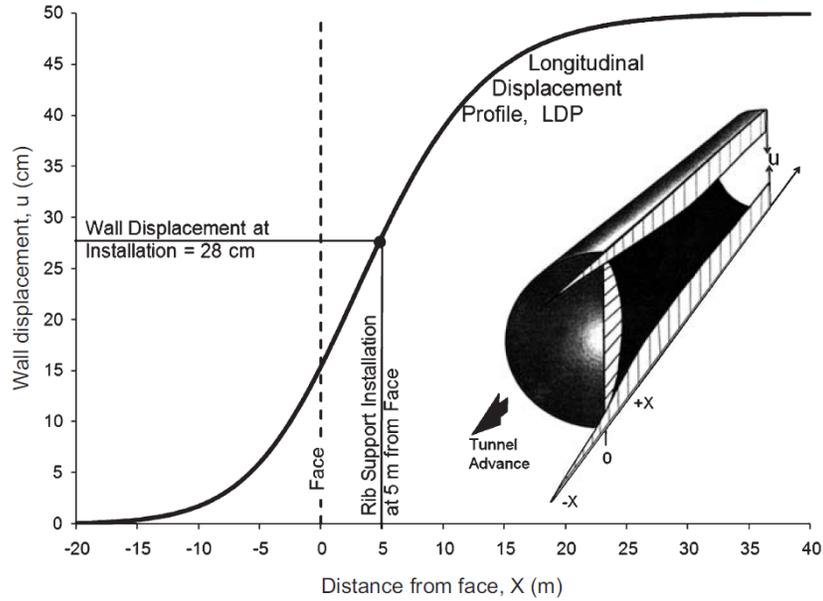


Figura 2. 11. Uso del perfil de desplazamiento longitudinal, que relaciona la ubicación de la instalación del soporte con el desplazamiento en las parades del túnel usando el método de convergencia-confinamiento. (Vlachopoulos, 2009).

Panet (1993, 1995), Panet y Guenot (1982), Chern et al. (1998) y otros han propuesto soluciones empíricas para los perfiles de desplazamiento longitudinal en base a modelos plásticos de deformación (correlacionando varios índices como la relación entre los esfuerzos in situ y la cohesión de la resistencia no drenada, entre otros). En la Figura 2. 12 se observa estas soluciones propuestas.

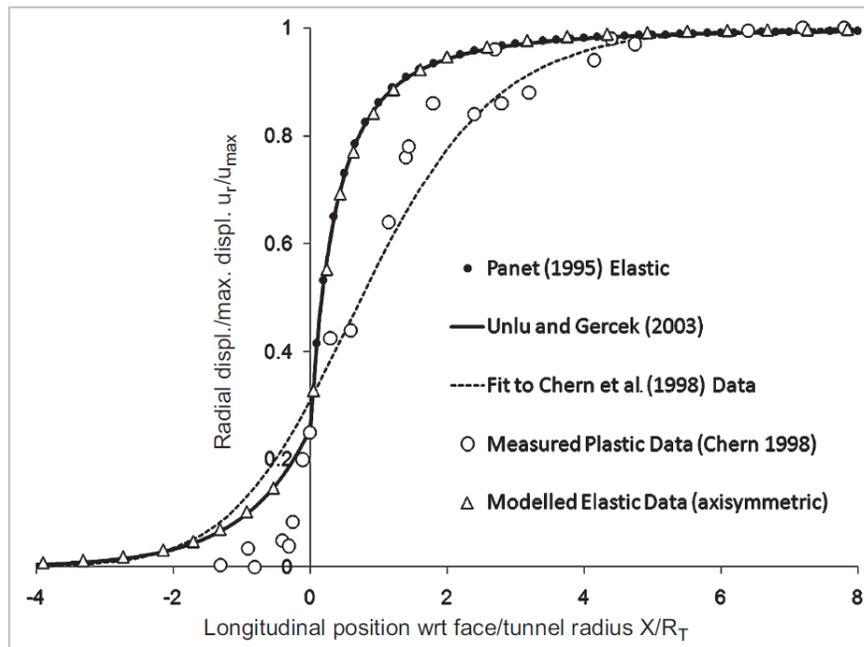


Figura 2. 12. Comparación del perfil de desplazamiento longitudinal reportado en la literatura (Chern et al., 1998).

Vlachopoulos y Diederichs (2009) realizaron unos nomogramas para poder obtener el desplazamiento radial (U). Para dicho cálculo se necesita el radio de la excavación (R_T), el radio plástico (R_p), el desplazamiento máximo (U_{max}) y la distancia a la que se colocará el sostenimiento (X). En la Figura 2. 13 se muestra el nomograma.

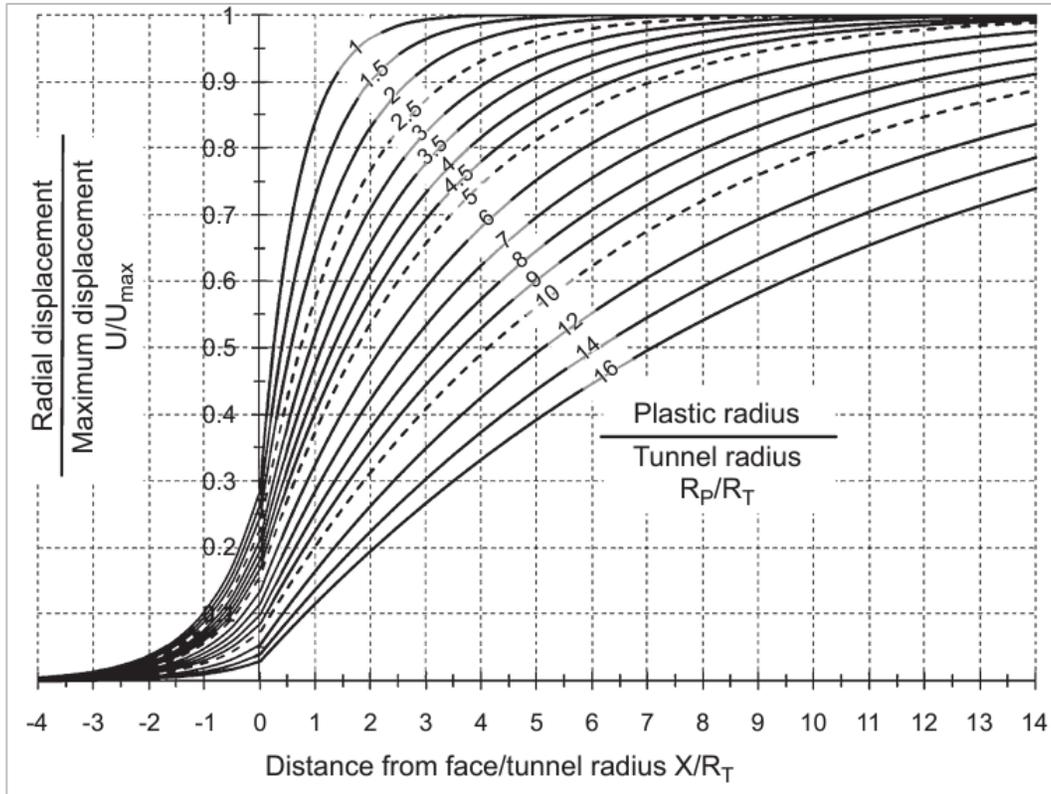


Figura 2. 13. Perfil del desplazamiento radial usado como alternativa a los métodos analíticos (Vlachopoulos y Diederichs, 2009).

2.5 MODELOS DE CÁLCULOS TENSO-DEFORMACIONALES

2.5.1 Introducción

Los cálculos tenso-deformacionales en excavaciones subterráneas y en geotecnia se realizan a través de los métodos numéricos, que pueden ser de 2 tipos: aquellos en los que se simula todo el material a analizar “método de dominio” y otros en los que se trabaja básicamente en los contornos “métodos de contorno”.

La ventaja principal de los métodos de dominio radica en su mayor flexibilidad para simular comportamientos no-lineales, fallas y discontinuidades, soportes, secuencia de excavación y propiedades heterogéneas. Los métodos incluidos son elementos finitos (MEF), diferencias finitas (MDF) y elementos distintos (MED). Y la combinación de estos MEF+ MDF, MEF+MED y MDF+MED.

Los métodos de contorno tienen la ventaja de la facilidad de simulación de dominios infinitos o semi-infinitos, así como el esfuerzo moderado, tanto en discretización como en tiempo de cálculo, para trabajar en 3D. Esto es el método de elementos de contorno (MEC).

Los cálculos tenso-deformaciones deben ceñirse a requisitos que establece la mecánica, como son las leyes constitutivas, equilibrios de fuerzas y compatibilidad de deformaciones. Igualmente deben cumplir condiciones de frontera (mecánica, hidráulicas, geométricas, entre otras).

La resolución de problemas geotécnicos tridimensionales por métodos numéricos a través de programas suele ser muy costosa, tanto en tiempo para el diseño como en potencia de cálculo. Además, se requiere que el usuario tenga una gran experiencia, y existe la dificultad de elegir las propiedades del material como el criterio de rotura. Sin embargo, su grado de aproximación a la realidad puede ser muy bueno y simulan adecuadamente el comportamiento de los soportes.

Los procesos de modelización generalmente siguen la siguiente secuencia:

- Construcción del modelo bidimensional o tridimensional, que incluye topografía, estratigrafía, geometría de las obras civiles o mineras.
- Definición de las condiciones de contorno: apoyos, cargas externas, nivel freático o condiciones de flujo de agua, etcétera.
- Discretización; subdivisión en MEF, MDF, MED y MEC.
- Asignación de propiedades a los materiales incluidos en el modelo.
- Simulación del estado inicial de esfuerzos. (Campos de esfuerzos iniciales, coeficiente de k_0)
- Simulación de los procesos de excavación y soporte.
- Procesamiento, análisis e interpretación de los resultados.

En la Figura 2.14 se presenta un modelo tridimensional para su discretización en elementos, y la Figura 2.15 muestra un modelo bidimensional para discretización que corresponde con una sección transversal de la figura anterior.

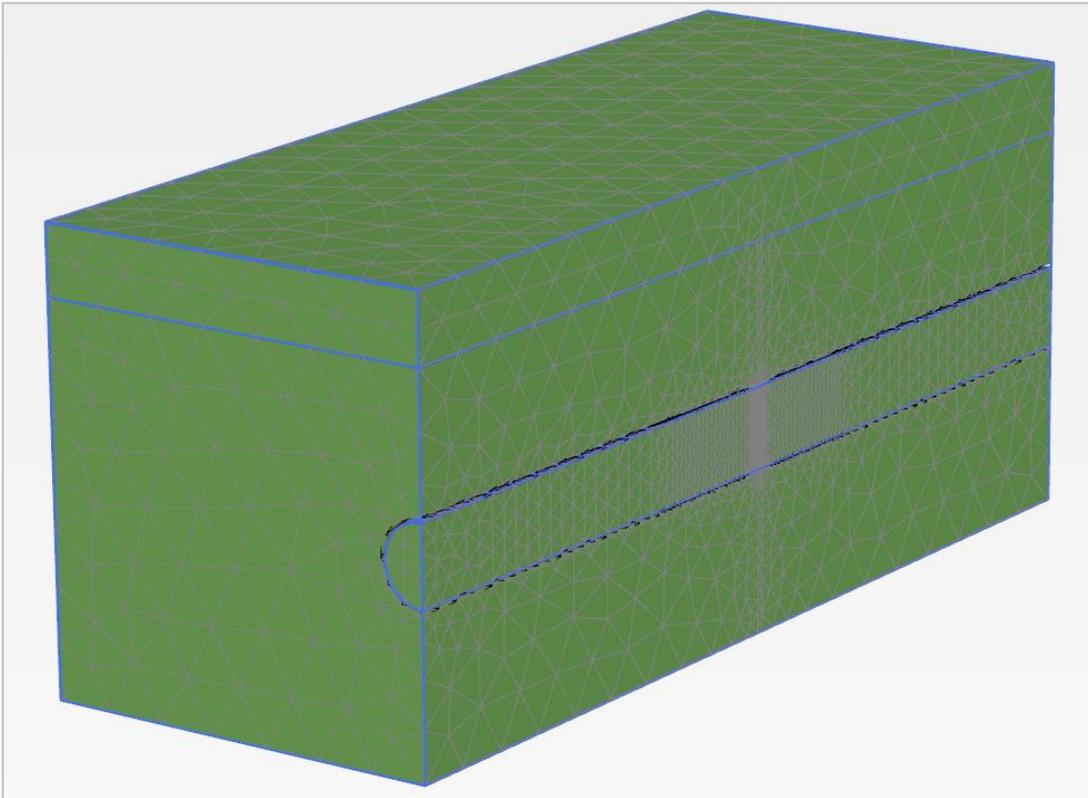


Figura 2.14. Modelo tridimensional para discretización.

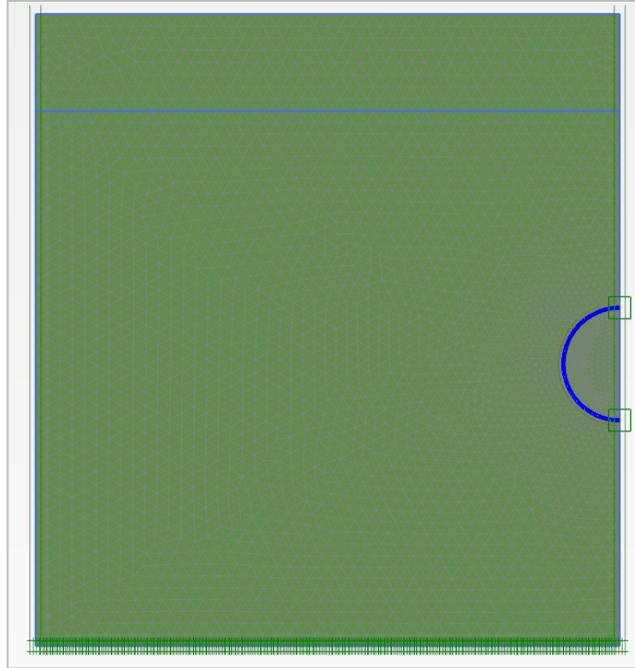


Figura 2.15. Modelos bidimensionales para discretización.

2.5.2 Simulación del estado inicial de esfuerzos

Todos los problemas de excavaciones subterráneas en ingeniería geotécnica requieren de la definición del estado inicial de esfuerzos. Este estado de esfuerzos iniciales suele estar influido por el peso del material y la génesis de la formación donde se encuentra la obra proyectada (profundidad, topografía, nivel freático entre otras).

Se puede calcular los esfuerzos iniciales a través del campo de esfuerzos iniciales (*field stress*), método del k_0 y método del peso propio (*gravity loading*).

2.5.2.1 Campo de esfuerzos iniciales (*field stress*)

El campo de esfuerzos iniciales (*field stress*) se aplica para definir un campo de esfuerzos constante en σ_1 , σ_2 y σ_3 antes de la excavación, es decir uno que no varíe con la posición o la profundidad.

Se utiliza generalmente en excavaciones que son relativamente profundas y en modelos teóricos.

2.5.2.2 Método k_0

El método k_0 es adecuado en casos donde la superficie de la obra proyectada es horizontal o subhorizontal, así como también los estratos que están debajo de la superficie y el nivel freático. El equilibrio se satisface sistemáticamente, esto quiere decir que el esfuerzo vertical es igual al peso del material por la profundidad ($\sigma_v = \gamma z$), mientras que para el esfuerzo horizontal se hace lo mismo, pero multiplicándolo por el valor de k_0 ($\sigma_h = k_0 \gamma z$).

2.5.2.3 Método del peso propio (*gravity loading*)

El método del peso propio es un tipo cálculo plástico en donde los esfuerzos iniciales se generan en base al peso volumétrico del terreno.

Cuando se utiliza un modelo elastoplástico perfecto, como el modelo Mohr-Coulomb, la relación del esfuerzo horizontal con el esfuerzo vertical (k_0) depende de los valores asumidos por el coeficiente de Poisson (ν).

Es importante elegir valores de coeficiente de Poisson (ν) que den valores realistas de coeficiente de k_0 . El coeficiente de k_0 viene definida por la teoría de la elasticidad:

$$k_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \tag{2.4}$$

Según la teoría elástica, no se permite el uso de coeficiente de Poisson (ν) mayor a 0.5; por lo que coeficiente máximo de k_0 es 1.00 (reemplazando $\nu = 0.50$ en la ecuación 2.4).

2.5.3 Método de relajación de esfuerzos

El método más utilizado para simular una excavación en un programa de cómputo bidimensional es el “Método de relajación de esfuerzos”, que consiste en aplicar una relajación de esfuerzos (λ) a la presión interna de la excavación (P_i), como se observa en Figura 2. 16, antes de instalar el soporte, para luego instalar el soporte y dejar relajar los esfuerzos al 100%.

Una de las fórmulas más conocidas para calcular la relajación de esfuerzos es la propuesta por Panet en 1995:

$$P_i = (1 - \lambda)P_0 \tag{2.5}$$

$$\lambda = \lambda_0 + (1 - \lambda_0)[1 - e^{\left(\frac{-d}{0.7r_i}\right)}]$$

Donde P_i es la presión interna ficticia de la excavación; P_0 corresponde con el estado de esfuerzos iniciales sobre la línea de excavación (condición geoestática); λ_0 aproximadamente es $1/3$ ($\lambda_0 \approx \frac{1}{3}$); d es la distancia desde donde termina el sostenimiento hasta el frente de excavación y r_i es el radio de la excavación.

Sin embargo, la fórmula de Panet (1995) es un método analítico y como tal tiene las limitaciones que se describen en el capítulo 3.2. Para conseguir valores realistas de relajaciones de esfuerzos se requiere hacer una calibración a través de modelos tridimensionales, o en su defecto, realizar una campaña de instrumentación cuando el proyecto se está ejecutando.

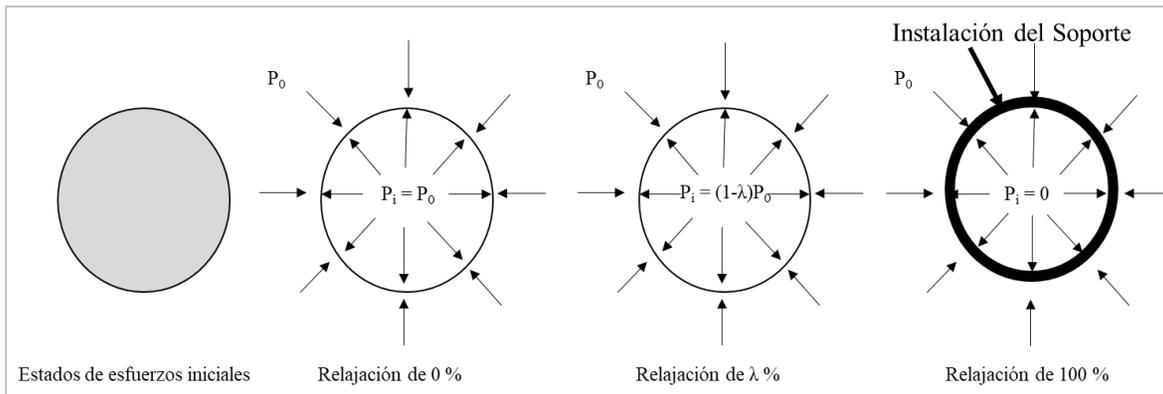


Figura 2. 16. Esquema de relajación de esfuerzos en un modelo bidimensional.

2.5.4 Comportamiento tridimensional real de excavaciones subterráneas

[El contenido de esta parte se basa en la obra inédita *Ingeniería de túneles*, del M.I. Fermín Antonio Sánchez Reyes.]

La solidez conceptual del método de convergencia-confinamiento ha permitido abordar los problemas básicos originados por las excavaciones subterráneas. Sin embargo, el método tiene también limitaciones, como se puede observar en el capítulo 3.2 (excavación circular, $k_0=1.0$, entre otras); además, se presentan otros fenómenos de naturaleza tridimensional que resultan muy difíciles de simular en modelos bidimensionales y que generalmente se alejan considerablemente de la realidad, a menos que se tenga un modelo tridimensional de referencia.

Cada vez que se realiza un avance de excavación en obras subterráneas se producen cambios en las condiciones de frontera del terreno, que generan redistribución de los esfuerzos (véase la Figura 2. 17) y un campo de deformaciones (véase la Figura 2. 8) en la zona de influencia de la excavación. Cuando se está a una cierta distancia considerable del frente de excavación (unas 5 veces el diámetro de la excavación) los estados de esfuerzos corresponden a la condición geostática inicial (véase la Figura 2. 17).

Como resultado del avance de la excavación, los esfuerzos verticales sobre una línea que pasa por la bóveda del túnel aumentan significativamente unos metros por delante de la excavación, y conforme se aleja del frente van retomando la condición dada por $\sigma_v = \gamma z$ (condición geostática inicial), como se puede apreciar en la Figura 2. 18.

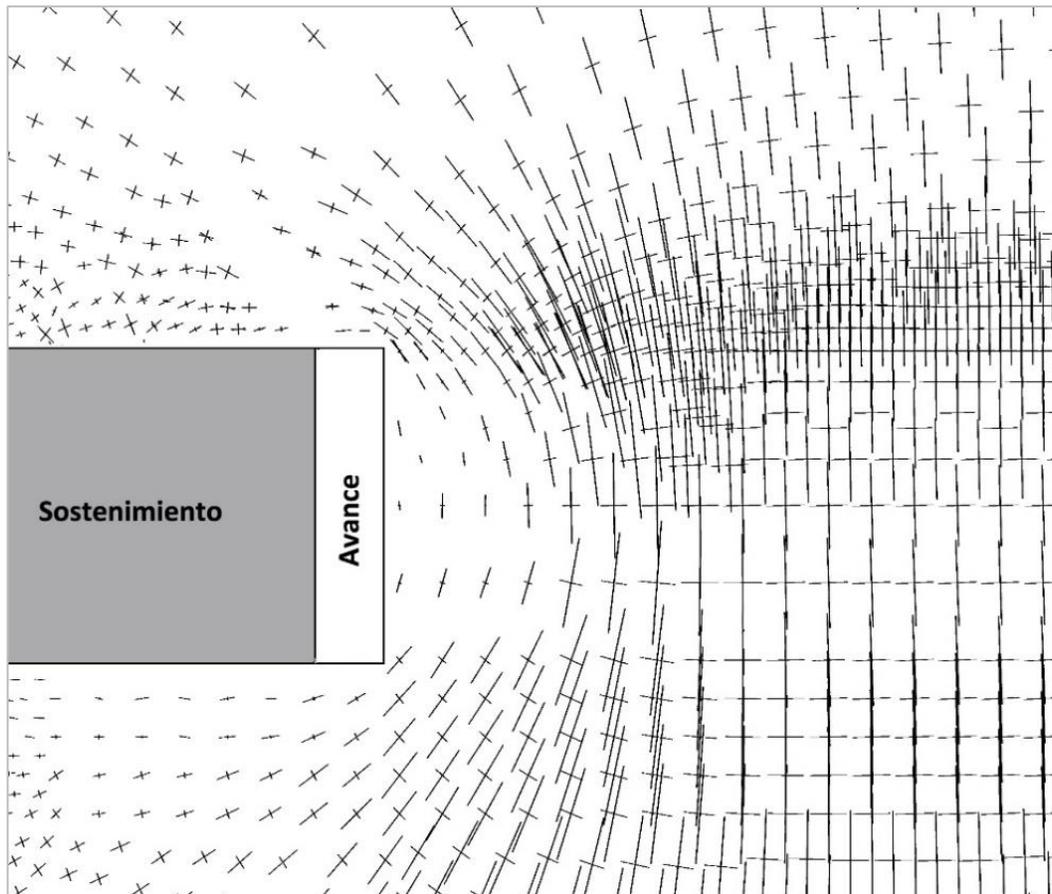


Figura 2. 17. Distribución de esfuerzos principales en una sección longitudinal en el plano de la clave de la excavación (Sánchez, 2014).

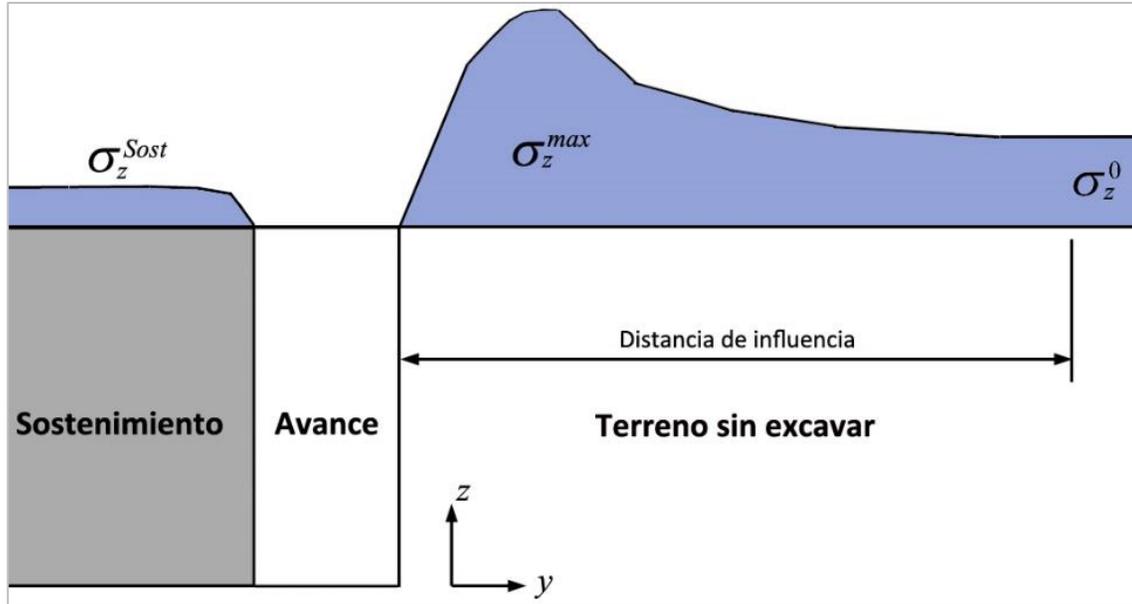


Figura 2. 18. Esquema de los esfuerzos verticales en una línea paralela al avance y a la altura de la clave (Sánchez, 2014).

En la Figura 2. 18 se observa que la distribución de esfuerzos no va acorde a lo que establece el método de convergencia-confinamiento; es decir, que el máximo valor del esfuerzo radial no corresponde al geoestático ($\frac{P_i}{P_0} > 1.00$) antes de que el frente de excavación llegue a la sección de control.

En la Figura 2. 19 se presenta la distribución de esfuerzos verticales y el aumento en la magnitud de estos esfuerzos por delante del frente de excavación en un modelo tridimensional. Como puede verse, los esfuerzos verticales son superiores al esfuerzo geoestático ($\frac{P_i}{P_0} > 1.00$).

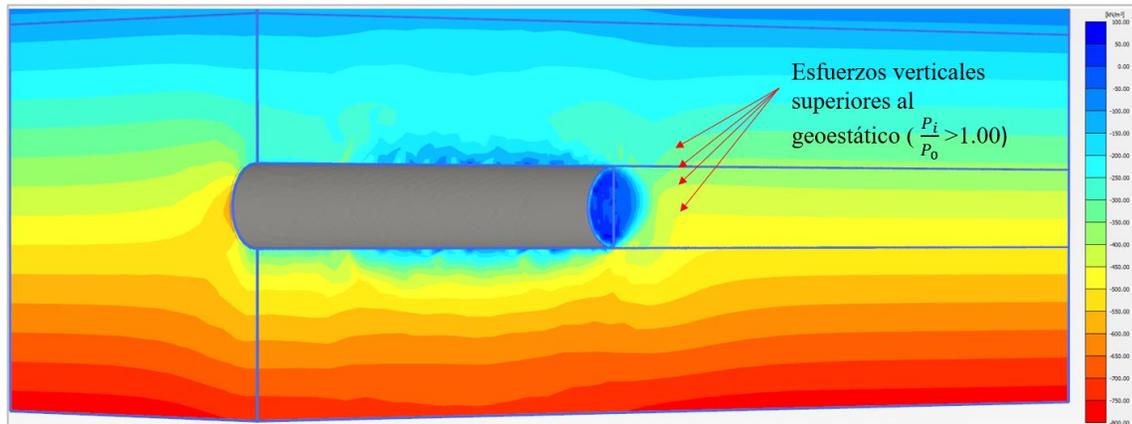


Figura 2. 19. Distribución de esfuerzos verticales durante el avance de excavación.

3 CURVAS CARACTERÍSTICAS OBTENIDAS CON MÉTODOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se compara, a través de casos de estudio, los métodos analíticos y numéricos para obtener la curva característica. Para este propósito es necesario, primero, repasar las limitaciones de los métodos analíticos.

3.2 LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS ANALÍTICOS

En el capítulo 2.2 se presentó una amplia descripción del método de convergencia-confinamiento y se hizo especial énfasis en las limitaciones que tiene al tratarse de un método de resolución analítico; entre ellas, las más importantes son:

- Únicamente pueden simularse túneles circulares o cavidades esféricas.
- Para túneles circulares únicamente se puede trabajar en 2 dimensiones (estado plano de esfuerzos o de deformaciones).
- Se parte de un estado de esfuerzos homogéneo y constante ($\sigma_v = \sigma_h = P_0 = \text{constante}$ para todo el ámbito del túnel, $k_0=1.00$). Por esta razón resultan poco aplicables a túneles someros.
- No es posible simular la excavación por etapas.
- No es posible considerar distintos materiales en el ámbito del túnel.
- No es posible considerar la resistencia a tensión de los materiales.
- No puede tenerse en cuenta el flujo de agua hacia el interior del túnel (cambios en estados de esfuerzos efectivos).
- Los soportes únicamente pueden ser anillos cerrados cuando se trata de marcos metálicos y concreto, radiales abarcando toda la circunferencia en el caso de las anclas.
- El relajamiento del terreno se simula mediante una presión radial ficticia y homogénea en toda la periferia del túnel, la misma que se va reduciendo gradualmente.
- Para calcular las deformaciones plásticas es necesario establecer hipótesis simplificadoras que normalmente no se cumplen en un proceso elastoplástico completo (se impone un único estado de equilibrio mientras que en un cálculo numérico dicho equilibrio se determina en muchos y pequeños incrementos de carga). (Sánchez, 2014)

Por el contrario, cuando los análisis se realizan mediante técnicas numéricas, es posible obtener resultados mucho más realistas, especialmente en el caso de túneles excavados secuencialmente, esto es con distintas fases de excavación-soporte y en secciones no circulares.). (Sánchez, 2014)

3.3 CASO DE ESTUDIO

Se presenta un caso con las siguientes condiciones: túnel circular de 10 m de diámetro, a una profundidad de 150 m., en un macizo rocoso con un peso específico de 27 kN/m^3 ($P_0=4\ 050 \text{ kN/m}^2 = \text{constante}$), con módulo de Young de $E_m=446 \text{ MPa}$, módulo de Poisson de $\nu = 0.3$, cohesión máxima de $c_p=1\ 000 \text{ kN/m}^2$, un ángulo de fricción pico de $\phi_p=37^\circ$ y un ángulo de dilatancia de $\psi=6^\circ$. Se varía el k_0 para valores de 0.50 y 1.00. Se aplica el criterio de falla de Mohr–Coulomb.

3.3.1 Caso I

Se compara la curva característica obtenida de forma analítica para un campo de esfuerzos iniciales de 4 050 kN/m² mediante el programa RocSupport v.5 frente la obtenida de forma numérica mediante el programa RS2 v.9 para un caso k_0 1.00 a una profundidad de 150 m. que simula el mismo campo de esfuerzos iniciales, ambos programas de la familia Rocscience.

3.3.1.1 Campo de esfuerzos iniciales 4050 kN/m² (equivalente a 150 m. de profundidad) por el método de la curva característica.

En la Figura 3. 1 se muestra la curva característica obtenida de forma analítica con el software RocSupport, la cual presenta un desplazamiento máximo de 68.05 mm.

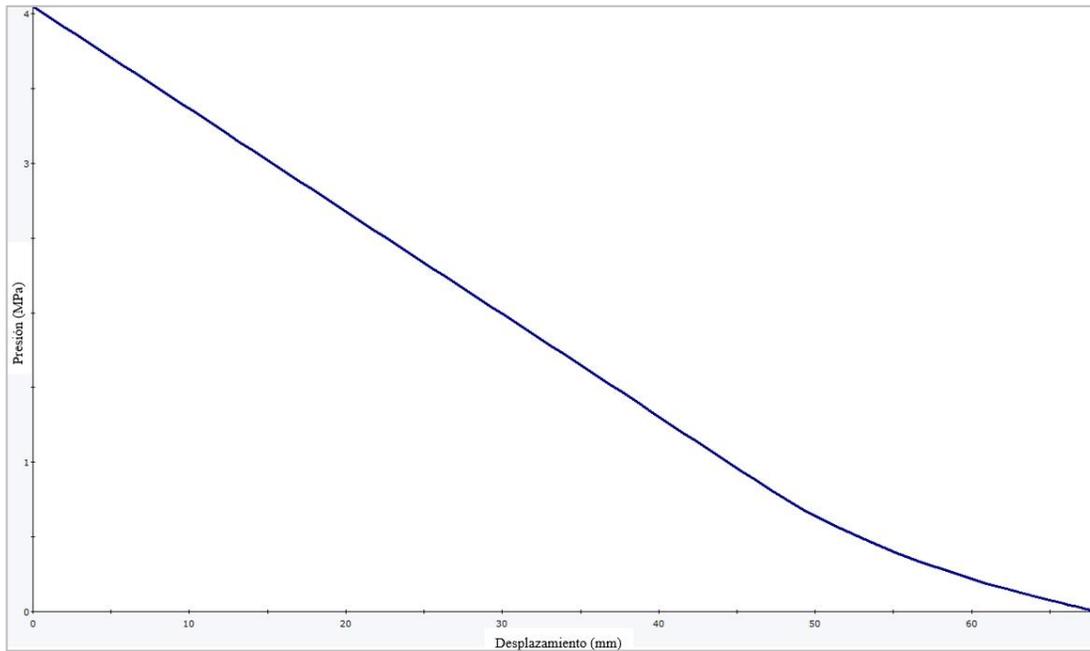


Figura 3. 1. Curva característica obtenida de forma analítica.

En la Figura 3. 2 se puede ver que el radio plástico que se obtiene es de 5.86 m mediante el software RocSupport.

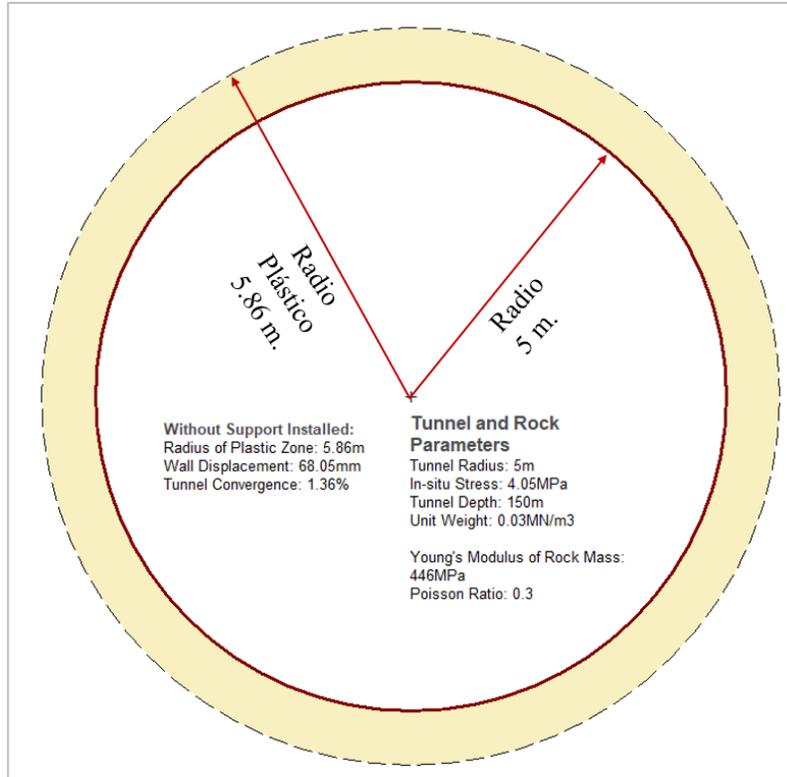


Figura 3. 2. Radio plástico del túnel obtenida de forma analítica.

3.3.1.2 Caso $k_0=1.00$ a una profundidad de 150 m por MEF.

En la Figura 3. 3 se observa los desplazamientos que ocurren en el túnel para distintas etapas de relajación de esfuerzos mediante métodos numéricos a través del software RS₂ que servirá para construir la curva característica por métodos numéricos.

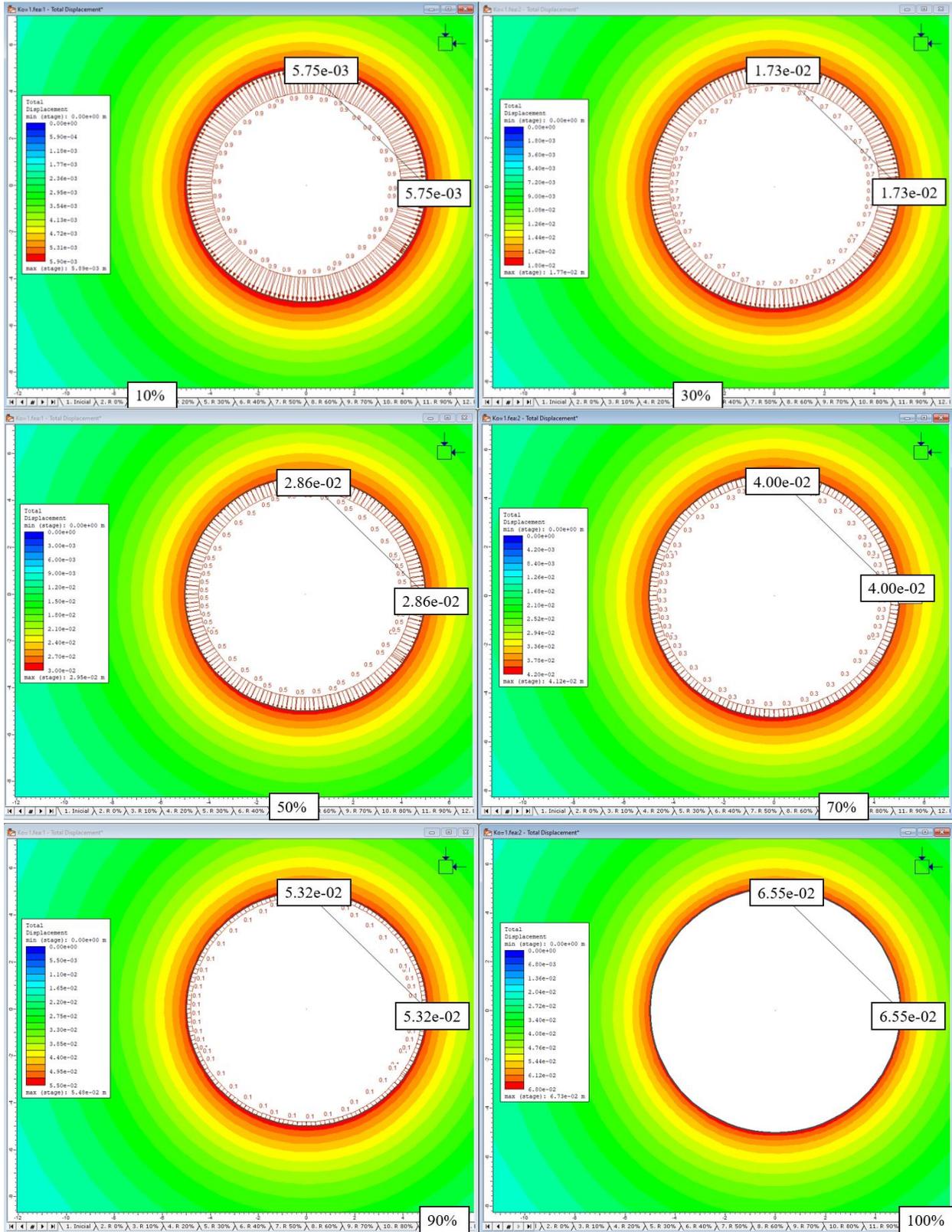


Figura 3. 3. Desplazamientos debido a la excavación del túnel en distintas etapas de relajación de esfuerzos.

Con los resultados obtenidos de la Figura 3. 3 se realiza la curva característica mediante métodos numéricos y se compara con la curva característica obtenida mediante métodos analíticos.

La Figura 3. 4 compara ambas curvas características. En la cual se observa que las curvas son muy similares, con la pequeña diferencia que al 100% de relajación, la deformación que se obtiene en métodos analíticos es 68.05 mm, mientras que en métodos numéricos es 65.50 mm.

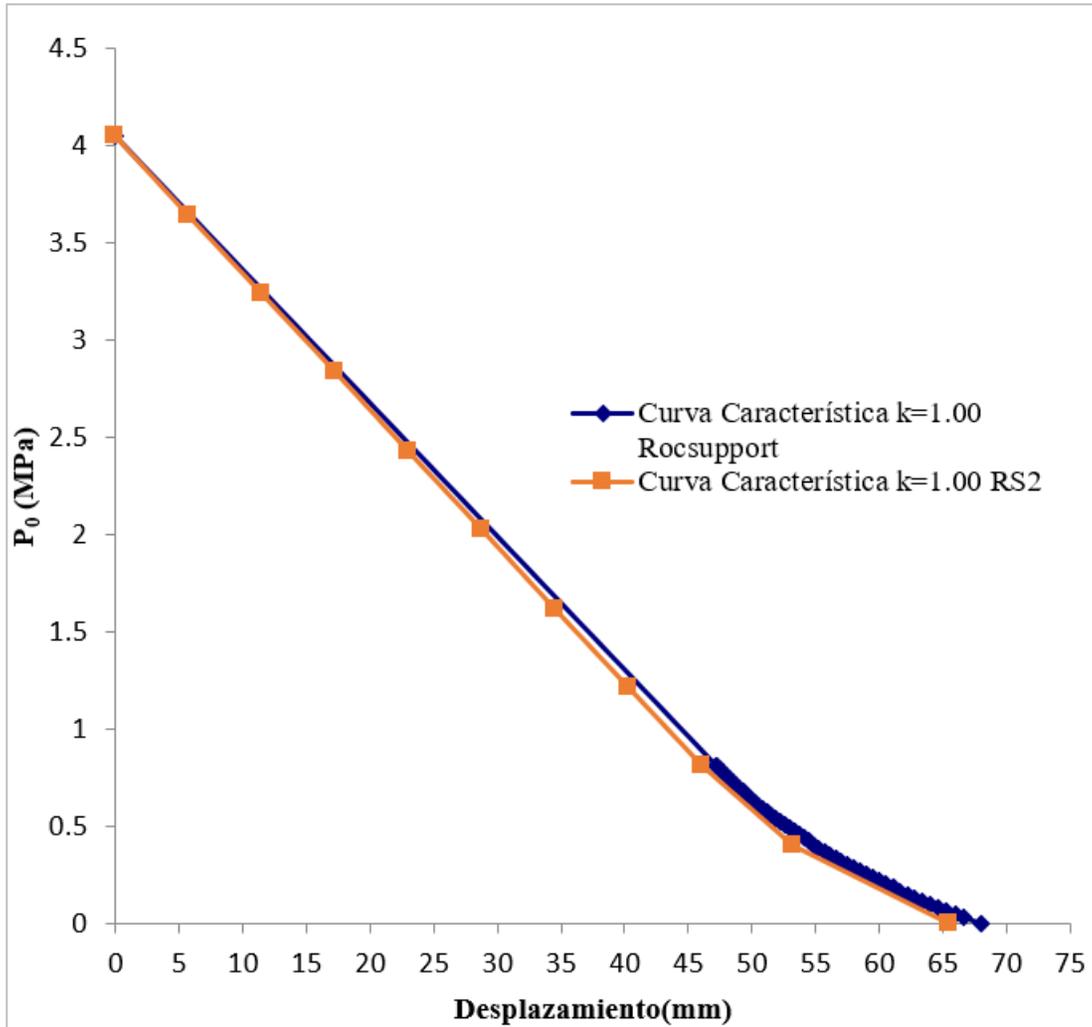


Figura 3. 4 Curvas características obtenidas con método analítico (RocSupport) y método numérico (RS₂).

En la Figura 3. 5 se observa que el radio plástico obtenido por métodos numéricos es 5.84 m que es muy similar al obtenido por métodos analíticos que es 5.86 m (Ver Figura 3. 2).

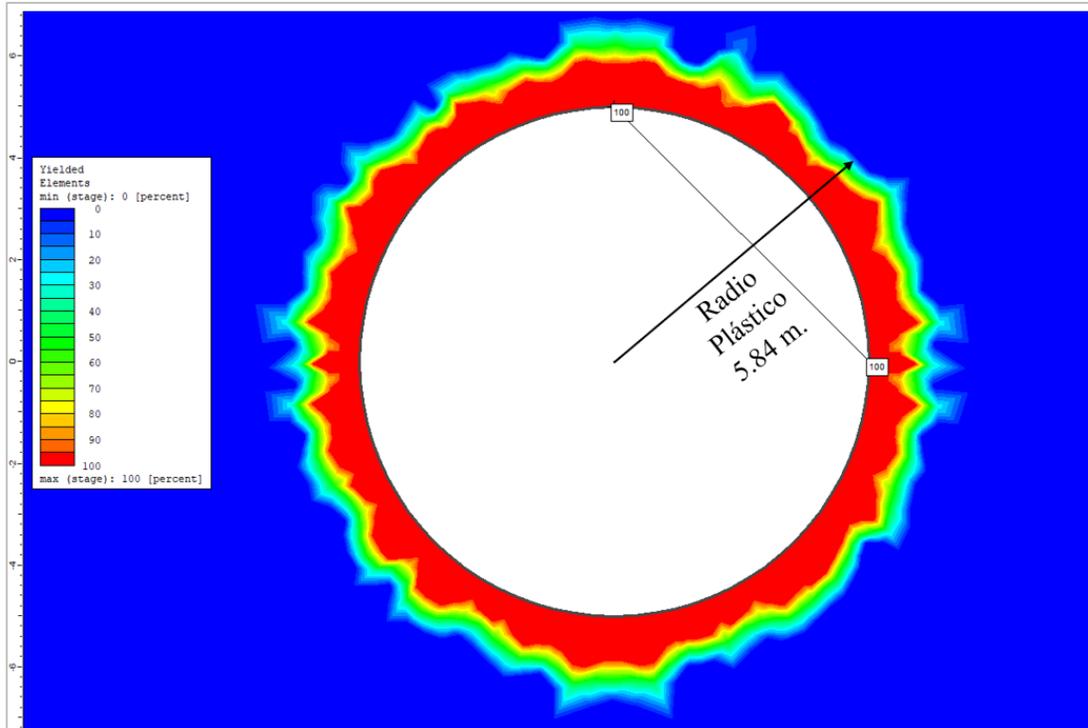


Figura 3.5. Radio plástico del túnel obtenidos por métodos numéricos.

3.3.2 Caso II

En este caso, se analiza un de estado de esfuerzos no homogéneos. Por lo que no es posible analizar por métodos analíticos (RocSupport) ya que una limitante del método es que sea isótropo y homogéneo. Por lo tanto, solo se analiza por métodos numéricos.

3.3.2.1 Caso $k_0=0.50$ a una profundidad de 150 m.

Se determinan los desplazamientos ocurridos en la bóveda y en el hastial del túnel para distintas etapas de relajación de esfuerzos, que permitirá realizar la curva característica por métodos numéricos.

En la Figura 3.6 se observa que los desplazamientos en la bóveda y en el hastial son diferentes y que varían de acuerdo a la relajación de esfuerzos, los cuáles han sido obtenidos mediante el software RS₂. En la figura Figura 3.6 se muestran los desplazamientos para la relajación al 10, 30, 50, 70, 90 y 100 %.

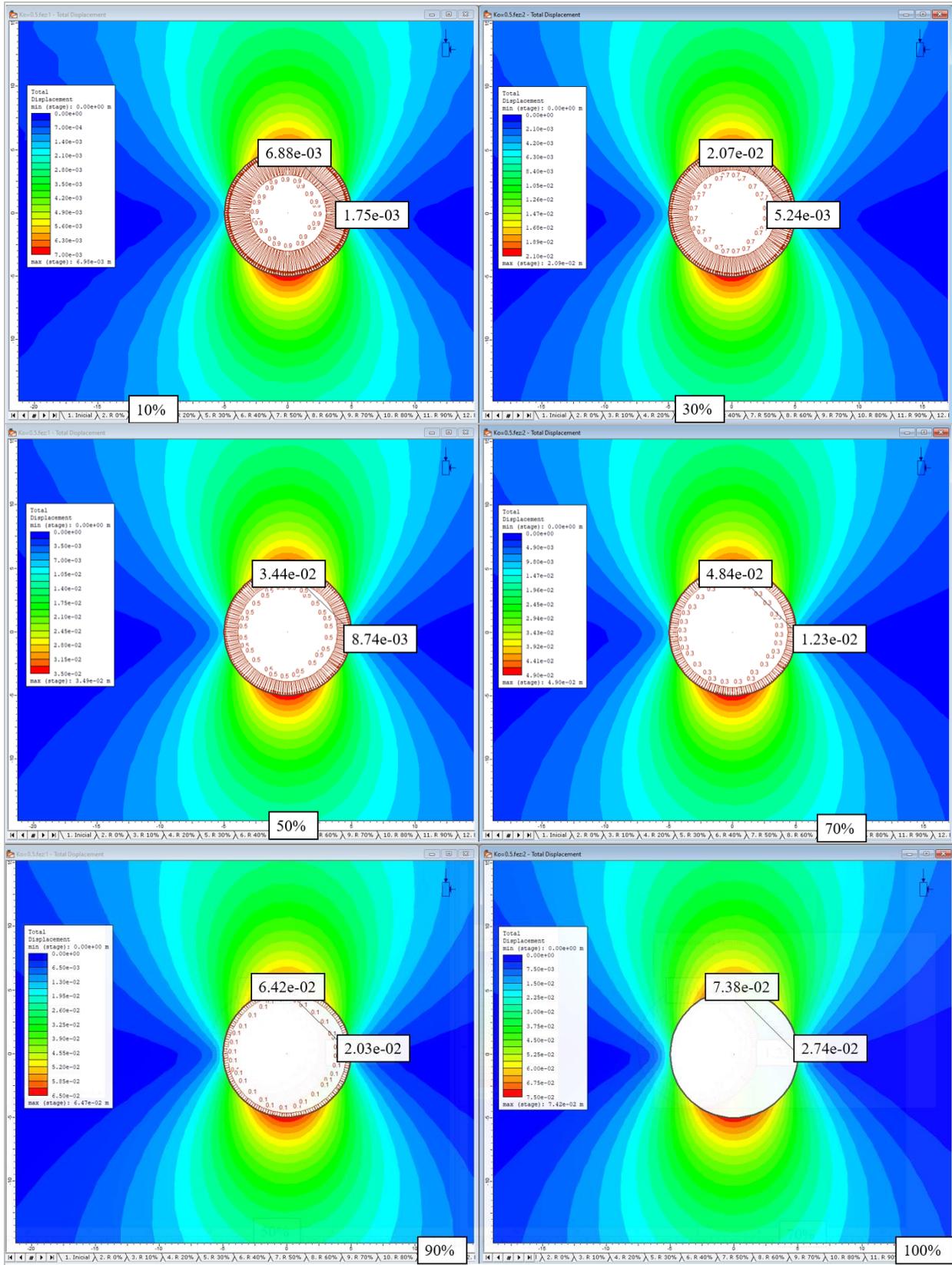


Figura 3. 6. Desplazamientos en la bóveda y hastial del túnel para diferentes etapas de relajación con k_0 0.50.

En la Figura 3. 7 se observa la curva característica donde los desplazamientos en la bóveda y en el hastial son diferentes para las distintas etapas de relajación de esfuerzos.

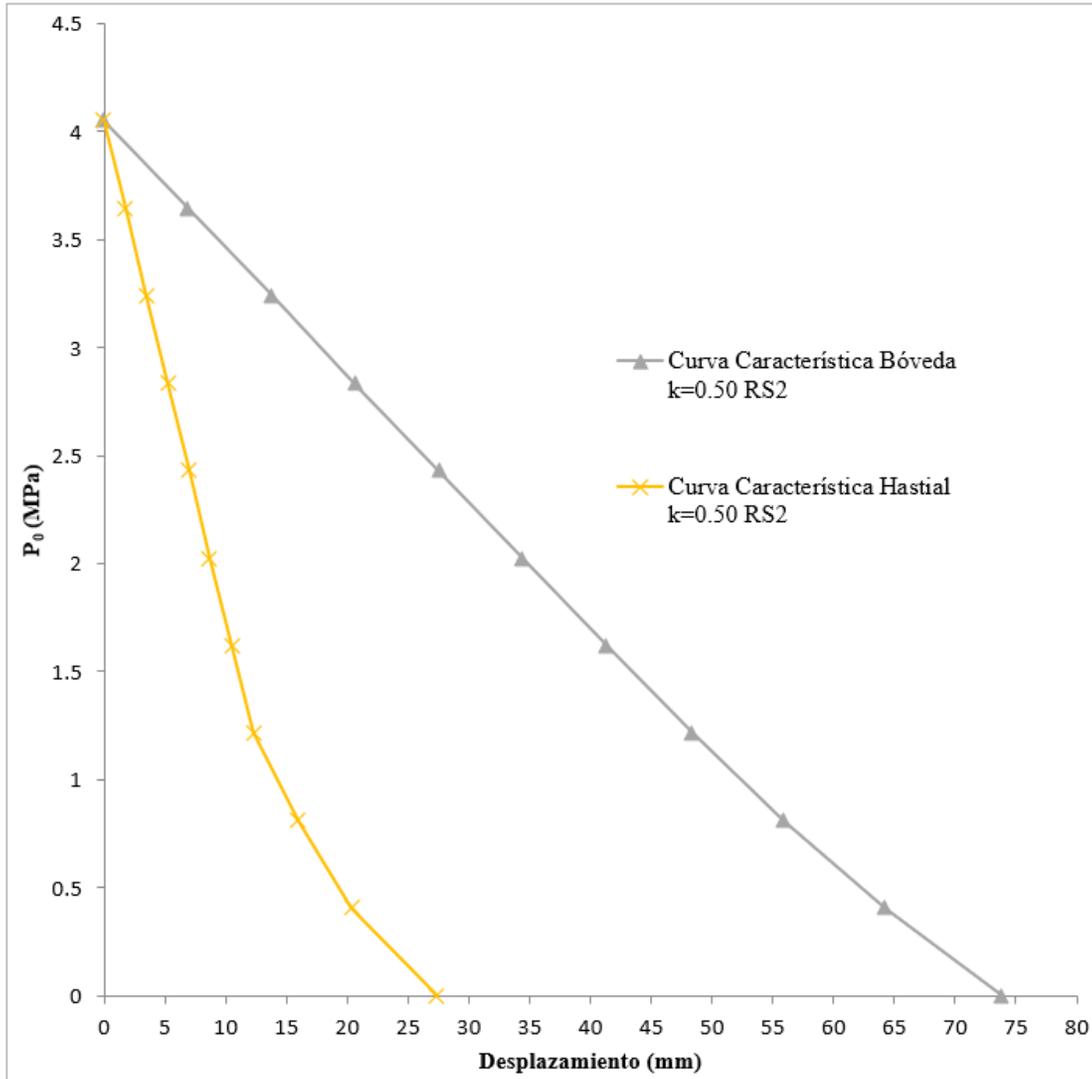


Figura 3. 7. Desplazamientos en la bóveda y hastial del túnel para distintas etapas de relajación

Además, se observa en la Figura 3. 8 que la plasticidad ocurre en la zona de los hastiales conforme va aumentando la relajación de esfuerzos. Se visualiza que la plasticidad empieza aproximadamente al 60% de relajación de esfuerzos y va aumentando hasta llegar al 100% de relajación.

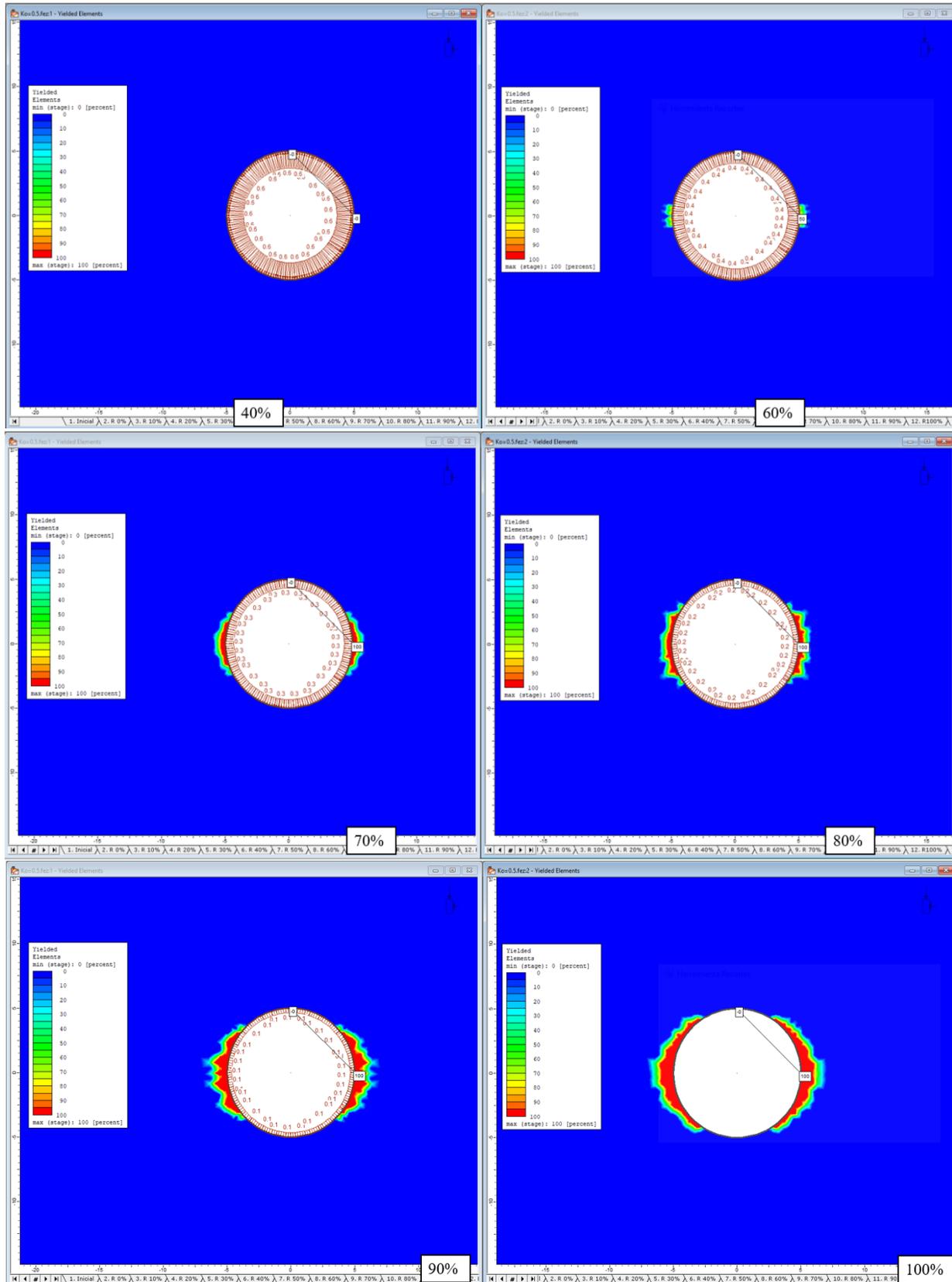


Figura 3. 8. Zona de plasticidad en los hastiales conforme avanza la relajación de esfuerzos.

3.3.3 Conclusiones

- Del caso de estudio I (Campo de esfuerzos iniciales de 4 050 kN/m² y $k_0 = 1.00$ a 150 m.) se concluyó que las curvas características obtenidas por métodos analíticos y numéricos para túneles circulares, con un estado de esfuerzo homogéneo y constante son muy similares, como se visualizó en la Figura 3. 4, donde los desplazamientos y la plasticidad son uniformes alrededor de toda la excavación.
- En el segundo caso de estudio ($k_0 = 0.50$ a 150m.) no puede ser analizado por métodos analíticos, debido a que únicamente permiten estados de esfuerzos homogéneos. La curva característica se determinó por métodos numéricos, en la cual se observa que los desplazamientos son diferentes tanto en la bóveda como en el hastial (ver Figura 3. 8) y la plasticidad solo ocurre en los hastiales conforme aumenta la relajación de esfuerzos. Por lo cual, es importante determinar la curva características por métodos numéricos cuando se presente valores de k_0 diferentes de 1.00.
- De ambos casos de estudios, como se observa en la Figura 3. 9 que los desplazamientos son mayores en la zona de la bóveda que en los hastiales para un k_0 0.50. obtenidos mediante métodos numéricos. Mientras, que para campo de esfuerzos iniciales de 4 050 kN/m² y para un k_0 1.00 a 150 m. los desplazamientos en la bóveda y en el hastial son similares al ser obtenidas por métodos analíticos y numéricos.

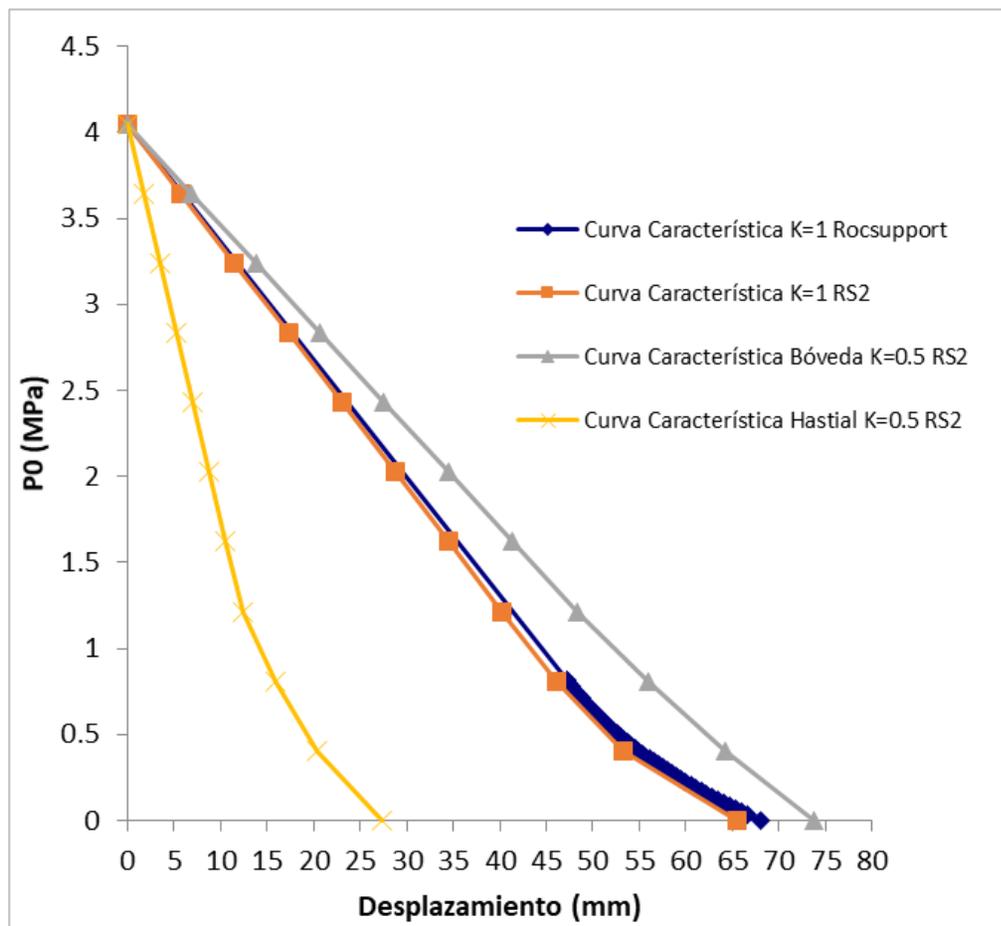


Figura 3. 9. Curvas características de los casos estudiados.

4 ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL DE LOS MODELOS DE INVESTIGACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los análisis tridimensionales para los modelos de túnel circular y de sección tipo carretera de esta investigación, para los cuales, en una primera serie de cálculos, se variaron los valores del campo de esfuerzos iniciales (*field stress*) y en una segunda serie, el coeficiente de esfuerzo horizontal (k_0). El campo de esfuerzos iniciales –que típicamente se usa en excavaciones profundas y en modelos teóricos– se aplica para definir un estado de esfuerzos homogéneo antes de la excavación, es decir uno que no varíe con la posición o la profundidad.

Los valores de campo de esfuerzos iniciales que se usaron en los análisis fueron de 720 y 3600 kN/m² (equivalente a 30 y 150 m. de profundidad respectivamente) en σ_1 , σ_2 y σ_3 ; los valores del coeficiente de k_0 fueron de 0.35, 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25; las profundidades, de 30, 75, 150 y 200 m.; y los avances de excavación, de 1, 2, 3 y 5 m. También se presentan las condiciones generales del análisis tridimensional. Los análisis tridimensionales se realizaron a través del programa de cómputo de elementos finitos Plaxis 3D.

La geometría del modelo circular aparece en la Figura 4. 1, donde se puede apreciar que presenta un radio de 4 m; la del modelo de túnel carretero, en la Figura 4. 2, y allí puede verse que se asemeja a un radio aproximado de 4 m, pero siguiendo la geometría de un caso típico de túnel carretero o herradura.

Se determinaron los desplazamientos máximos, las relaciones de esfuerzos ($\frac{P_i}{P_0}$) máximas y finales, y las distancias del frente de excavación a partir de las cuales comienza a variar la relación de esfuerzos.

4.2 CONDICIONES GENERALES DE ANÁLISIS

Para la investigación se consideró un túnel de 150 m de longitud, un suelo homogéneo a lo largo de todo el túnel, con las propiedades que se pueden observar en la Tabla 4. 1, sin presencia de elementos geológicos estructurales como fallas, pliegues o nivel freático.

Se hizo uso de material *suelo tapa*, artificio que sigue la técnica del terreno equivalente, que consiste en dividir el terreno en dos materiales: la parte superior (de menor potencia) como un *suelo tapa* con las mismas propiedades del suelo del terreno original, pero con un peso específico diferente; y la parte inferior (de mayor potencia), que mantiene todas las propiedades del terreno original. El peso específico del *suelo tapa* varía de acuerdo a la carga (o profundidad) que se desee simular; es decir, a mayor peso específico mayor será la carga simulada. Así se logra simular esfuerzos de profundidades mayores en estratos de menor potencia y, por tanto, con menor mallado. De esta manera se ahorra tiempo y costo de procesamiento y puede lograrse un mayor nivel de detalle en el mallado en las zonas de interés.

Tabla 4. 1. Propiedades del suelo.

Material	Modelo Constitutivo	Peso específico kN/m ³	Módulo de Young kN/m ²	Coficiente de Poisson	Cohesión kN/m ²	Ángulo de fricción	Ángulo de dilatación
Suelo	Mohr-Coulomb	24	500 000	0.30	50	30	0
Suelo tapa	Lineal elástico	Variable	500 000	0.30	---	---	---

La profundidad a la que se encuentra el túnel en el modelo es 30.0 m inicialmente, y a partir de la variación de la capa de material equivalente (tapa) se simulan profundidades de 75, 150 y 200 m. El punto de control

de esfuerzos y desplazamientos se ubicó en la clave, sobre una sección transversal a la mitad del modelo (75 m). En la Figura 4. 1 y Figura 4. 2 aparecen las vistas isométricas del túnel.

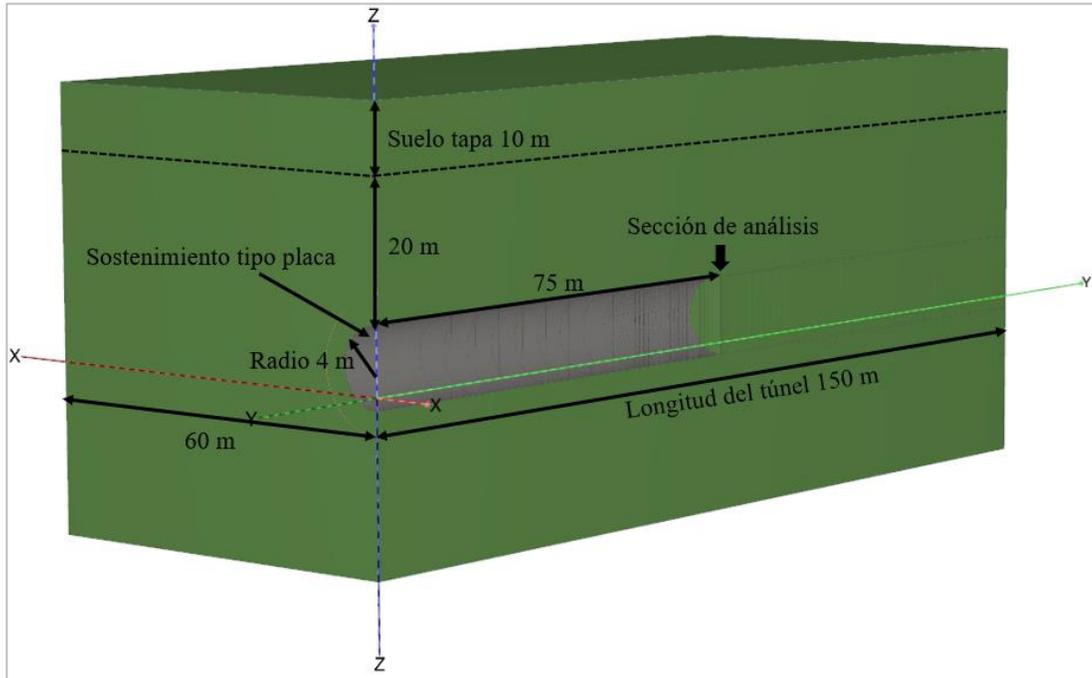


Figura 4. 1. Vista isométrica del túnel del modelo circular.

El soporte del túnel se simula por medio de elementos tipo placa (*plate*, Figura 4.2) con las propiedades que se presentan en la Tabla 4. 2.

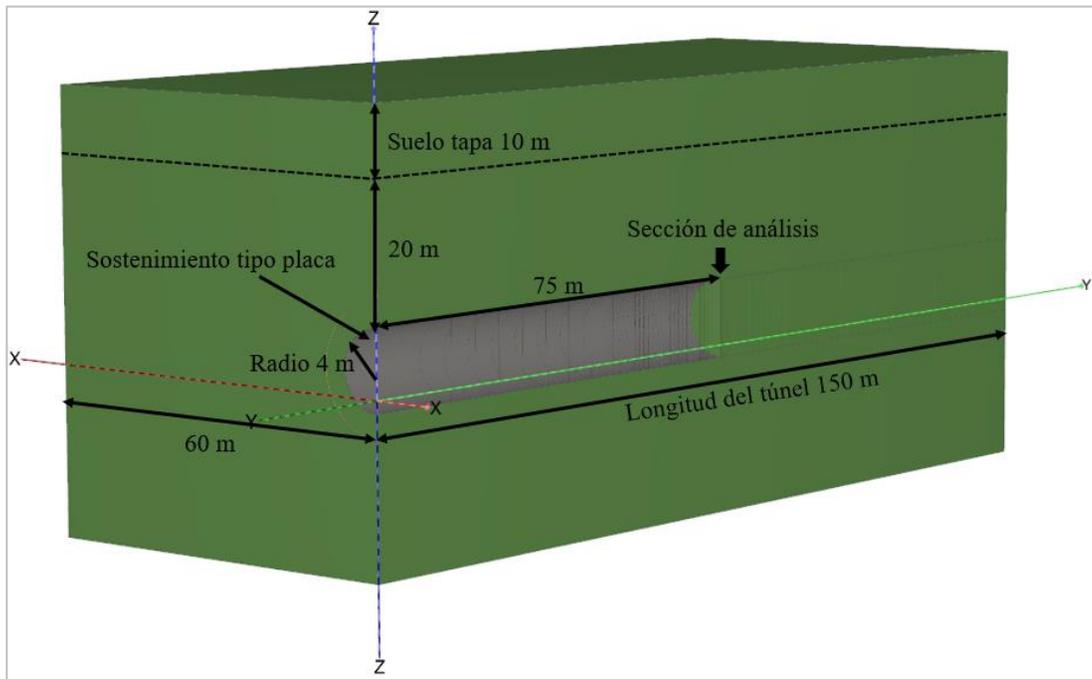


Figura 4. 2. Vista isométrica del túnel del modelo carretero.

Tabla 4. 2. Propiedades del soporte.

Tipo de sostenimiento	Modelo constitutivo	Espesor (m)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (kN/m ²)	Coefficiente de Poisson	Módulo de rigidez (kN/m ²)
Plate	Elástico	0.20	24	24.25 E6	0.20	10.10 E6

Se realizaron avances de excavación previos a la colocación del soporte de 1, 2, 3, y 5 m. a fin de estudiar la influencia de la longitud libre, como se puede observar en las Figuras 4. 3, 4. 4 y 4. 5.

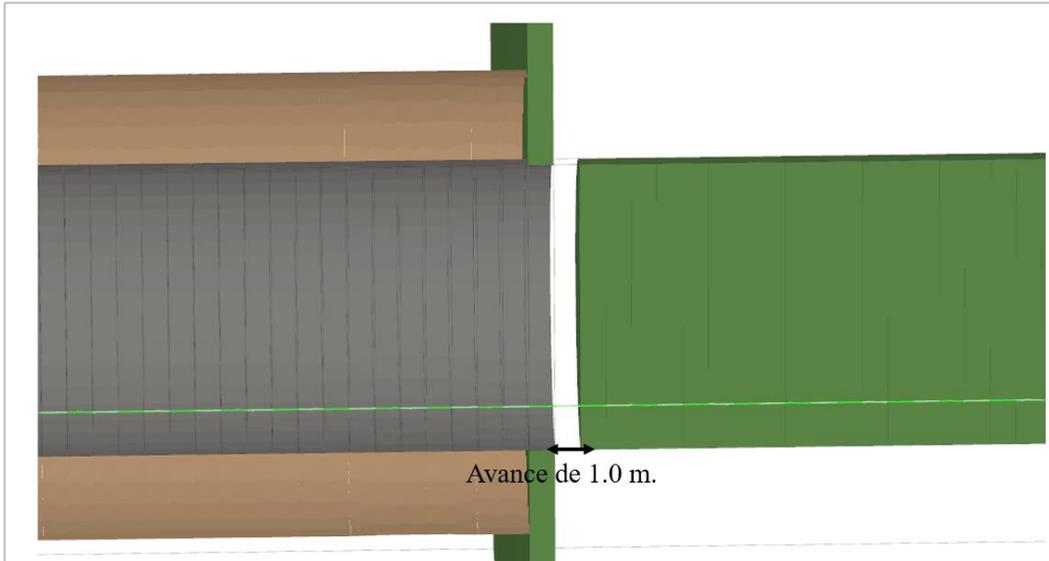


Figura 4. 3. Avance de excavación de 1 m.

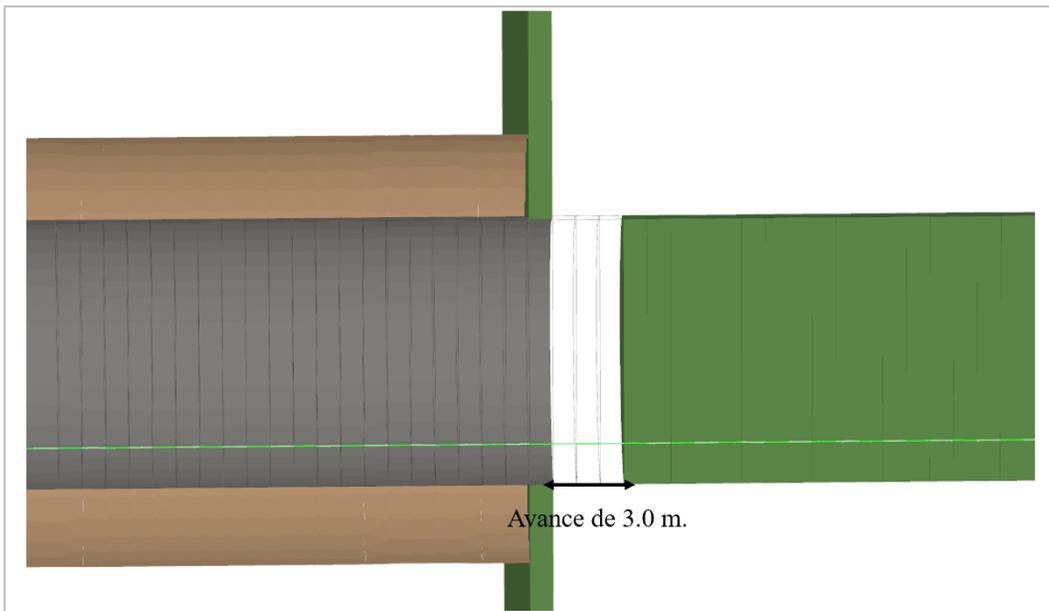


Figura 4. 4. Avance de excavación de 3 m.

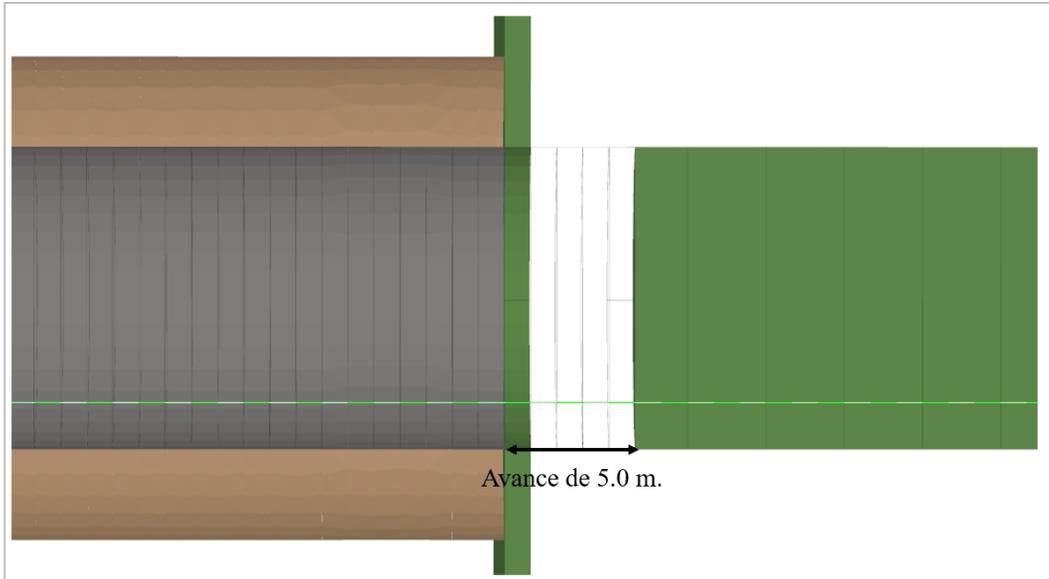


Figura 4.5. Avance de excavación de 5 m.

4.3 MODELO CON SECCIÓN DE TÚNEL CIRCULAR

Se llevaron a cabo los análisis tridimensionales para el modelo con una sección de túnel circular, con avances de excavación de 1, 2, 3, y 5 m. para los distintos valores del campo de esfuerzos iniciales y los coeficientes de k_0 . Se consideraron las propiedades del suelo de la Tabla 4. 1 y las propiedades del soporte de la Tabla 4. 2.

4.3.1 Campos de esfuerzos iniciales

Para los casos de campos de esfuerzos iniciales (720 y 3600 kN/m²) se consideraron los modelos constitutivos elástico lineal y Mohr-Coulomb elastoplástico perfecto, así como avances de excavación de 1, 2 y 3 m y la presencia o no de soporte. Todos los casos analizados para los campos de esfuerzos iniciales se muestran en la Figura 4. 6.



Figura 4. 6. Casos analizados para los campos de esfuerzos iniciales en el modelo de túnel circular.

4.3.1.1 Modelo elástico lineal

En los casos donde el terreno se considera elástico lineal se emplearon campos de esfuerzos iniciales de 720 y 3600 kN/m².

Se realizaron los análisis y con los resultados obtenidos se construyeron las curvas características de cada caso. Las curvas se presentan en el ANEXO .

En la Tabla 4. 3 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 4. 3. Resultado de análisis para diferentes campos iniciales con el modelo elástico lineal.

Caso	Estado inicial (kN/m ²)	Profundidad equivalente (m)	Avance (m)	Soporte	U _{máximo} (mm)	P _i /P ₀ (máximo)	P _i /P ₀ (final)
00-a_sin	720	30	1	No	10.145	1.239	0.000
00-b_con	720	30	1	Si	6.128	1.173	0.170
00-c_sin	3600	30	1	No	50.857	1.239	0.000
00-d_con	3600	30	1	Si	30.474	1.173	0.170

A partir de los análisis tridimensionales y las curvas características obtenidas se construyeron dos gráficas. En la Figura 4. 7 aparece la relación de esfuerzos frente al desplazamiento vertical en la clave del túnel; en la Figura 4. 8, la relación de esfuerzos vs distancia al frente.

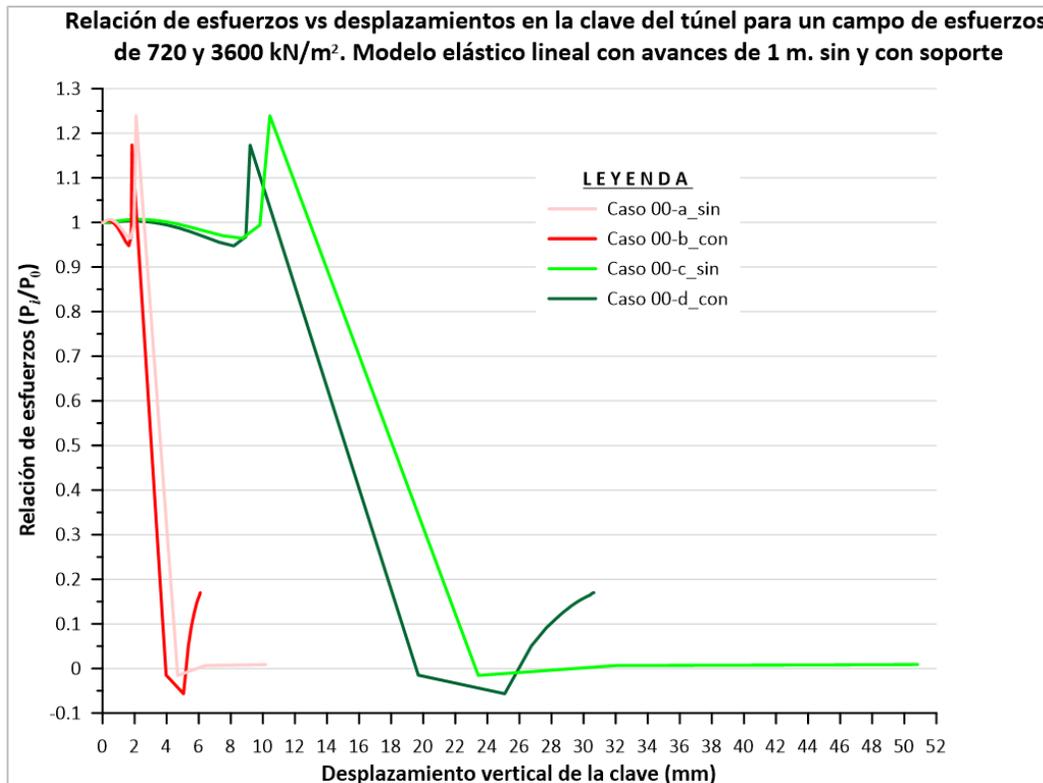


Figura 4. 7. Relación de esfuerzos vs desplazamientos en la clave del túnel para un campo de esfuerzos de 720 y 3600 kN/m². Modelo elástico lineal con avances de 1 m. sin y con soporte.

Como puede observarse en la Figura 4. 7, la relación de esfuerzos aumenta alrededor de 15% cuando se incluye soporte con avances de 1 m., tanto para el caso de campo de esfuerzos iniciales de 720 como para el de 3600 kN/m², mientras que cuando no hay soporte la relación de esfuerzos es mayor, alrededor de 25%.

También se identificó que los desplazamientos verticales en la clave del túnel son cinco veces mayores cuando no hay soporte frente a los casos con soporte, tanto para el caso de campo de esfuerzos iniciales de 720 como para 3600 kN/m².

Se aprecia en la Figura 4. 8 que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 3 m. de la distancia al frente hasta los 2 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico. Se observa también que las recuperaciones de esfuerzos son alrededor de 17% en los casos con soporte. En las Figuras 4. 7 y 4. 8 se pueden apreciar que antes de que ocurra el aumento de la relación de esfuerzos se produce primero una disminución de esta relación.

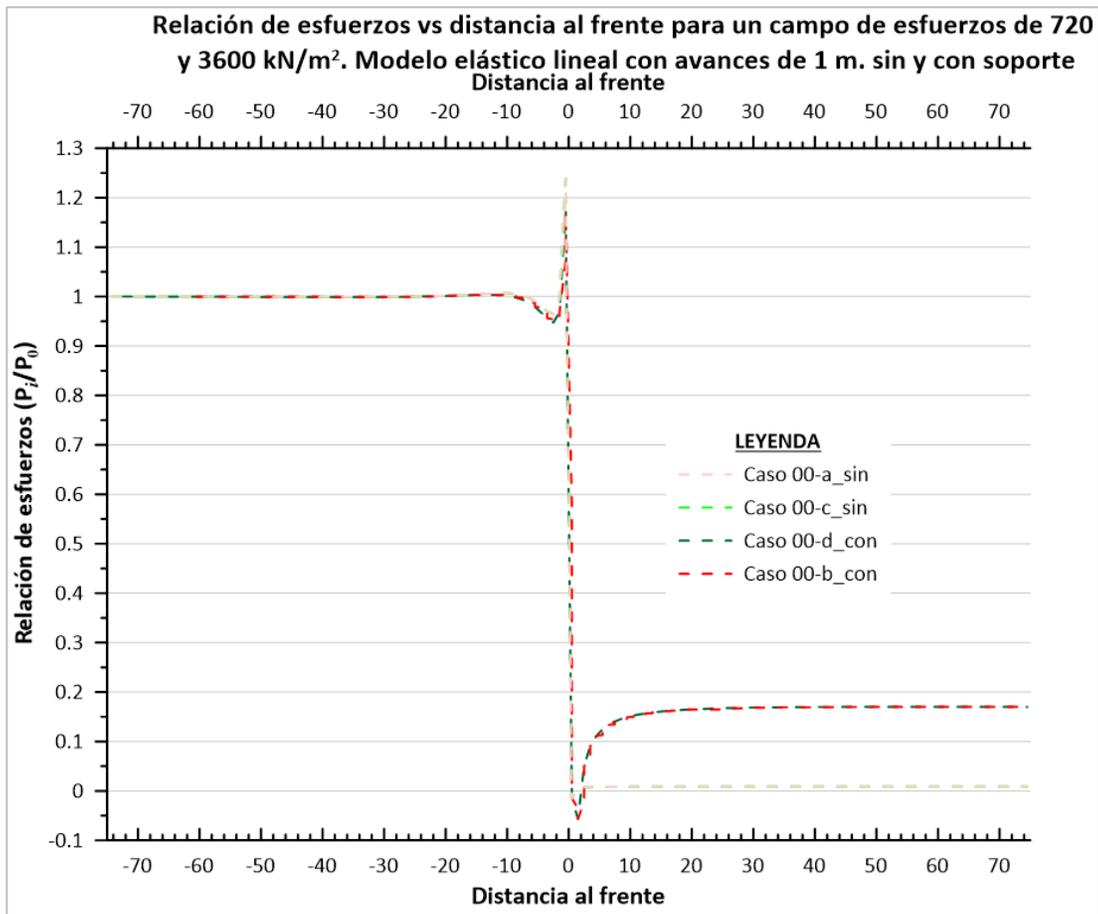


Figura 4. 8. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un campo de esfuerzos de 720 y 3600 kN/m². Modelo elástico lineal con avances de 1 m. sin y con soporte.

Se observa en Figura 4. 8 que, antes del cruce del túnel por la sección de control, la relación de esfuerzo $\frac{P_i}{P_0} > 1$, como se indicó en el capítulo 2.5.4. Se identificó que dicha relación de esfuerzos es mayor para el caso sin soporte respecto al caso con soporte, así como el desplazamiento vertical en la clave del túnel.

4.3.1.2 Modelo de Mohr-Coulomb

Se aplicó el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb a un total de 12 casos con campos de esfuerzos iniciales de 720 y 3600 kN/m².

Con los resultados obtenidos de los análisis tridimensionales se construyeron las correspondientes curvas características. En el ANEXO se aprecian las curvas.

En la Tabla 4. 4 se muestran los resultados de los 12 casos estudiados obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 4. 4. Resultados de análisis para diferentes campos de esfuerzos con el modelo de Mohr-Coulomb.

Caso	Estado inicial (kN/m ²)	Profundidad equivalente (m)	Avance (m)	Soporte	$U_{máximo}$ (mm)	P_i/P_0 (máximo)	P_i/P_0 (final)
01-a_sin	720	30	1	No	31.350	1.046	0.000
01-b_con	720	30	1	Si	9.867	1.018	0.258
01-c_sin	3600	150	1	No	510.730	1.122	0.000
01-d_con	3600	150	1	Si	93.625	1.041	0.213
02-a_sin	720	30	2	No	30.981	1.046	0.000
02-b_con	720	30	2	Si	11.061	1.022	0.271
02-c_sin	3600	150	2	No	513.534	1.109	0.000
02-d_con	3600	150	2	Si	106.927	1.051	0.265
03-a_sin	720	30	3	No	31.548	1.044	0.000
03-b_con	720	30	3	Si	12.834	1.021	0.251
03-c_sin	3600	150	3	No	506.958	1.101	0.000
03-d_con	3600	150	3	Si	115.592	1.053	0.217

En la tabla puede apreciarse que en todos los casos la relación de esfuerzo $\frac{P_i}{P_0} > 1$, antes de la llegada del frente a la sección de control, tal como se indicó en el capítulo 2.5.4. Al igual que en el caso elástico, se identificó que la relación de esfuerzos es mayor cuando no hay soporte frente al caso que presenta soporte, y el desplazamiento vertical en la clave del túnel también.

A partir de los análisis tridimensionales y las curvas características obtenidas se construyeron cuatro gráficas. La Figura 4. 9 muestra relación de esfuerzos vs desplazamiento vertical en la clave del túnel para el caso de campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m²; la Figura 4. 11, para el caso de 3600 kN/m². La

Figura 4. 10 muestra la relación de esfuerzos vs distancia al frente para el caso de campos de esfuerzos iniciales de 720 kN/m²; la Figura 4. 12, para el caso de 3600 kN/m².

a) Campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m²

En la Figura 4. 9 y en la Tabla 4. 4 se puede ver que la relación de esfuerzos aumenta alrededor de 2% para los casos con soporte y avances de 1, 2 y 3 m., con campo inicial de esfuerzos de 720 kN/m², mientras que para los casos sin soporte, con los mismos avances, la relación de esfuerzos es mayor, alrededor de 4%. También es importante destacar que en el caso elastoplástico, la magnitud de las diferencias observadas se atenúa considerablemente esto debido a que el terreno al entrar en régimen elastoplástico no puede pasar los esfuerzos en estado de fluencia, mientras que en una caso elástico si puede.

Asimismo, se identificó que los desplazamientos verticales en la clave del túnel son 3 veces mayores para los casos sin soporte respecto a los que tienen soporte, lo que representa también una menor diferencia que para el caso elástico.

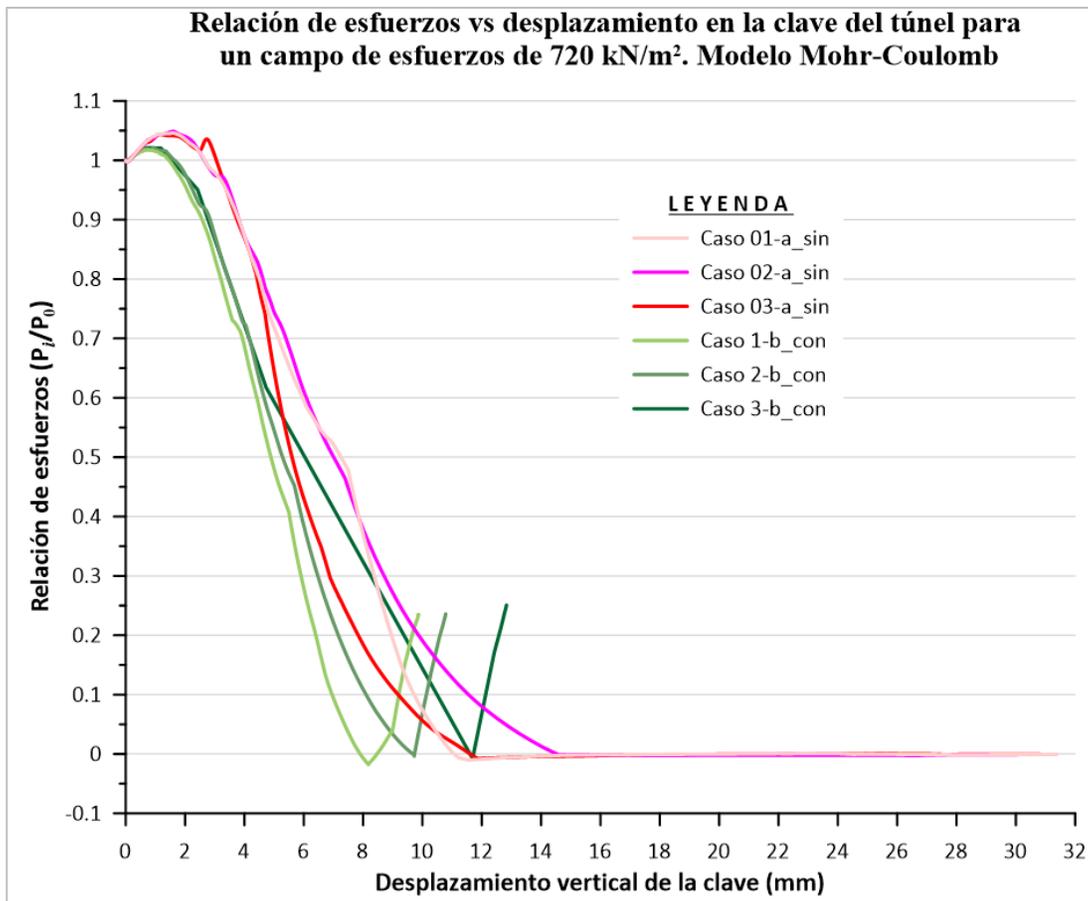


Figura 4. 9. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un campo de esfuerzos de 720 kN/m². Modelo Mohr-Coulomb.

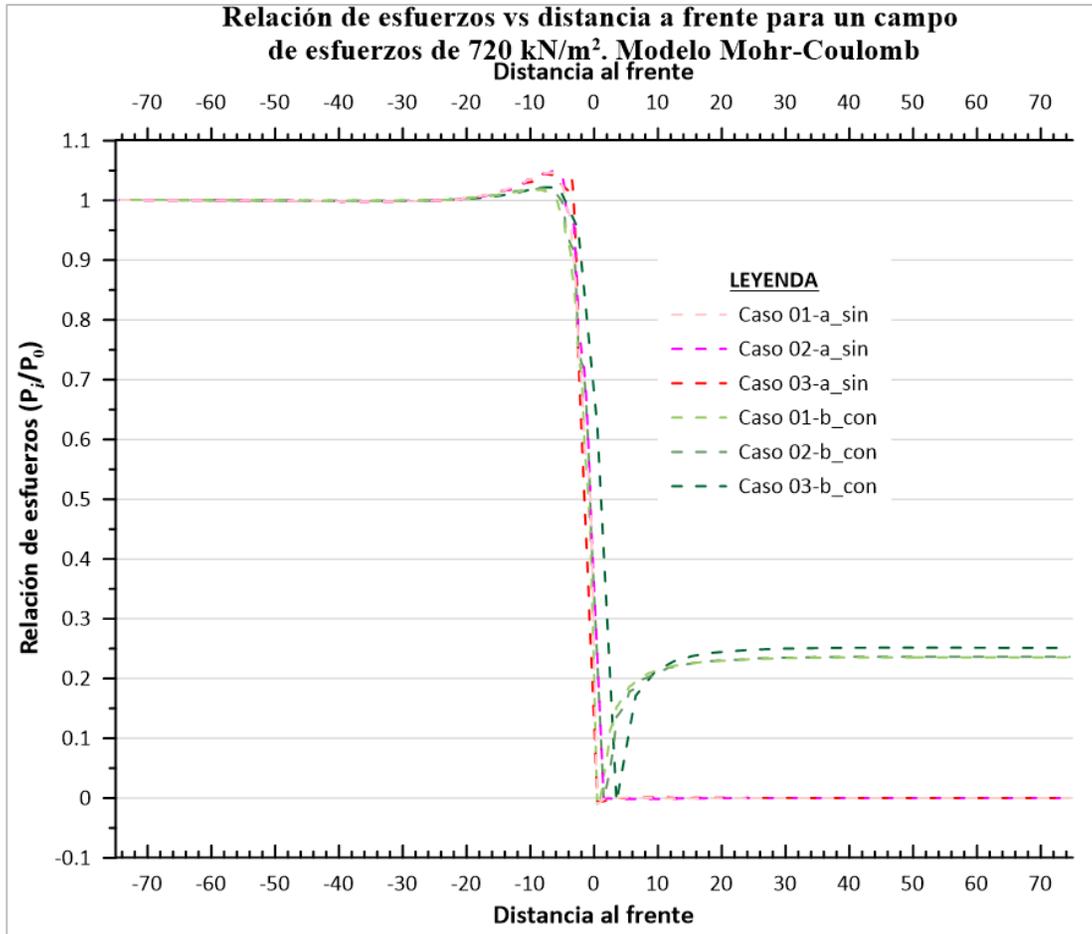


Figura 4. 10. Relación de esfuerzos vs distancia a frente para un campo de esfuerzos de 720 kN/m². Modelo Mohr-Coulomb.

Como puede apreciarse en la Figura 4. 10, el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 20 m. de la distancia al frente hasta los 5 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico, donde se observa también que la recuperación de esfuerzos es alrededor de 25% para los casos con soporte, lo que indica una mayor recuperación de esfuerzos frente al caso elástico. Se observa también en las Figuras 4. 9 y 4. 10 que no existen una disminución de la relación de esfuerzos antes de que ocurra el aumento de la relación de esfuerzos como en el caso elástico.

b) Campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m²

Como puede apreciarse en la Figura 4. 11 y en la Tabla 4. 4, la relación de esfuerzos aumenta alrededor de 5% cuando se incluye soporte, con avances de 1, 2 y 3 m., para casos de campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m², mientras que en los casos sin soporte, con las mismas longitudes de avance, la relación de esfuerzos es mayor, alrededor de 10%.

También se identificó que los desplazamientos verticales en la clave del túnel para los casos sin soporte son 5 veces mayores que los que llevan soporte, al igual que en el caso elástico.

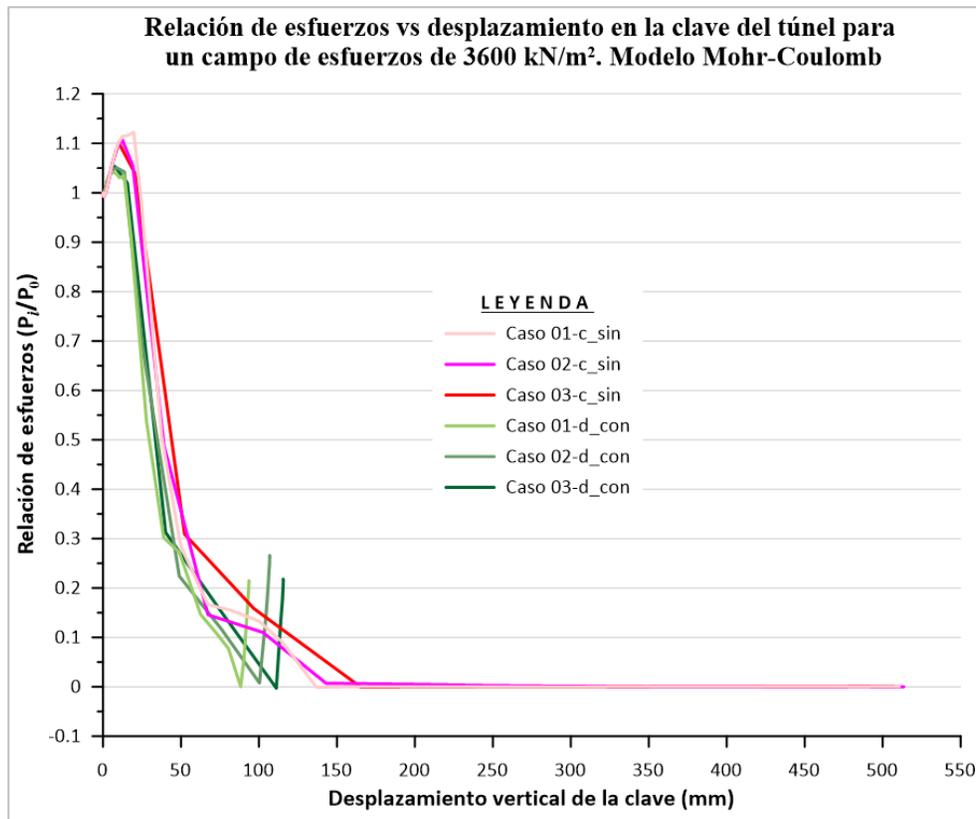


Figura 4. 11. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un campo de esfuerzos de 3600 kN/m². Modelo Mohr-Coulomb.

Puede apreciarse en la Figura 4. 12 que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 25 m. de la distancia al frente hasta los 7 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico, y que la recuperación de esfuerzos es alrededor de 25% para los casos con soporte, lo que representa una mayor recuperación de esfuerzos respecto al caso elástico.

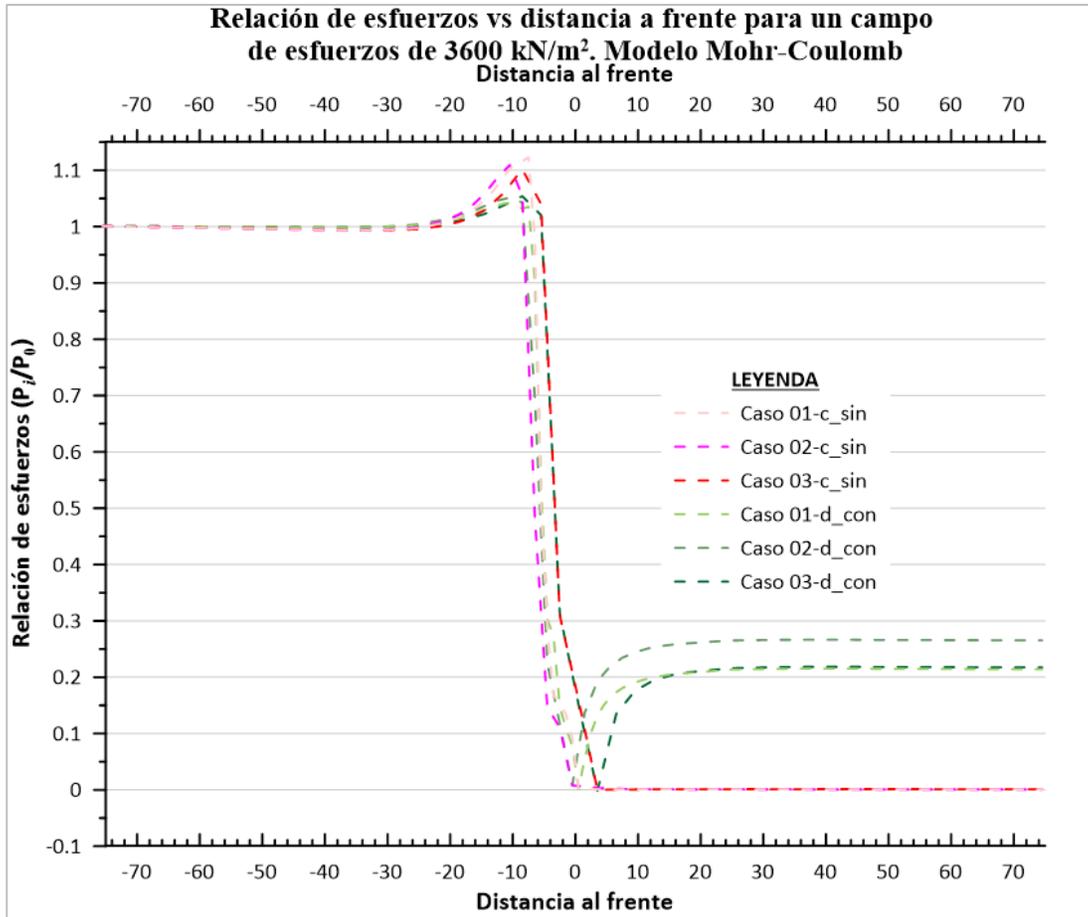


Figura 4. 12. Relación de esfuerzos vs distancia a frente para un campo de esfuerzos de 3600 kN/m². Modelo Mohr-Coulomb.

4.3.1.3 Conclusiones

De los 16 casos estudiados se concluye que:

- El aumento de la relación de esfuerzo para el caso elástico está entre 15% y 25%, para el caso elastoplástico está entre 2% y 4%.
- La relación de esfuerzos en todos los casos $\frac{P_i}{P_0} > 1.00$, antes de la llegada del frente a la sección de control, como se indicó en el capítulo 2.5.4.
- Conforme se incrementa la magnitud del campo de esfuerzos, los desplazamientos verticales en la clave del túnel aumentan.
- El aumento de la relación de esfuerzos en la clave del túnel para el caso elástico ocurre entre los 3 y 2 m. antes de la llegada del frente de excavación a la sección de control; mientras que para el caso elastoplástico ocurre entre los 20 y 5 m.
- Las recuperaciones de esfuerzos están alrededor de 17% para el caso elástico, para el caso elastoplástico están alrededor de 25%.

4.3.2 Variación del coeficiente de esfuerzo horizontal k_0 en terreno elastoplástico

Para esta sección se empleó el modelo constitutivo Mohr-Coulomb, con avances de excavación de 1, 3 y 5 m., profundidades de 30, 75, 150 y 200 m. y valores de k_0 de 0.35, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25; todos los casos presentaron soporte. Todos los casos analizados para el coeficiente de esfuerzo horizontal k_0 se muestran en la Figura 4. 13.

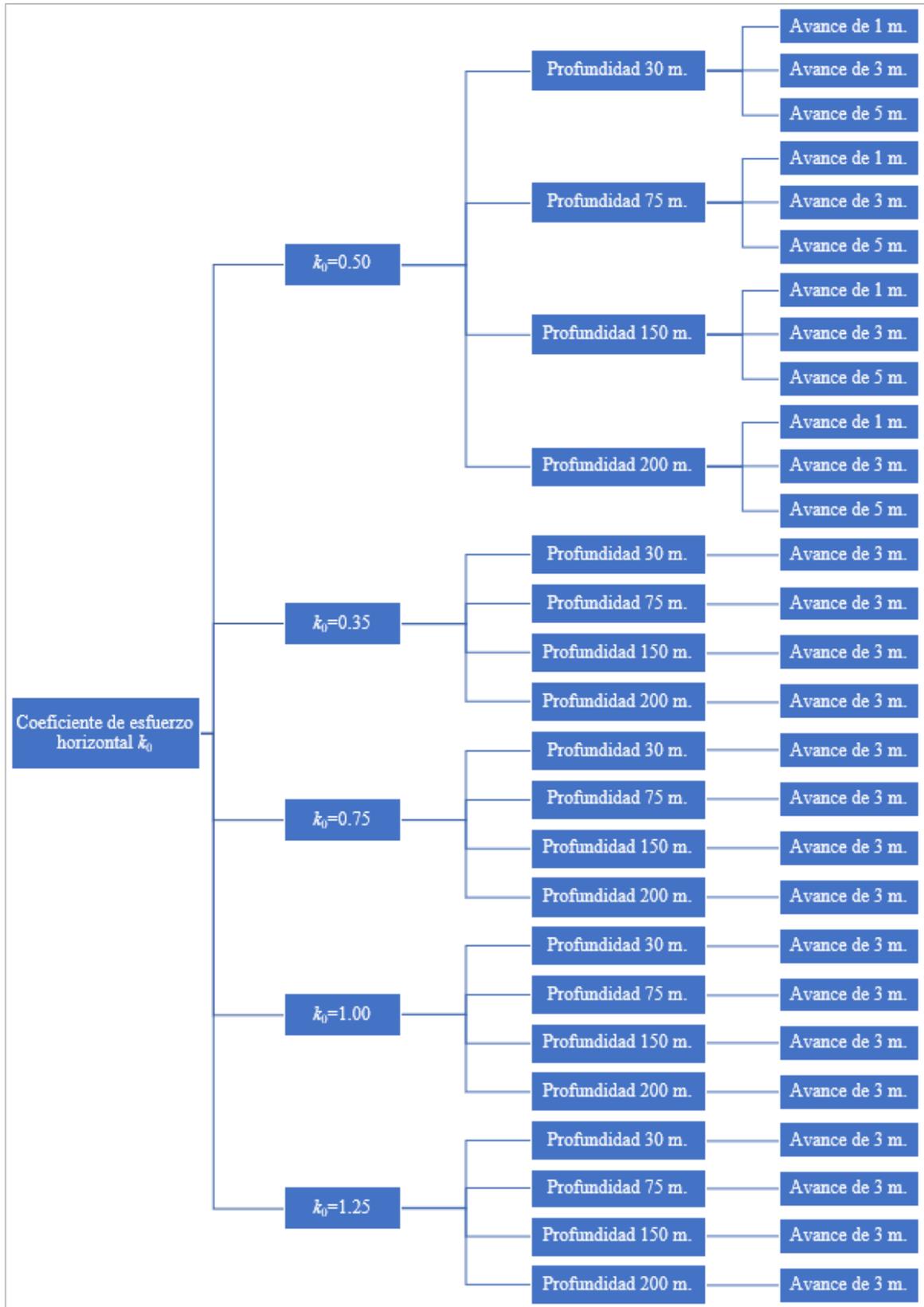


Figura 4. 13. Casos analizados para los coeficientes de esfuerzo horizontal k_0 en el modelo túnel circular.

4.3.2.1 Caso $k_0=0.50$

Como en los casos anteriores, con los resultados obtenidos de los análisis se construyeron las correspondientes curvas características. Los 12 casos estudiados están contenidos en el ANEXO .

En la Tabla 4. 5 se muestran los resultados de los 12 casos estudiados obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 4. 5. Resultados de análisis para $k_0=0.50$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.

Caso	Avance (m)	Profundidad (m)	Peso del suelo tapa (kN/m^3)	$U_{\text{máximo}}$ (mm)	P_i/P_0 (máximo)	P_i/P_0 (final)
04-a_con	1	30	24	14.715	1.105	0.167
04-b_con	3	30	24	17.001	1.115	0.183
04-c_con	5	30	24	19.081	1.123	0.153
04-d_con	1	75	132	48.119	1.142	0.169
04-e_con	3	75	132	56.559	1.151	0.186
04-f_con	5	75	132	64.653	1.142	0.165
04-g_con	1	150	312	124.924	1.174	0.171
04-h_con	3	150	312	148.490	1.210	0.180
04-i_con	5	150	312	170.833	1.187	0.170
04-j_con	1	200	432	185.938	1.198	0.171
04-k_con	3	200	432	226.001	1.245	0.178
04-l_con	5	200	432	262.055	1.231	0.172

Se construyeron cuatro gráficas a partir de los análisis tridimensionales y las curvas características obtenidas. En las figuras que se presentan puede verse la relación de esfuerzos frente al desplazamiento vertical en la clave del túnel y la relación de esfuerzos vs distancia al frente, para un valor de $k_0=0.50$ a ciertas longitudes de avance y a distintas profundidades.

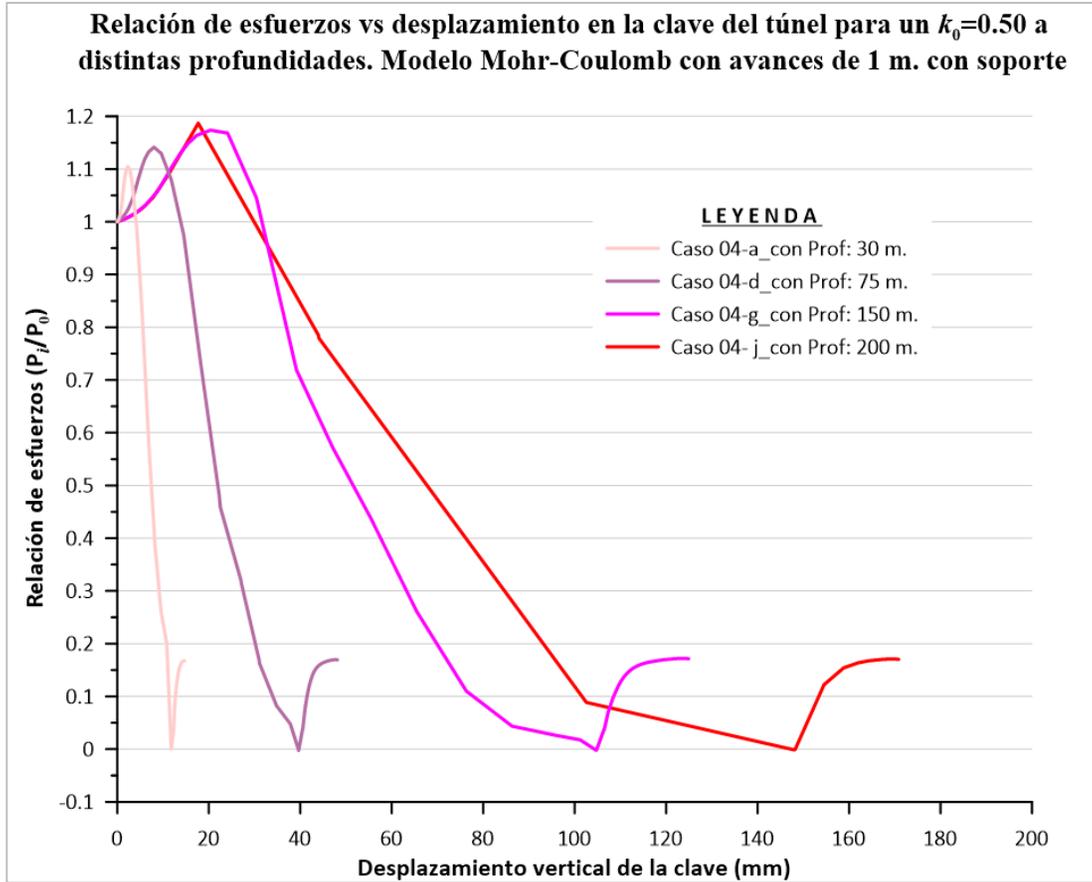


Figura 4. 14. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 1 m. con soporte.

En la Figura 4. 14 y en la Tabla 4. 5 puede verse que la relación de esfuerzos aumenta de 15% a 20% y que ésta se incrementa conforme aumenta la profundidad; asimismo, que los desplazamientos verticales en la clave del túnel crecen a medida que la profundidad aumenta, y presentan desplazamientos de 15, 48, 125 y 186 mm.

A continuación, en la Figura 4. 15 se observa que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 45 m de la distancia al frente hasta los 10 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico, y que las recuperaciones de esfuerzos son similares (alrededor de 17%).

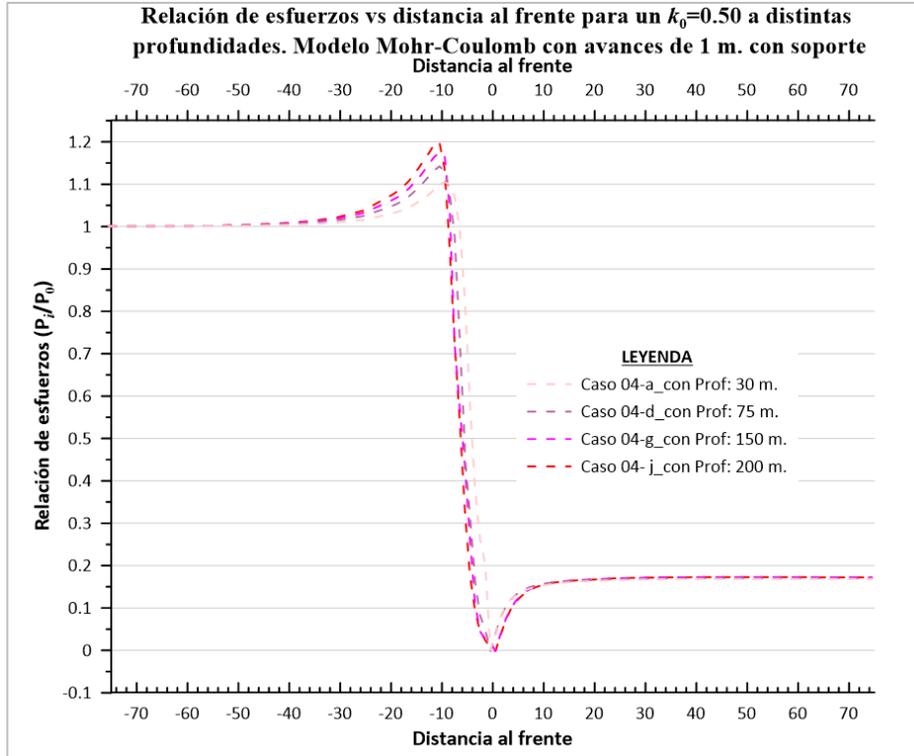


Figura 4. 15. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 1 m. con soporte.

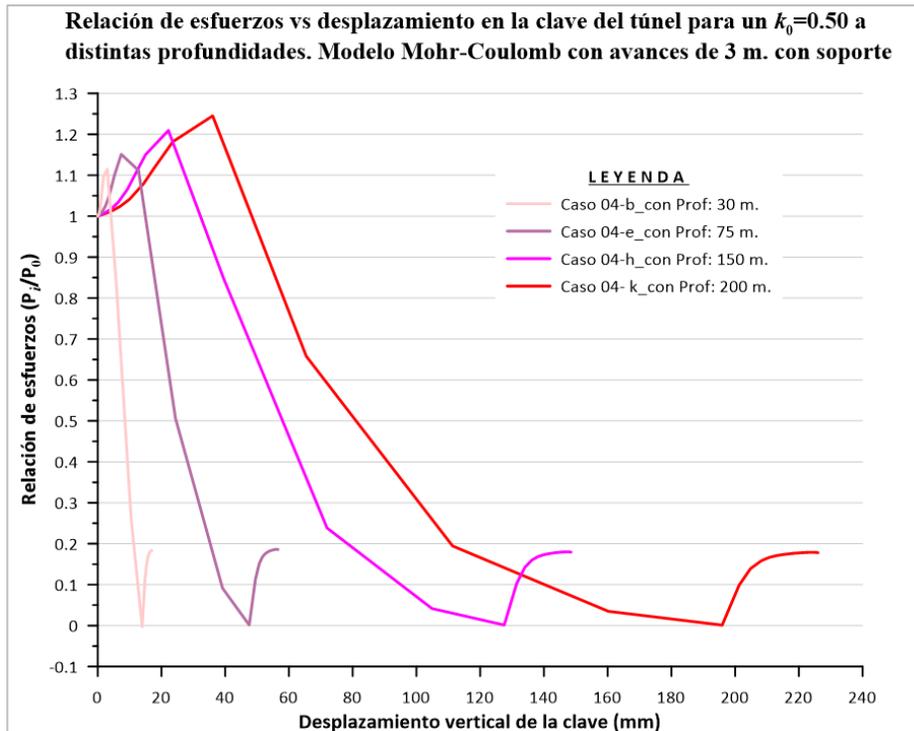


Figura 4. 16. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

Como puede verse en la Figura 4. 16 y en la Tabla 4. 5 la relación de esfuerzos aumenta entre 15% y 25% y se incrementa conforme aumenta la profundidad, tal, donde también se observa que los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan conforme aumenta la profundidad, presentando desplazamientos de 17, 57, 148 y 226 mm.

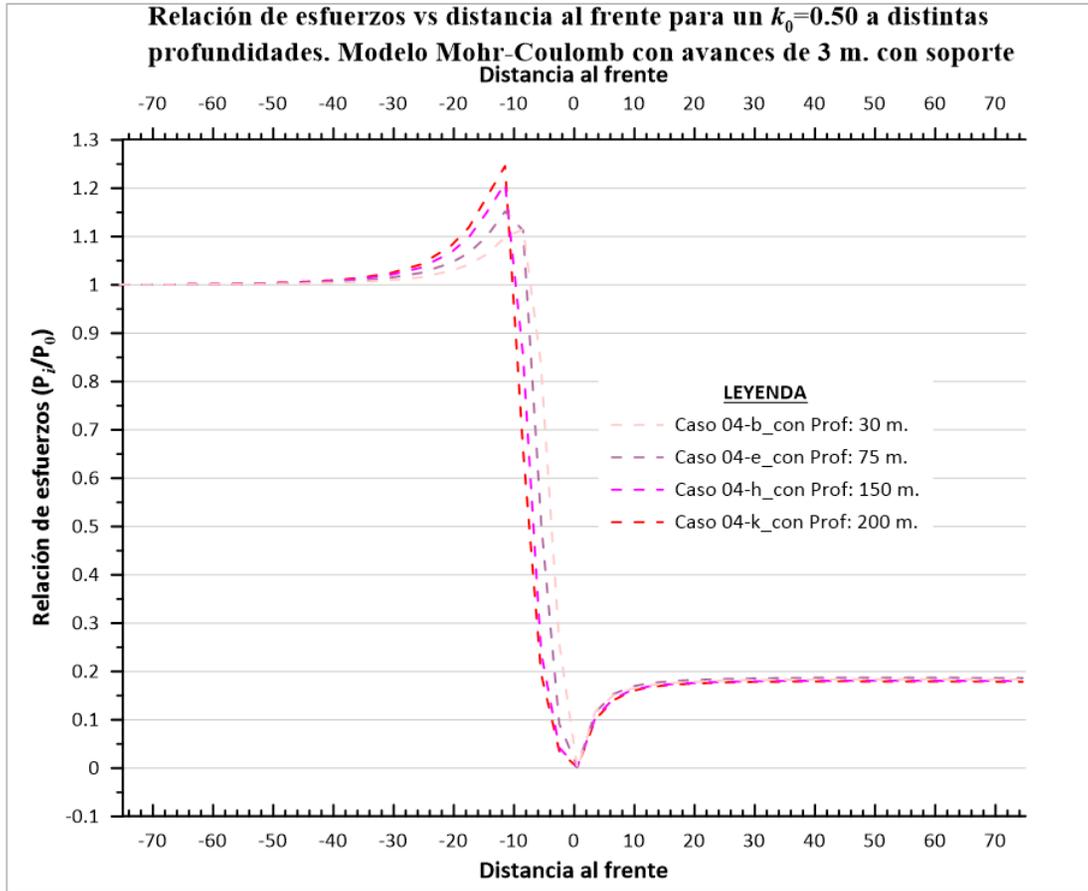


Figura 4. 17. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

En la Figura 4. 17 se observa que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 45 m. de la distancia al frente hasta los 10 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico, y que las recuperaciones de esfuerzos son similares (alrededor de 18%).

Puede verse en la Figura 4. 18 que la relación de esfuerzos aumenta entre 10% y 25% y se incrementa conforme aumenta la profundidad. También se observa que los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan conforme aumenta la profundidad, y que estos son de 19, 65, 171 y 262 mm.

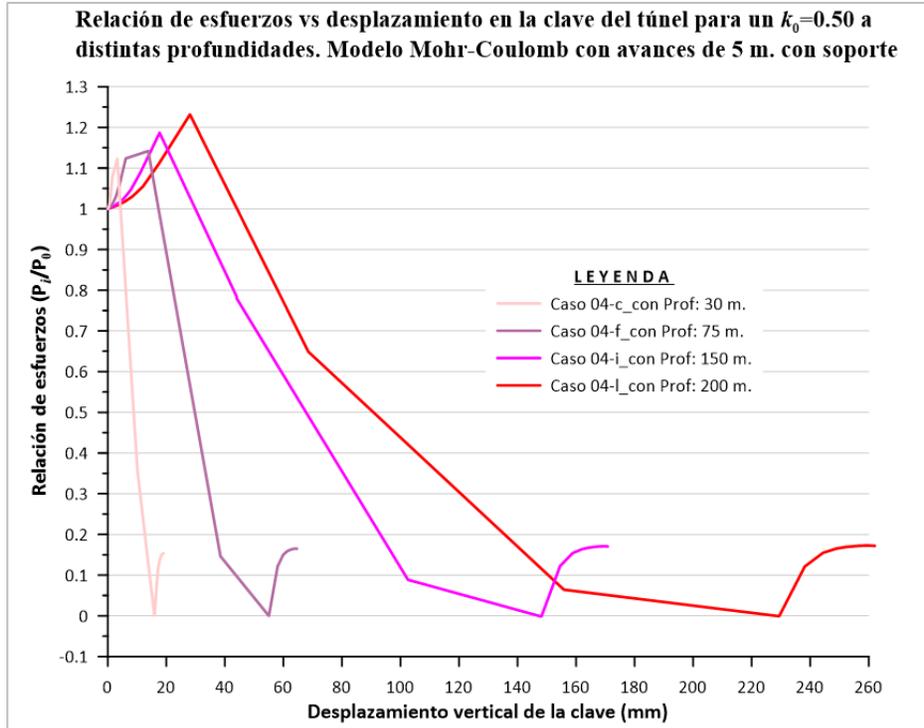


Figura 4. 18. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 5 m. con soporte.

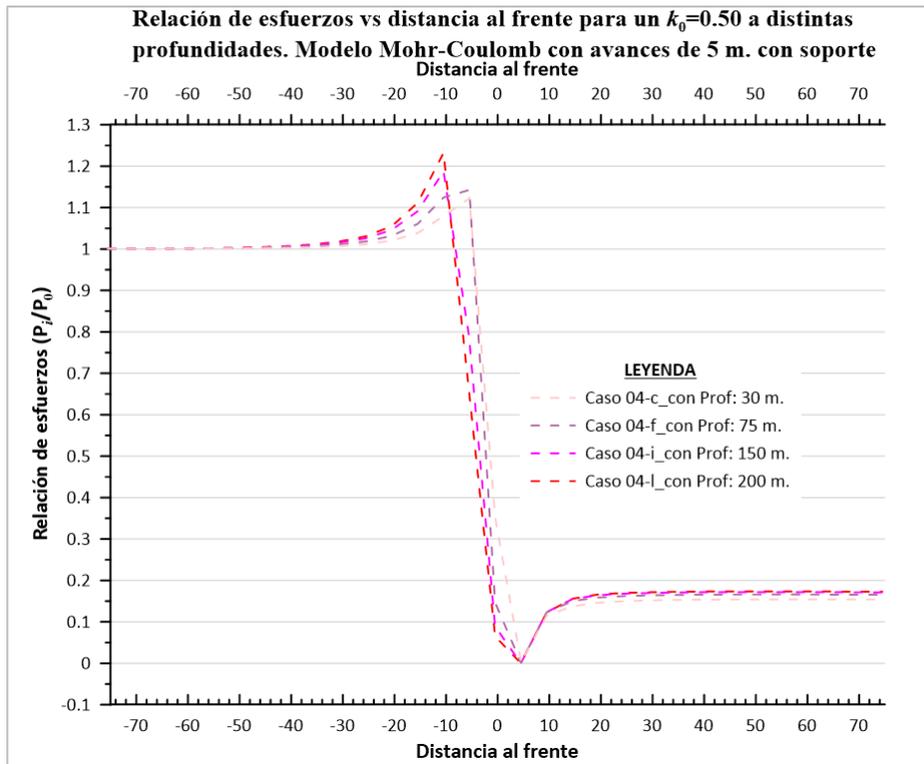


Figura 4. 19. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 5 m. con soporte.

Se observa en la Figura 4. 19 que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 40 m. de la distancia al frente hasta los 8 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico; asimismo, puede verse que las recuperaciones de esfuerzos son similares (alrededor de 17%).

Se obtuvieron ocho gráficas a partir de los resultados de los análisis tridimensionales y las curvas características, para el mismo valor de $k_0 = 0.50$, pero esta vez manteniendo constante la profundidad y variando las longitudes de avance.

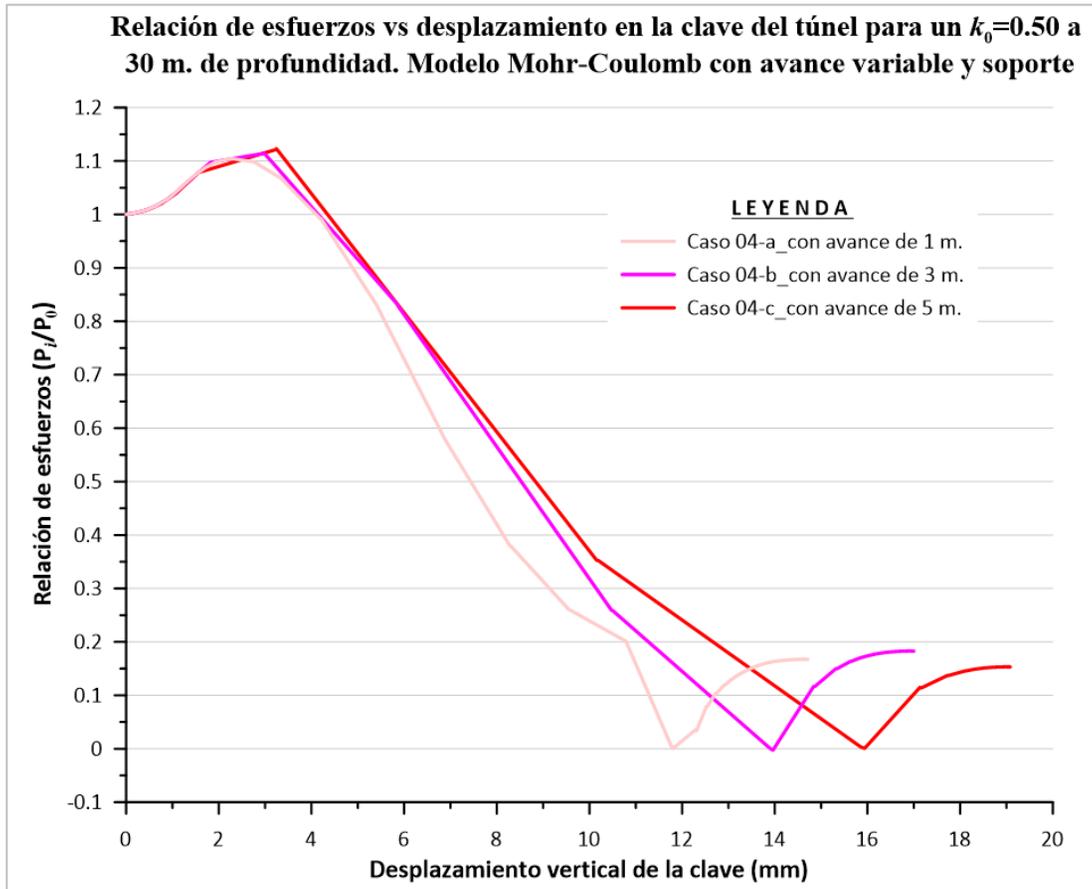


Figura 4.20. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a 30 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.

Puede verse en la Figura 4.20 y en la Tabla 4. 5 que la relación de esfuerzos aumenta alrededor de 10% y que ésta se incrementa a medida que aumenta el avance de excavación. Asimismo, se observa que los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan conforme aumenta el avance de excavación, presentando desplazamientos de 15, 17 y 19 mm.

En la Figura 4.21 se observa que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 40 m. de la distancia al frente hasta los 5 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico. También se aprecia que las recuperaciones de esfuerzos están entre 15% y 20%.

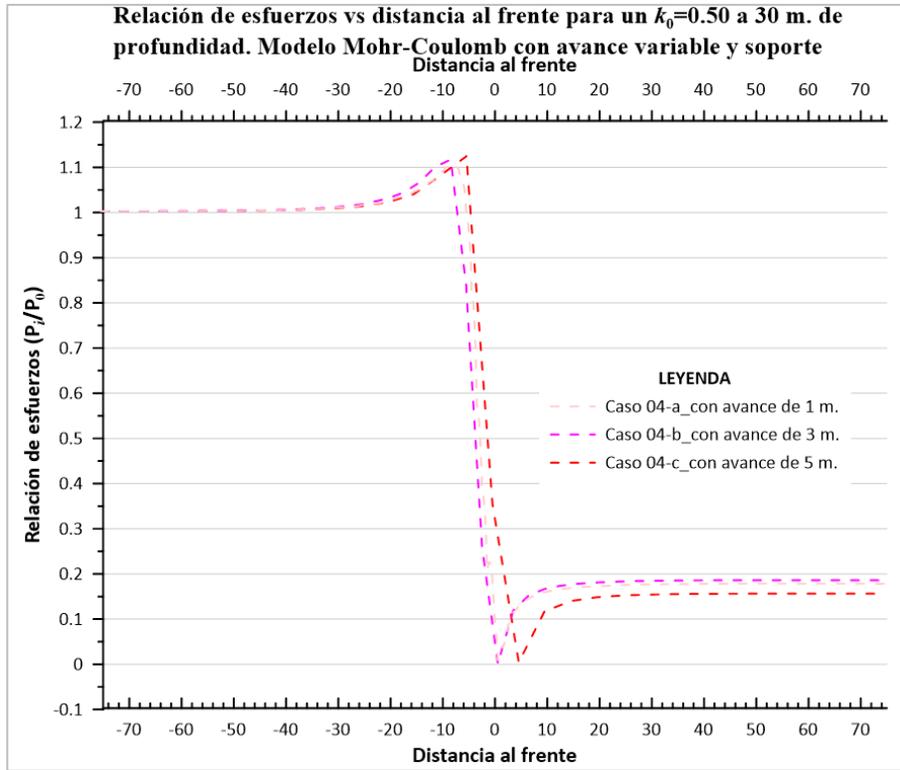


Figura 4.21. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a 30 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.

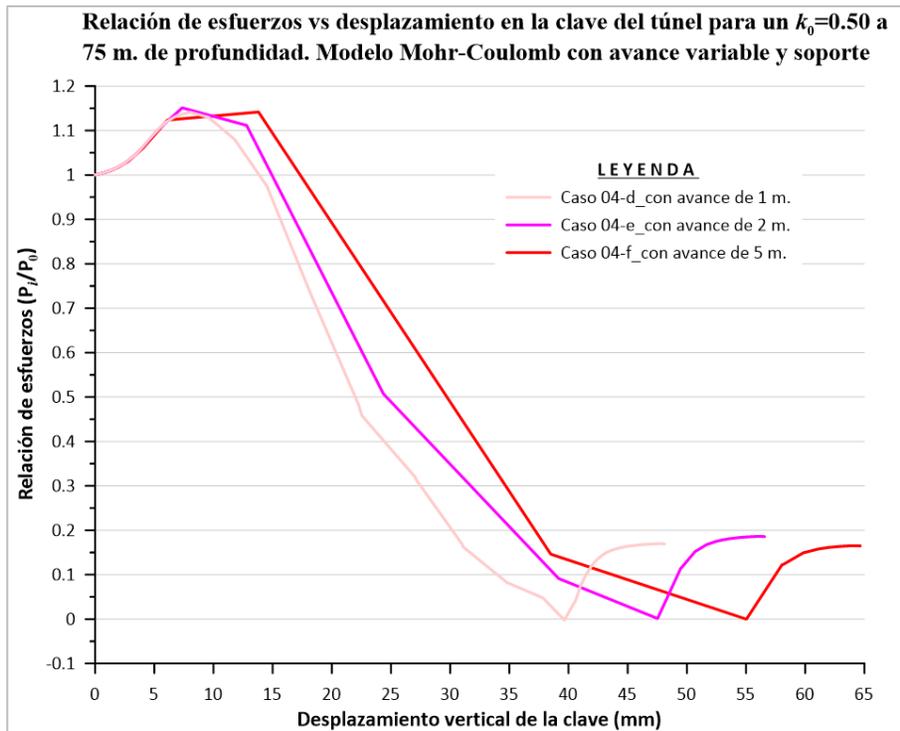


Figura 4.22. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a 75 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.

Como puede verse en la Figura 4. 22 y la Tabla 4. 5 la relación de esfuerzos aumenta alrededor de 15%. También se observa que los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan a medida que aumenta el avance de excavación, y que los desplazamientos son de 48, 57 y 65 mm.

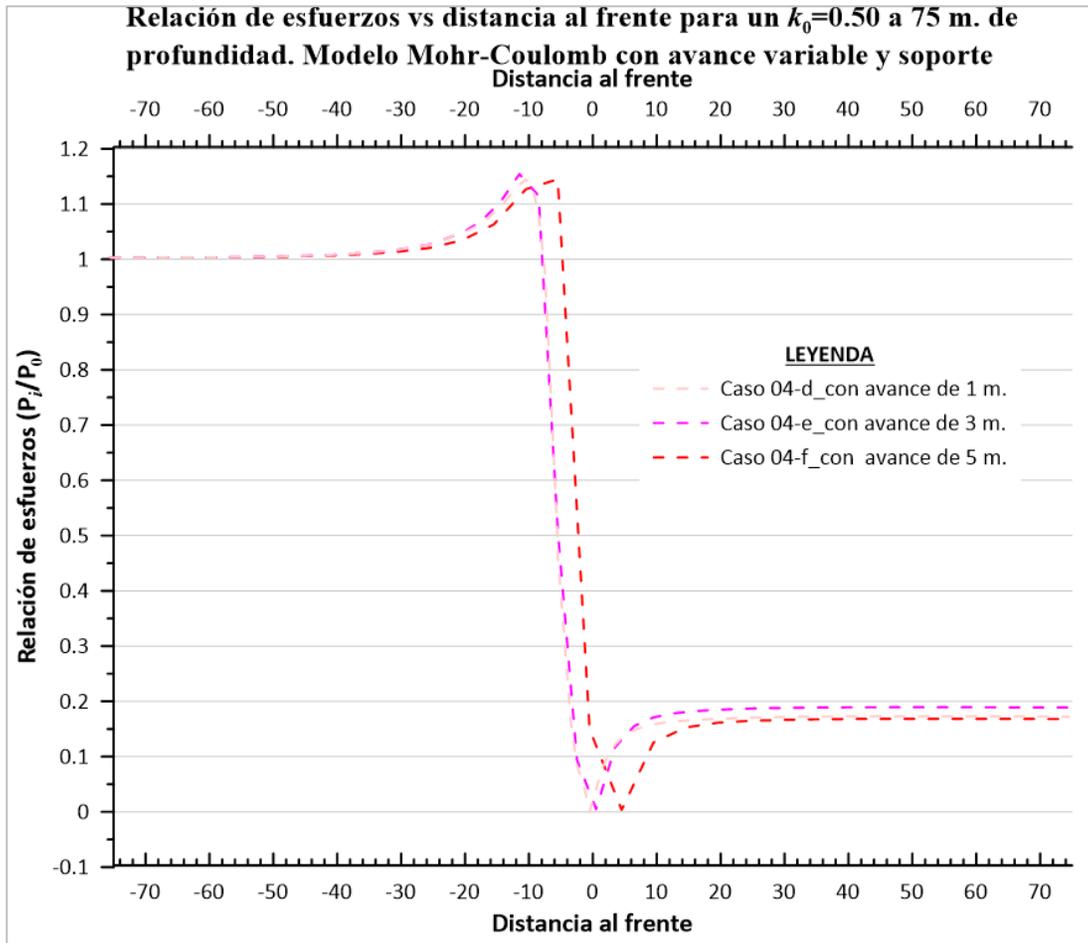


Figura 4. 23. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a 75 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.

Se observa en la Figura 4. 23 que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 40 m. de la distancia al frente hasta los 5 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico, y que las recuperaciones de esfuerzos están entre 15% y 20%.

En la Figura 4. 24 se puede ver que la relación de esfuerzos aumenta alrededor de 20%, y que los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan conforme aumenta el avance de excavación, presentando desplazamientos de 125, 149 y 171 mm.

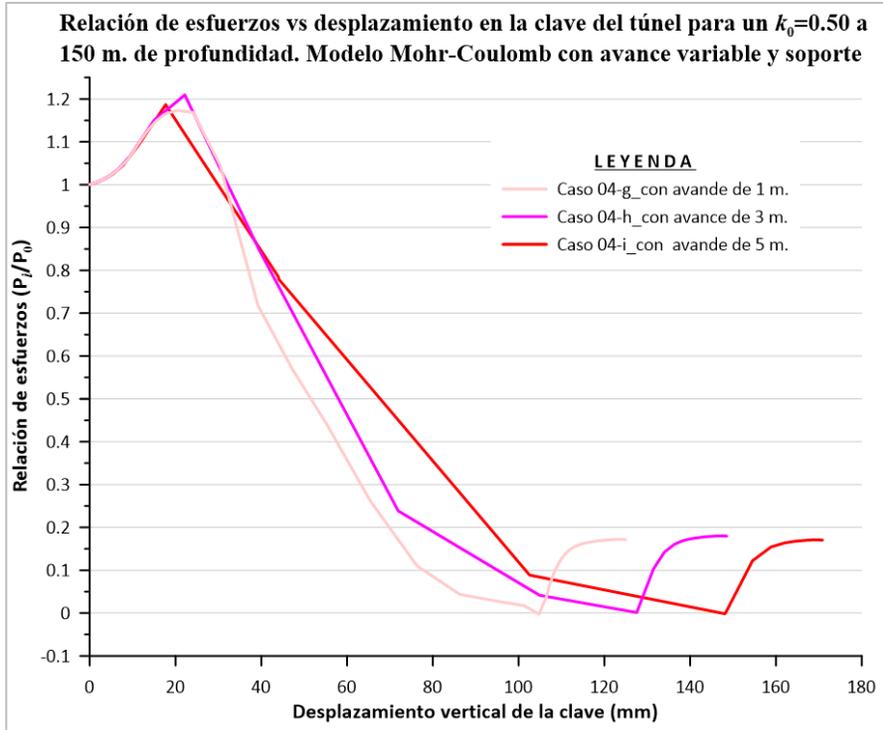


Figura 4. 24. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a 150 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.

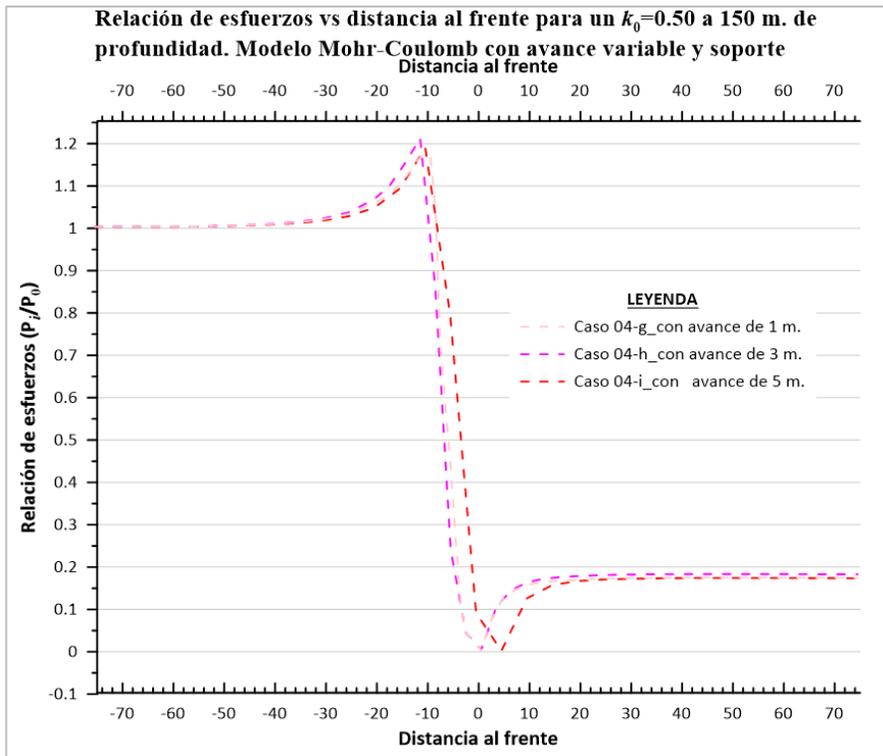


Figura 4. 25. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a 150 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.

Puede verse en la Figura 4. 25 que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 40 m. de la distancia al frente hasta los 10 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico. Asimismo, puede observarse que las recuperaciones de esfuerzos están entre 15% y 20%.

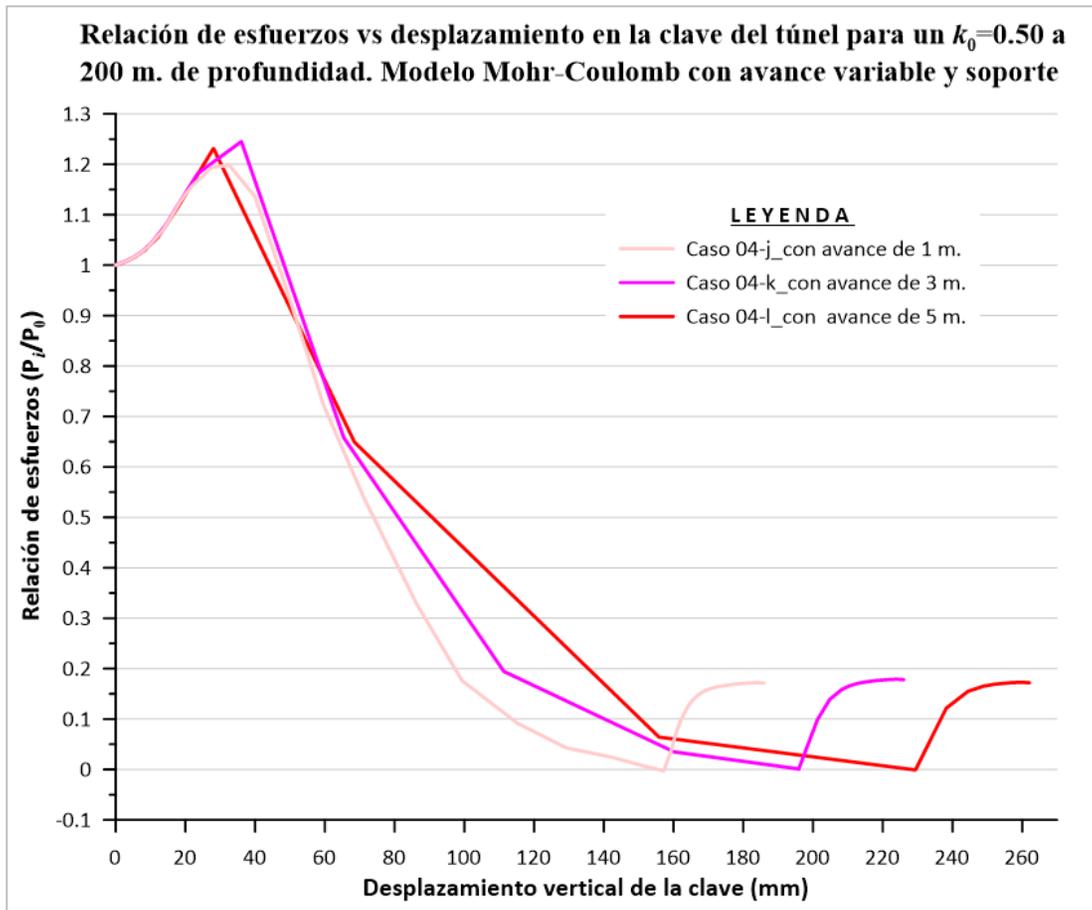


Figura 4. 26. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a 200 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.

En la Figura 4. 26. y en la Tabla 4. 5 se observa que la relación de esfuerzos aumenta alrededor de 25%. También puede verse que los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan a medida que el avance de excavación aumenta, y que los desplazamientos son de 186, 226 y 262 mm.

Como se aprecia en la Figura 4. 27 el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 40 m. de la distancia al frente hasta los 10 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico, en la cual se observa también que las recuperaciones de esfuerzos están entre 15% y 20%.

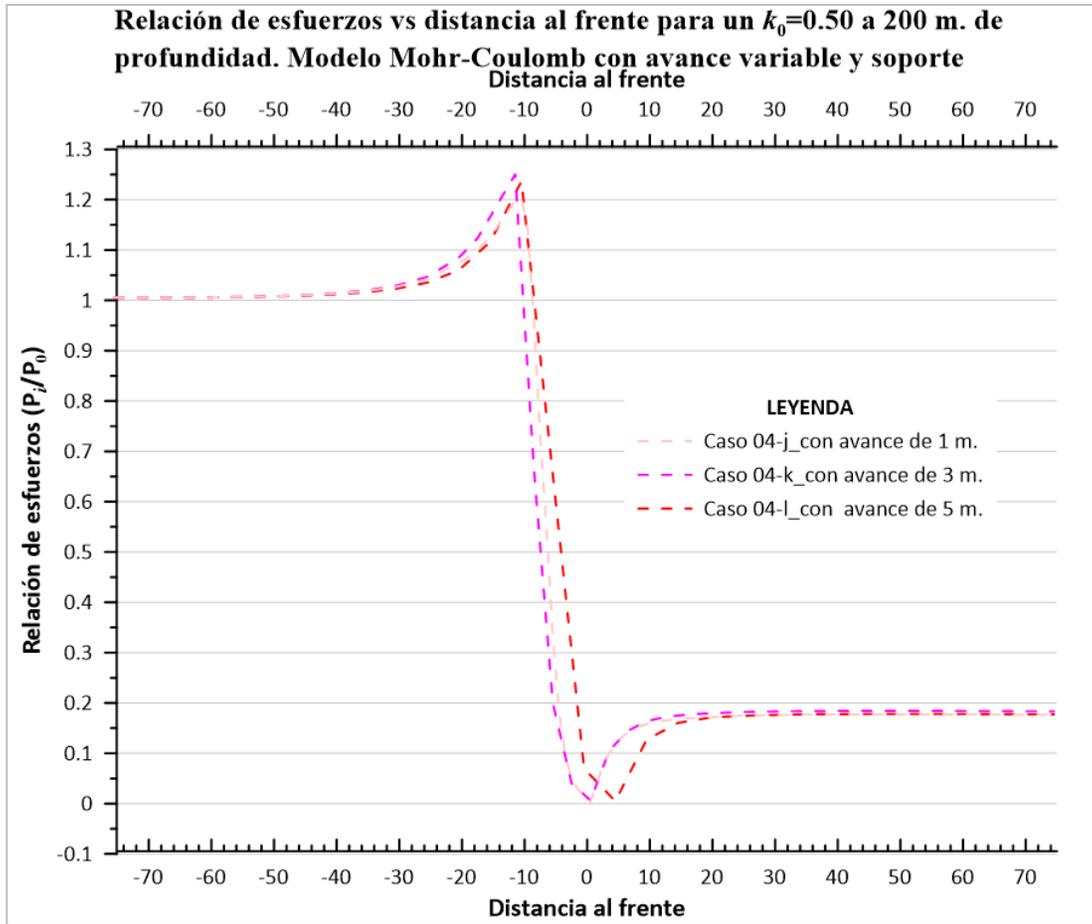


Figura 4. 27. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a 200 m. de profundidad. Modelo Mohr-Coulomb con avance variable y soporte.

De los 12 casos estudiados para $k_0=0.50$ se concluye que:

- El aumento de las relaciones de esfuerzos está entre 10% y 25% y se incrementan conforme aumenta la profundidad.
- Los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan conforme se aumenta la profundidad.
- El aumento de relación de esfuerzos ocurre entre 40 a 5 m. antes de la llegada del frente a la sección de control y las recuperaciones de esfuerzos están entre 15% y 20%.

4.3.2.2 Caso $k_0=0.35$

A partir de los resultados de los análisis tridimensionales se construyeron las curvas características de cada caso estudiado, que aparecen en el ANEXO .

En la Tabla 4. 6 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 4. 6. Resultados de análisis para $k_0=0.35$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.

Caso	Avance (m)	Profundidad (m)	Peso del suelo tapa (kN/m^3)	$U_{\text{máximo}}$ (mm)	P_i/P_0 (máximo)	P_i/P_0 (final)
05-a_con	3	30	24	20.182	1.131	0.162
05-b_con	3	75	132	68.088	1.176	0.167
05-c_con	3	150	312	178.682	1.162	0.165
05-d_con	3	200	432	265.526	1.189	0.164

A partir de los análisis tridimensionales y las curvas características obtenidas se construyeron dos gráficas. En las figuras aparece la relación de esfuerzos frente al desplazamiento vertical en la clave del túnel y la relación de esfuerzos vs distancia al frente, para un valor de $k_0=0.35$, con longitudes de avances de 3 m. a distintas profundidades.

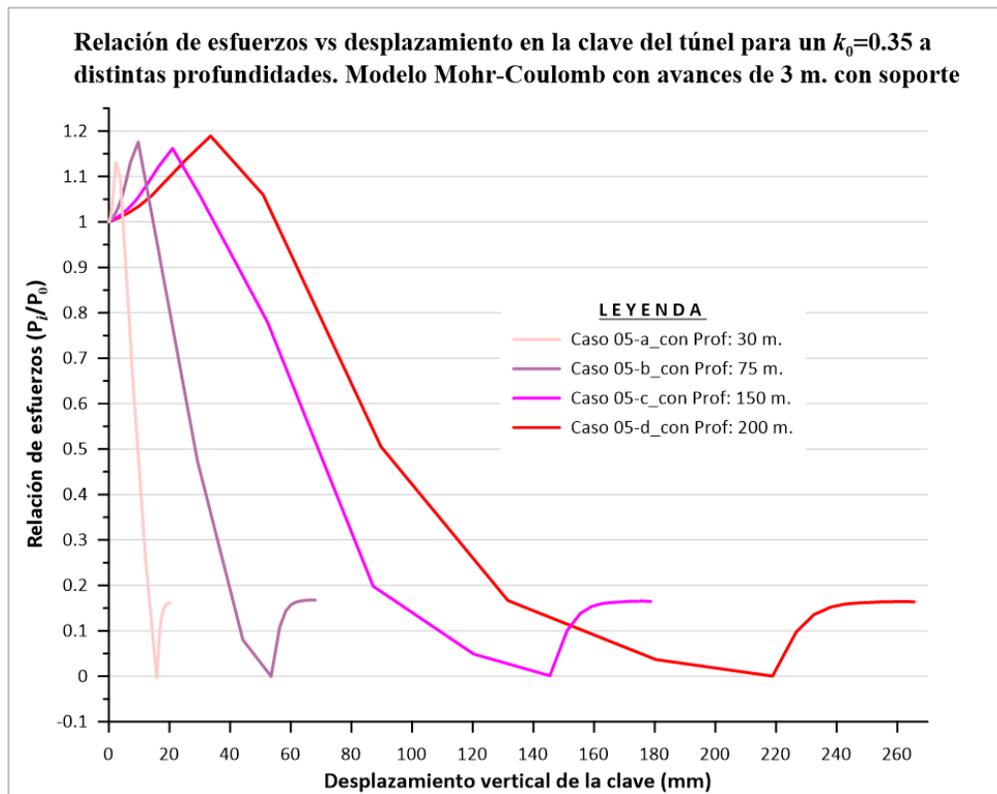


Figura 4. 28. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.35$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

Se observa en la Figura 4. 28 y en la Tabla 4. 6 que la relación de esfuerzos aumenta entre 15% y 20% y que se incrementa conforme aumenta la profundidad. Asimismo, puede verse que los desplazamientos

verticales en la clave del túnel se incrementan a medida que aumenta la profundidad, presentando desplazamientos de 20, 68, 179 y 266 mm.

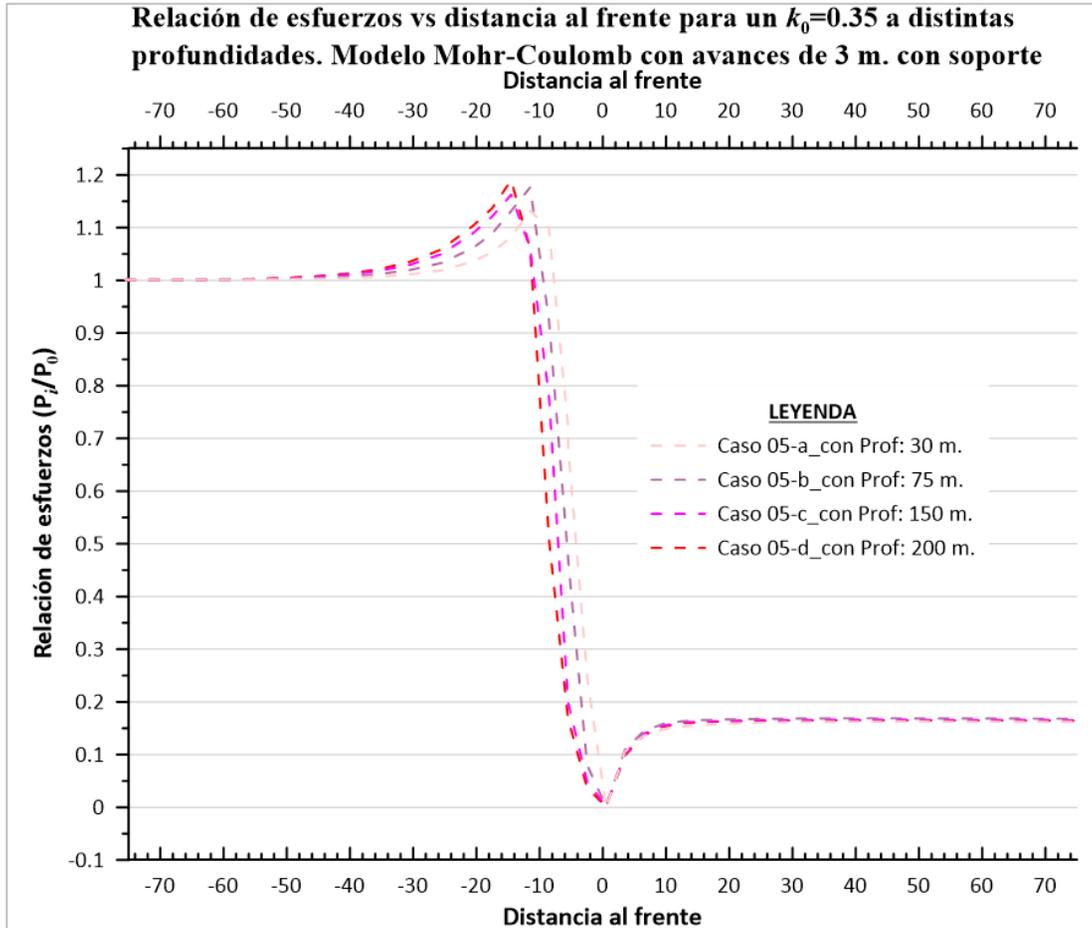


Figura 4. 29. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.35$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3m. con soporte.

En la Figura 4. 29 se puede apreciar que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 45 m. de la distancia al frente hasta los 10 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico, y que las recuperaciones de esfuerzos son similares (alrededor de 16%).

4.3.2.3 Caso $k_0=0.75$

Con los resultados de los análisis tridimensionales se construyeron las curvas características de los casos estudiados, las mismas que se encuentran en el ANEXO.

En la Tabla 4. 7 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 4.7. Resultados de análisis para $k_0=0.75$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.

Caso	Avance (m)	Profundidad (m)	Peso del suelo tapa (kN/m ³)	$U_{máximo}$ (mm)	P_i/P_0 (máximo)	P_i/P_0 (final)
06-a_con	3	30	24	16.476	1.101	0.236
06-b_con	3	75	132	58.506	1.127	0.217
06-c_con	3	150	312	157.877	1.182	0.206
06-d_con	3	200	432	238.490	1.214	0.164

Se construyeron dos gráficas a partir de los análisis tridimensionales y las curvas características obtenidas. En las figuras aparece la relación de esfuerzos frente al desplazamiento vertical en la clave del túnel y la relación de esfuerzos vs distancia al frente, para un valor de $k_0=0.75$, con longitudes de avance de 3m. a distintas profundidades.

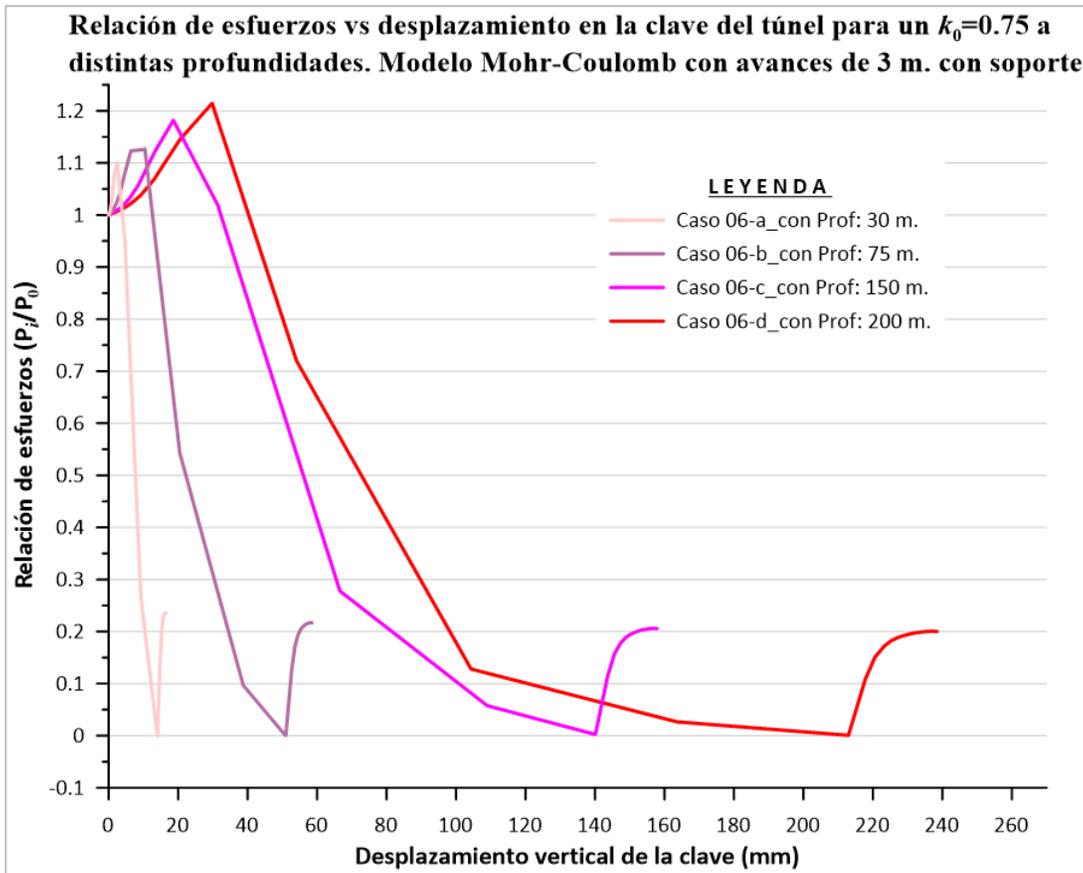


Figura 4. 30. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.75$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

Como puede verse en la Figura 4. 30 y en la Tabla 4. 7, la relación de esfuerzos aumenta entre 10% y 20% y se incrementa conforme aumenta la profundidad. Igualmente se observa que los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan conforme aumenta la profundidad, y los desplazamientos son de 16, 58, 158 y 238 mm.

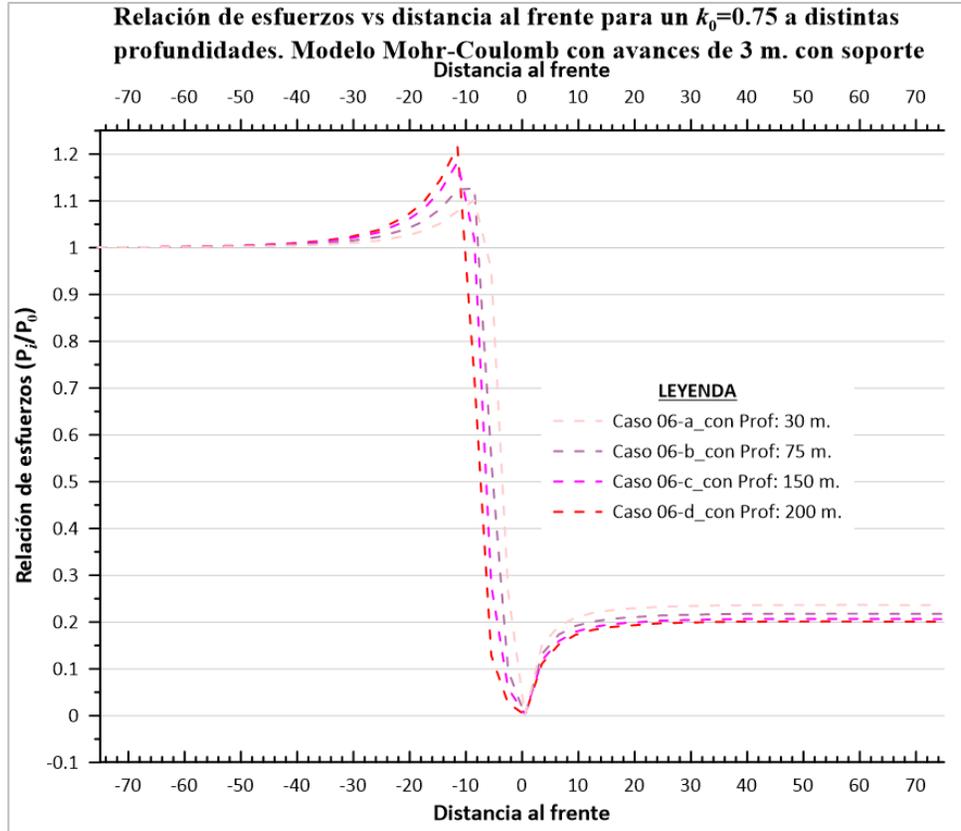


Figura 4. 31. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.75$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

En la Figura 4. 31 se observa que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 45 m. de la distancia al frente hasta los 8 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico. También se aprecia que las recuperaciones de esfuerzos son similares (alrededor de 20%).

4.3.2.4 Caso $k_0=1.00$

A partir de los resultados de los análisis tridimensionales se construyeron las correspondientes curvas características de los casos estudiados. Las curvas se pueden apreciar en el ANEXO .

En la Tabla 4. 8 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 4. 8. Resultados de análisis para $k_0=1.00$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.

Caso	Avance (m)	Profundidad (m)	Peso del suelo tapa (kN/m^3)	$U_{\text{máximo}}$ (mm)	P_i/P_0 (máximo)	P_i/P_0 (final)
07-a_con	3	30	24	17.740	1.081	0.289
07-b_con	3	75	132	68.147	1.136	0.257
07-c_con	3	150	312	186.878	1.156	0.240
07-d_con	3	200	432	280.904	1.185	0.232

A partir de los análisis tridimensionales y las curvas características se construyeron dos gráficas. Las figuras muestran la relación de esfuerzos vs desplazamiento vertical en la clave del túnel y la relación de esfuerzos vs distancia al frente, para un valor de $k_0=1.00$, con longitudes de avance de 3m. a distintas profundidades.

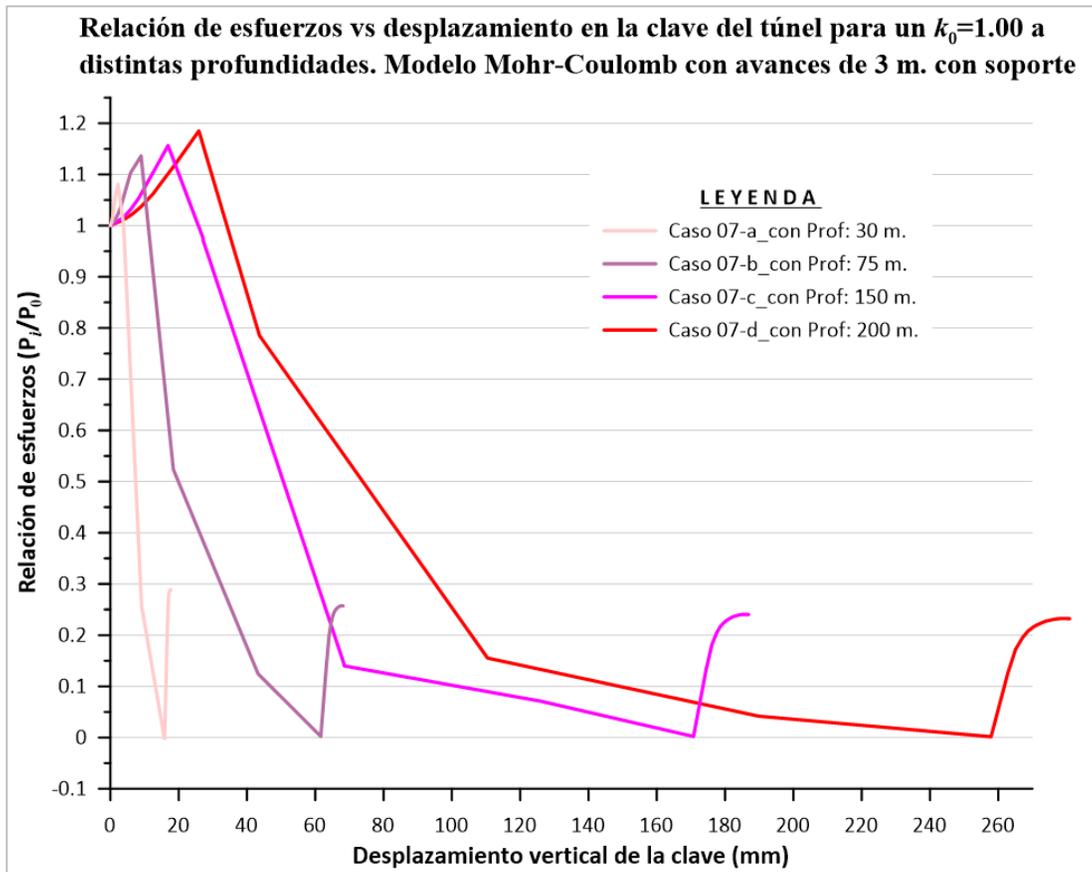


Figura 4. 32. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=1.00$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

En la Figura 4. 32 y en la Tabla 4. 8 se observa que la relación de esfuerzos aumenta entre 10% y 20% y se incrementa conforme aumenta la profundidad. También se ve que los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan conforme aumenta la profundidad, presentando desplazamientos de 18, 68, 187 y 281 mm.

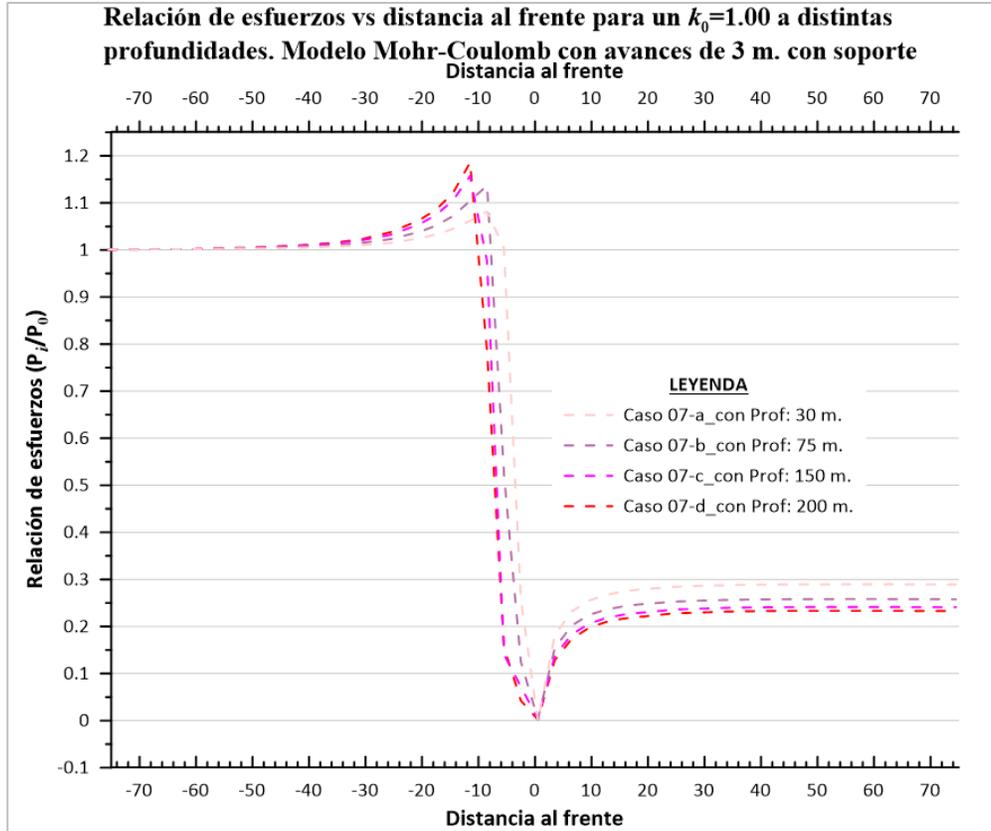


Figura 4. 33. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=1.00$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

Se observa en la Figura 4. 33 que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 45 m. de la distancia al frente hasta los 8 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico, y que las recuperaciones de esfuerzos están entre 25% a 30%.

4.3.2.5 Caso $k_0=1.25$

A partir de los resultados de los análisis tridimensionales se construyeron las correspondientes curvas características. Éstas aparecen en el ANEXO .

En la Tabla 4. 9 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 4. 9. Resultados de análisis para $k_0=1.25$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.

Caso	Avance (m)	Profundidad (m)	Peso del suelo tapa (kN/m^3)	$U_{\text{máximo}}$ (mm)	P_i/P_0 (máximo)	P_i/P_0 (final)
08-a_con	3	30	24	19.474	1.057	0.344
08-b_con	3	75	132	80.124	1.128	0.300
08-c_con	3	150	312	225.869	1.132	0.279
08-d_con	3	200	432	347.706	1.156	0.264

Se construyeron dos gráficas a partir de los análisis tridimensionales y las curvas características obtenidas. En las figuras que se presentan aparece la relación de esfuerzos frente al desplazamiento vertical en la clave del túnel y la relación de esfuerzos vs distancia al frente, para un valor de $k_0=1.25$, con longitud de avance de 3 m. a distintas profundidades.

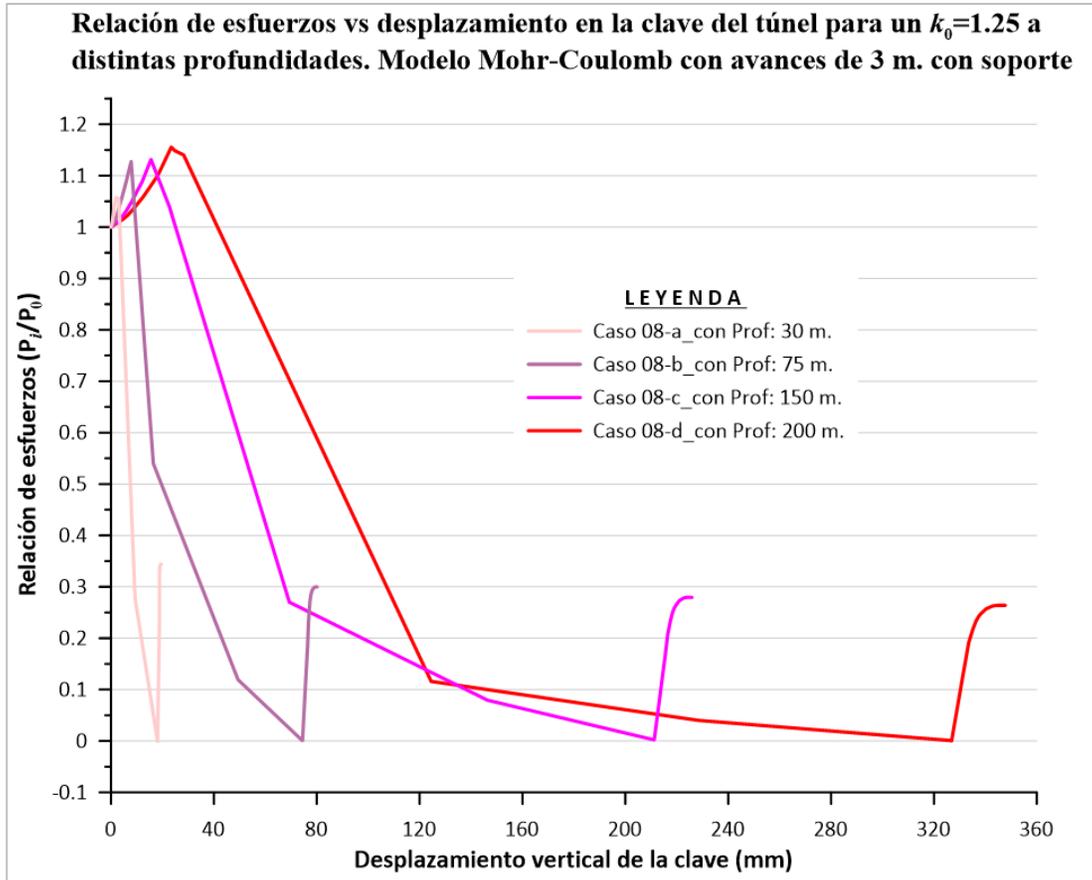


Figura 4. 34. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=1.25$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

Como puede verse en la Figura 4. 34 y en la Tabla 4. 9 la relación de esfuerzos aumenta entre 10% y 15% y se incrementa conforme aumenta la profundidad. Se observa también que los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan a medida que la profundidad aumenta, y que los desplazamientos son de 20, 80, 226 y 348 mm.

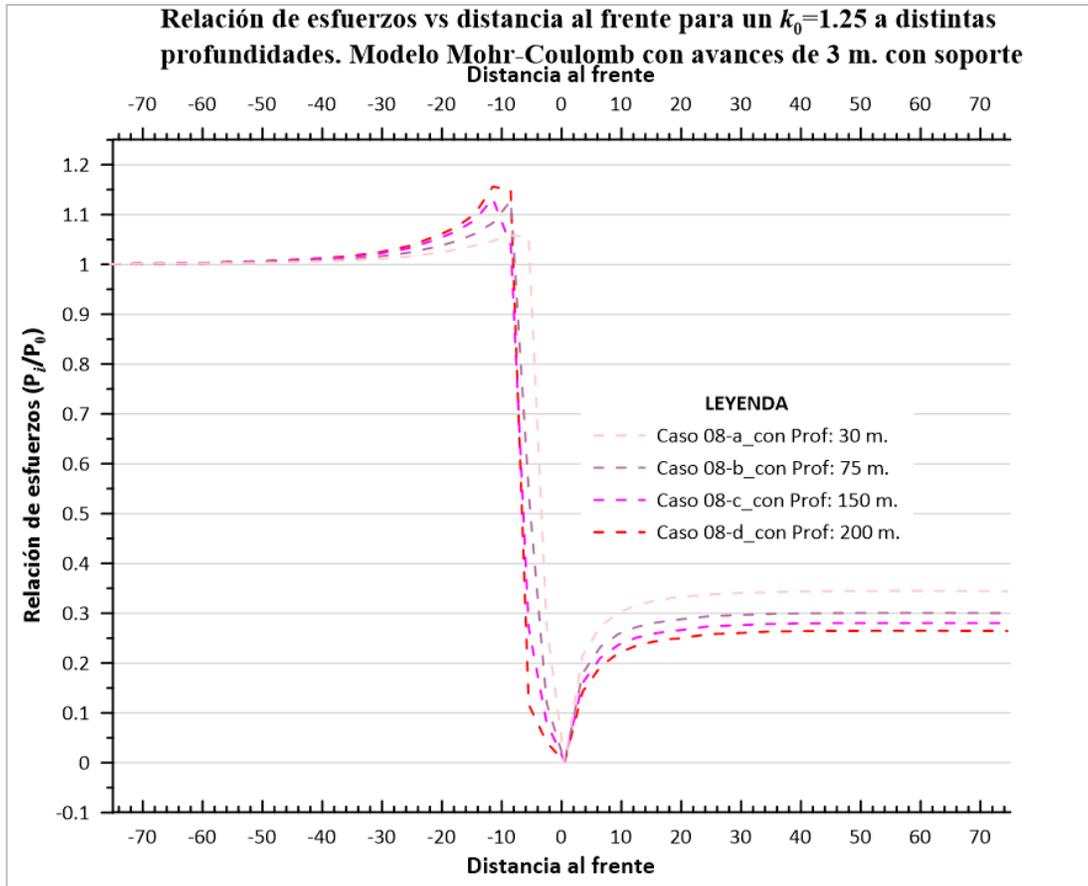


Figura 4. 35. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=1.25$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

Como puede verse en la Figura 4. 35, el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 45 m. de la distancia al frente hasta los 8 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico; asimismo, se puede apreciar que las recuperaciones de esfuerzos están entre 25 y 35%.

4.3.2.6 Conclusiones

De los 28 casos estudiados de coeficiente de k_0 se concluye que:

- La relación de esfuerzos aumenta entre 5% y 25% y se incrementa conforme aumenta la profundidad, como se observa en la Tabla 4. 10.
- Los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan conforme se aumenta la profundidad, tal como puede verse en la Figura 4. 34.
- El aumento de la relación de esfuerzos en la clave del túnel ocurre entre 45 a 8 m. antes de la llegada del frente a la sección de control.
- Las recuperaciones de esfuerzos son similares cuando se mantiene constante el valor de k_0 y se varía la profundidad, como se aprecia en la Tabla 4. 10.
- Los valores de recuperación de esfuerzos están entre 16% y 35% para los casos estudiados, como se observa en la Tabla 4. 10.

Tabla 4. 10. Resultado de análisis para distintos valores de k_0 en el túnel circular con avances de 3 m.

Caso k_0	Profundidad (m)	$U_{máximo}$ (mm)	Rango de $U_{máximo}$ (mm)	P_i/P_0 (máximo)	Rango de P_i/P_0 (máximo)	P_i/P_0 (final)	Rango de P_i/P_0 (final)
0.35	30	20.182	15 a 20	1.131	1.05 a 1.13	0.162	0.16 a 0.35
0.50		17.001		1.115		0.183	
0.75		16.476		1.101		0.236	
1.00		17.740		1.081		0.289	
1.25		19.474		1.057		0.344	
0.35	75	68.088	55 a 80	1.176	1.12 a 1.18	0.167	0.16 a 0.30
0.50		56.559		1.151		0.186	
0.75		58.506		1.127		0.217	
1.00		68.147		1.136		0.257	
1.25		80.124		1.128		0.300	
0.35	150	178.682	155 a 225	1.162	1.13 a 1.21	0.165	0.16 a 0.28
0.50		148.490		1.210		0.180	
0.75		157.877		1.182		0.206	
1.00		186.878		1.156		0.240	
1.25		225.869		1.132		0.279	
0.35	200	265.526	225 a 350	1.189	1.15 a 1.25	0.164	0.16 a 0.27
0.50		226.001		1.245		0.178	
0.75		238.490		1.214		0.164	
1.00		280.904		1.185		0.232	
1.25		347.706		1.156		0.264	

4.4 MODELO CON SECCIÓN DE TÚNEL CARRTERO

Se llevaron a cabo los análisis tridimensionales para el modelo con una sección propia de un túnel de carretera para el caso de avances de 3 metros bajo distintos campos iniciales de esfuerzos y diferentes coeficientes de k_0 . Se consideraron las propiedades del suelo de la Tabla 4. 1 y las propiedades del sostenimiento de la Tabla 4. 2.

4.4.1 Campos de esfuerzos iniciales

Para los casos de campos iniciales de esfuerzos se consideraron los modelos constitutivos elástico lineal y Mohr-Coulomb, avances de excavación de 3 m. y campos de esfuerzos iniciales de 720 y 3600 kN/m², así como la presencia o no de soporte. Todos los casos analizados para los campos de esfuerzos iniciales se muestran en la Figura 4. 36.

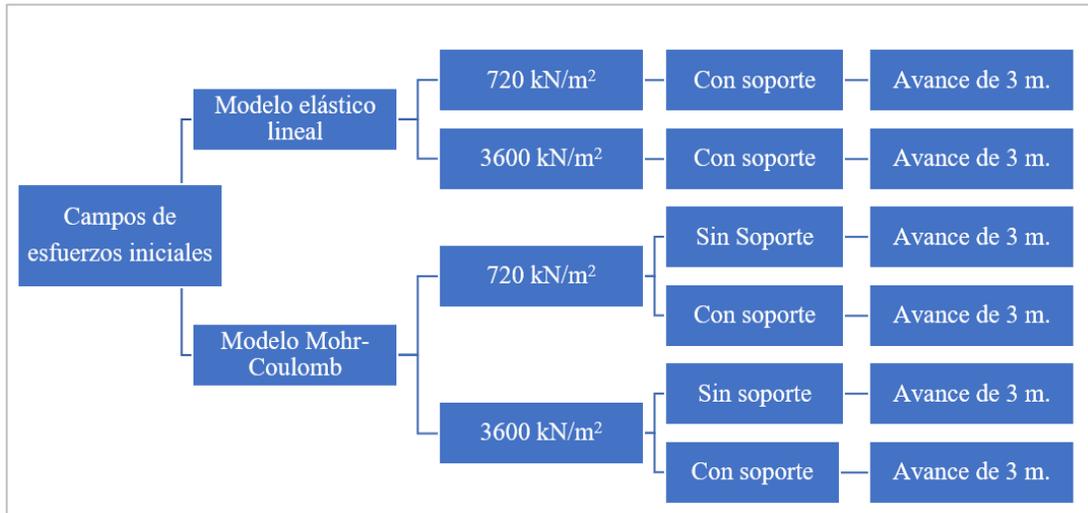


Figura 4. 36. Casos analizados para los campos de esfuerzos iniciales en el modelo de túnel carretero.

4.4.1.1 Modelo elástico lineal

En los casos donde el terreno se considera elástico lineal se emplearon campos de esfuerzos iniciales de 720 y 3600 kN/m².

En primer lugar se realizaron los análisis tridimensionales y con los resultados obtenidos se construyeron las curvas característica de cada caso. En el ANEXO se presentan las curvas.

En la Tabla 4. 11 se muestran los resultados de los 2 casos estudiados obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 4. 11. Resultado de análisis para diferentes campos iniciales con el modelo elástico lineal.

Caso	Estado inicial (kN/m ²)	Profundidad equivalente (m)	Avance (m)	Sostenimiento	$U_{máximo}$ (mm)	P_i/P_0 (máximo)	P_i/P_0 (final)
00-a_con	720	30	3	Si	11.713	1.076	0.215
00-b_con	3600	150	3	Si	58.565	1.076	0.215

A partir de los análisis tridimensionales y las curvas características obtenidas se construyeron dos gráficas. La Figura 4. 37 muestra relación de esfuerzos frente al desplazamiento vertical en la clave del túnel; en la Figura 4. 38, la relación de esfuerzos vs distancia al frente.

En la Figura 4. 37 y en la Tabla 4. 11 se observa que la relación de esfuerzos aumenta alrededor de 8% tanto para el caso de campo de esfuerzos iniciales de 720 como para el de 3600 kN/m², mientras que los desplazamientos para el caso de campos de esfuerzos iniciales de 720 kN/m² es de 12 mm y para el caso de 3600 kN/m² es de 59 mm.

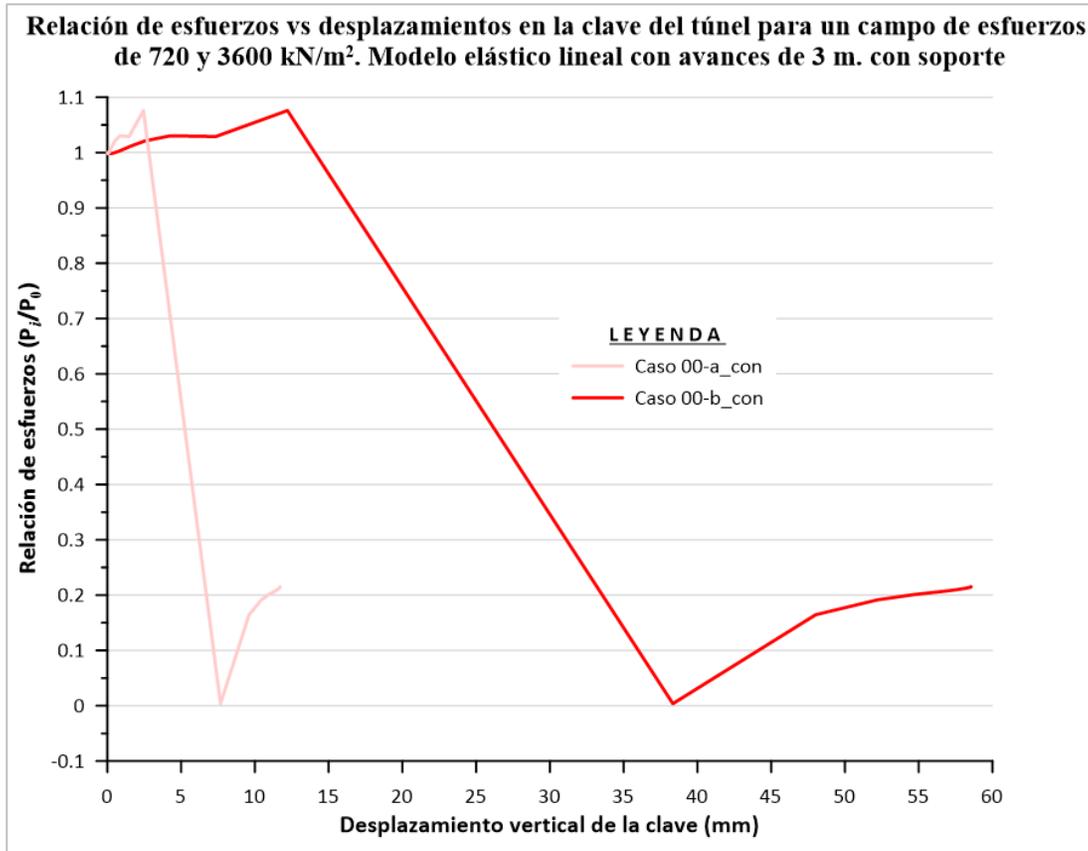


Figura 4. 37. Relación de esfuerzos vs desplazamientos en la clave del túnel para un campo de esfuerzos de 720 y 3600 kN/m². Modelo elástico lineal con avances de 3 m. con soporte.

En la Figura 4. 38 se observa que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 20 m. de la distancia al frente hasta los 2 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico, además que las recuperaciones de esfuerzos son iguales (de 22%) para los casos de campo de esfuerzos iniciales de 720 y 3600 kN/m². Un detalle importante de resaltar es que para ambos casos de campos de esfuerzos iniciales de 720 y 3600 kN/m² las gráficas son iguales y se superponen.

En las gráficas se observa que, antes del cruce del túnel por la sección de control, la relación de esfuerzo $\frac{P_i}{P_o} > 1$, como se indicó en el capítulo 2.5.4.

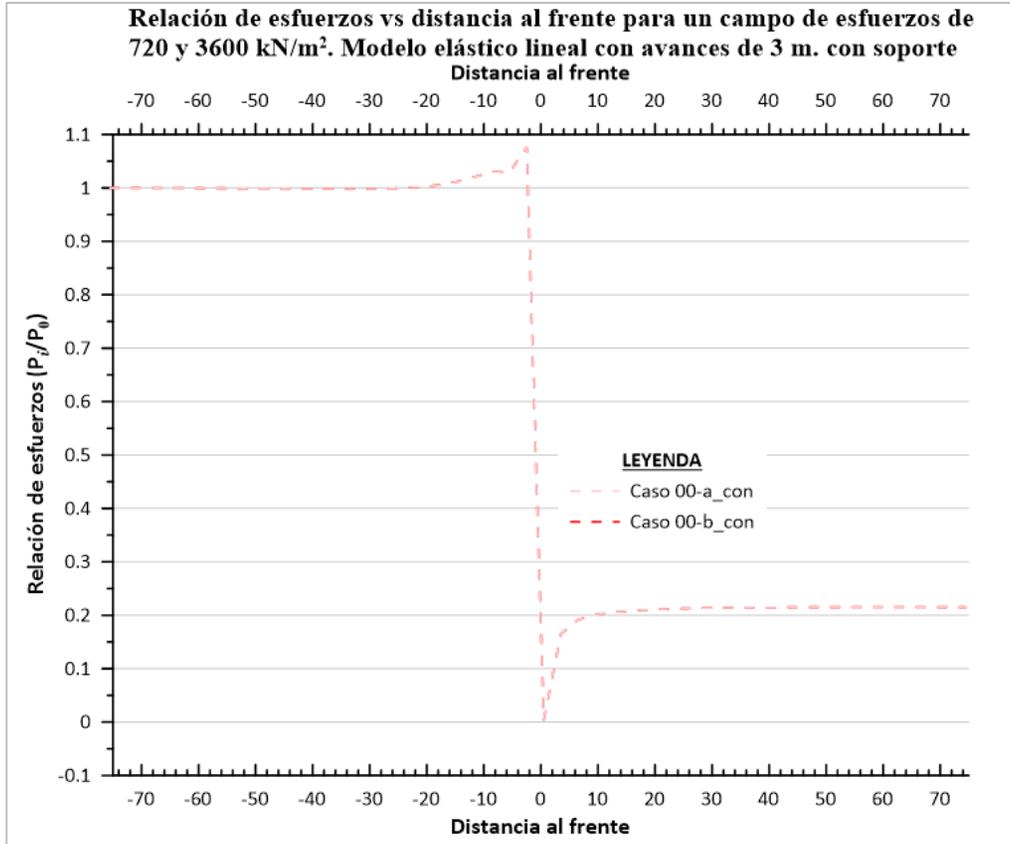


Figura 4. 38. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un campo de esfuerzos de 720 y 3600 kN/m². Modelo elástico lineal con avances de 3 m. con soporte.

4.4.1.2 Modelo elastoplástico de Mohr-Coulomb

Se aplicó el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb a un total de 4 casos con campos de esfuerzos iniciales de 720 y 3600 kN/m².

Con los resultados obtenidos de los análisis tridimensionales se construyeron las correspondientes curvas características. Estas curvas se encuentran en el ANEXO .

En la Tabla 4. 12 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 4. 12. Resultados de análisis para diferentes campos de esfuerzos con el modelo Mohr-Coulomb.

Caso	Estado inicial (kN/m ²)	Profundidad equivalente (m)	Avance (m)	Sostenimiento	$U_{máximo}$ (mm)	P_i/P_0 (máximo)	P_i/P_0 (final)
01-a_sin	720	30	3	No	36.621	1.090	0.000
01-b_con	720	30	3	Si	17.677	1.068	0.218
01-c_sin	3600	150	3	No	565.378	1.118	0.000
01-d_con	3600	150	3	Si	222.402	1.173	0.129

En la tabla puede apreciarse que en todos los casos la relación de esfuerzo $\frac{P_i}{P_0} > 1$, antes de la llegada del frente a la sección de control, tal como se indicó en el capítulo 2.5.4.

A partir de los análisis tridimensionales y las curvas características obtenidas se construyeron cuatro gráficas. La Figura 4. 39 muestra relación de esfuerzos vs desplazamiento vertical en la clave del túnel para el caso de campos de esfuerzos iniciales de 720 kN/m²; la Figura 4. 41, para el caso de 3600 kN/m². La Figura 4. 40 muestra la relación de esfuerzos vs distancia al frente para el caso de campos de esfuerzos iniciales de 720 kN/m²; la Figura 4. 42, para el caso de 3600 kN/m².

a) Campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m²

En la Figura 4. 39 y en la Tabla 4. 12 se observa que la relación de esfuerzos aumenta alrededor de 8% al igual que en el caso elástico, los desplazamientos en la clave del túnel es el doble para el caso sin soporte respecto al caso con soporte, presentando desplazamientos de 36 y 18 mm. respectivamente.

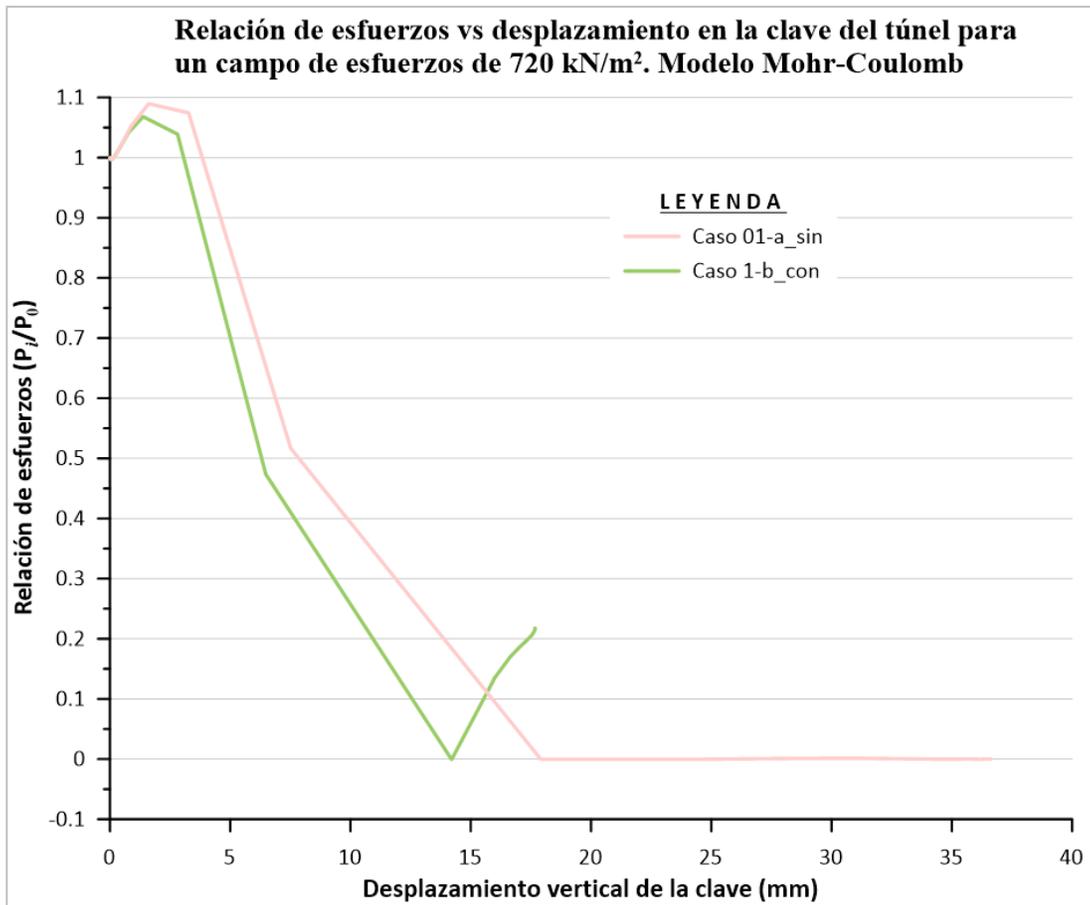


Figura 4. 39. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un campo de esfuerzos de 720 kN/m². Modelo Mohr-Coulomb.

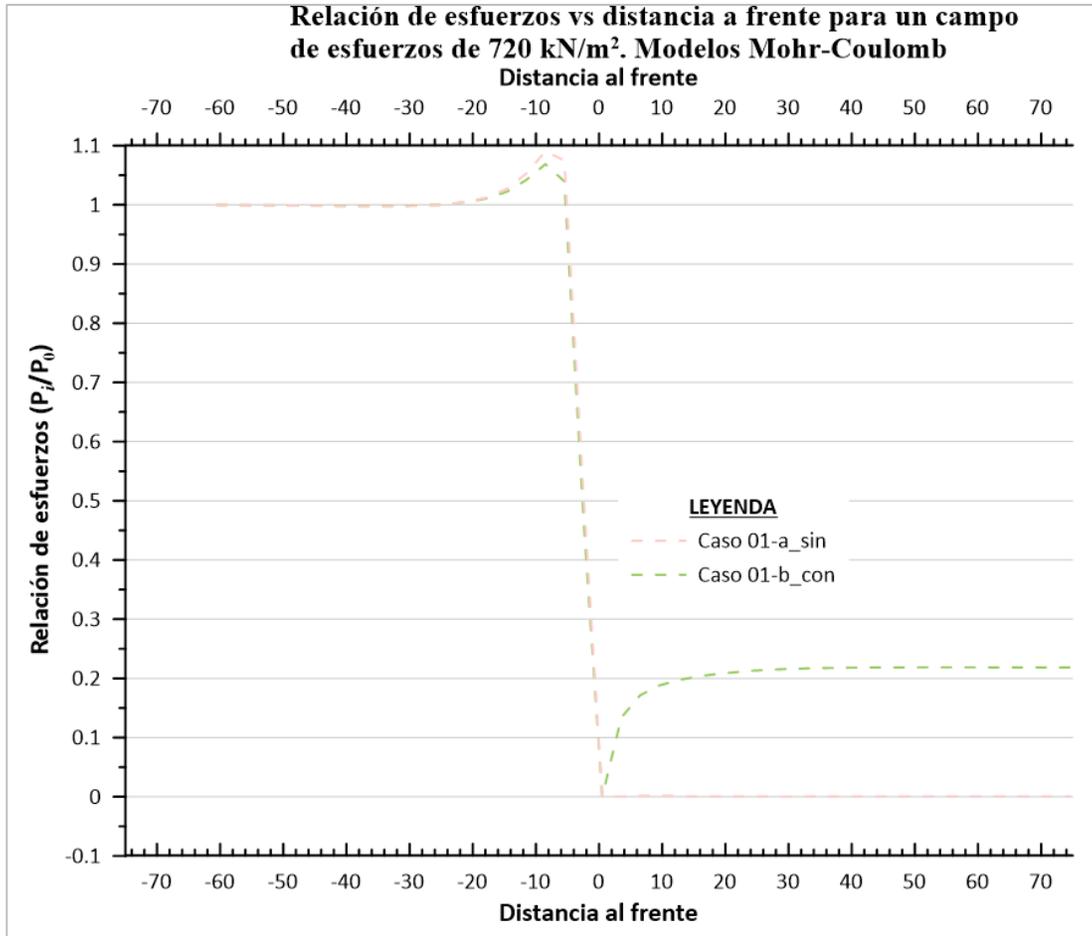


Figura 4. 40. Relación de esfuerzos vs distancia a frente para un campo de esfuerzos de 720 kN/m². Modelos Mohr-Coulomb.

En la Figura 4. 40 se observa que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 20 m. de la distancia al frente hasta los 6 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico, donde se observa también que la recuperación de esfuerzos es alrededor de 22% para el caso con soporte, lo que representa una recuperación similar al caso elástico.

b) Campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m²

Como puede apreciarse en la Figura 4. 41 y en la Tabla 4. 12, la relación de esfuerzos aumenta alrededor de 15%, lo que representa una relación de esfuerzos menor al caso elástico. El desplazamiento en la clave del túnel es 2.5 veces mayor para el caso sin soporte respecto al caso con soporte, presentando desplazamientos de 565 y 222 mm. respectivamente.

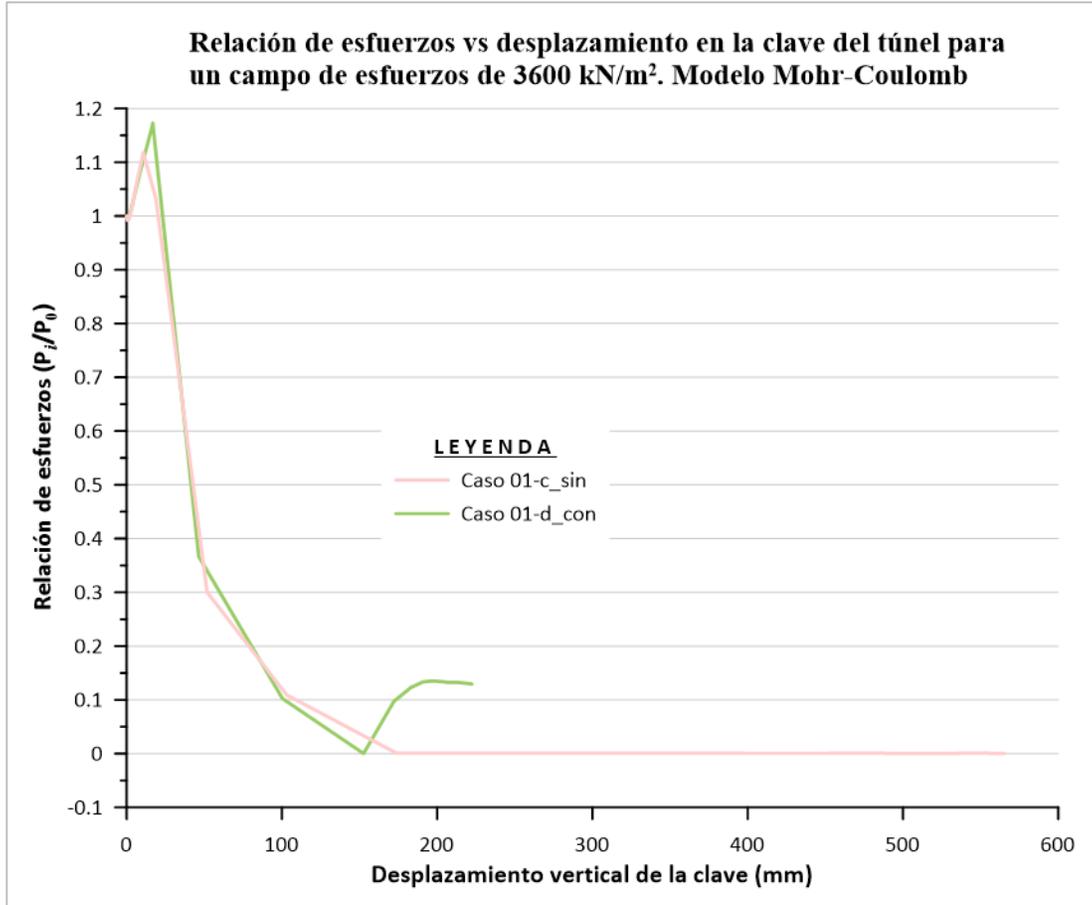


Figura 4. 41. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un campo de esfuerzos de 3600 kN/m². Modelos Mohr-Coulomb.

A continuación, puede apreciarse en la Figura 4. 42 que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 25 m. de la distancia al frente hasta los 8 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico, y que la recuperación de esfuerzos es alrededor de 15% para el caso con soporte, lo que representa una recuperación de esfuerzos menor respecto al caso elástico.

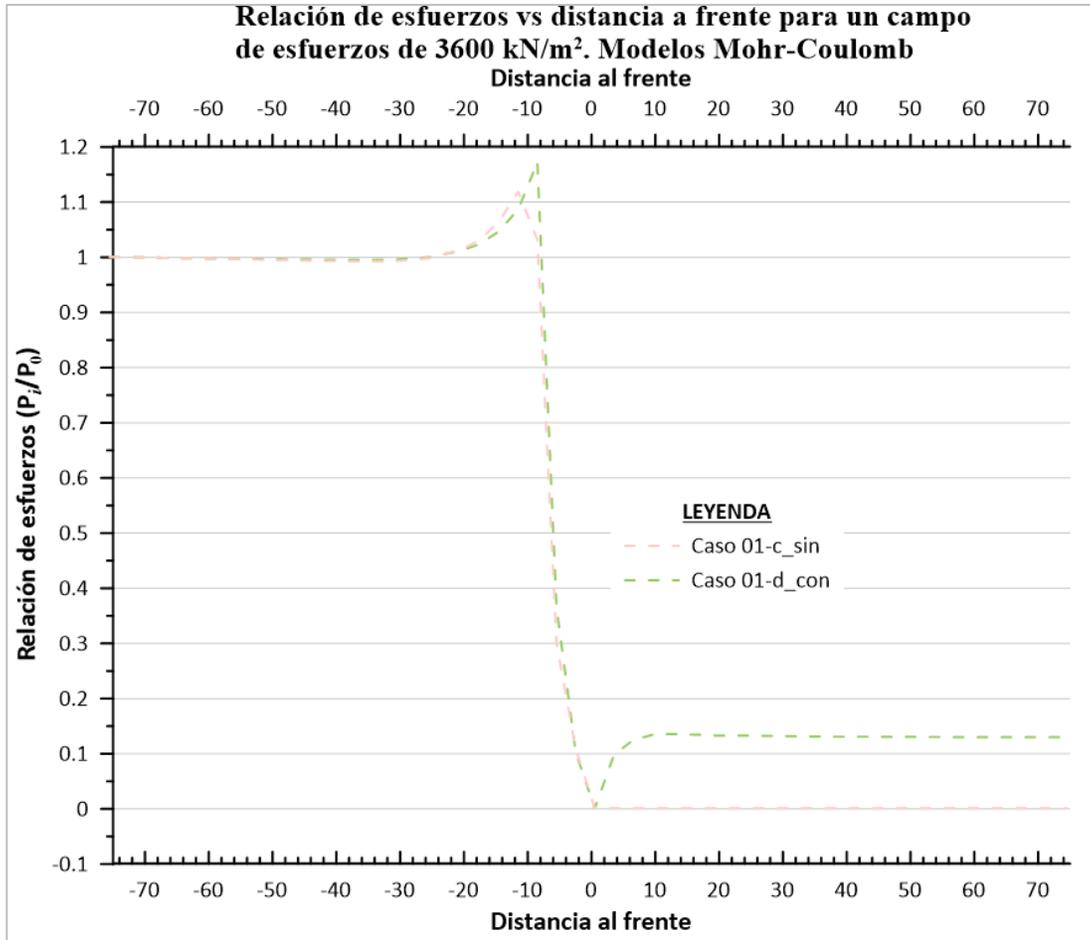


Figura 4. 42. Relación de esfuerzos vs distancia a frente para un campo de esfuerzos de 3600 kN/m². Modelos Mohr-Coulomb.

4.4.1.3 Conclusiones

De los 6 casos estudiados se concluye que:

- El aumento de la relación de esfuerzo para el caso elástico está alrededor de 8%, para el caso elastoplástico está entre 7% y 17%.
- La relación de esfuerzos en todos los casos $\frac{P_i}{P_0} > 1.00$, antes de la llegada del frente a la sección de control, como se indicó en el capítulo 2.5.4.
- Conforme se incrementa la magnitud del campo de esfuerzos, los desplazamientos verticales en la clave del túnel aumentan.
- El aumento de la relación de esfuerzos en la clave del túnel para el caso elástico ocurre entre 25 a 5 m. antes de la llegada del frente de excavación a la sección de control; mientras que para el caso elastoplástico ocurre entre los 25 y 6 m.
- Las recuperaciones de esfuerzos para el caso elástico están alrededor de 21%, para el caso elastoplástico están entre 13% y 21%

4.4.2 Variación del coeficiente de esfuerzo horizontal k_0 en terreno elastoplástico

Para esta sección se empleó el modelo constitutivo Mohr-Coulomb, avance de excavación de 3 m., profundidades de 30, 75, 150 y 200 m. y valores de k_0 de 0.35, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25; todos los casos presentaron soporte. Todos los casos analizados para el coeficiente de esfuerzo horizontal k_0 se muestran en la Figura 4. 43.

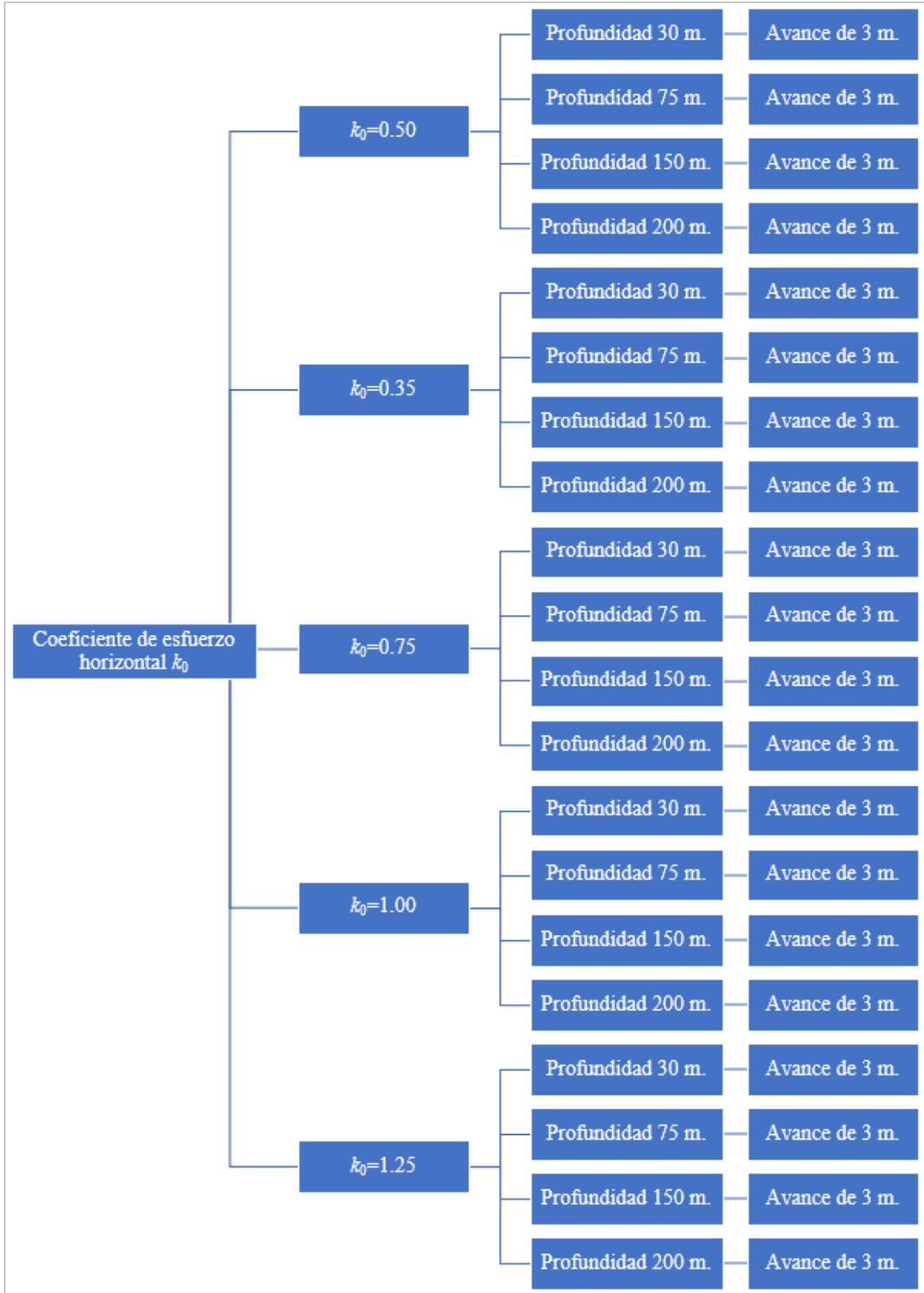


Figura 4. 43. Casos analizados para los coeficientes de esfuerzo horizontal k_0 en el modelo túnel carretero.

4.4.2.1 Caso $k_0=0.50$

Como en los casos anteriores, primero se realizaron los análisis tridimensionales y con los resultados obtenidos se construyeron las correspondientes curvas características. En el ANEXO se muestran las curvas características de los casos estudiados.

En la Tabla 4. 13 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 4. 13. Resultados de análisis para $k_0=0.50$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.

Caso	Avance (m)	Profundidad (m)	Peso del suelo tapa (kN/m^3)	$U_{\text{máximo}}$ (mm)	P_i/P_0 (máximo)	P_i/P_0 (final)
02-a_con	3	30	24	28.381	1.227	0.158
02-b_con	3	75	132	91.101	1.258	0.171
02-c_con	3	150	312	275.177	1.309	0.153
02-d_con	3	200	432	435.983	1.311	0.139

Se construyeron cuatro gráficas a partir de los análisis tridimensionales y las curvas características obtenidas. En las figuras que se presentan puede verse la relación de esfuerzos frente al desplazamiento vertical en la clave del túnel y la relación de esfuerzos vs distancia al frente, para un valor de $k_0=0.50$ a longitudes de avance de 3 m. y a distintas profundidades.

En la Figura 4. 44 y en la Tabla 4. 13 puede verse que la relación de esfuerzos aumenta de 20 y 30% y que está se incrementa conforme aumenta la profundidad, asimismo, que los desplazamientos verticales en la clave del túnel crecen a medida que la profundidad aumenta, y presentan desplazamientos de 28, 91, 275 y 435 mm.

A continuación, en la Figura 4. 45 se observa que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 45 m. de la distancia al frente hasta los 8 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico, y que las recuperaciones de esfuerzos son similares (alrededor de 15%).

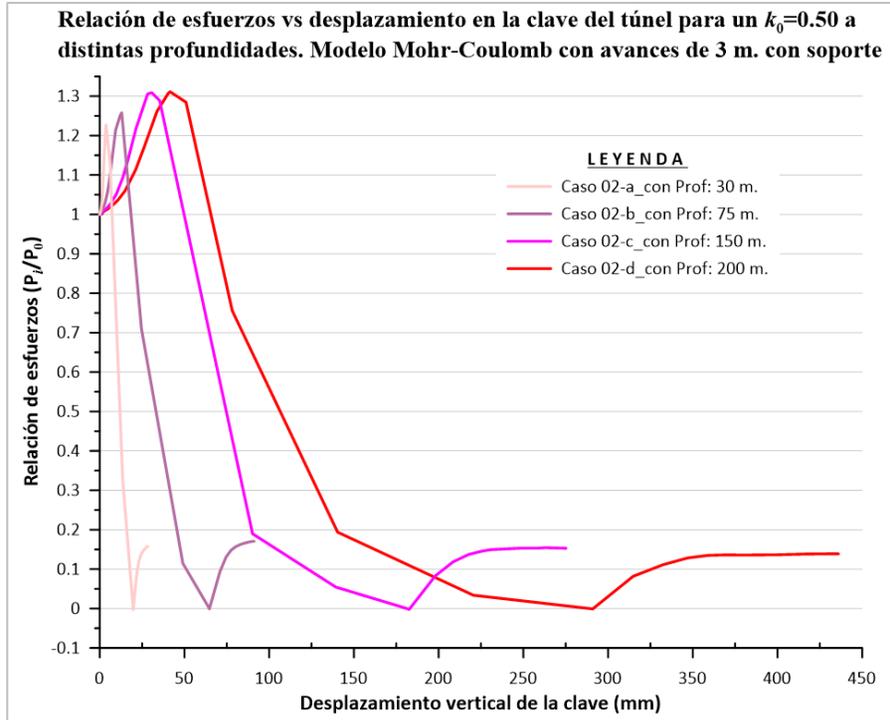


Figura 4. 44. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

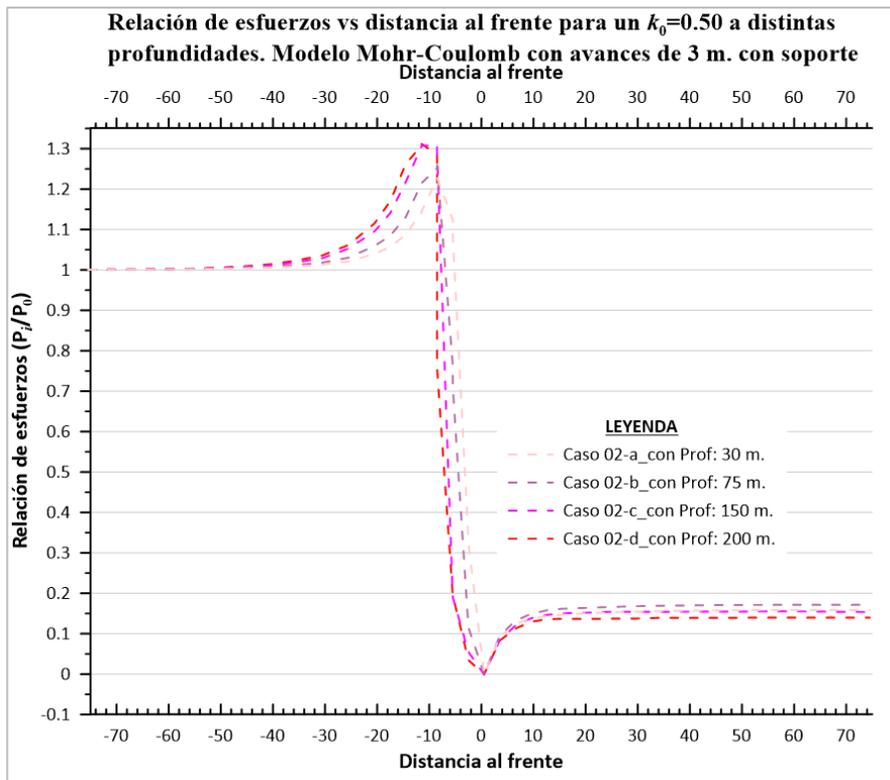


Figura 4. 45. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.50$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

4.4.2.2 Caso $k_0=0.35$

A partir de los resultados de los análisis tridimensionales se construyeron las curvas características de cada caso estudiado, que aparecen en el ANEXO .

En la Tabla 4. 14 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 4. 14. Resultados de análisis para $k_0=0.35$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.

Caso	Avance (m)	Profundidad (m)	Peso del suelo tapa (kN/m^3)	$U_{\text{máximo}}$ (mm)	P_i/P_0 (máximo)	P_i/P_0 (final)
03-a_con	3	30	24	35.898	1.265	0.154
03-b_con	3	75	132	117.147	1.239	0.152
03-c_con	3	150	312	338.868	1.221	0.146
03-d_con	3	200	432	548.877	1.236	0.136

A partir de los análisis tridimensionales y las curvas características obtenidas se construyeron dos gráficas. En las figuras aparece la relación de esfuerzos frente al desplazamiento vertical en la clave del túnel y la relación de esfuerzos vs distancia al frente, para un valor de $k_0=0.35$, con longitudes de avances de 3 m. a distintas profundidades.

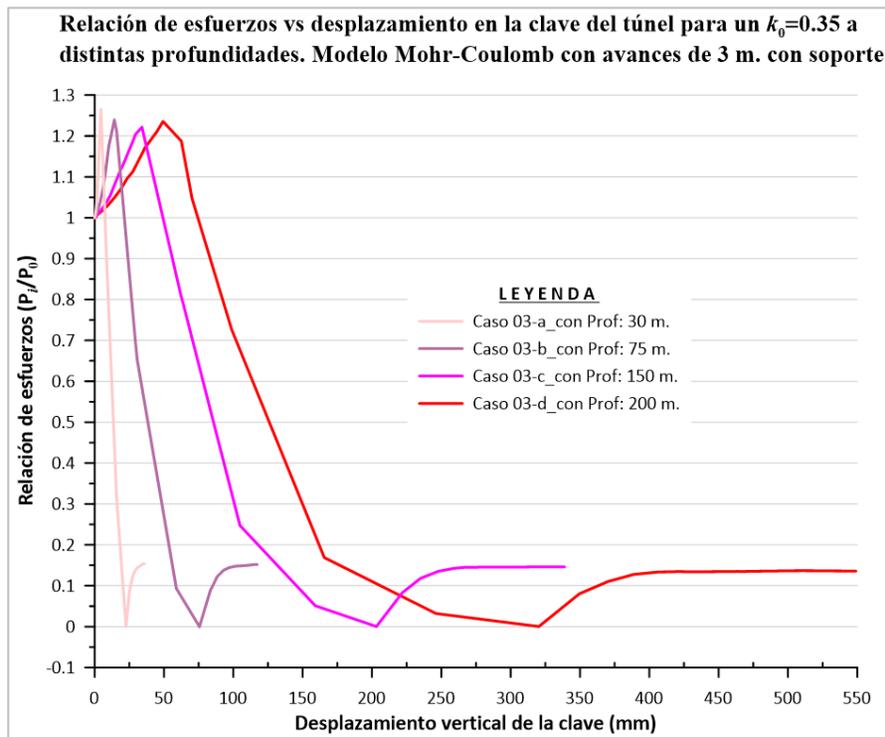


Figura 4. 46. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.35$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

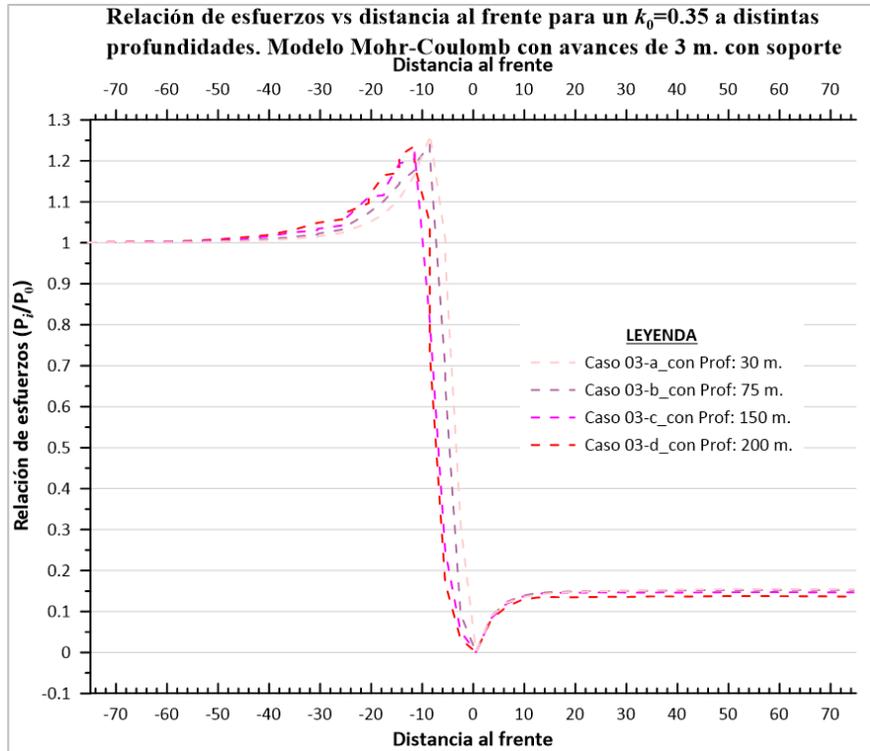


Figura 4. 47. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.35$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

Se observa en la Figura 4. 46 y en la Tabla 4. 14 que la relación de esfuerzos aumenta entre 20% y 25%. y que se incrementa conforme aumenta la profundidad. Asimismo, puede verse que los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan a medida que aumenta la profundidad, presentando desplazamientos de 36, 117, 339 y 549 mm.

En la Figura 4. 47 se puede apreciar que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 45 m. de la distancia al frente hasta los 8 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico; y que las recuperaciones de esfuerzos son similares (alrededor de 15%).

4.4.2.3 Caso $k_0=0.75$

Con los resultados de los análisis tridimensionales se construyeron las curvas características de los casos estudiados, las mismas que aparecen en el ANEXO .

En la Tabla 4. 15 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 4. 15. Resultados de análisis para $k_0=0.75$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.

Caso	Avance (m)	Profundidad (m)	Peso del suelo tapa (kN/m^3)	$U_{\text{máximo}}$ (mm)	P_i/P_0 (máximo)	P_i/P_0 (final)
04-a_con	3	30	24	26.557	1.186	0.180
04-b_con	3	75	132	89.273	1.245	0.188
04-c_con	3	150	312	260.403	1.297	0.156
04-d_con	3	200	432	434.493	1.337	0.140

Se construyeron dos gráficas a partir de los análisis tridimensionales y las curvas características obtenidas. En las figuras aparece la relación de esfuerzos frente al desplazamiento vertical en la clave del túnel y la relación de esfuerzos vs distancia al frente, para un valor de $k_0=0.75$, con longitudes de avance de 3 m. a distintas profundidades.

Como puede verse en la Figura 4. 48 y en la Tabla 4. 15, la relación de esfuerzos aumenta entre 20% y 30% y se incrementa conforme aumenta la profundidad. Igualmente se observa que los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan conforme aumenta la profundidad, y los desplazamientos son de 27, 89, 260 y 435 mm.

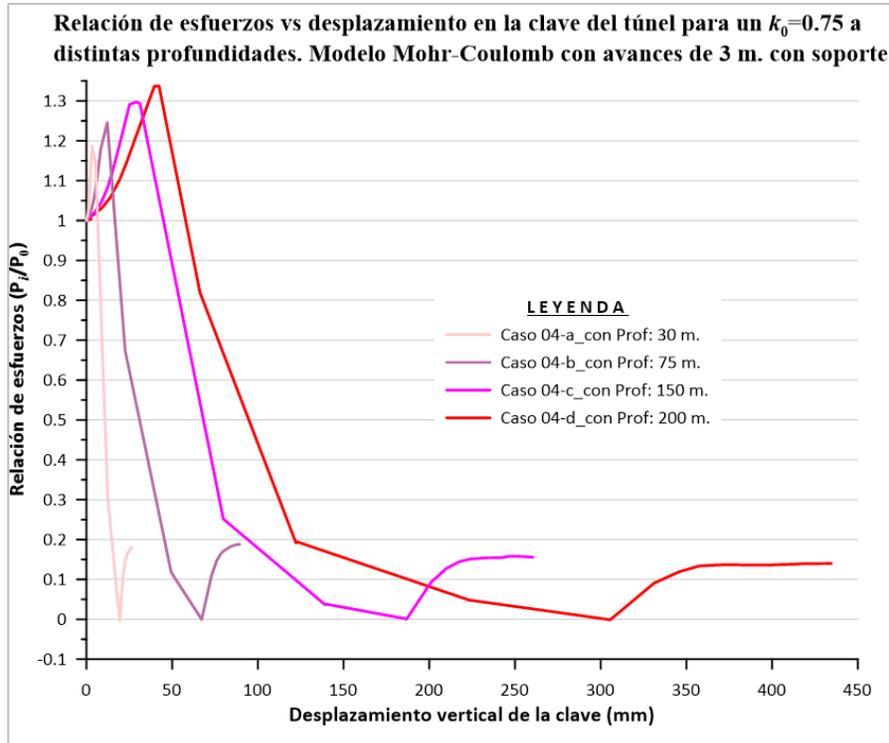


Figura 4. 48. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=0.75$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

En la Figura 4. 49 se observa que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 45 m. de la distancia al frente hasta los 8 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico. También se aprecia que las recuperaciones de esfuerzos son están entre 15% y 20%.

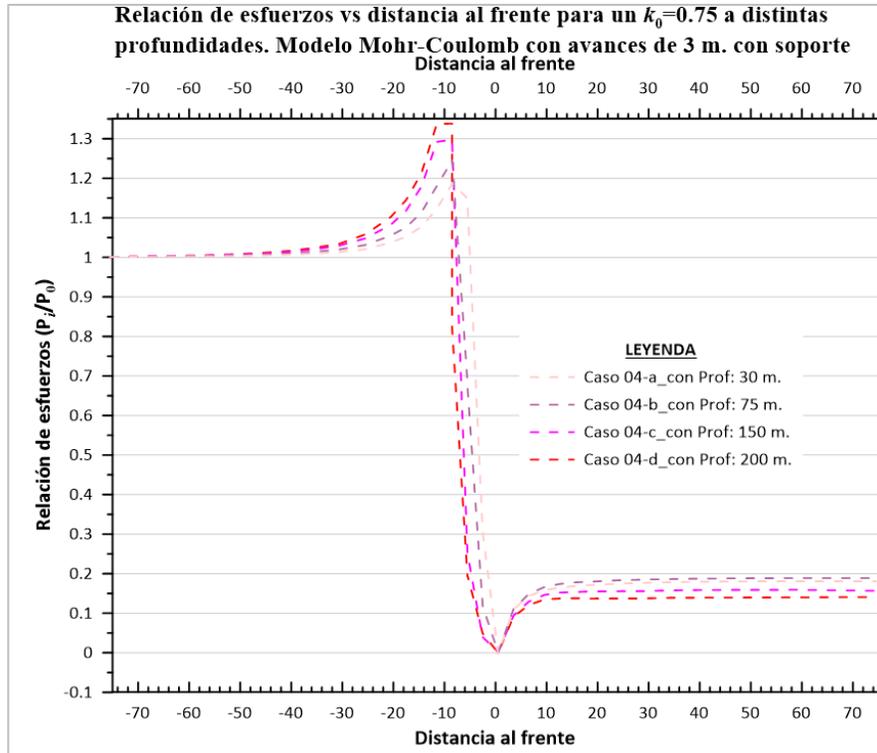


Figura 4. 49. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=0.75$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte

4.4.2.4 Caso $k_0=1.00$

A partir de los resultados de los análisis tridimensionales se construyeron las correspondientes curvas características de los casos estudiados. Son las que aparecen en el ANEXO .

En la Tabla 4. 16 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 4. 16. Resultados de análisis para $k_0=1.00$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.

Caso	Avance (m)	Profundidad (m)	Peso del suelo tapa (kN/m^3)	$U_{\text{máximo}}$ (mm)	P_i/P_0 (máximo)	P_i/P_0 (final)
05-a_con	3	30	24	27.724	1.161	0.241
05-b_con	3	75	132	104.791	1.235	0.220
05-c_con	3	150	312	304.073	1.286	0.163
05-d_con	3	200	432	537.383	1.319	0.145

A partir de los análisis tridimensionales y las curvas características se construyeron dos gráficas. Las figuras muestran la relación de esfuerzos vs desplazamiento vertical en la clave del túnel y la relación de esfuerzos vs distancia al frente, para un valor de $k_0=1.00$, con longitudes de avance de 3m. a distintas profundidades.

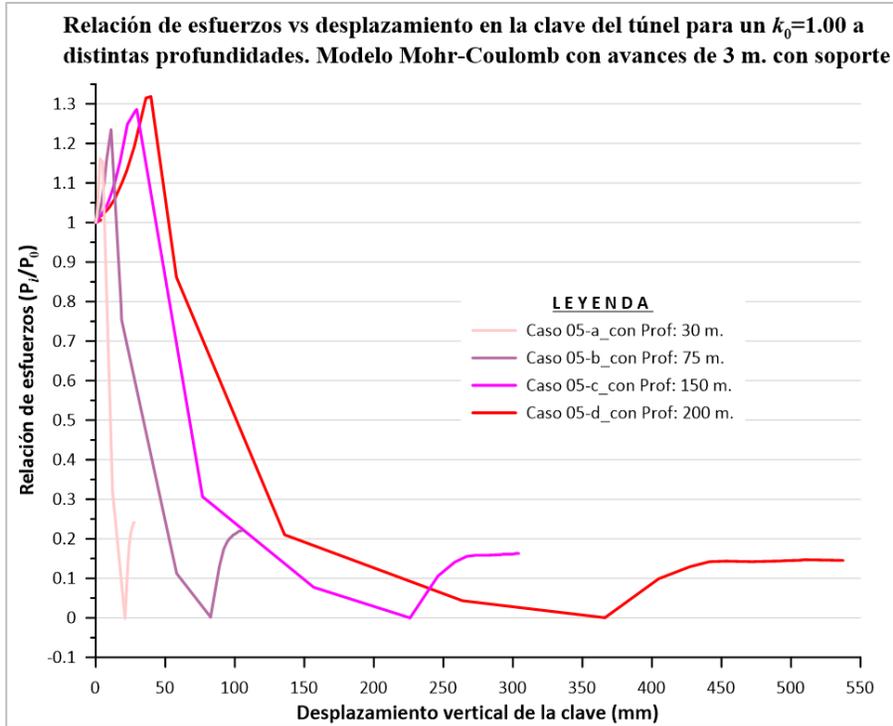


Figura 4. 50. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un k_0 1.00 a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

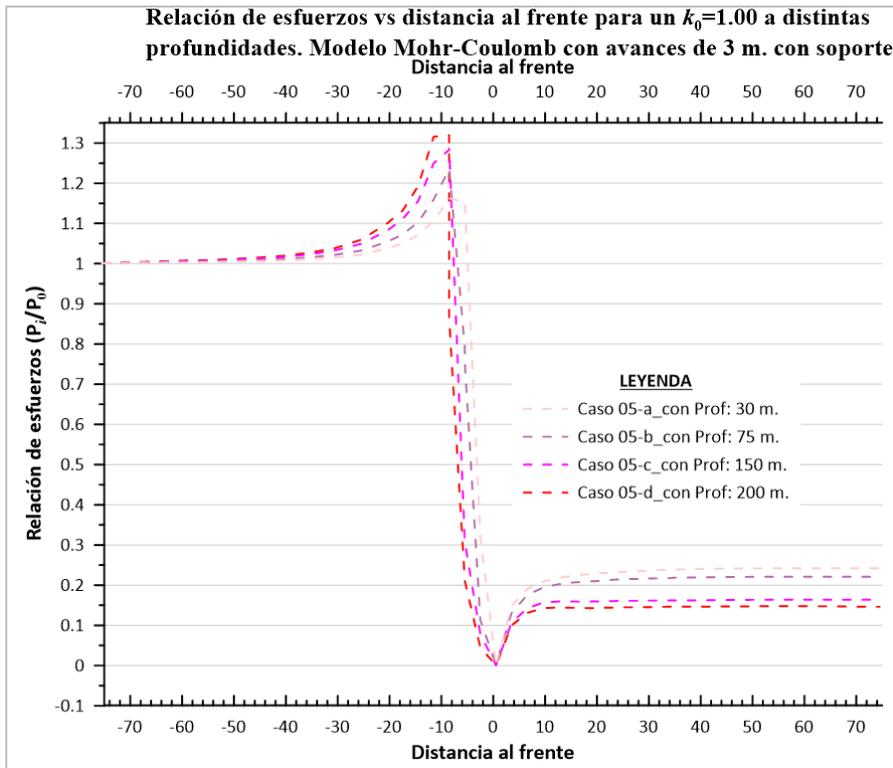


Figura 4. 51. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=1.00$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

En la Figura 4. 50 y en la Tabla 4. 16 se observa que la relación de esfuerzos aumenta entre 10 y 20% y se incrementa conforme aumenta la profundidad. También se ve que los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan conforme aumenta la profundidad, presentando desplazamientos de 28, 105, 304 y 537 mm.

Se observa en la Figura 4. 51 que el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 50 m. de la distancia al frente hasta los 6 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico, y que las recuperaciones de esfuerzos están entre 15% a 25%.

4.4.2.5 Caso $k_0=1.25$

A partir de los resultados de los análisis tridimensionales se construyeron las correspondientes curvas características. Éstas aparecen en el ANEXO .

En la Tabla 4. 17 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 4. 17. Resultados de análisis para $k_0=1.25$ a distintas profundidades con el modelo Mohr-Coulomb.

Caso	Avance (m)	Profundidad (m)	Peso del suelo tapa (kN/m^3)	$U_{\text{máximo}}$ (mm)	P_i/P_0 (máximo)	P_i/P_0 (final)
06-a_con	3	30	24	30.576	1.176	0.304
06-b_con	3	75	132	124.153	1.204	0.249
06-c_con	3	150	312	389.821	1.254	0.176
06-d_con	3	200	432	705.470	1.270	0.146

Se construyeron dos gráficas a partir de los análisis tridimensionales y las curvas características obtenidas. En las figuras que se presentan aparece la relación de esfuerzos frente al desplazamiento vertical en la clave del túnel y la relación de esfuerzos vs distancia al frente, para un valor de $k_0=1.25$, con longitud de avance de 3 m. a distintas profundidades.

Como puede verse en la Figura 4. 52 y en la Tabla 4. 17 la relación de esfuerzos aumenta entre 18% y 25% y se incrementa conforme aumenta la profundidad. Se observa también que los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan a medida que la profundidad aumenta, y que los desplazamientos son de 31, 124, 390 y 705 mm.

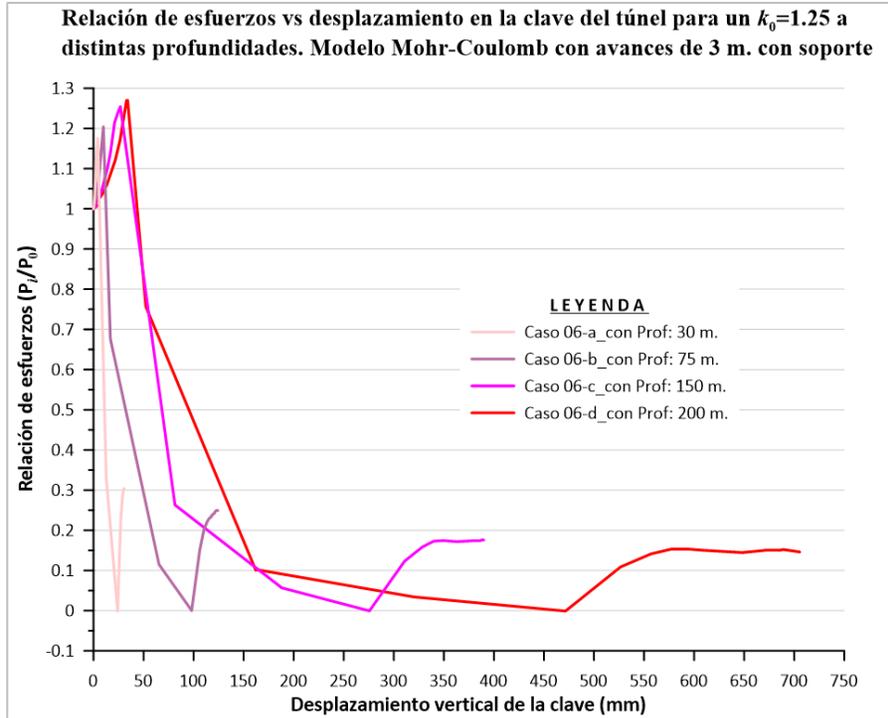


Figura 4. 52. Relación de esfuerzos vs desplazamiento en la clave del túnel para un $k_0=1.25$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

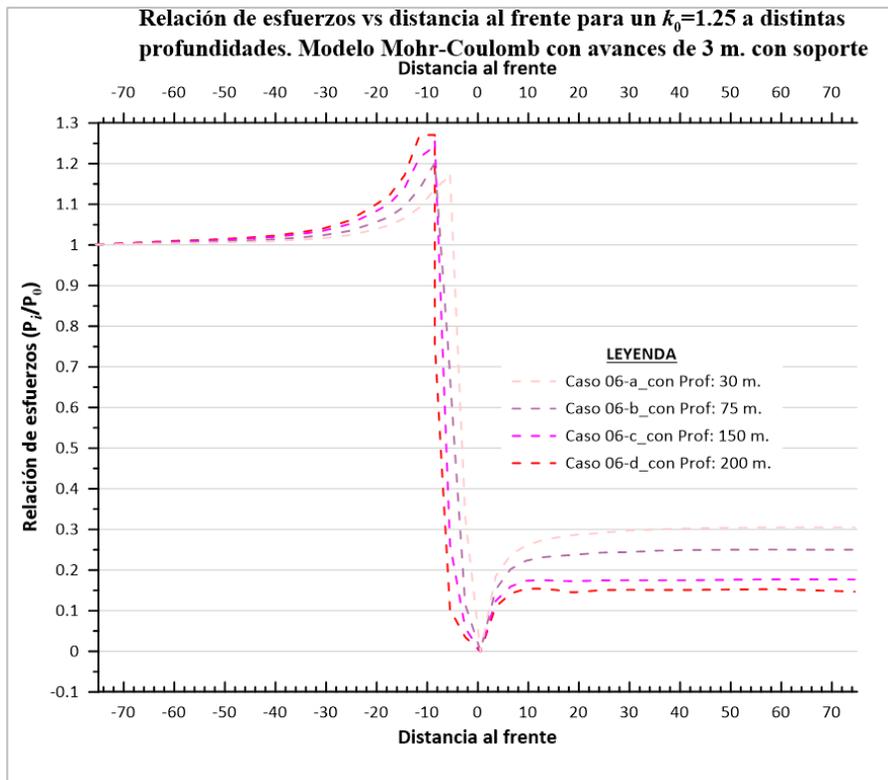


Figura 4. 53. Relación de esfuerzos vs distancia al frente para un $k_0=1.25$ a distintas profundidades. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

Como puede apreciarse en la Figura 4. 53, el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 50 m. de la distancia al frente hasta los 5 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico; asimismo, se puede apreciar que las recuperaciones de esfuerzos están entre 25 y 35%.

4.4.2.6 Conclusiones

De los 20 casos estudiados de coeficiente de k_0 se concluye que:

- La relación de esfuerzos aumenta entre 16% y 34% y se incrementa conforme aumenta la profundidad, como se observa en la Tabla 4. 18.
- Los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan conforme se aumenta la profundidad, tal como puede verse en la Tabla 4. 18.
- El aumento de la relación de esfuerzos en la clave del túnel ocurre entre 50 a 5 m. antes de la llegada del frente a la sección de control.
- Los valores de recuperación de esfuerzos están entre 13% y 30% para los casos estudiados, como se observa en la Tabla 4. 18.

Tabla 4. 18. Resultado de análisis para distintos valores de k_0 en el túnel de carretera con avances de 3 m.

Caso k_0	Profundidad (m)	$U_{máximo}$ (mm)	Rango de $U_{máximo}$ (mm)	P_i/P_0 (máximo)	Rango de P_i/P_0 (máximo)	P_i/P_0 (final)	Rango de P_i/P_0 (final)
0.35	30	35.898	25 a 35	1.265	1.16 a 1.26	0.154	0.15 a 0.30
0.50		28.381		1.227		0.158	
0.75		26.557		1.186		0.180	
1.00		27.724		1.161		0.241	
1.25		30.576		1.176		0.304	
0.35	75	117.147	90 a 125	1.239	1.20 a 1.25	0.152	0.15 a 0.25
0.50		91.101		1.258		0.171	
0.75		89.273		1.245		0.188	
1.00		104.791		1.235		0.220	
1.25		124.153		1.204		0.249	
0.35	150	338.868	260 a 390	1.221	1.22 a 1.30	0.146	0.15 a 0.18
0.50		275.177		1.309		0.153	
0.75		260.403		1.297		0.156	
1.00		304.073		1.286		0.163	
1.25		389.821		1.254		0.176	
0.35	200	548.877	435 a 705	1.236	1.23 a 1.34	0.136	0.13 a 0.15
0.50		435.983		1.311		0.139	
0.75		434.493		1.337		0.140	
1.00		537.383		1.319		0.145	
1.25		705.470		1.270		0.146	

4.5 COMPARACIÓN DE LOS CASOS DE TÚNEL CIRCULAR Y TÚNEL DE CARRETERA

En este apartado, se presenta la comparación de los estudios realizados con los modelos de túnel circular y de túnel con sección de carretera para los casos de campos de esfuerzos iniciales y variación del coeficiente de esfuerzo horizontal, k_0 .

4.5.1 Campos de esfuerzos iniciales

Para los casos de campo de esfuerzos iniciales se considera el modelo constitutivo Mohr-Coulomb, con avance de excavación de 3 m., campos de esfuerzos iniciales de 720 y 3600 kN/m²; y la presencia o no del soporte.

En la Tabla 4. 19 se observa lo siguiente:

- Los desplazamientos en la clave del túnel para el campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m² son alrededor de 30 mm. cuando no hay soporte, y de 15 mm. para el caso con soporte, tanto para el modelo carretero como para el circular.
- Para el caso de campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m² los desplazamientos en la clave del túnel son alrededor de 500 mm. cuando no hay soporte. En el caso con soporte el desplazamiento en el modelo carretero es casi el doble respecto al circular (222 y 116 mm., respectivamente).
- Las recuperaciones de esfuerzos para el caso de campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m² son alrededor de 25 % en ambos modelos, carretero y circular.
- Cuando el campo de esfuerzos iniciales es de 3600 kN/m² las recuperaciones de esfuerzos del modelo carretero son casi la mitad del modelo circular, esto es 13% y 22%, respectivamente.

Tabla 4. 19. Comparación de los casos de túnel circular y túnel de carretera con campos de esfuerzos iniciales.

Campo de esfuerzos iniciales (kN/m ²)	Avance (m)	Soporte	$U_{máximo}$ circular (mm)	$U_{máximo}$ carretero (mm)	P_i/P_0 circular (máximo)	P_i/P_0 carretero (máximo)	P_i/P_0 circular (final)	P_i/P_0 carretero (final)
720	3	No	31.548	36.621	1.044	1.090	0.000	0.000
		Si	12.834	17.677	1.021	1.068	0.251	0.218
3600	3	No	506.958	565.378	1.101	1.118	0.000	0.000
		Si	115.592	222.402	1.053	1.173	0.217	0.129

4.5.2 Variación del coeficiente del esfuerzo horizontal, k_0

Para esta sección se empleó el modelo constitutivo Mohr-Coulomb, con avance de excavación de 3 m., profundidades de 30, 75, 150 y 200 m. y valores de k_0 de 0.35, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, con soporte en todos los casos.

En la Tabla 4. 20 se compara los casos de túnel circular y túnel de carretera para diferentes coeficientes de esfuerzo horizontal.

Tabla 4. 20. Comparación de los casos de túnel circular y túnel de carretera con variación del coeficiente de esfuerzo horizontal k_0 con avances de 3 m.

Caso k_0	Profundidad (m)	$U_{\text{máximo}}^{\text{circular}}$ (mm)	$U_{\text{máximo}}^{\text{carretero}}$ (mm)	P_i/P_0 circular (máximo)	P_i/P_0 carretero (máximo)	P_i/P_0 circular (final)	P_i/P_0 carretero (final)
0.35	30	20.182	35.898	1.131	1.265	0.162	0.154
	75	68.088	117.147	1.176	1.239	0.167	0.152
	150	178.682	338.868	1.162	1.221	0.165	0.146
	200	265.526	548.877	1.189	1.236	0.164	0.136
0.50	30	17.001	28.381	1.115	1.227	0.183	0.158
	75	56.559	91.101	1.151	1.258	0.186	0.171
	150	148.490	275.177	1.210	1.309	0.180	0.153
	200	226.001	435.983	1.245	1.311	0.178	0.139
0.75	30	16.476	26.557	1.101	1.186	0.236	0.180
	75	58.506	89.273	1.127	1.245	0.217	0.188
	150	157.877	260.403	1.182	1.297	0.206	0.156
	200	238.490	434.493	1.214	1.337	0.164	0.140
1.00	30	17.740	27.724	1.081	1.161	0.289	0.241
	75	68.147	104.791	1.136	1.235	0.257	0.220
	150	186.878	304.073	1.156	1.286	0.240	0.163
	200	280.904	537.383	1.185	1.319	0.232	0.145
1.25	30	19.474	30.576	1.057	1.176	0.344	0.304
	75	80.124	124.153	1.128	1.204	0.300	0.249
	150	225.869	389.821	1.132	1.254	0.279	0.176
	200	347.706	705.470	1.156	1.270	0.264	0.146

En la tabla se observa lo siguiente:

4.5.2.1 Caso $k_0=0.35$

- En el modelo carretero el aumento de relación de esfuerzo es mayor (con valores entre 20% y 30%) que en el modelo circular (entre 15 y 20%).
- Los desplazamientos en la clave del túnel en el modelo carretero son aproximadamente 1.5 veces los del modelo circular para todas las profundidades estudiadas.
- En el modelo carretero las recuperaciones de esfuerzos ubican alrededor de 15%, mientras que en el modelo están en torno a 17%.

4.5.2.2 Caso $k_0=0.50$

- El aumento de relación de esfuerzo es mayor en el modelo carretero, con valores entre 20 y 30%; mientras que en el modelo circular está entre 10 y 25%.
- Los desplazamientos en la clave del túnel para el modelo carretero son aproximadamente el doble respecto al modelo circular en todas las profundidades estudiadas.
- Las recuperaciones de esfuerzos en el modelo carretero son menores frente al modelo circular, siendo alrededor de 15 y 18% respectivamente.

4.5.2.3 Caso $k_0=0.75$

- El aumento de relación de esfuerzo es mayor en el modelo carretero (con valores entre 20 y 35%) frente al modelo circular (entre 10 y 20%).
- Los desplazamientos en la clave del túnel del modelo carretero son aproximadamente 1.7 veces los del modelo circular para todas las profundidades estudiadas.
- Las recuperaciones de esfuerzos en el modelo carretero son menores respecto al modelo circular, y están entre 15 y 18% para el primero y entre 16 y 25% para el segundo.

4.5.2.4 Caso $k_0=1.00$

- El modelo carretero presenta mayor aumento de relación de esfuerzo (con valores entre 15 y 30%) frente al modelo circular (entre 8 y 18%).
- El modelo carretero acusa desplazamientos en la clave del túnel que son aproximadamente 1.7 veces los del modelo circular para todas las profundidades estudiadas.
- El modelo carretero tiene recuperaciones de esfuerzos menores que las del modelo circular; y están entre 15 y 25% para el primero y entre 23 y 30% para el segundo.

4.5.2.5 Caso $k_0=1.25$

- El aumento de relación de esfuerzo es mayor en el modelo carretero frente al modelo circular, con valores entre 18 y 28% del primero y 5 y 15% del segundo.
- Los desplazamientos en la clave del túnel del modelo carretero son aproximadamente 1.7 veces respecto al modelo circular para todas las profundidades estudiadas.
- Las recuperaciones de esfuerzos son menores en el modelo carretero respecto al modelo circular, y se ubican entre 15 y 30% en el carretero y entre 25 y 35% en el circular.

4.5.3 Conclusiones

Se concluye lo siguiente:

- El aumento de la relación de esfuerzos es mayor en el modelo carretero respecto al circular.
- Los desplazamientos en la clave del túnel del modelo carretero son aproximadamente 1.7 veces los del modelo circular.
- Las recuperaciones de esfuerzos en el modelo carretero son menores respecto al modelo circular.

5 CALIBRACIÓN DEL MODELO BIDIMENSIONAL CON EL TRIDIMENSIONAL

En el presente capítulo se desarrolla una metodología de calibración con la que se pueden lograrse curvas características en 2D similares a las 3D. Para esto fue empleado el programa de elementos finos Plaxis 2D. Se realizó la calibración para los coeficientes de $k_0=0.35, 0.50, 0.75, 1.00$ y 1.25 , con avances de excavación de 3 m., a profundidades de 30, 75, 150 y 200 m. para ambos modelos: circular y carretero. También se presentan los procedimientos y los valores con los que se logró la calibración.

5.1 MÉTODO DE CALIBRACIÓN

El método consiste de una serie de hipótesis y analogías que permiten obtener curvas características con los modelos bidimensionales sensiblemente similares a las obtenidas en 3D. Para esto se requiere de 6 fases de análisis que se describen a continuación.

El Método parte de una fase inicial (*Initial Phase*) en la que se definen las condiciones iniciales del modelo, que deben ser iguales que las del modelo tridimensional.

Como se indica en el capítulo 2.5.4 y se observa en los análisis tridimensionales del capítulo 4, antes de la llegada del frente a la sección de control se produce un incremento en la relación de esfuerzos ($\frac{P_i}{P_0}$), el cual no puede lograrse en dos dimensiones si se simula la excavación de manera convencional.

Para lograr el aumento de la relación de esfuerzos ($\frac{P_i}{P_0}$) en los análisis bidimensionales se implementaron dos artificios:

- El primero consiste en disminuir el módulo de Young del material a excavar en la fase 1, manteniendo constantes las otras propiedades, como puede verse en la Figura 5. 2. Esta variación del módulo de Young se obtiene probando valores en un proceso de ensayo-error hasta que se logra la calibración de la curva 2D respecto a la 3D, como se puede observar en la Figura 5. 4.
- El segundo artificio consiste en aplicar una expansión volumétrica a los materiales que no se van a excavar en la fase 1. Para lograrlo, se introducen incrementos de la misma magnitud en las deformaciones normales como se puede observar en la Figura 5. 3. Para obtener el valor de la expansión se prueban valores sucesivamente, en un proceso de ensayo y error, hasta lograr un incremento de la relación ($\frac{P_i}{P_0}$) en dos dimensiones similar al que sucede en el modelo tridimensional, como puede verse en la Figura 5. 4.

Una vez logrado el aumento en la relación ($\frac{P_i}{P_0}$) se procede a relajar los esfuerzos en varias etapas sin el soporte, es decir, se prueban distintos valores del coeficiente de relajación a fin de ir ajustando gradualmente los resultados para lograr una similitud de la curva 2D respecto a la 3D. En el presente caso se usaron 4 fases de relajación de esfuerzos; sin embargo, puede usarse un número distinto, bajo el entendido de que a mayor número de fases el ajuste de la curva será mejor.

Finalmente en una última fase se instala el soporte y se procede a relajar los esfuerzos al 100% a fin de que el soporte absorba la carga remanente y tratando que el estado último de esfuerzos se asemeje lo más posible al desarrollado por el modelo tridimensional.

A continuación, a modo de ejemplo, se muestran los pasos de calibración para un caso del modelo de túnel de carretera.

1. En la fase inicial se definen las condiciones iniciales del modelo, mismas que deben ser exactamente las mismas que en el caso tridimensional (parámetros, propiedades de los materiales y condiciones de frontera).

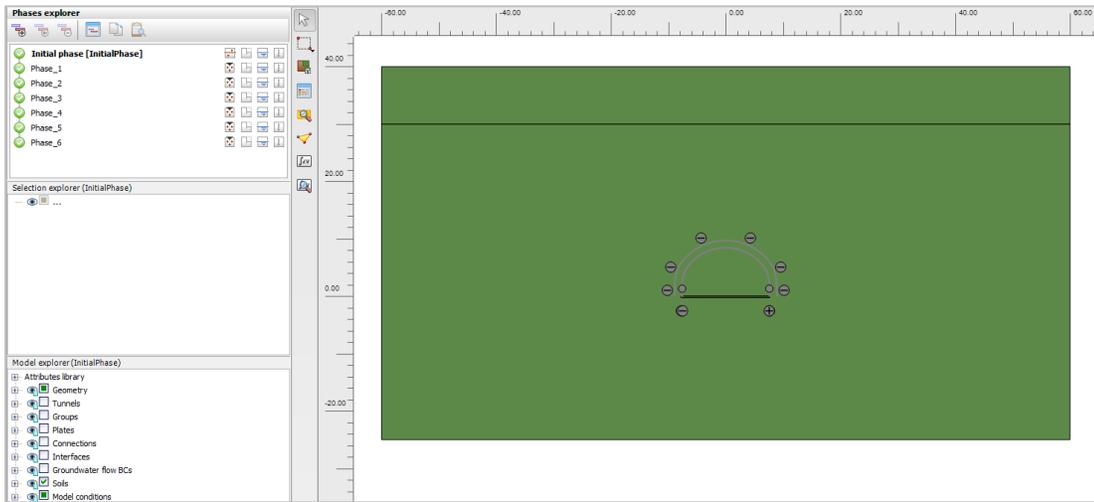


Figura 5.1. Fase inicial se definen las condiciones iniciales del modelo.

2. En la fase 1 se disminuye el módulo de Young al material que será excavado. Para el modelo carretero se disminuye hasta $80\,000\text{ kN/m}^2$ (16% del módulo de Young inicial) y las demás propiedades se mantienen constantes.

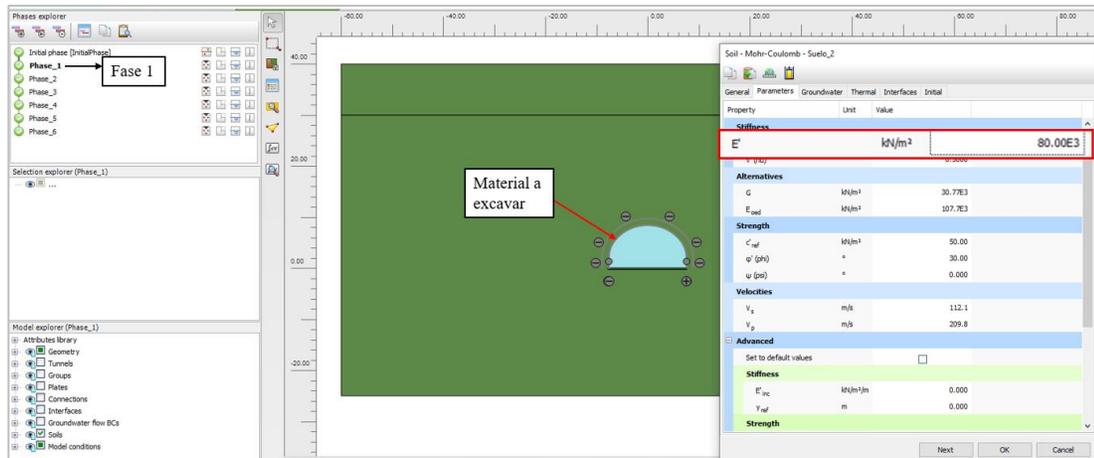


Figura 5.2. Fase 1, se disminuye el módulo de Young del material a excavar.

3. En la misma fase 1, al material que no será excavado se le aplica una expansión volumétrica (a partir de imponer incrementos de la misma magnitud en las tres direcciones). Para el modelo carretero del ejemplo se aplicó una deformación volumétrica (ε_v) de 0.084%.

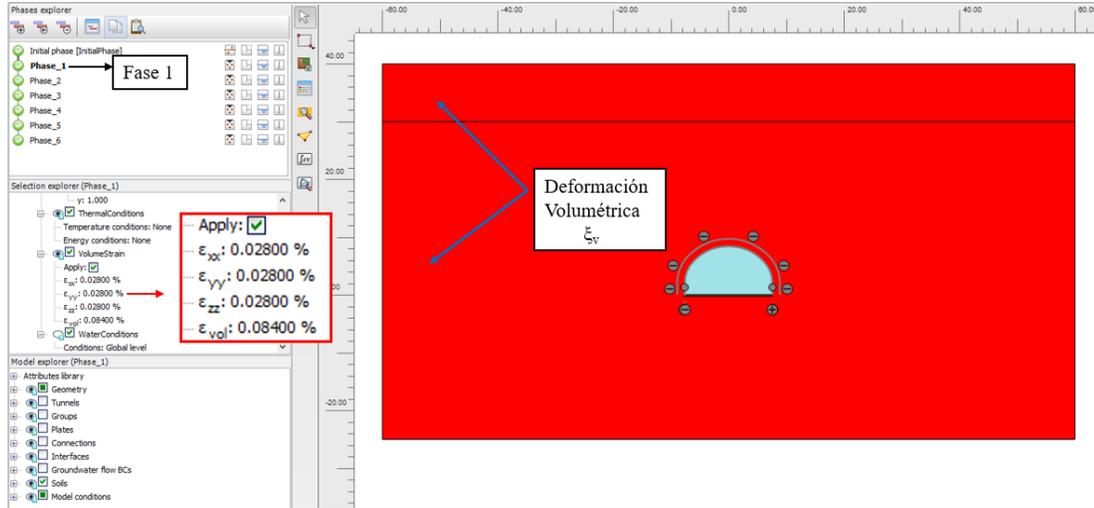


Figura 5. 3. Aplicación de la deformación volumétrica al material que no será excavado.

La calibración del tramo inicial fue exitosa y se logró simular el aumento de la relación de esfuerzos y los desplazamientos (Figura 5. 4.).

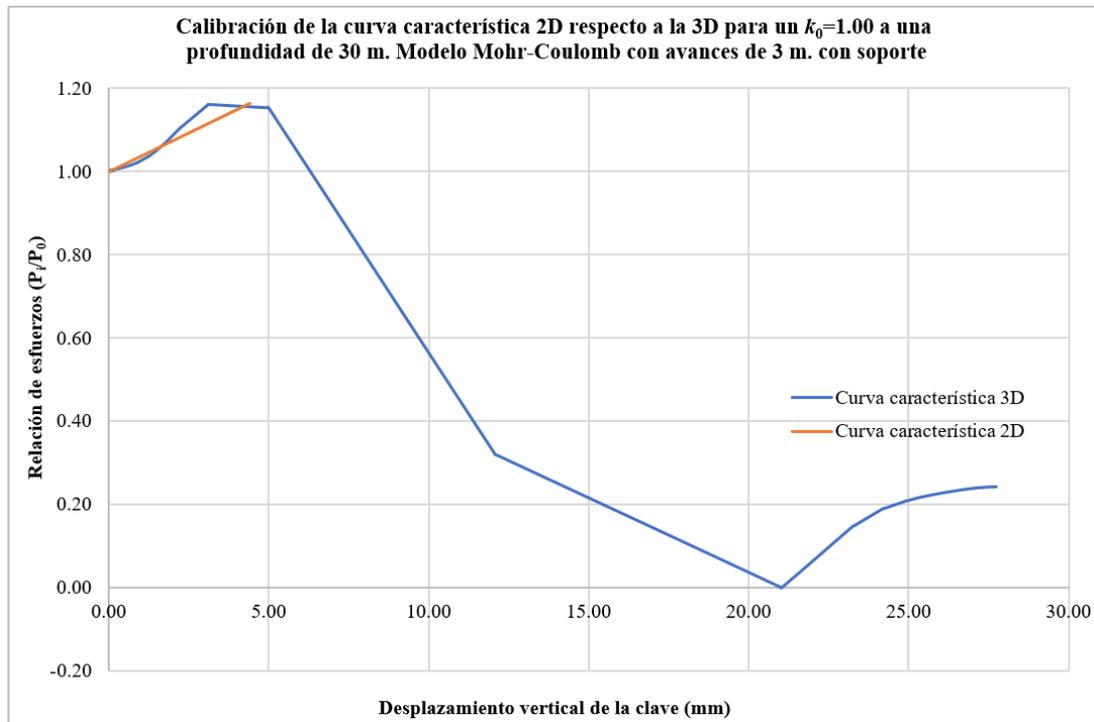


Figura 5. 4. Calibración de las curvas características en la fase 1.

4. En la fase 2 se procede a realizar la excavación aplicando una relajación de esfuerzos a la excavación. En este ejemplo se aplicó un coeficiente de relajación del 89%.

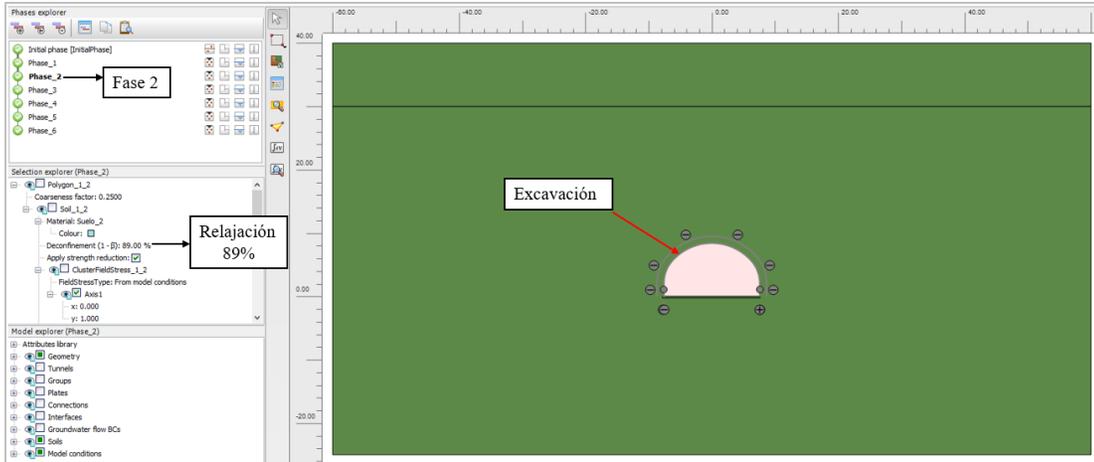


Figura 5.5. Aplicación de la relajación de esfuerzos al 89% y excavación del túnel.

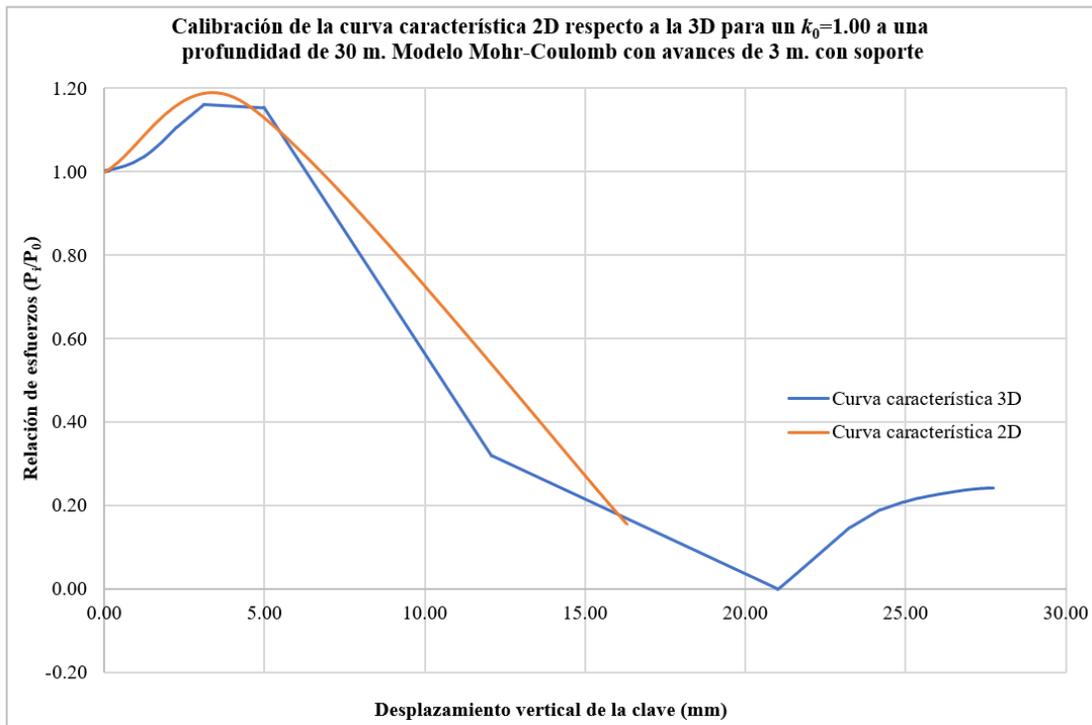


Figura 5.6. Calibración de las curvas características en la fase 2.

- Desde la fase 3 hasta la fase 5 se aumenta el coeficiente de relajación desde 90% hasta 91.5% para seguir ajustando la curva al comportamiento 3D, como se observa en la Figura 5.7.

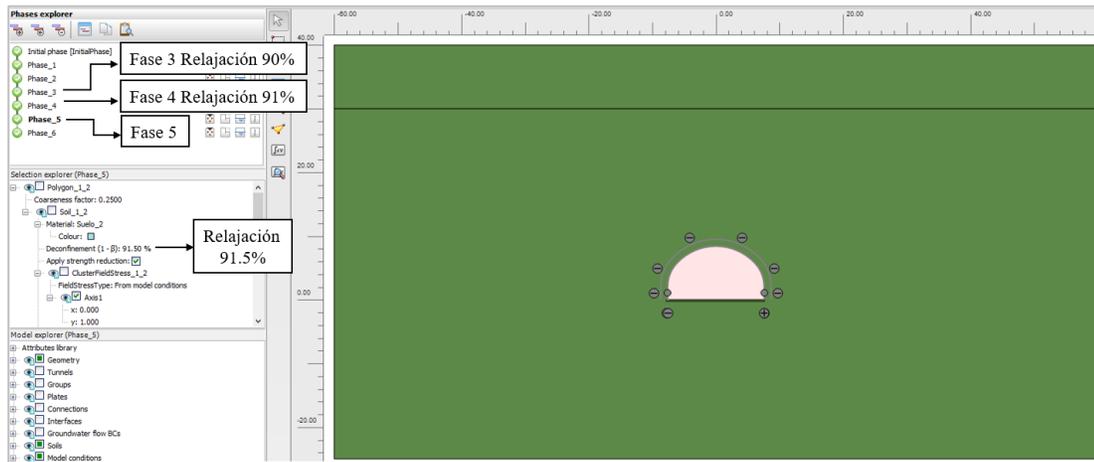


Figura 5.7. Aplicación de la relajación de esfuerzos al 91.5%.

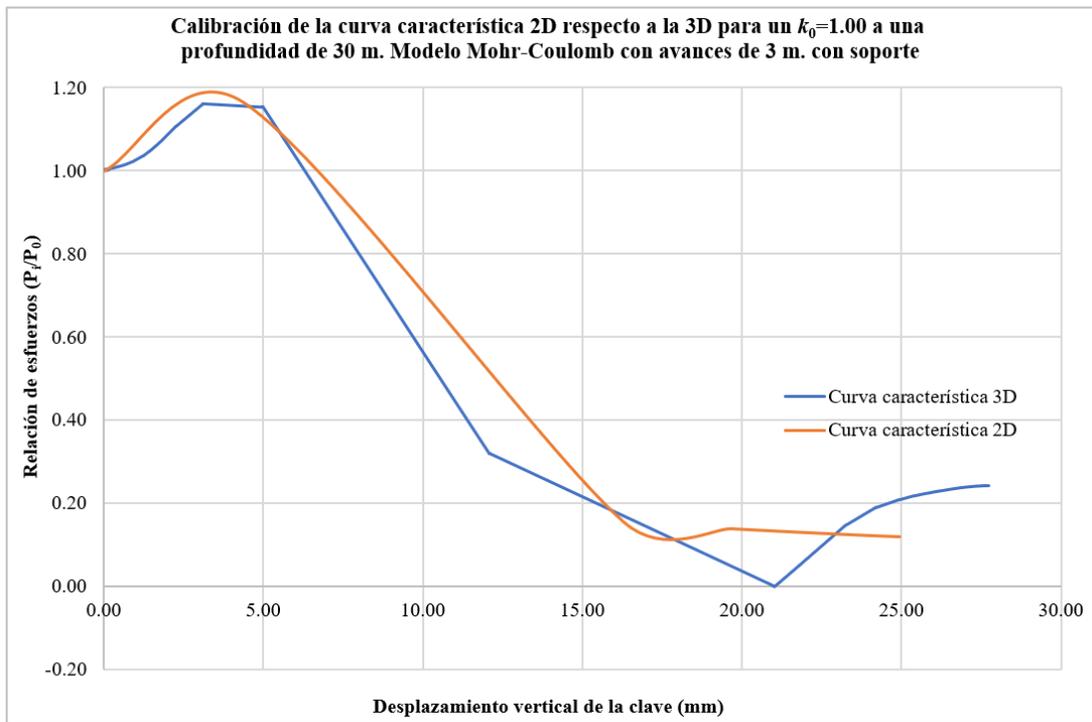


Figura 5.8. Calibración de las curvas características en la fase 5.

6. En la fase 6 se instala el soporte y se deja relajar el 100% de tal manera que se logre simular el comportamiento de la curva característica 3D.

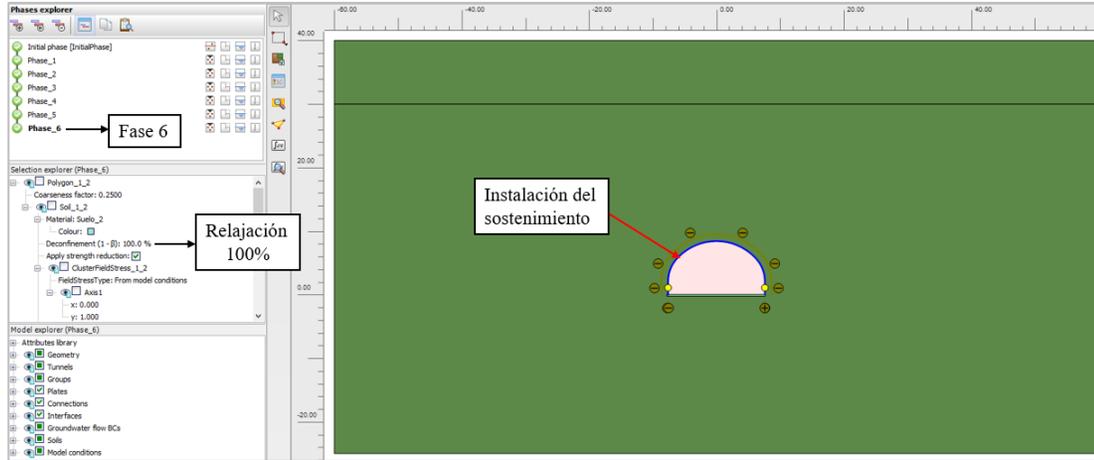


Figura 5. 9. Instalación del sostenimiento y aplicación de la relajación de esfuerzos al 100%.

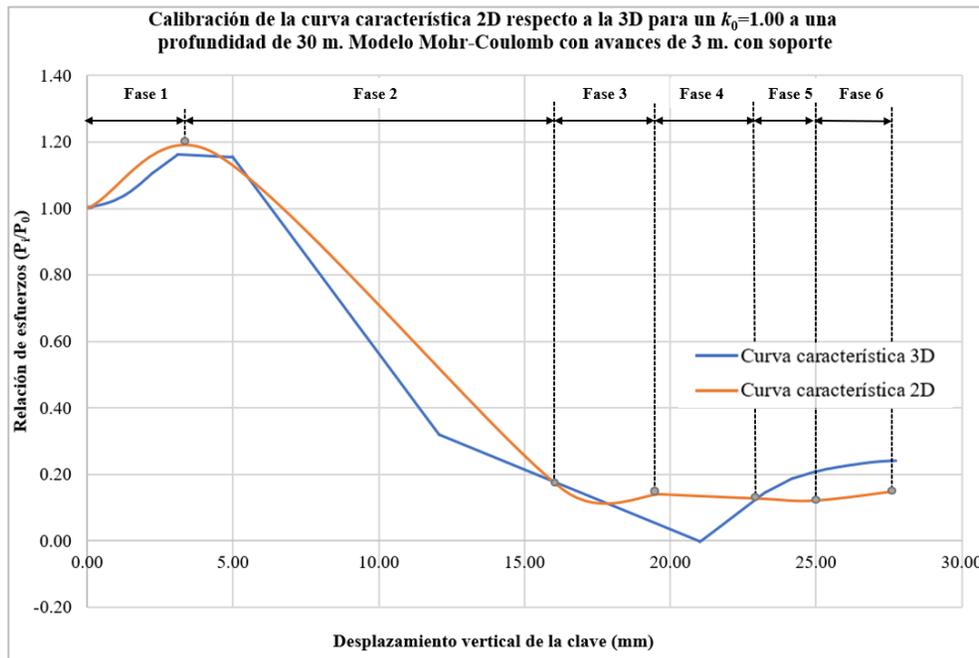


Figura 5. 10. Calibración de las curvas características en la fase 6.

Se puede apreciar en Figura 5. 10 que la relación de esfuerzos en la curva característica 2D no puede llegar a 0, dado que si esto sucediera indicaría una relajación del 100 % (final del proceso de cálculo) y no podría ocurrir una recuperación de esfuerzos como se observa en la figura.

5.2 CASOS DE ESTUDIO

Una vez establecido el método, se calibraron los modelos de túnel circular y de túnel de carretera para los coeficientes k_0 de 0.35, 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25.

5.2.1 Túnel circular

Se realizó la calibración para los coeficientes anteriormente mencionados y para avances de excavación de 1, 3 y 5 m. y profundidades de 30, 75, 150 y 200 m.

5.2.1.1 Caso $k_0=0.50$

A continuación se muestran los resultados de la calibración de los 12 casos estudiados.

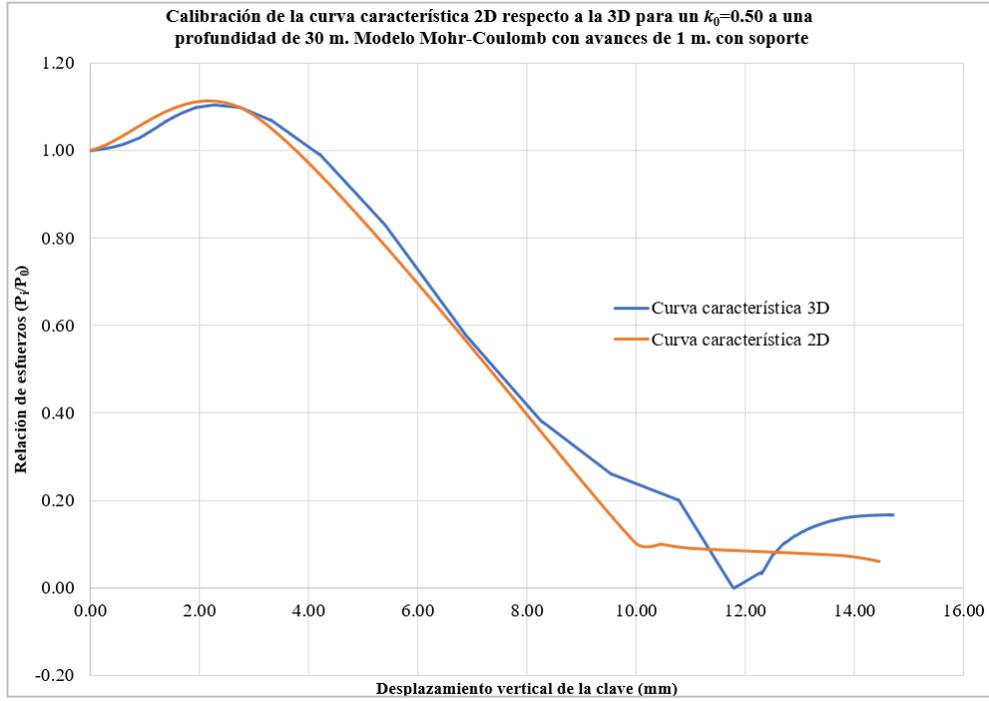


Figura 5. 11. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 1 m., con soporte.

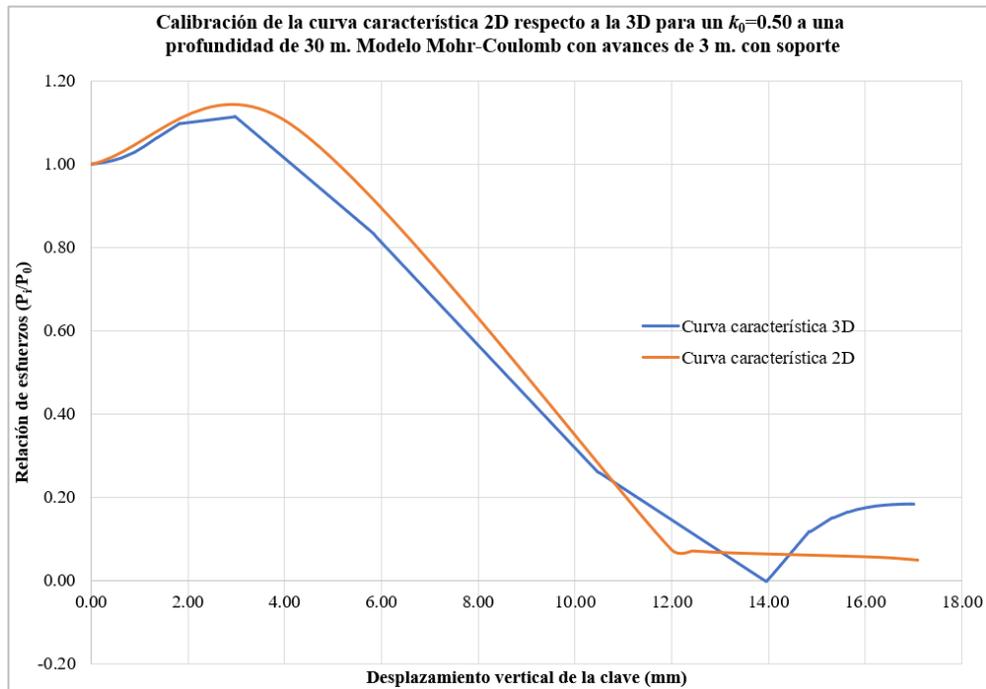


Figura 5. 12. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

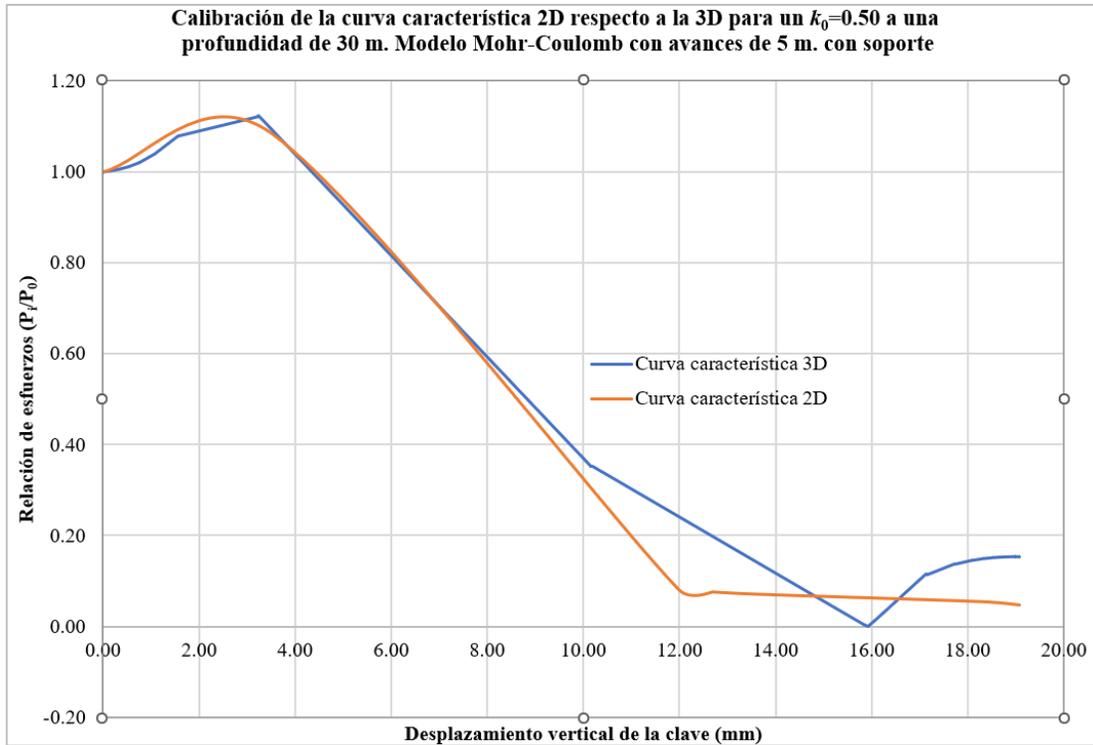


Figura 5. 13. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 5 m., con soporte.

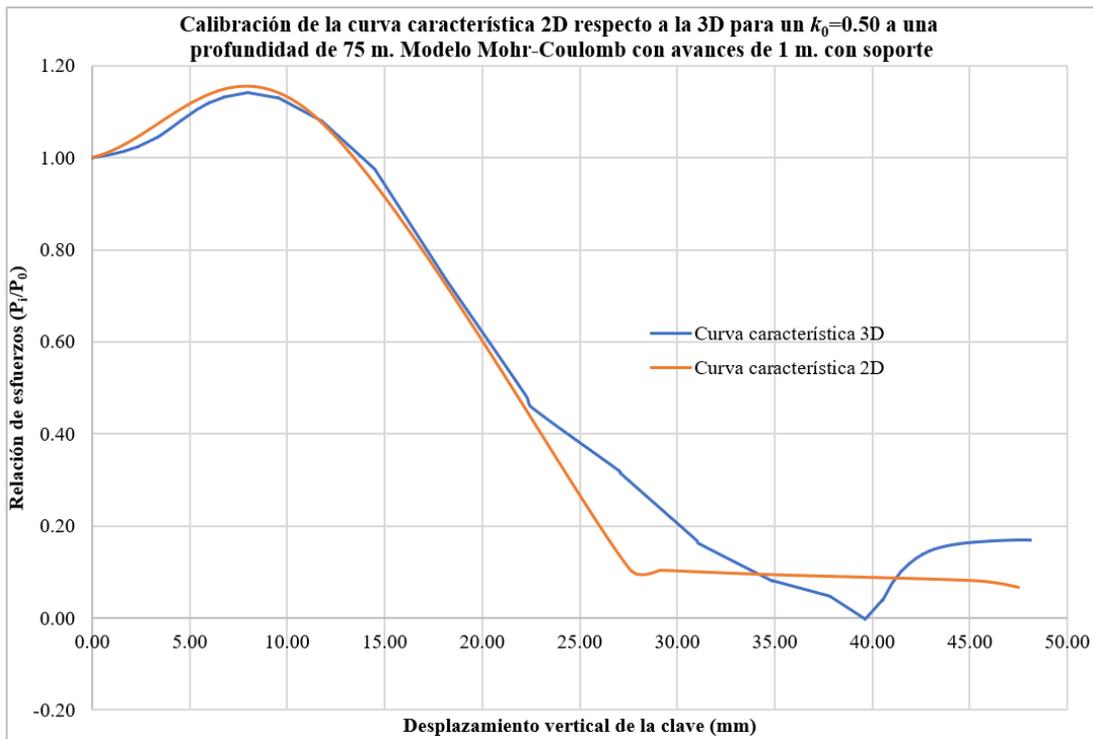


Figura 5. 14. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 1 m., con soporte.

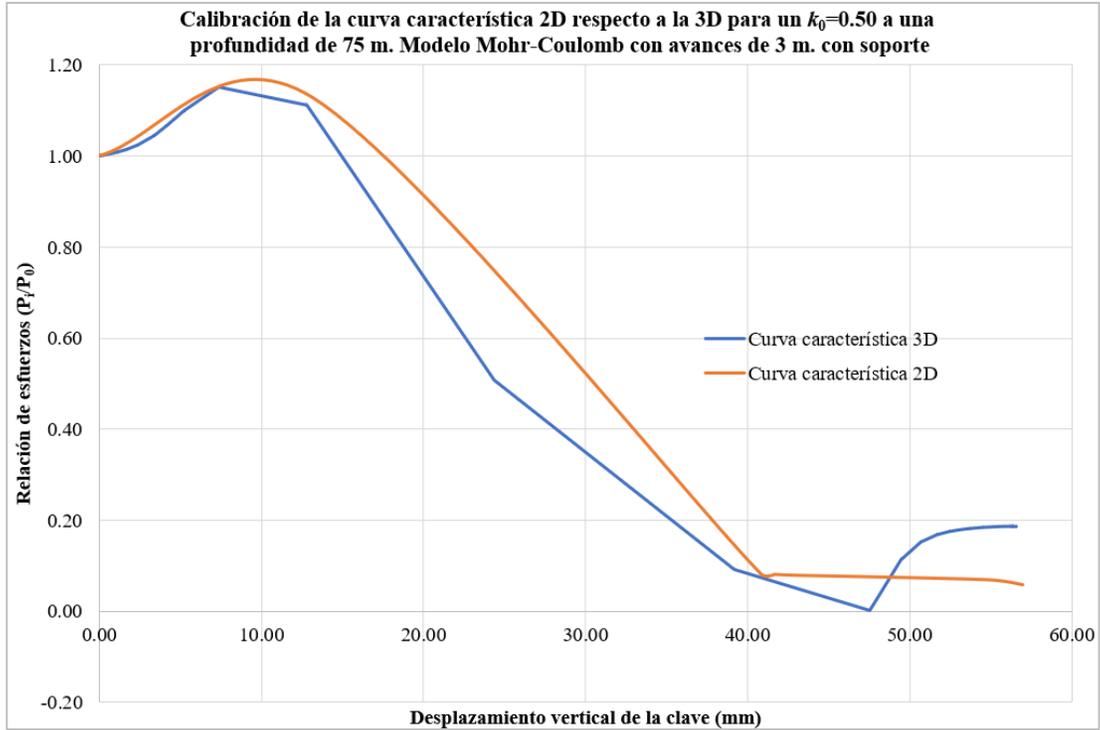


Figura 5. 15. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

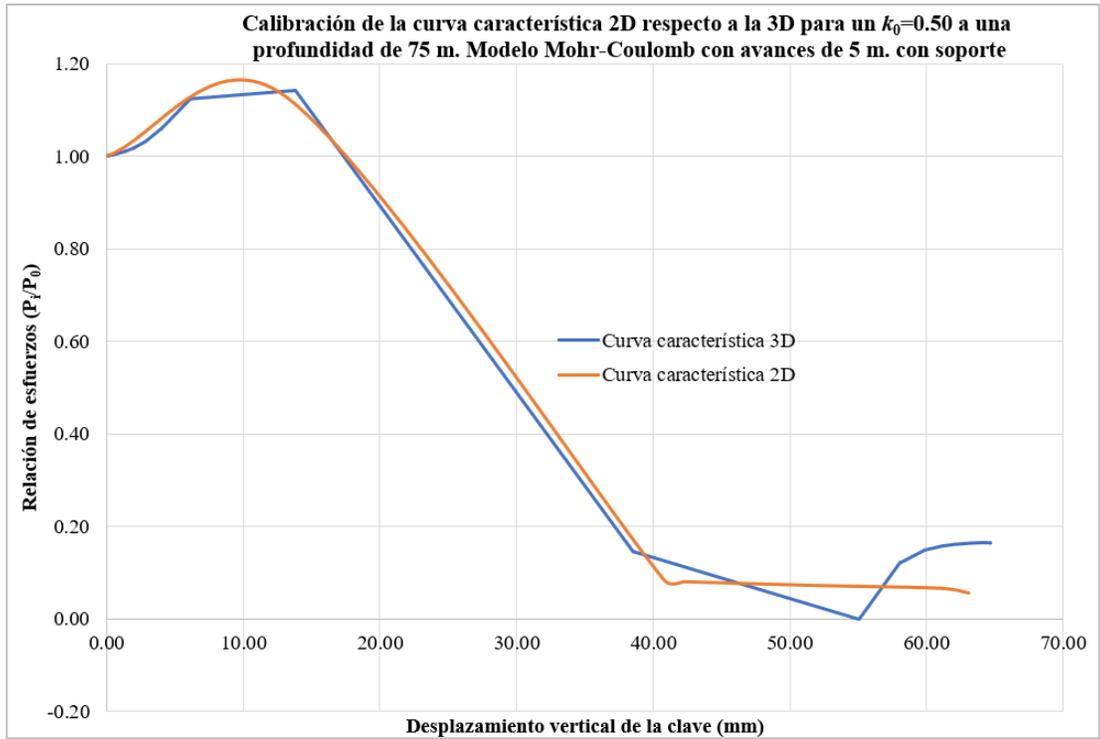


Figura 5. 16. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 5 m., con soporte.

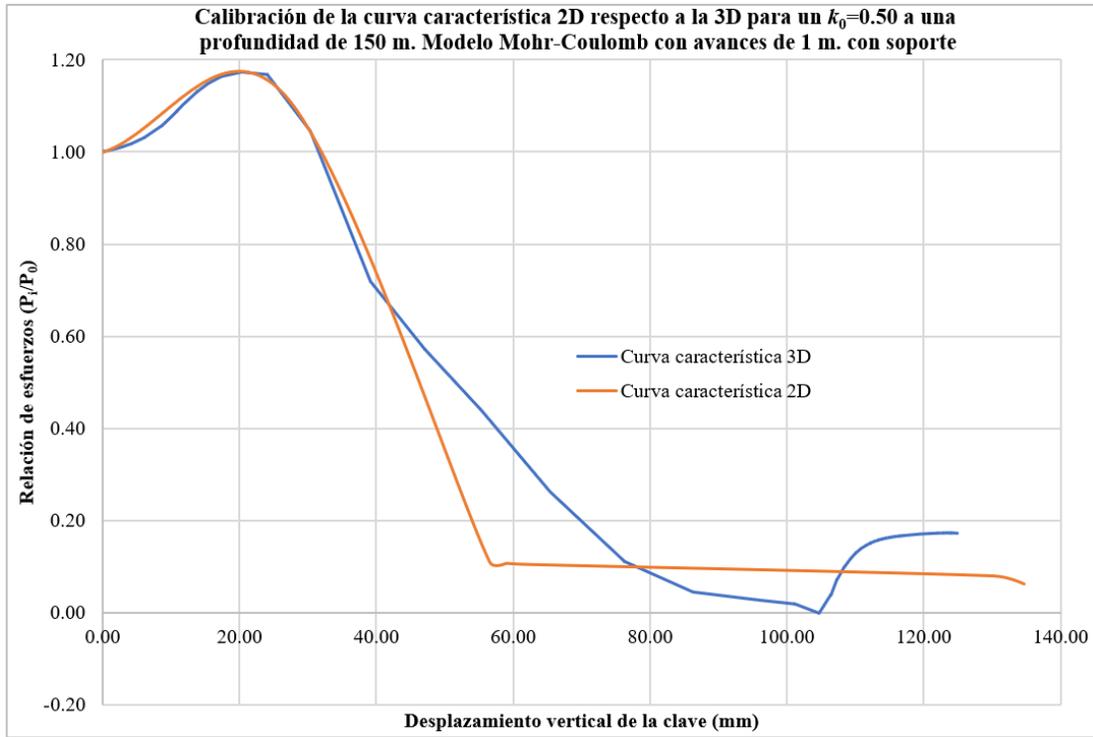


Figura 5. 17. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 1 m., con soporte.

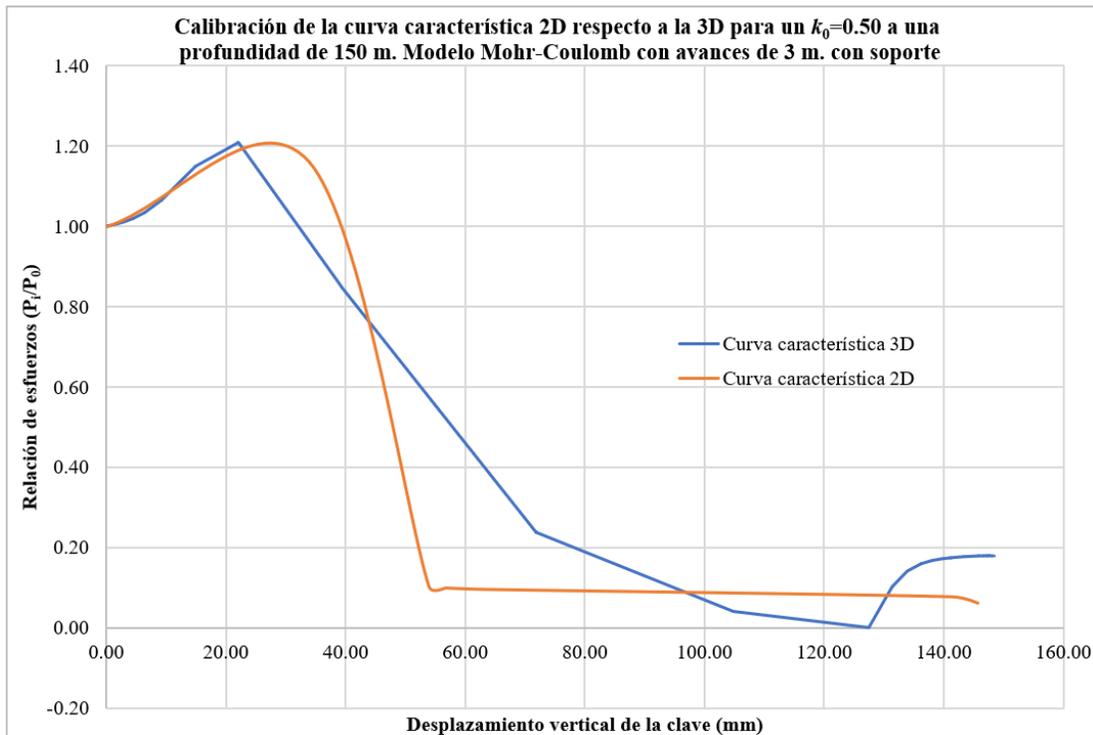


Figura 5. 18. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

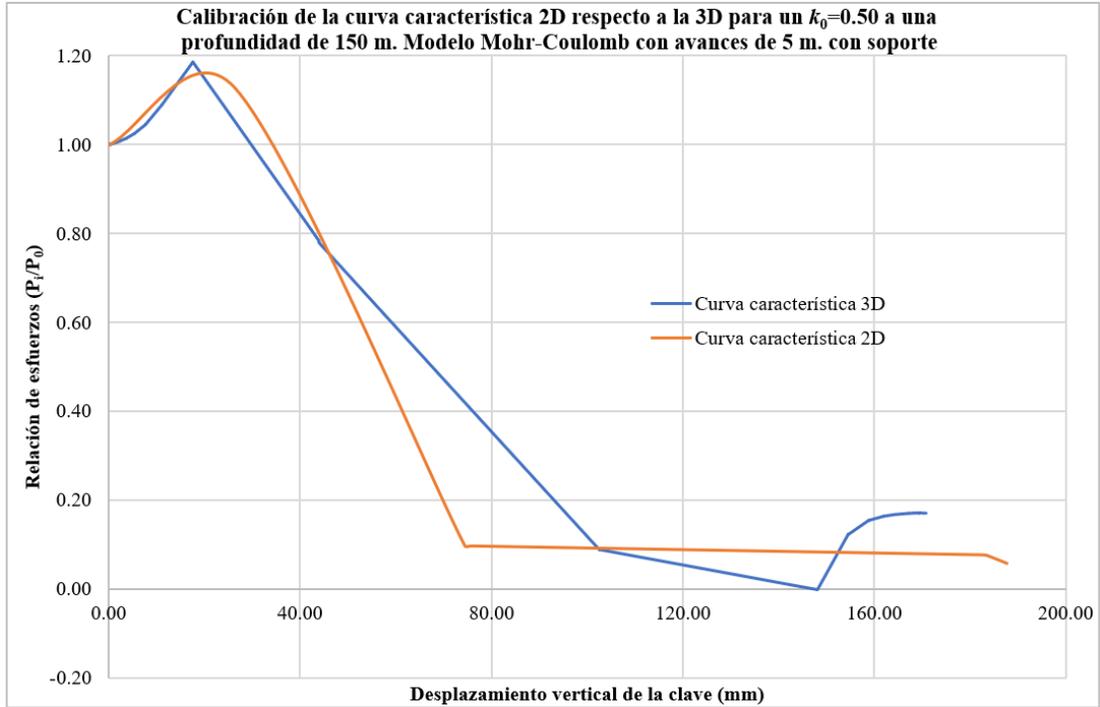


Figura 5. 19. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 5 m., con soporte.

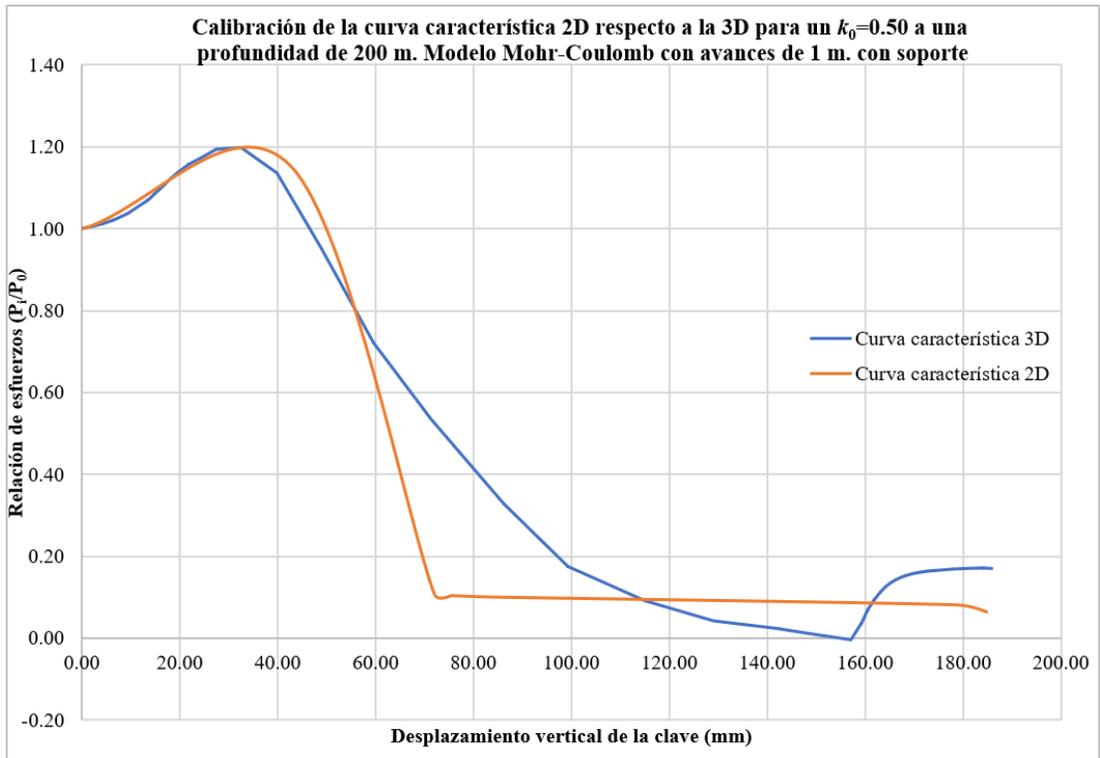


Figura 5. 20. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 1 m., con soporte.

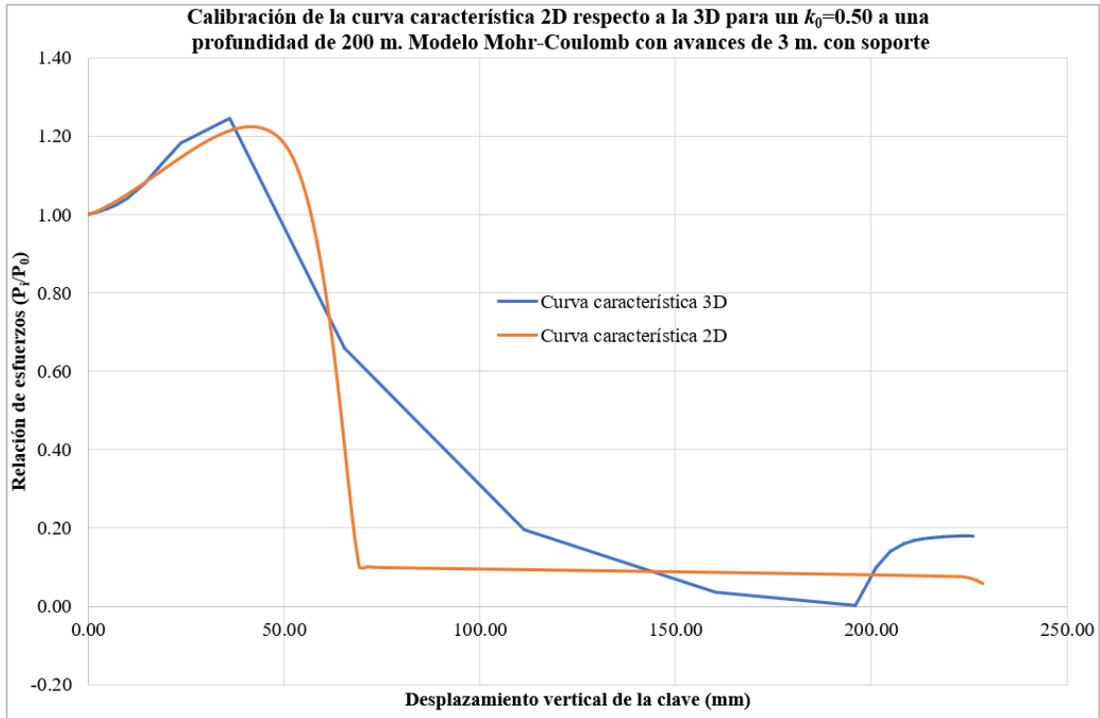


Figura 5. 21. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

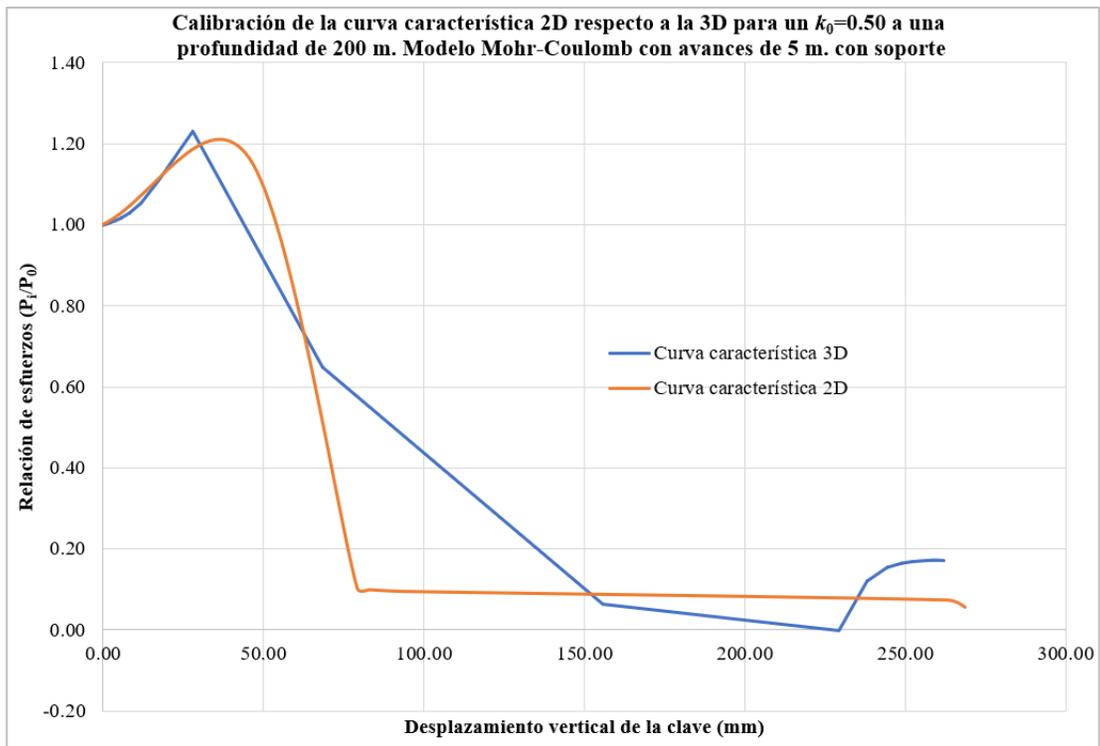


Figura 5. 22. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 5 m., con soporte.

En la Tabla 5. 1 se muestran los resultados de los 12 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 5. 1. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=0.50$ en modelos Mohr-Coulomb en modelo de túnel circular.

Caso	Avance (m)	Profundidad (m)	$U_{máximo}$ 2D (mm)	$U_{máximo}$ 3D (mm)	Preci-sión $U_{máximo}$	P_i/P_0 2D máximo (kN/m ²)	P_i/P_0 3D máximo (kN/m ²)	Preci-sión P_i/P_0 max.	P_i/P_0 2D final (kN/m ²)	P_i/P_0 3D final (kN/m ²)	Preci-sión P_i/P_0 final	Rela-jación inicial (%)	Rela-jación final (%)	$\Delta\varepsilon_v$ (%)	E_m (kN/m ²)	ΔE_0 (%)
04-a_con	1	30	14.4	14.7	98%	1.074	1.105	97%	0.060	0.167	36%	90.0%	94.5%	0.063%	50 000	10%
04-b_con	3	30	17.0	17.0	101%	1.098	1.115	99%	0.050	0.183	27%	94.0%	96.9%	0.084%	50 000	10%
04-c_con	5	30	19.0	19.1	100%	1.084	1.123	97%	0.048	0.153	31%	93.0%	97.0%	0.072%	50 000	10%
04-d_con	1	75	47.4	48.1	99%	1.106	1.142	97%	0.066	0.169	39%	90.5%	94.0%	0.225%	50 000	10%
04-e_con	3	75	56.9	56.5	101%	1.127	1.151	98%	0.059	0.186	32%	93.0%	95.2%	0.270%	50 000	10%
04-f_con	5	75	63.0	64.6	98%	1.127	1.142	99%	0.056	0.165	34%	93.0%	95.5%	0.270%	50 000	10%
04-g_con	1	150	134.6	124.9	108%	1.127	1.174	96%	0.062	0.171	36%	90.5%	93.0%	0.540%	50 000	10%
04-h_con	3	150	145.7	148.4	98%	1.163	1.210	96%	0.061	0.180	34%	91.5%	93.7%	0.690%	50 000	10%
04-i_con	5	150	187.7	170.8	110%	1.127	1.187	95%	0.058	0.170	34%	91.5%	94.0%	0.540%	50 000	10%
04-j_con	1	200	184.7	185.9	99%	1.154	1.198	96%	0.063	0.171	37%	91.0%	93.2%	0.870%	50 000	10%
04-k_con	3	200	228.3	226.0	101%	1.181	1.245	95%	0.059	0.178	33%	91.5%	93.6%	1.020%	50 000	10%
04-l_con	5	200	268.487	262.055	102%	1.164	1.231	95%	0.055	0.172	32%	91.5%	93.8%	0.930%	50 000	10%

Se observa en la Tabla 5. 1 lo siguiente:

- La calibración de los desplazamientos finales presenta una precisión del 98% a 110%. Es un rango aceptable para una calibración, con un margen menor al 5%.
- La calibración de los esfuerzos máximos tiene una precisión del 95% al 99%. Es un rango aceptable para una calibración, con un margen menor al 5%.
- La calibración de los esfuerzos finales tiene una precisión del 27% al 37%. Estos valores no son aceptables para una calibración, y dan cuenta de la limitación de este método, que calibra los desplazamientos finales, más no los esfuerzos finales.
- Las relajaciones iniciales de esfuerzos fueron superiores al 90%.
- Las relajaciones finales de esfuerzos fueron alrededor de 93% al 97% antes de colocar el soporte.
- La deformación volumétrica se incrementa conforme aumenta la profundidad.
- El módulo de Young modificado (E_m) es constante para todos los casos analizados con un valor de 50 000 kN/m², que corresponde al 10% del módulo de Young inicial (E_0).

5.2.1.2 Caso $k_0=0.35$

Se muestran a continuación los resultados de la calibración de los 4 casos estudiados:

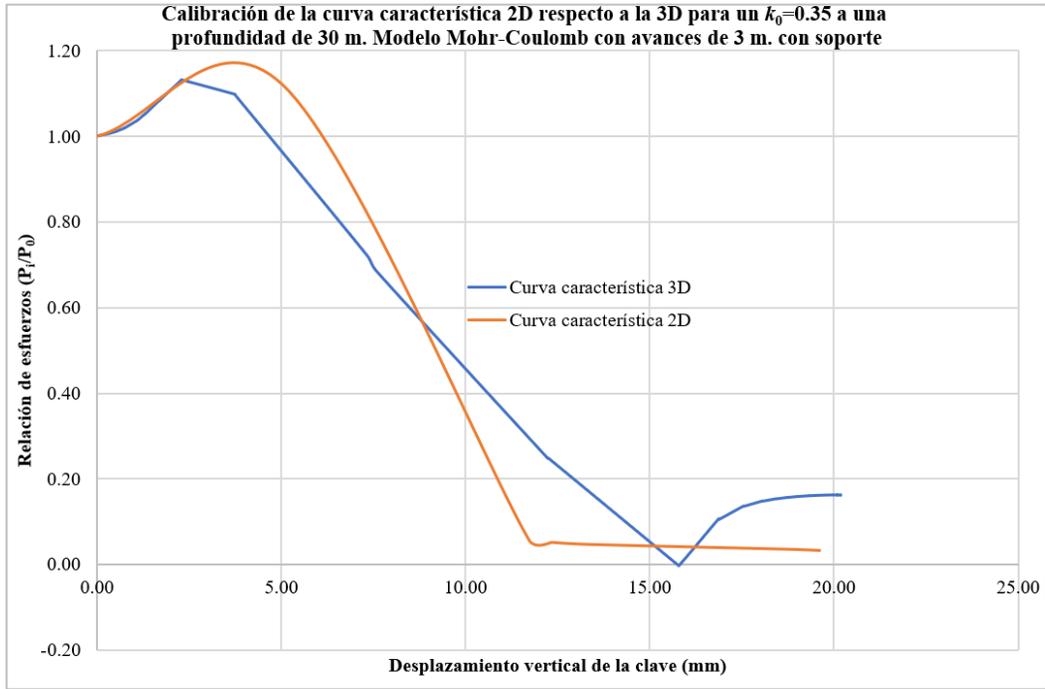


Figura 5. 23. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

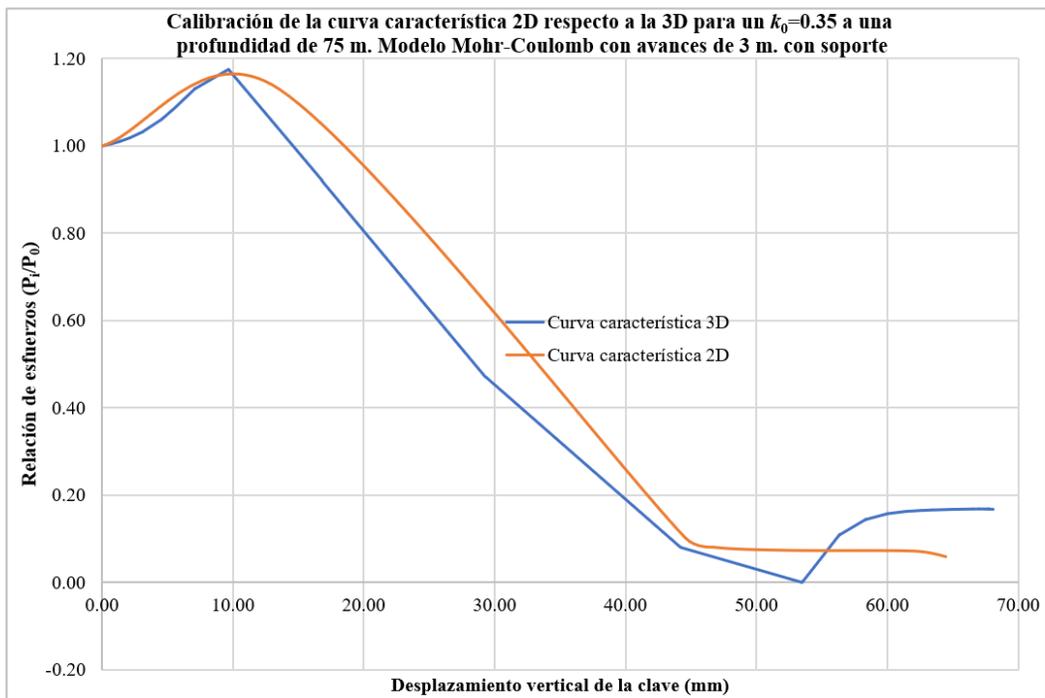


Figura 5. 24. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

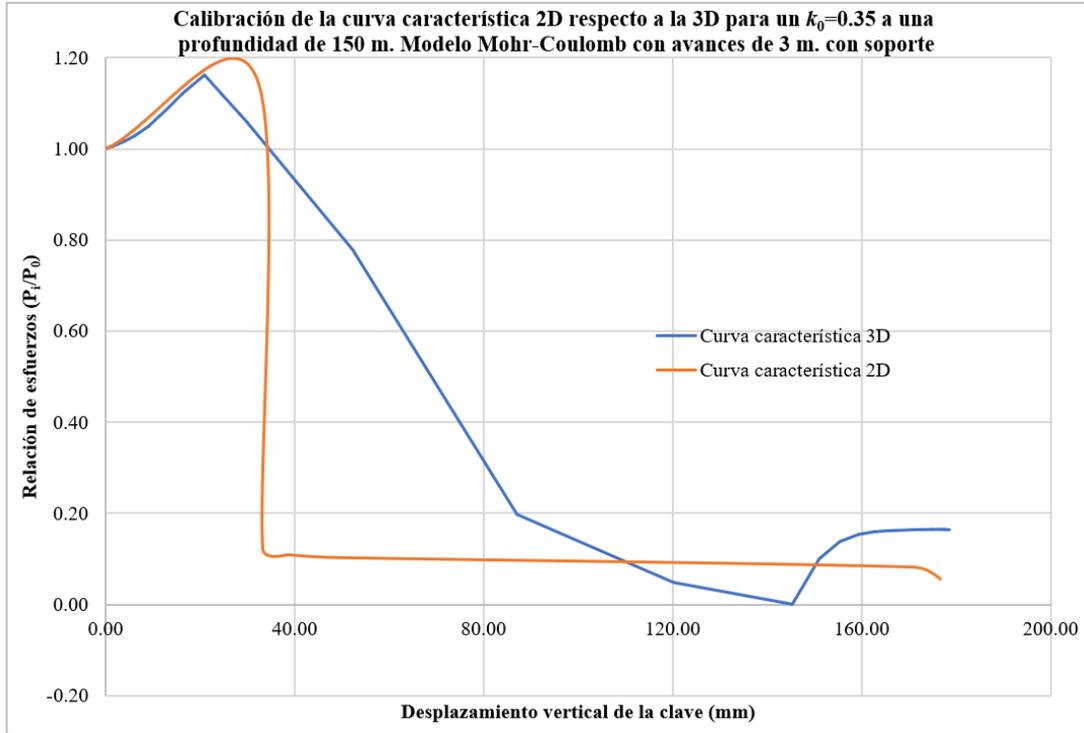


Figura 5. 25. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

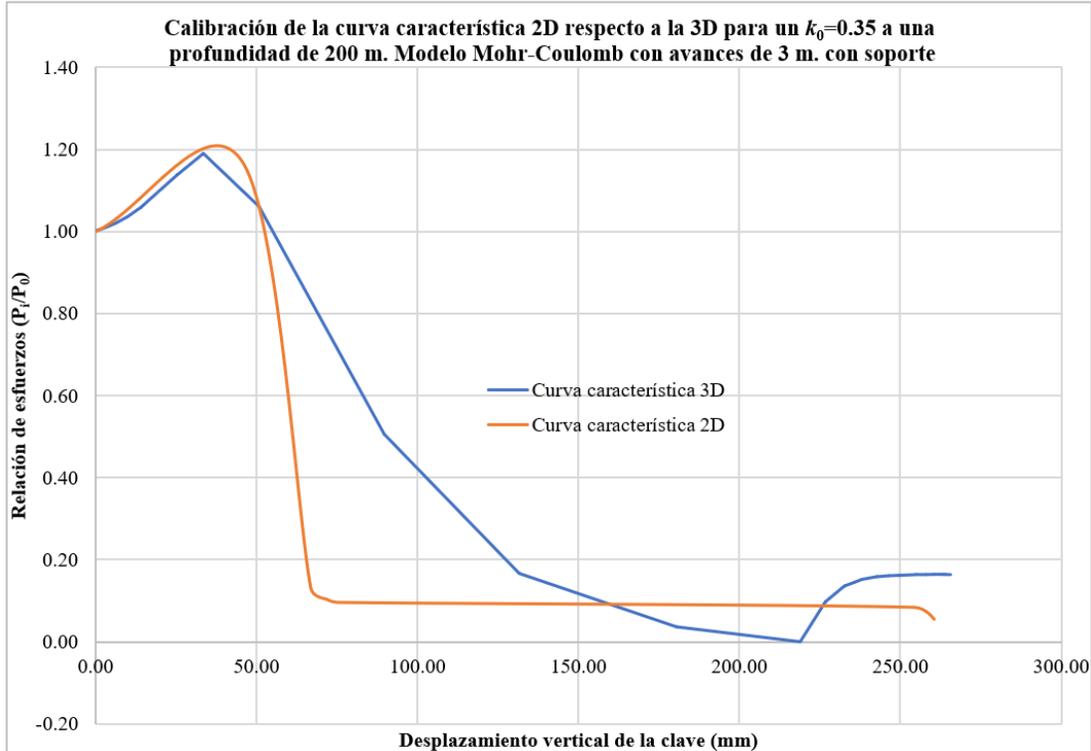


Figura 5. 26. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

En la Tabla 5. 2 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 5. 2. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=0.35$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en modelo de túnel circular.

Caso	Profundidad (m)	$U_{máximo}$ 2D (mm)	$U_{máximo}$ 3D (mm)	Precisión $U_{máximo}$	P_i/P_0 máximo 2D (kN/m ²)	P_i/P_0 máximo 3D (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 max.	P_i/P_0 final 2D (kN/m ²)	P_i/P_0 final 3D (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 final	Relajación inicial (%)	Relajación final (%)	$\Delta\varepsilon_v$ (%)	E_m (kN/m ²)	ΔE_0 (%)
05-a_con	30	19.6	20.1	97%	1.120	1.131	99%	0.033	0.162	20%	95.5%	98.5%	0.102%	50 000	10%
05-b_con	75	64.4	68.1	95%	1.130	1.176	96%	0.058	0.167	35%	91.5%	95.4%	0.270%	50 000	10%
05-c_con	150	176.6	178.6	99%	1.153	1.162	99%	0.055	0.165	34%	89.5%	92.8%	0.630%	50 000	10%
05-d_con	200	260.5	265.5	98%	1.165	1.189	98%	0.056	0.164	34%	89.0%	92.7%	0.900%	50 000	10%

En la Tabla 5. 2 se observa lo siguiente:

- La calibración de los desplazamientos finales tuvo una precisión del 95% al 98%. Esto es un margen menor al 5%, aceptable para una calibración.
- La calibración de los esfuerzos máximos tiene una precisión del 96% al 99%. Es un rango aceptable para una calibración, con un margen menor al 5%.
- La precisión de la calibración de los esfuerzos fue de 20 al 35%. Estos valores no son aceptables para una calibración; por lo tanto, es la limitante: solamente calibra los desplazamientos finales, más no los esfuerzos finales.
- Las relajaciones iniciales de esfuerzos fueron superiores al 90%.
- Las relajaciones finales de esfuerzos fueron alrededor de 92 al 98.5% antes de instalar el soporte.
- La deformación volumétrica se incrementa conforme aumenta la profundidad.
- El módulo de Young modificado (E_m) es constante para todos los casos analizados, con un valor de 50 000 kN/m², que corresponde al 10% del módulo de Young inicial (E_0).

5.2.1.3 Caso $k_0=0.75$

Los resultados de la calibración de los 4 casos estudiados se muestran a continuación:

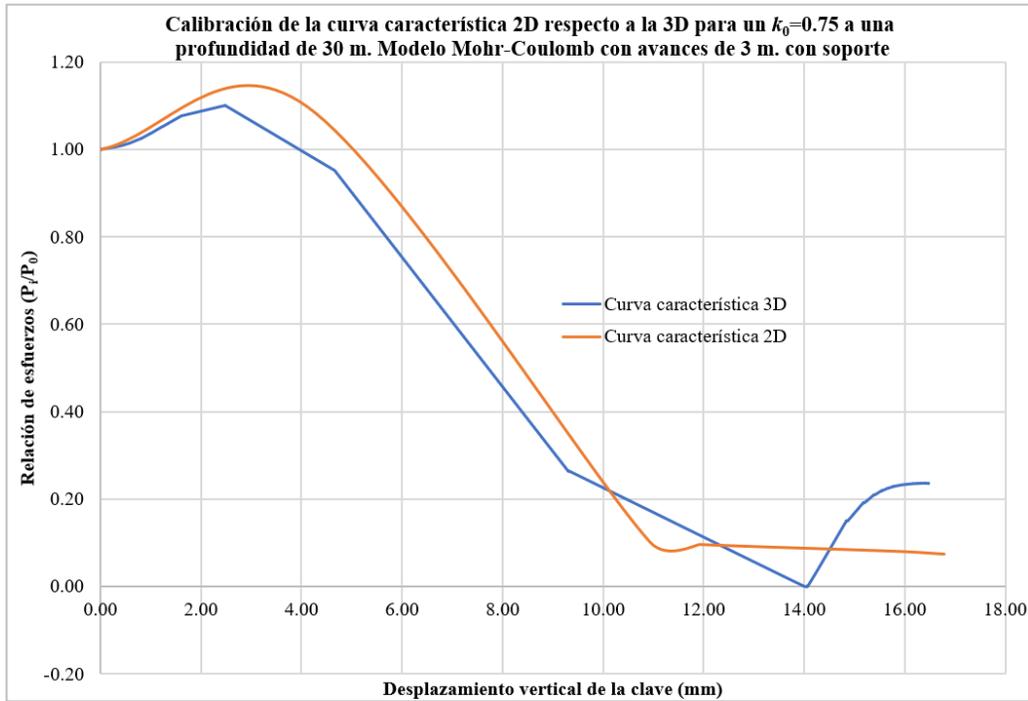


Figura 5. 27. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

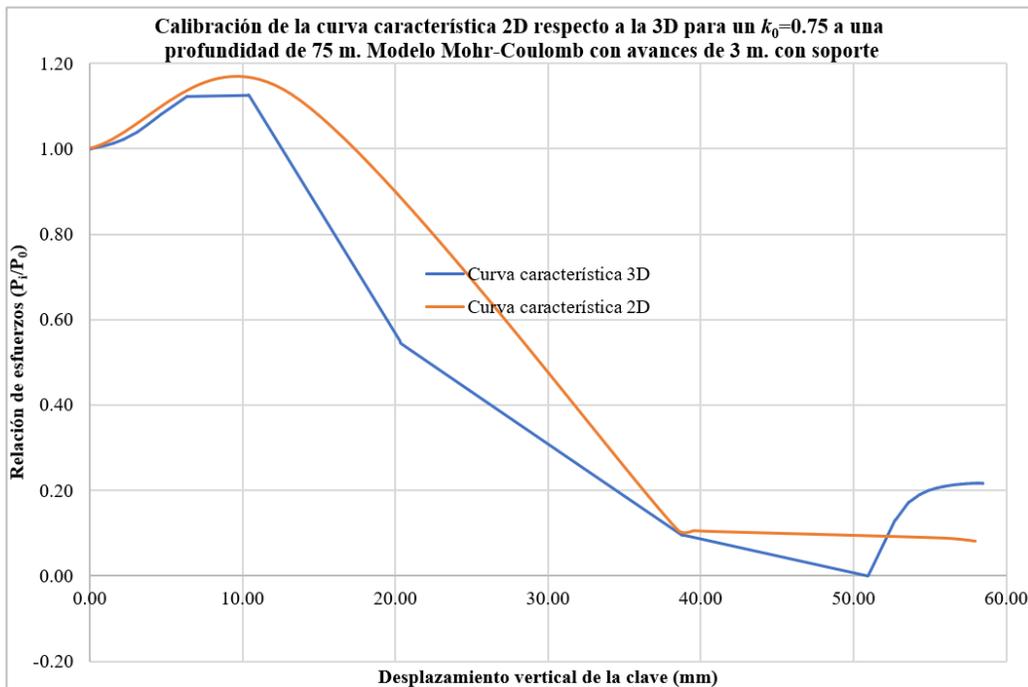


Figura 5. 28. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

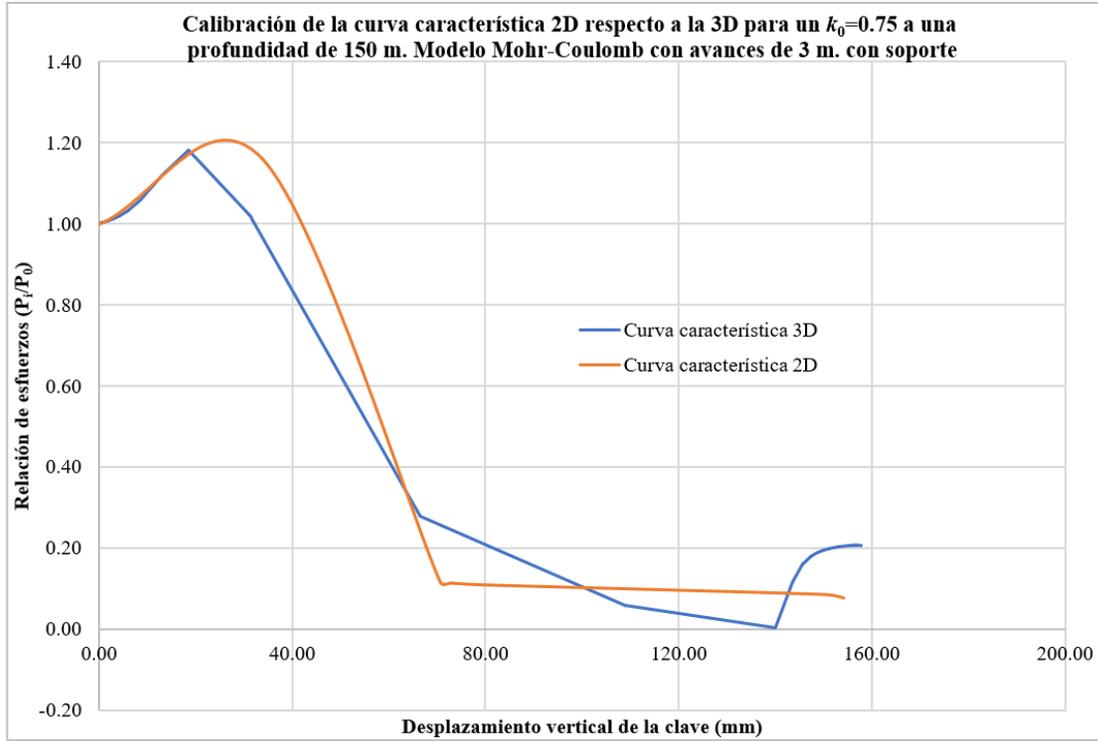


Figura 5.29. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

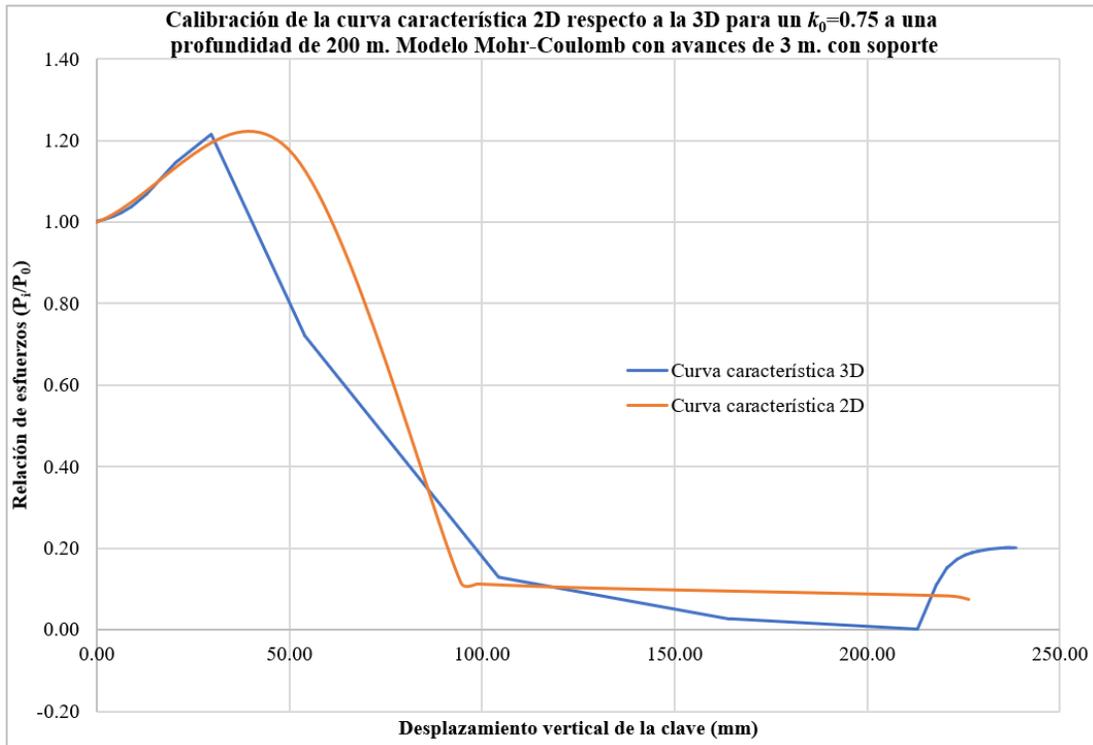


Figura 5.30. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

En la Tabla 5. 3 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 5. 3. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=0.75$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en modelo de túnel circular.

Caso	Profundidad (m)	$U_{máximo}$ 2D (mm)	$U_{máximo}$ 3D (mm)	Precisión $U_{máximo}$	P_i/P_0 máximo 2D (kN/m ²)	P_i/P_0 máximo 3D (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 max.	P_i/P_0 final 2D (kN/m ²)	P_i/P_0 final 3D (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 final	Relajación inicial (%)	Relajación final (%)	$\Delta\varepsilon_v$ (%)	E_m (kN/m ²)	ΔE_0 (%)
06-a_con	30	16.7	16.4	102%	1.098	1.101	100%	0.075	0.236	32%	91.5%	94.7%	0.084%	50 000	10%
06-b_con	75	57.9	58.5	99%	1.127	1.127	100%	0.080	0.217	37%	91.0%	93.7%	0.270%	50 000	10%
06-c_con	150	154.2	157.8	98%	1.162	1.182	98%	0.076	0.206	37%	90.5%	93.1%	0.690%	50 000	10%
06-d_con	200	226.2	238.4	95%	1.180	1.214	97%	0.075	0.200	37%	90.5%	93.3%	1.020%	50 000	10%

En la Tabla 5. 3 puede verse que:

- La calibración de los desplazamientos finales tuvo una precisión del 95% al 102%. La cual presenta valores aceptables para una calibración, teniendo un margen menor al 5%.
- La calibración de los esfuerzos máximos tiene una precisión del 97% al 100%. Es un rango aceptable para una calibración, con un margen menor al 5%.
- La calibración de los esfuerzos tuvo una precisión del 32 al 37%. Estos valores no son aceptables para una calibración, y muestran la limitante de esta calibración, que solamente calibra los desplazamientos finales, más no los esfuerzos finales.
- Las relajaciones iniciales de esfuerzos fueron superiores al 90%.
- Las relajaciones finales de esfuerzos fueron alrededor de 93 al 95% antes de colocar el sostenimiento.
- La deformación volumétrica se incrementa conforme aumenta la profundidad.
- El módulo de Young modificado (E_m) es constante para todos los casos analizados, con un valor de 50 000 kN/m², que corresponde al 10% del módulo de Young inicial (E_0).

5.2.1.4 Caso $k_0=1.00$

A continuación, se muestran los resultados de la calibración de los 4 casos estudiados:

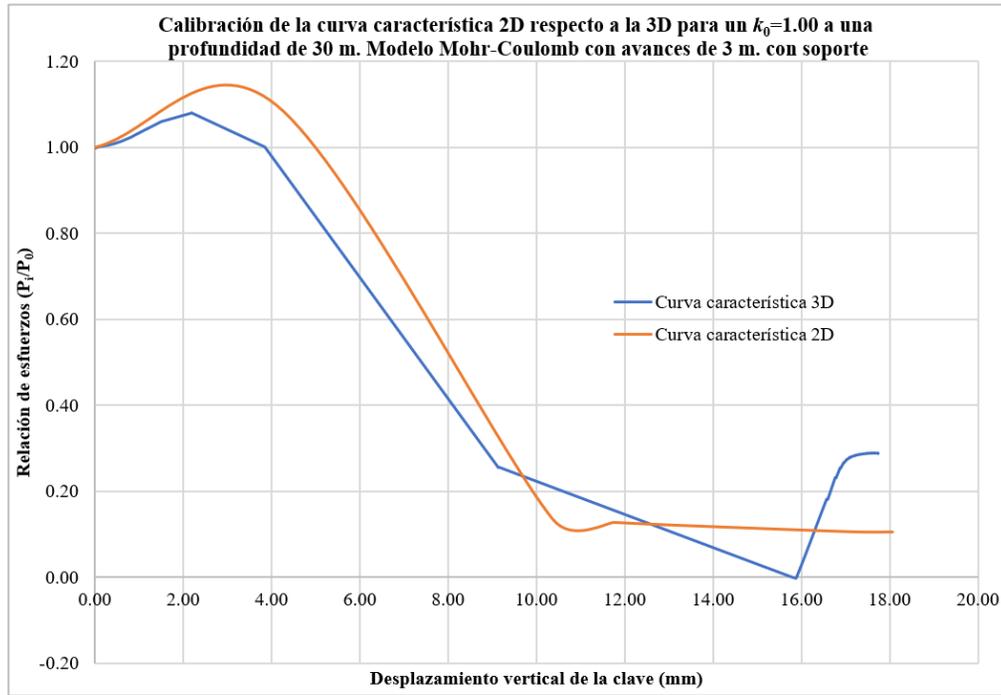


Figura 5. 31. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

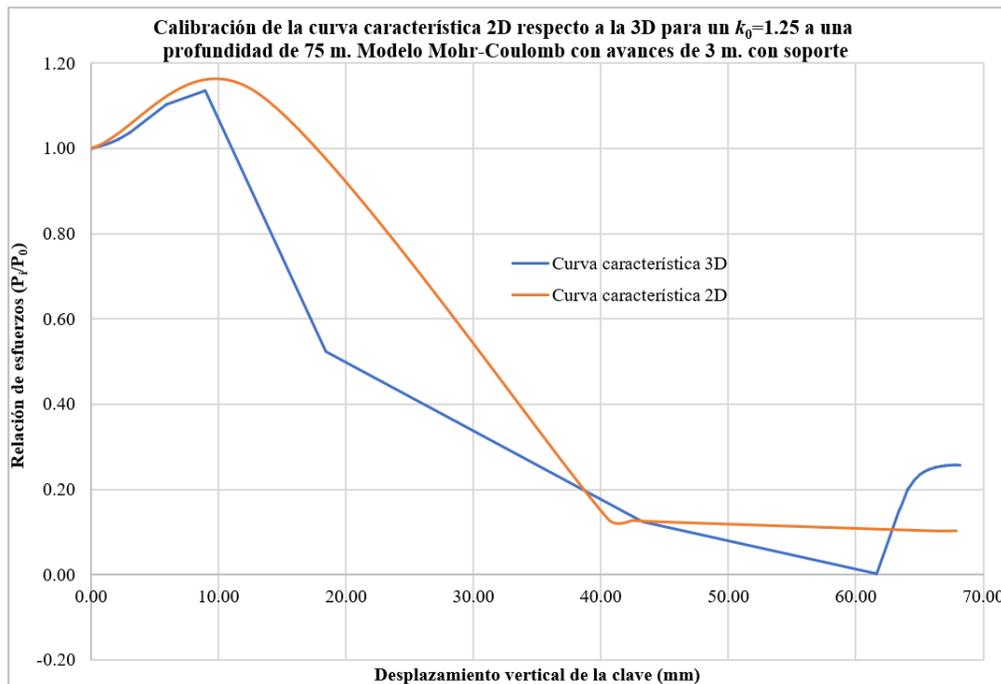


Figura 5. 32. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

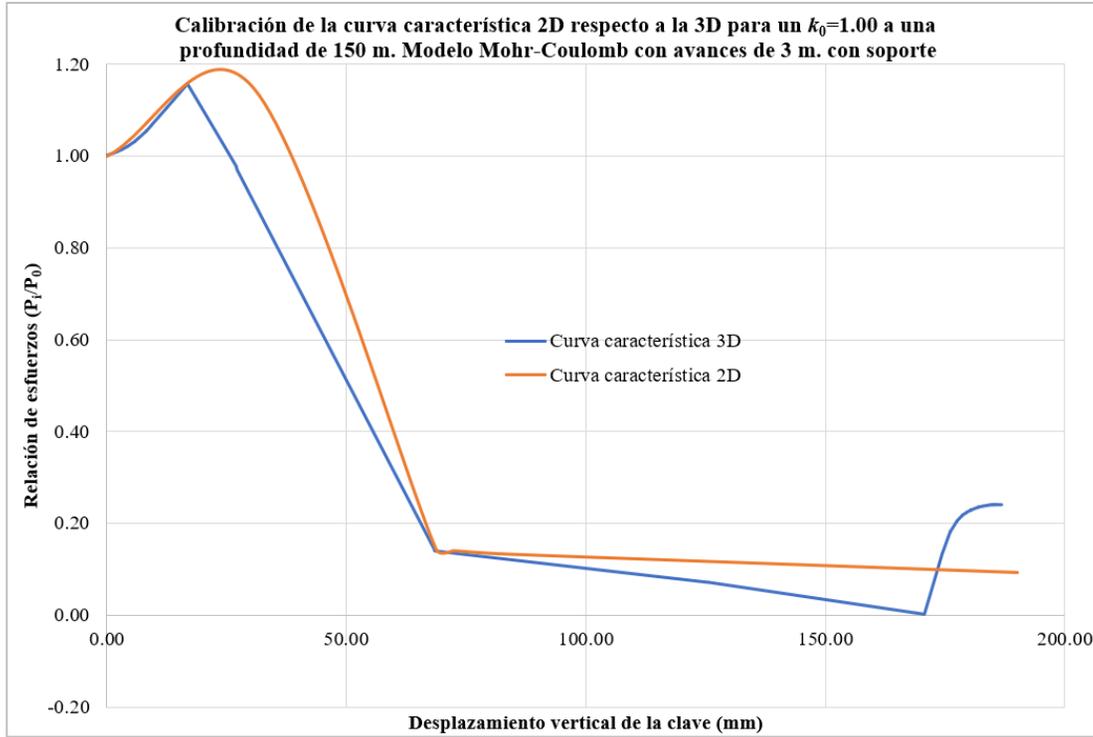


Figura 5.33. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

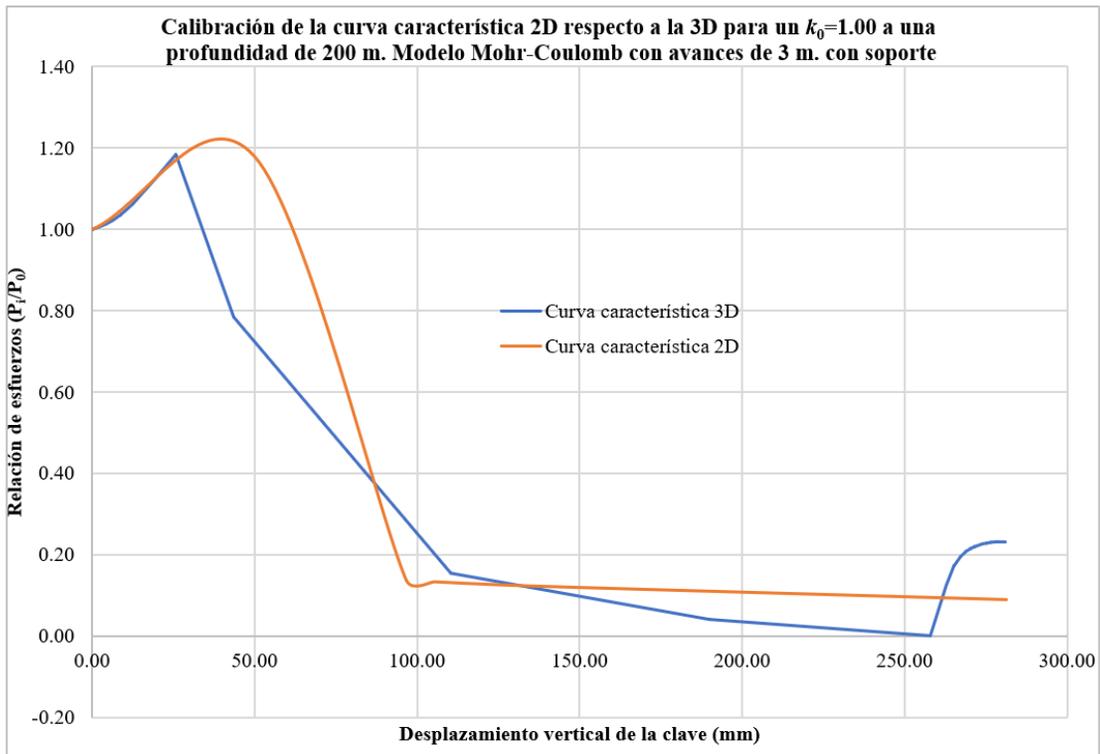


Figura 5.34. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

En la Tabla 5. 4 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 5. 4. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=1.00$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en modelo de túnel circular.

Caso	Profundidad (m)	$U_{máximo}$ 2D (mm)	$U_{máximo}$ 3D (mm)	Precisión $U_{máximo}$	P_i/P_0 2D máximo (kN/m ²)	P_i/P_0 3D máximo (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 max.	P_i/P_0 2D final (kN/m ²)	P_i/P_0 3D final (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 final	Relajación inicial (%)	Relajación final (%)	$\Delta\varepsilon_v$ (%)	E_m (kN/m ²)	ΔE_0 (%)
07-a_con	30	18.0	17.7	102%	1.098	1.081	102%	0.105	0.289	36%	89.0%	92.8%	0.084%	50 000	10%
07-b_con	75	67.8	68.1	100%	1.127	1.136	99%	0.103	0.257	40%	89.0%	92.6%	0.270%	50 000	10%
07-c_con	150	190.1	186.8	102%	1.148	1.156	99%	0.093	0.240	39%	88.0%	92.2%	0.630%	50 000	10%
07-d_con	200	281.3	280.9	100%	1.180	1.185	100%	0.091	0.232	39%	88.5%	92.5%	1.020%	50 000	10%

En la Tabla 5. 4 se observa lo siguiente:

- Una precisión de 100% a 102% se obtuvo en la calibración de los desplazamientos finales. Es un rango aceptable para una calibración, con un margen menor al 2%.
- La calibración de los esfuerzos máximos tiene una precisión del 99% al 102%. Es un rango aceptable para una calibración, con un margen menor al 5%.
- La calibración de los esfuerzos finales tuvo una precisión del 36% al 40%. Estos valores no son aceptables para una calibración, y muestran la limitante de esta calibración, que calibra los desplazamientos finales, más no los esfuerzos finales.
- Relajaciones iniciales de esfuerzos superiores al 88%.
- Relajaciones finales de esfuerzos alrededor de 92 al 93% antes de colocar el sostenimiento.
- La deformación volumétrica se incrementa conforme aumenta la profundidad.
- El módulo de Young modificado (E_m) es constante para todos los casos analizados con un valor de 50 000 kN/m², que corresponde al 10% del módulo de Young inicial (E_0).

5.2.1.5 Caso $k_0=1.25$

Se muestran a continuación los resultados de la calibración de los 4 casos estudiados:

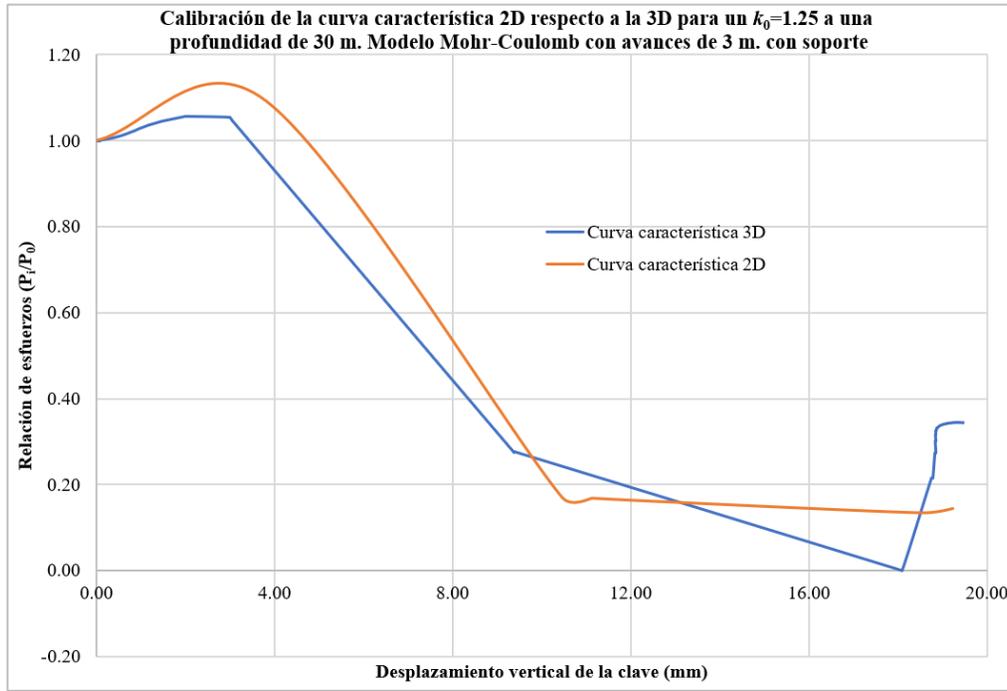


Figura 5. 35. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

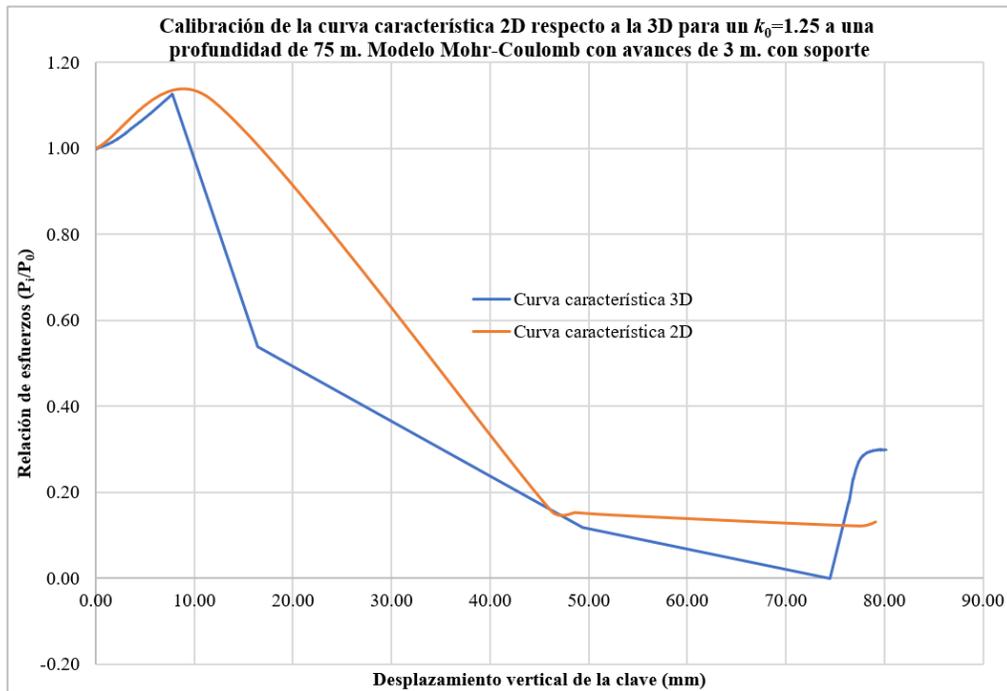


Figura 5. 36. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

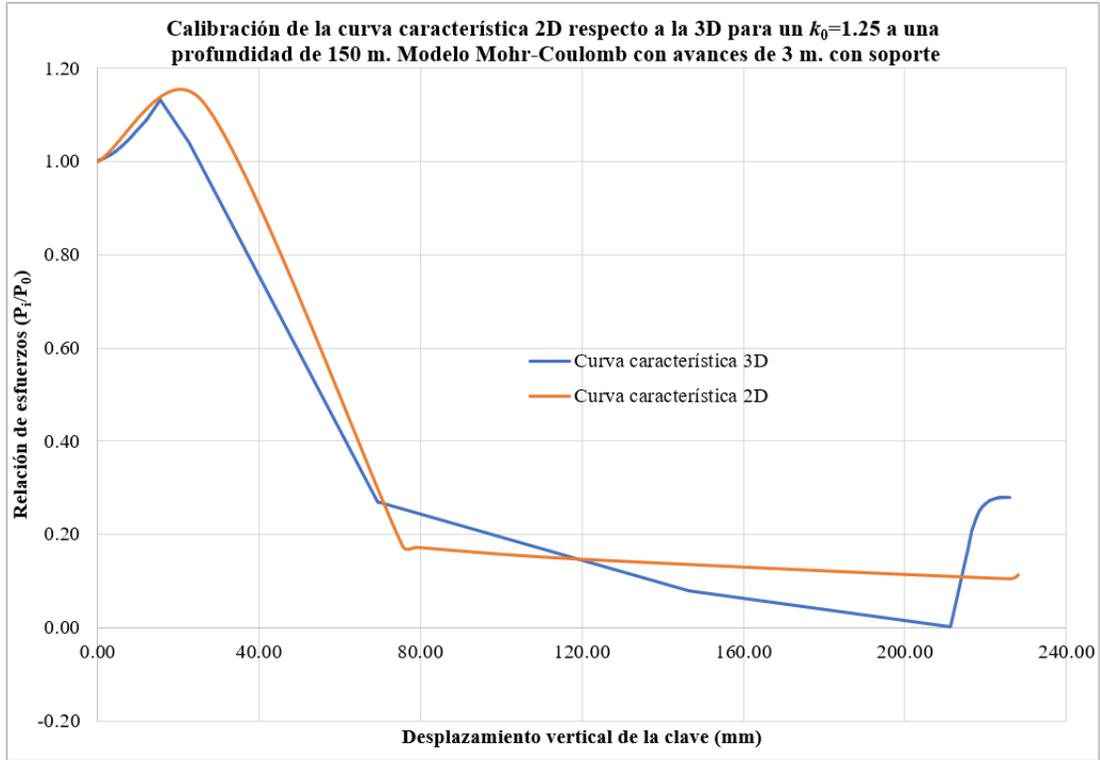


Figura 5.37. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

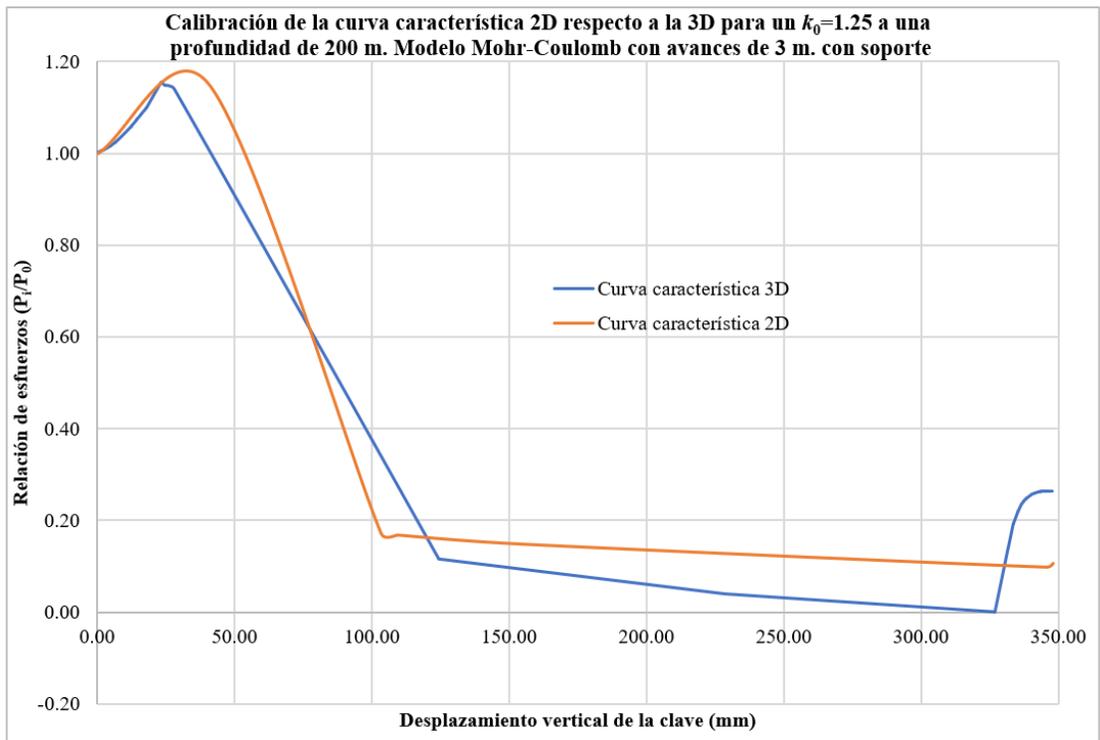


Figura 5.38. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

En la Tabla 5. 5 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 5. 5. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=1.25$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en modelo de túnel circular.

Caso	Profundidad (m)	$U_{máximo}$ 2D (mm)	$U_{máximo}$ 3D (mm)	Precisión $U_{máximo}$	P_i/P_0 2D máximo (kN/m ²)	P_i/P_0 3D máximo (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 max.	P_i/P_0 2D final (kN/m ²)	P_i/P_0 3D final (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 final	Relajación inicial (%)	Relajación final (%)	$\Delta\varepsilon_v$ (%)	E_m (kN/m ²)	ΔE_0 (%)
08-a_con	30	19.2	19.4	99%	1.091	1.081	101%	0.143	0.344	42%	85.5%	90.5%	0.078%	50 000	10%
08-b_con	75	79.1	80.1	99%	1.113	1.136	98%	0.130	0.300	43%	86.5%	91.2%	0.240%	50 000	10%
08-c_con	150	227.9	225.8	101%	1.127	1.156	97%	0.112	0.279	40%	85.0%	91.1%	0.540%	50 000	10%
08-d_con	200	347.9	347.7	100%	1.148	1.185	97%	0.106	0.264	40%	85.5%	91.7%	0.840%	50 000	10%

En la Tabla 5. 5 se observa que:

- La calibración de los desplazamientos finales tuvo una precisión de 99% a 101%, que es aceptable para una calibración, con un margen menor al 1%.
- La calibración de los esfuerzos máximos tiene una precisión del 97% al 101%. Es un rango aceptable para una calibración, con un margen menor al 5%.
- La precisión de la calibración de los esfuerzos finales estuvo entre 37% y 40%. Estos valores no son aceptables para una calibración, y esto muestra que la limitación de esta calibración radica que solamente calibra los desplazamientos finales, más no los esfuerzos finales.
- Las relajaciones iniciales de esfuerzos fueron superiores al 85%.
- Las relajaciones finales de esfuerzos fueron alrededor 90% al 92% antes de colocar el sostenimiento.
- La deformación volumétrica se incrementa conforme aumenta la profundidad.
- El módulo de Young modificado (E_m) es constante para todos los casos analizados, con un valor de 50 000 kN/m², que corresponde al 10% del módulo de Young inicial (E_0).

5.2.1.6 Resultados del túnel circular

Procesando los resultados de la Tabla 5. 1, Tabla 5. 2, Tabla 5. 3, Tabla 5. 4 y Tabla 5. 5, se obtuvieron cuatro gráficas.

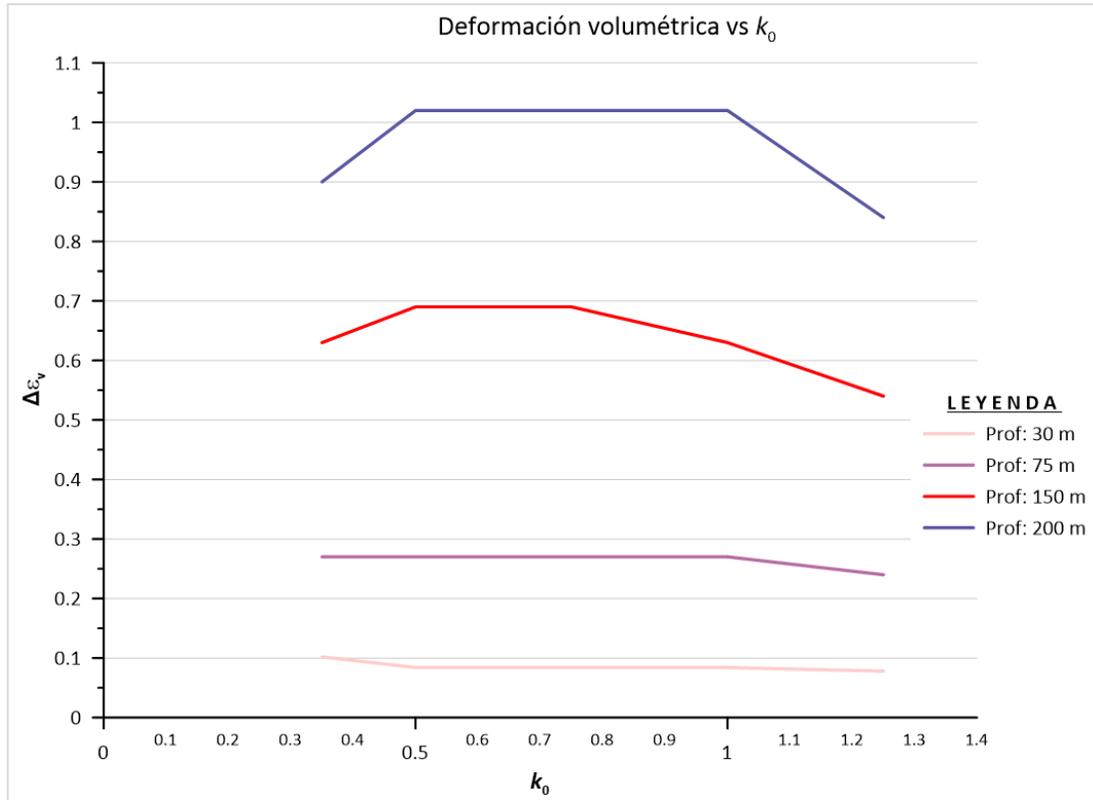


Figura 5. 39. Deformación volumétrica vs k_0 a distintas profundidades en el modelo circular.

En la Figura 5. 39 se observa que la deformación volumétrica se incrementa conforme se aumenta la profundidad. En la Tabla 5. 6 se pueden apreciar los rangos de las deformaciones volumétricas con su respectiva profundidad para los coeficientes de k_0 analizados.

Tabla 5. 6. Rangos de deformaciones volumétricas con su respectiva profundidad. Túnel circular

Rangos de deformaciones volumétricas (%)	Profundidad (m)
0.08 a 0.10	30
0.24 a 0.27	75
0.54 a 0.69	150
0.84 a 1.02	200

A continuación se adjunta la Figura 5. 40 en la que se observa que las deformaciones volumétricas son idénticas para los coeficientes de $k_0=0.50$ y 0.75 , y que disminuyen conforme se aumenta el valor de k_0 , a partir de $k_0=0.50$.

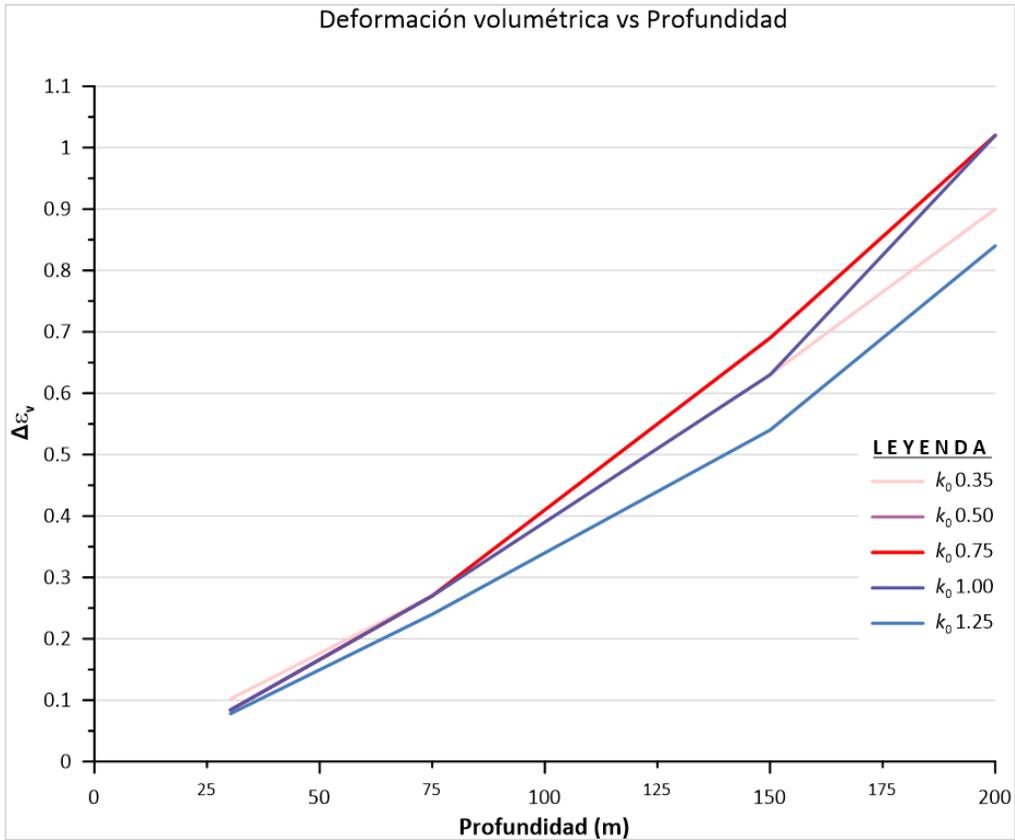


Figura 5. 40. Deformación volumétrica vs profundidad a distintos k_0 en modelo circular.

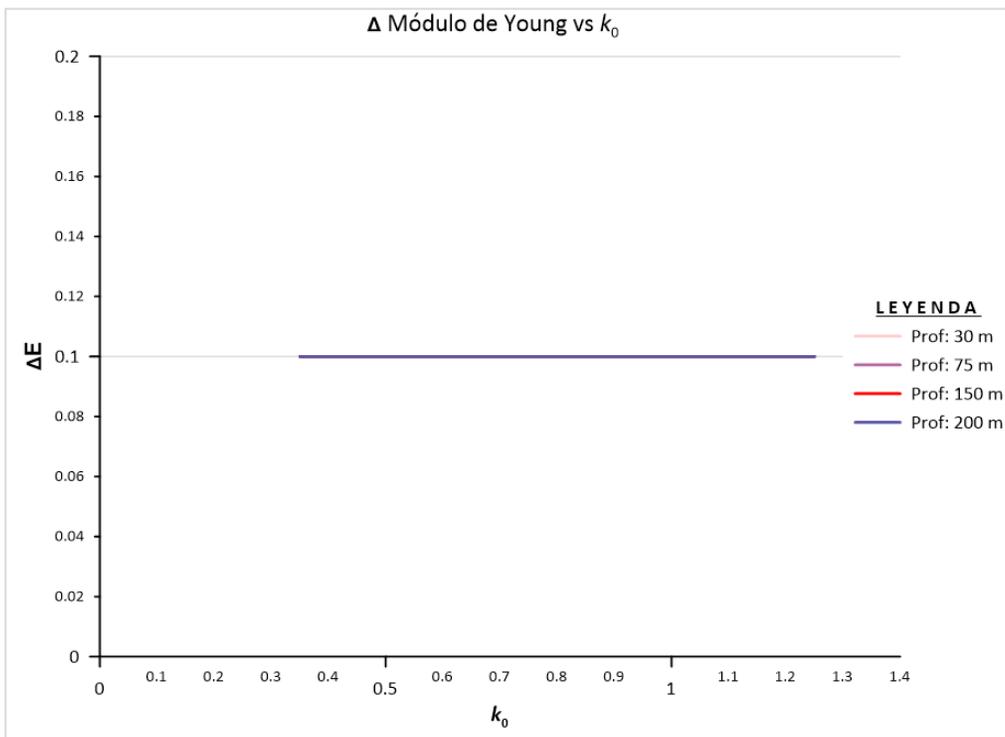


Figura 5. 41. Δ Módulo de Young vs k_0 a distintas profundidades en modelo circular.

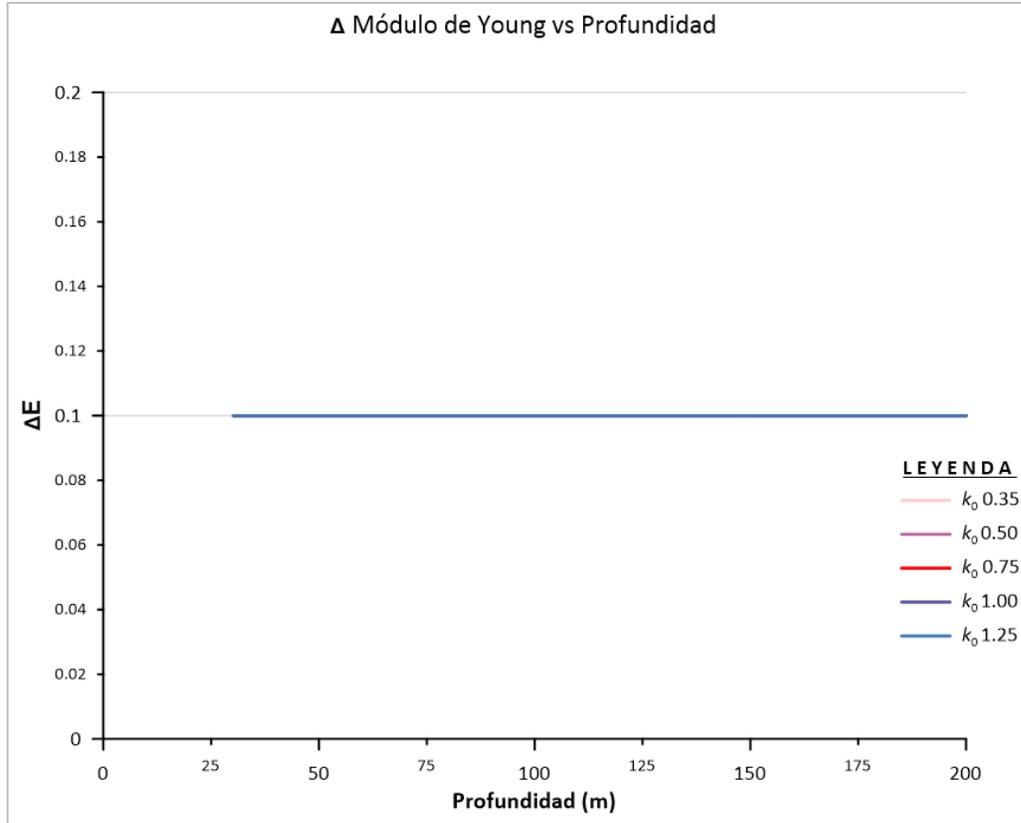


Figura 5. 42. Δ Módulo de Young vs profundidad a distintos k_0 en modelo circular.

En las Figuras 5. 41y 5. 42 pueden verse que el Δ Módulo de Young es constante para todos los casos de calibraciones estudiados, presentando el 10 % del módulo de Young inicial con un valor de 50 000 kN/m².

5.2.1.7 Conclusiones del túnel circular

- La calibración del tramo inicial de la curva característica se realizó exitosamente. Esto fue posible gracias a la aplicación de los artificios mostrados en la fase 1, que consistieron en modificar el módulo de Young de la sección a excavar y aplicar una deformación volumétrica a la sección que no se va excavar.
- El Δ Módulo de Young es constante para todos los casos analizados, con un valor de 50 000 kN/m², que corresponde al 10% del módulo de Young inicial (E_0). Este resultado se logró luego de iterar valores en un proceso de ensayo-error.
- La deformación volumétrica varía según el k_0 y la profundidad, y se incrementa conforme aumenta la profundidad.
- A partir de las Figuras 5. 39 y 5. 40 se pueden interpolar valores de deformación volumétrica para nuevas calibraciones deseadas, siempre que el valor de k_0 varíe entre 0.35 y 1.25 y la profundidad varíe entre 30 y 200 m.
- El tramo intermedio de la curva característica se logró calibrar a través de relajaciones de esfuerzos.
- Las relajaciones iniciales de esfuerzos que se realizan a partir de la fase 2 fueron superiores al 85%.
- Las relajaciones finales de esfuerzos están entre 90% y 97% antes de colocar el soporte,

- En la calibración del tramo final de la curva, que se realiza en la fase 6, los desplazamientos finales tuvieron una precisión del 95% al 102%, los cuales son valores aceptables para una calibración, teniendo un margen menor al 5%.
- En la calibración del tramo final de la curva los esfuerzos finales tuvieron una precisión de 20% a 40%. Estos valores no son aceptables para una calibración. Aquí radica la limitante de este método, que solamente calibra los desplazamientos finales, más no los esfuerzos finales.

5.2.2 Túnel de carretera

En el modelo de túnel de carretera se realizó la calibración para los coeficientes de $k_0=0.35, 0.50, 0.75, 1.00$ y 1.25 , con avance de excavaciones de 3 m., a la profundidad de 30, 75, 150 y 200 m.

5.2.2.1 Caso $k_0=0.50$

A continuación, se muestran los resultados de la calibración de los 4 casos estudiados.

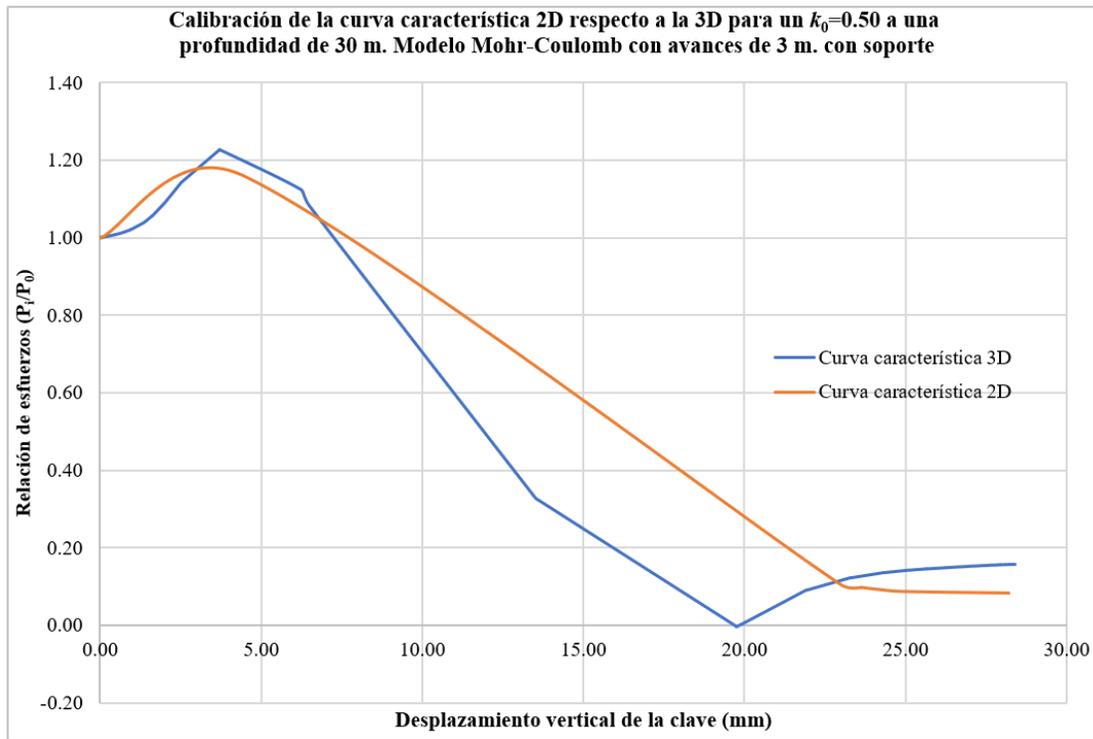


Figura 5. 43. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

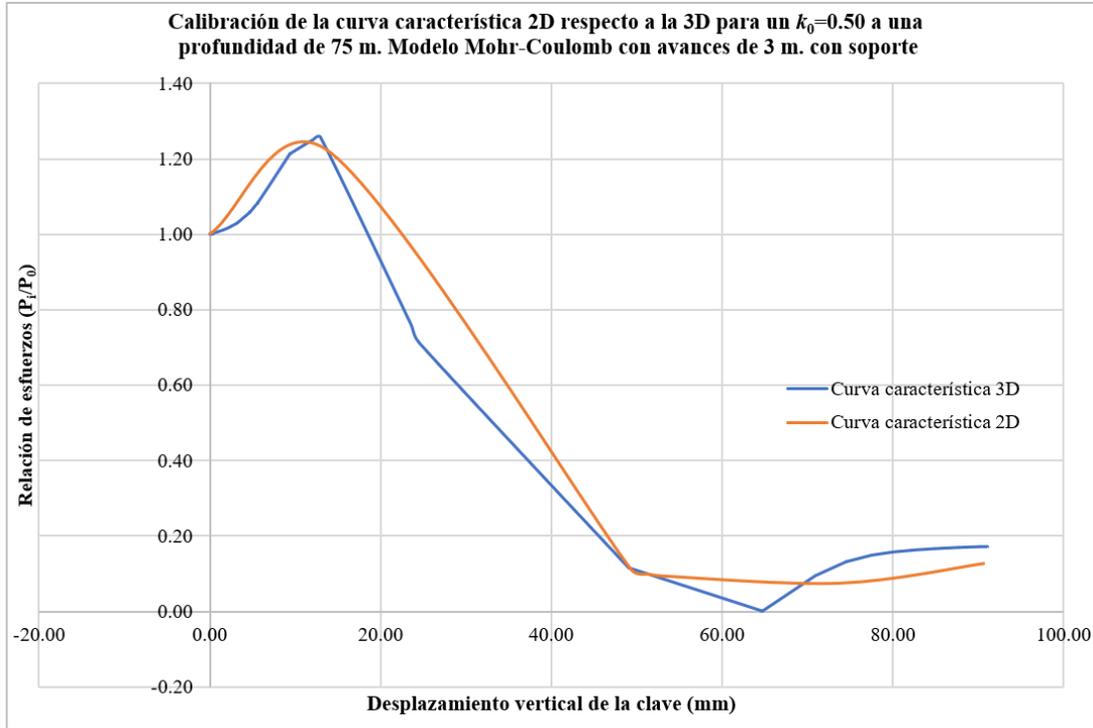


Figura 5.44. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

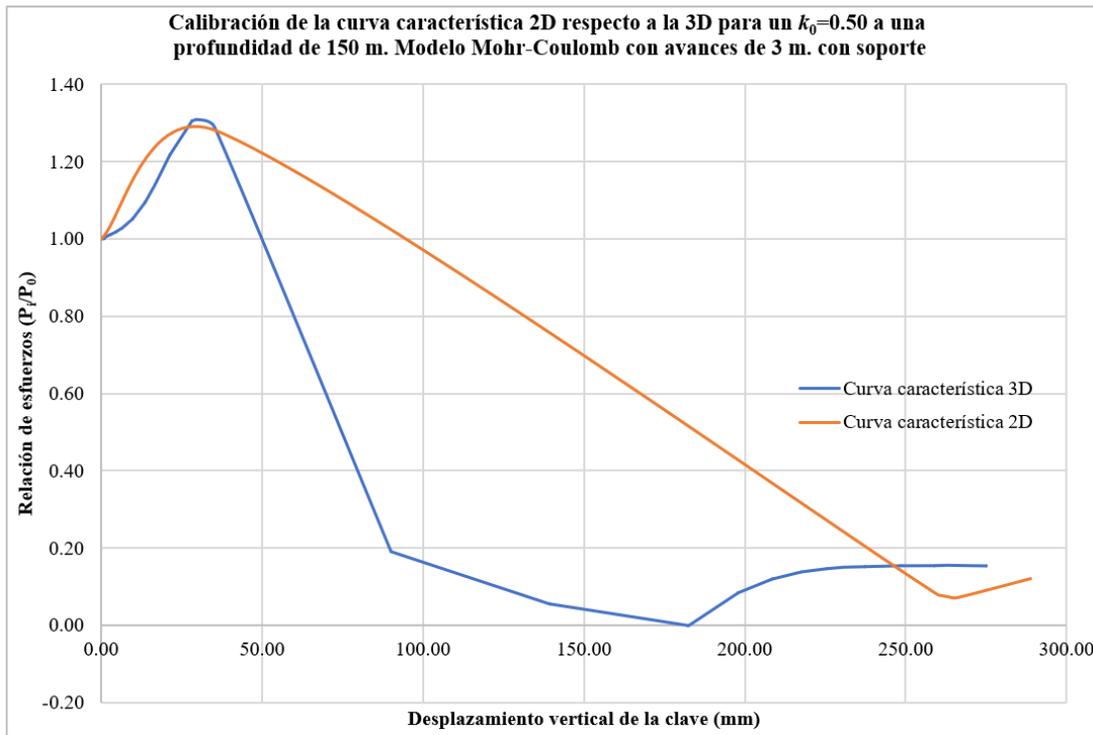


Figura 5.45. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

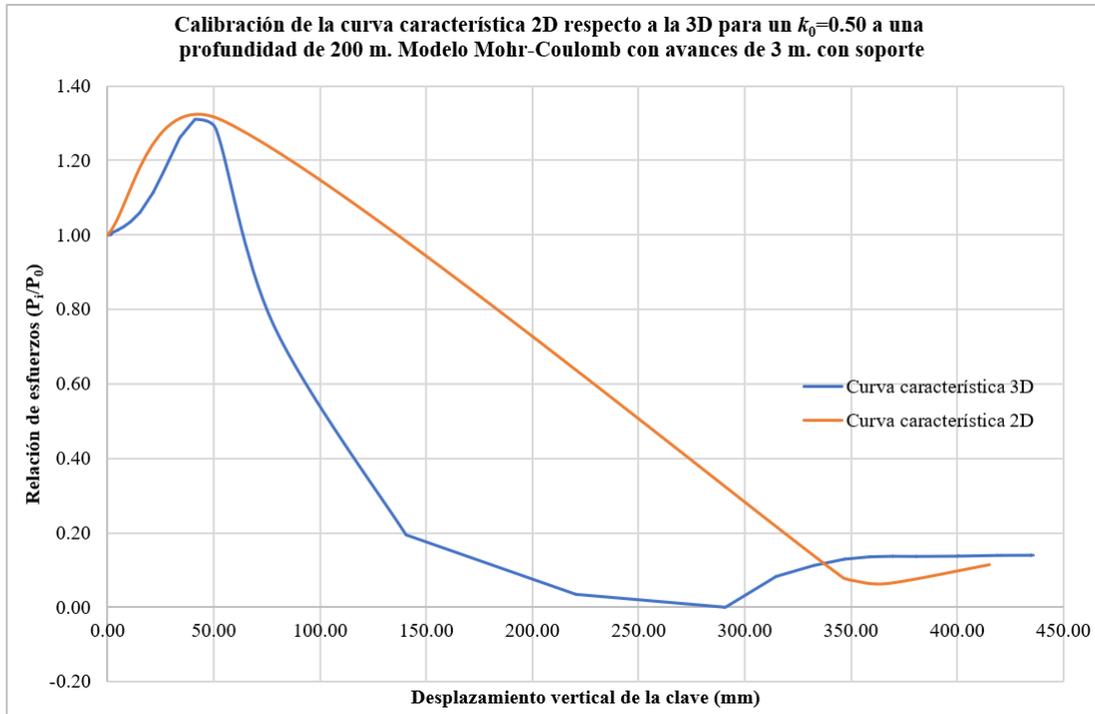


Figura 5. 46. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

En la Tabla 5. 7 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 5. 7. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=0.50$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en túnel de carretera.

Caso	Profundidad (m)	$U_{máximo}$ 2D (mm)	$U_{máximo}$ 3D (mm)	Precisión $U_{máximo}$	P_i/P_0 2D máximo (kN/m ²)	P_i/P_0 3D máximo (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 max.	P_i/P_0 2D final (kN/m ²)	P_i/P_0 3D final (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 final	Relajación inicial (%)	Relajación final (%)	$\Delta\varepsilon_v$ (%)	E_m (kN/m ²)	ΔE_0 (%)
02-a_con	30	28.2	28.3	99%	1.16	1.23	95%	0.084	0.158	53%	91.0%	93.5%	0.084%	80 000	16%
02-b_con	75	90.5	91.1	99%	1.21	1.26	97%	0.126	0.171	74%	91.0%	95.0%	0.270%	80 000	16%
02-c_con	150	288.8	275.1	105%	1.28	1.31	98%	0.120	0.153	78%	94.0%	95.2%	0.690%	80 000	16%
02-d_con	200	415.3	435.9	95%	1.31	1.31	100%	0.115	0.139	83%	94.0%	95.6%	1.020%	80 000	16%

En la Tabla 5. 7 puede apreciarse que:

- La calibración de los desplazamientos finales tuvo una precisión de 95% a 99%. Este rango es aceptable para una calibración, teniendo un margen menor al 5%.
- La calibración de los esfuerzos máximos tiene una precisión del 95% al 100%. Es un rango aceptable para una calibración, con un margen menor al 5%.
- La precisión de la calibración de los esfuerzos finales estuvo entre 53 y 83%. Estos valores no son aceptables para una calibración. Esta es la limitación de esta calibración, pues solamente calibra los desplazamientos finales y no calibra los esfuerzos finales.
- Las relajaciones iniciales de esfuerzos fueron superiores al 91%.
- Las relajaciones finales de esfuerzos fueron alrededor de 93.5% al 95.6% antes de colocar el soporte.
- La deformación volumétrica se incrementa conforme aumenta la profundidad.
- El módulo de Young modificado (E_m) es constante para todos los casos analizados, con un valor de 80 000 kN/m², que corresponde al 16% del módulo de Young inicial (E_0).

5.2.2.2 Caso $k_0=0.35$

Se muestran los resultados de la calibración de los 4 casos estudiados a continuación:

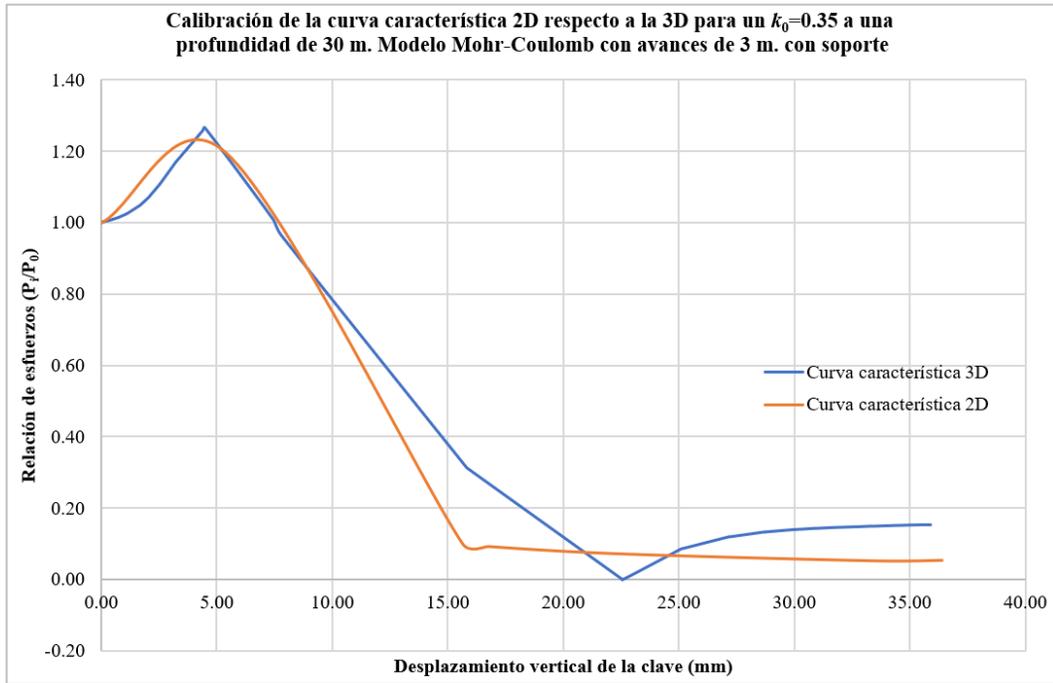


Figura 5. 47. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

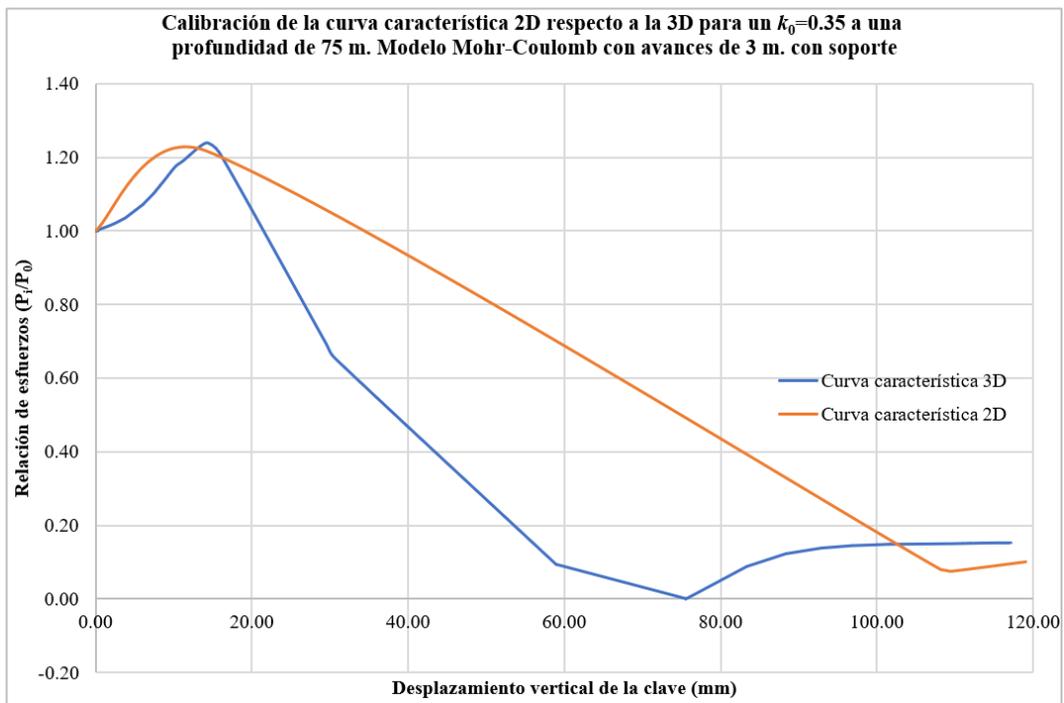


Figura 5. 48. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

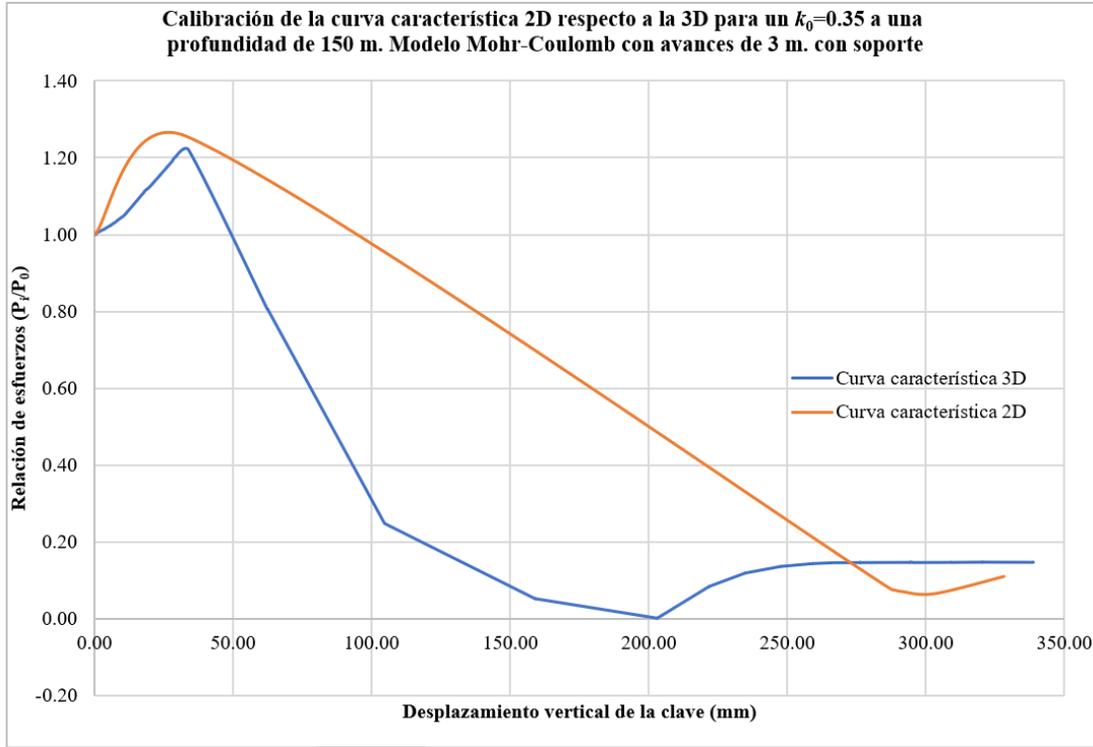


Figura 5. 49. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

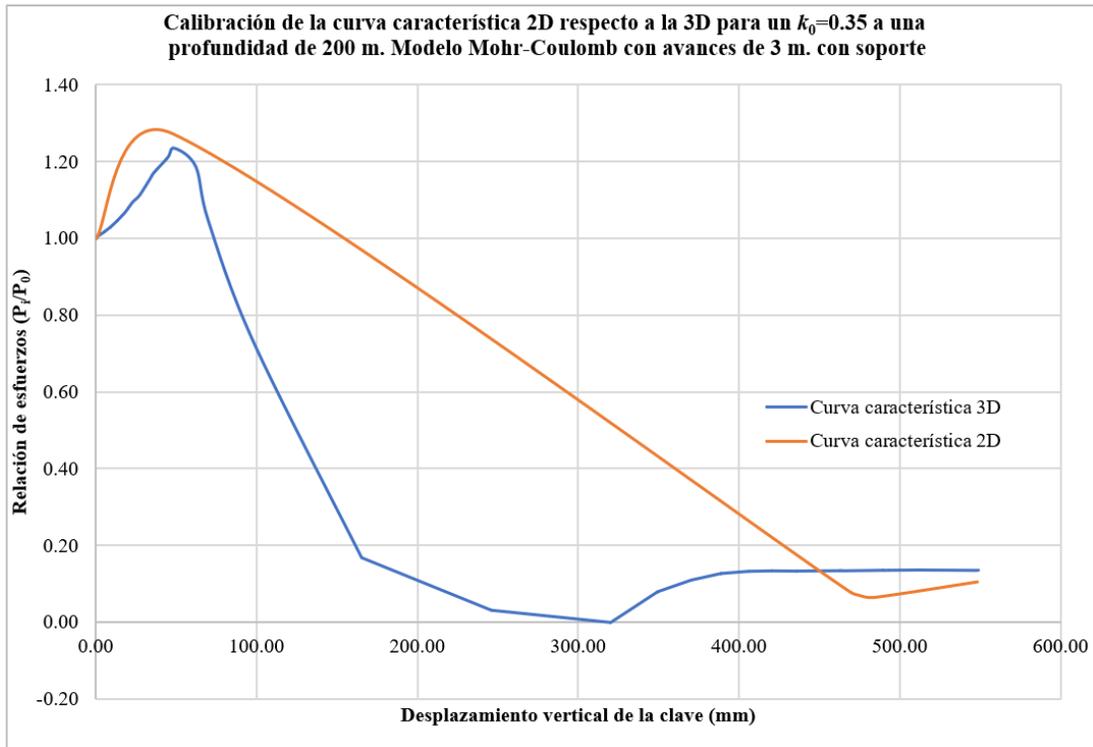


Figura 5. 50. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

En la Tabla 5. 8 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 5. 8. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=0.35$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en túnel de carretera.

Caso	Profundidad (m)	$U_{máximo}$ 2D (mm)	$U_{máximo}$ 3D (mm)	Precisión $U_{máximo}$	P_i/P_0 máximo 2D (kN/m ²)	P_i/P_0 máximo 3D (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 max.	P_i/P_0 2D final (kN/m ²)	P_i/P_0 3D final (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 final	Relajación inicial (%)	Relajación final (%)	$\Delta\varepsilon_v$ (%)	E_m (kN/m ²)	ΔE_0 (%)
03-a_con	30	36.3	35.8	101%	1.20	1.27	95%	0.055	0.154	36%	91.5%	96.7%	0.102%	80 000	16%
03-b_con	75	119.1	117.1	102%	1.22	1.24	98%	0.102	0.152	67%	93.5%	94.0%	0.270%	80 000	16%
03-c_con	150	328.2	338.8	97%	1.25	1.22	103%	0.110	0.146	75%	94.0%	95.5%	0.630%	80 000	16%
03-d_con	200	548.6	548.8	100%	1.27	1.24	103%	0.105	0.136	77%	94.0%	95.5%	0.900%	80 000	16%

En la Tabla 5. 8 puede observarse lo siguiente:

- La precisión de la calibración de los desplazamientos finales estuvo entre 97% y 102%, rango aceptable para una calibración, teniendo un margen menor al 3%.
- La calibración de los esfuerzos máximos tiene una precisión del 95% al 103%. Es un rango aceptable para una calibración, con un margen menor al 5%.
- La calibración de los esfuerzos finales tuvo una precisión de 36% a 77%, que no resulta aceptable para una calibración. Estos valores dan cuenta de la limitante de esta calibración: calibra los desplazamientos finales, más no los esfuerzos finales.
- Las relajaciones iniciales de esfuerzos fueron superiores al 91%.
- Las relajaciones finales de esfuerzos fueron del alrededor de 94% al 96.7% antes de colocar el soporte.
- La deformación volumétrica se incrementa conforme aumenta la profundidad.
- El módulo de Young modificado (E_m) es constante para todos los casos analizados presentando un valor de 80 000 kN/m², que corresponde al 16% del módulo de Young inicial (E_0).

5.2.2.3 Caso $k_0=0.75$

Se muestran a continuación los resultados de la calibración de los 4 casos estudiados:

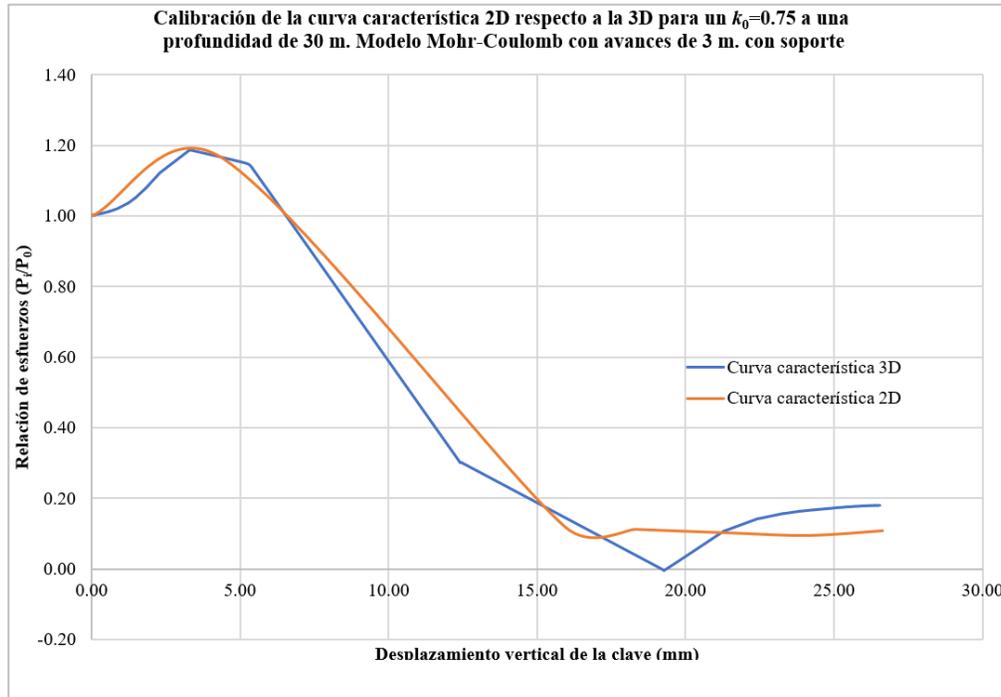


Figura 5. 51. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

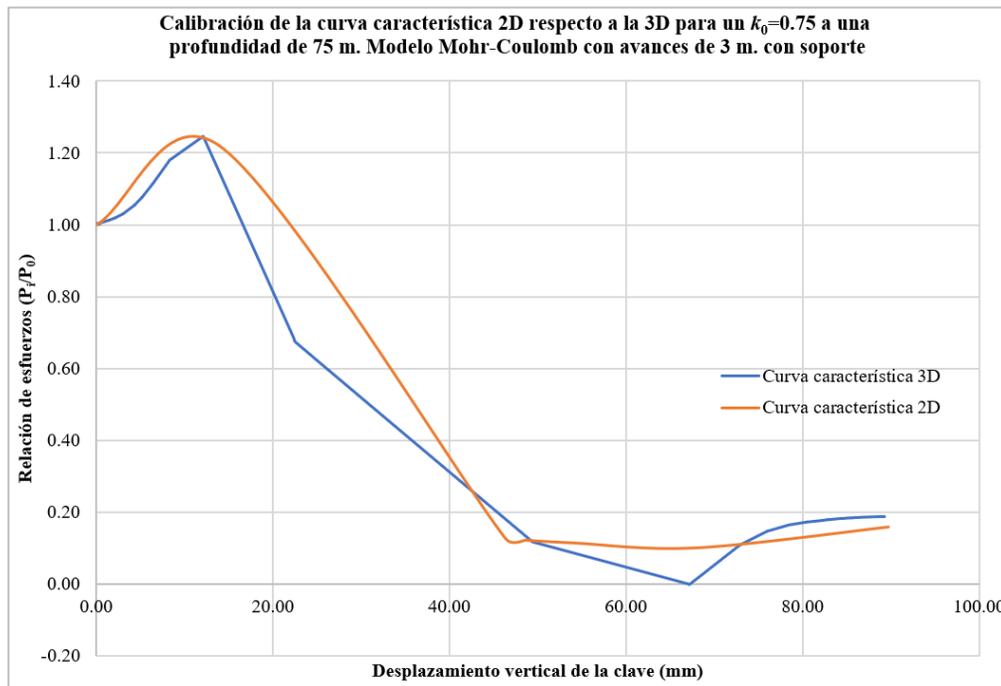


Figura 5. 52. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

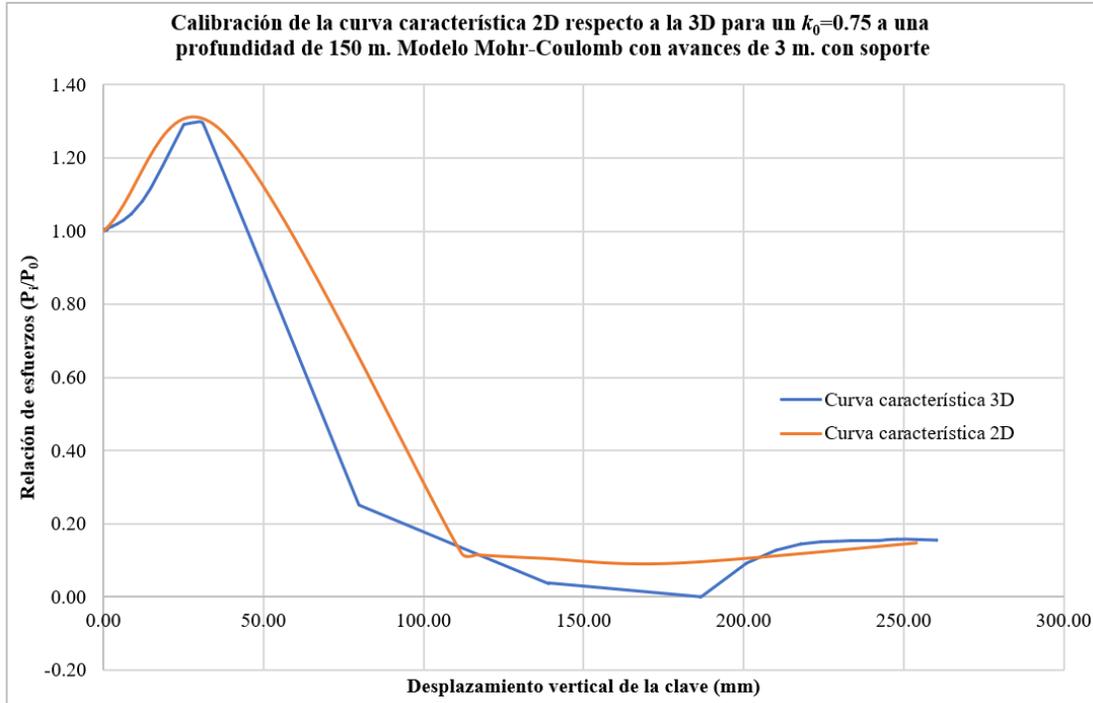


Figura 5. 53. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

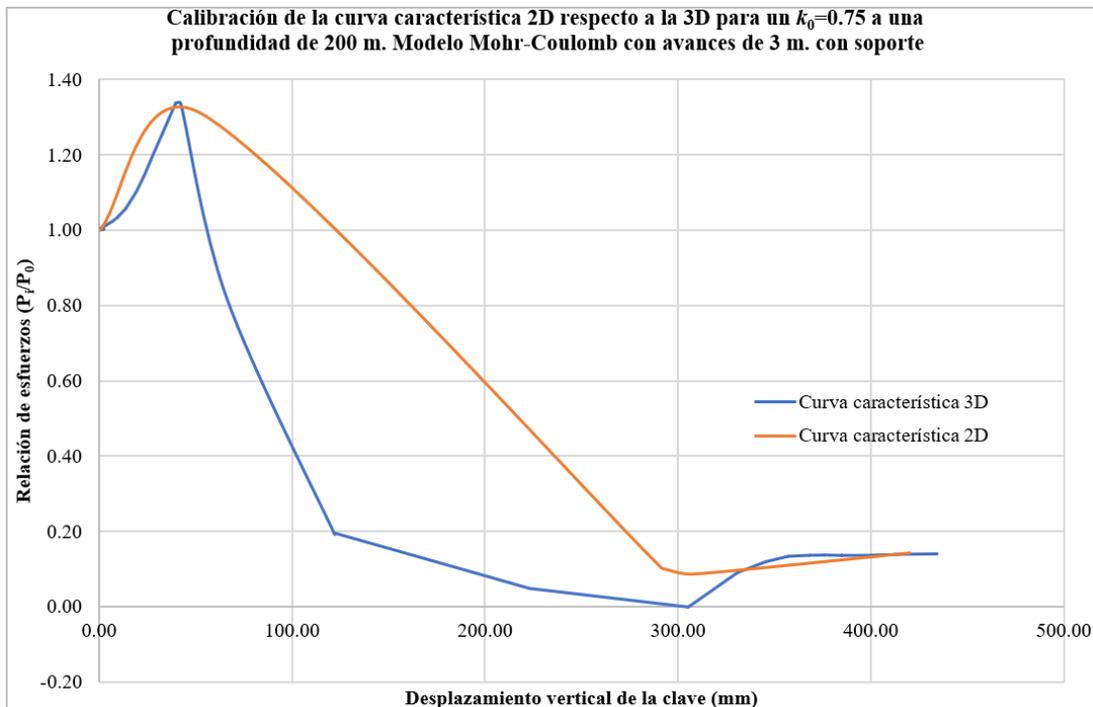


Figura 5. 54. Calibración de la curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

En la Tabla 5. 9 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 5. 9 Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=0.75$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en túnel de carretera.

Caso	Profundidad (m)	$U_{máximo}$ 2D (mm)	$U_{máximo}$ 3D (mm)	Preci-sión $U_{máximo}$	P_i/P_0 2D máximo (kN/m ²)	P_i/P_0 3D máximo (kN/m ²)	Preci-sión P_i/P_0 max.	P_i/P_0 2D final (kN/m ²)	P_i/P_0 3D final (kN/m ²)	Preci-sión P_i/P_0 final	Relaja-ción inicial (%)	Relaja-ción final (%)	$\Delta\varepsilon_v$ (%)	E_m (kN/m ²)	ΔE_0 (%)
04-a_con	30	26.640	26.557	100%	1.16	1.19	98%	0.107	0.180	59%	91.0%	93.6%	0.084%	80 000	16%
04-b_con	75	89.704	89.273	100%	1.21	1.25	98%	0.159	0.188	84%	90.0%	93.2%	0.270%	80 000	16%
04-c_con	150	253.876	260.403	97%	1.28	1.30	98%	0.147	0.156	94%	91.0%	94.0%	0.690%	80 000	16%
04-d_con	200	420.000	434.493	97%	1.31	1.34	98%	0.144	0.140	103%	92.0%	94.1%	1.020%	80 000	16%

Se observa en la Tabla 5. 9 lo siguiente:

- La calibración de los desplazamientos finales tuvo una precisión de 97 a 100%, la cual es aceptable para una calibración, teniendo un margen menor al 3%.
- La calibración de los esfuerzos máximos tiene una precisión del 98%. Es un rango aceptable para una calibración, con un margen menor al 5%.
- La calibración de los esfuerzos finales tuvo una precisión de 59% a 103%. Estos valores no son aceptables para una calibración; por lo tanto, muestran la limitante del método: no calibra los esfuerzos finales.
- Las relajaciones iniciales de esfuerzos fueron superiores al 90%.
- Las relajaciones finales de esfuerzos estuvieron alrededor de 93.2% al 94.1% antes de colocar el sostenimiento.
- La deformación volumétrica se incrementa conforme aumenta la profundidad.
- El módulo de Young modificado (E_m) es constante para todos los casos analizados, con un valor de 80 000 kN/m², que corresponde al 16% del módulo de Young inicial (E_0).

5.2.2.4 Caso $k_0=1.00$

A continuación, se muestran los resultados de la calibración de los 4 casos estudiados:

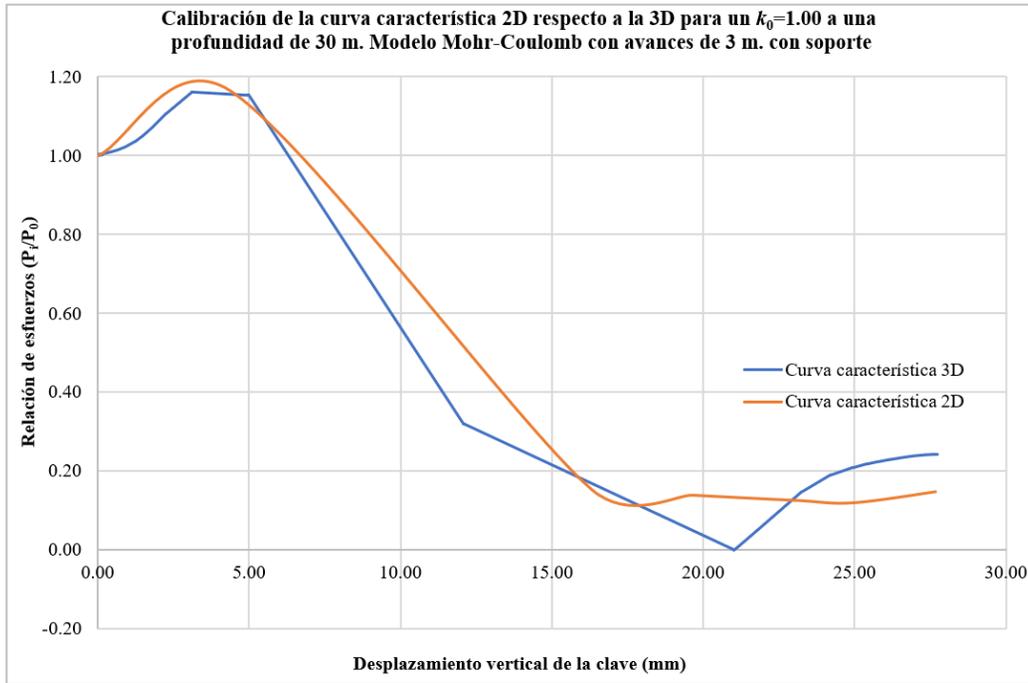


Figura 5. 55. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

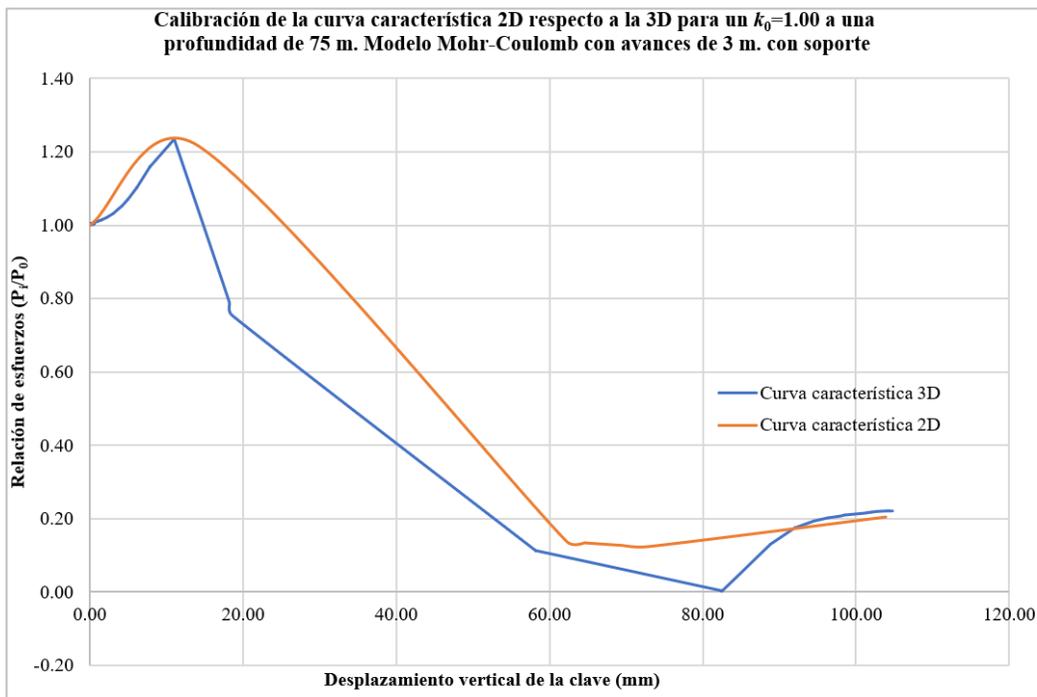


Figura 5. 56. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

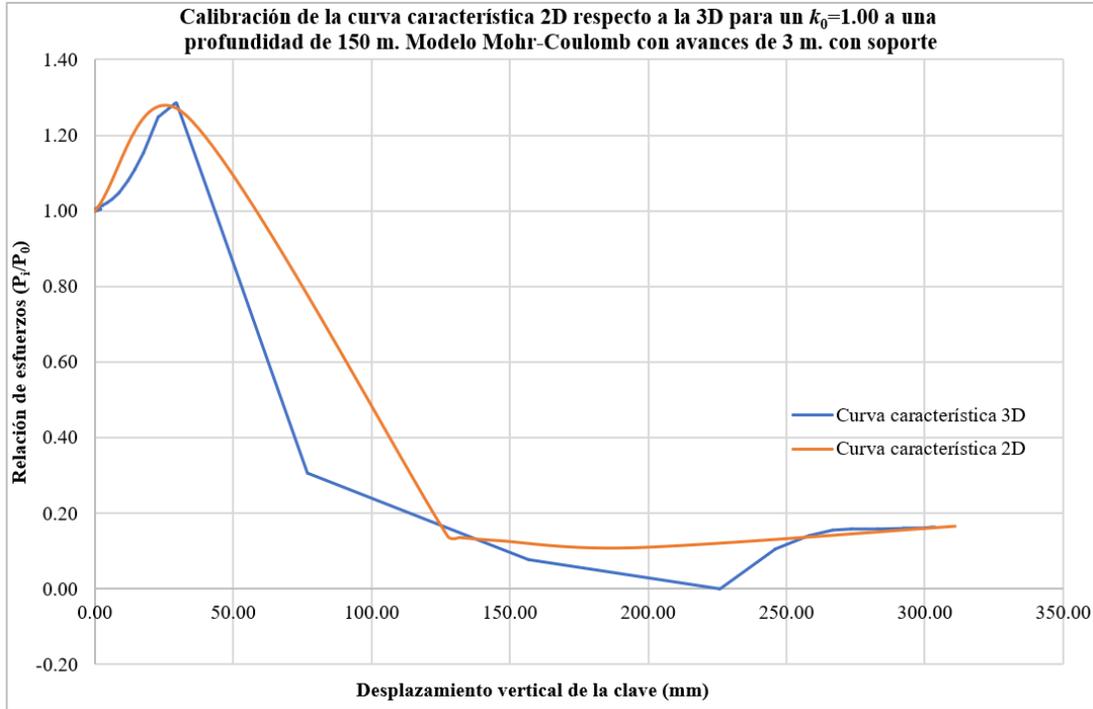


Figura 5.57. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

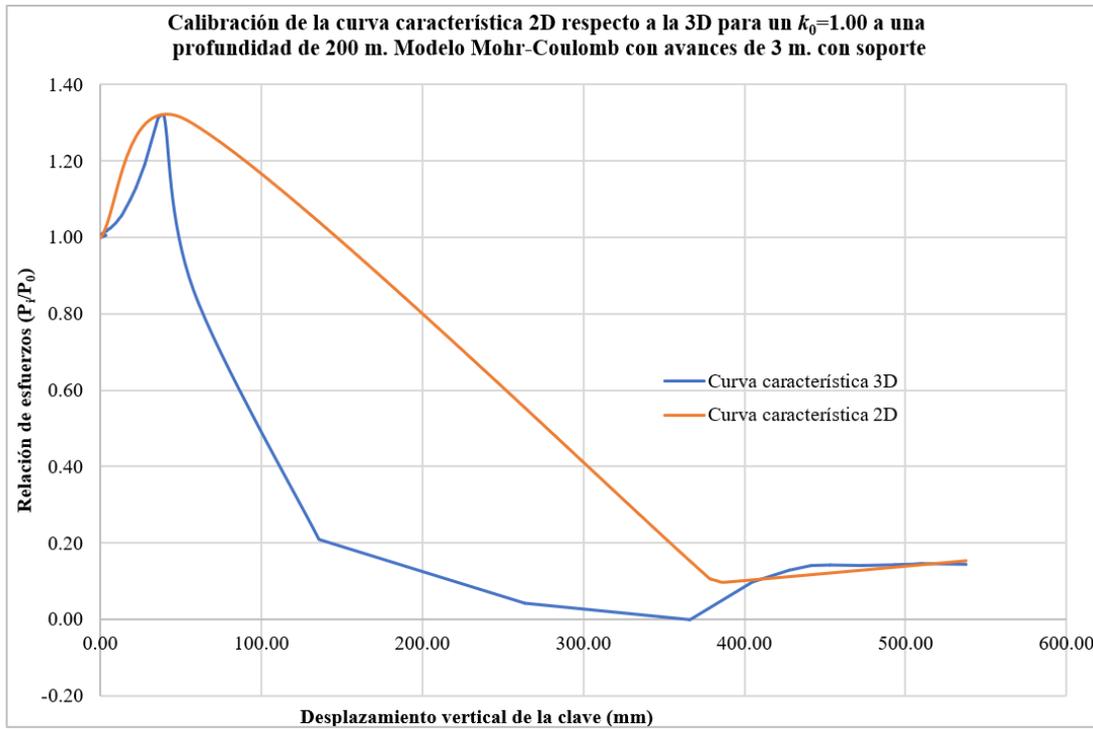


Figura 5.58. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

En la Tabla 5. 10 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 5. 10. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=1.00$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en túnel de carretera.

Caso	Profundidad (m)	$U_{máximo}$ 2D (mm)	$U_{máximo}$ 3D (mm)	Precisión $U_{máximo}$	P_i/P_0 2D máximo (kN/m ²)	P_i/P_0 3D máximo (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 max.	P_i/P_0 2D final (kN/m ²)	P_i/P_0 3D final (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 final	Relajación inicial (%)	Relajación final (%)	$\Delta\varepsilon_v$ (%)	E_m (kN/m ²)	ΔE_0 (%)
05-a_con	30	27.6	27.7	100%	1.16	1.16	100%	0.148	0.242	61%	89.0%	91.5%	0.084%	80 000	16%
05-b_con	75	103.8	104.7	99%	1.21	1.23	98%	0.204	0.220	92%	89.0%	91.3%	0.270%	80 000	16%
05-c_con	150	310.8	304.1	102%	1.25	1.29	97%	0.166	0.163	102%	89.0%	92.5%	0.630%	80 000	16%
05-d_con	200	537.3	537.3	100%	1.31	1.32	99%	0.153	0.145	105%	92.0%	93.3%	1.020%	80 000	16%

En la Tabla 5. 10 puede apreciarse que:

- La precisión de la calibración de los desplazamientos finales estuvo entre 99% y 102%. Son valores aceptables para una calibración, teniendo un margen menor al 2%.
- La calibración de los esfuerzos máximos tiene una precisión del 97% al 100%. Es un rango aceptable para una calibración, con un margen menor al 5%.
- La calibración de los esfuerzos finales tuvo una precisión de 61% a 105%, rango que no resulta aceptable para una calibración. Esta es la limitante del método, que calibra los desplazamientos finales, pero no calibra los esfuerzos finales.
- Las relajaciones iniciales de esfuerzos fueron superiores al 89%.
- Las relajaciones finales de esfuerzos estuvieron alrededor de 91.3% al 93.3% antes de colocar el sostenimiento.
- La deformación volumétrica se incrementa conforme aumenta la profundidad.
- El módulo de Young modificado (E_m) es constante para todos los casos analizados, con un valor de 80 000 kN/m², que corresponde al 16% del módulo de Young inicial (E_0).

5.2.2.5 Caso $k_0=1.25$

Se muestran los resultados de la calibración de los 4 casos estudiados a continuación:

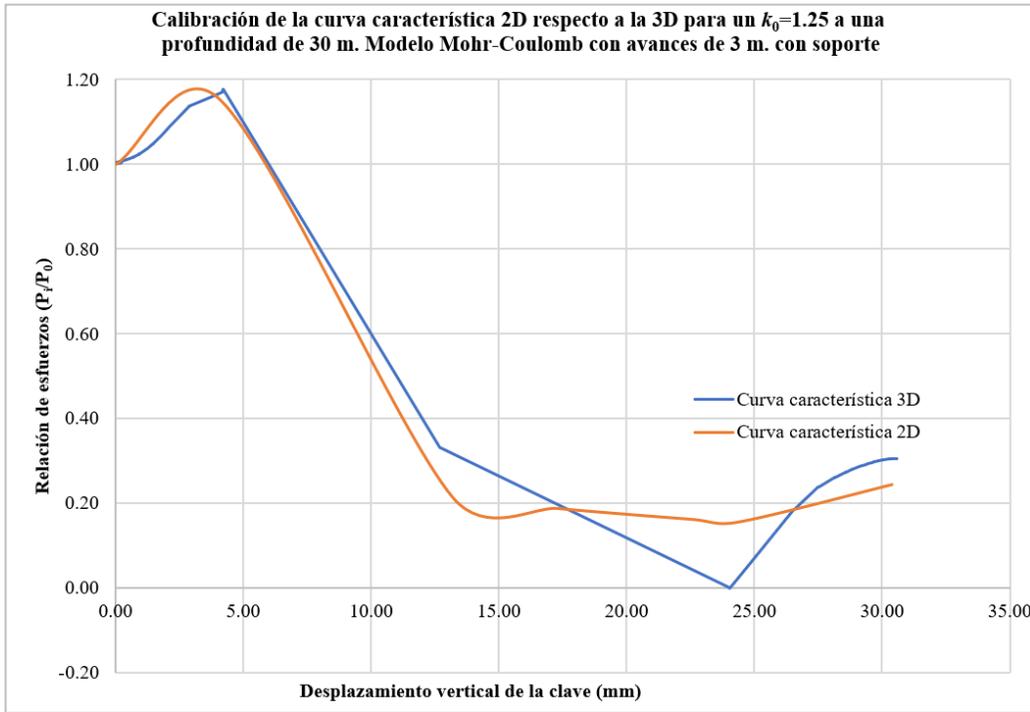


Figura 5. 59. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

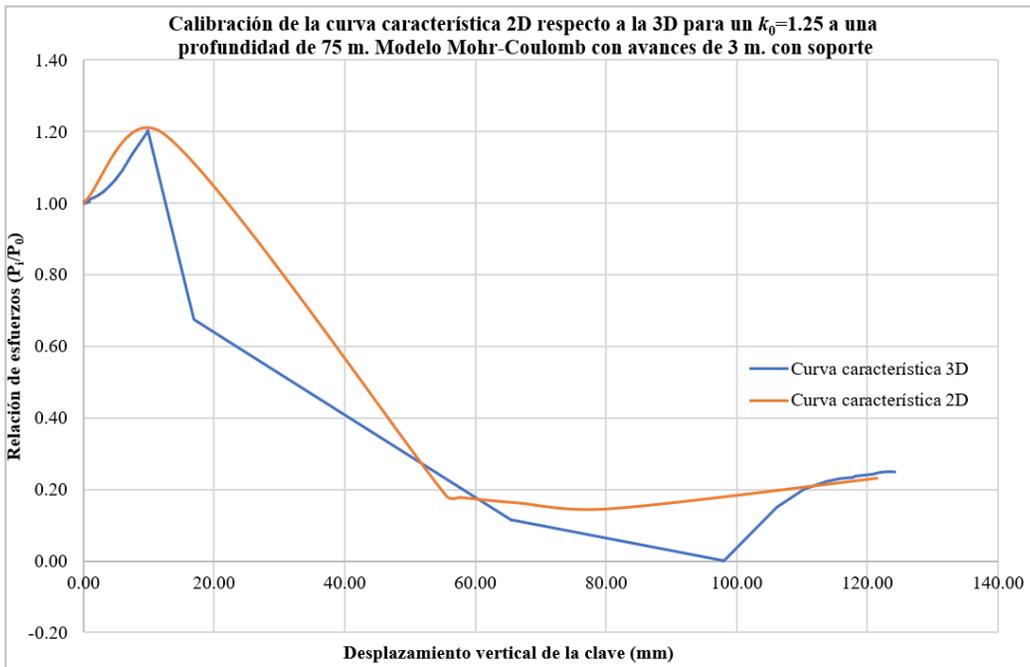


Figura 5. 60. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

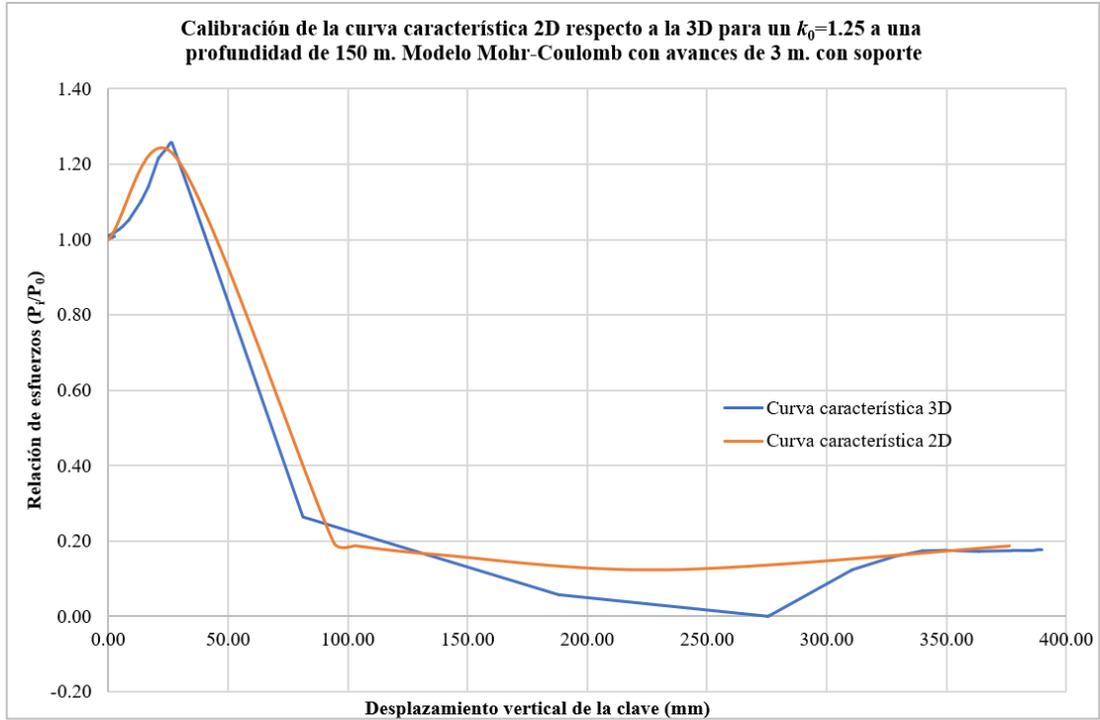


Figura 5. 61. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

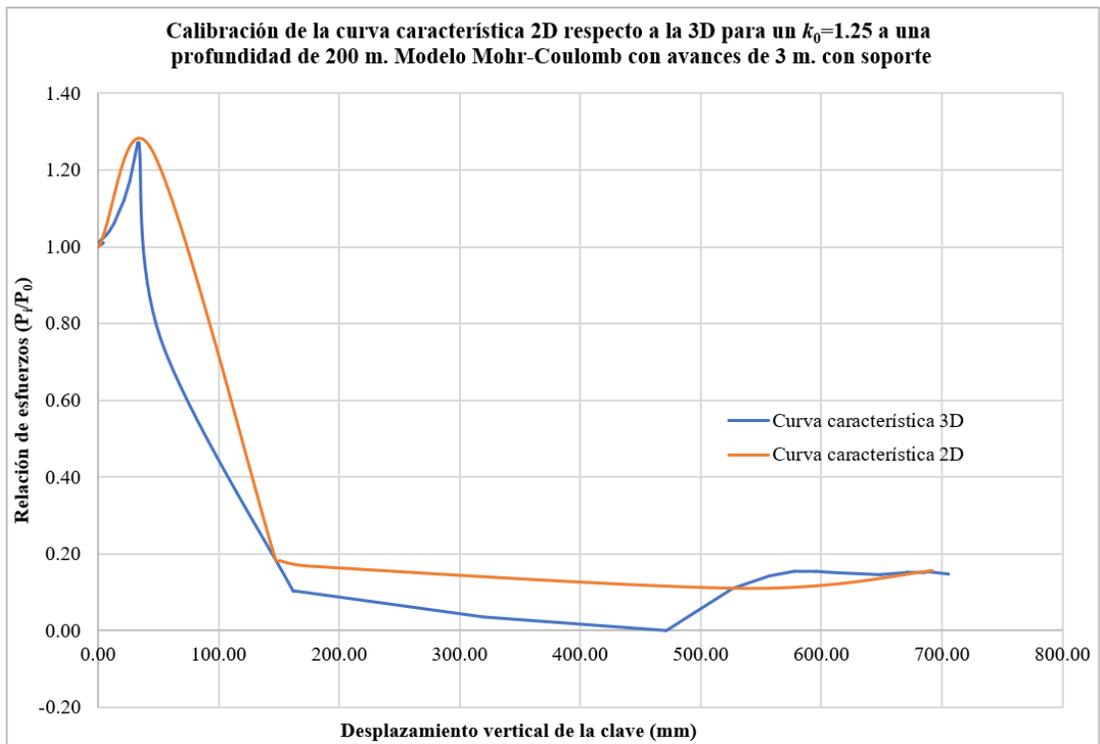


Figura 5. 62. Calibración de la curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb, con avances de 3 m., con soporte.

En la Tabla 5.11 se muestran los resultados de los 4 casos estudiados, obtenidos en la clave del túnel.

Tabla 5.11. Resultados de la calibración para el coeficiente $k_0=1.25$ con avance de 3m. en modelos Mohr-Coulomb en túnel de carretera.

Caso	Profundidad (m)	$U_{máximo}$ 2D (mm)	$U_{máximo}$ 3D (mm)	Precisión $U_{máximo}$	P_i/P_0 2D máximo (kN/m ²)	P_i/P_0 3D máximo (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 max.	P_i/P_0 2D final (kN/m ²)	P_i/P_0 3D final (kN/m ²)	Precisión P_i/P_0 final	Relajación inicial (%)	Relajación final (%)	$\Delta\varepsilon_v$ (%)	E_m (kN/m ²)	ΔE_0 (%)
06-a_con	30	30.3	30.5	99%	1.14	1.14	100%	0.243	0.304	80%	84.0%	88.5%	0.078%	80 000	16%
06-b_con	75	121.4	124.1	98%	1.16	1.16	100%	0.231	0.249	93%	85.0%	89.5%	0.240%	80 000	16%
06-c_con	150	376.1	389.8	96%	1.20	1.19	100%	0.187	0.176	107%	84.0%	90.5%	0.540%	80 000	16%
06-d_con	200	692.3	705.4	98%	1.23	1.24	99%	0.157	0.146	107%	85.5%	91.2%	0.840%	80 000	16%

Se observa en la Tabla 5.11 lo siguiente:

- La calibración de los desplazamientos finales tuvo una precisión de 96% a 99%. Estos valores son aceptables para una calibración, teniendo un margen menor al 3%.
- La calibración de los esfuerzos máximos tiene una precisión del 99% al 100%. Es un rango aceptable para una calibración, con un margen menor al 5%.
- La precisión de la calibración de los esfuerzos finales estuvo entre 80% y 107%, rango cuya cota inferior lo hace inaceptable para una calibración, lo cual representa la limitante del método, que calibra los desplazamientos finales, pero no calibra los esfuerzos finales.
- Las relajaciones iniciales de esfuerzos fueron superiores al 84%.
- Las relajaciones finales de esfuerzos fueron del orden del 88.5% al 91.2% antes de colocar el sostenimiento.
- La deformación volumétrica se incrementa conforme aumenta la profundidad.
- El módulo de Young modificado (E_m) es constante para todos los casos analizados, con un valor de 80 000 kN/m², que corresponde al 16% del módulo de Young inicial (E_0).

5.2.2.6 Resultados del túnel de carretera

A partir de los resultados de la Tabla 5. 7, Tabla 5. 8, Tabla 5. 9, Tabla 5. 10 y Tabla 5.11, se obtuvieron cuatro gráficas.

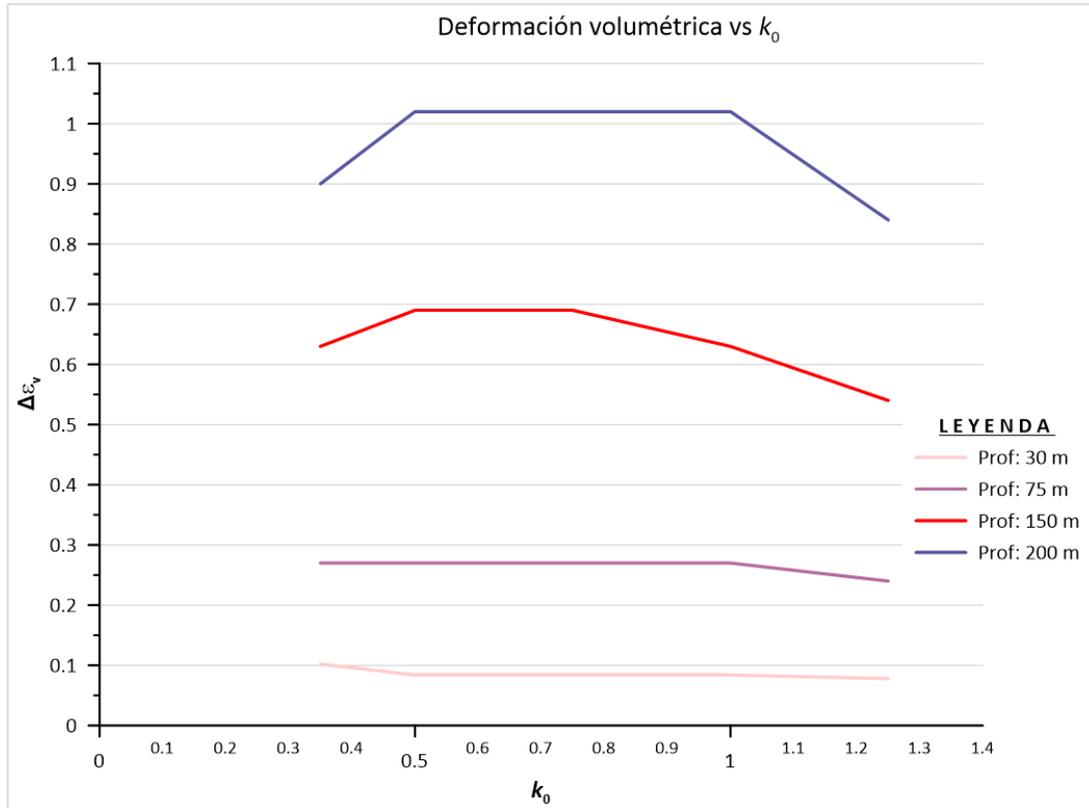


Figura 5. 63. Deformación volumétrica vs k_0 a distintas profundidades en modelo carretero.

En la Figura 5. 63 se observa que la deformación volumétrica se incrementa conforme se aumenta la profundidad. En la Tabla 5. 12 se pueden apreciar los rangos de las deformaciones volumétricas con su respectiva profundidad para los coeficientes de k_0 analizados.

Tabla 5. 12 Rangos de deformaciones volumétricas con su respectiva profundidad en modelo de túnel de carretera.

Rangos de deformaciones volumétricas (%)	Profundidad (m)
0.08 a 0.10	30
0.24 a 0.27	75
0.54 a 0.69	150
0.84 a 1.02	200

A continuación, en la Figura 5. 64 se puede apreciar que las deformaciones volumétricas son idénticas para los coeficientes $k_0=0.50$ y 0.75 , y disminuyen a medida que se aumenta el valor de k_0 , a partir de $k_0=0.50$.

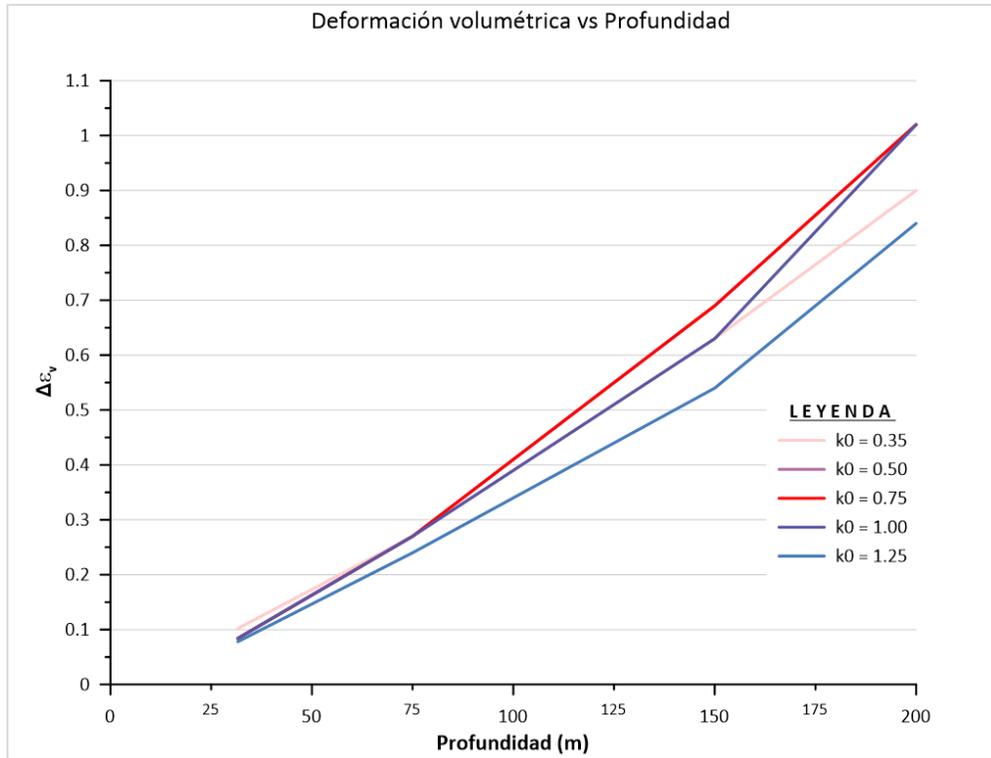


Figura 5. 64. Deformación volumétrica vs profundidad a distintos k_0 en modelo carretero.

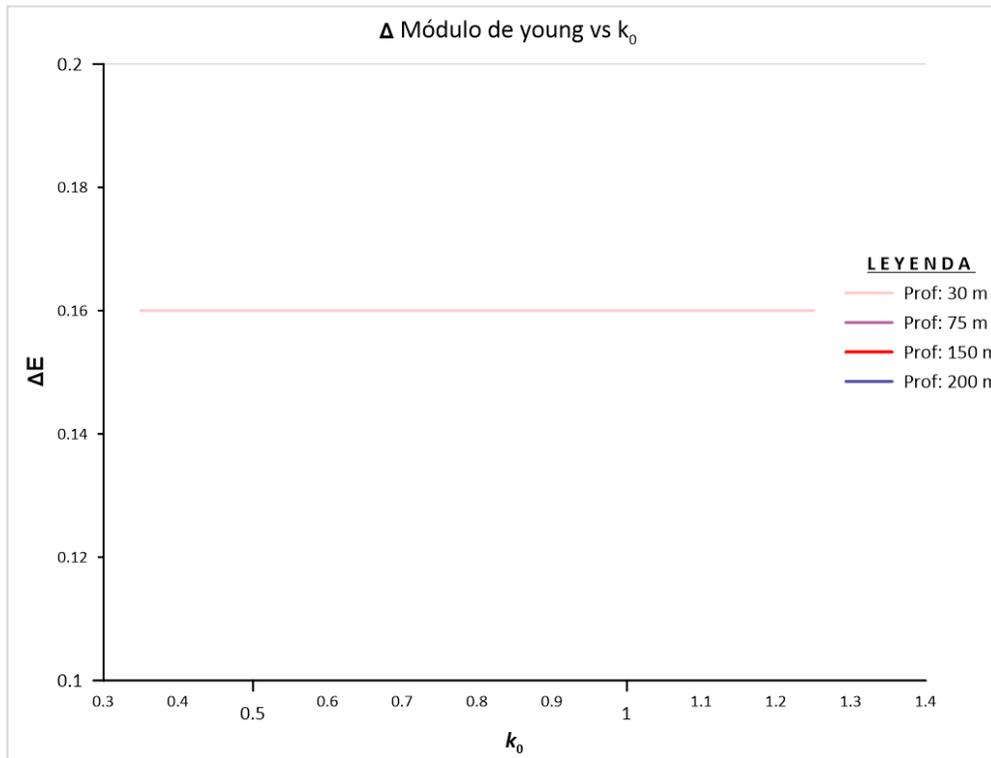


Figura 5. 65. Δ Módulo de Young vs k_0 a distintas profundidades en modelo carretero.

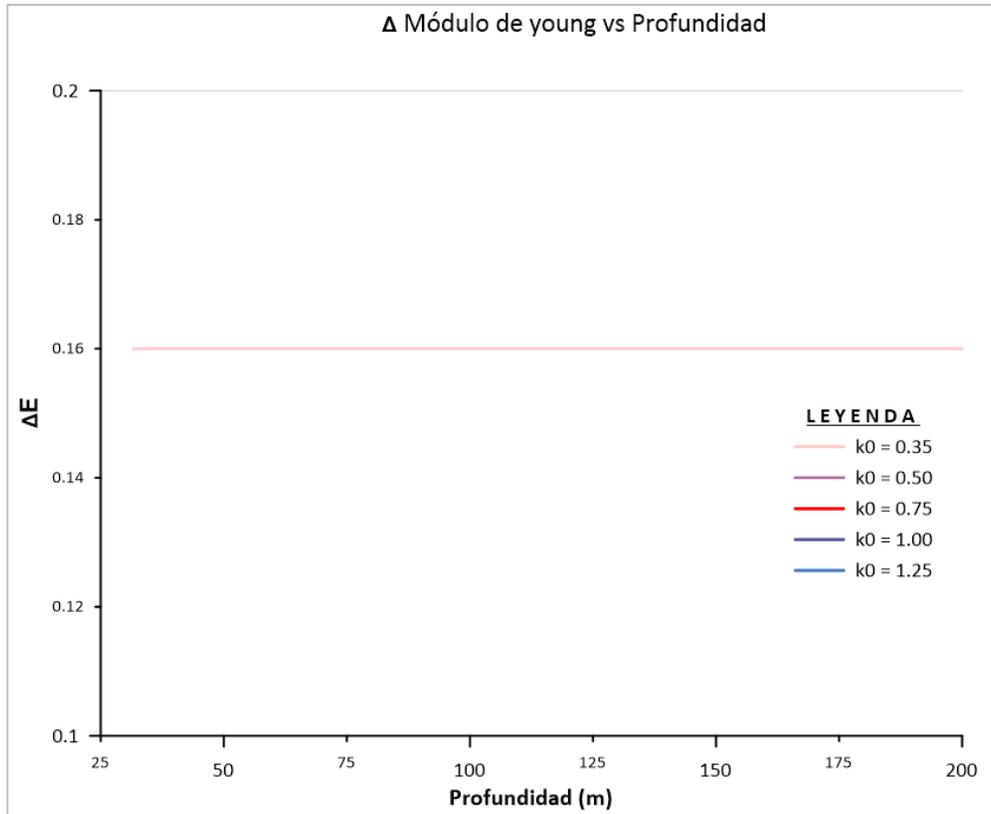


Figura 5. 66. Δ Módulo de Young vs profundidad a distintos k_0 en modelo carretero.

Como puede apreciarse en las Figuras 5. 65 y 5. 66, el Δ Módulo de Young es constante para todos los casos de calibraciones estudiados, y corresponde al 16 % del módulo de Young inicial, con un valor de 80 000 kN/m².

5.2.2.7 Conclusiones del túnel de carretera

- La calibración del tramo inicial de la curva característica fue exitosa, gracias a la aplicación de los 2 artificios mostrados en la fase 1, que consistieron en modificar el módulo de Young de la sección a excavar y aplicar una deformación volumétrica a la sección que no se va excavar.
- El Δ Módulo de Young es constante para todos los casos analizados, con un valor de 80 000 kN/m², que corresponde al 16% del módulo de Young inicial (E_0). Para lograrlo se probaron diversos valores sucesivamente, en un proceso de ensayo-error.
- La deformación volumétrica varía según el k_0 y la profundidad, y se incrementa conforme aumenta la profundidad.
- A partir de las Figuras 5. 63 y 5. 64 se pudo interpolar valores de deformación volumétrica para nuevas calibraciones, siempre que el valor de k_0 varíe entre 0.35 y 1.25; y la profundidad, entre 30 y 200 m.
- Se logró calibrar el tramo intermedio de la curva característica a través de relajaciones de esfuerzos.
- Las relajaciones iniciales de esfuerzos, que se realizan a partir de la fase 2, fueron superiores al 84%.

- Las relajaciones finales de esfuerzos están entre 89 y 97% antes de instalar el soporte que se realiza en la fase 5.
- En la calibración del tramo final de la curva, los desplazamientos tuvieron una precisión de 95 a 105%. Son valores aceptables para una calibración, teniendo un margen menor al 5%:
- La precisión de los esfuerzos finales en la calibración del tramo final de la curva estuvo entre 36 y 107%. La amplitud del rango y su cota inferior lo hacen inaceptable para una calibración. Aquí radica la limitante del método: calibra los desplazamientos finales, pero no calibra los esfuerzos finales.

5.2.3 Conclusiones del capítulo

- Fue exitosa la calibración del tramo inicial de la curva característica, y se logró a partir de la aplicación de los 2 artificios mostrados en la fase 1. Estos consistieron en modificar el módulo de Young de la sección a excavar y aplicar una deformación volumétrica a la sección que no se va excavar.
- El Δ Módulo de Young es constante para todos los casos analizados. Presenta valores de 50 000 kN/m² para el modelo circular y 80 000 kN/m² para el carretero, como se puede ver en la Figura 5. 41, Figura 5. 42, Figura 5. 65 y Figura 5. 66.
- Los valores de la deformación volumétrica coinciden en ambos modelos, circular y carretero. Esto quiere decir que para un mismo valor de k_0 y profundidad los valores de la deformación volumétrica son idénticos para los 2 modelos, tal como se observa en la Figura 5. 39, Figura 5. 40, Figura 5. 63 y Figura 5. 64.
- Se logró calibrar el tramo intermedio de la curva característica a través de relajaciones de esfuerzos.
- En la calibración del tramo final de la curva característica, los desplazamientos tuvieron una precisión de 95 a 105%, rango aceptable para una calibración, teniendo un margen menor al 5%.
- En la calibración del tramo final de la curva característica, los esfuerzos finales tuvieron una precisión de 36 a 107%. Este rango no es aceptable para una calibración, pues resulta incierto el margen, debido no sólo a la amplitud del rango sino también a su cota inferior. Aquí radica la limitante del método: no calibra los esfuerzos finales.

6 CONCLUSIONES Y PROPUESTAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

- Se logró el objetivo principal de la presente tesis de desarrollar una metodología de calibración que permita establecer equivalencias de los modelos bidimensionales con respecto a la realidad tridimensional (capítulo 5.1).
- Las curvas características obtenidas por métodos analíticos tienen muchas limitaciones, como se indica en el capítulo 3.2.
- De la comparación realizada en el capítulo 3 de las curvas características obtenidas por métodos analíticos y numéricos se concluye que:
 - Las curvas características obtenidas por métodos analíticos y numéricos para túneles circulares, con un estado de esfuerzo homogéneo y constante, son muy similares, como se visualiza en el capítulo 3.3.1 y en la Figura 3. 4, donde los desplazamientos y la plasticidad son uniformes alrededor de toda la excavación. (Véase la Figura 3. 5.)
 - Cuando el coeficiente de k_0 es diferente de 1.00 no puede ser analizado por métodos analíticos, pues únicamente permite estados de esfuerzos homogéneos. La curva característica se determina por métodos numéricos, y se observa que los desplazamientos son diferentes tanto en la bóveda como en el hastial (véase la Figura 3. 8) y la plasticidad, en el caso analizados, sólo ocurre en los hastiales conforme aumenta la relajación de esfuerzos. Por ello es importante determinar la curva característica por métodos numéricos cuando se presenten valores de k_0 diferentes de 1.00.
- En los análisis tridimensionales del capítulo 4 se verifica que, previo a la llegada del frente a la sección de control, la relación de esfuerzos en todos los casos $\frac{P_i}{P_0} > 1.00$, como se indicó en el capítulo 2.5.4.
- En los análisis tridimensionales de los 28 casos estudiados del coeficiente k_0 , en el modelo circular, se concluye que la relación de esfuerzos $\frac{P_i}{P_0}$ incrementa conforme aumenta la profundidad, entre 5% y 25 %. Igualmente, los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan conforme aumenta la profundidad, como se aprecia en la Tabla 4. 10.
- En el caso de túnel circular, el aumento de relación de esfuerzos comienza a los 45 m. de la distancia al frente hasta los 8 m. antes de que el frente de excavación alcance la sección de control donde alcanza su valor pico, para los distintos coeficientes k_0 . Las recuperaciones de esfuerzos producidas por el sostenimiento, son similares cuando se mantiene constante el coeficiente de k_0 y se varía la profundidad. Los valores de recuperaciones de esfuerzos están entre 16% y 35% para los casos estudiados, como se observa en la Tabla 4. 10.
- En los análisis tridimensionales de los 20 casos estudiados del coeficiente de k_0 , en el modelo carretero, se concluye que la relación de esfuerzos $\frac{P_i}{P_0}$ se incrementa entre 15% y 20% conforme aumenta la profundidad. Igualmente, los desplazamientos verticales en la clave del túnel se incrementan a medida que aumenta la profundidad, como se observa en la Tabla 4. 18.
- El aumento de la relación de esfuerzos en la clave del túnel, en el modelo carretero, comienza a los 50 m. de la distancia al frente hasta los a 5 m. antes de la llegada del frente a la sección de control donde alcanza su valor pico, para los casos k_0 . Las recuperaciones de esfuerzos son similares cuando se mantiene constante el valor de k_0 y se varía la profundidad. Los valores de recuperaciones de esfuerzos están entre 16% y 34% para los casos estudiados, como se aprecia en la Tabla 4. 18.

- El aumento de la relación de esfuerzos es mayor en el modelo carretero respecto al circular. (Ver Tabla 4. 20).
- En el modelo carretero, los desplazamientos en la clave del túnel son mayores que los del modelo circular (aproximadamente 1.7 veces), como se observa en la Tabla 4. 20.
- Las recuperaciones de esfuerzos en el modelo carretero son menores frente al modelo circular, como se aprecia en Tabla 4. 20.
- Fue exitosa la calibración del tramo inicial de la curva característica, realizada a partir de la aplicación de los 2 artificios mostrados en la fase 1, que consistieron en modificar el módulo de Young de la sección a excavar y aplicar una deformación volumétrica a la sección que no se va excavar.
- Se constató que el decremento del módulo de Young (ΔE) es constante para todos los casos analizados, con un 10% en el modelo circular y 16% en el carretero del módulo de Young original (E_0), como se puede observar en la Figura 5. 41, Figura 5. 42, Figura 5. 65 y Figura 5. 66.
- Si se presentara otro modelo (geometría de excavación) con las mismas propiedades de los materiales y aplicando la metodología propuesta, sería recomendable iterar el ΔE hasta encontrar un valor constante para dicho modelo.
- Se identificaron los valores de deformación volumétrica en los modelos estudiados. Son los que se pueden apreciar desde la Tabla 5. 1 hasta la Tabla 5.11 y en la Figura 5. 39, Figura 5. 40, Figura 5. 63 y Figura 5. 64. Se constató que coinciden, esto es que para un mismo valor de k_0 y profundidad los valores de la deformación volumétrica son idénticos para ambos modelos, circular y carretero, como puede verse en la Figura 5. 39, Figura 5. 40, Figura 5. 63 y Figura 5. 64; y en la Tabla 5. 6 y Tabla 5. 12.
- A partir de la Figura 5. 39, Figura 5. 40, Figura 5. 63 y Figura 5. 64 se pueden interpolar valores de deformación volumétrica para nuevas calibraciones de los modelos circulares y carreteros estudiados, siempre que el valor de k_0 varíe entre 0.35 y 1.25 y la profundidad lo haga entre 30 y 200 m.
- Se puede inferir que, si es que se presentara otro modelo (geometría de excavación) con las mismas propiedades de los materiales y aplicando la metodología propuesta, los valores de deformación volumétrica serían los mismos que se determinaron para el modelo circular y carretero.
- Se logró calibrar el tramo intermedio de la curva a través de relajaciones de esfuerzos.
- En la calibración del tramo final de la curva característica los desplazamientos tuvieron una precisión de 95% a 105%, rango aceptable para una calibración, teniendo un margen menor al 5%.
- En la calibración del tramo final de la curva característica los esfuerzos finales tuvieron una precisión de 36% a 107%. Este rango no es aceptable, tanto por su cota inferior como por su amplitud. Aquí radica la limitante del método: calibra los desplazamientos finales; pero no, los esfuerzos finales.
- Se recomienda ampliar los casos de k_0 y profundidad para los modelos estudiados, con incrementos de 0.10 para el valor de k_0 y de 25 m para la profundidad, de tal manera que se puedan afinar la Figura 5. 39, Figura 5. 40, Figura 5. 63 y Figura 5. 64; y sea más preciso el proceso de iteración para los valores deseados de calibración.

- Asimismo, se recomienda mejorar la metodología de calibración que se logre calibrar también los esfuerzos finales en el tramo final de la curva característica.
- Por último se recomienda realizar nuevos modelos de estudios variando la geometría y propiedades de los materiales a fin de lograr validar la metodología propuesta en el presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Barla, G., & Barla, M. (2000).** *Continuum and discontinuum modelling in tunnel engineering*. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 12(1), 45-57.
- Brebbia, C. A., & Walker, S. (2016).** *Boundary element techniques in engineering*. Elsevier.
- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., Waterman, D., Chesaru, A., & Bonnier, P. G. (2016).** *PLAXIS 2016*. Plaxis B.V., the Netherlands.
- Brown, E. T. (1980).** *Underground excavations in rock*. CRC Press.
- Brown, E. T., Bray, J. W., Ladanyi, B., & Hoek, E. (1983).** *Ground response curves for rock tunnels*. Journal of geotechnical Engineering, 109(1), 15-39.
- Caballero Olmedo, S. R. (2011).** *Manual para construcción de túneles tanto viales como de conducción a gravedad*. (Bachelor's thesis, QUITO/PUCE/2011).
- Carranza-Torres, C., & Fairhurst, C. (2000).** *Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion*. Tunnelling and underground space technology, 15(2), 187-213.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2004).** *Ingeniería geológica*. Pearson/Prentice Hall.
- Goodman, R. E. (1989).** *Introduction to rock mechanics*. (Vol. 2, pp. 221-388). New York: Wiley.
- Hall, W. S., & Oliveto, G. (Eds.). (2003).** *Boundary element methods for soil-structure interaction*. Springer Science & Business Media.
- Hemeda, S. (2022).** *Geotechnical modelling and subsurface analysis of complex underground structures using PLAXIS 3D*. International Journal of Geo-Engineering, 13(1), 1-17.
- Hoek, E., & Palmieri, A. (1998, September).** *Geotechnical risks on large civil engineering projects*. In *Proceedings of the 8th Congress IAEG* (pp. 79-88). Vancouver, Canada: International Association of Engineering Geologists Congress.
- Hoek, E., (2007).** *Practical Rock Engineering: RocScience*. (Available from the publisher at <http://www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>).
- Jaeger, J. C., Cook, N. G., & Zimmerman, R. (2009).** *Fundamentals of rock mechanics*. John Wiley & Sons.
- Kuesel, T. R., King, E. H., & Bickel, J. O. (2012).** *Tunnel engineering handbook*. Springer Science & Business Media.
- Lopez Álvarez, D. (2012).** *Limitations of the ground reaction curve concept for shallow tunnels under anisotropic in-situ stress conditions*. UPC.
- Lopez, J. C. (2003).** *Manual de túneles y obras subterráneas*. U.D. Proyectos, ETSI Minas, Universidad Politécnica de Madrid.
- Lunardi, P. (2008).** *Design and construction of tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils (ADECO-RS)*. Springer Science & Business Media.

- Lysmer, J. y Kuhlemeyer, R. (1969).** *Finite Dynamic Model for Infinite Media*. J. Eng. Mech., 95(EM4), 859-877.
- Montiel, E., Valenzuela, J. C., OSSA, A., & TLALOLINI, A. (2018).** *Evaluación numérica de falla por sub-presión en lumbreras construidas en suelos*. XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica. León, Guanajuato, 8.
- Murthy, V. N. S. (2002).** *Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. CRC press.
- Oreste, P. (2009).** *The convergence-confinement method: roles and limits in modern geomechanical tunnel design*. American Journal of Applied Sciences, 6(4), 757.
- Ovando-Shelley, E., & Santoyo, E. (2001).** *Underexcavation for leveling buildings in Mexico City: case of the Metropolitan Cathedral and the Sagrario Church*. Journal of architectural engineering, 7(3), 61-70.
- Panet, M., Givet, P. D. C. O., Guilloux, A., Duc, J. L. D. G. N. M., Piraud, J., & Wong, H. T. S. D. H. (2001).** *The convergence-confinement method*. Press ENPC.
- Reddy, J. N. (2019).** *Introduction to the finite element method*. McGraw-Hill Education.
- Sánchez, F. (2014).** *Ingeniería de túneles*. UNAM.
- Senent Domínguez, S. (2015).** *La estabilidad del frente de excavación de un túnel en terrenos heterogéneos o con un criterio de rotura no-lineal* (Doctoral dissertation, Caminos).
- Suárez Fino, F., & Alonso Jiménez, A. (2012).** *Estudio del comportamiento de las excavaciones y los sistemas de sostenimiento para una propuesta alterna de construcción de los Túneles Desierto de los Leones*. Ingeopres, (220), 18-24.
- Terzaghi, K. (1943).** *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley, New York.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996).** *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Vlachopoulos, N., & Diederichs, M. S. (2009).** *Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels*. Rock mechanics and rock engineering, 42(2), 131-146.

ANEXO 1

CURVAS CARACTERÍSTICAS

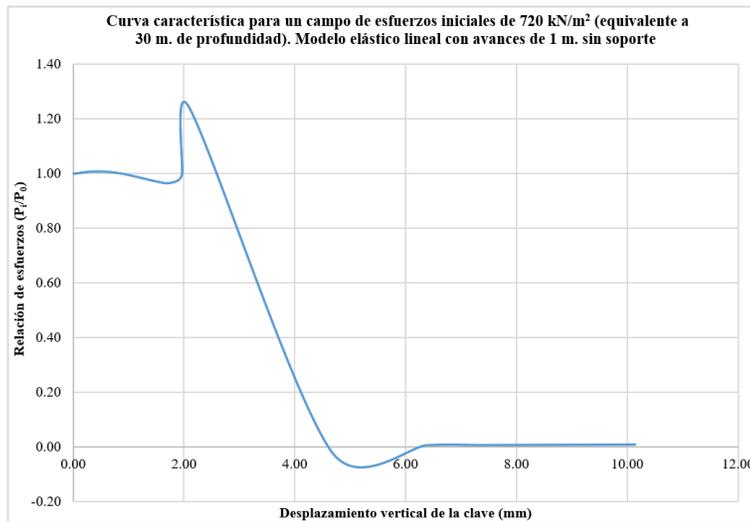
En este anexo se presentan todas las curvas características de los casos estudiados para el modelo de túnel circular y túnel de carretera.

A.1. MODELO CON SECCIÓN DE TÚNEL CIRCULAR

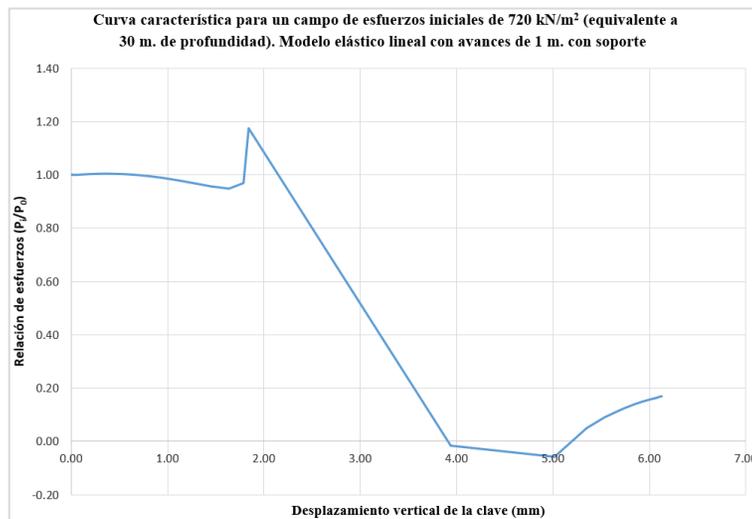
A.1.1 Campos de esfuerzos iniciales

A.1.1.1 Modelo elástico lineal

a) Campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m²

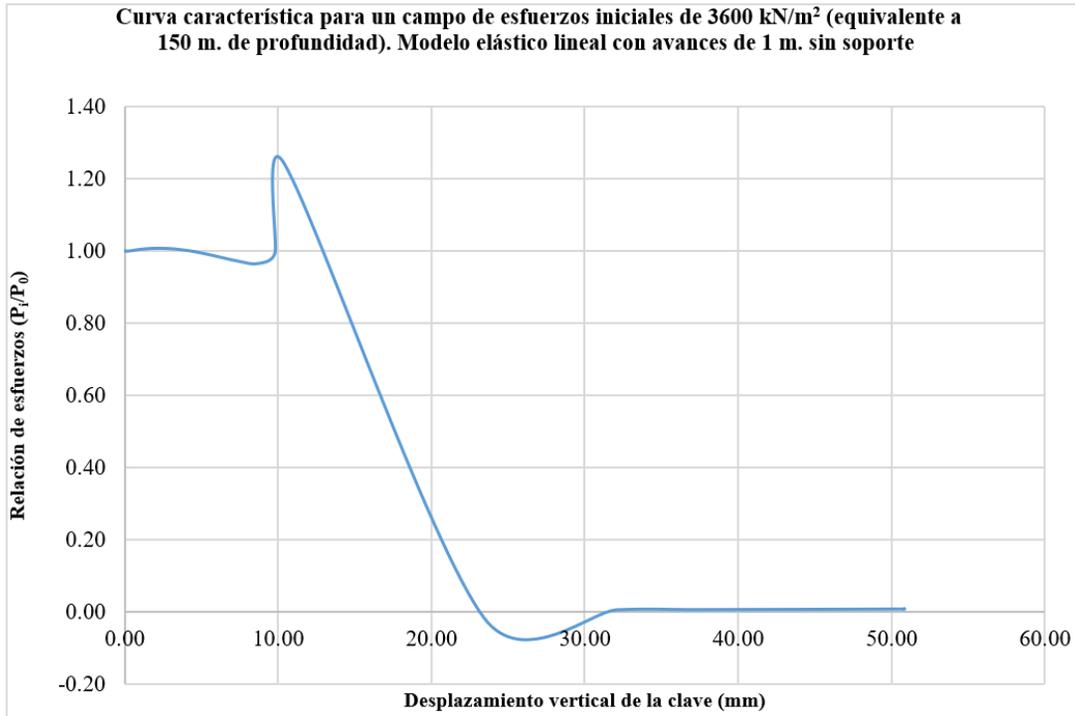


A. 1. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m² (equivalente a 30 m. de profundidad). Modelo elástico lineal con avances de 1 m sin soporte.

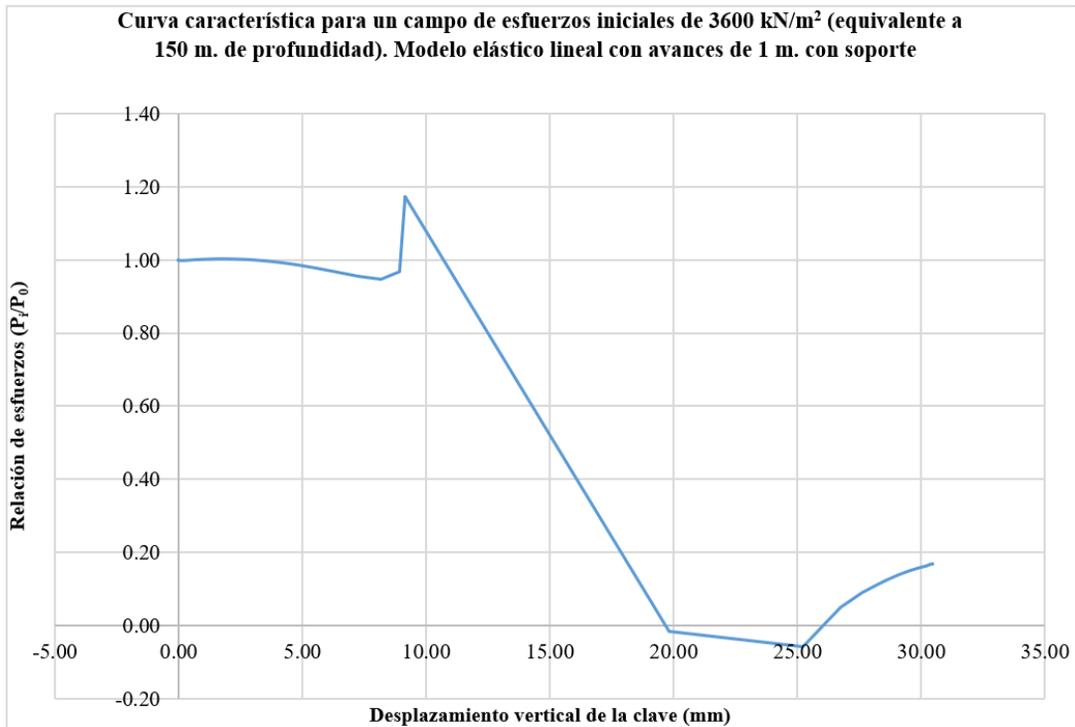


A. 2. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m² (equivalente a 30 m. de profundidad). Modelo elástico lineal con avances de 1 m con soporte.

b) Campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m²



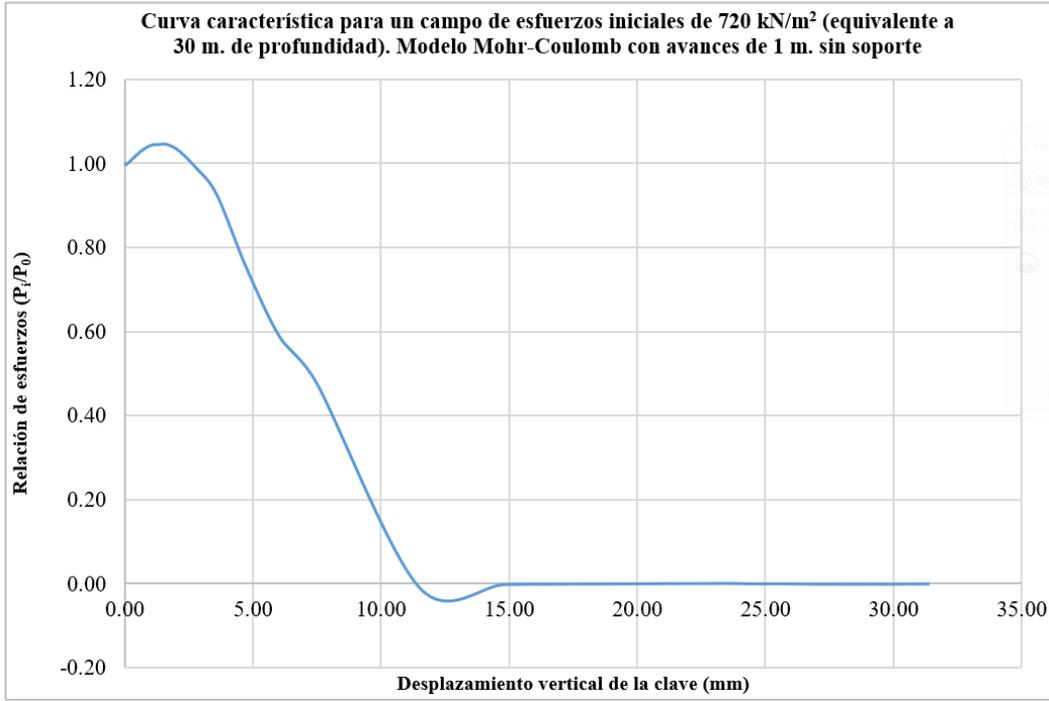
A. 3. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m² (equivalente a 150 m. de profundidad). Modelo elástico lineal con avances de 1 m sin soporte.



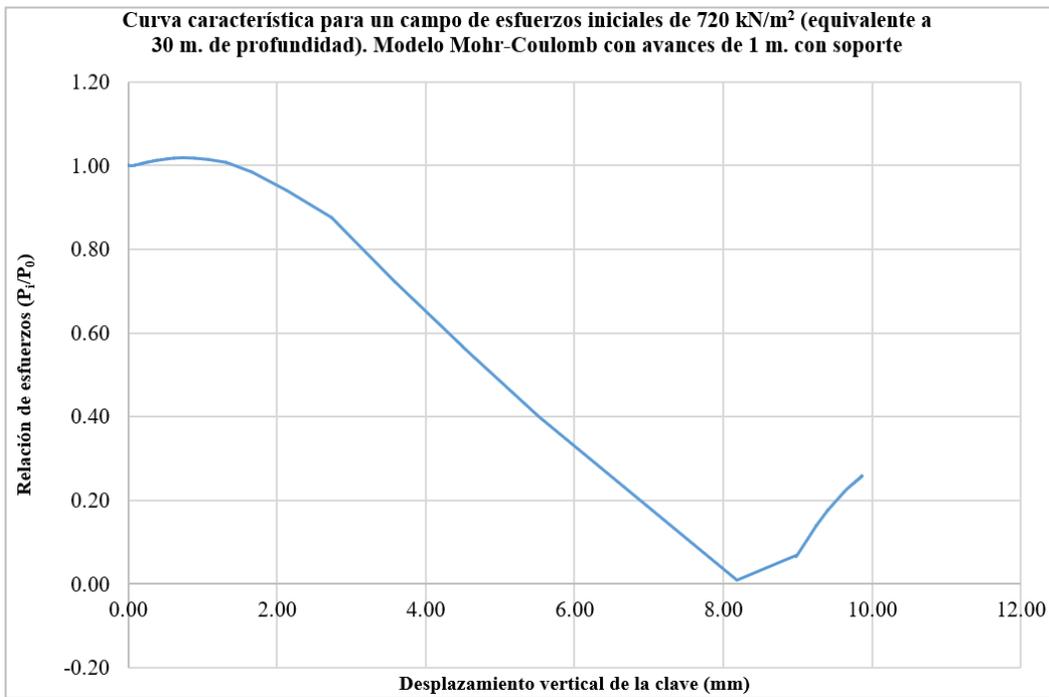
A. 4. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m² (equivalente a 150 m. de profundidad). Modelo elástico lineal con avances de 1 m con soporte.

A.1.1.2. Modelo de Mohr-Coulomb

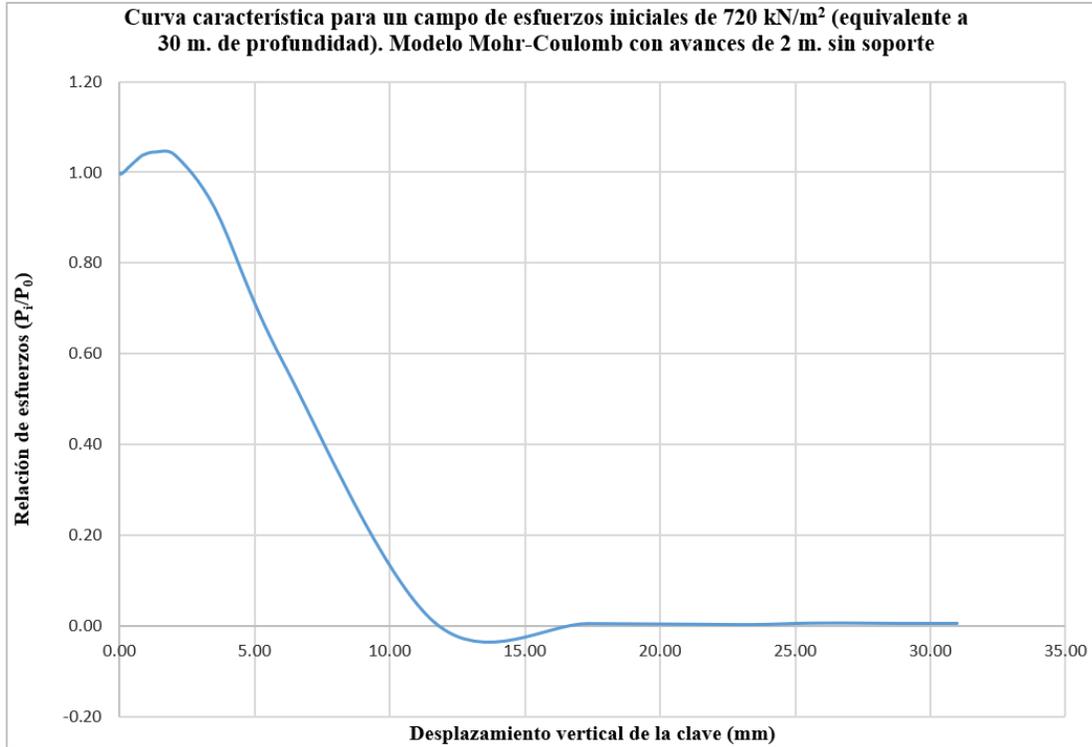
a) Campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m²



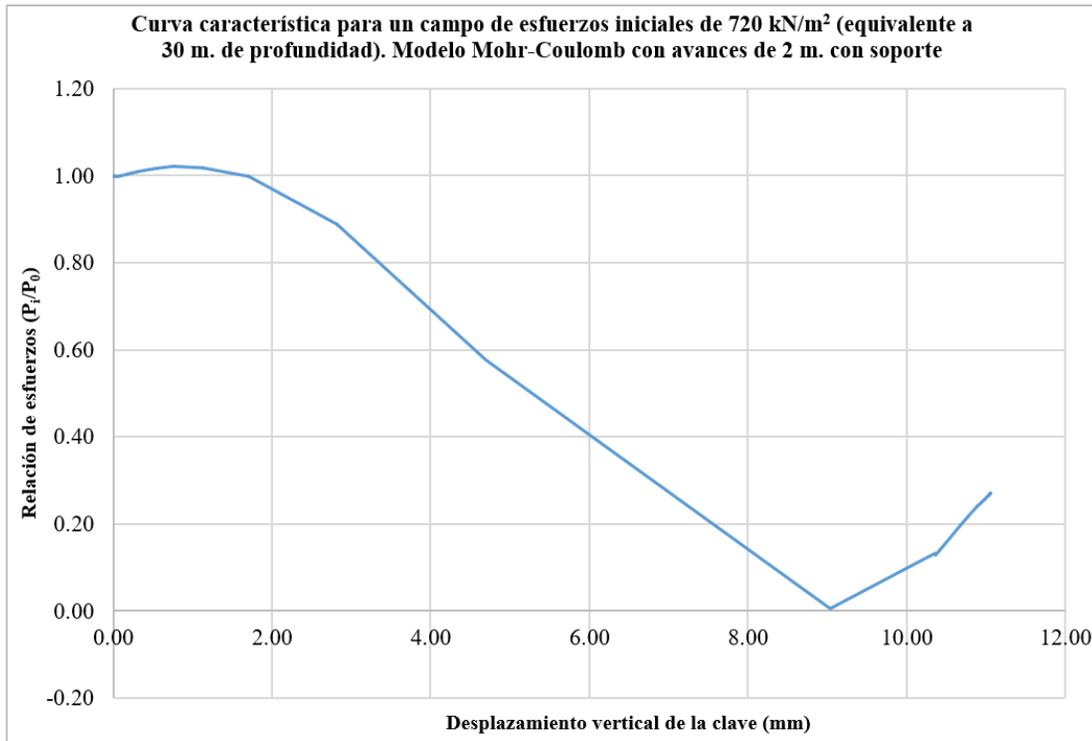
A. 5. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m² (equivalente a 30 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 1 m. sin soporte.



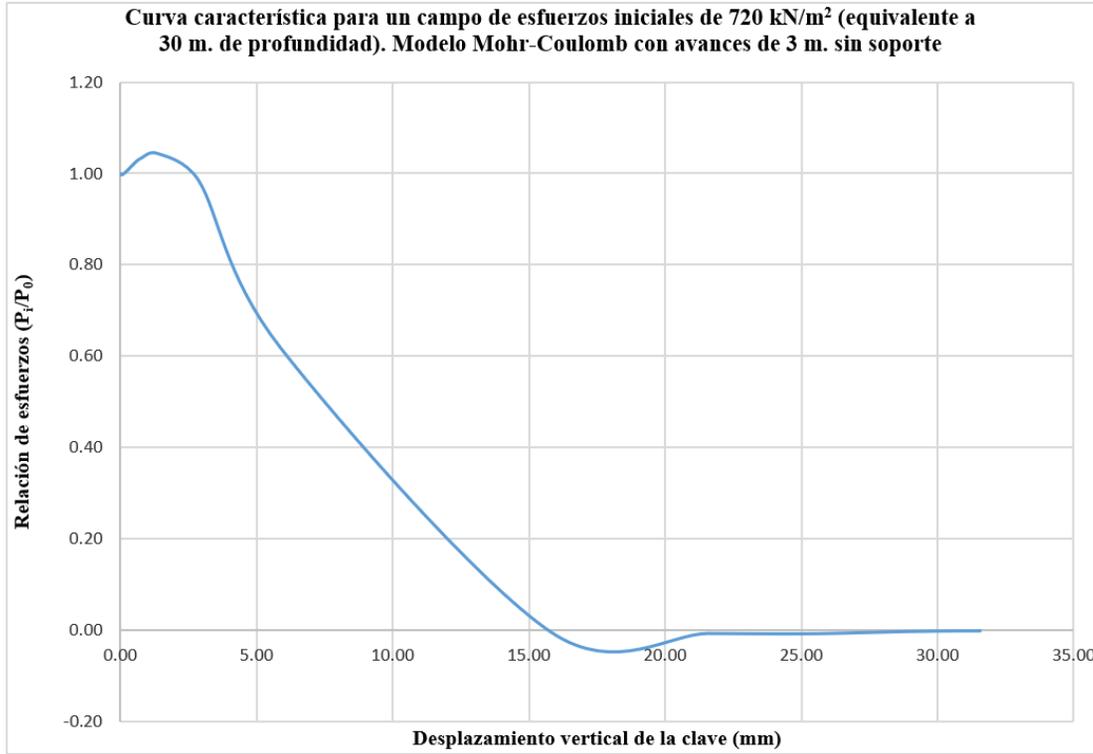
A. 6. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m² (equivalente a 30 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 1 m. con soporte.



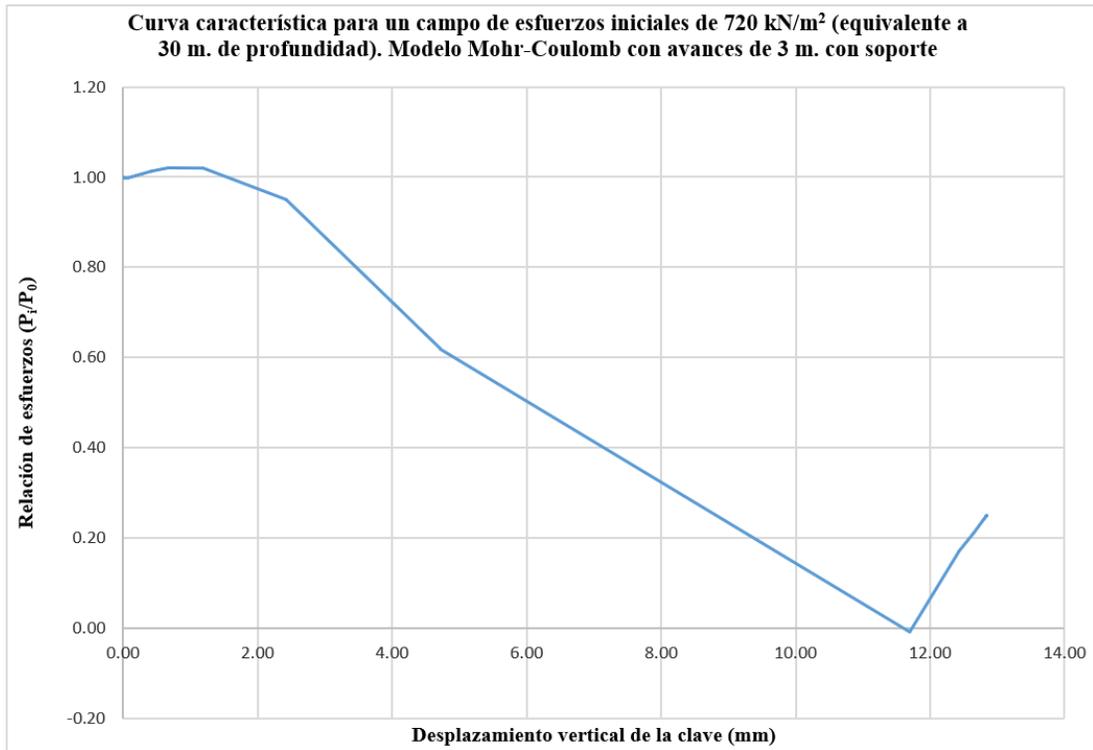
A. 7. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m² (equivalente a 30 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 2 m. sin soporte.



A. 8. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m² (equivalente a 150 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 2 m. sin soporte.

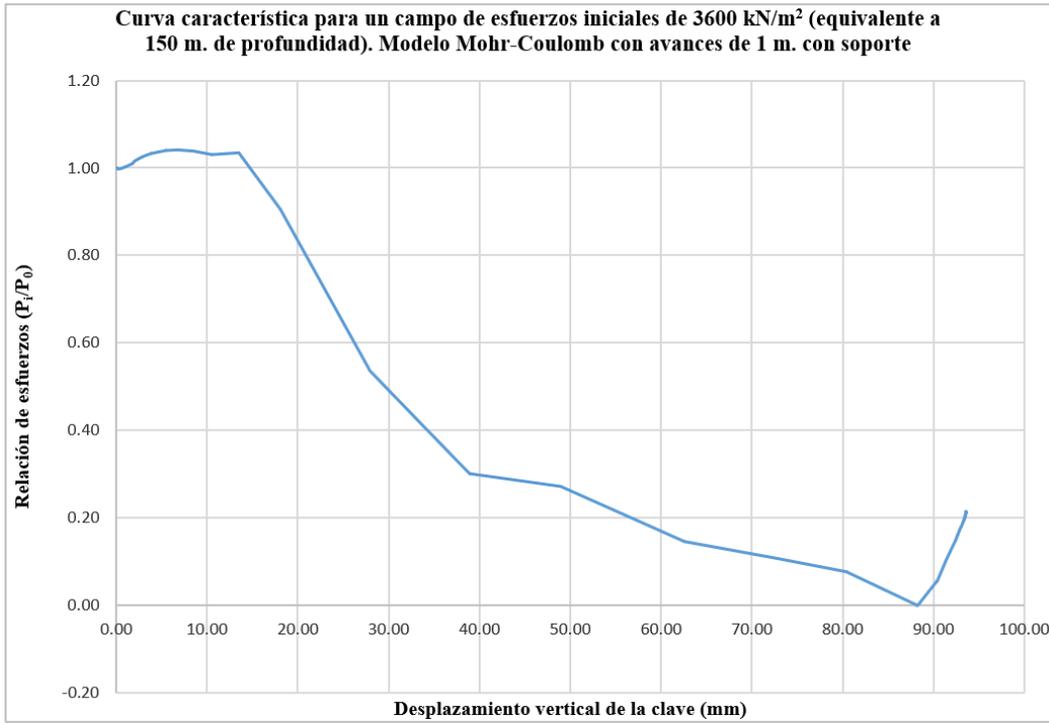


A. 9. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m² (equivalente a 30 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. sin soporte.

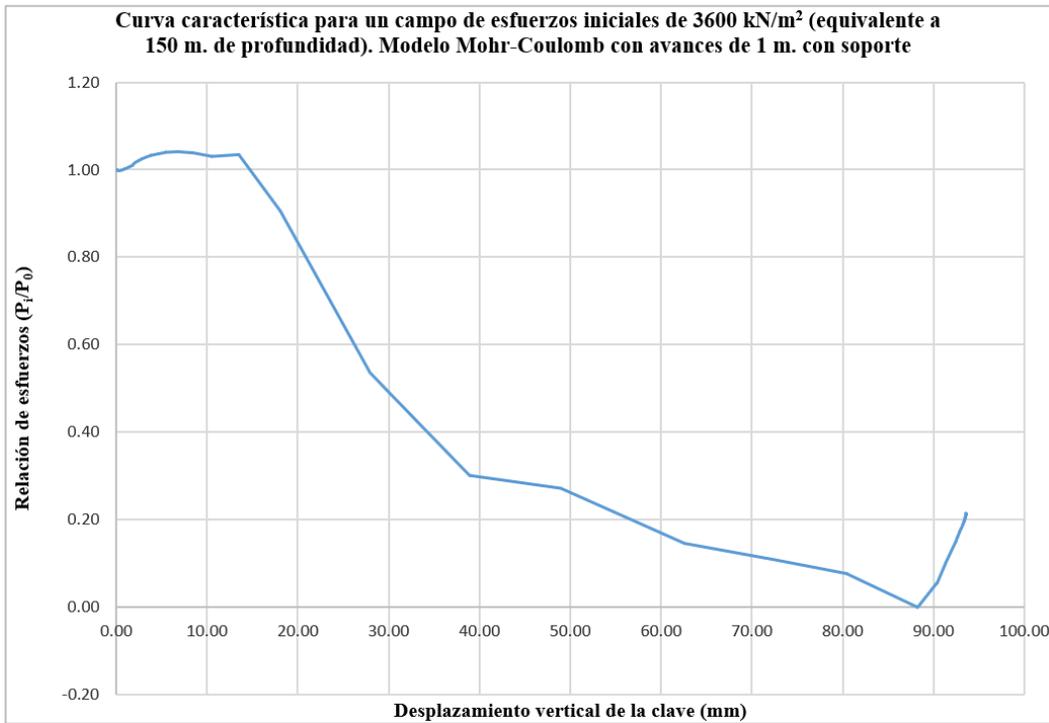


A. 10. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m² (equivalente a 30 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

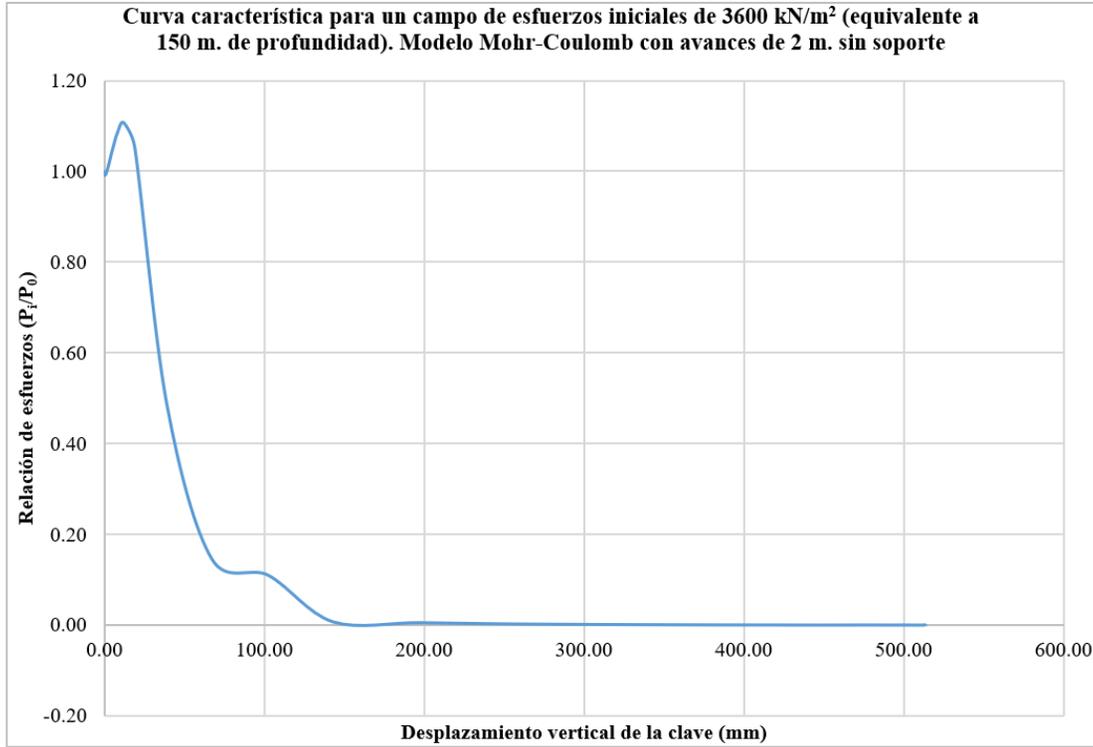
b) Campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m²



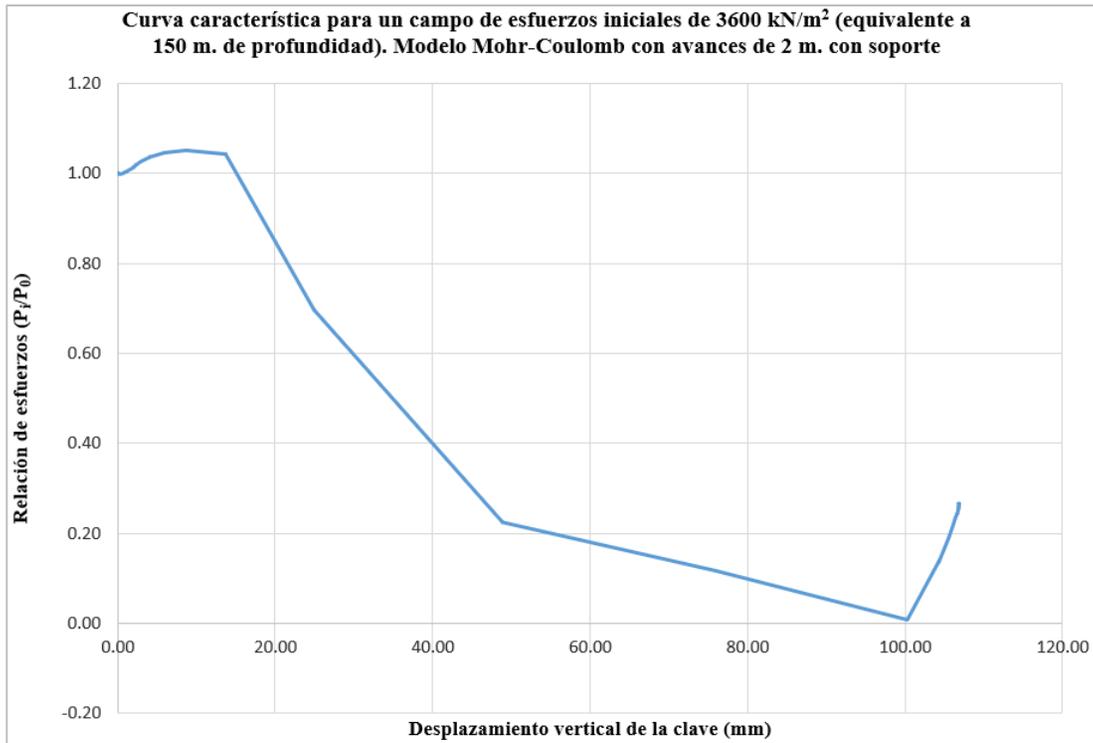
A. 11. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m² (equivalente a 150 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 1 m. sin soporte.



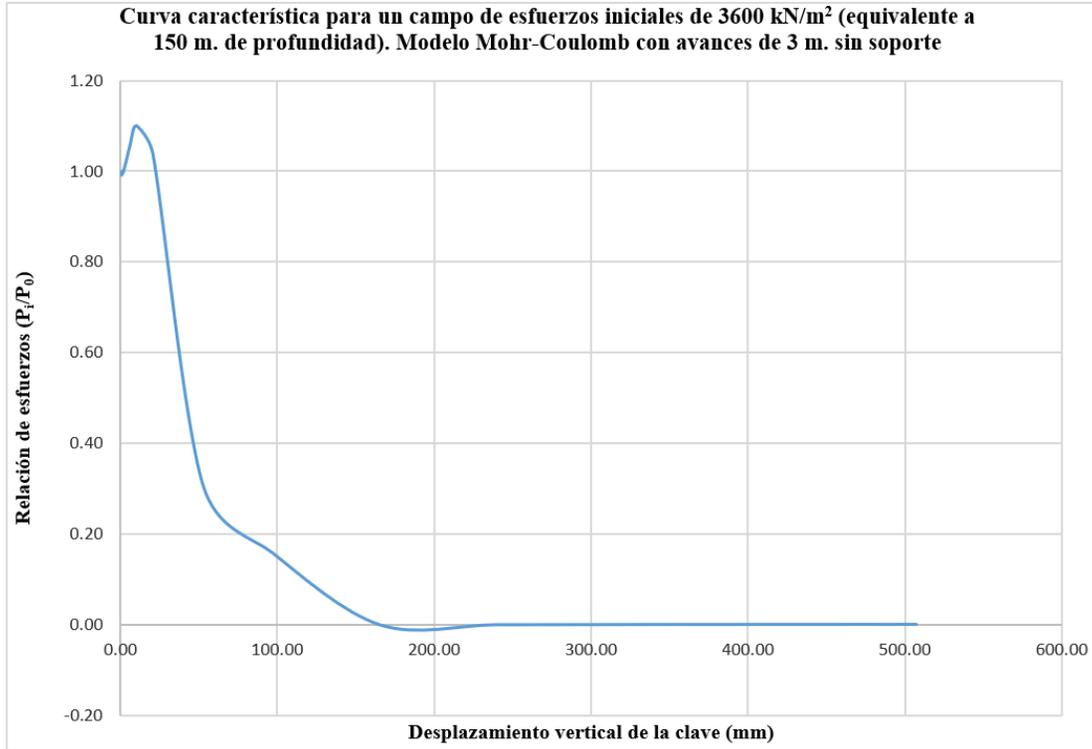
A. 12. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m² (equivalente a 150 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 1 m. con soporte.



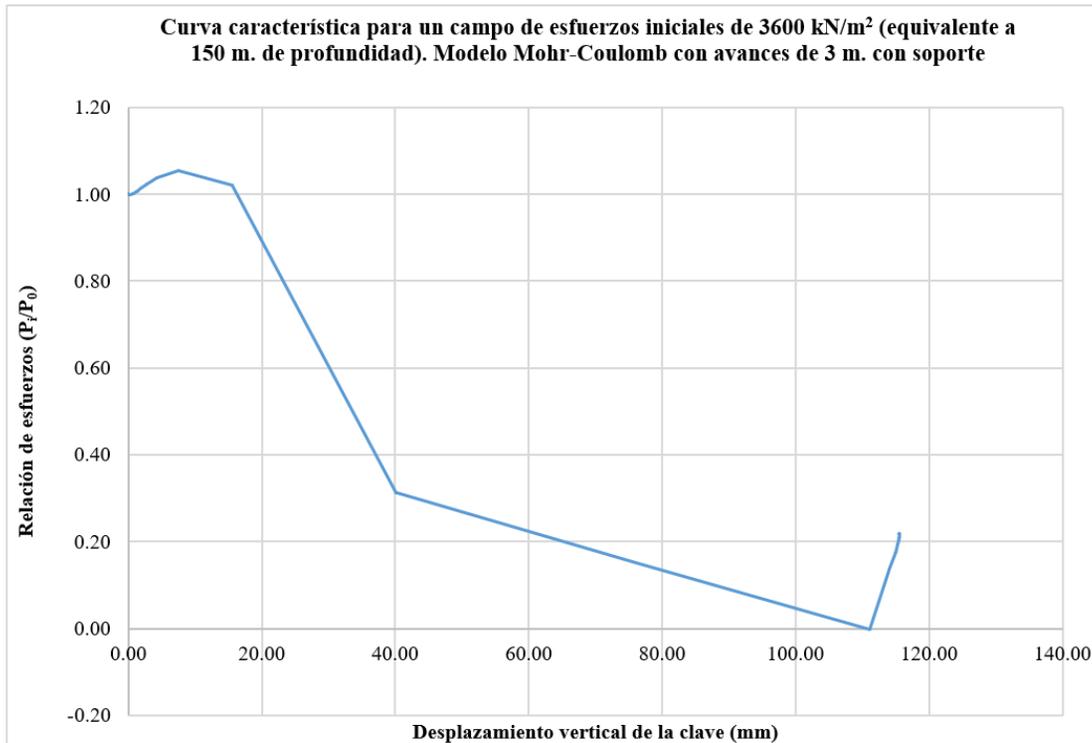
A. 13. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m² (equivalente a 150 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 2 m. sin soporte.



A. 14. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m² (equivalente a 150 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 2 m. con soporte.



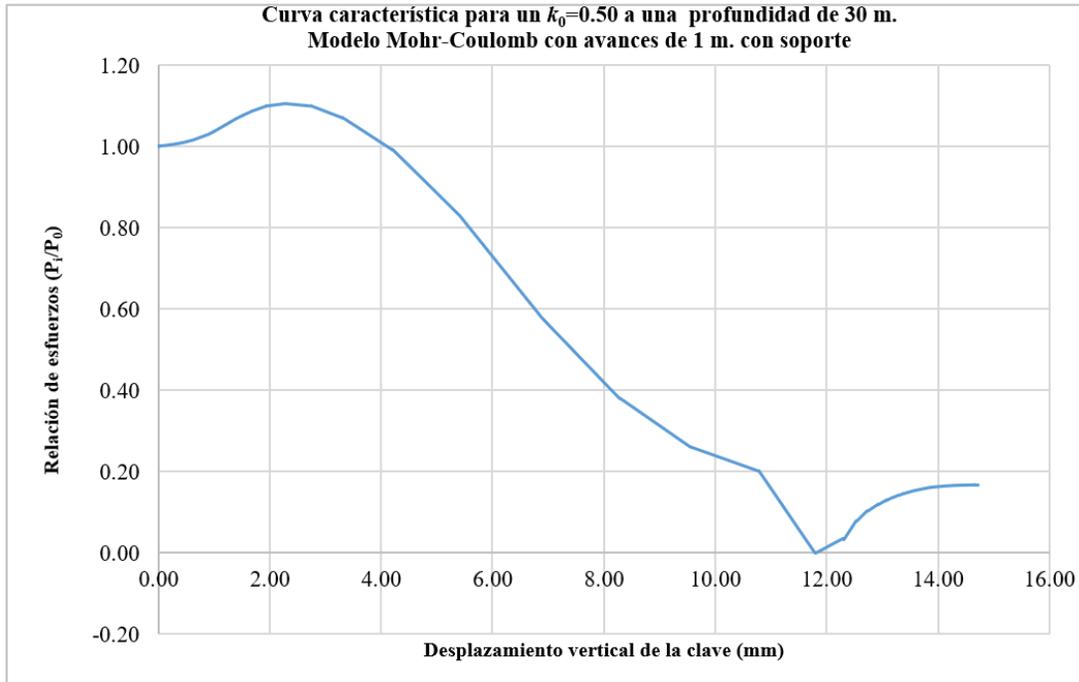
A. 15. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m² (equivalente a 150 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. sin soporte.



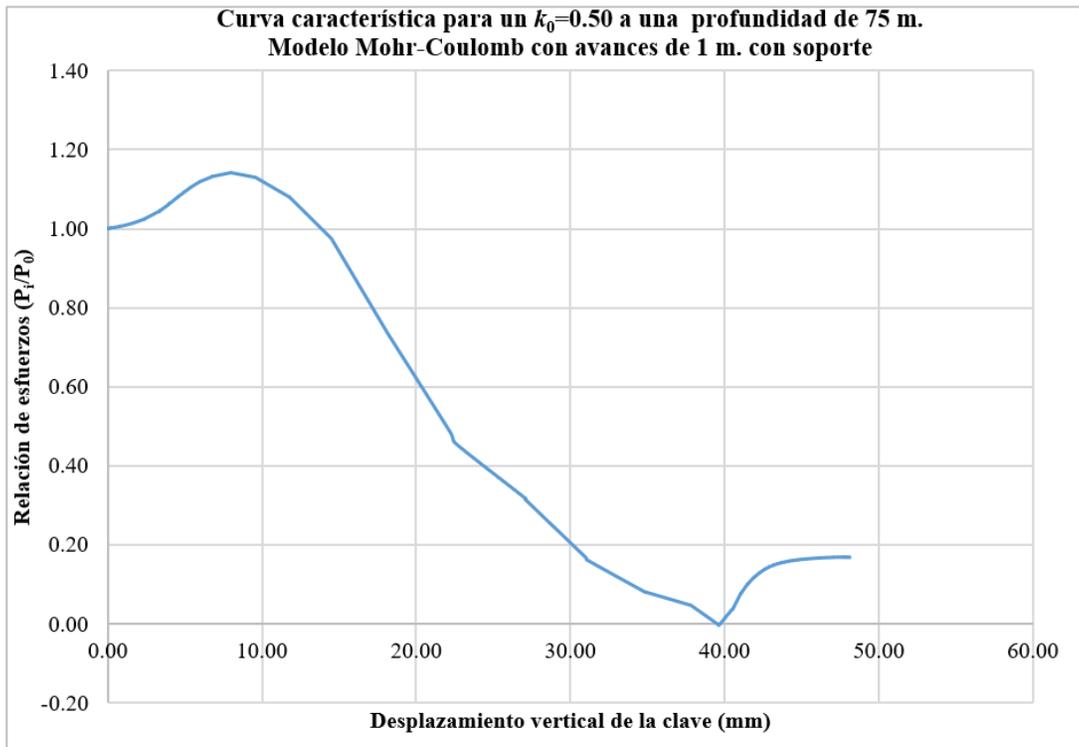
A. 16. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m² (equivalente a 150 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

A.1.2. Variación del coeficiente de esfuerzo horizontal, k_0

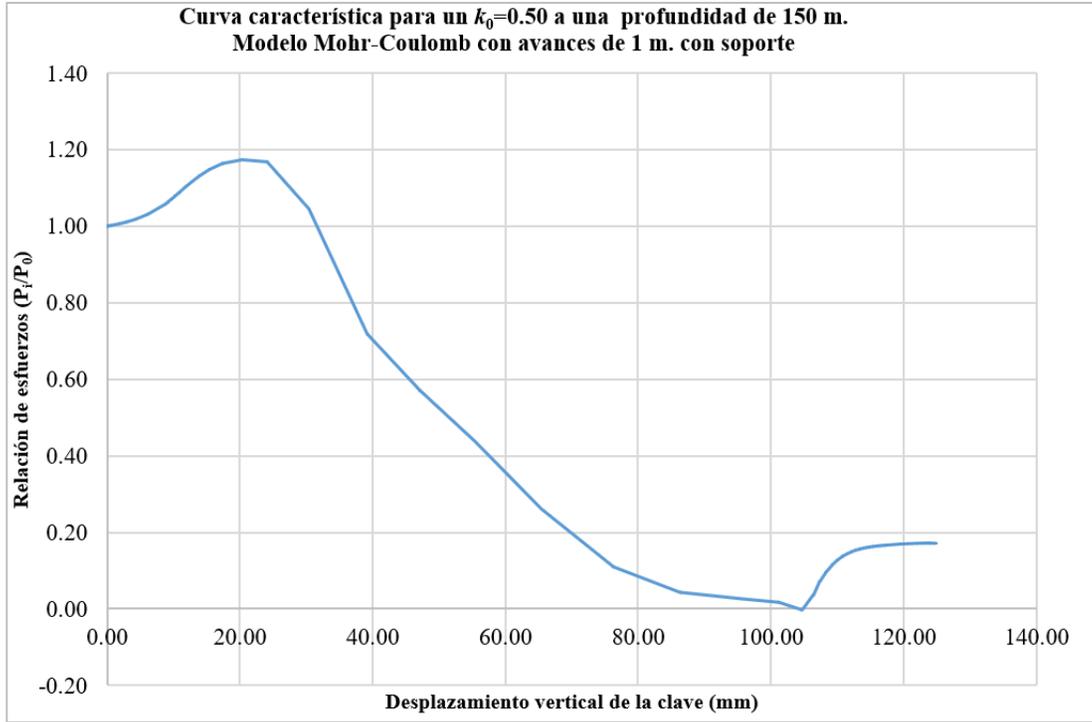
A.1.2.1. Caso $k_0=0.50$



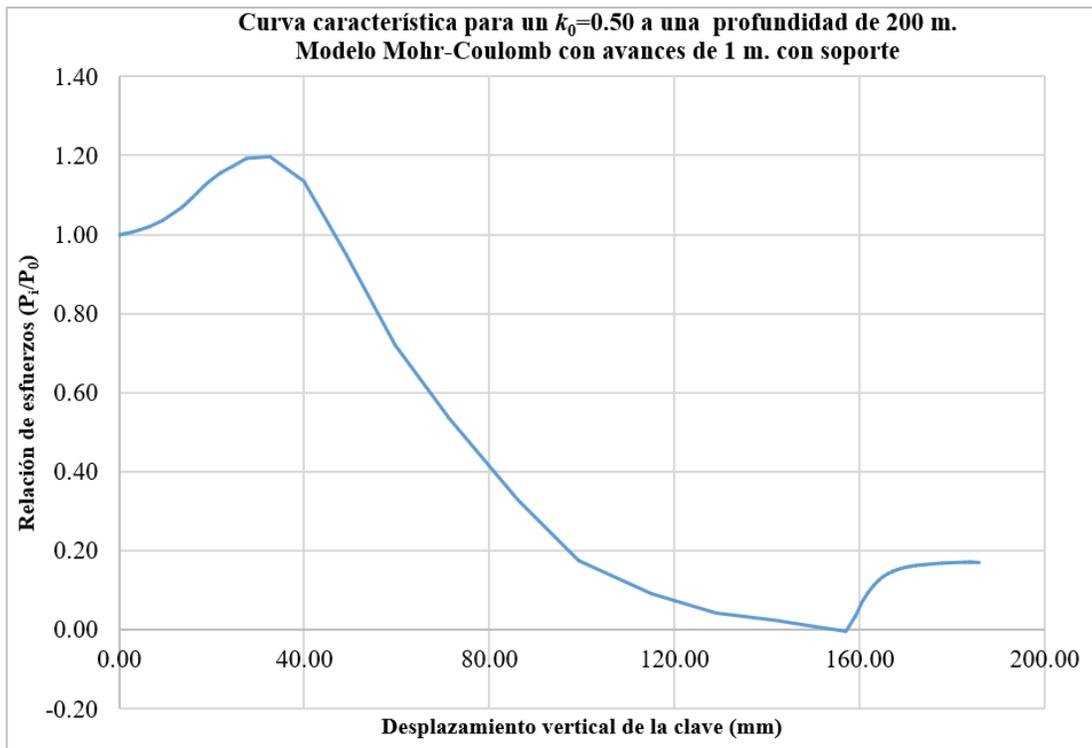
A. 17. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 1 m. con soporte.



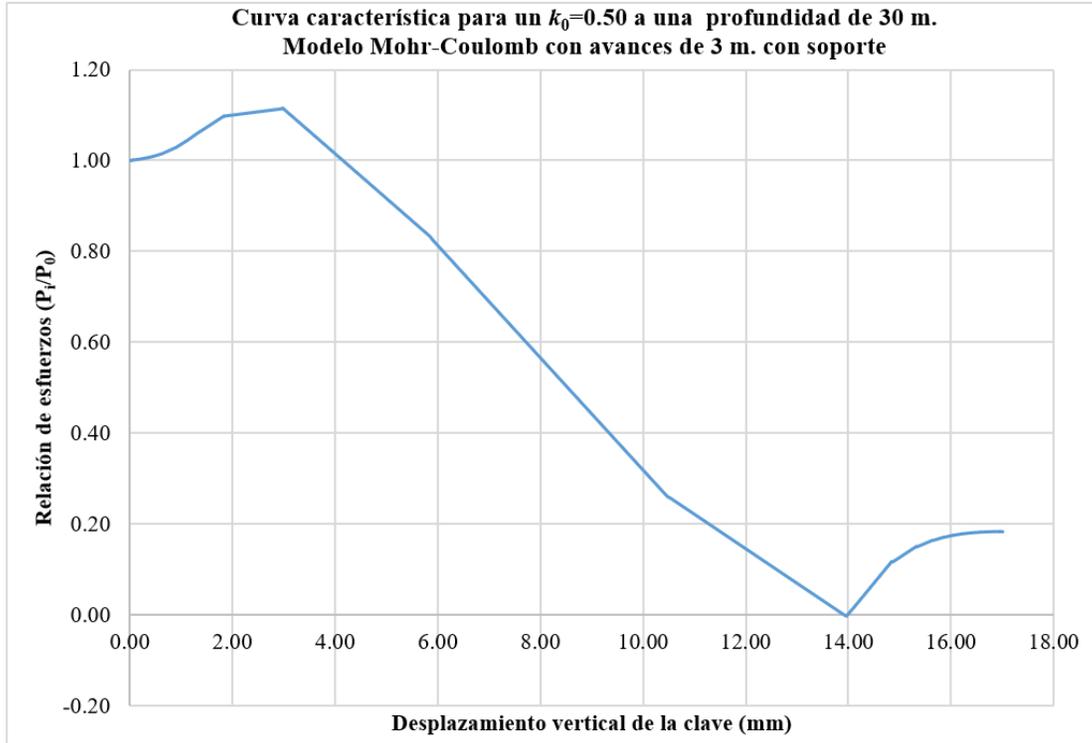
A. 18. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 1 m. con soporte.



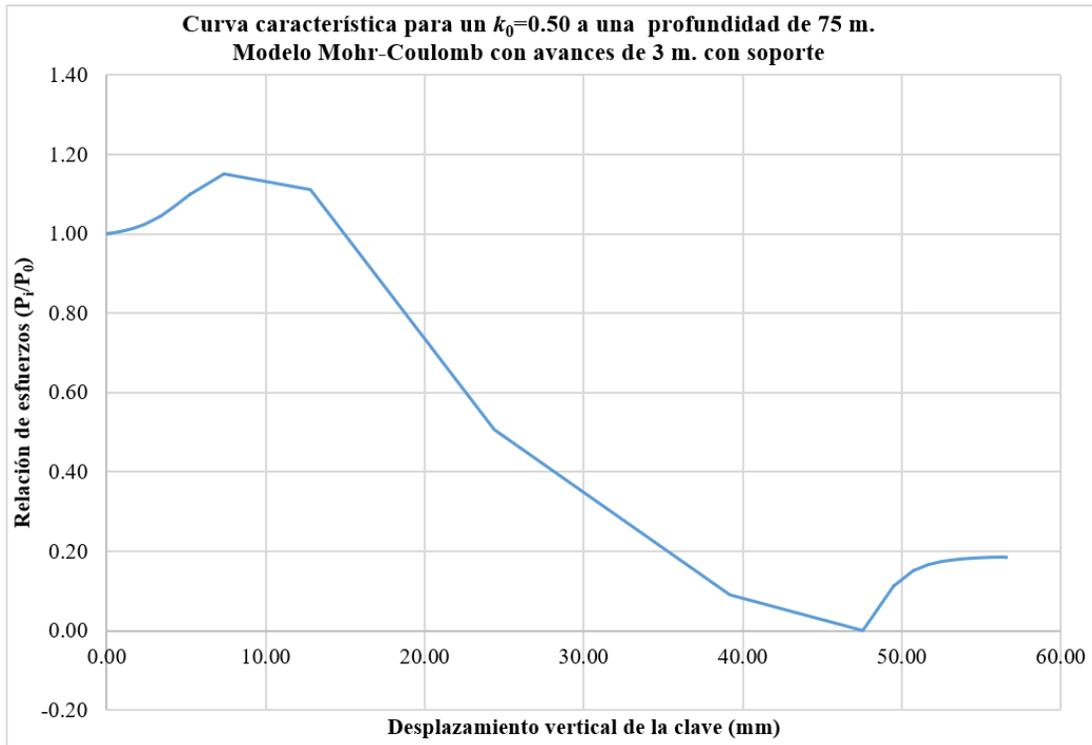
A. 19. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 1 m. con soporte.



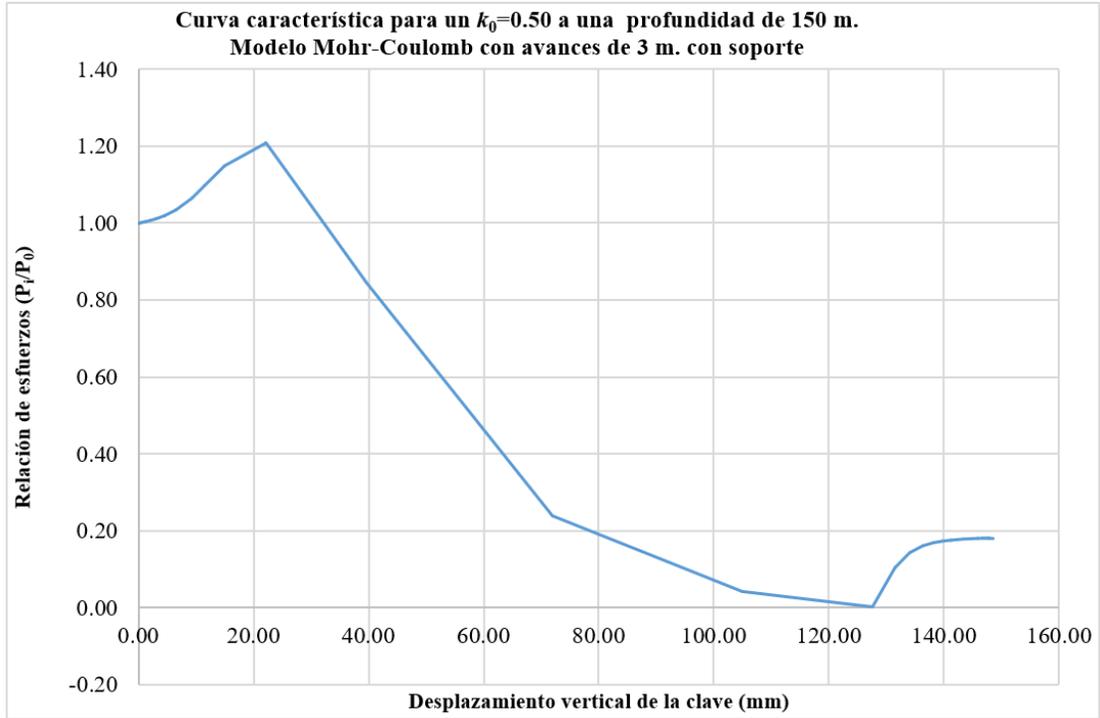
A. 20. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 1 m. con soporte.



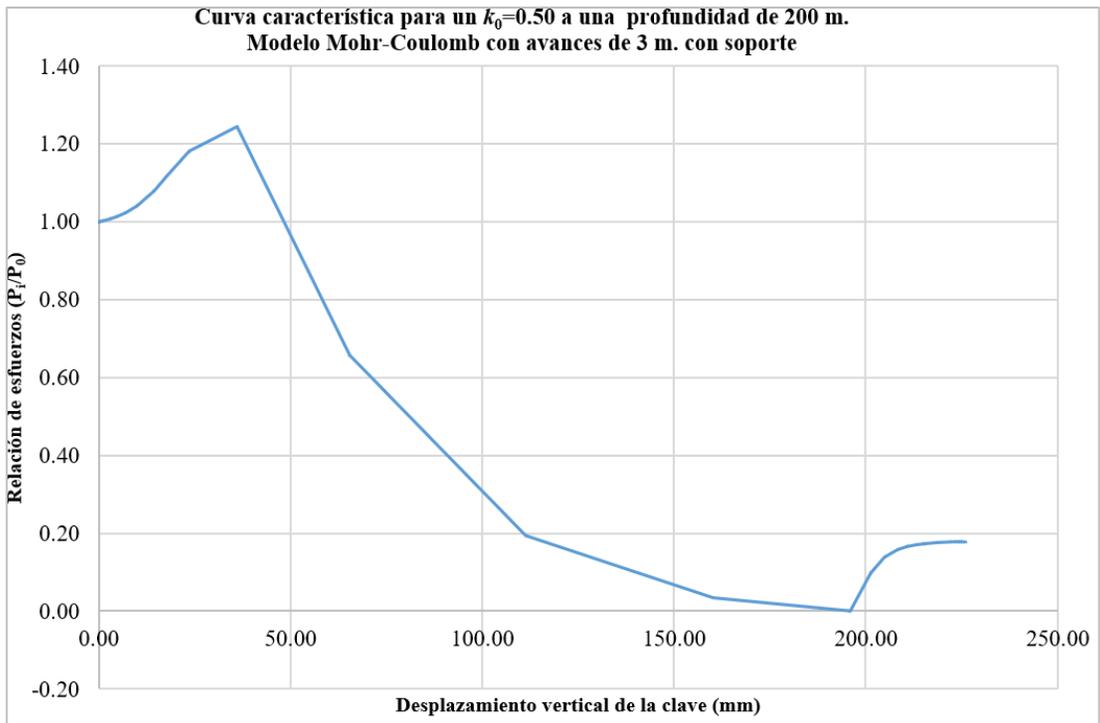
A. 21. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



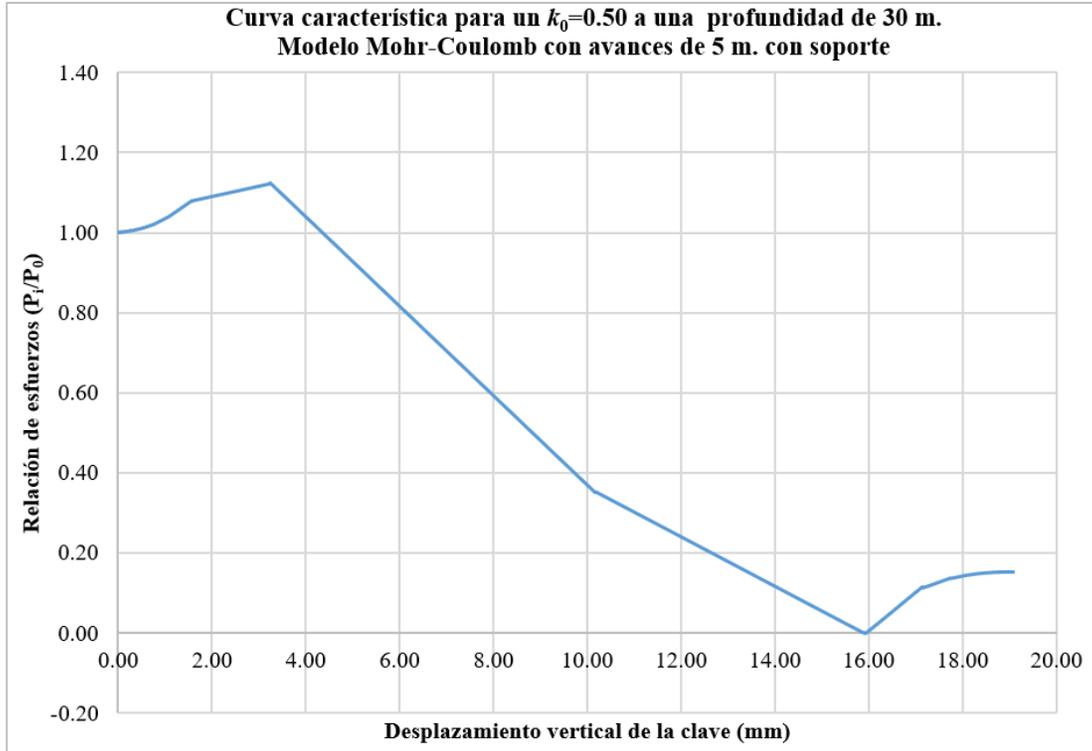
A. 22. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



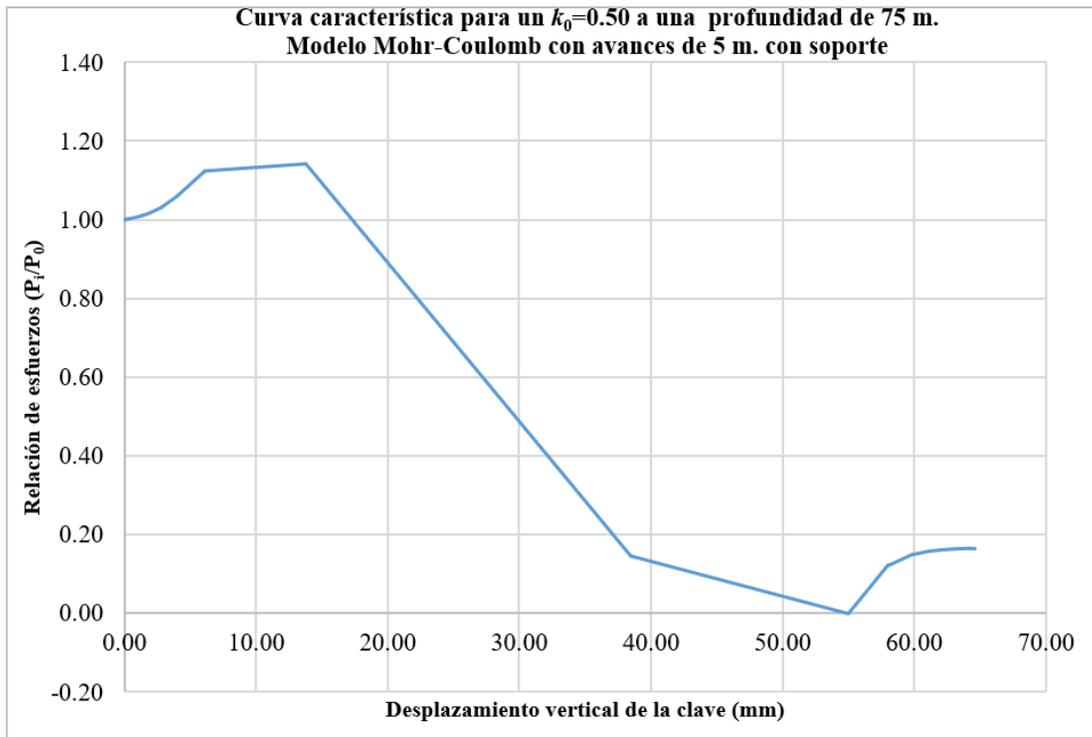
A. 23. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



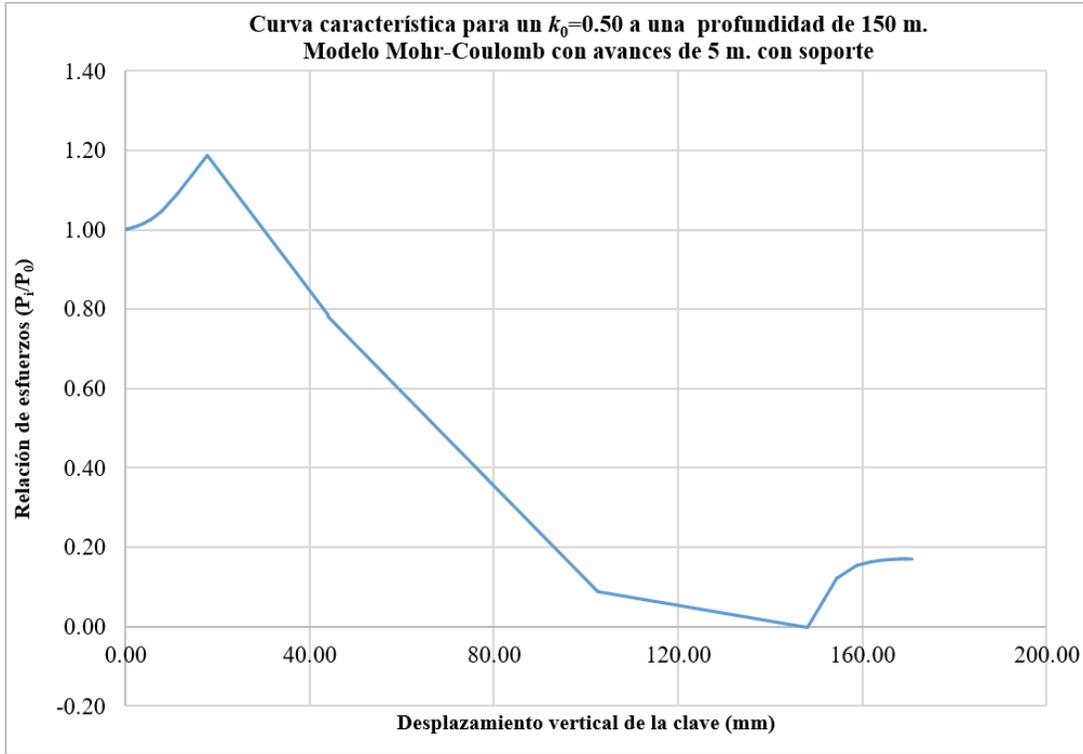
A. 24. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



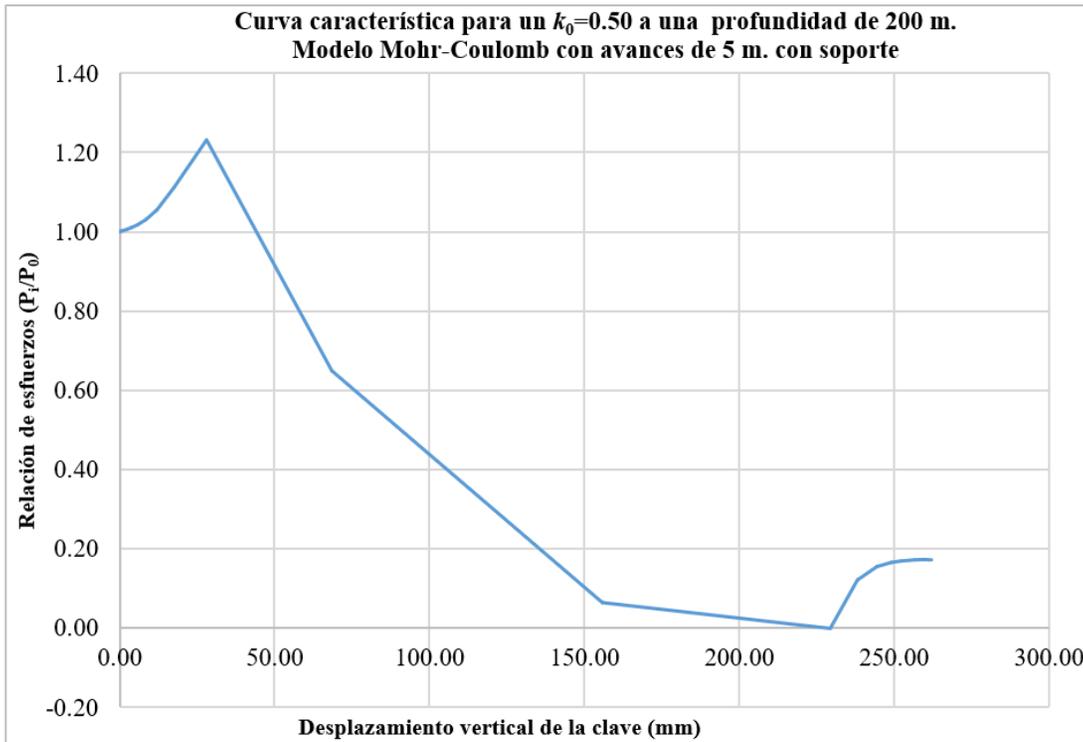
A. 25. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 5 m. con soporte.



A. 26. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 5 m. con soporte.

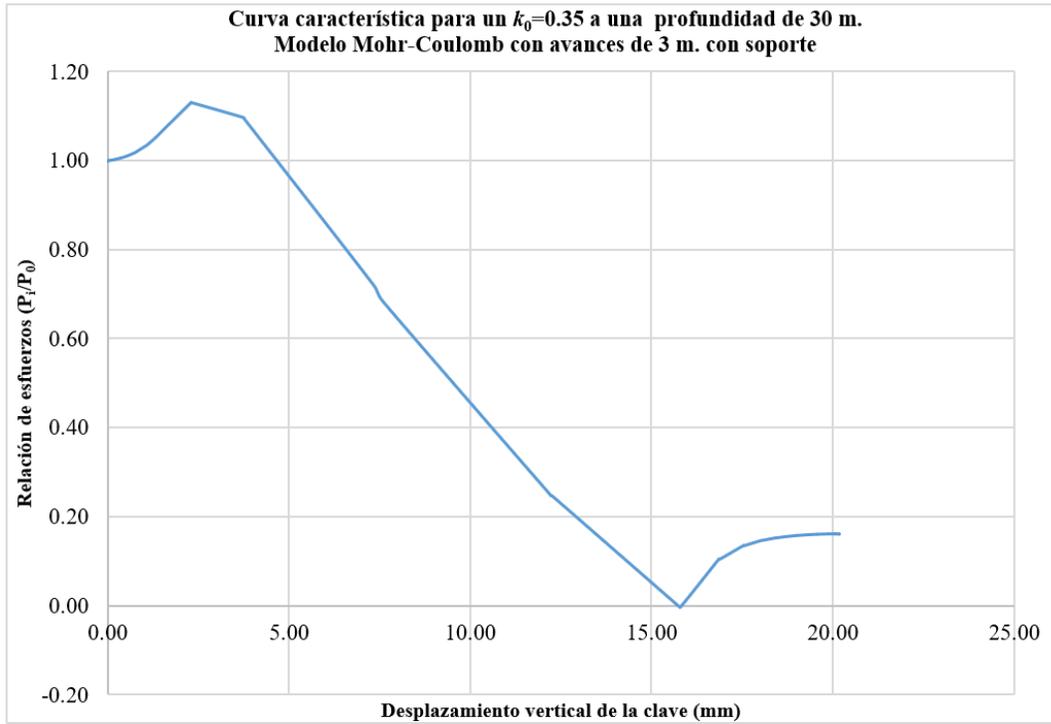


A. 27. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 5 m. con soporte.

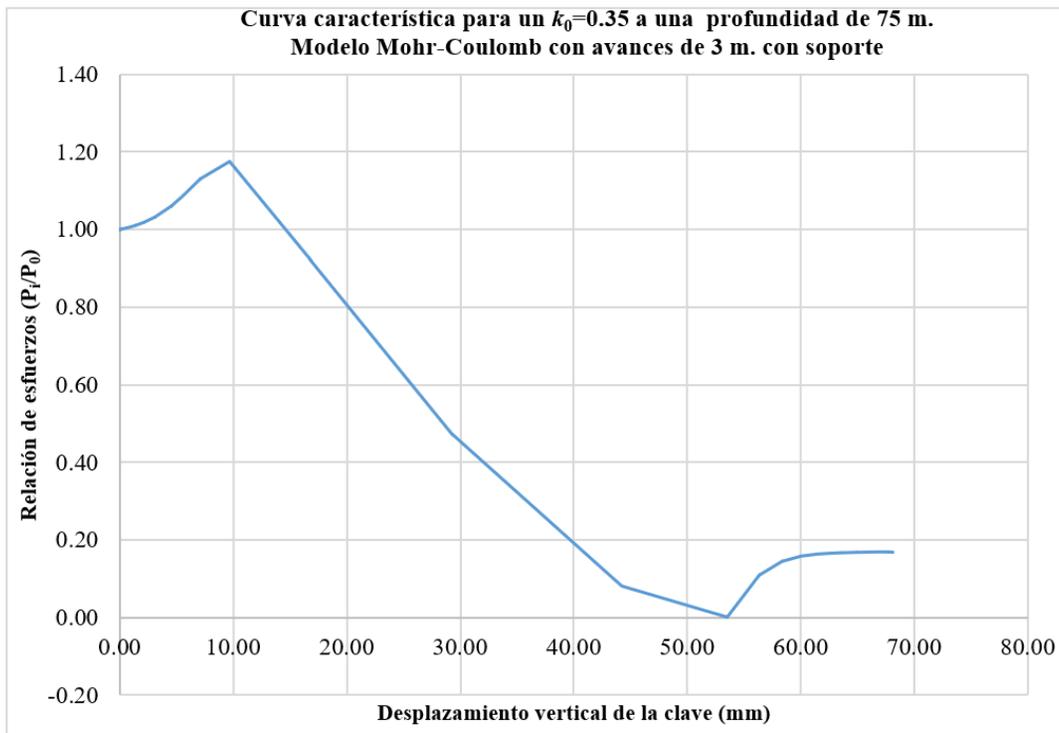


A. 28. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 5 m. con soporte.

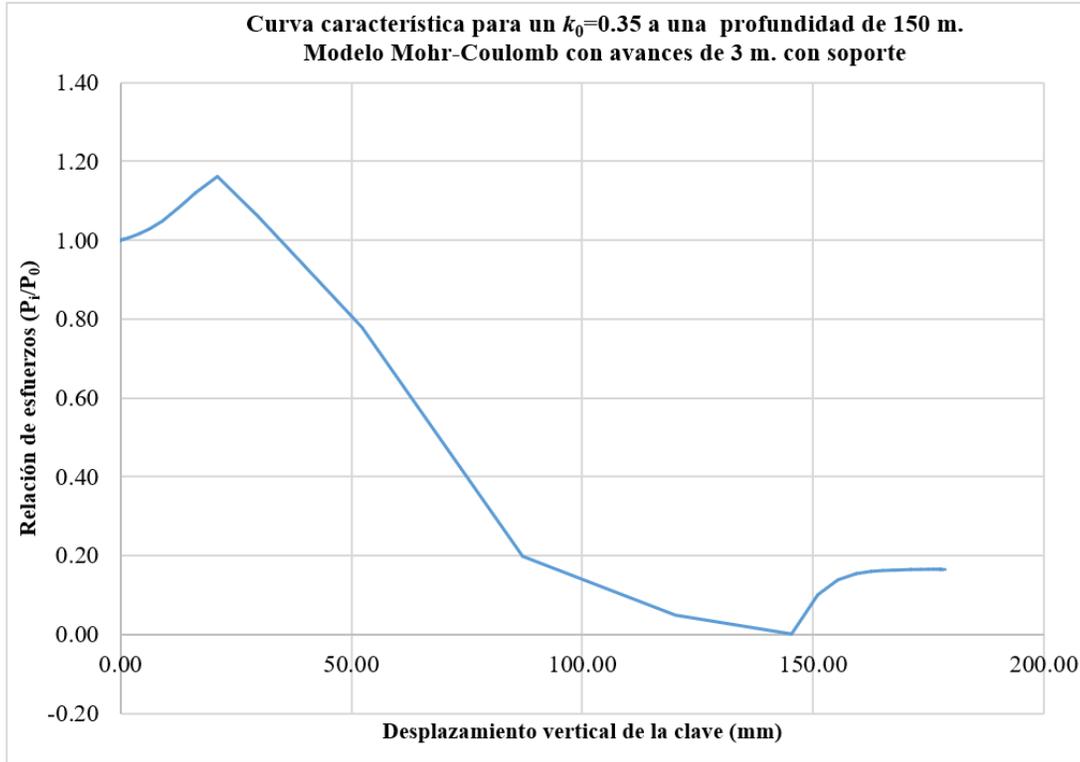
A.1.2.2. Caso $k_0=0.35$



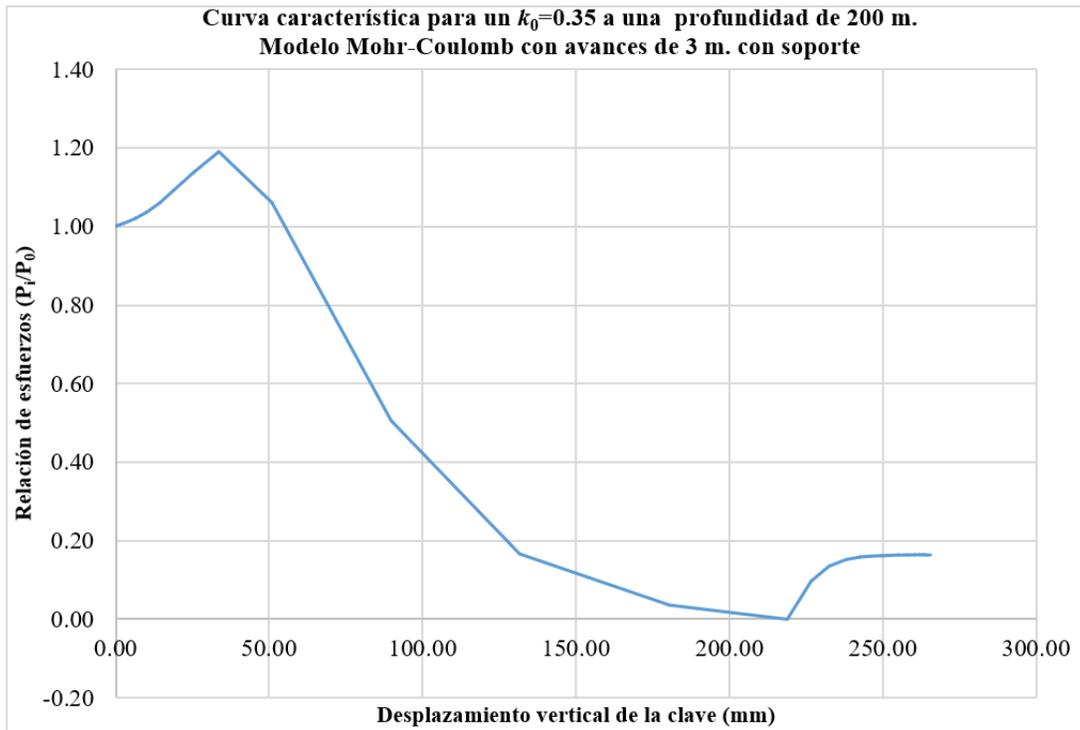
A. 29. Curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad 30 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



A. 30. Curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad 75 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

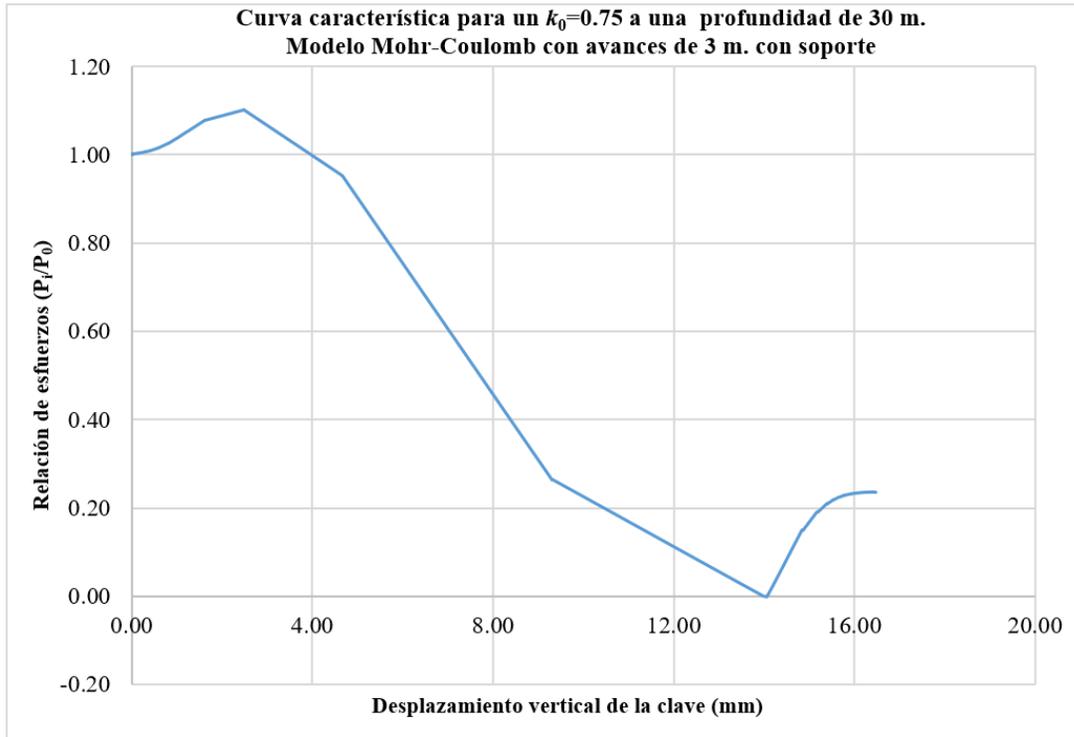


A. 31. Curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

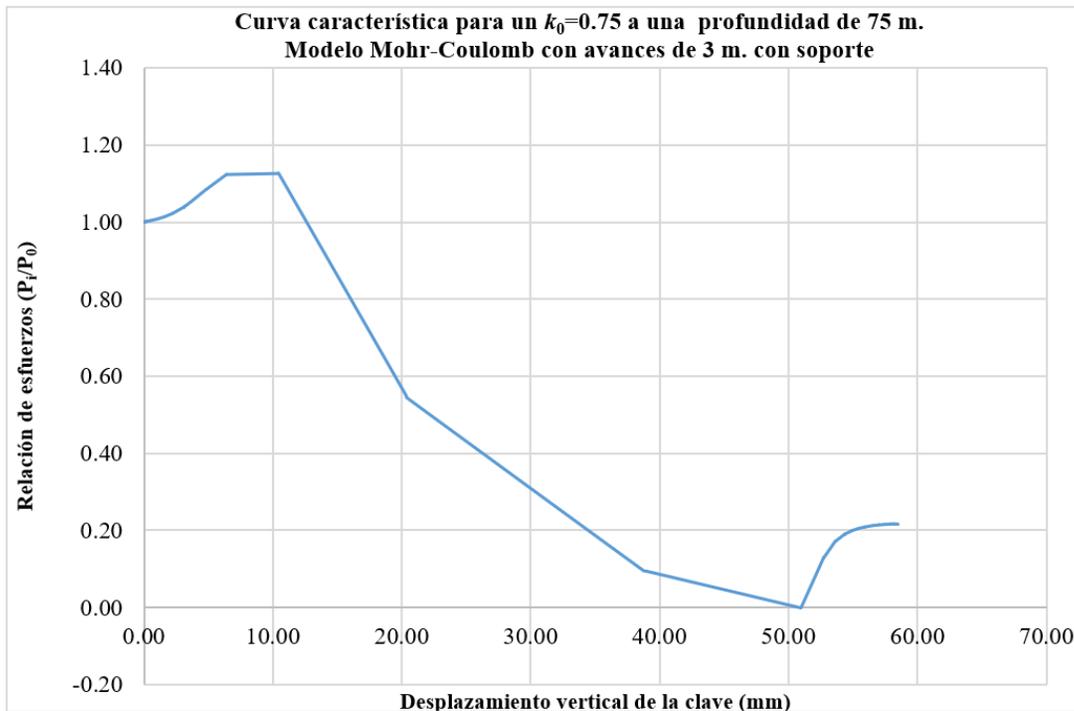


A. 32. Curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

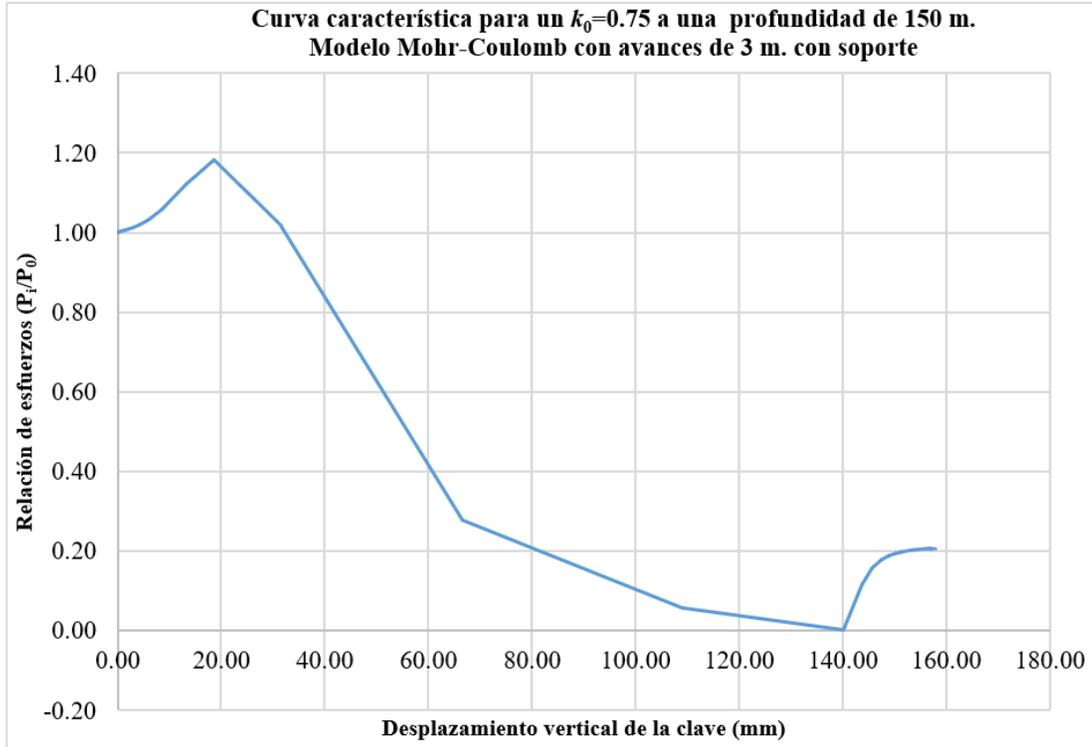
A.1.2.3. Caso $k_0=0.75$



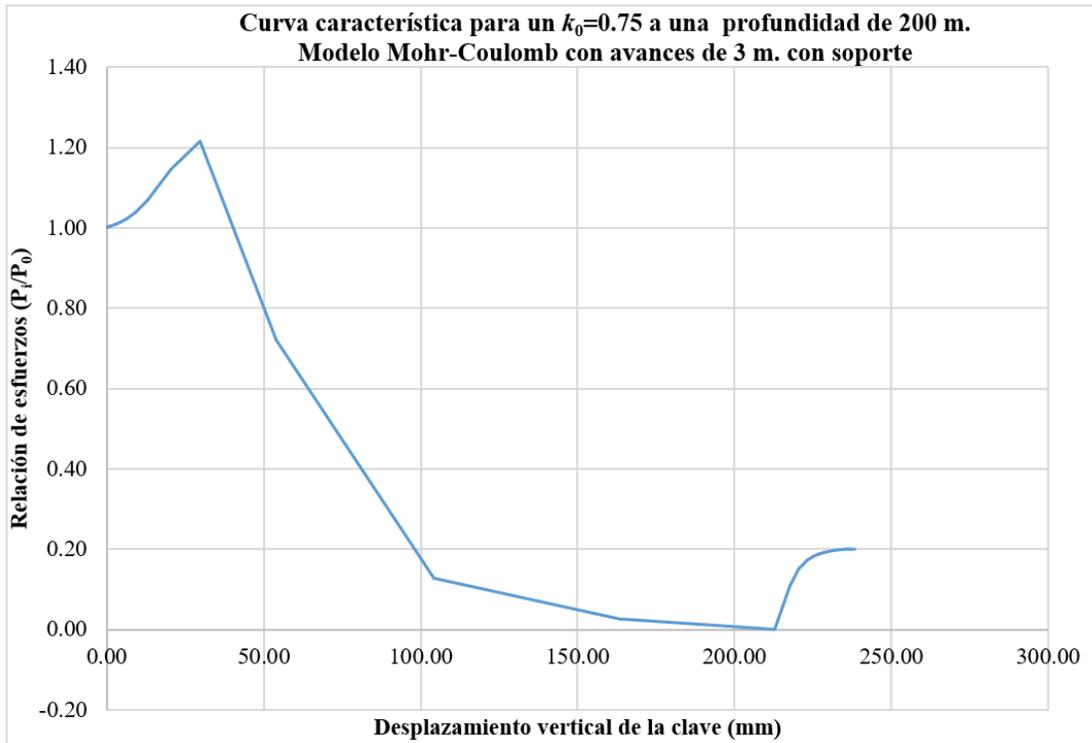
A. 33. Curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad 30 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



A. 34. Curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad 75 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

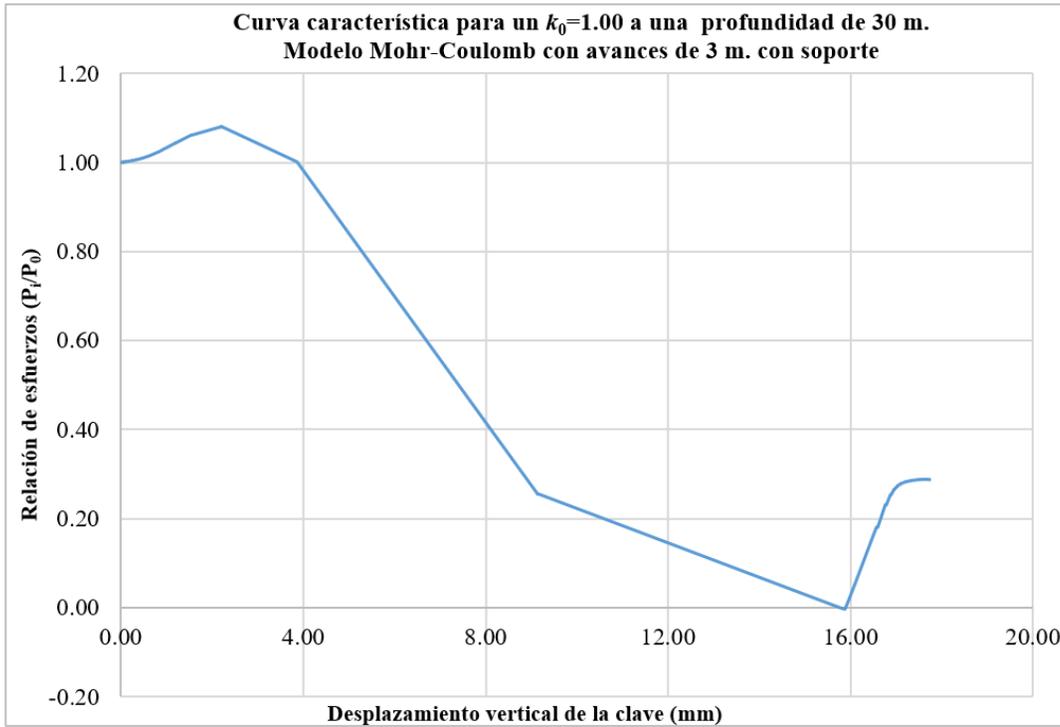


A. 35. Curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad 150 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

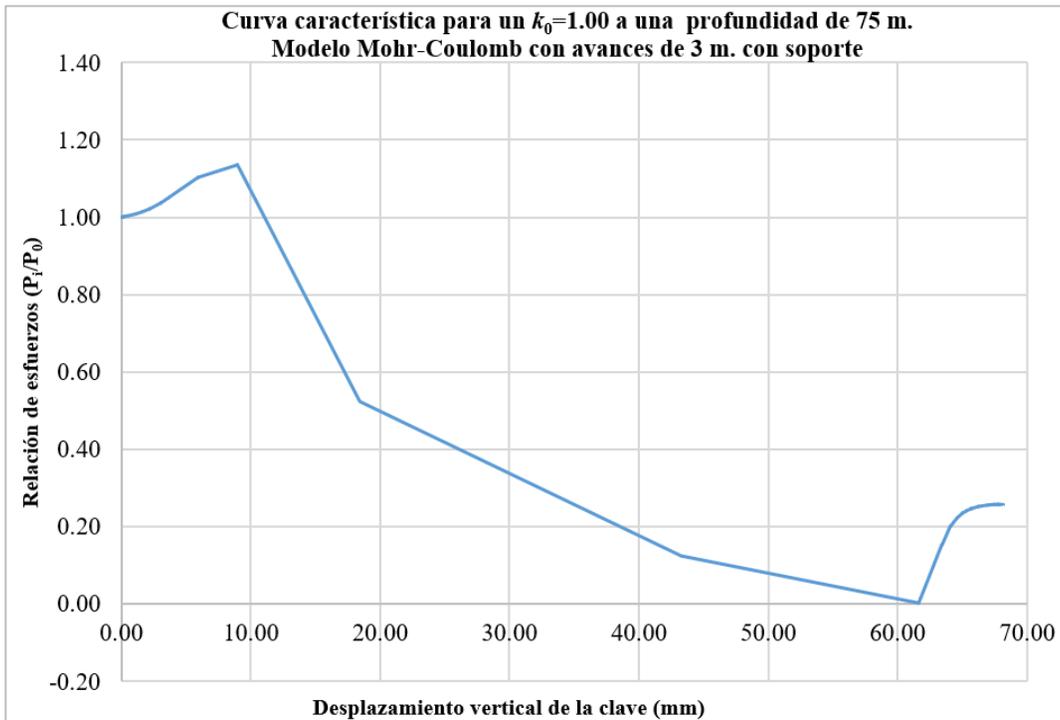


A. 36. Curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad 200 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

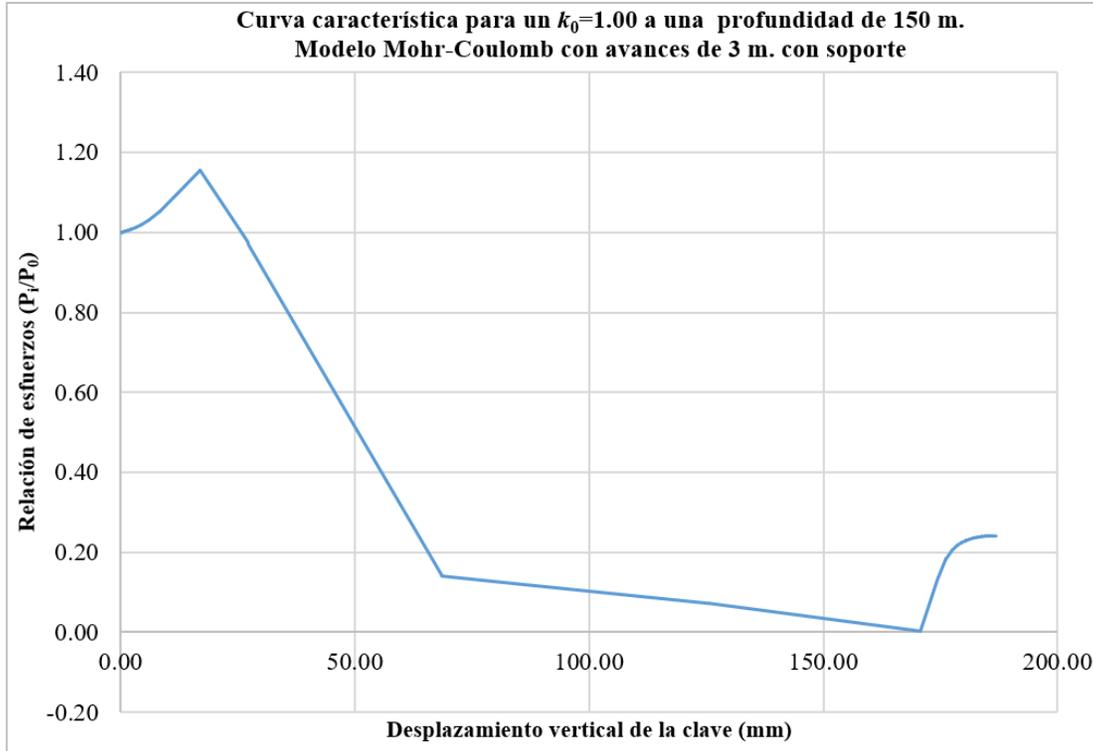
A.1.2.4. Caso $k_0=1.00$



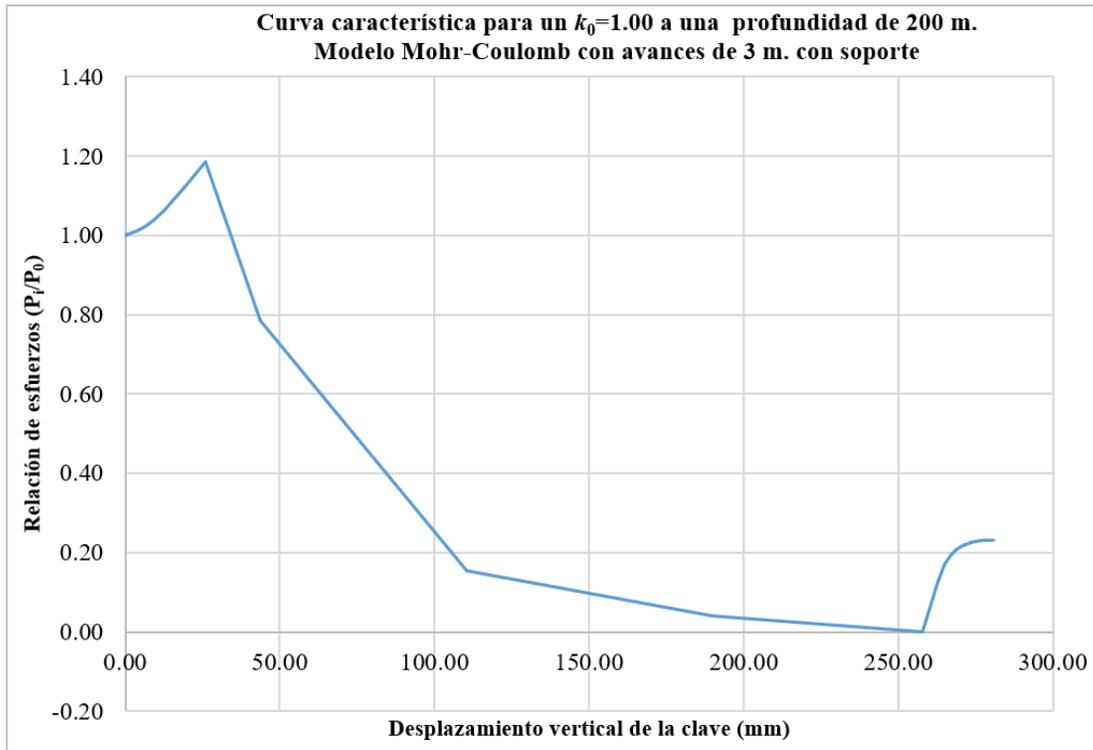
A. 37. Curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



A. 38. Curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

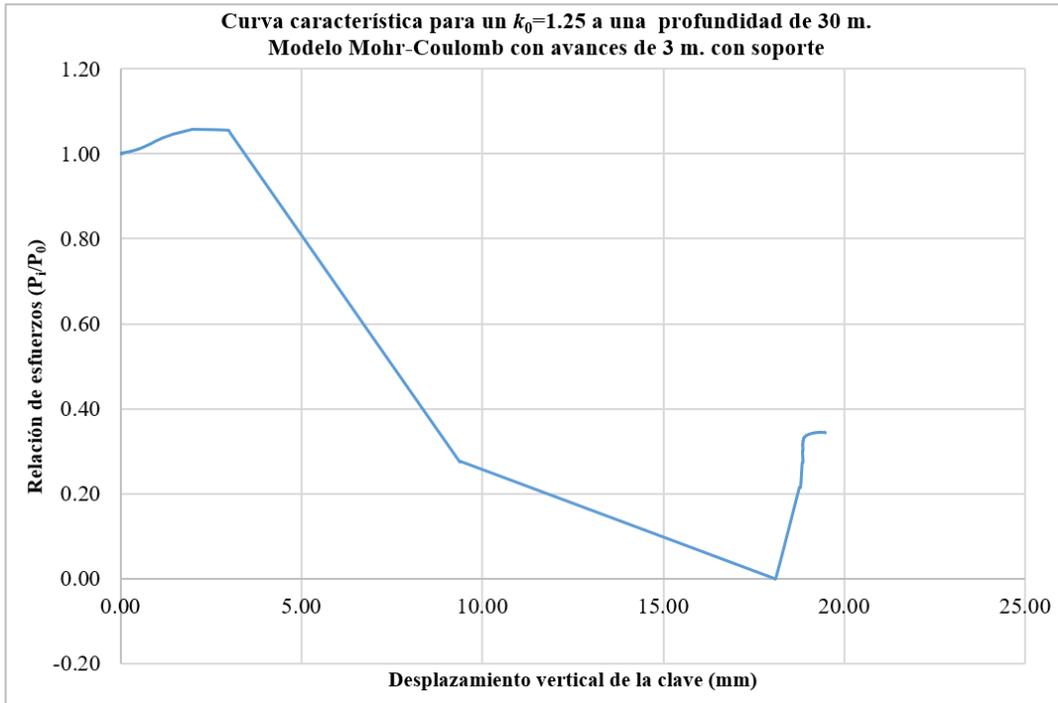


A. 39. Curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

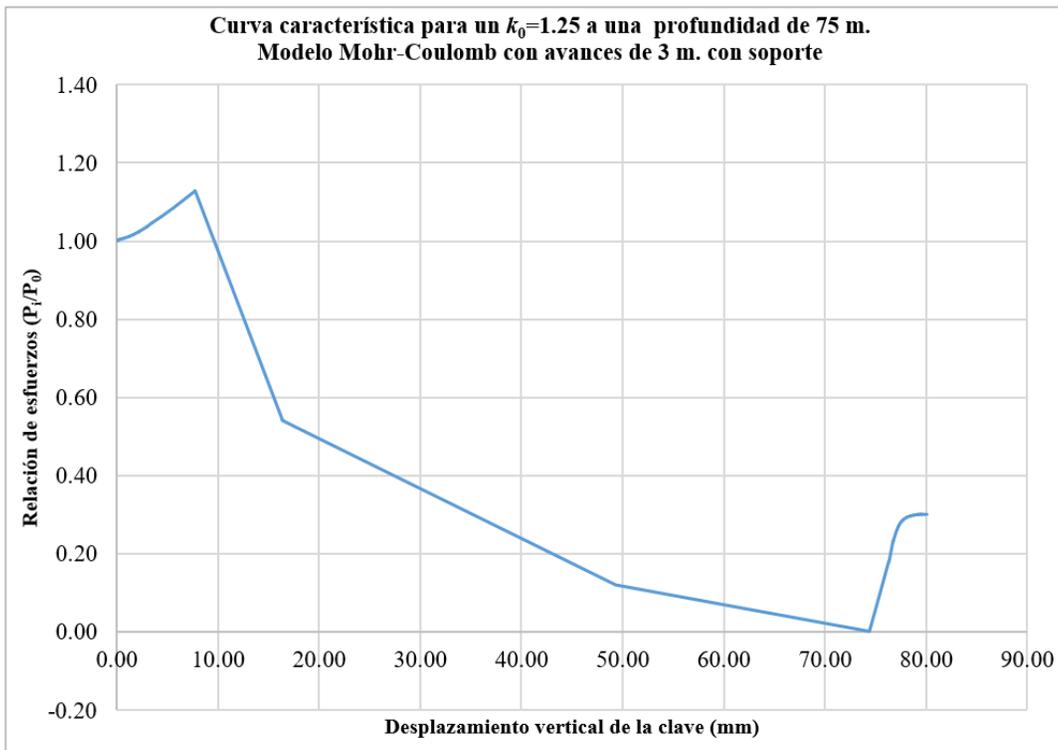


A. 40. Curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

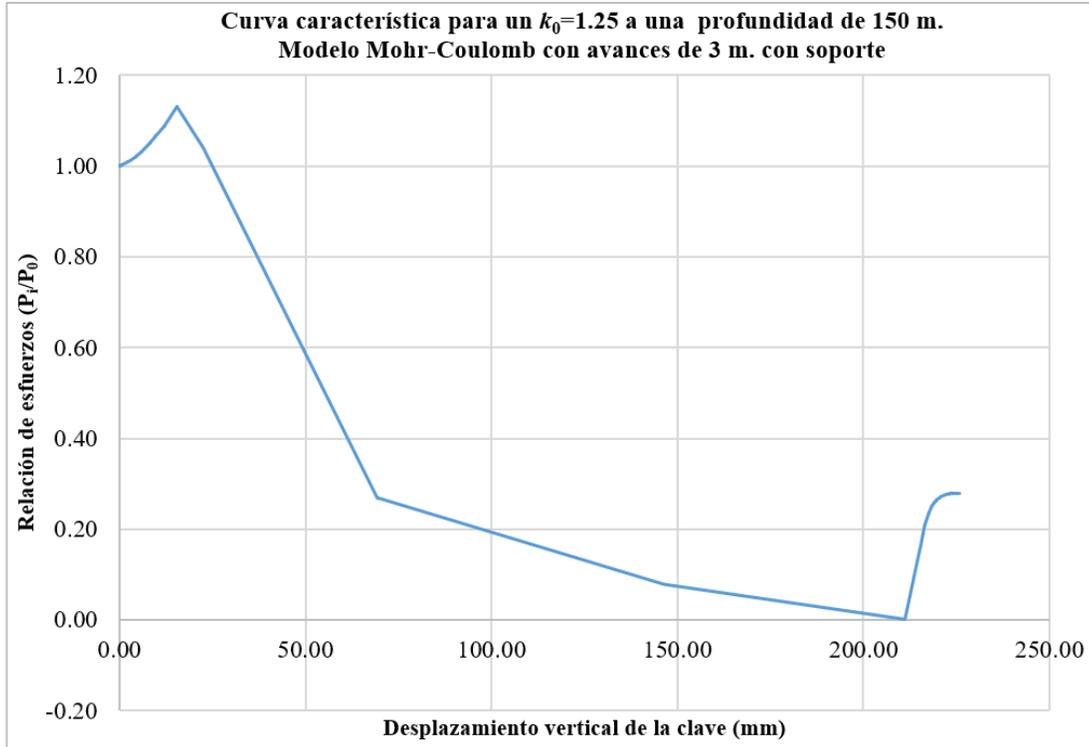
A.1.2.5. Caso $k_0=1.25$



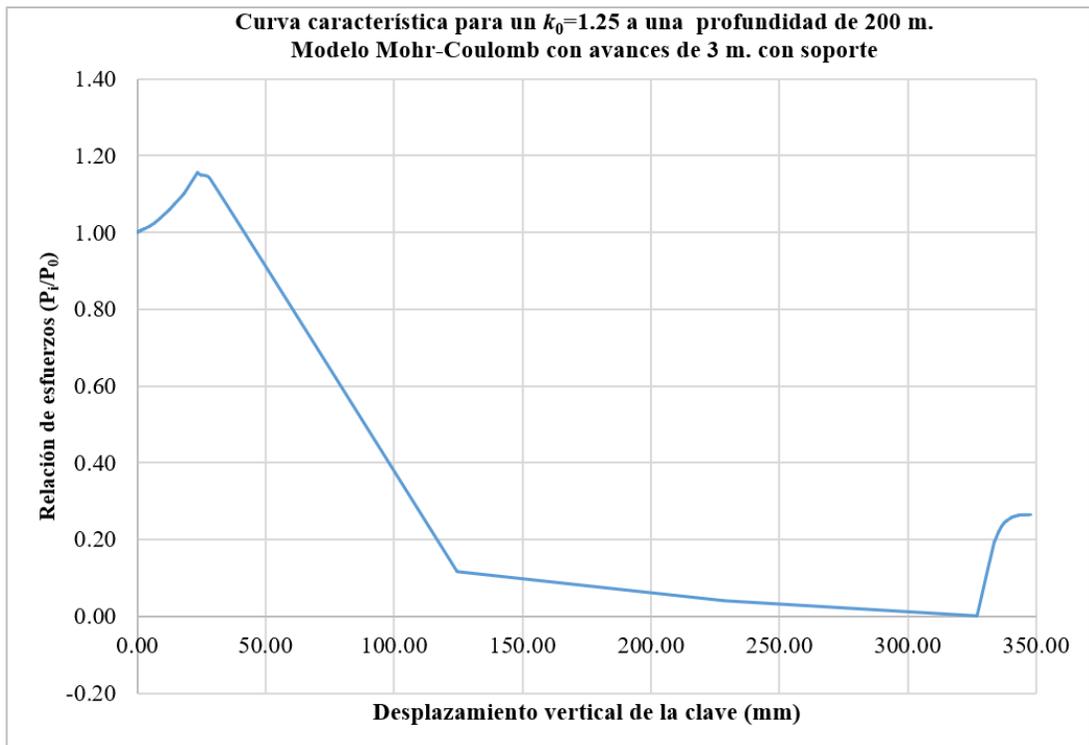
A. 41. Curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad 30 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



A. 42. Curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad 75 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



A. 43. Curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad 150 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



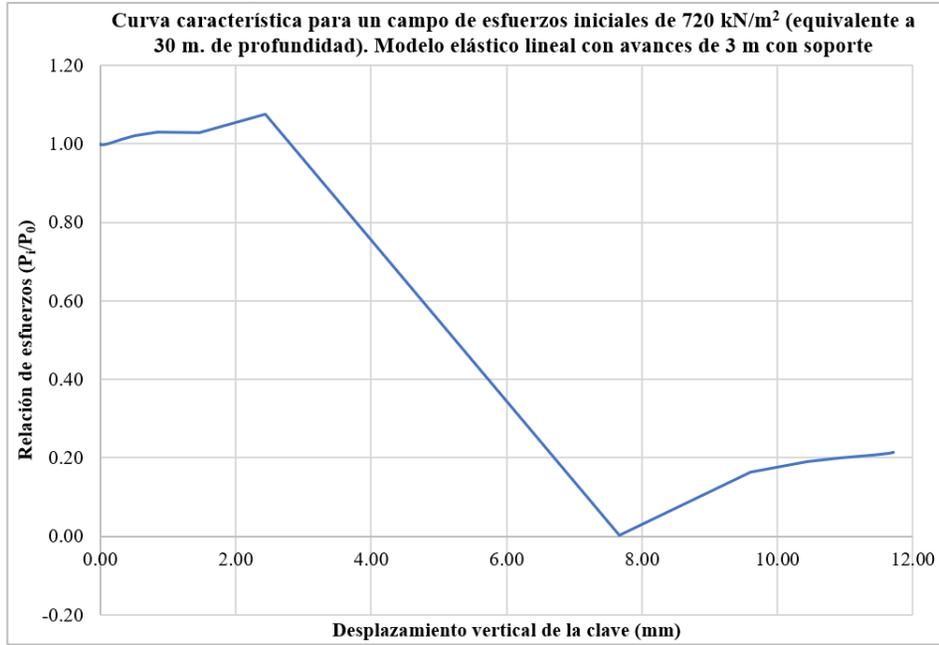
A. 44. Curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad 200 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

A.2. MODELO CON SECCIÓN DE TÚNEL CARRTERO

A.2.1 Campos de esfuerzos iniciales

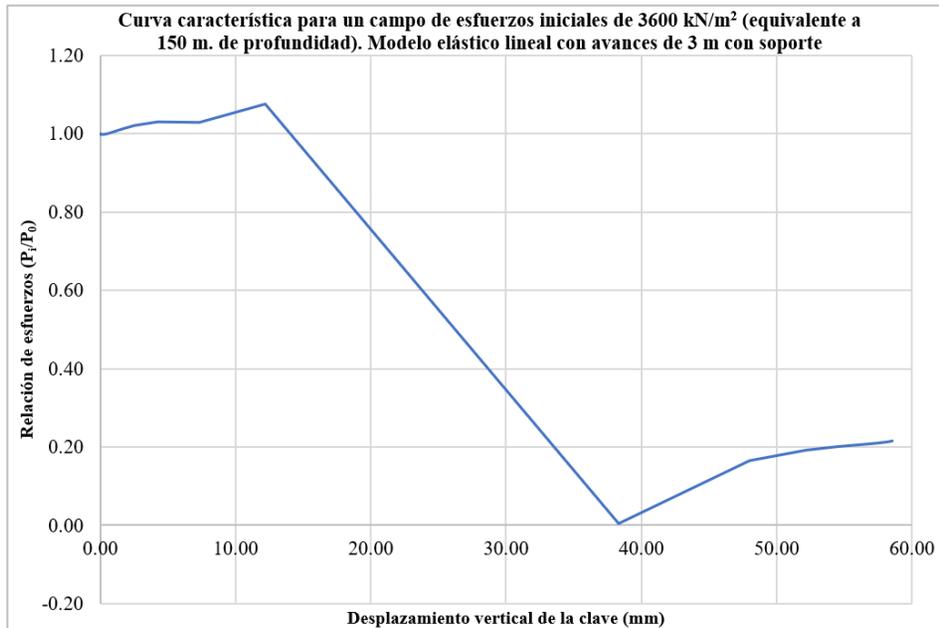
A.2.1.1 Modelo elástico lineal

a) Campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m^2



A. 45. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m^2 (equivalente a 30 m. de profundidad). Modelo elástico lineal con avances de 3 m con soporte.

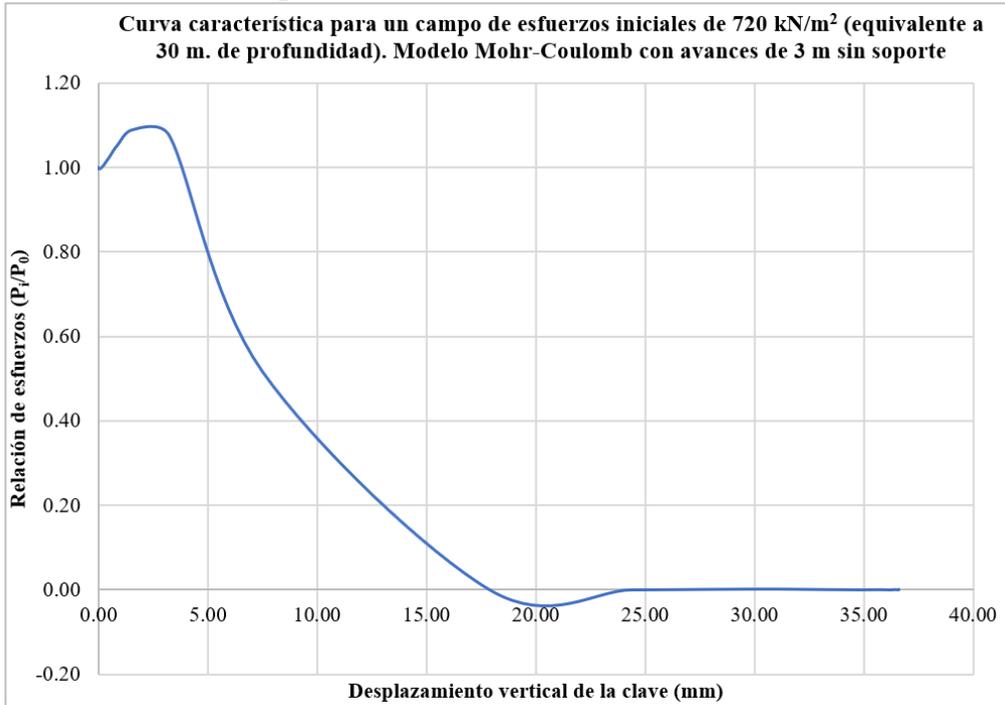
b) Campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m^2



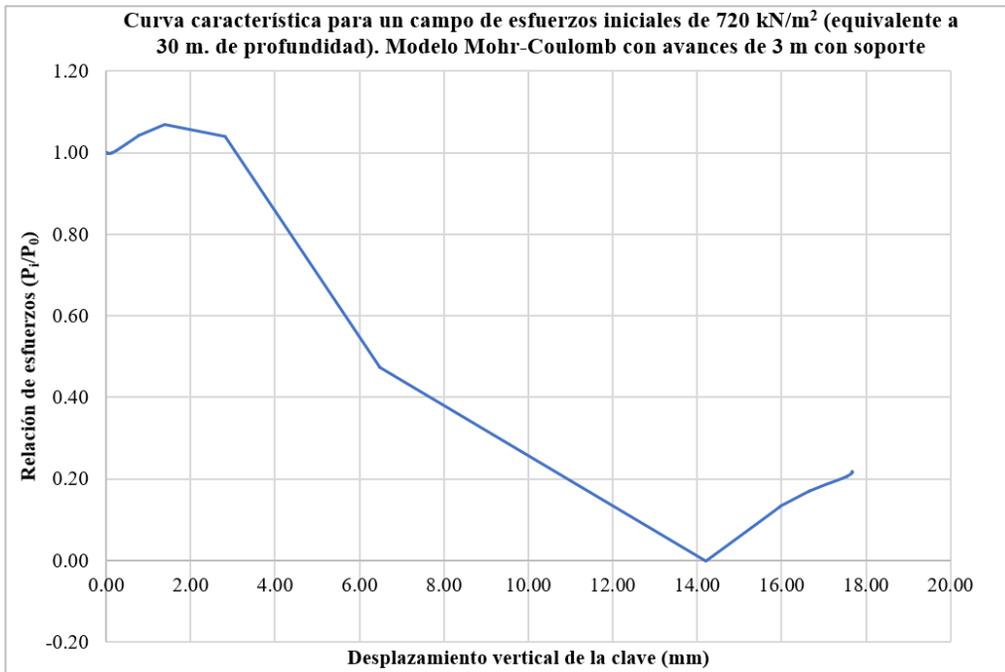
A. 46. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m^2 (equivalente a 150 m. de profundidad). Modelo elástico lineal con avances de 3 m con soporte.

A.2.1.2. Modelo de Mohr-Coulomb

a) Campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m²

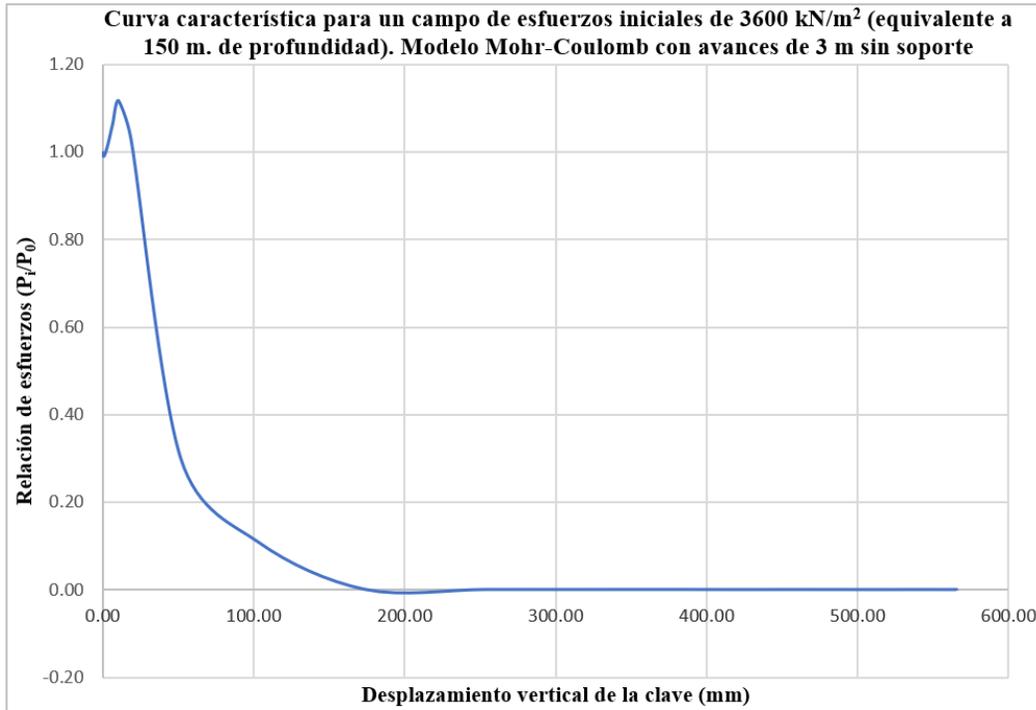


A. 47. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m² (equivalente a 30 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m sin soporte.

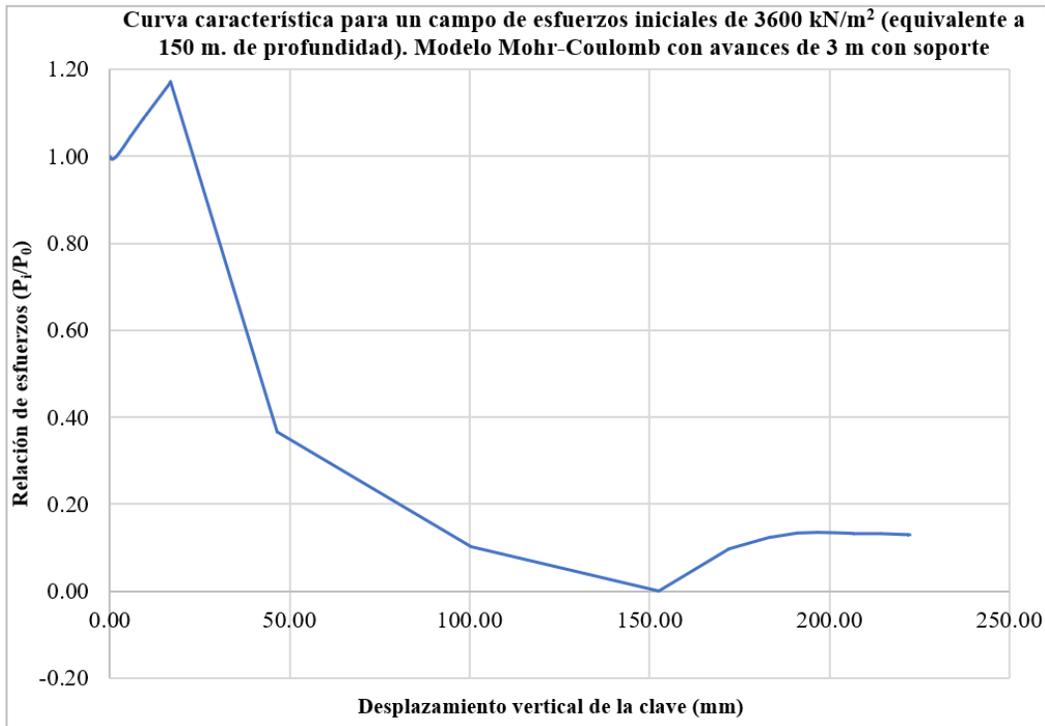


A. 48. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 720 kN/m² (equivalente a 30 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m con soporte.

b) Campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m²



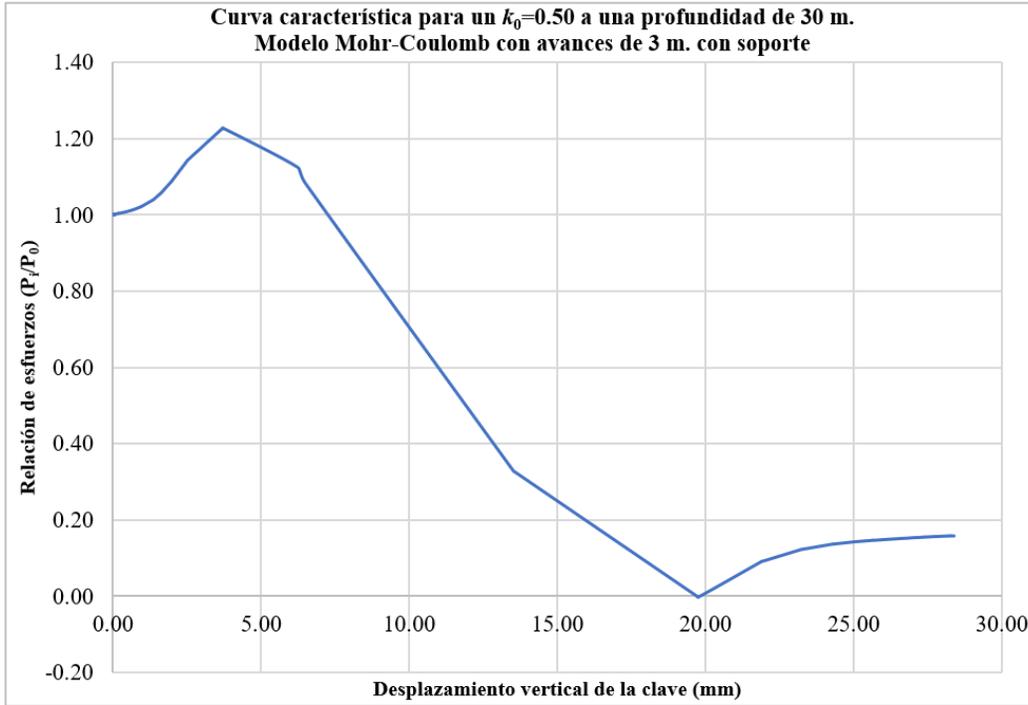
A. 49. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m² (equivalente a 150 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m sin soporte.



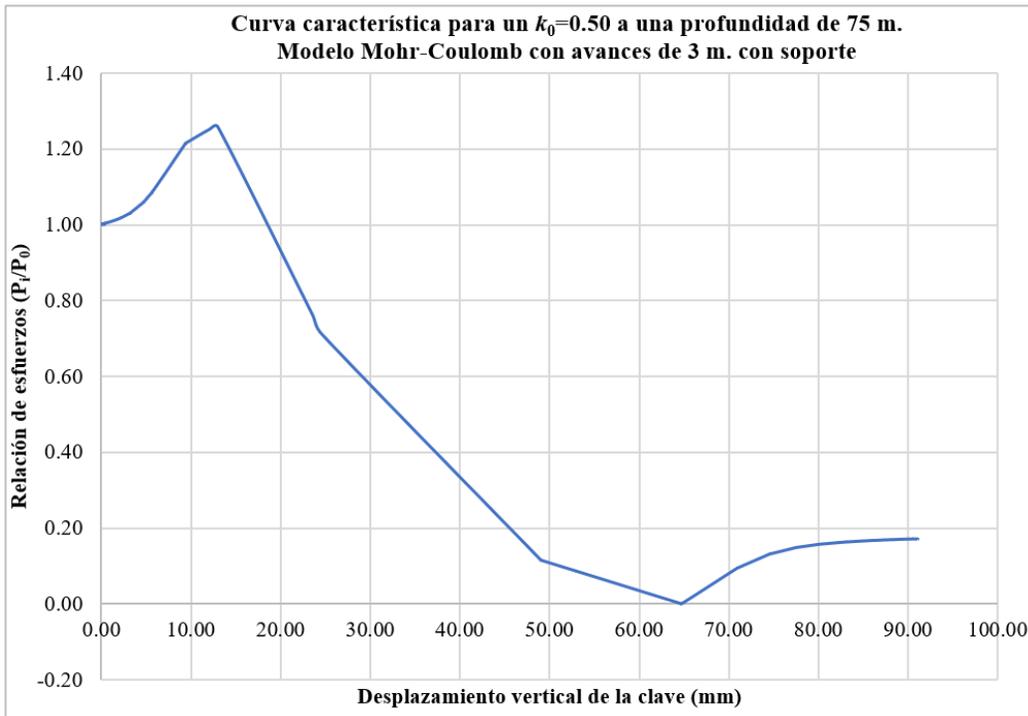
A. 50. Curva característica para un campo de esfuerzos iniciales de 3600 kN/m² (equivalente a 150 m. de profundidad). Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m con soporte.

A.2.2. Variación del coeficiente de esfuerzo horizontal, k_0

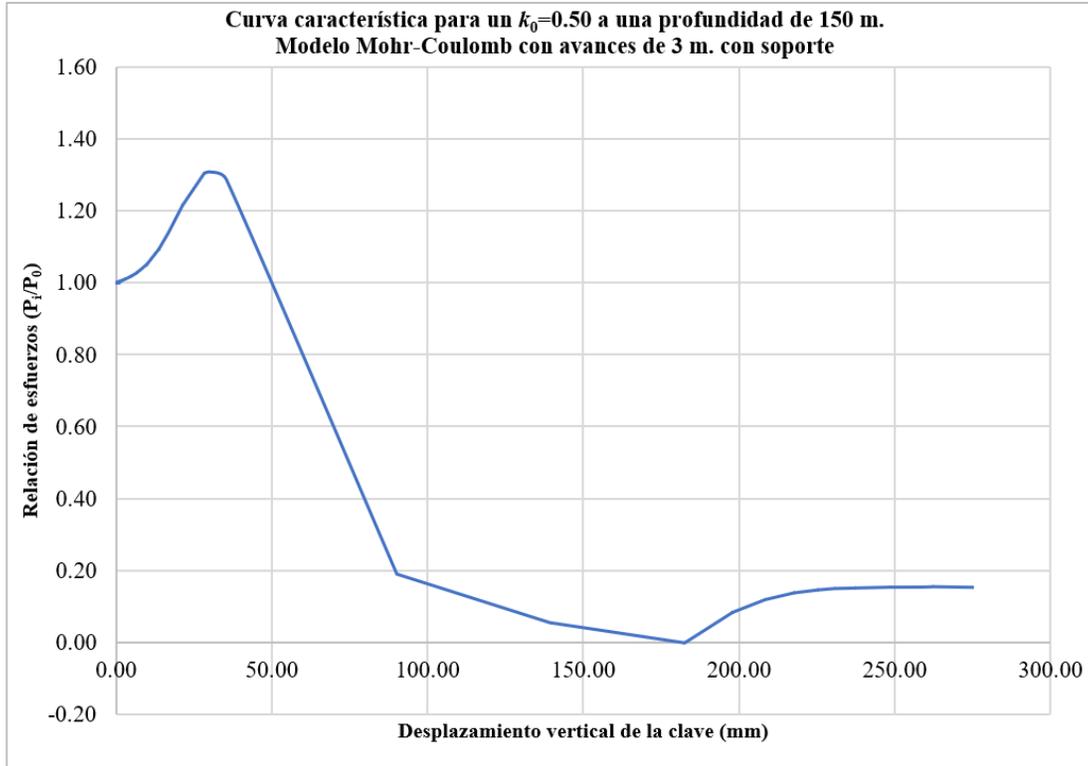
A.2.2.1. Caso $k_0=0.50$



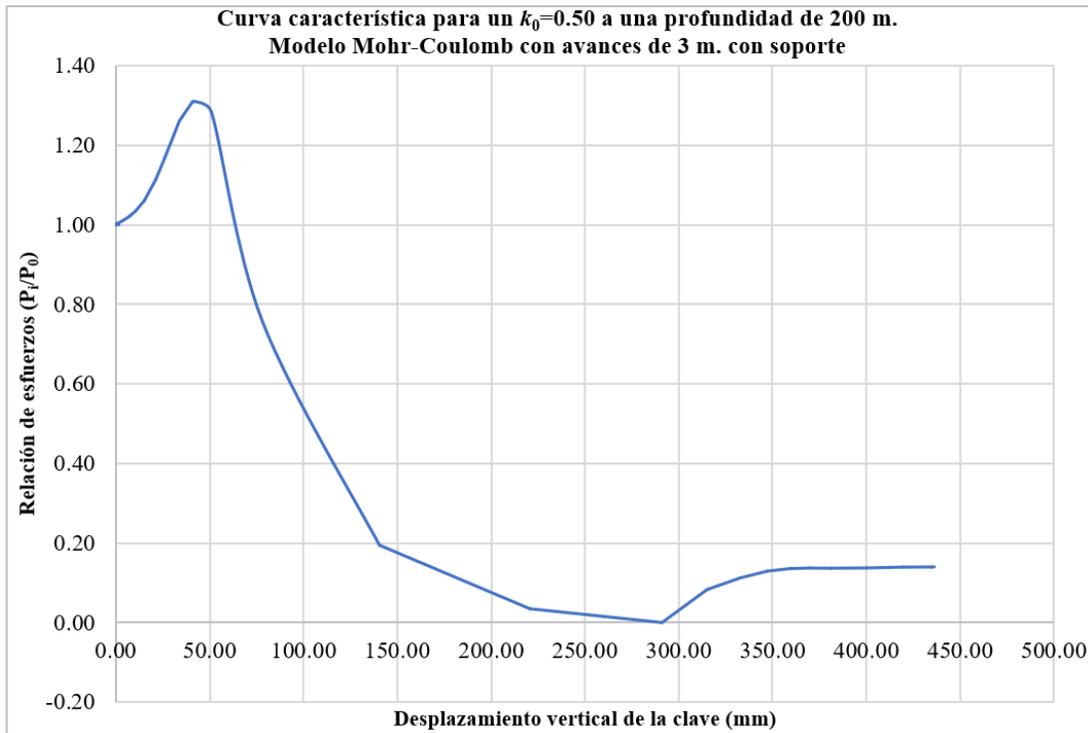
A. 51. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



A. 52. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

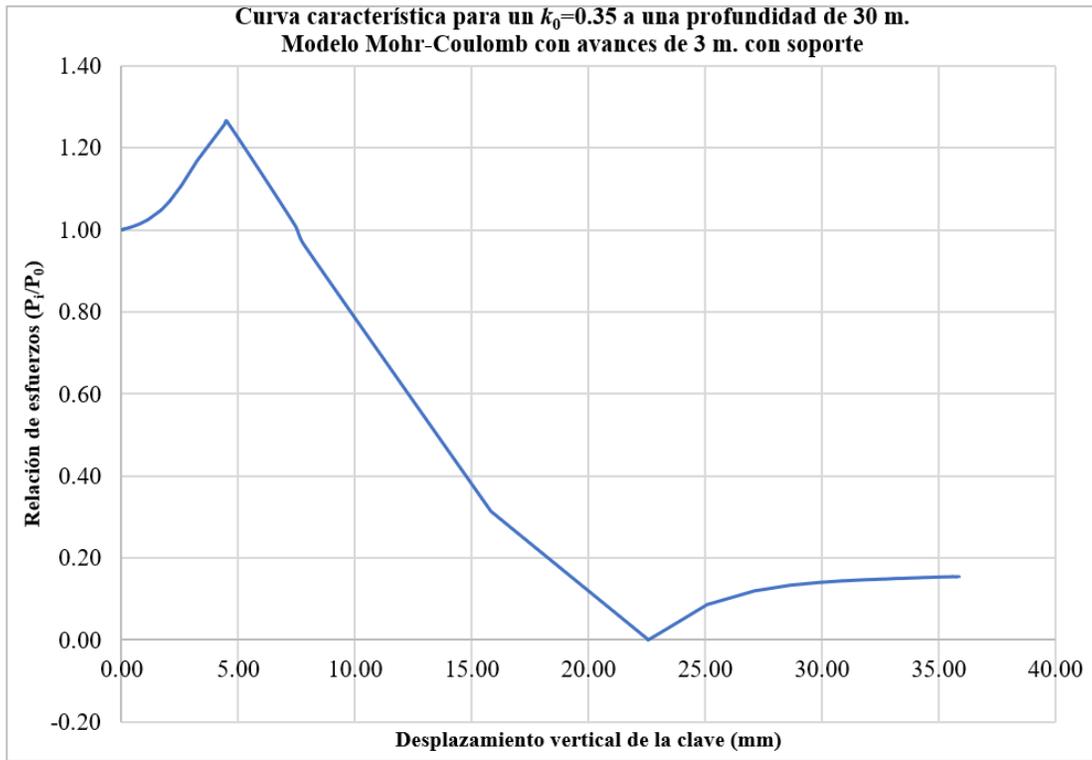


A. 53. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

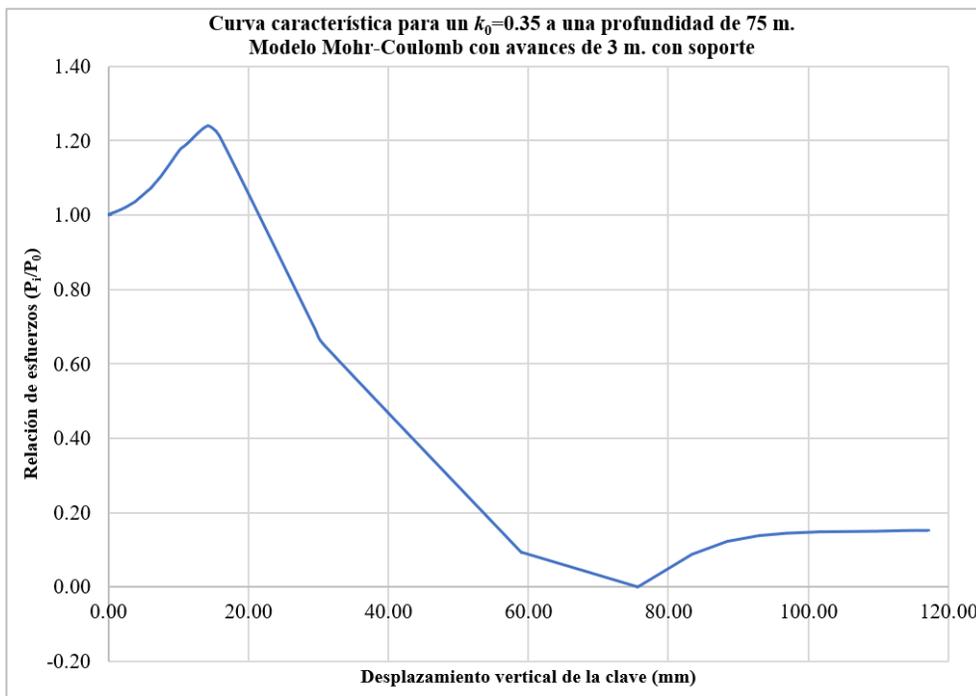


A. 54. Curva característica para un $k_0=0.50$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

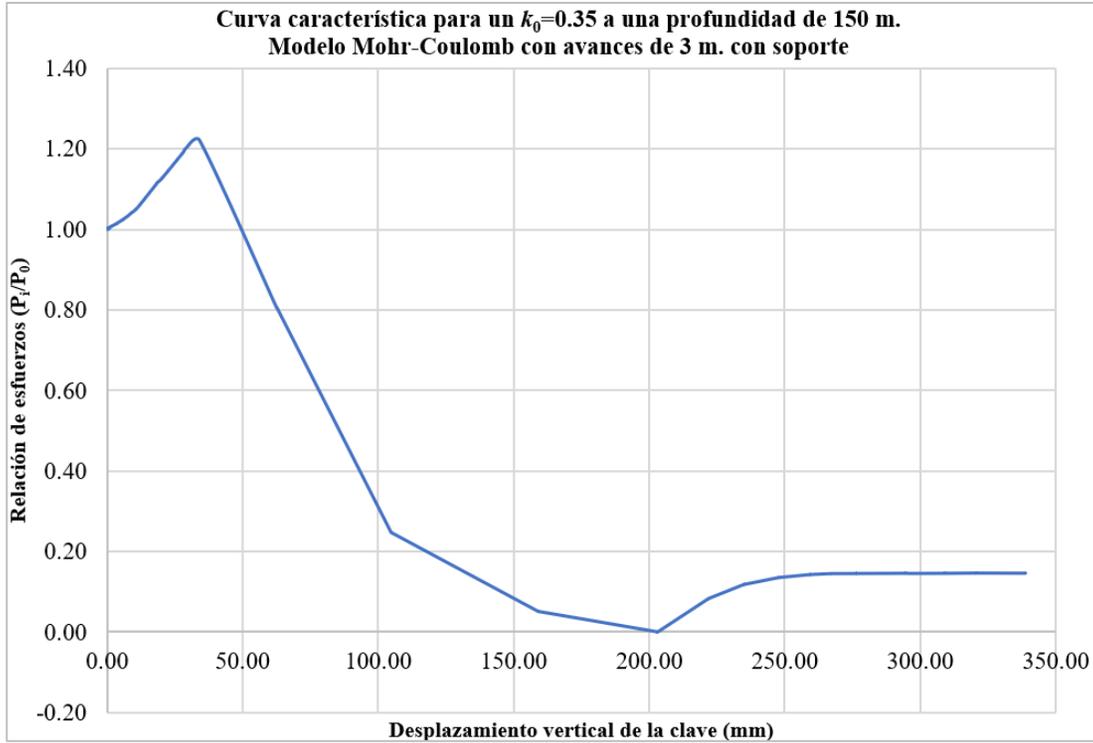
A.2.2.2. Caso $k_0=0.35$



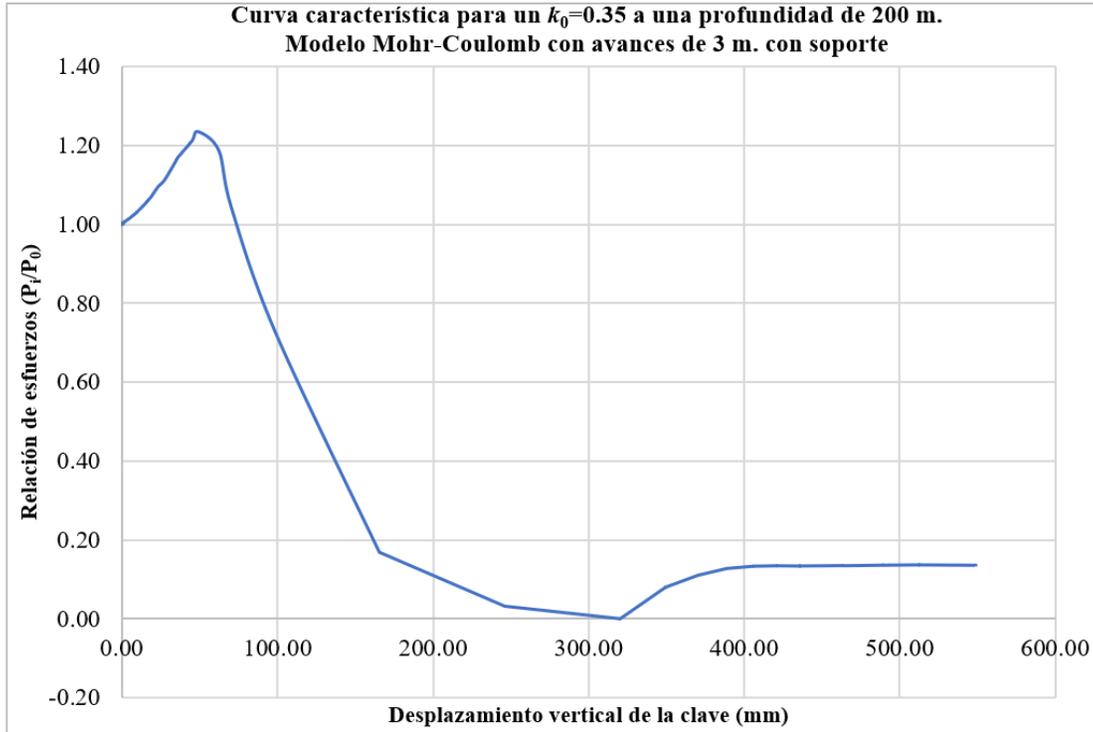
A. 55. Curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad 30 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



A. 56. Curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad 75 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

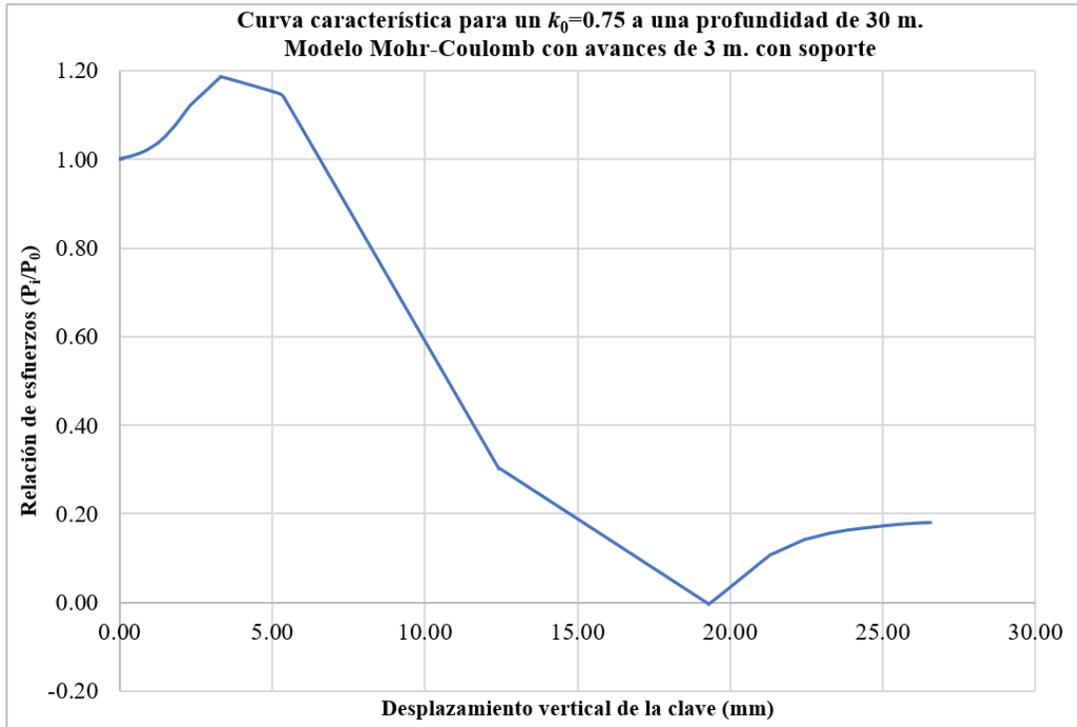


A. 57. Curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

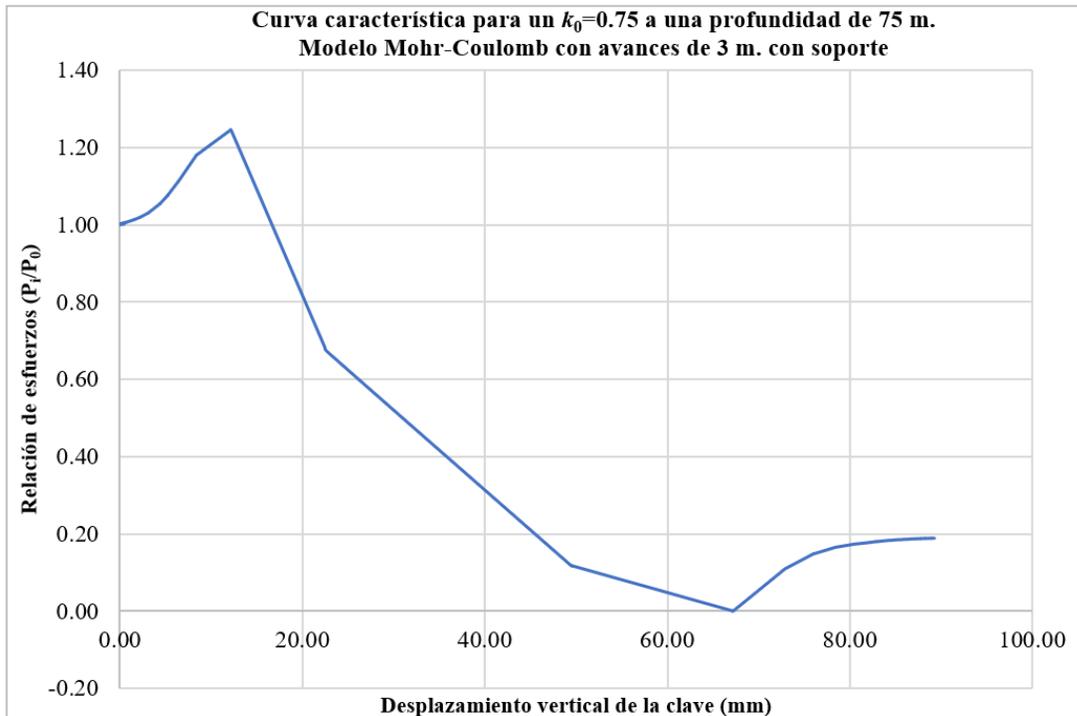


A. 58. Curva característica para un $k_0=0.35$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

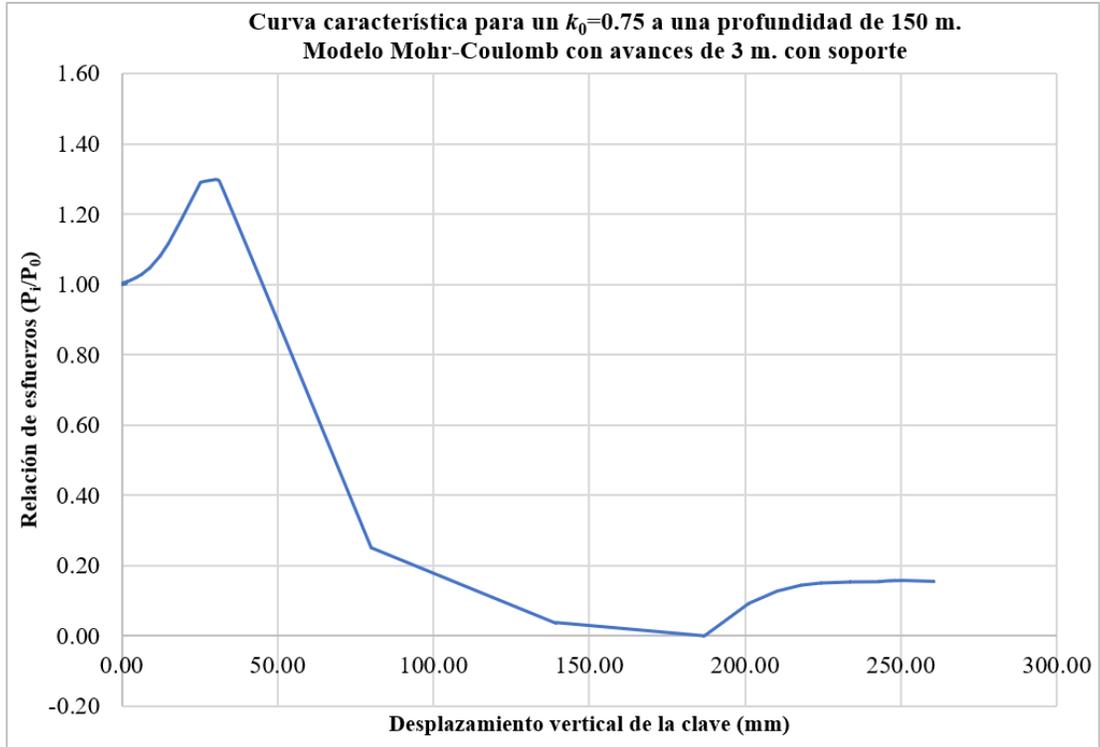
A.2.2.3. Caso $k_0=0.75$



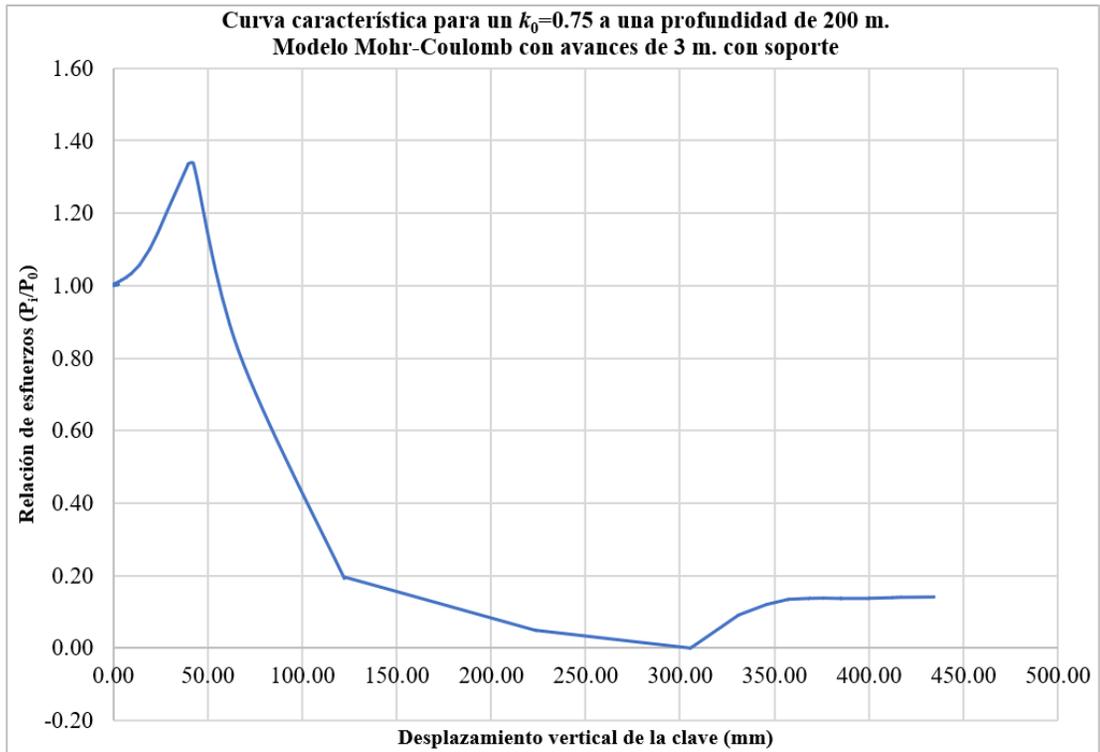
A. 59. Curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad 30 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



A. 60. Curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad 75 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

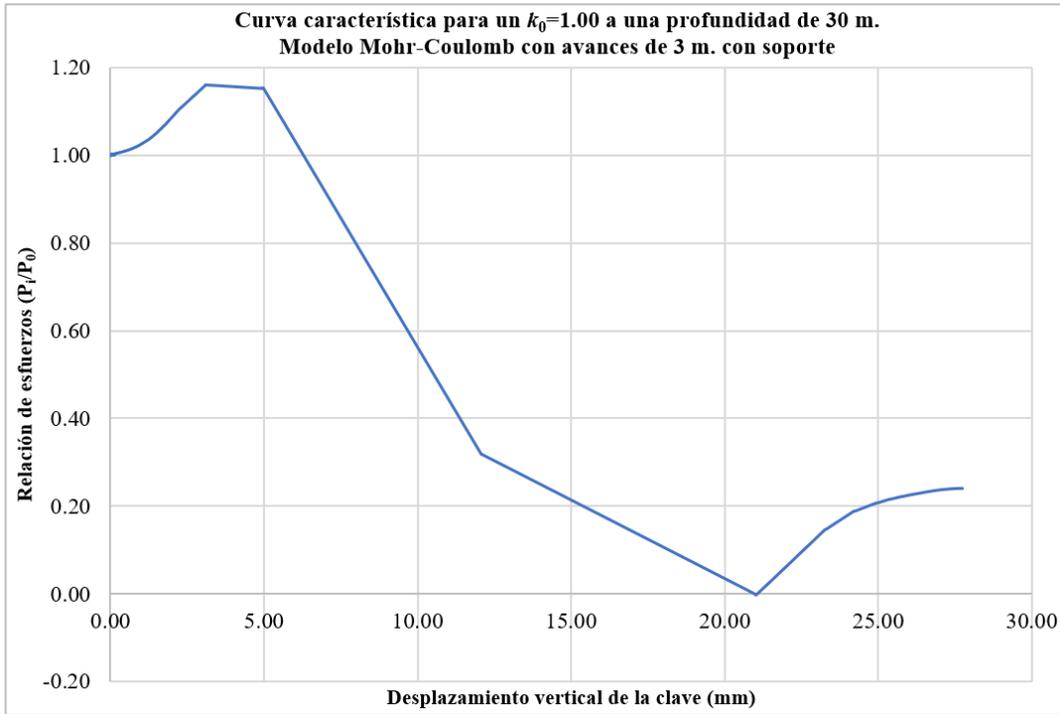


A. 61. Curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad 150 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



A. 62. Curva característica para un $k_0=0.75$ a una profundidad 200 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

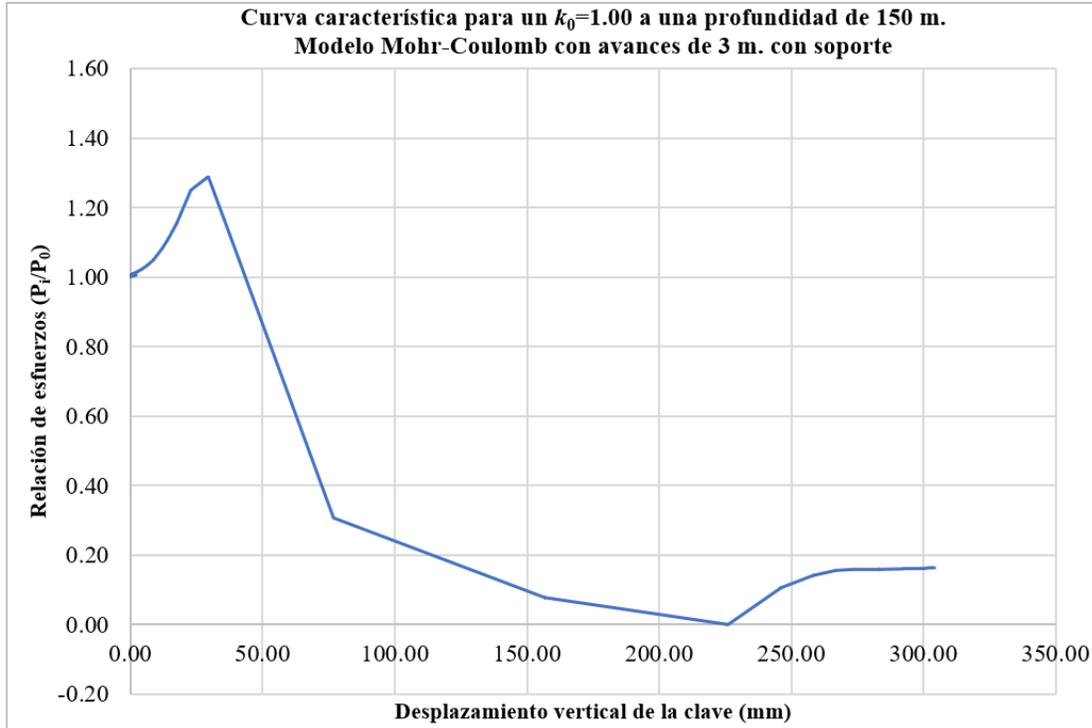
A.2.2.4. Caso $k_0=1.00$



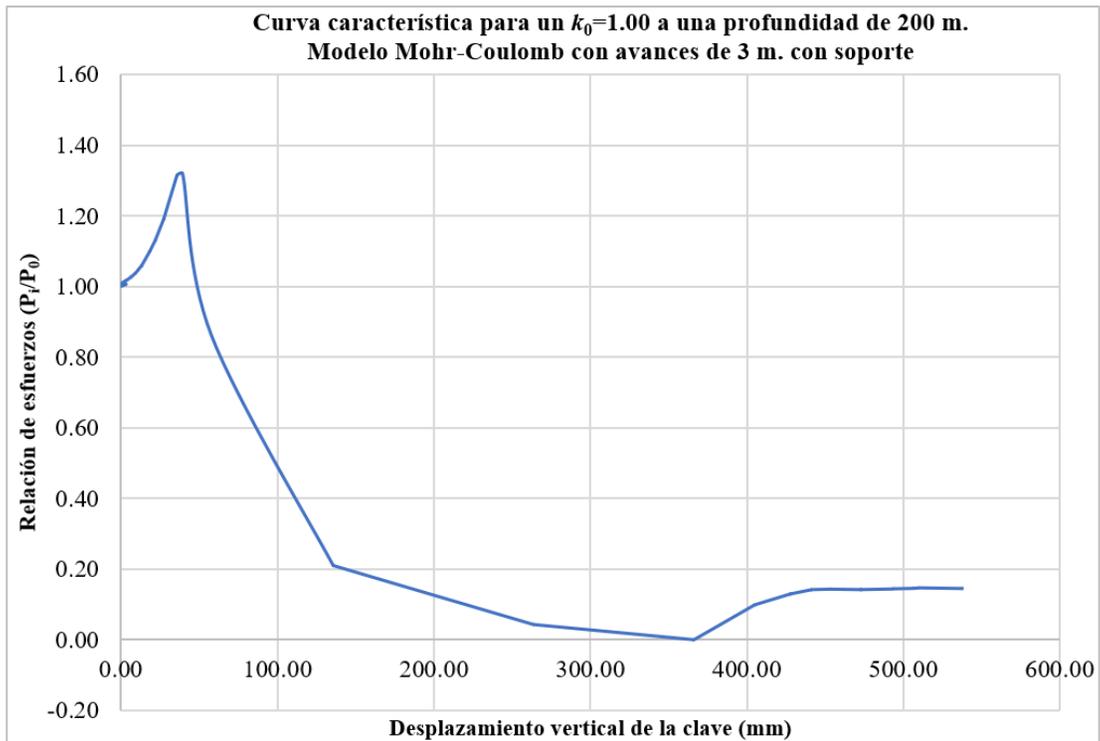
A. 63. Curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 30 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



A. 64. Curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 75 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

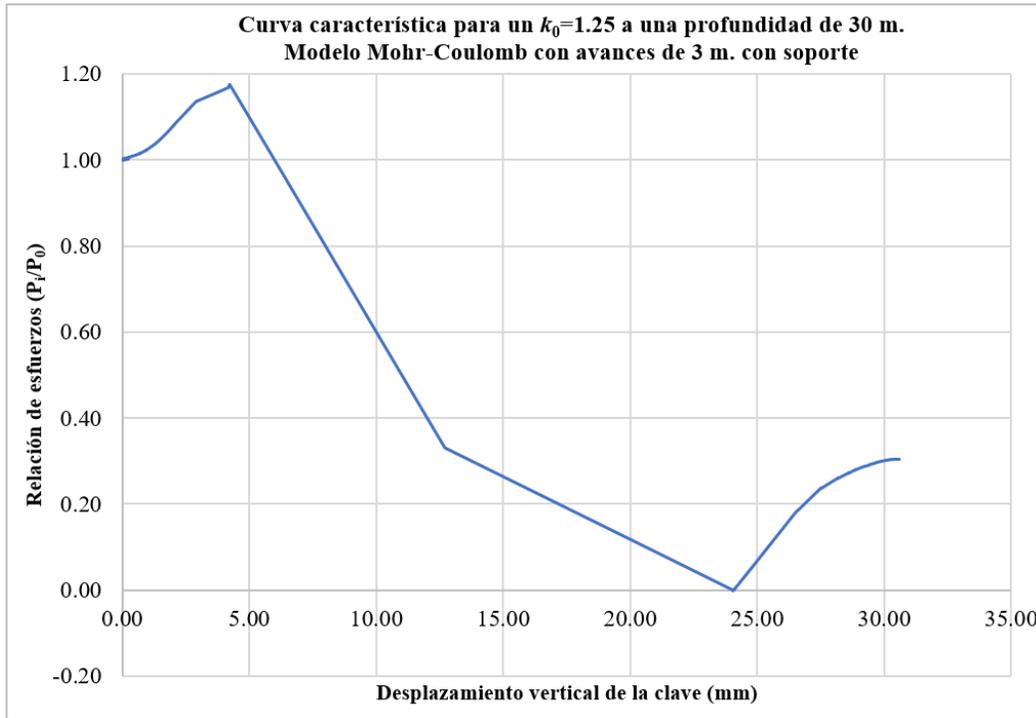


A. 65. Curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 150 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

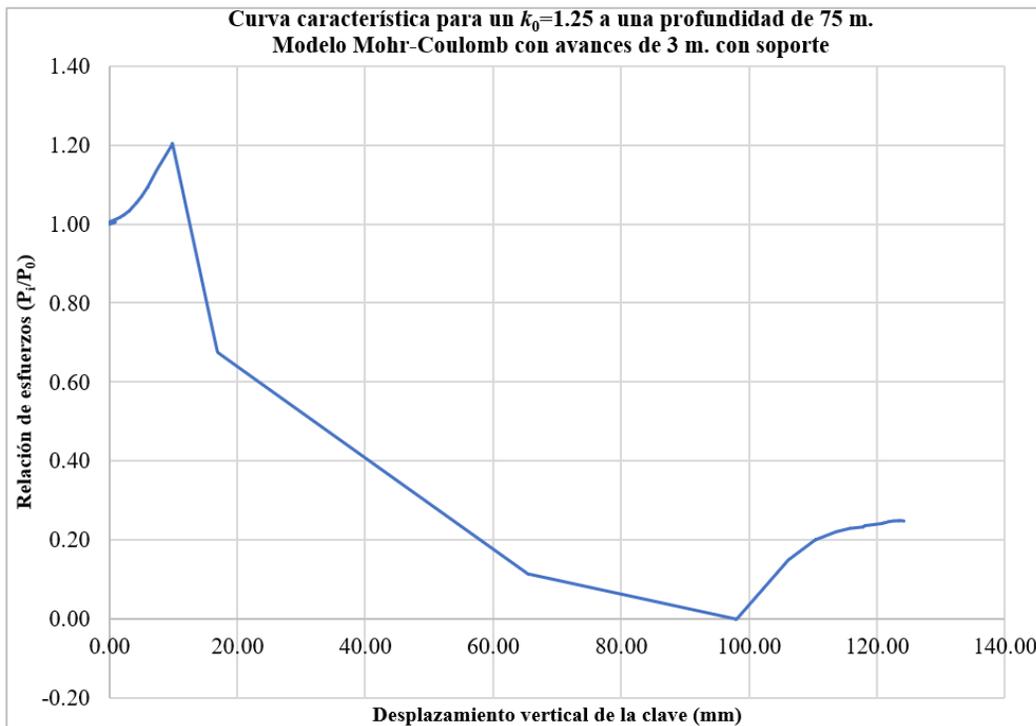


A. 66. Curva característica para un $k_0=1.00$ a una profundidad de 200 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.

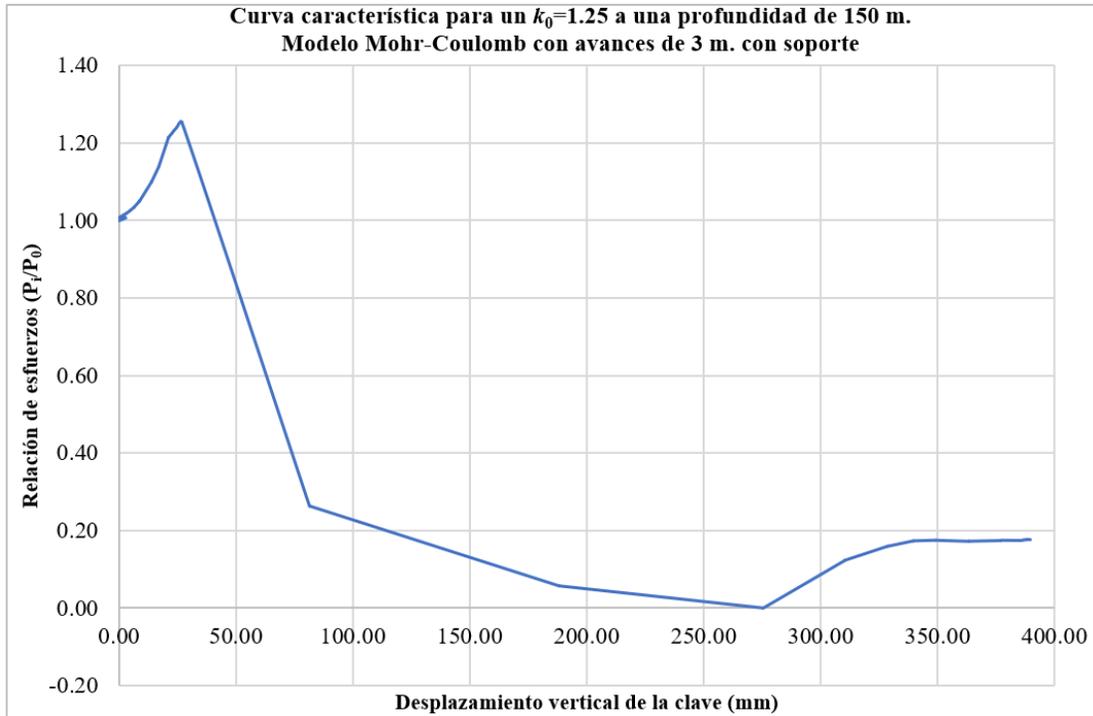
A.1.2.5. Caso $k_0=1.25$



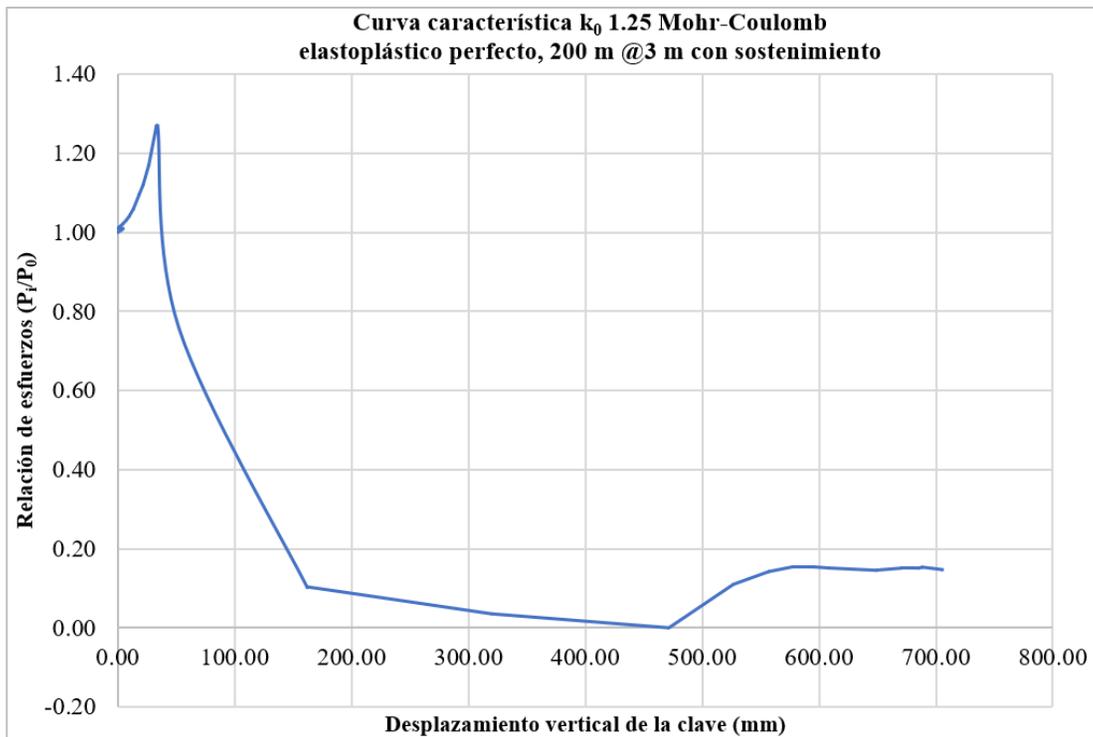
A. 67. Curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad 30 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



A. 68. Curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad 75 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



A. 69. Curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad 150 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.



A. 70. Curva característica para un $k_0=1.25$ a una profundidad 200 m. Modelo Mohr-Coulomb con avances de 3 m. con soporte.