



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

Nayel María Rubiano Moreno

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2022

Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

Nayel María Rubiano Moreno

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Geotecnia

Director

PhD Edgard Robert Barbosa Cruz

Línea de Investigación:

Modelación y análisis en geotecnia

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2022


Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Nayel Rubiano Moreno

26/08/2022

Agradecimientos

Agradecimientos especiales al docente Edgard Robert Barbosa Cruz, quien fue mi tutor durante la elaboración del presente documento, resaltando su dedicación y disponibilidad de tiempo para la atención de las dudas y las reuniones de socialización de los avances. De igual modo agradezco las sugerencias y aportes realizados por el docente, los cuales tenían como objetivo elaborar un documento completo a nivel técnico, así como claro y correcto en su presentación.

Resumen

Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

La construcción de una perforación horizontal dirigida (PHD) tiene tres (3) etapas principales: la elaboración del túnel piloto, el ensanchamiento de la perforación al diámetro requerido y la instalación de la tubería. Las actividades mencionadas generan en el suelo esfuerzos y deformaciones en los cuales influye el efecto de arco, la profundidad de la cobertura del suelo sobre la PHD y la presión de los lodos de perforación.

En el trabajo desarrollado para el análisis de la construcción de una PHD se emplea el programa de computador Plaxis 3D, el cual cuenta con un módulo para la evaluación de túneles, lo que facilita la idealización y la modelación de las PHD. Mediante este módulo el usuario de Plaxis puede analizar una secuencia de pasos de construcción que se repite a lo largo de la perforación en un número de secciones seleccionadas. Por medio de estos pasos se puede analizar la excavación y la estabilización de una PHD, mediante la eliminación secuencial de volúmenes de suelo y la aplicación de una presión estabilizante sobre las paredes de la excavación, las cuales representan el avance de la PHD y el empleo de los lodos de perforación respectivamente.

Las evaluaciones realizadas se basan en nueve (9) modelos de análisis mediante elementos finitos en tres dimensiones (3D), los cuales combinan tres (3) arenas de diferente resistencia al corte (compacidad) y tres (3) magnitudes diferentes de la presión de lodos aplicada sobre las paredes de la PHD. Además, se evaluaron dos (2) variables geométricas: el diámetro, incluyendo el túnel piloto y (2) diámetros de ensanchamiento, y la profundidad de la PHD variable, empleando el eje de la perforación inclinado 8° con respecto a la horizontal. La influencia de estas variables y su relación con el efecto de arco

es evaluada mediante el análisis de los desplazamientos verticales y horizontales, y de los esfuerzos verticales totales en la clave, la batea y la pared de la perforación.

Palabras clave: Perforación horizontal dirigida (PHD), efecto de arco, lodos de perforación, modelación mediante elementos finitos tridimensionales, Plaxis 3D.

Abstract

Numerical simulation of the arching effect and drilling fluid pressure in a horizontal directional drilling

The construction of a horizontal directional drilling (HDD) has three (3) main stages: the excavation of the pilot tunnel, the expansion of the drilling hole to the required diameter and the installation of the pipe. The mentioned activities generate stresses and deformations in the soil which are influenced by the arching effect, the depth of the soil cover above the HDD and the pressure of the drilling fluid (mud).

In the present study, the Plaxis 3D computer program is used for the analysis of the construction of a HDD. Plaxis has a module for the evaluation of tunnels, which facilitates the idealization and modelling of the HDD. Using this module, the Plaxis user can analyse a sequence of construction steps that is repeated throughout the borehole in several selected sections. Through those steps of analysis, the excavation and stabilization of a HDD can be examined by means of the sequential removal of volumes of soil and the application of a stabilizing pressure on the walls of the excavation, which represent the advance of the HDD and the use of drilling mud respectively.

The evaluations carried out here are based on nine (9) three-dimensional (3D) finite element analysis models, which combine three (3) sands of different shear strength (density) and three (3) different magnitudes of mud pressure applied on the walls of the PHD. In addition, two (2) geometric variables were evaluated: including the pilot tunnel diameter and (2) underreaming diameters, and a variable PHD depth, using the borehole axis tilted 8° below the horizontal. The influence of those variables and their relationship with the arching effect is evaluated by analysing the vertical and horizontal displacements, and the total vertical stresses in the crown, the invert and the springline (wall) of the drilling hole.

Keywords: Horizontal directional drilling (HDD), arching effect, drilling fluid, three-dimensional Finite Element Method, Plaxis 3D.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XVII
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XVIII
Introducción	1
1. Efecto de arco	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Definición del efecto de arco	4
1.3 Tipos de efecto de arco	5
1.4 Teorías clásicas sobre el efecto de arco	7
1.4.1 Marston (1913)	8
1.4.2 Terzaghi (1943)	9
1.5 Aproximaciones analíticas.....	11
1.5.1 Aproximaciones continuas basadas en la teoría elástica	11
1.5.2 Aproximaciones basadas en la teoría la plástica.....	12
1.6 Métodos empíricos de análisis del efecto de arco	15
1.7 Métodos numéricos.....	15
2. Perforación Horizontal Dirigida (PHD)	18
2.1 Proceso constructivo	19
2.1.1 Perforación piloto.....	19
2.1.2 Ensanchamiento de la perforación.....	20
2.1.3 Instalación de tubería	22
2.2 Normas de diseño y programas de computador para el diseño de una perforación horizontal dirigida	23
2.2.1 Normas de diseño.....	23
2.2.2 Programas de computador	23
2.3 Fuerzas de halado.....	25
2.3.1 Fuerza resistente debido a la fricción entre la tubería y la superficie del terreno 25	
2.3.2 Fuerza resistente debido a la fricción entre la tubería y las paredes de la perforación	26
2.3.3 Fuerza resistente debido a la presencia de curvas en el trazado de la PHD..	27
2.3.4 Fuerza resistente debido a la fuerza de arrastre de los lodos de perforación.	28
2.4 Presión de lodos de perforación	28
3. Modelos constitutivos del suelo	32
3.1 Elasticidad isotrópica.....	32
3.2 Elasticidad lineal combinada con plasticidad perfecta	33
4. Modelación numérica en Plaxis 3D	37
4.1 Introducción.....	37

4.2	Caso de estudio de referencia	38
4.2.1	Introducción.....	38
4.2.2	Problema de estudio	38
4.2.3	Perfil estratigráfico.....	39
4.2.4	Modelación numérica	40
4.3	Geometría del problema de análisis.....	44
4.4	Generación de los materiales geotécnicos en Plaxis	46
4.5	Propiedades geotécnicas seleccionadas	46
4.6	Selección de cargas para los análisis numéricos	47
4.7	Módulo de diseño de túneles del programa Plaxis	49
4.7.1	Sección transversal	49
4.7.2	Cargas del modelo de análisis del programa Plaxis	49
4.7.3	Trayectoria de la perforación horizontal dirigida (PHD).....	51
4.7.4	Mallado	51
4.8	Etapas de construcción.....	56
4.9	Escenarios de análisis	58
4.10	Secciones de análisis	59
4.11	Puntos para la extracción de resultados	60
4.12	Coordenadas de los puntos para la extracción de resultados	62
4.13	Evaluación de los esfuerzos iniciales	63
5.	Análisis de resultados	67
5.1	Desplazamientos verticales	78
5.2	Desplazamientos horizontales	80
5.3	Esfuerzos verticales totales	82
5.3.1	Esfuerzos en la clave de la perforación horizontal dirigida (PHD).....	84
5.3.2	Esfuerzos en la batea de la perforación horizontal dirigida (PHD)	85
5.3.3	Esfuerzos en la pared de la perforación horizontal dirigida (PHD)	86
5.3.4	Análisis de los resultados obtenidos de los esfuerzos en la clave, la batea y las paredes de la perforación horizontal dirigida (PHD).....	87
5.4	Evaluación del efecto de arco en una perforación horizontal dirigida (PHD)	88
6.	Conclusiones	95
6.1	Preliminares	95
6.2	Desarrollo del efecto de arco en el suelo	95
6.3	Efecto de arco en el suelo y la presión de lodos.....	96
6.4	Efecto de arco en el suelo y la resistencia al corte	96
6.5	Efecto de arco en el suelo y la geometría de la PHD	97
6.6	Consecuencias del efecto de arco en el suelo producido en la construcción de una PHD	97
6.7	Limitaciones del trabajo presente	98
6.8	Recomendaciones para trabajos futuros	99
7.	Anexos.....	101
8.	Bibliografía	102

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Esquema de resistencia friccional y medición de imágenes digitales “DIM” para interpretación del ensayo de la “puerta trampa” (“Trapdoor”) (modificado de Pardo et al., 2014).	4
Figura 1-2: Desplazamientos verticales tras la aplicación de un esfuerzo P_s sobre un elemento que tiene a) menor rigidez y b) mayor rigidez que el suelo alrededor (modificado de Tien, 1996).	6
Figura 1-3: Distribución de deformaciones típicas y esfuerzos de una estructura rectangular enterrada flexible (modificado de Tien, 1996).	6
Figura 1-4: Esquema de (a) efecto de arco positivo, (b) efecto de arco negativo (modificado de Han et al., 2017).	7
Figura 1-5: Escenarios de tuberías enterradas analizadas por Marston (1913): (a) Zanja angosta; (b) Zanja ancha y proyección positiva; (c) proyección negativa (modificado de Tien, 1990).	8
Figura 1-6: Efecto de arco en tuberías enterradas: (a) efecto de arco favorable; (b) efecto de arco desfavorable (modificado de Tien, 1990).	9
Figura 1-7: Condiciones de frontera para una masa de suelo cuya base se desplaza verticalmente (modificado de Tien, 1990).	11
Figura 1-8: Esquema de la ley de potencia plástico (Modificado de Tien, 1996).	13
Figura 1-9: Dimensiones sugeridas por principio de Saint Venant para modelación de una perforación (modificado de Xu et al., 2018).	17
Figura 2-1: Esquema de perforación piloto en una perforación horizontal dirigida (PHD) (modificado de Deltares, 2009).	20
Figura 2-2: Esquema del ensanchamiento de una perforación horizontal dirigida (PHD) (modificado de Deltares, 2009).	21
Figura 2-3: Esquema de ensanchamiento de una perforación horizontal dirigida (PHD) (modificado de Deltares, 2009).	22
Figura 2-4: Fuerza resistente entre la tubería y la superficie del suelo (modificado de Yan, 2018).	26
Figura 2-5: Fuerza resistente entre la tubería y las paredes del suelo de la perforación (modificado de Yan, 2018).	27
Figura 2-6: Incremento en la fuerza de contacto debido al efecto de curvatura de la tubería sobre el suelo (modificado de Yan, 2018).	27

Figura 2-7: Incremento en la fuerza normal sobre la tubería debido al paso de la PHD por un tramo curvo (modificado de Yan, 2018).....	28
Figura 2-8: Distancias r y R en la redistribución de los esfuerzos.....	31
Figura 3-1. Respuesta elástica y plástica de un material. (a) Elástico lineal, (b) Elástico perfectamente plástico, (c) Inelástico plástico.	32
Figura 3-2. Idealización del modelo elástico perfectamente plástico	34
Figura 3-3. Superficie de cedencia con Mohr-Coulomb en el espacio de esfuerzos principales, extraído del Manual Plaxis 3D, 2020.	35
Figura 3-4. Parámetros de resistencia modelo Mohr Coulomb, adaptado del Manual Plaxis 3D, 2020.....	36
Figura 4-1. Geometría de la PHD del caso de estudio para verificación del uso de Plaxis 3D– sin escala (modificado de Shu y Ma, 2015).	38
Figura 4-2. Fotografía de hundimientos en superficie y revestimiento instalado cerca de superficie (modificado de Shu y Ma, 2015).	39
Figura 4-3. Localización de hundimientos en superficie con respecto al revestimiento – sin escala (modificado de Shu y Ma, 2015).....	39
Figura 4-4. Modelo de FLAC3D y geometría de modelo de la PHD del caso de estudio (modificado de Shu y Ma, 2015).	40
Figura 4-5. Diámetros utilizados para modelación de la secuencia de escarificación de la PHD (Shu y Ma, 2015).....	42
Figura 4-6. Comparación de los estados de falla para procesos constructivos supuestos (a) Perforación simple y (b) perforación secuencial (Shu y Ma, 2015).....	43
Figura 4-7. Alzado izquierdo y derecho de la geometría del dominio de análisis del problema de estudio.....	45
Figura 4-8. Perfil e isométrico de la geometría del problema.....	45
Figura 4-9. Ejemplo de creación de perfil estratigráfico y material geotécnico.....	46
Figura 4-10. Configuración de la sección transversal de la PHD	49
Figura 4-11. Cargas de superficie tipo “slice” y “plane” aplicadas sobre la PHD.....	50
Figura 4-12. Ejemplo de carga perpendicular con incremento vertical aplicado sobre la PHD (elaborado con base en datos extraídos del modelo en Plaxis 3D).....	50
Figura 4-13. Definición de la trayectoria y de los segmentos de avance de la PHD	51
Figura 4-14. Esquema de elemento tetraédrico de 10 nodos definido en Plaxis 3D	52
Figura 4-15. Tipos de mallados evaluados en Plaxis 3D según la densidad de la malla. (Extraído del modelo del programa Plaxis 3D).	52
Figura 4-16. Mallado con distribución de elemento tipo fino y diferente refinado del mallado - sección longitudinal (Extraído de modelo en Plaxis 3D).....	53
Figura 4-17. Mallado con distribución de elemento tipo fino y diferente refinado - sección transversal (extraído de modelo en Plaxis 3D).	54
Figura 4-18. Ejemplo de un estado de esfuerzos verticales imposible obtenido con base en un mallado fino tipo A sin refinamiento en la zona adyacente a la PHD, sin escala (extraído de modelo en Plaxis 3D).	55

Figura 4-19. Ejemplo de estado de esfuerzos esperados obtenido con base en un mallado fino tipo B con refinamiento en la zona adyacente a la PHD, sin escala (extraído de modelo en Plaxis 3D).	55
Figura 4-20. Chequeo de la calidad de la malla, a) SICN = 0.45 y b) SICN =1, sin escala (extraído de modelo en Plaxis 3D).....	56
Figura 4-21. Secuencia de etapas de la evaluación del proceso de construcción de una PHD.	57
Figura 4-22. Etapas de construcción de una PHD evaluadas mediante el programa Plaxis 3D, vista isométrica. (Extraído del modelo analizado con Plaxis 3D).....	58
Figura 4-23. Vista isométrica del dominio de suelo analizado con la PHD en la cual se indica la localización de las seis (6) secciones de análisis. (Extraído del modelo en Plaxis 3D).....	59
Figura 4-24. Esquema de la localización de los puntos para la extracción de los resultados en la clave, la batea y la pared de la PHD para los tres (3) diámetros y las 6 (seis) secciones de análisis.....	60
Figura 4-25. Ejemplo de esfuerzos verticales totales calculados en Plaxis 3D	64
Figura 5-1. Desplazamientos totales calculados para el modelo de análisis 1.2 a profundidades diferentes. Escenario 1 – Arena media (elaborado con base en los resultados en Plaxis 3D).....	68
Figura 5-2. Deformaciones totales calculados para el modelo de análisis 3.1 a profundidades diferentes. Escenario 3 – Arena suelta (elaborado con base en los resultados en Plaxis 3D).....	68
Figura 5-3. Esfuerzos verticales totales calculados para el modelo de análisis 1.2 a profundidades diferentes. Escenario 1 – Arena media (elaborado con base en los resultados en Plaxis 3D).....	69
Figura 5-4. Esfuerzos verticales totales calculados para el modelo de análisis 3.1 a diferentes profundidades. Escenario 3 – Arena suelta (elaborado con base en los resultados en Plaxis 3D).....	69
Figura 5-5. Deformaciones cortantes calculadas para el modelo de análisis 1.2 a profundidades diferentes. Escenario 1 – Arena media (elaborado con base en los resultados en Plaxis 3D).....	70
Figura 5-6. Deformaciones cortantes calculadas para el modelo de análisis 3.1 a profundidades diferentes. Escenario 3 – Arena suelta (elaborado con base en los resultados en Plaxis 3D).....	70
Figura 5-7. Recorte de los resultados de los cálculos del modelo de análisis 1.3. Escenario 1 – Arena densa, diámetro D3 = 1.42 m y profundidad z = 11 m, sin escala (extraído de modelo en Plaxis3D).....	71
Figura 5-8. Recoret de los resultados de los cálculos del modelo de análisis 3.1. Escenario 3 – Arena suelta, diámetro D3 = 1.42 m y profundidad z = 11 m, sin escala (extraído de modelo en Plaxis 3D).....	72
Figura 5-9. Ejemplo de la extracción de los desplazamientos verticales en la herramienta Curves Manager (extraído de modelo en Plaxis 3D).....	78

Figura 5-10. Desplazamientos verticales calculados en la clave y la batea de la perforación horizontal dirigida (PHD) de las seis secciones de análisis para los tres diámetros y tres compacidades de suelo.	79
Figura 5-11. Desplazamientos horizontales en la pared de la perforación horizontal dirigida (PHD) para diferentes diámetros y profundidades de la perforación analizadas.	81
Figura 5-12. Ejemplo de la variación de las magnitudes de los esfuerzos verticales totales en los puntos de interpolación “stress point” en un mismo elemento.	83
Figura 5-13. Ejemplo de la variación de los esfuerzos verticales totales en un mismo elemento.	83
Figura 5-14. Esfuerzo vertical total en la clave de la perforación horizontal dirigida (PHD) para diferentes diámetros y profundidades de la perforación.	84
Figura 5-15. Esfuerzo vertical en la batea de la perforación horizontal dirigida (PHD) para diferentes diámetros y profundidades de la perforación.	85
Figura 5-16. Esfuerzo vertical en la pared de la perforación horizontal dirigida (PHD) para diferentes diámetros y profundidades de perforación.	86
Figura 5-17. Efecto de arco en la clave de la PHD para diferentes diámetros y profundidades de la perforación.	89
Figura 5-18. Efecto de arco en la batea de la perforación horizontal dirigida (PHD) para diferentes diámetros y profundidades de la perforación.	90
Figura 5-19. Efecto de arco en la pared de la perforación horizontal dirigida (PHD) para diferentes diámetros y profundidades de la perforación.	91
Figura 5-20. Desplazamientos totales relacionados con el efecto de arco debido a la construcción de una perforación horizontal dirigida (PHD).	93
Figura 5-21. Ejemplo del efecto de arco debido a la construcción de una perforación horizontal dirigida (PHD), relacionado con el desarrollo de los esfuerzos cortantes.	93
Figura 5-22. Ejemplo del efecto de arco generado debido a la construcción de una perforación horizontal dirigida (PHD), relacionado con la redistribución de los esfuerzos verticales totales.	94

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 4-1. Parámetros de materiales geotécnicos modelados en caso de estudio. Extractado de Shu y Ma (2015).	40
Tabla 4-2. Parámetros geotécnicos modelados en el caso de estudio. Elaborado con base en Shu y Ma (2015).	43
Tabla 4-3. Propiedades geotécnicas de materiales.	47
Tabla 4-4. Presiones de lodos calculadas para soporte de la perforación horizontal dirigida (PHD) de los tres escenarios de densidad de los lodos.	48
Tabla 4-5. Desplazamiento máximo según tipo de mallado y número de elementos finitos.	52
Tabla 4-6. Rótulos ID de los análisis realizados de una perforación horizontal dirigida (PHD).	59
Tabla 4-7. Profundidad (eje z) de los puntos para la extracción de los resultados en los tres (3) diámetros y las 6 (seis) secciones de análisis (eje y).	61
Tabla 4-8. Coordenadas de los puntos para la extracción de los resultados localizados en la clave, la batea y la pared de la PHD.	62
Tabla 4-9. Rótulos (ID) de los nodos y los puntos de Gauss de la PHD seleccionados para el análisis de los resultados.	63
Tabla 4-10. Esfuerzos iniciales en la batea y clave de la PHD analizada según tipo de material y profundidad de cada sección de análisis.	65
Tabla 4-11. Esfuerzos iniciales en la pared de la PHD según tipo de material y profundidad de cada sección de análisis.	66
Tabla 5-1. Ejemplos de los mecanismos de deformación y puntos de plastificación de una perforación horizontal dirigida (PHD).	73

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
B	Ancho	m
D	Diámetro de la PHD	m
c	Cohesión aparente	kPa
E_i	Escenario de análisis	
E	Módulo de Young	kN/m ²
E_{oed}	Módulo confinado odométrico	kN/m ²
F	Superficie de cedencia	
G	Módulo de corte	kPa
G	Función de potencial plástico	
g	Aceleración de la gravedad	m/s ²
h	Profundidad al eje de la PHD	m
K	Módulo Bulk	kPa
k_o	Coefficiente de presión de tierras pasivo	
M_i	Material geotécnico de análisis	
P_{lodos}	Presión de lodos de perforación	
R	Radio de la PHD	m
S_i	Sección de análisis	
T_g	Fuerza de halado debida a fricción con la superficie	kN
T_b	Fuerza de halado debida a fricción con la perforación	kN
x	Eje transversal a la PHD	
y	Eje longitudinal a la PHD	
z	Eje vertical (profundidad)	m

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
ε	Deformación	
Δ	Gradiente	
φ	Ángulo de fricción	°
σ_h	Esfuerzo horizontal	kPa
σ_t	Resistencia a la tensión del suelo	kPa

Símbolo	Término	Unidad SI
σ_v	Esfuerzo vertical	kPa
ψ	Ángulo de dilatación	°
ρ	Densidad	Kg/m ³
ν	Relación de Poisson	
γ	Peso unitario	kN/m ³

Abreviaturas

Abreviatura Término

ASCE	American Society of Civil Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
CATT	Center for Advancement of Trenchless Technologies
DEM	Método de los elementos discretos
DIM	Digital Image Measurement
FDM	Método de las diferencias finitas
FEM	Método de los elementos finitos
PPI	Plastics Pipe Institute
NASTT	North American Society for Trenchless Technology
PHD	Perforación Horizontal Dirigida
PRCI	Pipeline Research Council International

Introducción

La perforación horizontal dirigida (PHD) es un método de instalación de tuberías cuyo empleo se ha incrementado en las últimas décadas, debido al desarrollo constante de la tecnología de equipos y procedimientos que permiten la instalación de tuberías de dimensiones grandes, en cuanto a diámetro, longitud y profundidad. La instalación mediante PHD de tuberías de servicios bajo vías y en los cruces de ríos es cada vez más común (Norizam et al., 2017). Así mismo el sector de hidrocarburos se vale de esta técnica para la instalación de líneas de transporte de sus productos bajo drenajes naturales y zonas de exclusión ambiental. En el último caso las tuberías tienen incluso hasta kilómetros de longitud y se pueden instalar a profundidades grandes, permitiendo así eludir el paso por materiales inestables, topografías abruptas, zonas de protección ambiental y áreas con problemas de orden público (More, 2012).

Ya que el procedimiento de instalación de una tubería mediante PHD es similar a la construcción de un túnel, resulta importante conocer el estado de los esfuerzos durante y después de su instalación. Debido a que los esfuerzos efectivos del suelo se incrementan con la profundidad, entre más profundo se emplace la tubería, los esfuerzos sobre esta son mayores, lo que implica utilizar una tubería de mayor espesor de pared para garantizar su integridad. Por otra parte, debido a que las tuberías pueden tener más de (1) un kilómetro de longitud, los costos de su construcción son dependientes del espesor de pared de tubería seleccionado (Goldenberg, 2013). Por lo tanto, las reducciones de los esfuerzos actuantes sobre la tubería como consecuencia del efecto de arco y el proceso constructivo, son aspectos que no deben ser ignorados en la selección y el diseño de una PHD.

Debido a que en ocasiones el diseño geométrico de una PHD se efectúa teniendo en cuenta en forma básica aspectos de Ingeniería Mecánica, el efecto de arco del suelo que

actúa sobre las PHD se suele omitir, obteniéndose espesores grandes de pared de la tubería, los cuales pueden no ser necesarios e implican un sobrediseño que se traduce en sobrecostos. Desde el punto de vista opuesto, en el caso de que el espesor de pared sea subdimensionado, los costos no son menores, pues la tubería puede sufrir aplastamiento y por ende la necesidad de detener el transporte de productos, lo que acarrea pérdidas económicas sustanciales y en casos peores, puede generar derrames de los productos y con ello consecuencias ambientales. A lo anterior, se agrega el hecho de que las PHD se construyen para una vida útil superior a veinte (20) años, por lo cual, entender los esfuerzos y deformaciones actuantes sobre la tubería a ser instalada en una PHD hace parte fundamental de un buen diseño.

Con el fin de evaluar el desarrollo del efecto de arco, este documento incluye el análisis de nueve (9) modelos mediante elementos finitos en tres dimensiones (3D), resultado de la combinación de tres (3) materiales de diferente resistencia al corte y tres (3) magnitudes de la presión de lodos, las cuales simulan diferentes grados de soporte de las paredes de la PHD, generadas por el uso de los fluidos de perforación. La influencia de estas variables y su relación con el efecto de arco es evaluada mediante el análisis de los desplazamientos verticales y horizontales, y de los esfuerzos verticales.

Dentro de los antecedentes del presente documento se excluyen los temas que no son del alcance directo de la modelación en Plaxis 3D. Por lo anterior, aspectos tales como las alternativas diferentes de tecnologías de excavación sin zanja “Trenchless”, como lo son el hincado de las tuberías, la perforación percusiva o los microtúneles, no son temas desarrollados en el documento. De manera similar y a causa de que no se modela el revestimiento (tubería), las características estructurales y de desempeño de las tuberías de diferentes materiales son un tema que no se aborda en el presente estudio. En los antecedentes, se contemplan las temáticas del efecto de arco, incluyendo una breve descripción de las aproximaciones realizadas por Martson, Terzaghi y Evans, el proceso constructivo de la Perforación Horizontal Dirigida (PHD), los principales modelos constitutivos y la metodología utilizada para la modelación numérica en tres dimensiones.

1.Efecto de arco

1.1 Antecedentes

Desde tiempos antiguos el empleo de elementos en forma de arco con el objetivo de distribuir los esfuerzos es conocido y aplicado para la construcción de estructuras. En el siglo XIX el efecto de arco se empezó a estudiar, dado que se identificó que las paredes de los silos reciben cargas mayores a las predichas por las teorías clásicas de presión lateral de tierras. En los años 50 del siglo pasado estuvo en auge la construcción de autopistas, y con ello, la utilización de estructuras enterradas diversas. Por otra parte, a principios del siglo XX se realizó una investigación extensa de las tuberías enterradas, en donde la teoría más destacada fue desarrollada por Marston, originada como respuesta a las fallas constantes de tuberías enterradas de la época (McKelvey, 1994).

En 1943 Terzaghi analizó una arena ideal en el ensayo denominado la “puerta trampa” (*“Trapdoor”*), consistente en observar los desplazamientos del suelo al interior de una cámara de vidrio, la cual tenía una compuerta que al ser retirada permitía que el suelo se movilizara, lo que generaba la redistribución de los esfuerzos desde las zonas muy deformadas a las zonas estacionarias (muy rígidas), como se ilustra en la Figura 1-1. Otros autores como Handy (1985) y Harrop - Williams (1989) estudiaron de forma matemática el ensayo propuesto por Terzaghi (1943), e implementaron mejoras a la idealización en aspectos como la rugosidad y la distribución de los esfuerzos principales sobre los muros de contención. Recientemente Salgado y Paik (2003) contribuyeron al diseño de los muros de contención rígidos, incluyendo la distribución de las presiones laterales en profundidad y estudiando su relación con el efecto de arco.

Con el desarrollo de las computadoras y el análisis numérico, por medio del método de los elementos finitos, el efecto de arco se estudió como técnica de estabilización de los taludes

4 Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

mediante el uso de pilotes. Una de las principales investigaciones al respecto, corresponde a la desarrollada por Chen y Martin (2002), en la cual recomendaron una separación entre los pilotes empleados en la estabilización de los taludes, correspondiente a tres (3) veces el diámetro.

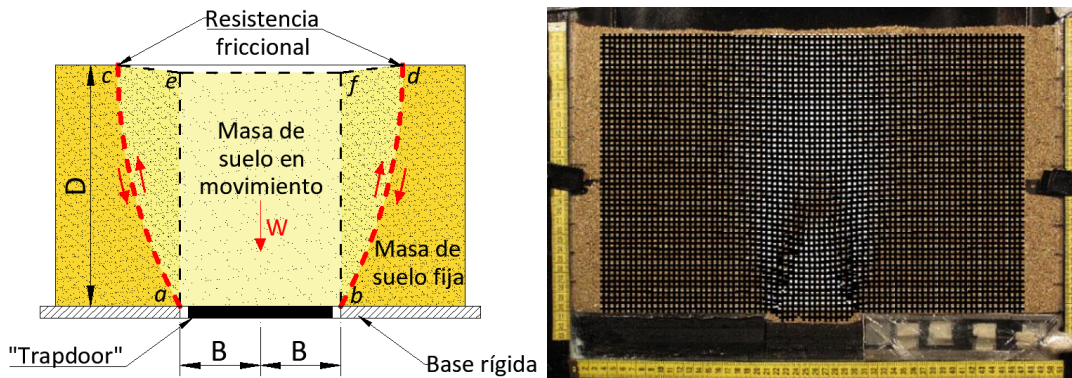


Figura 1-1: Esquema de resistencia friccional y medición de imágenes digitales “DIM” para interpretación del ensayo de la “puerta trampa” (“Trapdoor”) (modificado de Pardo et al., 2014).

1.2 Definición del efecto de arco

El efecto de arco corresponde a la concentración de las deformaciones y la redistribución de los esfuerzos, el cual ha sido medido en varias escalas, desde escala grande “in situ” a escala pequeña en laboratorio. Debido a su importancia como una forma eficiente de transmitir los esfuerzos a los apoyos, es un tema estudiado en forma extensa. En el caso de los suelos, el desplazamiento relativo en la masa de suelo genera una superficie de corte que implica el desarrollo de resistencia friccional, como lo ilustran los planos verticales \overline{ae} y \overline{bf} en la Figura 1-1. De manera simultánea, en las áreas de suelo menos deformadas (más rígidas) se produce la concentración de esfuerzos mientras que en las zonas plastificadas se reducen los esfuerzos.

En el área de geotecnia, el efecto de arco se puede observar en formaciones naturales como los “Karts” o los “sinkhole”, los túneles, los pilotes, las excavaciones y las tuberías enterradas. Para su entendimiento existen métodos empíricos como el expuesto por Terzaghi en 1943 o Balla en 1963, así como aproximaciones analíticas desarrolladas por

Finn (1963), Evans (1984) y Trollope (1963). Por medio del uso de los equipos de cómputo, el efecto de arco también se puede estudiar por medio de la modelación numérica basada en métodos numéricos (método de los elementos finitos FEM, método de los elementos discretos DEM, y método de las diferencias finitas FDM).

1.3 Tipos de efecto de arco

Para que el efecto de arco se genere, es necesario que se produzca la movilización de la resistencia al corte en los planos de falla, y que la tendencia al movimiento sea continua. De manera experimental, en el caso de tuberías enterradas se ha determinado que el efecto de arco se extiende por encima de la tubería hasta una altura de cinco (5) veces el diámetro de la tubería. Por otra parte, debido a los procesos de excavación, el suelo adyacente se deforma hacia la tubería, lo que implica una condición de presión de tierras activa.

En función de la rigidez del suelo, el efecto de arco puede ser pasivo o activo (ver la Figura 1-2). Cuando el elemento enterrado es más flexible que el suelo alrededor, el efecto de arco se denomina activo. En este caso si las deformaciones en un plano \overline{AA} o en el plano \overline{BB} son uniformes, el esfuerzo vertical P_s actuante sobre el elemento disminuye, esto debido al desarrollo de un esfuerzo cortante, como se muestra en la Figura 1-2 (a). En el caso contrario, en el cual el suelo tiene menor rigidez que el elemento enterrado, el suelo será el que experimente los desplazamientos mayores, movilizándolo el esfuerzo cortante, el cual incrementa el esfuerzo vertical P_s sobre la estructura enterrada, y reduce el esfuerzo actuante sobre el material del suelo adyacente, como se ilustra en la Figura 1-2 (b).

6 Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

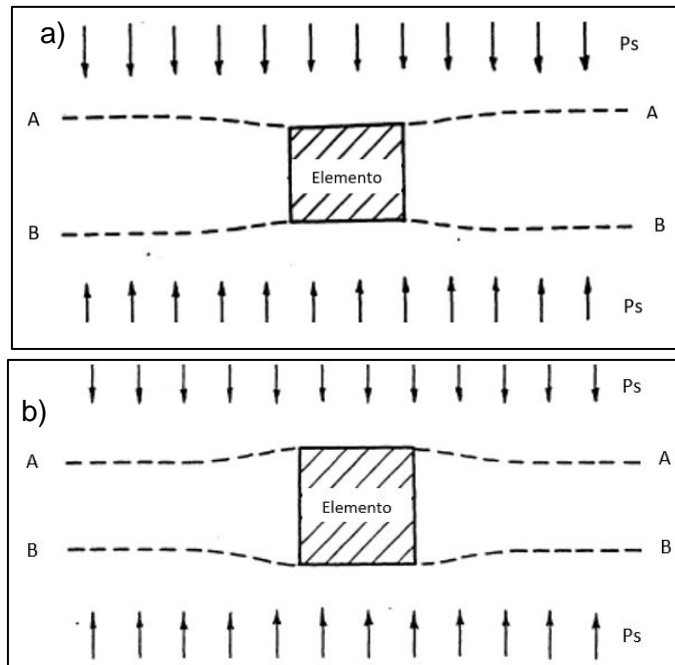


Figura 1-2: Desplazamientos verticales tras la aplicación de un esfuerzo P_s sobre un elemento que tiene a) menor rigidez y b) mayor rigidez que el suelo alrededor (modificado de Tien, 1996).

Dado que las estructuras enterradas no se deforman de manera uniforme, la distribución de los esfuerzos dista de las presentadas en la Figura 1-2. Esto ocurre debido a que las caras horizontales como el plano \overline{AA} o las caras verticales como el plano \overline{BB} indicadas en la Figura 1-3, son más flexibles hacia el centro, lo que implica que el elemento enterrado esté sometido a esfuerzos tanto activos como pasivos.

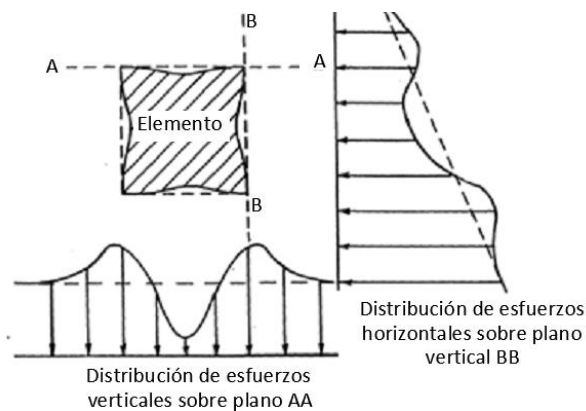


Figura 1-3: Distribución de deformaciones típicas y esfuerzos de una estructura rectangular enterrada flexible (modificado de Tien, 1996).

El efecto de arco activo, también denominado efecto de arco positivo implica que la masa de suelo se desplace de forma vertical hacia abajo con respecto al suelo que permanece estable. Por lo tanto, se desarrollan esfuerzos cortantes en dirección contraria al movimiento, es decir, de forma vertical hacia arriba, lo que genera que el suelo bajo el volumen movilizado, experimente una reducción de los esfuerzos verticales. Por el contrario, cuando el efecto de arco es negativo (pasivo), el suelo movilizado se desplaza de manera vertical hacia arriba, por lo que el esfuerzo cortante desarrollado incrementa el esfuerzo que experimenta la masa de suelo bajo el volumen movilizado, mientras reduce el esfuerzo actuante en el suelo adyacente, el cual permanece estable. En la Figura 1-4 se muestra en forma esquemática el desarrollo de los efectos de arco positivo y negativo (Han et al., 2017).

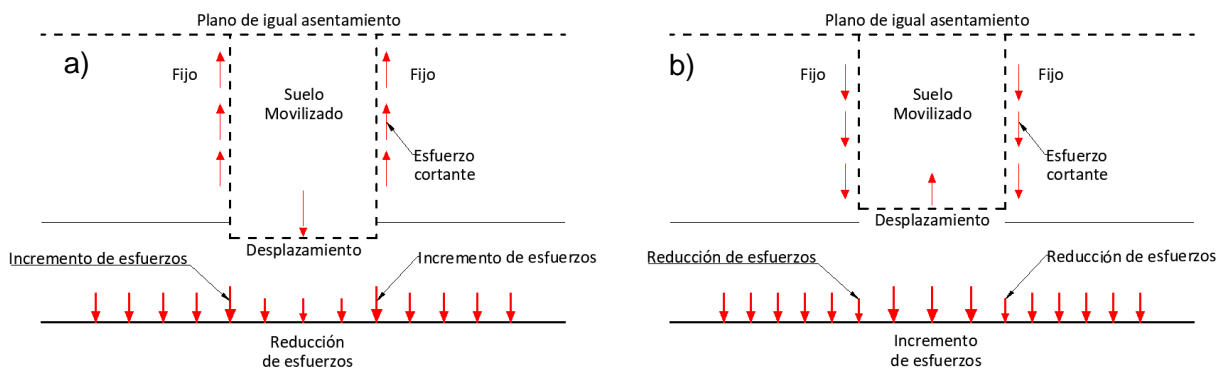


Figura 1-4: Esquema de (a) efecto de arco positivo, (b) efecto de arco negativo (modificado de Han et al., 2017).

1.4 Teorías clásicas sobre el efecto de arco

La teoría clásica elaborada para arenas por Terzaghi (1943), ha sido una de las investigaciones más extensas y con mayor cantidad de experimentación. Su desarrollo fue estudiado y mejorado por autores como Jakobson en 1958 para la teoría de los silos, Spangler en 1964 para el análisis de las estructuras enterradas, y por Paikowsky en 1989 en el estudio de las deformaciones del suelo tras el hincado de elementos como los pilotes de sección hueca.

1.4.1 Marston (1913)

Para el análisis de las tuberías enterradas se deben considerar las propiedades de la columna de suelo sobre el elemento enterrado y la relación de las rigideces del suelo y la tubería. Para lo anterior, Marston (1913) analizó los escenarios siguientes: zanja angosta, zanja ancha, proyección positiva y proyección negativa.

En el caso de la zanja angosta la deformación del suelo lateral es superior a la deformación del volumen central, por lo cual, el esfuerzo actuante sobre la tubería es menor al generado por la sobrecarga. En el caso de la zanja ancha, debido a que el ancho de la zanja es grande, la sobrecarga del suelo actúa de forma directa sobre el diámetro de la tubería y no sobre las paredes de la zanja, como se ilustra en la Figura 1-5.

Por otro lado, Marston (1913) incluyó en sus análisis la rigidez relativa entre el material de relleno y la tubería, definiendo como proyección positiva la condición en la cual la tubería es más rígida que el suelo alrededor. De este modo, de acuerdo con Marston, una tubería de concreto soportará por lo menos un 50 % adicional del esfuerzo vertical, en comparación con una tubería de acero de igual diámetro.

Como se indicó en la sección 1.3, cuando el efecto de arco es de tipo negativo, la carga debida al volumen de suelo sobre la tubería no se reduce; ejemplo de ello es la instalación de las tuberías de alcantarillado bajo los terraplenes, en donde el efecto de arco se invierte debido a la rigidez mayor de la estructura enterrada, la cual suele ser en concreto, como se muestra en la Figura 1-6.

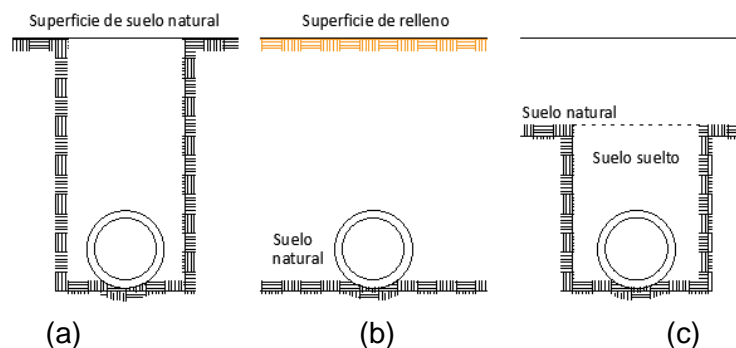


Figura 1-5: Escenarios de tuberías enterradas analizadas por Marston (1913): (a) Zanja angosta; (b) Zanja ancha y proyección positiva; (c) proyección negativa (modificado de Tien, 1990).

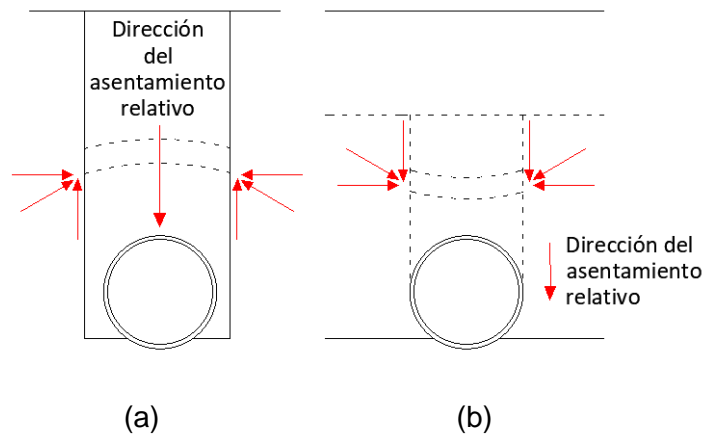


Figura 1-6: Efecto de arco en tuberías enterradas: (a) efecto de arco favorable; (b) efecto de arco desfavorable (modificado de Tien, 1990).

La condición de zanja ancha estudiada por Marston (1913) requiere que el suelo sobre y alrededor de la tubería tenga características diferentes al resto del material en el cual se encuentra embebida la tubería. Tras la conformación y la compactación del material de relleno de la zanja, se desarrollan fuerzas verticales de resistencia al corte sobre los planos de contacto entre los dos (2) materiales. Debido a que las perforaciones horizontales dirigidas (PHD) se construyen a profundidades grandes, y uno de sus objetivos es eliminar los procesos de excavación en superficie, las teorías establecidas por Marston (1913) no son aplicables a la construcción de las PHD.

1.4.2 Terzaghi (1943)

Con base en la ejecución del experimento denominado “puerta trampa” (“trapdoor”), Terzaghi (1943) estableció que el esfuerzo actuante decrece con rapidez a medida que se produce el desplazamiento relativo entre masas de suelo, especialmente cuando la densidad del suelo es mayor. De esta forma Terzaghi (1943) logro demostrar que los esfuerzos verticales se reducen tan pronto la puerta trampa en el ensayo se remueve, es decir cuando se elimina el soporte y se permite la deformación de la masa de suelo. En sus observaciones Terzaghi (1943) notó que el efecto de arco no requiere de la fractura o aplastamiento de las partículas de suelo, si no que corresponde a un estado temporal que depende de la resistencia al corte que se genere en cada suelo, la cual puede ser alterada principalmente por la ocurrencia de vibraciones.

10 Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

Es de aclarar que la teoría propuesta por Terzaghi (1943) no tiene en cuenta los efectos en tres (3) dimensiones, es decir, estudió el efecto de arco como un problema de deformación plana. Terzaghi (1943) simplificó el problema considerando que las superficies de deslizamiento son verticales, con lo cual el esfuerzo actuante en dichos planos corresponde a la resultante del peso del material sobre un plano de referencia y la resistencia al corte a lo largo de las superficies de falla. Además, Terzaghi (1943) supuso que el esfuerzo es uniforme en toda la sección horizontal, y que el coeficiente de presión de tierras lateral (K) es constante a lo largo de las superficies verticales, es decir, el equilibrio de fuerzas estará dado por la Ecuación 1.1, en donde z corresponde a la profundidad, 2B es el ancho de la franja de cedencia (suelo en movimiento), γ es el peso unitario del suelo, c es el intercepto de cohesión del suelo, φ es el ángulo de fricción del suelo y σ_v el esfuerzo vertical.

$$2B\gamma dz = 2B(\sigma_v + d\sigma_v) - 2B\sigma_v + 2cdz + 2\sigma_h dz \tan\varphi \quad \text{Ecuación 1-1}$$

Para dar solución a la Ecuación 1-1, se considera que el esfuerzo vertical a la profundidad del elemento es igual a 0, con lo cual se obtiene la Ecuación 1-2, en donde “q” corresponde a la sobrecarga de suelo.

$$\sigma_v = \frac{B\left(\gamma - \frac{c}{B}\right)}{K \tan\varphi} \left(1 - e^{-\frac{k \tan\varphi z}{B}}\right) + q e^{-k \tan\varphi z / B} \quad \text{Ecuación 1-2}$$

La experimentación realizada por Terzaghi (1943) llevó a la conclusión de que el efecto de arco se extiende hasta una distancia de cinco (5) veces la dimensión. Es decir, toda partícula de suelo localizada hasta por debajo de cinco (5) veces el radio de la tubería con respecto al nivel de aplicación de la carga, dejará de recibir la totalidad del esfuerzo vertical proveniente de la sobrecarga del suelo a esa profundidad.

1.5 Aproximaciones analíticas

1.5.1 Aproximaciones continuas basadas en la teoría elástica

Este tipo de solución no ofrece resultados realísticos debido a que no representan el comportamiento observado del suelo para el sistema suelo-tubería. Esto debido a que la mayoría de las deformaciones que ocurren durante el proceso de excavación e instalación de una perforación horizontal dirigida (PHD) son de tipo plástico.

En las soluciones elásticas se considera una condición plana de deformaciones y el suelo como un material homogéneo, isotrópico y puramente elástico con profundidad del suelo infinita. La solución elástica más aproximada ha sido establecida a partir del ensayo de "Trap door" por Finn (1963). Esta solución está limitada para problemas muy específicos, en los cuales los desplazamientos del suelo son muy pequeños y por ende se encuentran en el rango elástico, es decir para valores de "d" muy bajos, véase Figura 1-7 (Tien, 1996). Posteriormente Chelapati (1964) modificó la solución desarrollada por Finn, considerando una presión de sobrecarga con el fin de dar solución a problemas prácticos en donde la profundidad no es infinita.

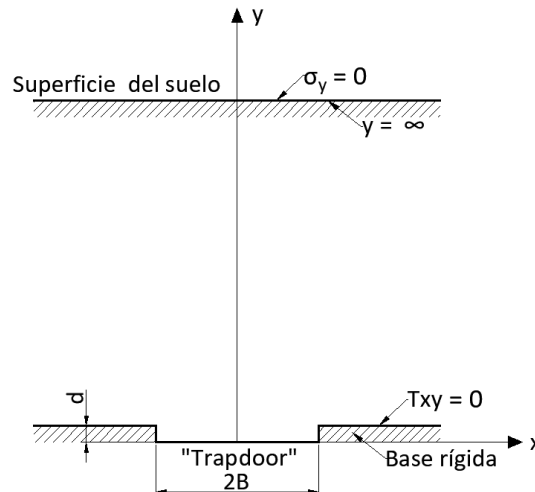


Figura 1-7: Condiciones de frontera para una masa de suelo cuya base se desplaza verticalmente (modificado de Tien, 1990).

12 Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

La teoría elástica establecida por Finn fue aplicada adicionalmente para el análisis de muros de contención. Siendo en este caso el desplazamiento horizontal en lugar de vertical es decir un mecanismo de rotación en lugar de traslación, encontrando que la presión actuante obtenida sobre un muro corresponde a la estimada a través del método de Taylor (1948). Las soluciones elásticas en sus momento permitieron establecer que el efecto de arco depende principalmente de tres (3) parámetros, b/h , Ph/dE y ν ; siendo h la profundidad del suelo, b el ancho del ensayo de "Trapdoor", P el peso propio del suelo, E el módulo de elasticidad y ν la relación de Poisson (Tien, 1996).

Otras aproximaciones elásticas para la estimación de la redistribución de los esfuerzos alrededor de una perforación fueron las propuestas por Bjerru et al., (1972) a través del modelo del arco y el análisis de Burghignoli (1981), quien propuso un método iterativo y presento los resultados de forma gráfica

1.5.2 Aproximaciones basadas en la teoría la plástica

Tiempo después de que las soluciones elásticas fueron propuestas, surgieron varios críticos, como Peck en 1975, quienes dudaron de su aplicación. De acuerdo con Peck, los movimientos del suelo asociados con la construcción y en particular en suelos blandos, distan mucho de corresponder con los principios de la teoría de la elasticidad.

La primera aproximación que incluyó el comportamiento plástico del suelo fue propuesta por Evans en 1984, quien, empleando un suelo idealizado sin cohesión, isotrópico y homogéneo reprodujo el ensayo de "puerta trampa" ("trapdoor") propuesto por Terzaghi (1943). En este caso debido a la no elasticidad del suelo, además de utilizarse el criterio de falla de Mohr Coulomb, se debe emplear una regla de flujo asociado que establezca la relación entre las deformaciones y la superficie de cedencia del suelo en las zonas plásticas. En esta aproximación los parámetros principales que determinan las deformaciones son la dirección del movimiento y el ángulo de dilatancia, este último equivalente al ángulo del potencial plástico con respecto a la horizontal. En el numeral 3 se amplía la explicación sobre los modelos constitutivos, (Tien, 1996).

La ley de potencial plástico es una curva definida a través de la perpendicularidad de todos los vectores de incrementos de deformaciones plásticas. En la Figura 1-8 se ilustra la variación de las deformaciones volumétricas y cortantes plásticas. El ángulo de dilatancia determina la dirección del vector del incremento de deformación plástica, por lo que constituye una variable adecuada para su uso en la expresión de la regla de flujo. Por lo anterior, cuando la magnitud del ángulo de dilatancia del suelo es mayor a 0° , se genera la expansión del material, mientras que cuando el ángulo de dilatancia es igual a 0° el cambio de volumen es nulo, lo cual es útil para la modelación de los materiales con relaciones de sobreconsolidación muy altas (Tien, 1996).

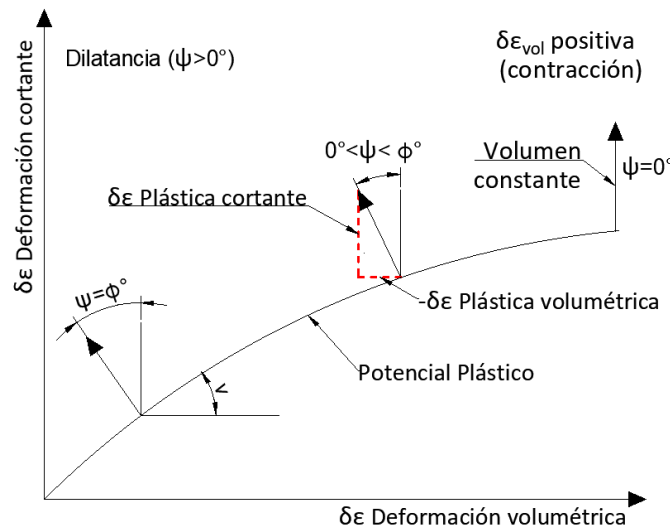


Figura 1-8: Esquema de la ley de potencia plástica (Modificado de Tien, 1996).

Con base en la teoría propuesta por Evans, se establece que cuando el ángulo de dilatancia es mayor a 0° , el volumen del suelo movilizado sobre el elemento enterrado es de forma triangular y se mueve hacia abajo. En el caso del efecto de arco activo cuando el valor del ángulo de dilatancia es mayor a 0° , el movimiento del prisma es hacia arriba y presenta una forma trapezoidal. Cuando el ángulo de dilatancia es igual a 0° , tanto en el caso activo como en el caso pasivo del efecto de arco, el volumen de suelo movilizado tiene forma rectangular, lo que coincide con lo presentado por Terzaghi en 1943.

14 Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

Con el objetivo de investigar el efecto de arco en diferentes tipos de arena, Evans ensayo cuatro (4) tipos de arena diferentes, en las cuales variaba principalmente el origen y el tamaño del grano entre fino, medio y grueso (Tien, 1996).

Los resultados obtenidos por Evans fueron similares a los establecidos por Terzaghi en el caso de la arena suelta, representando el efecto de arco activo, en donde tan pronto se inicia el ensayo de "Trapdoor", al eliminar el soporte de ancho B, los esfuerzos verticales decrecen rápidamente, hasta llegar a un valor mínimo. Una vez se alcanza un desplazamiento cercano al 10% del ancho B, los valores de los esfuerzos tienden a permanecer constantes. De manera opuesta, en el caso del efecto de arco pasivo, los esfuerzos se incrementan tan pronto como se elimina el soporte, llegando hasta un valor máximo pico. Después del valor máximo, el esfuerzo se reduce hasta a un valor constante, en este caso el resultado obtenido por Evans es similar al evidenciado por McNulty, sin embargo, este último no incluye el valor pico encontrado por Evans. Ambos autores evidenciaron que la relación entre la profundidad (h) y el ancho del ensayo "Trapdoor" (B) afectan directamente el desarrollo del efecto de arco (Tien, 1996).

Adicionalmente en la simulación del avance de un túnel, Evans estableció que la redistribución de los esfuerzos en una perforación se genera incluso a profundidades bajas, y que su efecto se evidencia en por lo menos 0.5 veces el diámetro de la perforación a cada uno de los lados, y en dirección perpendicular al frente de excavación, al menos 1.5 veces el diámetro. De este experimento Evans sugirió que los modelos tradicionales en dos (2) dimensiones son cinemáticamente incorrectos, pues no incluyen el comportamiento en tres (3) dimensiones, en el cual se genera un incremento en el volumen del suelo, siempre y cuando se desarrolle el efecto de arco (Tien, 1996).

Es importante destacar que, así como el suelo no es un material perfectamente elástico, tampoco es un material perfectamente plástico, por lo cual el modelo asumido por Evans (1984) no constituye una solución rigurosa. A partir de esta teoría se han derivado otras teorías, en las cuales se han obtenido mejores resultados en las deformaciones del suelo y en el efecto de arco en los suelos blandos.

1.6 Métodos empíricos de análisis del efecto de arco

Los métodos empíricos surgen con base en las experiencias de construcción, la mayoría de estas metodologías se enfocan en la obtención del esfuerzo máximo que actúa en el sistema. Para lo anterior estos métodos se dividen en aquellos que consideran o no la altura de la sobrecarga. Cuando la sobrecarga no genera deformaciones por encima del límite elástico, los esfuerzos no se ven influenciados por la altura de esta. Por otro lado, cuando los esfuerzos implican el desarrollo de las deformaciones plásticas, la altura de la sobrecarga se debe considerar, no solo en la magnitud del esfuerzo que actúa sobre la estructura enterrada, sino también en el tiempo necesario para que se genere el efecto de arco.

En los métodos empíricos el estado inicial de los esfuerzos en el suelo, es decir previo a la construcción de la perforación horizontal dirigida (PHD) y las condiciones geológicas del sitio, son los principales datos de entrada, pues estos determinaran la estabilidad de los materiales durante el proceso constructivo. Además, la estabilidad de la PHD estará determinada por los parámetros de resistencia al corte del suelo y la geometría de la perforación.

1.7 Métodos numéricos

Debido a las simplificaciones necesarias de las aproximaciones elásticas y plásticas, las soluciones teóricas tienen limitaciones. Por otra parte, y gracias al poder de cálculo de los computadores en la actualidad, en la práctica es común el uso de programas de computador para realizar análisis mediante métodos numéricos, los cuales son flexibles y facilitan la interpretación de las deformaciones y de la redistribución de los esfuerzos. Entre los métodos numéricos más utilizados están el método de las diferencias finitas (FDM), el método de los elementos finitos (FEM) y el método de los elementos discretos (DEM), los cuales permiten incluir en los análisis materiales heterogéneos y anisotrópicos, así como emplear geometrías irregulares.

16 Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

La modelación numérica de problemas en geotecnia es la representación aproximada de la realidad mediante el uso de técnicas matemáticas, las cuales buscan dar solución a un sistema de ecuaciones diferenciales. Estas técnicas se pueden utilizar para estudiar diversos problemas como lo son las deformaciones, el flujo o la consolidación (Potts et al., 1999).

Los elementos finitos hacen parte de los métodos numéricos que dan solución a los sistemas de ecuaciones diferenciales. La solución de cualquier problema mecánico involucra el cumplimiento de las ecuaciones de equilibrio de esfuerzos, compatibilidad de deformaciones y relaciones constitutivas del material en un continuo, las cuales componen el sistema de ecuaciones diferenciales a resolver (Bathe, 1982).

Los elementos finitos buscan aproximar la solución de un medio continuo a través de la discretización en elementos de tamaños pequeños. En el caso particular de la geotecnia, la variable primaria por resolver corresponde a los desplazamientos nodales, los cuales a partir de las funciones de interpolación permiten obtener otras variables derivadas como los son los esfuerzos y las deformaciones unitarias.

Para solucionar el sistema de ecuaciones diferenciales se tiene como objetivo balancear los vectores de fuerzas externas de forma incremental para un intervalo de tiempo, los cuales dependen de la matriz de rigidez del sistema y de las condiciones de frontera establecidas para el problema. Estas ecuaciones se solucionan de manera incremental hasta obtener una magnitud mínima del error o tolerancia para la cual se acepta que el sistema converge.

En 1975 Ranken y Ghaboussi codificaron un programa de elementos finitos para simular el avance de un túnel en un material isotrópico empleando un modelo axisimétrico. Por otro lado, Stone en 1988 modeló el ensayo de “puerta trampa” (“trapdoor”), y obtuvo predicciones aproximadas de la dirección y la magnitud de las deformaciones. En 1989 Koutsabeloulis y Griffiths discretizaron el suelo mediante elementos finitos y modelaron tanto el efecto de arco activo como el efecto de arco pasivo, a partir de lo cual generaron

resultados representativos para el caso pasivo, sin embargo, obtuvieron resultados poco concluyentes para el caso activo.

Por otro lado, el método de los elementos discretos es utilizado para los materiales granulares, modelando las partículas de manera individual. El método de los elementos discretos (DEM) fue utilizado en 1992 por Sakaguchi y Ozaki, quienes modelaron la descarga de las partículas al interior de un silo debido a la fuerza de gravedad, para ello consideraron partículas de 10 mm de diámetro, y emplearon el concepto denominado “fricción rodante”.

Por otro lado, en caso de que la interfaz suelo-tubería se requiera modelar, en la literatura se recomienda incluir la interfaz entre ambos materiales como un material elastoplástico, con las propiedades del suelo adyacente reducidas hasta en un 75 %. Este material representa el material menos resistente alrededor de la tubería, es decir un suelo débil generado por las deformaciones ocurridas debido a la excavación de la PHD.

De acuerdo con el principio de Saint Venan (Xu, 2018), el ancho del dominio del modelo debe ser de alrededor de once (11) veces el diámetro de la perforación. El centro de la tubería suele coincidir con el centro del volumen del suelo y en varios análisis, teniendo en cuenta la simetría del problema, se utiliza solo la mitad del volumen, como se ilustra en la Figura 1-9, reduciendo así el gasto computacional.

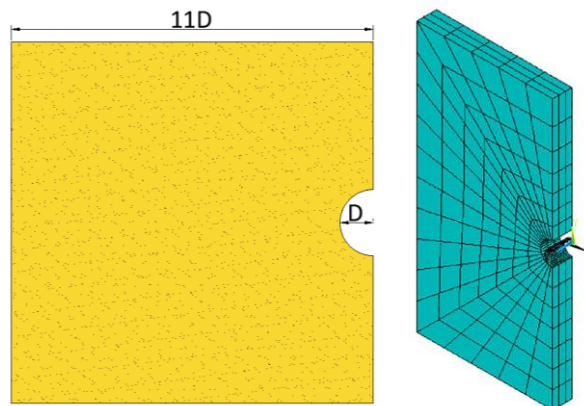


Figura 1-9: Dimensiones sugeridas por principio de Saint Venan para modelación de una perforación (modificado de Xu et al., 2018).

2. Perforación Horizontal Dirigida (PHD)

La perforación horizontal dirigida (PHD) es un método de instalación de tuberías utilizado cuando resulta inviable la construcción de las zanjas, lo que evita generar excavaciones abiertas. El primer equipo para la construcción de una perforación horizontal dirigida data del siglo XV, fue propuesto por Leonardo Da Vinci y permitió la instalación de tuberías de madera (IbTT, 2015).

En el año de 1971 la técnica de la perforación horizontal dirigida (PHD) fue utilizada para ejecutar por primera vez un cruce bajo el río del Pájaro en Watsonville-California. Esta PHD consistió en la instalación de una tubería de acero para el transporte de gas natural a lo largo de 187 m de longitud (Yan, 2018). Hoy en día el uso de la PHD es recurrente para la construcción de líneas de transporte de hidrocarburos, localizadas por debajo de obstáculos, tales como las carreteras, las áreas inestables y las obras de infraestructura como las redes de servicios.

En su inicio las PHDs se caracterizaban por ser perforaciones horizontales, tal y como su nombre lo indica, sin embargo, debido a los requerimientos para salvar las diferencias de elevación, los alineamientos de las PHD suelen ser curvos y en algunas ocasiones con puntos de inflexión. Los diámetros más utilizados varían entre 0.25 m a 2 m y hoy en día adquieren longitudes superiores a un (1) km (More, 2012).

2.1 Proceso constructivo

El proceso constructivo de una PHD se verá afectado por el tipo de suelo, el diámetro, la longitud, la profundidad y el material de la tubería que será instalada. Así mismo se debe considerar la capacidad de torque de la máquina, la longitud de la tubería de perforación, las propiedades reológicas de los lodos de perforación y la capacidad de bombeo de estos fluidos (More, 2012).

Las etapas básicas de la construcción de una PHD se describen a continuación.

2.1.1 Perforación piloto

Una vez se determina la geología e hidrogeología del área en donde se realizará la perforación horizontal dirigida (PHD), el primer paso consiste en la construcción de la perforación guía o piloto. Para ello se utiliza un cabezal direccionable que permite la variación en la orientación de la perforación, tanto en dirección vertical como en el plano horizontal, el cual se rastrea electrónicamente (Deltares, 2009). Dicha direccionalidad se obtiene por medio de la selección adecuada de la broca de corte, el empuje y la flexibilidad de las barras de perforación, buscando crear el mayor radio de curvatura dentro del derecho de vía de la PHD. Esto con el fin de reducir los esfuerzos a flexión y el efecto “Capstan”, el cual se debe a la fricción generada debido al halado de la tubería en una curva, producida por la fuerza normal a la curvatura, véase numeral 2.3.3 (Wong et al., 1994).

Durante este proceso y en forma simultánea se inyectan a presión los lodos o fluidos de perforación, los cuales permiten además de reducir la fricción, facilitar la refrigeración de los equipos de perforación y el mejoramiento en la estabilidad de la excavación. Estos lodos son bombeados a través de la tubería y retornan transportando los materiales triturados, se reciclan y recirculan durante todo el proceso. Los fluidos están compuestos por una mezcla de bentonita y agua, en la actualidad la bentonita se suele sustituir o ser mezclada con polímeros, los cuales mejoran las propiedades del fluido.

En la Figura 2-1 se representa en forma esquemática el proceso de excavación del túnel piloto para el cruce bajo un río. Se muestra el avance de la perforación de izquierda a derecha y algunos elementos principales como la cabeza de perforación y el sistema guía.

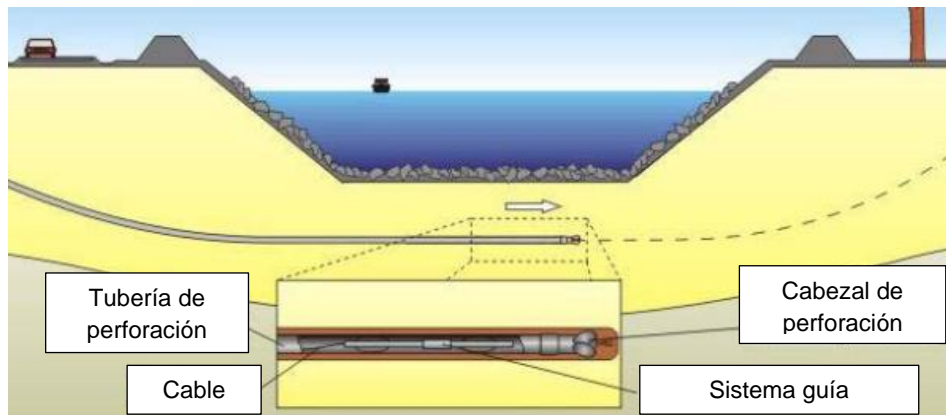


Figura 2-1: Esquema de perforación piloto en una perforación horizontal dirigida (PHD) (modificado de Deltares, 2009).

En función de la naturaleza geológica de los materiales del subsuelo, la excavación del túnel piloto requerirá o no del uso de los lodos que permitan estabilizar la perforación. Por lo general la PHD ejecutada en suelos cohesivos se auto soporta, mientras que la perforación de suelos granulares requiere del uso de lodos de perforación. En el caso de los suelos granulares de granulometría gruesa la ejecución de una PHD se ve limitada debido a la existencia aislada de bolos, los cuales constituyen un obstáculo para el escarificador durante la ejecución del túnel piloto y de las etapas de construcción subsecuentes. Además, la mezcla de materiales pobremente gradados genera una limitante adicional, ya que, debido a las relaciones de vacíos grandes del suelo, se permite la salida de los lodos de perforación, y por tanto la reducción del soporte de la PHD, (Bandis, 2015).

2.1.2 Ensanchamiento de la perforación

Realizada la perforación piloto, se procede a ensanchar la perforación horizontal dirigida (PHD) hasta el diámetro requerido. Este proceso implica una nueva perforación de diámetro mayor y en dirección contraria a la perforación piloto. Mediante el equipo que realizó la perforación piloto, se extrae un escarificador. Dependiendo del diámetro

requerido, el proceso de escarificación se puede repetir varias veces hasta obtener el diámetro requerido, el cual suele ser entre 1.2 a 1.5 veces el diámetro de la tubería que se instalará. Según las propiedades de suelo, el tipo de escarificador empleado varía, por ejemplo, se utilizan ensanchadores tipo “flycutter” en el caso de arcillas y escarificadores con protección de carburo en el caso de materiales duros y existencia de roca.

Durante la etapa de construcción de la perforación horizontal dirigida (PHD) es necesario garantizar una cabeza de presión de lodos mínima que evite el colapso de las paredes y del frente de la excavación. Así mismo las propiedades reológicas de los lodos deben ser seleccionadas de manera que durante su inyección sea posible la formación y adherencia a las paredes de la PHD de una capa de lodos solidificada, denominada “Filter cake”. Esta capa reduce la posibilidad de pérdida de los lodos de perforación, dado que contribuye a impermeabilizar las paredes de la PHD. De acuerdo con Bandis et al (2015), en la mayoría de los casos para mantener la perforación estable, es suficiente la aplicación de una presión de lodos con una magnitud mayor a la presión hidrostática.

En la Figura 2-2 se representa el proceso de ensanchamiento de la PHD, en ella se indica que el proceso de perforación se realiza en dirección contraria a la ejecución de la perforación piloto y se efectúa con el empleo de lodos de perforación.

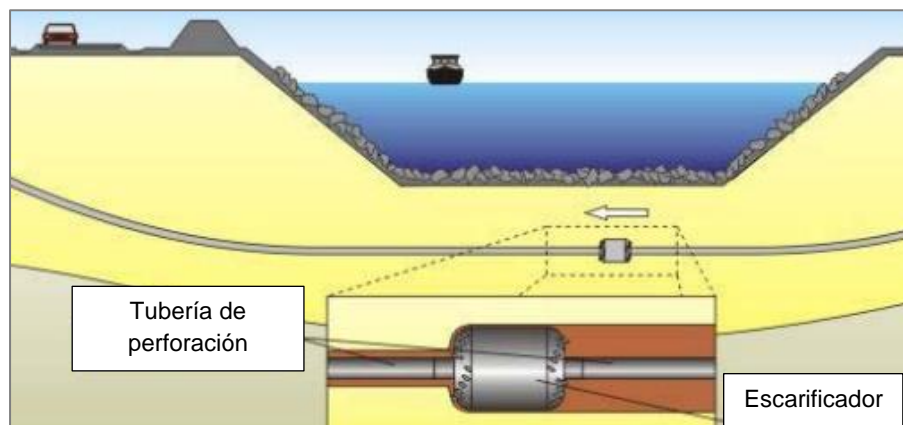


Figura 2-2: Esquema del ensanchamiento de una perforación horizontal dirigida (PHD) (modificado de Deltares, 2009).

2.1.3 Instalación de tubería

Una vez la perforación horizontal dirigida (PHD) adquiere el diámetro requerido, el mismo equipo que ejecutó la perforación piloto y realizó el ensanchamiento, hala la tubería, conocida como lingada, la cual se debe disponer con anterioridad sobre el terreno en un área preparada. En la Figura 2-3 se ilustra la instalación de la tubería en la PHD ejecutada, para lo cual la tubería se conecta al escarificador a través de un “Swivel”, el cual permite que el equipo de perforación gire sin que la tubería gire.

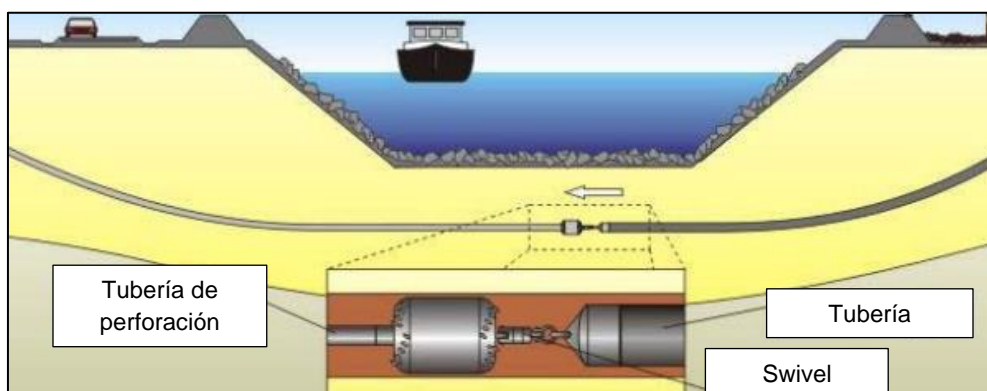


Figura 2-3: Esquema de ensanchamiento de una perforación horizontal dirigida (PHD) (modificado de Deltares, 2009).

Una vez la tubería se instala, esta debe ser capaz de soportar la magnitud de los esfuerzos a los que estará sometida durante su vida útil. Previo a la instalación de la tubería se evalúan los esfuerzos, la presión interna, las cargas estáticas y las cargas dinámicas que actuarán sobre la tubería, verificando que las deformaciones y los esfuerzos no puedan producir la falla de la tubería por pandeo o fisuración (Bayat., 2008).

De acuerdo con la “U.S. Army Corps of Engineers” debido a que las tuberías flexibles se deforman durante su vida útil, para su análisis es adecuado el empleo de los métodos de elementos finitos (FEM), dado que esta herramienta permite cuantificar los incrementos de los esfuerzos verticales sobre la tubería, así como evaluar sus deformaciones.

2.2 Normas de diseño y programas de computador para el diseño de una perforación horizontal dirigida

2.2.1 Normas de diseño

Debido a la complejidad del proceso de construcción de una perforación horizontal dirigida (PHD) y la variabilidad de las propiedades de los suelos, en la práctica existen guías de instalación cuyo objeto es obtener un funcionamiento y desempeño adecuado. Algunas de las recomendaciones utilizadas en la práctica están establecidas en las normas siguientes: ASCE 2005, ASTM F – 1962, ASTM F – 2007 y PPI 2006.

2.2.2 Programas de computador

Por otra parte, se han desarrollado programas de computador comerciales enfocados a dar solución a problemas particulares. Algunos de estos programas son los siguientes.

- Drillpath (1997) fue desarrollado por Infrasoftware para dar asistencia en la construcción de las PHD. Entre los datos de entrada del programa están las propiedades del suelo y de la tubería, las elevaciones, las cargas de instalación y los obstáculos.
- Plexco (1998) incluye herramientas para el cálculo de las fuerzas de halado, el radio de flexión, las fuerzas de flotación, las presiones y el pandeo de la tubería.
- Atlas Bore Planner, codificado por Vermeer (1998), es una herramienta de diseño la cual incluye restricciones como la profundidad mínima de cobertura y los radios máximos de flexión.

Si bien los programas de computador mencionados tratan algunos aspectos particulares de las perforaciones horizontales dirigidas PHDs, no tienen en cuenta los efectos del proceso constructivo de una PHD, y las cinco (5) etapas de diseño siguientes:

- Planeación del alineamiento de la perforación horizontal dirigida.
- Cálculo de las cargas y las deflexiones.
- Diseño de la secuencia de perforación.

24 Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

- Consideraciones y consecuencias de la perforación.
- Selección de los equipos de perforación.

Para involucrar las cinco (5) etapas previas en el diseño de una perforación horizontal dirigida (PHD), la Universidad de Waterloo en conjunto con CATT (Center for Advancement of Trenchless Technologies) desarrollo una herramienta computacional llamada BoreAid (Bayat et al., 2008), la cual es un programa de computador que involucra las buenas prácticas especificadas en la ASTM F1962, así como los criterios y las guías de la PRCI (Pipeline Research Council International) y la NASTT (North American Society for Trenchless Technology).

Para la planeación del alineamiento de la PHD, BoreAid requiere la definición de la geometría de la PHD, la diferencia de elevaciones, la profundidad mínima y el ángulo de salida con respecto a la horizontal, el cual está definido por la capacidad de los equipos de instalación, variando generalmente entre 4° y 12° (Guohui, 2016). Así mismo se deben incluir las características del perfil del subsuelo, tales como la estratigrafía, el nivel freático y las áreas con anomalías como lo son los vacíos y los bloques. Paso seguido es posible introducir en BoreAid las interferencias sobre y bajo la superficie como servicios públicos, vías o edificios. Por último y de manera iterativa el programa BoreAid se encarga de determinar el mejor alineamiento que cumpla las condiciones y restricciones ingresadas por el usuario.

Para la verificación de las cargas y de las deflexiones en el programa BoreAid se deben incluir las propiedades de la tubería, es decir la longitud, el diámetro interno y externo, las presiones internas, los esfuerzos de tracción y la compresión admisible. De igual modo se deben definir las características del suelo, como el peso unitario, el ángulo de fricción, la cohesión y las propiedades de los lodos, con respecto al peso unitario y la presión hidrocínética.

En el programa BoreAid Paso seguido al diseño de la perforación y la verificación de las cargas, se realiza el diseño de la secuencia de perforación y de los equipos necesarios. Para ello se definen aspectos como el radio de curvatura, la longitud de la perforación, las características de bombeo, las eficiencias y las velocidades de perforación.

Durante la construcción de una PHD además del diseño del alineamiento, el cálculo de las cargas y la secuencia constructiva se debe tener en consideración los procesos del hidrofracturamiento, la salida de los lodos de perforación y las deformaciones en superficie. Todos estos procesos están relacionados con el exceso o la deficiencia de la presión de lodos aplicada sobre las paredes de la perforación.

Por último, en la etapa final el programa de computador BoreAid incluye la selección de los equipos o los suministros de perforación, los cuales son seleccionados con base en la magnitud de las fuerzas de halado y la capacidad de bombeo. Tras esta etapa se determina si la ejecución de la PHD es viable o inviable y se realizan los ajustes necesarios en el diseño de la PHD para que el proyecto sea factible.

2.3 Fuerzas de halado

Las fuerzas de halado se desarrollan durante el proceso de instalación de la tubería, su cálculo se requiere para la selección del equipo de perforación y para la evaluación de los esfuerzos sobre la tubería, los cuales deben ser conocidos para evitar el deterioro de la tubería durante su instalación. Para el cálculo de estas fuerzas en la literatura técnica se recomienda considerar las cuatro (4) fuerzas que se explican a continuación.

2.3.1 Fuerza resistente debido a la fricción entre la tubería y la superficie del terreno

La fuerza de fricción entre la tubería y la superficie del terreno, la cual se opone al movimiento, se debe al proceso previo de la instalación de la tubería, en el cual esta se apoya sobre la superficie antes de su ingreso a la perforación horizontal dirigida (PHD). Una vez se inicia la instalación de la tubería, se desarrolla una fuerza de fricción opuesta a la dirección del movimiento, como se ilustra en la Figura 2-4. La magnitud de esta fuerza es máxima para el tiempo en el cual se da inicio al halado de la tubería, debido a que toda su longitud se encuentra en superficie. Tras el inicio del halado dicha fuerza de fricción se reduce de manera proporcional a medida que la tubería se instala en la perforación. La estimación de la fuerza de resistencia debida a la fricción con el suelo en superficie se basa en la ley de Coulomb.

La magnitud de esta fuerza dependerá además de la longitud de la tubería sobre la superficie, del peso por unidad de la tubería y del coeficiente de fricción entre la tubería y el suelo, el cual, en función del material de la tubería y la rugosidad del suelo, varía entre 0.1 y 0.5. En ocasiones la magnitud del coeficiente de fricción es inferior a 0.1 debido a que en la práctica se utilizan rodillos o zanjas con agua, las cuales reducen la fricción entre la tubería y la superficie del terreno (Yan et al., 2018).

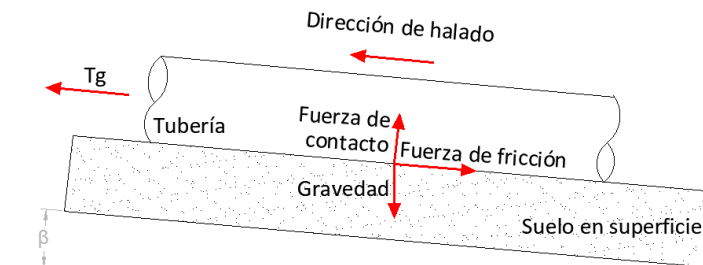


Figura 2-4: Fuerza resistente entre la tubería y la superficie del suelo (modificado de Yan, 2018).

2.3.2 Fuerza resistente debido a la fricción entre la tubería y las paredes de la perforación

La fuerza de fricción entre la tubería y las paredes de la perforación horizontal dirigida se desarrolla debido al contacto entre la tubería y las paredes de la perforación y se opone al movimiento de la tubería. Con el objetivo de obtener la estabilidad de la excavación y la refrigeración de los equipos, la perforación tendrá en su interior lodos de perforación, los cuales generan un empuje sobre la tubería, lo que produce una fuerza de flotación a lo largo de toda la tubería al interior de la perforación, como se muestra en la Figura 2-5. La magnitud de esta fuerza dependerá del ángulo de inclinación de la tubería y del coeficiente de fricción entre la tubería y las paredes de la perforación horizontal dirigida (PHD), cuyas magnitudes oscilan entre 0.2 y 0.5. En la práctica para reducir la fricción y reducir la presión de contacto debido al efecto de la flotación, se suele llenar la tubería con agua, con lo cual se obtiene un peso adicional (Yan et al., 2018).

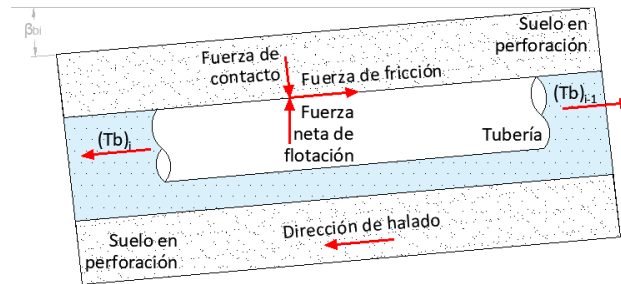


Figura 2-5: Fuerza resistente entre la tubería y las paredes del suelo de la perforación (modificado de Yan, 2018).

2.3.3 Fuerza resistente debido a la presencia de curvas en el trazado de la PHD

La fuerza resistente debido a las curvas en el trazado de la perforación horizontal dirigida (PHD) se deriva de dos (2) condiciones. La primera condición se debe al incremento en la presión de contacto entre la tubería y las paredes de la perforación. Esta condición se origina a causa del cambio en dirección de la fuerza de halado sobre la tubería en un tramo curvo del alineamiento, como se muestra en la Figura 2-6. Por otro lado, una segunda condición genera una fuerza adicional debido a las curvas en el trazado de la PHD, y a las características de rigidez de la tubería, la cual, al flexionarse durante su paso en el tramo curvo, desarrolla incrementos en la fuerza normal sobre la tubería, como se ilustra en la Figura 2-7. Está fuerza es mayor en las tuberías flexibles de gran diámetro.

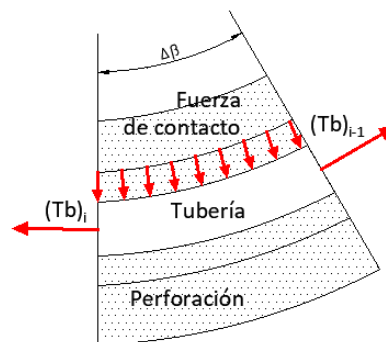


Figura 2-6: Incremento en la fuerza de contacto debido al efecto de curvatura de la tubería sobre el suelo (modificado de Yan, 2018).

El efecto debido a la flexibilidad de la tubería ha sido investigado por autores como Polak y Chu (2005), quienes consideran las paredes rígidas y asumen que las presiones sobre la tubería son concentradas.

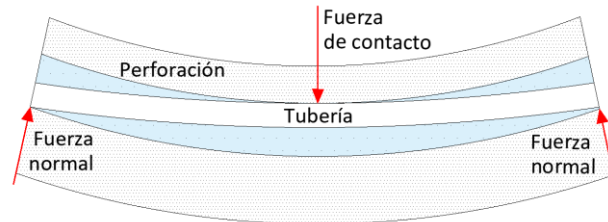


Figura 2-7: Incremento en la fuerza normal sobre la tubería debido al paso de la PHD por un tramo curvo (modificado de Yan, 2018).

2.3.4 Fuerza resistente debido a la fuerza de arrastre de los lodos de perforación

Cuando la tubería está en el interior de la perforación horizontal dirigida (PHD), a causa de la presencia de los lodos de perforación y del movimiento relativo entre la tubería y el fluido, se generan sobre la PHD fuerzas de arrastre. Según autores como Huey (1996) y Puckett (2003) este efecto se debe considerar para tuberías de acero. Por otra parte, autores como Driscopipe (1993) y Chin (2001) indican que el efecto se puede despreciar en tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE).

2.4 Presión de lodos de perforación

Previo a la construcción de una PHD se debe establecer la presión máxima del fluido para mantener la integridad de la perforación, así como determinar la presión mínima de los lodos de perforación para lograr el retorno de los materiales cortados hasta la superficie (Elwood, 2008).

Debido a la forma de aplicación de los lodos de perforación, la presión máxima se desarrolla en el frente de la excavación y se reduce de manera gradual a lo largo de la perforación. En una perforación horizontal dirigida (PHD) esta presión de lodos tiene un límite superior ya que un exceso en la presión de lodos puede generar el colapso de la excavación a causa del hidrofracturamiento, generado cuando la presión de los lodos vence la resistencia al corte del suelo, por lo cual, los lodos de perforación pueden migrar

a superficie y generar una pérdida total de la presión de los lodos, lo que implica la inestabilidad del pozo e incluso costos adicionales debidos a la toma de acciones civiles o penales en áreas de sensibilidad ambiental (Elwood, 2008). Para explicar el proceso de hidrofracturamiento Keulen (2001) utiliza la teoría de la expansión de cavidades.

La inestabilidad de una perforación horizontal dirigida (PHD) puede generar efectos tales como la desviación del alineamiento y la falla de la tubería, lo que implica el desarrollo de fuerzas de halado y torques adicionales no estimados durante el diseño de la PHD. En forma adicional, la perforación puede colapsar, lo cual genera el deterioro de la tubería en caso de que esto ocurra durante el proceso de instalación, así como la pérdida de herramientas y el abandono de la perforación.

A mayor densidad del fluido de perforación utilizado en las PHD construidas en materiales granulares, mayor será el espesor del “filter cake” generado alrededor del espacio anular de la excavación, lo que facilita el sello de la perforación y con ello se evita la pérdida de los lodos de perforación. Así mismo para materiales tipo grava o roca es recomendable el uso de densidades mayores, ya que los elementos generados tras la excavación se mantendrán más fácilmente en suspensión (Elwood, 2008).

Durante la construcción de una PHD se desarrolla tanto el régimen de flujo laminar como el régimen de flujo turbulento. Con respecto al flujo laminar Bourgoyne et al. (1986) propusieron ecuaciones en función del tipo de fluido, la viscosidad, la longitud y el diámetro de la varilla. Por otro lado, Yan (1996) estableció un método para estimar la presión máxima al interior de la perforación basado en que la presión inyectada se equilibra con la presión actuante y que los lodos de perforación se mantienen en movimiento. (Yan et al., 2018) establecieron que la presión actuante corresponde a la suma de las pérdidas de la presión en los anillos y en las varillas de perforación, las cuales equivalen al 20 % a 25 % de la presión circulante.

Ya que los lodos de perforación son bombeados durante todo el proceso de construcción de la PHD, existe un gradiente de presión, el cual garantiza que los lodos estén en constante movimiento. Motivo por el cual la definición del gradiente es de gran importancia

para la selección de los equipos de construcción. Cuando se modela el flujo axial de los lodos de perforación, se simplifica considerando que los lodos son incompresibles y que el flujo únicamente es de tipo laminar, lo que se conoce como flujo anular. En la mayoría de las modelaciones se desprecia además la excentricidad de la tubería con respecto a la excavación, por lo cual el flujo no es circunferencialmente uniforme alrededor de la tubería (Elwood, 2008).

Para el análisis de la presión de los lodos de perforación se desprecia la reducción del peso del suelo debido a la excavación, por lo cual el peso propio del suelo se estima a partir de los esfuerzos originales. En general, las fuerzas externas se desprecian y se supone que la presión de los lodos actúa de manera distribuida y uniforme en dirección normal a la perforación. Si se considera una sección completamente circular en un estado hidrostático de esfuerzos, se tendrá que los esfuerzos radiales y tangenciales serán los esfuerzos principales. Bajo la condición plana de deformación los esfuerzos cortantes tangenciales serán igual a 0.

Al definir "R" como la distancia entre un punto sobre la pared de la perforación y el eje de la perforación, y la magnitud del coeficiente de presión de tierras es igual a 1, se tiene que a medida que el valor de r se incrementa, el esfuerzo tangencial se reduce de forma gradual, véase Figura 2-8. Cuando el valor de "r" se aproxima a cinco (5) veces el valor del radio de la perforación, las magnitudes de los esfuerzos radiales y tangenciales son cercanas a la magnitud del esfuerzo vertical. Es decir, bajo dicho escenario la redistribución de los esfuerzos se aproxima al estado de esfuerzos original (Yan et al., 2018).

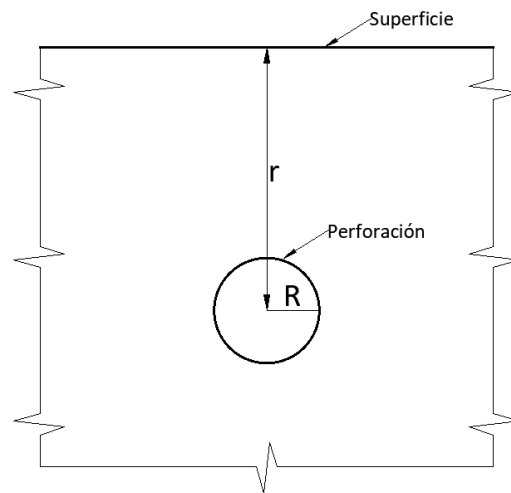


Figura 2-8: Distancias r y R en la redistribución de los esfuerzos

Algunos autores como Lueke y Ariaratnam han estudiado la influencia de la presión de los lodos de perforación en la estabilidad de las perforaciones horizontales de PHD en arcillas, quienes evidenciaron que un exceso en la presión aplicada implica la expansión del suelo (Shu y Ma, 2015). Las arenas y gravas por su parte son conocidas como materiales no reactivos, ya que estos no tienden a expandirse en presencia de agua (Xia, 2009).

En el caso de las arenas y para las perforaciones horizontales dirigidas PHDs de diámetro grande, el límite superior de la presión de lodos resulta menos importante, cobrando mayor relevancia la magnitud mínima de la presión de lodos a ser aplicada. Esta presión mínima deberá producir el soporte necesario de la perforación, por lo cual es fundamental que la PHD siempre esté llena de los lodos de perforación, y que estos sean seleccionados de forma adecuada con el fin de que los mismos no se filtren, especialmente en arenas sueltas (Slavin et al, 2011).

3. Modelos constitutivos del suelo

En términos generales la solución de cualquier problema en el dominio de la mecánica de sólidos debe satisfacer al menos las siguientes tres (3) condiciones:

1. Equilibrio de esfuerzos
2. Compatibilidad de deformaciones
3. Leyes constitutivas del material o relaciones esfuerzo-deformación

La primera condición exige que los esfuerzos internos de cualquier elemento diferencial del suelo estén en equilibrio con las fuerzas externas, incluyendo su propio peso. La segunda condición, es decir la compatibilidad de deformaciones, denota cinemáticamente la relación que existe entre los desplazamientos y las deformaciones del elemento diferencial, con lo cual se establece la forma geométrica del elemento. Por último, la tercera condición define como se relacionan las componentes de esfuerzo con las de deformación para cualquier punto de la masa de suelo, lo que representa la naturaleza del material.

3.1 Elasticidad isotrópica

El comportamiento mecánico de los suelos y las rocas se puede aproximar con niveles de precisión diferente. La primera aproximación y también la más simple, es la ley de elasticidad isotrópica de Robert Hooke (1676), la cual se fundamenta en la proporcionalidad directa entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones generadas, la cual se ilustra en la Figura 3-1a.

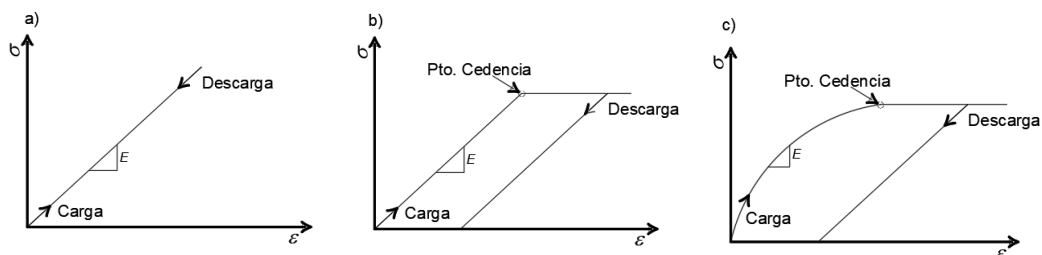


Figura 3-1. Respuesta elástica y plástica de un material. (a) Elástico lineal, (b) Elástico perfectamente plástico, (c) Inelástico plástico.

En general este modelo se base en dos (2) variables, la relación de Poisson ν , y el módulo de Young E . Sin embargo, en función del tipo de análisis, el modelo se puede formular a partir de otros módulos: el módulo de corte G , el módulo Bulk K , o el módulo odométrico E_{oed} , los cuales dependen de la relación de Poisson ν , y el módulo de Young E . Además, este modelo no implementa ningún criterio de fluencia o falla, lo que implica que el suelo siempre podrá recuperar su forma inicial sin importar el nivel de esfuerzos al que este sometido.

Debido a la sencillez del modelo, este es insuficiente para representar el comportamiento del suelo en forma confiable, incluso en el rango de las deformaciones pequeñas, pues ignoran aspectos como la trayectoria de esfuerzos, la dilatancia, el endurecimiento y el ablandamiento por deformación. Es importante destacar que en condiciones reales el comportamiento mecánico del suelo es altamente no lineal y las deformaciones son irreversibles.

3.2 Elasticidad lineal combinada con plasticidad perfecta

La plasticidad de una masa de suelo significa que las deformaciones son irreversibles no recuperables. Estas deformaciones no recuperables junto con la existencia de un esfuerzo de falla constituyen las principales mejoras del modelo elástico perfectamente plástico con respecto a la elasticidad isotrópica lineal (Chen et al., 1985).

En general, la teoría de la plasticidad discrimina que las deformaciones totales (ε_{ji}) están constituidas por la componente elástica (ε_{ji}^e) y la componente plástica (ε_{ji}^p), a través del principio de superposición como se muestra en la Ecuación 3.1.

$$\varepsilon_{ji} = \varepsilon_{ji}^e + \varepsilon_{ji}^p \quad (3.1)$$

Para evaluar si se alcanza o no la condición de plasticidad, el modelo constitutivo posee una superficie de fluencia o cedencia F , en función de los esfuerzos y las deformaciones. Cuando $F < 0$, el suelo se comportará de manera elástica, y si $F = 0$, el suelo experimentará deformaciones plásticas no recuperables, como se muestra en la Figura 3-2. En forma adicional, la teoría de la plasticidad (Hill, 1950) establece que la magnitud

de las deformaciones plásticas ϵ_{ji}^p es proporcional a la derivada de la función de cedencia F con respecto a los esfuerzos.

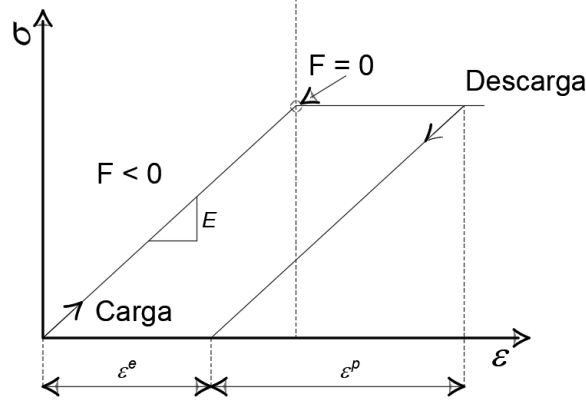


Figura 3-2. Idealización del modelo elástico perfectamente plástico

En forma complementaria a la superficie de cedencia F , los modelos de plasticidad incorporan otra superficie con el fin de definir los cambios de la superficie de cedencia con las deformaciones plásticas incrementales $\dot{\epsilon}_{ji}^p$. Esta función se denomina función de potencial plástico G . Otra componente del modelo es la regla de flujo, la cual determina como se producen los incrementos de la deformación plástica $\dot{\epsilon}_{ji}^p$, que son proporcionales a la derivada de la función de potencial plástico G con respecto a los esfuerzos (Chen et al., 1986).

Un modelo perfectamente plástico sin endurecimiento es un modelo constitutivo con una superficie de cedencia fija, lo que quiere decir que la superficie de cedencia, definida por los parámetros del modelo, no se ve afectada por los incrementos de la deformación plástica, es decir $F = G$. En estas condiciones se dice que el modelo incorpora una regla de flujo asociada o que cumple la ley de la normalidad.

De manera frecuente se emplea una superficie de cedencia que adopta una envolvente de falla de tipo Mohr - Coulomb, la cual es una extensión de la ley de fricción de Coulomb. La superficie de cedencia Mohr - Coulomb está compuesta por seis (6) funciones formuladas en términos de los tres (3) esfuerzos principales (σ'_1 , σ'_2 y σ'_3) y de dos (2) parámetros del suelo, el ángulo de fricción interna ϕ' y el intercepto de cohesión c' (Plaxis, 2020).

La condición $F_i = 0$ para el conjunto de las funciones de fluencia Mohr - Coulomb, donde F_i se usa para denotar cada una de las seis (6) funciones de fluencia individual, es un cono hexagonal fijo en el espacio de los esfuerzos principales, el cual se ilustra en la Figura 3-3.

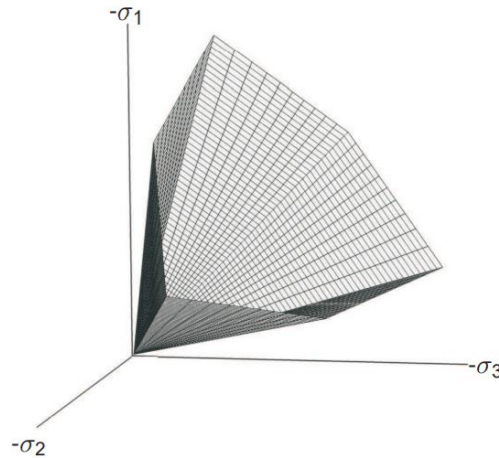


Figura 3-3. Superficie de cedencia con Mohr-Coulomb en el espacio de esfuerzos principales, extraído del Manual Plaxis 3D, 2020.

La variante del modelo elástico perfectamente plástico utilizada por el software Plaxis 3D 2020, corresponde a la formulación del modelo propuesto por (Smith, et al., 1982). En esta se incorpora el endurecimiento del suelo con base en el ángulo de dilatación ψ' , el cual es de utilidad para modelar los cambios de volumen positivo debidos a trayectorias de esfuerzos que producen esfuerzos cortantes en suelos muy densos. Aunque este escenario no es objeto de este estudio, se aclara que el modelo constitutivo permite analizarlo, con lo cual, al utilizar este parámetro de plasticidad, el modelo implementado en Plaxis 3D se describe como una regla de flujo no acoplada ($F \neq G$).

Cuando se emplea $c' > 0$, el criterio estándar de Mohr-Coulomb permite esfuerzos de tracción. Sin embargo, se debe hacer notar que los suelos no suelen soportar ningún esfuerzo de tracción. Para el caso en que los suelos pueden soportar esfuerzos de tracción algunos programas de computador, como Plaxis, incorporan un parámetro denominado la resistencia a la tracción del suelo σ_t , el cual se agrega a las funciones de cedencia mencionadas.

El modelo Mohr-Coulomb lineal elástico perfectamente plástico requiere un total de seis (6) parámetros, los cuales se pueden obtener a partir de los ensayos básicos de laboratorio y son comunes de determinar en la práctica. Estos seis (6) parámetros con sus unidades estándar se listan a continuación:

E :	Módulo de Young	[kN/m ²]
ν :	Relación de Poisson	[-]
c' :	Intercepto de cohesión	[kN/m ²]
ϕ' :	Ángulo de fricción	[°]
ψ' :	Ángulo de dilatación	[°]
σ_t :	Resistencia a la tracción	[kN/m ²]

Siendo σ_t el intercepto de la envolvente Mohr Coulomb con el eje horizontal (esfuerzos normales) y c' el intercepto de cohesión de la envolvente con el eje vertical (esfuerzos cortantes). Si el valor de σ_t es igual a 0, la envolvente de falla se restringe mediante el parámetro del intercepto de cohesión, lo que permite representar de mejor forma el comportamiento mecánico de los suelos, pues a diferencia de las rocas, la resistencia a la tracción de los suelos tiende a 0.

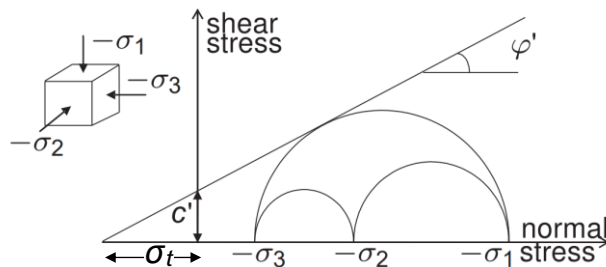


Figura 3-4. Parámetros de resistencia modelo Mohr Coulomb, adaptado del Manual Plaxis 3D, 2020.

4. Modelación numérica en Plaxis 3D

4.1 Introducción

Plaxis es un programa de computador basado en el método de los elementos finitos utilizado en el análisis de las deformaciones, desarrollado inicialmente en el año 1987 por la Universidad Tecnológica de Delft. A partir del año 2004 Plaxis se encuentra disponible para el análisis de problemas en dos (2) y en (3) dimensiones, programas denominados Plaxis 2D y 3D respectivamente. Para el presente trabajo de grado se utilizó el software Plaxis 3D versión 2020, el cual dispone de un módulo para el diseño de túneles, el cual facilita la modelación de la geometría y la generación de la secuencia constructiva de túneles y perforaciones horizontales dirigidas PHDs.

Para aprender el uso correcto del módulo de túneles fue necesario el estudio por parte del autor del presente trabajo del ejemplo número 6 del manual de Plaxis 3D, el cual corresponde a la simulación del avance de 25 m de longitud de un túnel excavado con la tecnología TBM (tunnel boring machine). El ejemplo incluye el avance en tramos de 1.5 m, hasta completar la excavación, así como el revestimiento en concreto del túnel en una longitud de 41.5 m. Con base en el desarrollo de este ejemplo el autor del trabajo presente adquirió los conocimientos necesarios para la correcta modelación de la presión de soporte (presión de lodos) y la simulación del proceso constructivo de una PHD.

Es importante notar que, para una adecuada interpretación de los resultados presentados más adelante, se debe tener en cuenta que Plaxis emplea la convención de signos estándar para esfuerzos de acuerdo con la mecánica de materiales. Es decir que, los esfuerzos de compresión son esfuerzos negativos (-) y los esfuerzos de tracción son esfuerzos positivos (+).

4.2 Caso de estudio de referencia

4.2.1 Introducción

Con el fin de verificar si el programa de computador Plaxis 3D se puede emplear para analizar el proceso de construcción de una perforación horizontal dirigida (PHD), el autor del trabajo presente modeló mediante Plaxis 3D el caso de estudio publicado por Shu y Ma (2015) (“Study of ground collapse induced by large-diameter horizontal directional drilling in sand layer using numerical modeling”, elaborado por Biao Shu y Baosong Ma y publicado el Canadian Geotechnical Journal en el año 2015).

En el artículo de Shu y Ma (2015) se exponen los resultados de la modelación en FLAC3D de un caso de estudio correspondiente a la construcción de una PHD, en la cual se instaló una tubería de acero de 48” para el transporte de gas natural. Esta PHD cruza el río Wuhan en China y tiene una longitud de 945 m, con una profundidad máxima hacia el centro del alineamiento de 29 m, y un ángulo de salida de 8°. La geometría del caso de estudio se ilustra en la Figura 4-1.

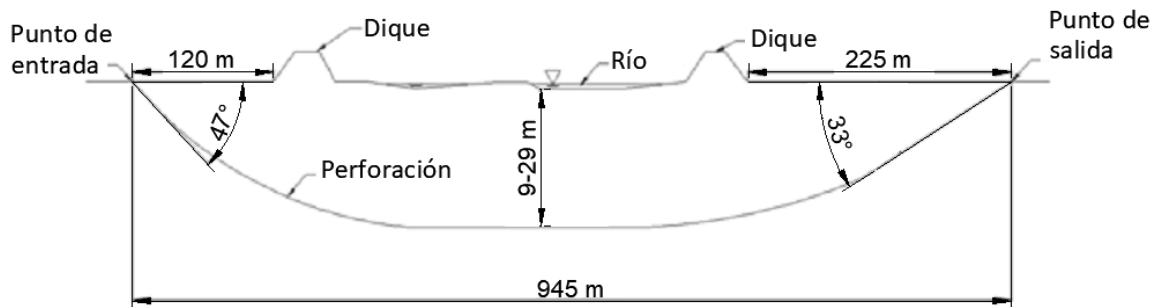


Figura 4-1. Geometría de la PHD del caso de estudio para verificación del uso de Plaxis 3D– sin escala (modificado de Shu y Ma, 2015).

4.2.2 Problema de estudio

Luego de la construcción de la perforación horizontal dirigida (PHD) bajo el río Wuhan, en los últimos 50 m a 60 m del punto de salida, se produjeron en superficie tres (3) áreas de hundimientos del terreno con diámetros entre 1.5 m a 3 m, generados en un intervalo de tiempo de 15 días entre cada uno de ellos. La generación de los hundimientos fue de gran interés debido a su cercanía a uno de los diques del río Wuhan.

Como se muestra en la Figura 4-2 y la Figura 4-3, en los últimos 50 m de longitud de la PHD se instaló un revestimiento o “casing”, esto como medida preventiva debido a que la PHD es de diámetro grande cerca de la superficie y está excavada en una capa de arena fina. Si bien el revestimiento se proyectó en una longitud mayor, debido a las magnitudes altas de fricción de la arena existente, la instalación del revestimiento no se efectuó en todos los 50 m de la PHD, lo que favoreció el colapso de la PHD cerca de la superficie del terreno, en donde no se instaló el revestimiento.

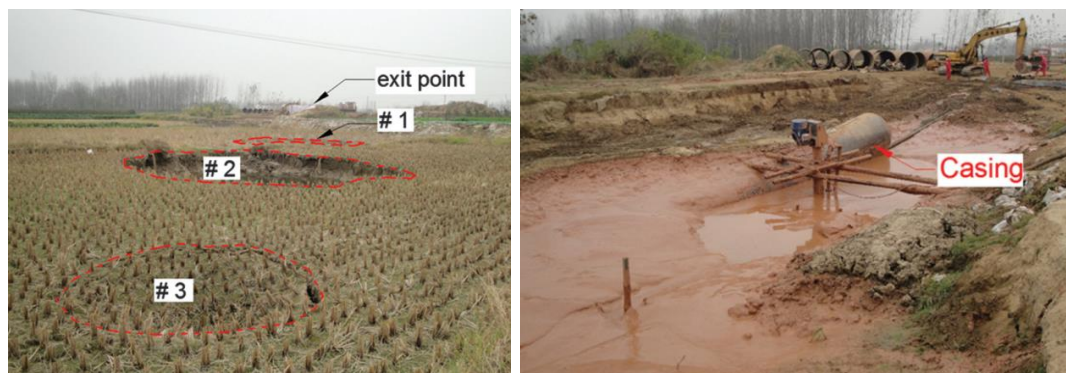


Figura 4-2. Fotografía de hundimientos en superficie y revestimiento instalado cerca de superficie (modificado de Shu y Ma, 2015).

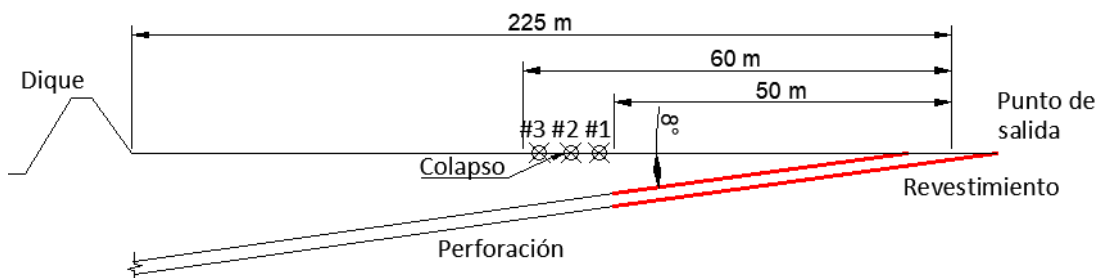


Figura 4-3. Localización de hundimientos en superficie con respecto al revestimiento – sin escala (modificado de Shu y Ma, 2015).

4.2.3 Perfil estratigráfico

El perfil estratigráfico del suelo en la zona de estudio consta de una capa delgada de arcilla limosa de 50 cm de espesor que sobreyace a una capa de arena fina, la cual se extiende hasta los 16 m de profundidad, la cual se localiza sobre una arenisca de resistencia alta.

40 Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

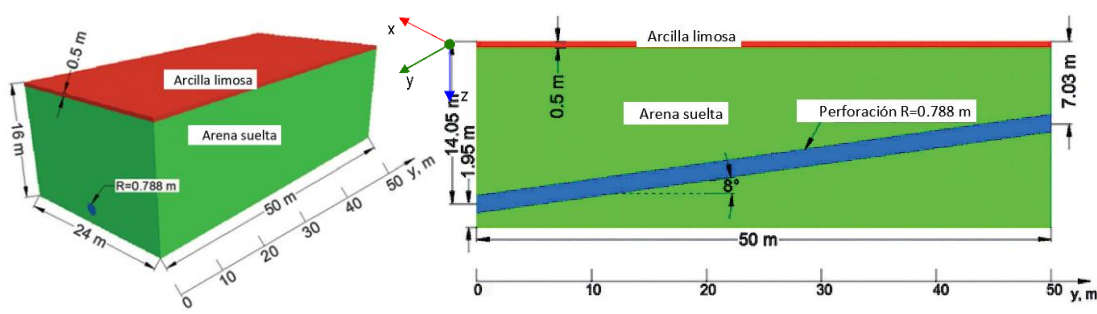


Figura 4-4. Modelo de FLAC3D y geometría de modelo de la PHD del caso de estudio (modificado de Shu y Ma, 2015).

Debido a la diferencia grande en las magnitudes de las propiedades geotécnicas de la arenisca y la arena fina, solo los dos (2) materiales geotécnicos superficiales se modelaron mediante el modelo constitutivo elástico perfectamente plástico con criterio de falla Mohr Coulomb. El estrato de arenisca no fue incluido en el dominio de la modelación numérica debido a que, por sus características altas de resistencia al corte, permiten utilizarlo como la frontera inferior del modelo de análisis. En la Tabla 4-1 se listan las propiedades de resistencia al corte indicadas en el artículo de Shu y Ma (2015) para cada uno de los materiales existentes.

Tabla 4-1. Parámetros de materiales geotécnicos modelados en caso de estudio. Extractado de Shu y Ma (2015).

Parámetro	Arcilla limosa	Arena fina	Arenisca
Módulo de elasticidad (MPa)	8.8	20.7	2100
Relación de Poisson	0.26	0.22	0.20
Intercepto de cohesión (kPa)	10	3	-
Angulo de fricción (°)	29	35	-
Resistencia a la tensión (MPa)	0	0	-
Densidad (kg/m ³)	1750	1920	2360
Módulo Bulk (MPa)	6.11	12.32	1166.67
Módulo de corte (MPa)	3.49	8.48	875

4.2.4 Modelación numérica

Shu y Ma (2015) efectuaron el análisis de la perforación horizontal dirigida (PHD) mediante el programa de computador FLAC3D, el cual utiliza el método de las diferencias finitas para estudiar el comportamiento geotécnico. En contraste, Plaxis por su parte usa el método variacional de los elementos finitos. El modelo numérico de Shu y Ma (2015) tiene un

volumen de suelo de longitud igual a 50 m, correspondiente al tramo de la PHD constituido por suelo débil, longitud en la cual no se instaló el revestimiento, la PHD se encuentra por fuera de la arenisca.

En profundidad, el volumen de suelo analizado tiene una altura de 16 m, lo que representa el espesor de la capa de arena fina. Por último, el ancho del volumen modelado es de 24 m, como se ilustra en la Figura 4-4.

A continuación, se describen de forma simplificada las etapas de modelación descritas en el artículo de Shu y Ma (2015):

1. Modelación del estado inicial de esfuerzos debidos al peso propio de los elementos de suelo.
2. Creación de la perforación horizontal dirigida (PHD) y la aplicación del gradiente de presión debido a de los lodos de perforación.

Como se indica en el artículo de Shu y Ma (2015), se considera que, tras la inyección de los lodos de perforación, parte de la bentonita inyectada se acumula en las paredes de la excavación, lo que forma una especie de costra denominada “filter cake” que genera una superficie impermeable, lo que permite asumir que la PHD siempre estará llena de los fluidos de perforación (Shu y Ma, 2015).

La presión de los lodos de perforación está dada por la cabeza piezométrica de este fluido, y se evalúa mediante la Ecuación 4-1.

$$P_{lodos} = \rho_{lodos}gh \quad \text{Ecuación 4-1}$$

En donde:

ρ_{lodos} es la densidad de los lodos igual a 1100 kg/m^3

g es la aceleración de la gravedad definida como 9.8 N/kg

h es la profundidad variable desde la superficie del terreno al eje de la PHD

42 Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

Con base en la Ecuación 4-1 se obtiene una magnitud de la presión de lodos dada por Shu y Ma (2015) igual a $75783 Pa$ a una profundidad $h = 7.03 m$, e igual a $151459 Pa$ para una profundidad $h = 14.05 m$.

De manera similar a los análisis numéricos realizados en el trabajo presente, en el artículo de Shu y Ma (2015) se presenta la simulación del proceso constructivo de una PHD mediante el desarrollo progresivo de cada uno de los diámetros. Esto con el fin de estudiar la etapa de escarificación, y por tanto el incremento gradual del diámetro de la PHD. El túnel piloto de Shu y Ma (2015) tiene un diámetro de $0.168 m$, el cual después de seis (6) procesos de escarificación por medio de seis (6) diámetros incrementales adicionales, alcanza el séptimo diámetro de la PHD, correspondiente a $1.575 m$, como se ilustra en la Figura 4-5.

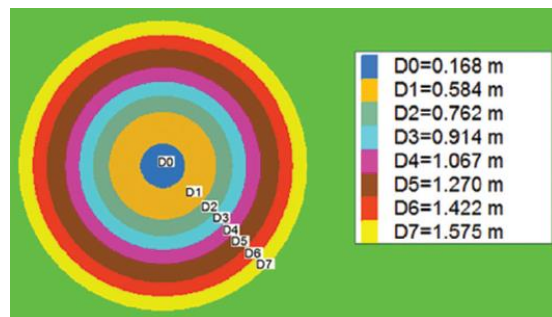


Figura 4-5. Diámetros utilizados para modelación de la secuencia de escarificación de la PHD (Shu y Ma, 2015).

Con el fin de evaluar la influencia de la secuencia constructiva, Shu y Ma (2015) compararon la modelación numérica anterior con un modelo en el cual se genera una única perforación con el diámetro final de la PHD. Es decir, Shu y Ma (2015) comparan los resultados entre un (1) modelo de perforación simple y un (1) modelo de perforación secuencial, como se indica en la Figura 4-6.

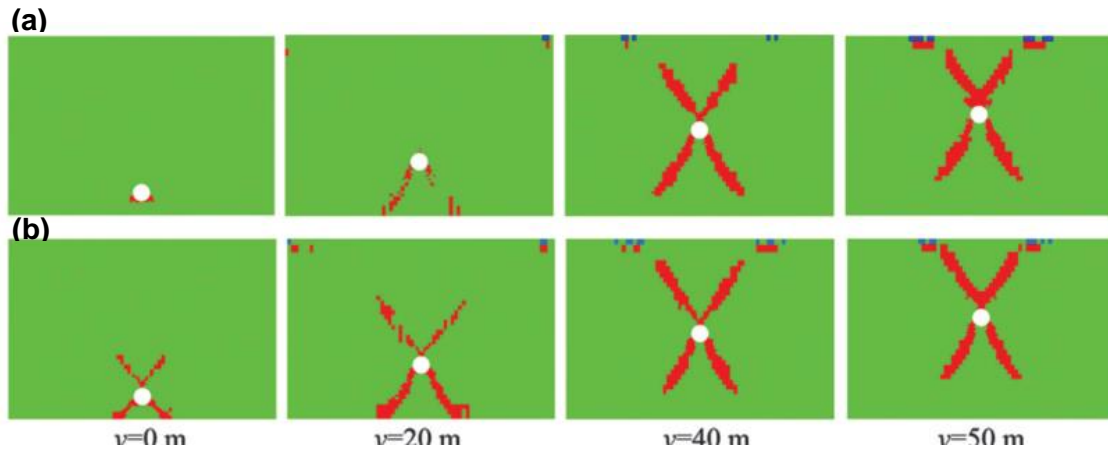


Figura 4-6. Comparación de los estados de falla para procesos constructivos supuestos (a) Perforación simple y (b) perforación secuencial (Shu y Ma, 2015).

Como se puede observar en la Figura 4-6 y es indicado por Shu y Ma (2015), los resultados en las dos (2) modelaciones propuestas son similares, en donde la principal diferencia corresponde a una longitud mayor en las zonas de falla cuando se realiza el proceso secuencial, en particular en las abscisas $y = 0\text{ m}$ y $y = 20\text{ m}$, es decir para las profundidades mayores de la PHD.

Shu y Ma (2015) efectuaron un análisis paramétrico para evaluar la importancia de algunos parámetros del suelo y de los lodos de perforación. Para lo anterior Shu y Ma (2015) analizaron varios modelos numéricos en los cuales se asignaron magnitudes diferentes a las cuatro (4) variables de análisis de la arena fina. En la Tabla 4-2 se listan las magnitudes de los parámetros que se variaron.

Tabla 4-2. Parámetros geotécnicos modelados en el caso de estudio. Elaborado con base en Shu y Ma (2015).

Módulo de elasticidad (MPa)	Coefficiente de Poisson	Intercepto de Cohesión aparente (kPa)	Ángulo de fricción (°)
15	0.18	1	28
20.7	0.22	2	30
25	0.27	3	35
30	0.32	5	40
-	-	8	45

De acuerdo con los resultados indicados por Shu y Ma (2015), la cohesión y el ángulo de fricción son los parámetros más importantes en la estabilidad de la perforación horizontal dirigida, los cuales son de mayor influencia en comparación al módulo de elasticidad y la relación de Poisson. Así mismo, con base en la evaluación de diámetros diferentes, la modelación realizada por Shu y Ma (2015) mediante FLAC3D permitió concluir que las perforaciones de mayor diámetro presentan franjas de falla más extensas.

Shu y Ma (2015) concluyeron que la causa principal de los hundimientos en superficie fue la baja cohesión de las arenas (3 kPa), estrato en el cual se localizó el punto de salida de la perforación horizontal dirigida (PHD) bajo el río Wuhan. Sumado a esta causa están la falta de soporte debido a una presión de lodos insuficiente y la ausencia del revestimiento proyectado en el tramo superficial, en donde la perforación era más susceptible a colapso.

4.3 Geometría del problema de análisis

La geometría del problema de análisis del trabajo presente tiene como base la geometría del caso de estudio descrito con anterioridad. El dominio del modelo numérico tiene una longitud horizontal de 50 m (eje y), ancho de 24 m (eje x), y altura de 20 m (eje z) como se ilustra en la Figura 4-7. La altura del modelo se incrementó en 4 m con respecto a la del estudio de Shu y Ma (2015), esto con el objetivo de evitar posibles efectos de frontera debido a la cercanía entre el extremo inferior de la perforación, localizado a 14 m de profundidad y el límite del modelo de Shu y Ma (2015), correspondiente a 16 m.

Al considerar que el suelo corresponde a un material isotrópico y que el problema tiene un eje de simetría (eje y), la modelación numérica realizada utiliza solo la mitad de la geometría de la perforación horizontal dirigida (PHD), en este caso la mitad izquierda, como se muestra en la Figura 4-7 y la Figura 4-8. Lo anterior permite reducir el número de elementos finitos de la malla, y por tanto disminuir los tiempos de cálculo del computador.

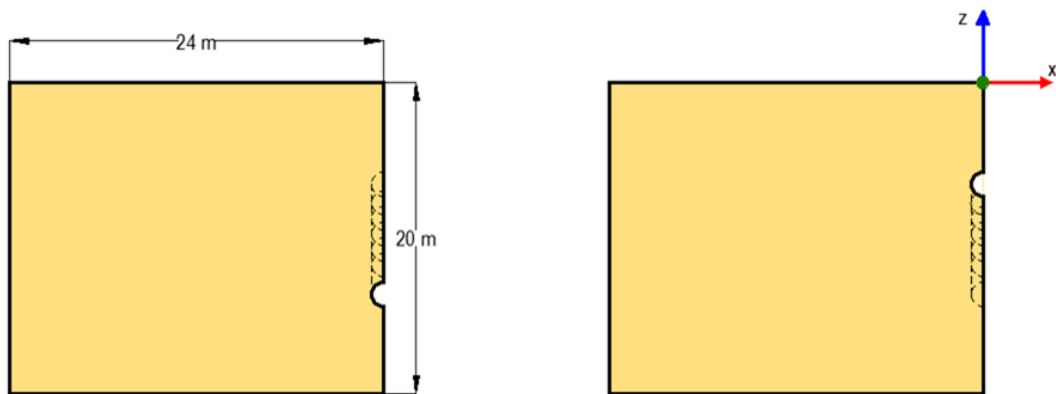


Figura 4-7. Alzado izquierdo y derecho de la geometría del dominio de análisis del problema de estudio.

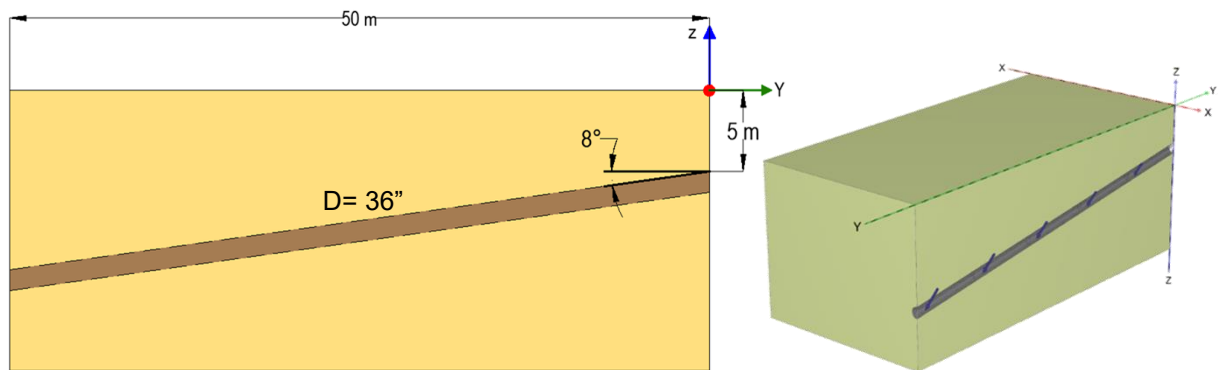


Figura 4-8. Perfil e isométrico de la geometría del problema (Elaborado con base en extracción de modelo en Plaxis 3D).

Se emplea un diámetro final de la perforación horizontal dirigida (PHD) igual a 56" (1.42 m), el cual corresponde a uno de los diámetros comerciales mayores utilizados en la construcción de una PHD. De manera similar al caso de estudio de Shu y Ma (2015), se emplean diámetros intermedios que representan el proceso de escarificación durante la construcción de una PHD. Para esto además del diámetro final de la PHD, se emplean dos (2) diámetros intermedios iguales a 20" (0.58 m) y 42" (1.06 m).

Por último, con el fin de evaluar el efecto de arco en la PHD y su variación en profundidad, los modelos numéricos de análisis consideran una profundidad al centro de la PHD variable entre 5 m y 12 m en los extremos de la PHD.

4.4 Generación de los materiales geotécnicos en Plaxis

Para la generación de los materiales geotécnicos Plaxis permite la definición del perfil estratigráfico mediante la creación de un sondeo “borehole”, en el cual, se incluyen los niveles que acotan los estratos, el nivel freático e incluso su variación espacial, como se ilustra en la Figura 4-9. Para el presente proyecto se considera un único estrato, en consecuencia, el nivel superior del suelo “Top” corresponde a 0 m y la base del sondeo “Bottom” al espesor del dominio del modelo, es decir 20 m. El nivel freático se asume en superficie (suelo saturado).

Una vez se define el perfil estratigráfico se crean los materiales para su posterior asignación. Para el estudio presente se emplearon como materiales de análisis, arenas con tres (3) densidades diferentes, es decir, con tres resistencias al corte diferentes.

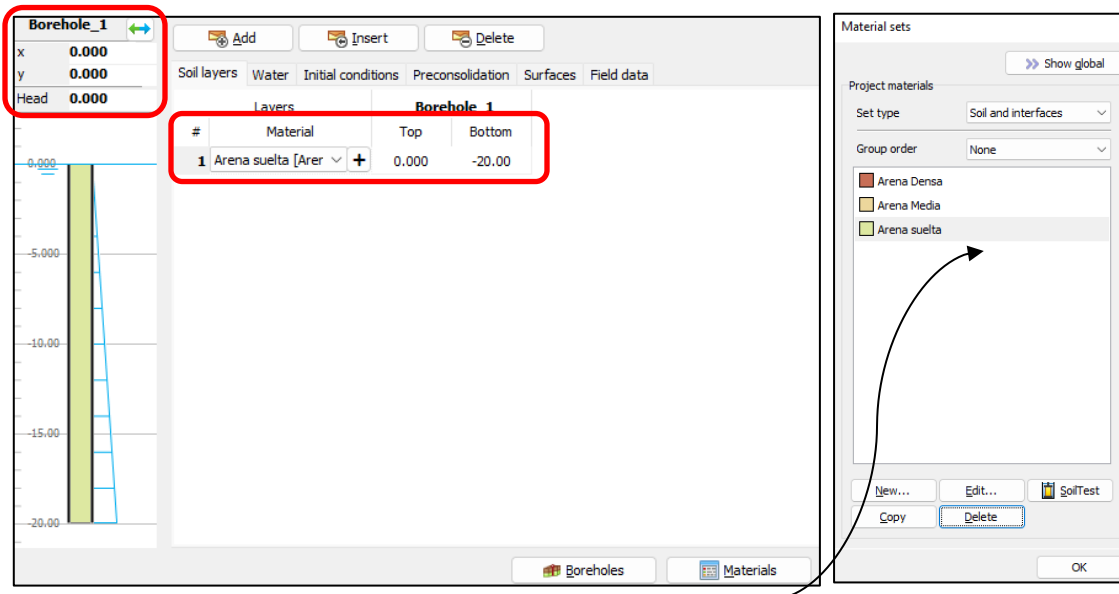


Figura 4-9. Ejemplo de creación de perfil estratigráfico y material geotécnico (extraído de modelo numérico en Plaxis 3D).

4.5 Propiedades geotécnicas seleccionadas

En la Tabla 4-3 se listan las propiedades geotécnicas seleccionadas para los materiales de estudio. Las magnitudes escogidas para cada tipo de material corresponden a valores típicos publicados en la literatura técnica para arenas de densidades diferentes.

Tabla 4-3. Propiedades geotécnicas de materiales.

Propiedad geotécnica	M1	M2	M3
	Arena suelta	Arena Media	Arena Densa
γ_{sat} (kN/m ³)	18	19	20
ϕ' (°)	26	33	40
c' (kN/m ²)	5	10	15
E (kN/m ³)	10000	25000	40000
ν	0.30	0.32	0.35
k_0	0.56	0.46	0.36
G (kN/m²)*	3846	9470	14810
E_{oed} (kN/m²)*	13460	35770	64200

* Parámetros geotécnicos calculados por Plaxis 3D a partir de las propiedades base

Los tres (3) materiales seleccionados se representan mediante el modelo elástico perfectamente plástico tipo Mohr Coulomb en condición drenada. Por lo tanto, en los análisis no se producen excesos de presión de poros. Dado que los materiales granulares son permeables, los incrementos de presión de poros del suelo saturado alrededor de la PHD se disipan de forma inmediata.

4.6 Selección de cargas para los análisis numéricos

Durante el proceso de construcción de una perforación horizontal dirigida (PHD) actúan sobre el suelo varias fuerzas, tales como las fuerzas cortantes generadas por los escarificadores, las fuerzas perpendiculares a las paredes debidas a los lodos de perforación, y las fuerzas de halado producidas en el proceso de instalación de la tubería.

Debido a que uno de los objetivos principales del trabajo presente es la evaluación de la influencia de los lodos de perforación en las deformaciones y los esfuerzos sobre una PHD, las fuerzas de corte y halado producidas por los equipos de perforación e instalación de la tubería no son consideradas. En consecuencia, en el documento presente solo se incluye la aplicación de las cargas ejercidas por los lodos de perforación.

Para la cuantificación de las magnitudes de las presiones de los lodos sobre las paredes de la perforación horizontal dirigida (PHD), se adopta la hipótesis de que la perforación

siempre está llena y que el flujo de los lodos es continuo. Teniendo en cuenta las características reológicas del fluido, se tiene que las moléculas de los lodos son más grandes que los vacíos de la masa del suelo, por lo tanto, se asume que estos no se exfiltran hacia el exterior de la PHD. En consecuencia, se adopta la hipótesis de que las paredes de la perforación son impermeables y que las cargas ejercidas por los lodos actúan en todo el perímetro de la perforación en dirección perpendicular a las paredes, y que la magnitud de la carga es función de la cabeza piezométrica del fluido.

Con el fin de evaluar la influencia de los lodos de perforación en el comportamiento de la PHD, se seleccionaron tres (3) magnitudes de presiones de lodos diferentes, obtenidas con base en el rango de variación de las densidades de los lodos.

Teniendo en cuenta que la PHD se modela desde una profundidad mínima h igual a 5 m, se calcula la magnitud de referencia de la presión de lodos a esa profundidad ($P_{\text{base } h = 5 \text{ m}}$). Además, debido a que los lodos de perforación se modelan como un fluido hidrostático, se calcula el gradiente (ΔP) aplicado sobre la PHD por cada metro de profundidad. Las dos magnitudes estimadas de presión (la presión de referencia a 5 m de profundidad y el gradiente de presión por cada metro de profundidad) se incluyen en el módulo de cálculo de túneles del programa Plaxis como una carga perpendicular la cual se incrementa en la vertical, como se explica en el numeral 4.7.

Para la determinación de las tres (3) magnitudes de la presión de lodos se emplea el rango de magnitudes de las densidades reportadas en la literatura técnica, entre 1050 kg/m^3 a 2000 kg/m^3 . En la Tabla 4-4 elaborada por el autor, se listan las presiones de lodos calculadas para los tres (3) escenarios (E1, E2 y E3) asumidos.

Tabla 4-4. Presiones de lodos calculadas para soporte de la perforación horizontal dirigida (PHD) de los tres escenarios de densidad de los lodos.

Escenario de presión de lodos	E1	E2	E3
$\rho_{\text{lodos}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1200	1400	1600
$P_{\text{base } h = 5 \text{ m}} \text{ (kN/m}^2\text{)}$	58.9	68.7	78.5
$\Delta P \text{ (kN/m}^2\text{) /m}$	11.8	13.7	15.7

4.7 Módulo de diseño de túneles del programa Plaxis

El módulo de túneles del programa de computador Plaxis está en la pestaña “structures”. Este módulo tiene los siguientes datos de entrada de la perforación: la geometría , las cargas, la trayectoria y la secuencia constructiva. A continuación, se detalla la configuración realizada para los análisis de la perforación horizontal dirigida (PHD) del estudio presente, haciendo uso del módulo de túneles del programa Plaxis para la modelación.

4.7.1 Sección transversal

- Tipo de sección: Circular.
- Sección: Mitad izquierda.
- Subsecciones: Corresponden a la sección circular para cada uno de los tres (3) diámetros seleccionados del proceso de construcción de la PHD, los cuales se ilustran en la Figura 4-10.

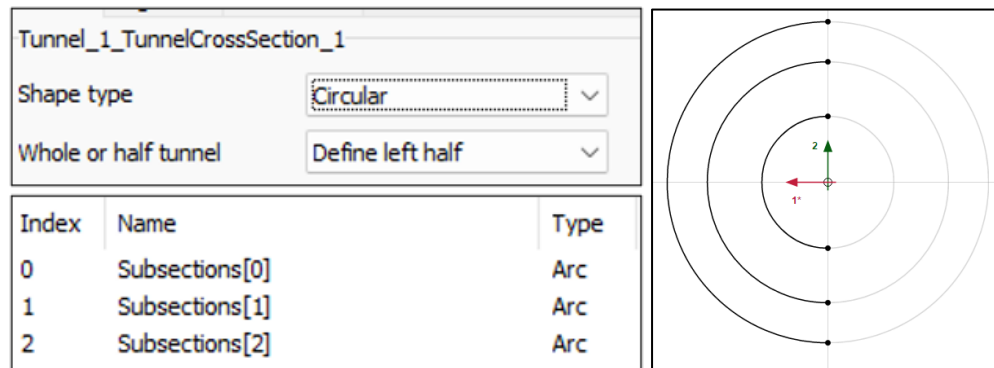


Figura 4-10. Configuración de la sección transversal de la PHD (extraído del modelo del programa Plaxis 3D).

4.7.2 Cargas del modelo de análisis del programa Plaxis

Como parte de las características del módulo de túneles del programa de computador Plaxis 3D están los tipos diferentes de cargas, entre ellas la carga de distribución tipo perpendicular con incremento vertical. Este tipo de carga se empleó en el estudio presente

50 Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

para representar y asignar la presión de lodos aplicada durante el proceso constructivo de la perforación horizontal dirigida (PHD). El proceso de cálculo de las cargas aplicadas se detalla en el numeral 4.6 del documento presente. A continuación, se explican los tipos de cargas utilizados en el módulo de túneles de Plaxis, los cuales se muestran en la Figura 4-11 y la Figura 4-12.

- Cargas de superficie en el perímetro de la sección (Slice): Magnitud variable según escenario y profundidad.
- Cargas de superficie en la cara de la PHD (Plane): Magnitud variable según escenario y profundidad.
- Distribución de carga de superficie: Perpendicular con incremento vertical.

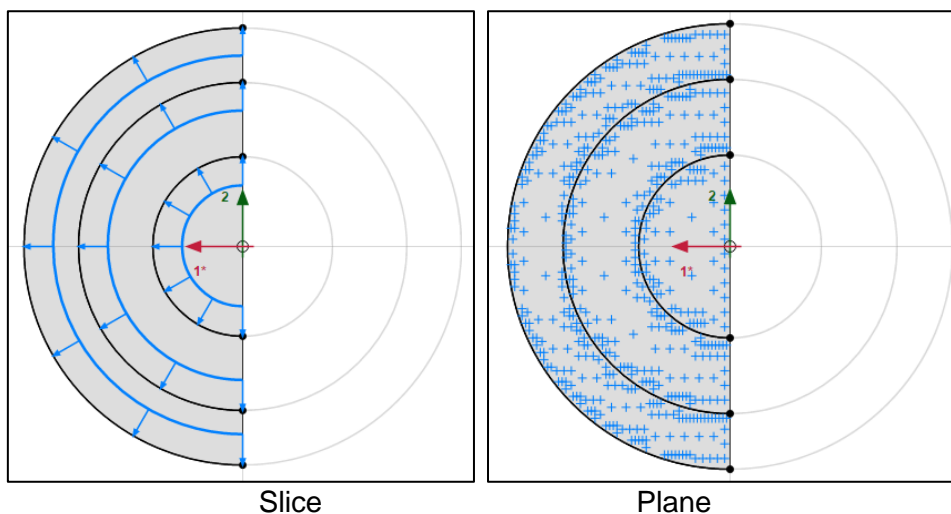


Figura 4-11. Cargas de superficie tipo “slice” y “plane” aplicadas sobre la PHD (extraído de modelo en Plaxis 3D).

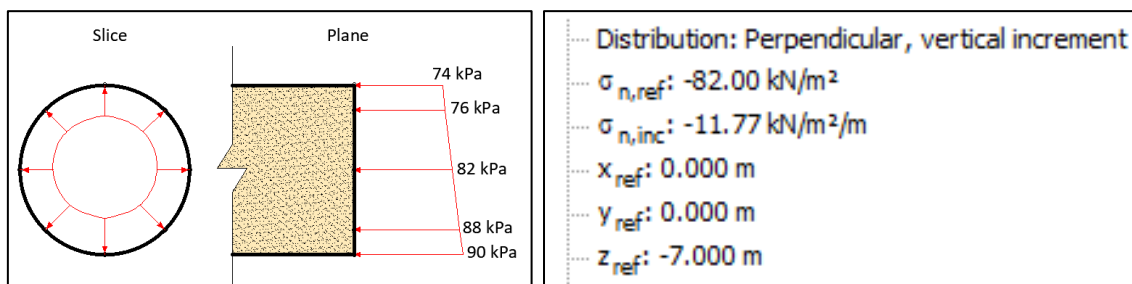


Figura 4-12. Ejemplo de carga perpendicular con incremento vertical aplicado sobre la PHD (elaborado con base en datos extraídos del modelo en Plaxis 3D).

4.7.3 Trayectoria de la perforación horizontal dirigida (PHD)

La trayectoria de la perforación horizontal dirigida (PHD) está determinada mediante el ángulo de entrada “start angle”, que en este caso representa el ángulo de salida de la PHD, adoptado igual a 8° , en forma similar a la geometría del caso de estudio de Shu y Ma (2015), como se ilustra en la Figura 4-13.

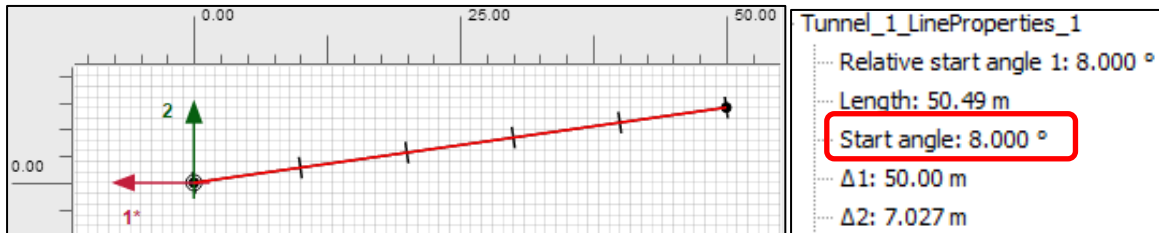


Figura 4-13. Definición de la trayectoria y de los segmentos de avance de la PHD (extraído de modelo en Plaxis 3D).

- Orientación del eje 1: Eje y
- Orientación del eje 2: Eje z
- Ángulo de entrada/salida de la PHD: 8°
- Longitud inclinada de la PHD: 50.49 m
- Diferencia de altura entre los extremos de la PHD: 7 m
- Número de segmentos de la PHD: 5

4.7.4 Mallado

De forma predeterminada el programa de computador Plaxis 3D utiliza elementos finitos sólidos de forma tetraédrica de 10 nodos, los cuales tienen nodos intermedios en los segmentos del elemento como se muestra en la Figura 4-14. Este tipo de elemento posee una precisión mayor en la aplicación de las funciones de interpolación de los esfuerzos y las deformaciones.

52 Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

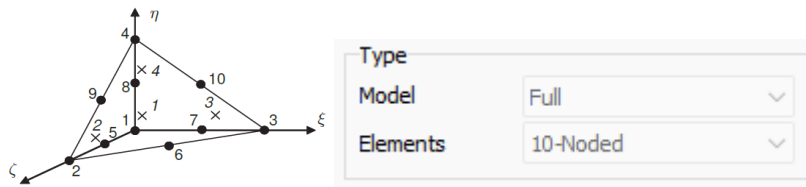


Figura 4-14. Esquema de elemento tetraédrico de 10 nodos definido en Plaxis 3D Manual de Plaxis 3D.

Para evaluar la densidad de mallado del modelo se efectuaron cálculos con las cuatro (4) opciones de malla predeterminadas en el programa Plaxis 3D: muy gruesa, media, fina y muy fina. En función de la opción seleccionada el número de los elementos se incrementa, con la consecuencia de que se obtienen magnitudes diferentes de los desplazamientos máximos en función de la densidad del mallado empleado.

En la Tabla 4-5 se lista la variación de los desplazamientos máximos obtenidos para los cuatro (4) tipos de mallado evaluados y en la Figura 4-15 se ilustra la densidad de la discretización en elementos obtenida para cada tipo de mallado.

Tabla 4-5. Desplazamiento máximo según tipo de mallado y número de elementos finitos.

.No	Tipo de mallado	Número de elementos	Desplazamiento máximo (m)
1	Muy grueso	8429	0.0112
2	Medio	9369	0.0114
3	Fino	12472	0.0114
4	Muy Fino	23193	0.0126

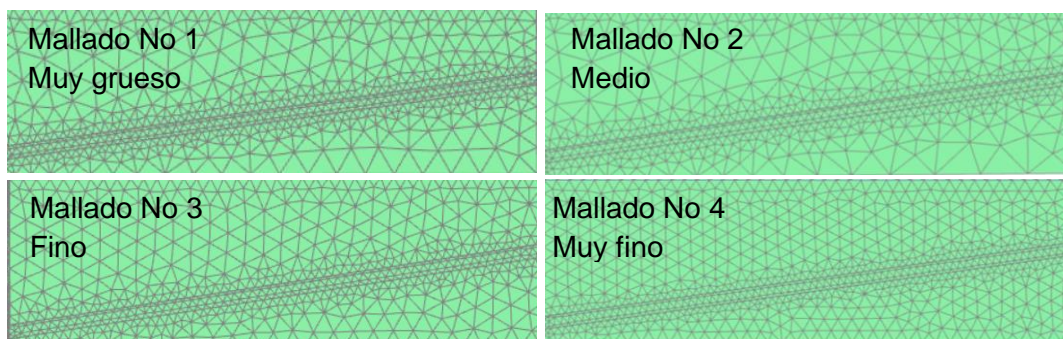


Figura 4-15. Tipos de mallados evaluados en Plaxis 3D según la densidad de la malla. (Extraído del modelo del programa Plaxis 3D).

Aún para la malla “fina” y “muy fina” empleada en los cálculos se obtuvieron estados de esfuerzos imposibles para los puntos del dominio analizado, en los cuales no se cumple el criterio de falla Mohr Coulomb, como se ilustra en el ejemplo de la Figura 4-18.

Así mismo, aunque el intercepto de cohesión definido en los materiales es diferente a cero, se obtuvieron esfuerzos de tracción (positivos) en el suelo de magnitudes superiores a 20 kN/m², los cuales se habían restringido previamente, ya que Plaxis permite acotar la resistencia a la tracción del suelo mediante la herramienta “cut off”, lo que implica la premisa de una resistencia a la tracción igual a 0 kN/m², la cual no se estaba obteniendo con los mallados evaluados.

Con el objetivo de determinar el tamaño a utilizar de los elementos del mallado, se realizó el refinamiento de la malla de elementos finitos a prueba y error hasta que los esfuerzos interpolados obtenidos fuesen posibles y la calidad de la malla fuese buena, véase Figura 4-20. Para ello además de utilizar una densidad tipo fina de los elementos, se ajustaron los parámetros de factor de tamaño mínimo del elemento y el factor global de la escala. Con lo anterior fue posible incrementar la densidad de la malla en el volumen de suelo en donde se prevén mayores desplazamientos.

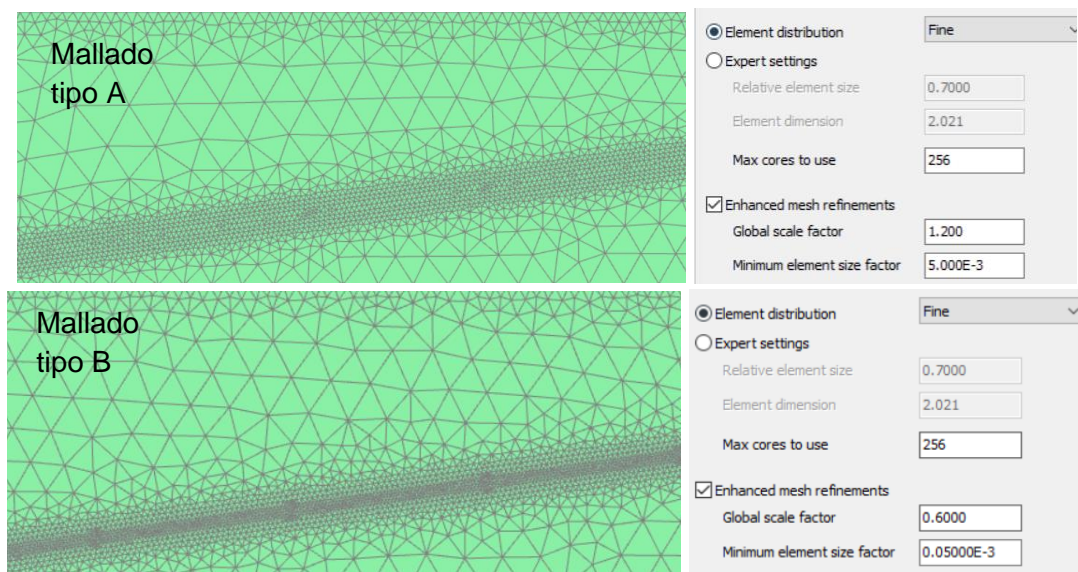


Figura 4-16. Mallado con distribución de elemento tipo fino y diferente refinado del mallado - sección longitudinal (Extraído de modelo en Plaxis 3D).

Como se muestra en la Figura 4-17, aunque ambos tipos de mallados “tipo A” y “tipo B” tienen una densidad de elementos tipo fina, el mallado tipo B tiene un número mayor de elementos en la región interior a los tres (3) radios evaluados de la perforación horizontal dirigida (PHD), en comparación con el mallado tipo A.

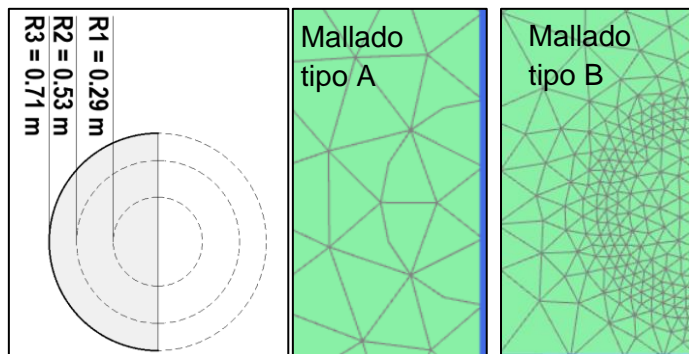


Figura 4-17. Mallado con distribución de elemento tipo fino y diferente refinado - sección transversal (extraído de modelo en Plaxis 3D).

Entre más lejos estén los elementos finitos de la perforación, las deformaciones son menores, por lo cual estos elementos pueden tener un mallado más grueso, como se ilustra en las secciones longitudinales de la Figura 4-16. Es decir, a medida que los elementos finitos se localizan a mayor distancia de la frontera de la PHD, los elementos tienen dimensiones mayores.

Al refinar la malla de elementos finitos en cercanías de la perforación horizontal dirigida se puede obtener una mejor variación en los esfuerzos verticales del suelo, como puede observarse en la Figura 4-19 en comparación con la Figura 4-18.

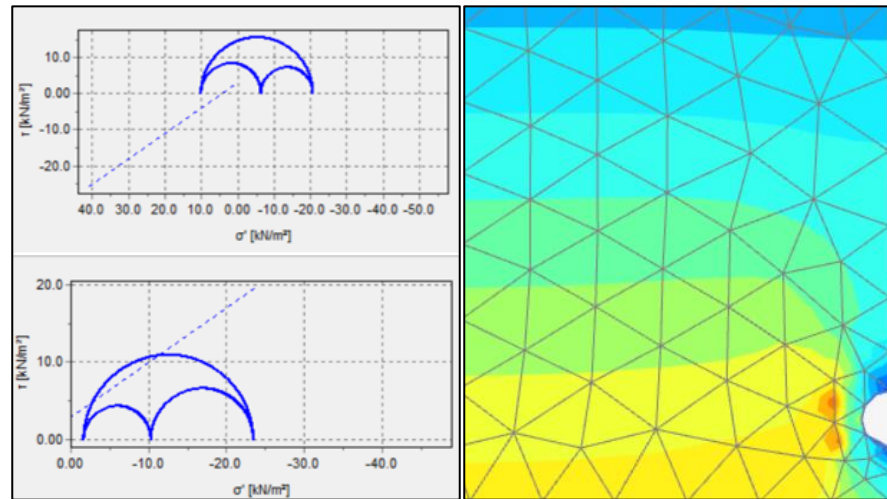


Figura 4-18. Ejemplo de un estado de esfuerzos verticales imposible obtenido con base en un mallado fino tipo A sin refinamiento en la zona adyacente a la PHD, sin escala (extraído de modelo en Plaxis 3D).

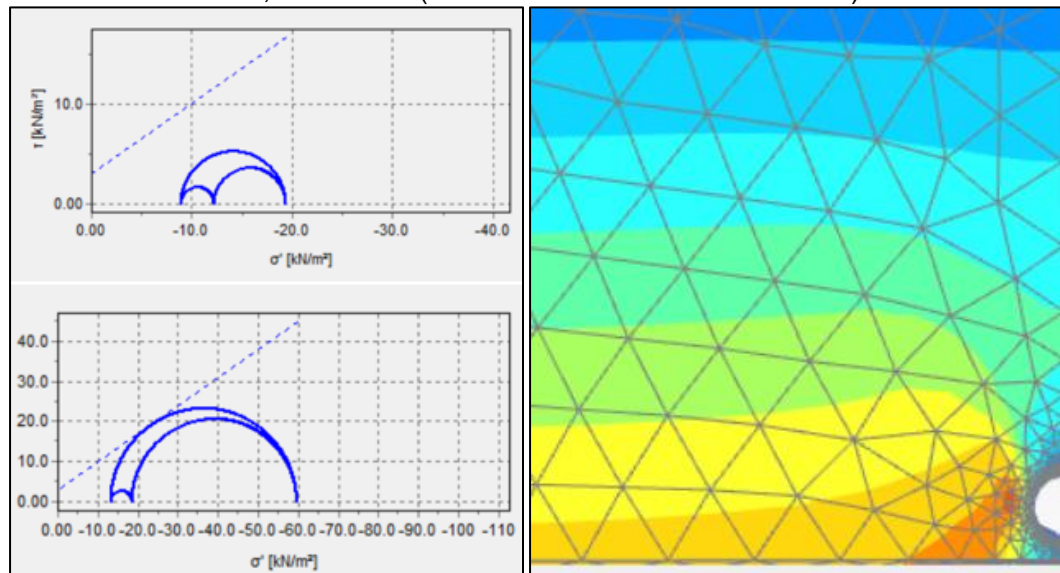


Figura 4-19. Ejemplo de estado de esfuerzos esperados obtenido con base en un mallado fino tipo B con refinamiento en la zona adyacente a la PHD, sin escala (extraído de modelo en Plaxis 3D).

Previo a la definición de las etapas de construcción, se revisó la calidad de la malla con el fin de no generar afectaciones en los resultados, para ello el mallado se chequea mediante la herramienta de Plaxis “Quality SICN”, evidenciando valores mínimos de 0.31, localizados cerca a la excavación de la PHD, en donde el refinado de la malla presenta mayor dificultad debido al tamaño reducido de los elementos. El mallado obtenido con valores de SICN

superiores a 0.3 (color verde) permite garantizar que la geometría de los elementos tipo tetraedro presenta un adecuado tamaño relativo, relación de aspecto y baja distorsión.

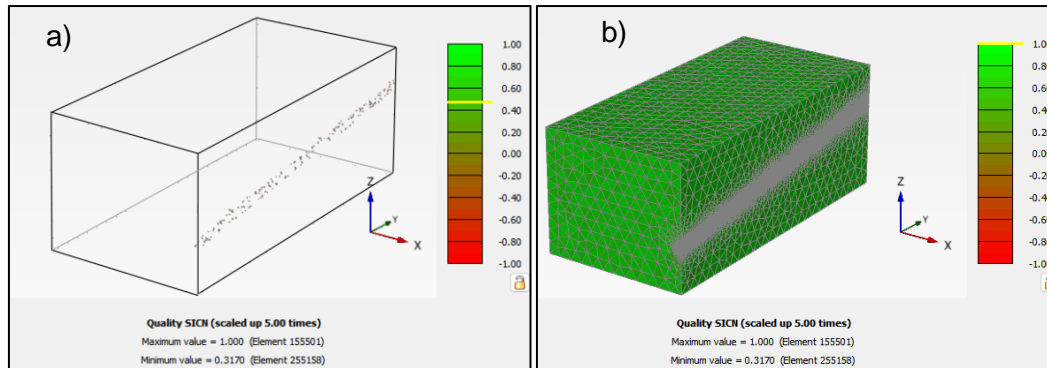


Figura 4-20. Chequeo de la calidad de la malla, a) SICN = 0.45 y b) SICN =1, sin escala (extraído de modelo en Plaxis 3D).

4.8 Etapas de construcción

Una vez determinada la geometría, adoptado las propiedades geotécnicas y realizado el mallado, por medio del módulo de túneles del programa de computador Plaxis 3D, se establecen las etapas constructivas de la perforación horizontal dirigida (PHD), cada una de las cuales se denomina fase (“Phase”). Con base en la geometría del modelo de análisis y los diámetros seleccionados (indicados en el numeral 4.3), con el objetivo de simular el proceso de construcción de la PHD, la longitud horizontal de 50 m se divide en cinco (5) partes iguales, como se ilustra en la Figura 4-21.

Teniendo en cuenta los tres (3) diámetros diferentes seleccionados para la construcción de la PHD, se establecen tres (3) avances, cada uno de ellos con cinco (5) fases, lo cual resulta en un total de 15 fases (“Phases”) para ser calculadas mediante el programa Plaxis 3D.

Con el fin de simular el proceso de construcción de la PHD, la primera etapa corresponde a un escarificador de 0.58 m de diámetro que avanza de izquierda a derecha, posteriormente en la segunda etapa se desplaza un escarificador con un diámetro de 1.07 m de derecha a izquierda, por último, se realiza la tercera y última etapa avanzando un escarificador con el diámetro final de 1.42 m de izquierda a derecha, como se muestra en la Figura 4-21.

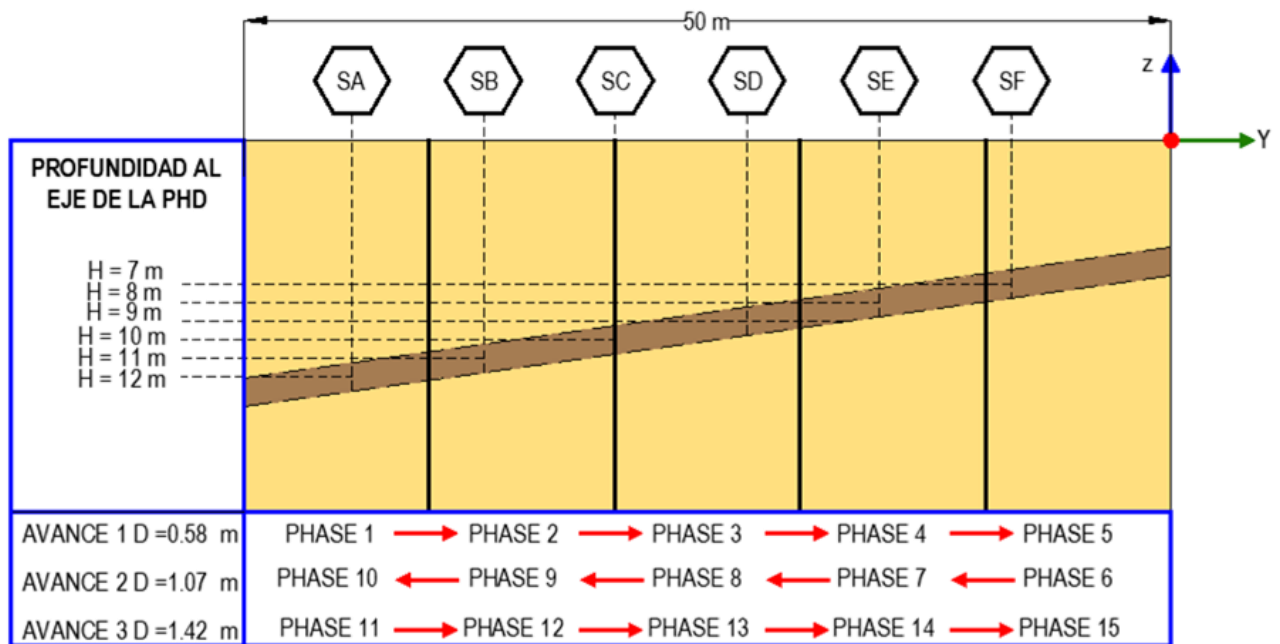


Figura 4-21. Secuencia de etapas de la evaluación del proceso de construcción de una PHD.

Los avances o etapas de construcción se realizaron de manera simplificada utilizando la herramienta “advancement step” del programa Plaxis 3D. Esta herramienta permite repetir el proceso combinado de eliminación del suelo, cambio de las condiciones de drenaje y aplicación de las cargas en cada una de las fases analizadas.

Debido al cambio en la dirección de avance de la perforación en las fases 6, 7, 8, 9 y 10, la dirección de las cargas aplicadas en la cara de la excavación se ajustó en forma manual, debido a que en el módulo de túneles del programa Plaxis 3D estas cargas tienen una dirección constante. Para realizar este proceso manual, en el explorador de fases de Plaxis 3D las cargas negativas se cambian a cargas positivas en las cinco (5) fases indicadas.

En la Figura 4-22 se ilustran cada una de las 15 fases de excavación mostradas en la Figura 4-21. Es importante notar que la fase inicial corresponde al estado inicial de esfuerzos, como se indica el numeral 4.13 del documento presente.

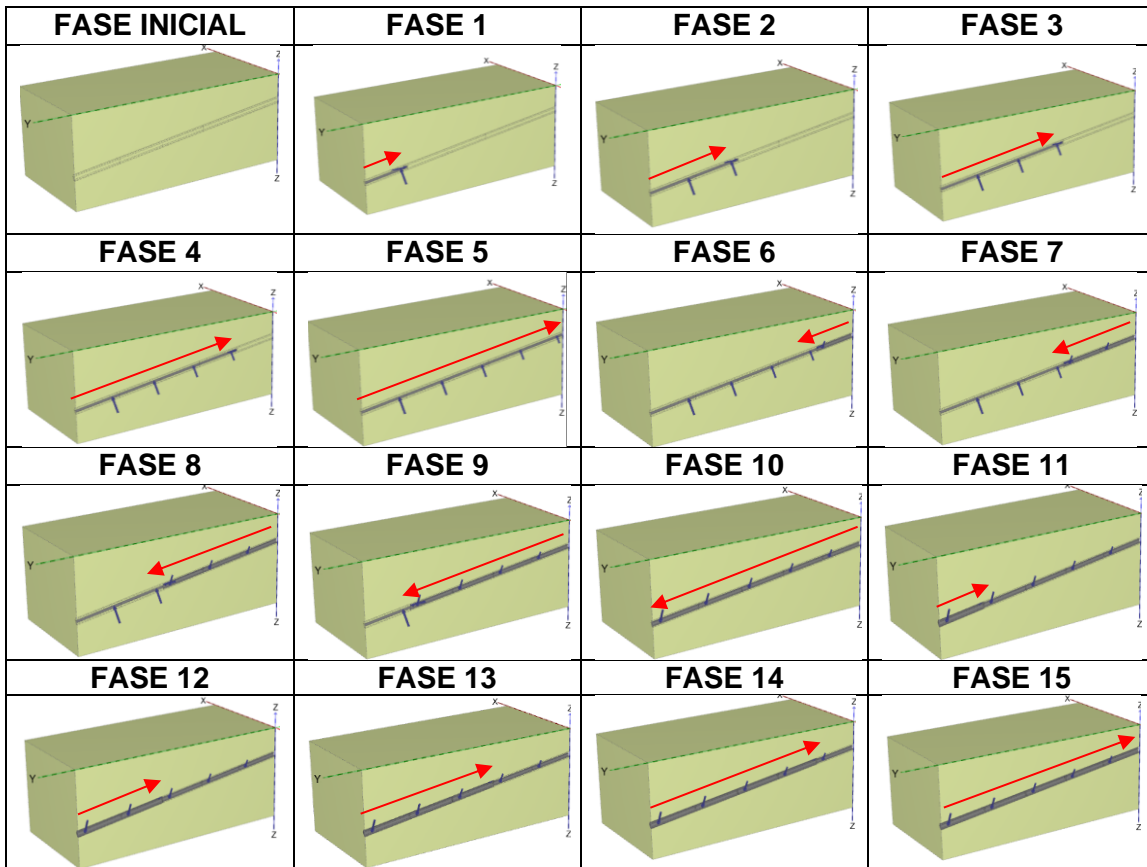


Figura 4-22. Etapas de construcción de una PHD evaluadas mediante el programa Plaxis 3D, vista isométrica. (Extraído del modelo analizado con Plaxis 3D).

4.9 Escenarios de análisis

Los análisis de la construcción de una perforación horizontal dirigida (PHD) del presente documento se basan en los cálculos numéricos en tres (3) dimensiones mediante el programa de computador Plaxis 3D para tres (3) escenarios diferentes de presión de lodos y tres (3) resistencias al corte (compacidades) del suelo arenoso. De la combinación de los tres (3) escenarios de presiones de lodos “E” y las (3) compacidades de una arena “M”, se obtienen los nueve (9) modelos de análisis listados en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6. Rótulos ID de los análisis realizados de una perforación horizontal dirigida (PHD).

Escenario de presión de lodos (E)	E1			E2			E3		
Material geotécnico granular según compacidad (M)	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Rótulo ID de identificación Modelo	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3

4.10 Secciones de análisis

En la Figura 4-23 se ilustran las seis (6) secciones de análisis seleccionadas para la evaluación de los resultados del programa Plaxis 3D sobre el proceso de construcción de una perforación horizontal dirigida (PHD). En las seis (6) secciones se extractaron los desplazamientos y los esfuerzos totales a diferentes profundidades de la PHD. Debido a que la primera etapa de la perforación se realiza de izquierda a derecha, la sección de análisis A corresponde a una profundidad de la PHD de 12 m, mientras que la última sección de análisis (F) corresponde a una profundidad de 7 m.

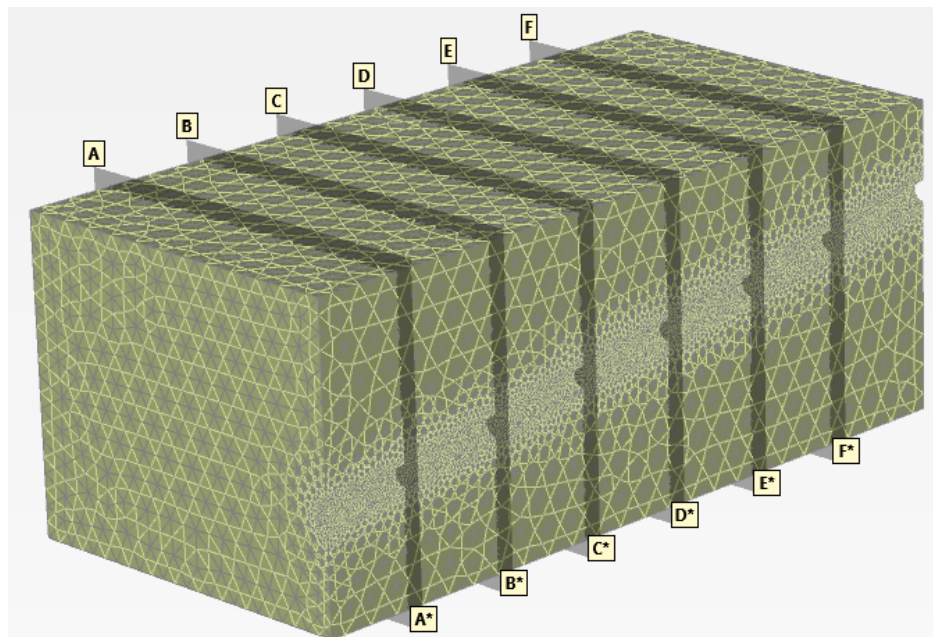


Figura 4-23. Vista isométrica del dominio de suelo analizado con la PHD en la cual se indica la localización de las seis (6) secciones de análisis. (Extraído del modelo en Plaxis 3D).

4.11 Puntos para la extracción de resultados

Para cada una de las seis (6) secciones de análisis de la perforación horizontal dirigida (PHD) indicadas en el numeral 4.9, se seleccionaron como puntos para la extracción de los resultados de desplazamientos y de los esfuerzos obtenidos a partir de los análisis numéricos, los nodos y los puntos de Gauss localizados en la clave, la batea y la pared de cada sección y diámetro de perforación. En la Tabla 4-7 se muestra la localización de los puntos para la extracción de los resultados de las secciones indicas en la Figura 4-24.

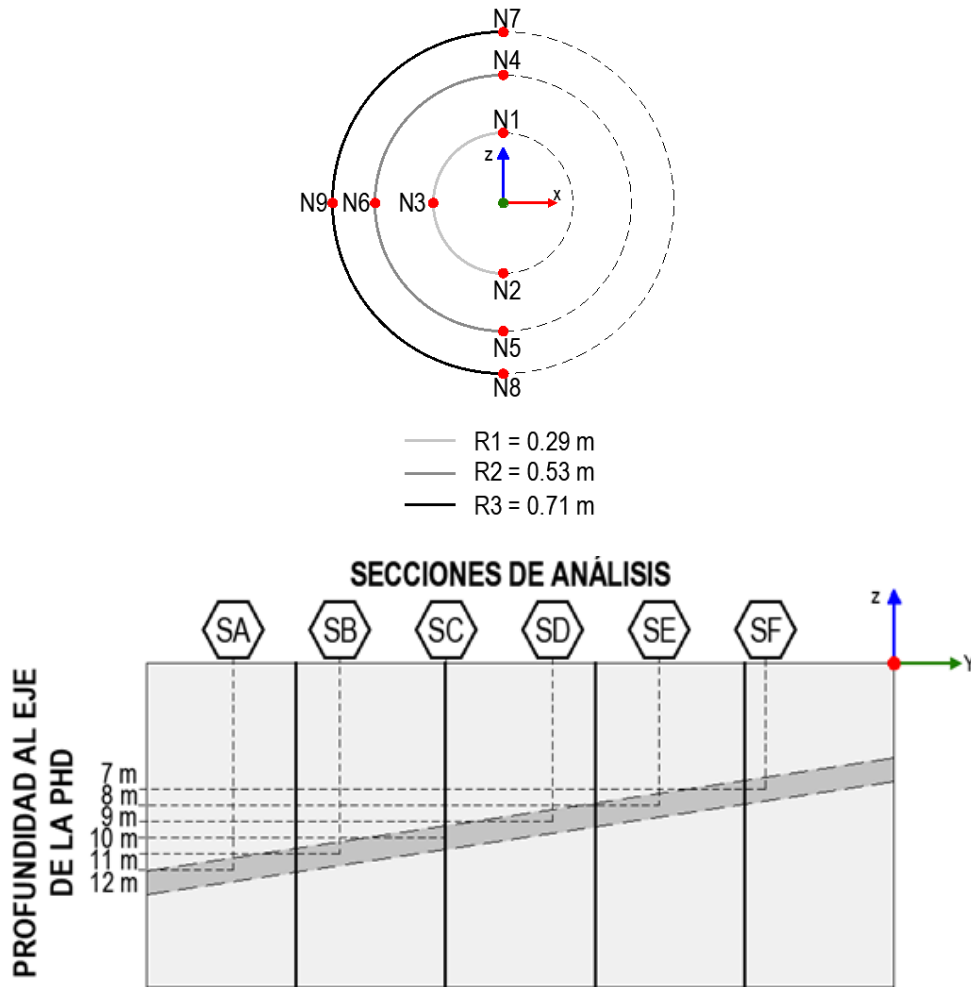


Figura 4-24. Esquema de la localización de los puntos para la extracción de los resultados en la clave, la batea y la pared de la PHD para los tres (3) diámetros y las 6 (seis) secciones de análisis.

Tabla 4-7. Profundidad (eje z) de los puntos para la extracción de los resultados en los tres (3) diámetros y las 6 (seis) secciones de análisis (eje y).

SECCIÓN DE ANÁLISIS	DIAMETRO RADIO	D1 = 0.58 m R1 = 0.29 m	D2 = 1.06 m R2 = 0.53 m	D3 = 1.42 m R3 = 0.71 m
SA Y= 47.18 m 				
SB Y= 37.07 m 				
SC Y= 29.95 m 				
SD Y= 22.84 m 				
SE Y= 15.72 m 				
SF Y= 8.61 m 				

4.12 Coordenadas de los puntos para la extracción de resultados

Teniendo en cuenta la orientación de los diámetros (eje x), la distancia longitudinal de la sección (eje y) y la profundidad de la perforación horizontal dirigida (PHD) (eje z), se establecieron las coordenadas espaciales aproximadas de los puntos para la extracción de los resultados localizados en los nodos y en los puntos de Gauss de los elementos finitos. En estos puntos se extractaron las deformaciones y los esfuerzos en la batea, la clave y la pared de la perforación. En la Tabla 4-8 y la Tabla 4-9 se listan las coordenadas y los rótulos de los nodos y los puntos Gauss respectivamente.

Tabla 4-8. Coordenadas de los puntos para la extracción de los resultados localizados en la clave, la batea y la pared de la PHD.

COORDENADAS EN CLAVE						COORDENADAS EN BATEA						COORDENADAS EN PARED					
RADIO	NODO	SECCIÓN	X	Y	Z	RADIO	NODO	SECCIÓN	X	Y	Z	RADIO	NODO	SECCIÓN	X	Y	Z
0.29	N1	F	0	-44.19	-11.71	0.29	N3	F	0	-44.19	-12.29	0.29	N3	F	-0.29	-44.19	-12
0.53	N4		0	-44.19	-11.47	0.53	N5		0	-44.19	-12.53	0.53	N6		-0.53	-44.19	-12.00
0.71	N6		0	-44.19	-11.29	0.71	N8		0	-44.19	-12.71	0.71	N9		-0.71	-44.19	-12.00
0.29	N1	E	0	-37.07	-10.71	0.29	N3	E	0	-37.07	-11.29	0.29	N3	E	-0.29	-37.07	-11.00
0.53	N4		0	-37.07	-10.47	0.53	N5		0	-37.07	-11.53	0.53	N6		-0.53	-37.07	-11.00
0.71	N6		0	-37.07	-10.29	0.71	N8		0	-37.07	-11.71	0.71	N9		-0.71	-37.07	-11.00
0.29	N1	D	0	-29.96	-9.71	0.29	N3	D	0	-29.96	-10.29	0.29	N3	D	-0.29	-29.96	-10.00
0.53	N4		0	-29.96	-9.47	0.53	N5		0	-29.96	-10.53	0.53	N6		-0.53	-29.96	-10.00
0.71	N6		0	-29.96	-9.29	0.71	N8		0	-29.96	-10.71	0.71	N9		-0.71	-29.96	-10.00
0.29	N1	C	0	-22.84	-8.71	0.29	N3	C	0	-22.84	-9.29	0.29	N3	C	-0.29	-22.84	-9.00
0.53	N4		0	-22.84	-8.47	0.53	N5		0	-22.84	-9.53	0.53	N6		-0.53	-22.84	-9.00
0.71	N6		0	-22.84	-8.29	0.71	N8		0	-22.84	-9.71	0.71	N9		-0.71	-22.84	-9.00
0.29	N1	B	0	-15.72	-7.71	0.29	N3	B	0	-15.72	-8.29	0.29	N3	B	-0.29	-15.72	-8.00
0.53	N4		0	-15.72	-7.47	0.53	N5		0	-15.72	-8.53	0.53	N6		-0.53	-15.72	-8.00
0.71	N6		0	-15.72	-7.29	0.71	N8		0	-15.72	-8.71	0.71	N9		-0.71	-15.72	-8.00
0.29	N1	A	0	-8.61	-8.29	0.29	N3	A	0	-8.61	-7.29	0.29	N3	A	-0.29	-8.61	-7.00
0.53	N4		0	-8.61	-7.29	0.53	N5		0	-8.61	-7.53	0.53	N6		-0.53	-8.61	-7.00
0.71	N6		0	-8.61	-6.29	0.71	N8		0	-8.61	-7.71	0.71	N9		-0.71	-8.61	-7.00

Tabla 4-9. Rótulos (ID) de los nodos y los puntos de Gauss de la PHD seleccionados para el análisis de los resultados.

NODOS SELECCIONADOS PARA LECTURA DE DESPLAZAMIENTOS

AVANCE	SECCIÓN DE ANÁLISIS	DIÁMETRO	N1	N2	N3
1-PHASE 1	A	0.29	7139	7000	142592
1-PHASE 2	B	0.29	7362	7237	145677
1-PHASE 2-3	C	0.29	50	49	7279
1-PHASE 3	D	0.29	7569	7444	147737
1-PHASE 4	E	0.29	7792	7667	149966
1-PHASE 5	F	0.29	8015	7890	151092

AVANCE	SECCIÓN DE ANÁLISIS	DIÁMETRO	N4	N5	N6
2-PHASE 6	F	0.53	5638	5403	120710
2-PHASE 7	E	0.53	5948	5784	125658
2-PHASE 7-8	D	0.53	38	6069	5838
2-PHASE 8	C	0.53	6281	6118	128544
2-PHASE 9	B	0.53	6564	6401	135036
2-PHASE 10	A	0.53	6779	6684	140274

AVANCE	SECCIÓN DE ANÁLISIS	DIÁMETRO	N7	N8	N9
3-PHASE 11	A	0.71	3351	2980	73597
3-PHASE 12	B	0.71	3847	3477	85804
3-PHASE 12-13	C	0.71	4295	4032	3672
3-PHASE 13	D	0.71	4372	4109	96519
3-PHASE 14	E	0.71	4712	4449	100459
3-PHASE 15	F	0.71	5162	4897	113773

PUNTOS DE GAUSS SELECCIONADOS PARA LECTURA DE ESFUERZOS

AVANCE	SECCIÓN DE ANÁLISIS	DIÁMETRO	N1	N2	N3
1-PHASE 1	A	0.29	1017749	1018061	1012321
1-PHASE 2	B	0.29	898811	898425	893180
1-PHASE 2-3	C	0.29	345803	346424	352360
1-PHASE 3	D	0.29	345215	344407	348238
1-PHASE 4	E	0.29	223604	224660	218967
1-PHASE 5	F	0.29	106219	106743	104349

AVANCE	SECCIÓN DE ANÁLISIS	DIÁMETRO	N4	N5	N6
2-PHASE 6	F	0.53	994031	993968	984234
2-PHASE 7	E	0.53	874988	875267	881986
2-PHASE 7-8	D	0.53	320696	321519	320563
2-PHASE 8	C	0.53	319684	320103	310460
2-PHASE 9	B	0.53	193705	200151	191173
2-PHASE 10	A	0.53	81315	81125	75875

AVANCE	SECCIÓN DE ANÁLISIS	DIÁMETRO	N4	N5	N6
3-PHASE 11	A	0.71	934796	913847	946179
3-PHASE 12	B	0.71	797861	817327	812269
3-PHASE 12-13	C	0.71	269669	274976	248641
3-PHASE 13	D	0.71	264643	272041	255058
3-PHASE 14	E	0.71	160779	131404	157372
3-PHASE 15	F	0.71	29016	26457	44357

4.13 Evaluación de los esfuerzos iniciales

En los análisis de elementos finitos como primera etapa previo a las fases de construcción se calcula el estado inicial de esfuerzos, el cual depende de la geometría del problema, el tipo de mallado y los modelos constitutivos adoptados para los materiales que conforman el dominio del problema. El programa Plaxis 3D ofrece las tres (3) alternativas siguientes para calcular los esfuerzos iniciales:

1. Procedimiento K0.
2. Carga gravitacional.
3. Campo de esfuerzos.

En la modelación numérica mediante el programa Plaxis 3D se utilizó el método para cálculo de los esfuerzos iniciales denominado “Carga gravitacional”, el cual evalúa la

respuesta esfuerzo-deformación del suelo debida a la aplicación de las fuerzas de cuerpo, en este caso debidas solo al peso propio del suelo. Es decir, se evalúan los esfuerzos verticales en equilibrio con el peso propio y los esfuerzos horizontales iguales a las reacciones laterales.

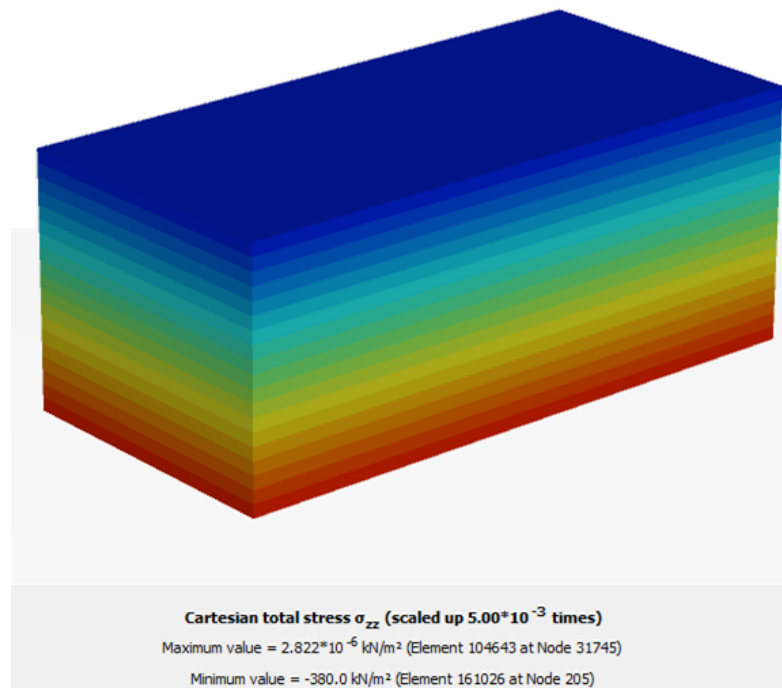

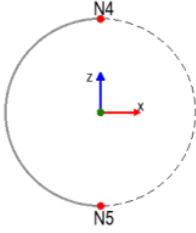
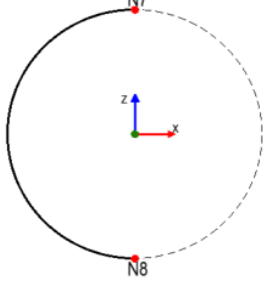


Figura 4-25. Ejemplo de esfuerzos verticales totales calculados en Plaxis 3D (extraído de modelo en Plaxis 3D).

En la Tabla 4-10 y la Tabla 4-11 se resumen los esfuerzos iniciales en todas las secciones y radios de la perforación para cada uno de los materiales definidos en el numeral 4.5, extraídos en la clave, la batea y la pared de la perforación horizontal dirigida (PHD), de acuerdo con los puntos listados en la Figura 4-24.

Tabla 4-10. Esfuerzos iniciales en la batea y clave de la PHD analizada según tipo de material y profundidad de cada sección de análisis.

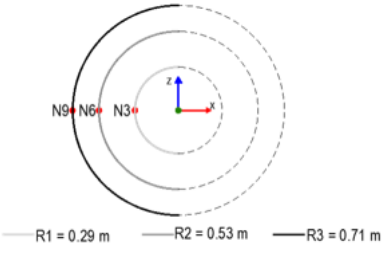
Material geotécnico	M1	M2	M3
	Arena suelta	Arena Media	Arena Densa
γ_{sat} (kN/m ³)	18	19	20

<p>AVANCE 1 R1= 0.29</p> 	PUNTO	SECCIÓN	z (m)	M1	M2	M3
	N1-CLAVE	F	-11.71	-210.8	-222.5	-234.2
	N2-BATEA		-12.29	-221.2	-233.5	-245.8
	N1-CLAVE	E	-10.71	-192.8	-203.5	-214.2
	N2-BATEA		-11.29	-203.2	-214.5	-225.8
	N1-CLAVE	D	-9.71	-174.8	-184.5	-194.2
	N2-BATEA		-10.29	-185.2	-195.5	-205.8
	N1-CLAVE	C	-8.71	-156.8	-165.5	-174.2
	N2-BATEA		-9.29	-167.2	-176.5	-185.8
	N1-CLAVE	B	-7.71	-138.8	-146.5	-154.2
	N2-BATEA		-8.29	-149.2	-157.5	-165.8
	N1-CLAVE	A	-6.71	-120.8	-127.5	-134.2
N2-BATEA	-7.29		-131.2	-138.5	-145.8	
<p>AVANCE 2 R1= 0.53</p> 	PUNTO	SECCIÓN	z (m)	M1	M2	M3
	N4-CLAVE	A	-11.47	-206.5	-217.9	-229.4
	N5-BATEA		-12.53	-225.5	-238.1	-250.6
	N4-CLAVE	B	-10.47	-188.5	-198.9	-209.4
	N5-BATEA		-11.53	-207.5	-219.1	-230.6
	N4-CLAVE	C	-9.47	-170.5	-179.9	-189.4
	N5-BATEA		-10.53	-189.5	-200.1	-210.6
	N4-CLAVE	D	-8.47	-152.5	-160.9	-169.4
	N5-BATEA		-9.53	-171.5	-181.1	-190.6
	N4-CLAVE	E	-7.47	-134.5	-141.9	-149.4
	N5-BATEA		-8.53	-153.5	-162.1	-170.6
	N4-CLAVE	F	-6.47	-116.5	-122.9	-129.4
N5-BATEA	-7.53		-135.5	-143.1	-150.6	
<p>AVANCE 3 R1= 0.71</p> 	PUNTO	SECCIÓN	z (m)	M1	M2	M3
	N7-CLAVE	F	-11.29	-203.2	-214.5	-225.8
	N8-BATEA		-12.71	-228.8	-241.5	-254.2
	N7-CLAVE	E	-10.29	-185.2	-195.5	-205.8
	N8-BATEA		-11.71	-210.8	-222.5	-234.2
	N7-CLAVE	D	-9.29	-167.2	-176.5	-185.8
	N8-BATEA		-10.71	-192.8	-203.5	-214.2
	N7-CLAVE	C	-8.29	-149.2	-157.5	-165.8
	N8-BATEA		-9.71	-174.8	-184.5	-194.2
	N7-CLAVE	B	-7.29	-131.2	-138.5	-145.8
	N8-BATEA		-8.71	-156.8	-165.5	-174.2
	N7-CLAVE	A	-6.29	-113.2	-119.5	-125.8
N8-BATEA	-7.71		-138.8	-146.5	-154.2	

66 Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

Tabla 4-11. Esfuerzos iniciales en la pared de la PHD según tipo de material y profundidad de cada sección de análisis.

Material geotécnico	M1	M2	M3
	Arena suelta	Arena Media	Arena Densa
γ_{sat} (kN/m ³)	18	19	20

 <p>R1 = 0.29 m R2 = 0.53 m R3 = 0.71 m</p>	PUNTO	SECCIÓN	z (m)	M1	M2	M3	
	N3 = N6 = N9		A	-7	-126.0	-133.0	-140.0
			B	-8	-144.0	-152.0	-160.0
			C	-9	-162.0	-171.0	-180.0
			D	-10	-180.0	-190.0	-200.0
			E	-11	-198.0	-209.0	-220.0
			F	-12	-216.0	-228.0	-240.0

5. Análisis de resultados

Una vez efectuados los cálculos numéricos tridimensionales de la perforación horizontal dirigida (PHD) mediante el programa de computador PLAXIS 3D de los nueve (9) escenarios expuestos en el numeral 4.9, se extrajeron los resultados (Output) de los desplazamientos verticales y horizontales de los nodos y puntos de Gauss seleccionados, los cuales se enumeran en la Tabla 4-9.

En la Figura 5-1 y la Figura 5-2 se presentan dos (2) ejemplos de los desplazamientos totales obtenidos para diferentes profundidades y diámetros de análisis en dos (2) de los nueve (9) escenarios de la PHD analizada en el trabajo presente. El consolidado de los resultados de los desplazamientos verticales en la clave y la batea, y los desplazamientos horizontales en la batea para los nueve (9) modelos de análisis se muestran en la Figura 5-10 y Figura 5-11 respectivamente.

Por otra parte, en la Figura 5-3 y la Figura 5-4 se presentan dos (2) ejemplos de las magnitudes de los esfuerzos verticales totales obtenidos para diferentes profundidades y diámetros de análisis en dos (2) de los nueve (9) escenarios de cálculo evaluados en el trabajo presente. El consolidado de los resultados para los nueve (9) modelos de los esfuerzos totales actuantes en la clave, la batea y la pared de la perforación se presentan en la Figura 5-14, la Figura 5-15 y la Figura 5-16.

Con el fin de examinar los mecanismos de deformación y de falla del suelo producidos por la ejecución de la perforación horizontal dirigida (PHD), en la Figura 5-5 y la Figura 5-6 se presentan dos (2) ejemplos de las deformaciones cortantes γ_{zx} obtenidas para diferentes profundidades y diámetros de análisis en dos (2) de los nueve (9) escenarios calculados en el trabajo presente. Se debe tener en cuenta que las figuras presentadas corresponden a recortes de las secciones del modelo, por lo cual, se aclara que las deformaciones cortantes evidenciadas no se desarrollan hasta los límites del dominio computacional, véase la escala de la excavación en comparación con el recorte; el área de influencia puede observarse de manera correcta por ejemplo en la Figura 5-1 y Figura 5-3.

El total de los resultados examinados para las secciones extraídas en los nueve (9) escenarios de análisis de la perforación horizontal dirigida PHD se incluyen en los anexos listados en el numeral 7 del trabajo presente.

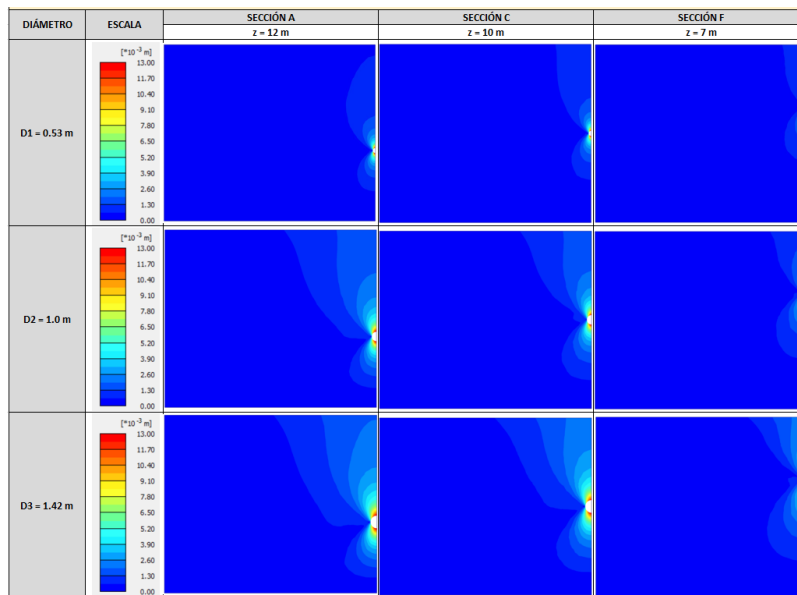


Figura 5-1. Desplazamientos totales calculados para el modelo de análisis 1.2 a profundidades diferentes. Escenario 1 – Arena media (elaborado con base en los resultados en Plaxis 3D).

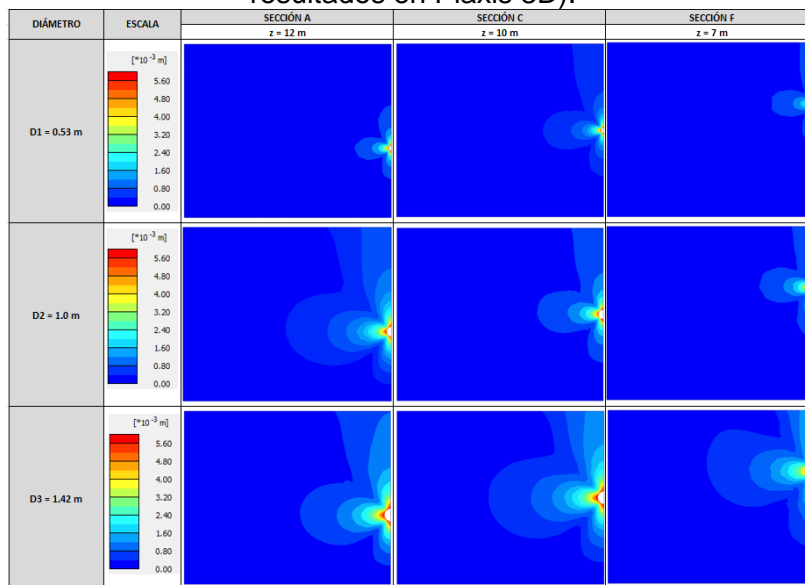


Figura 5-2. Deformaciones totales calculados para el modelo de análisis 3.1 a profundidades diferentes. Escenario 3 – Arena suelta (elaborado con base en los resultados en Plaxis 3D).

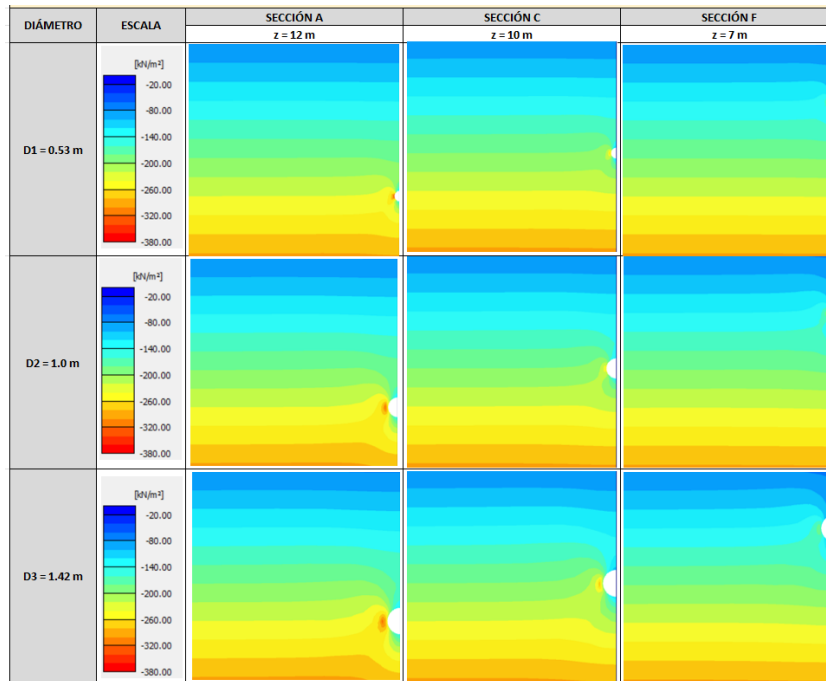


Figura 5-3. Esfuerzos verticales totales calculados para el modelo de análisis 1.2 a profundidades diferentes. Escenario 1 – Arena media (elaborado con base en los resultados en Plaxis 3D).

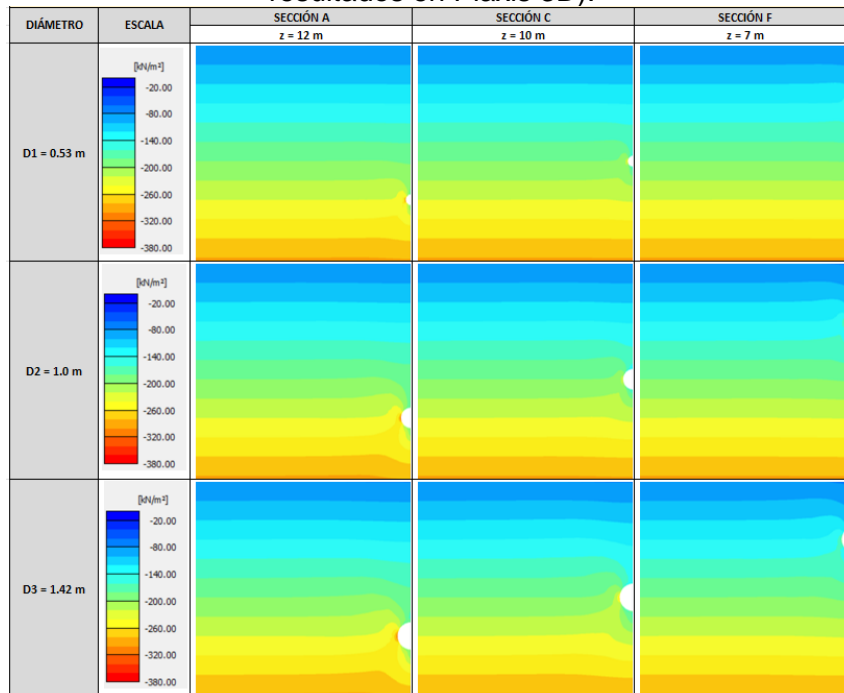


Figura 5-4. Esfuerzos verticales totales calculados para el modelo de análisis 3.1 a diferentes profundidades. Escenario 3 – Arena suelta (elaborado con base en los resultados en Plaxis 3D).

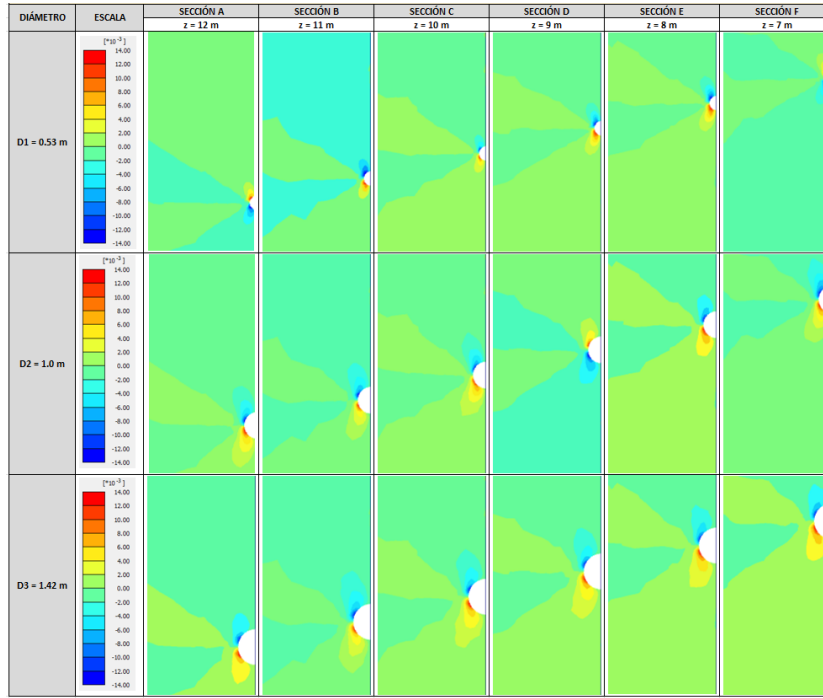


Figura 5-5. Deformaciones cortantes calculadas para el modelo de análisis 1.2 a profundidades diferentes. Escenario 1 – Arena media (elaborado con base en los resultados en Plaxis 3D).

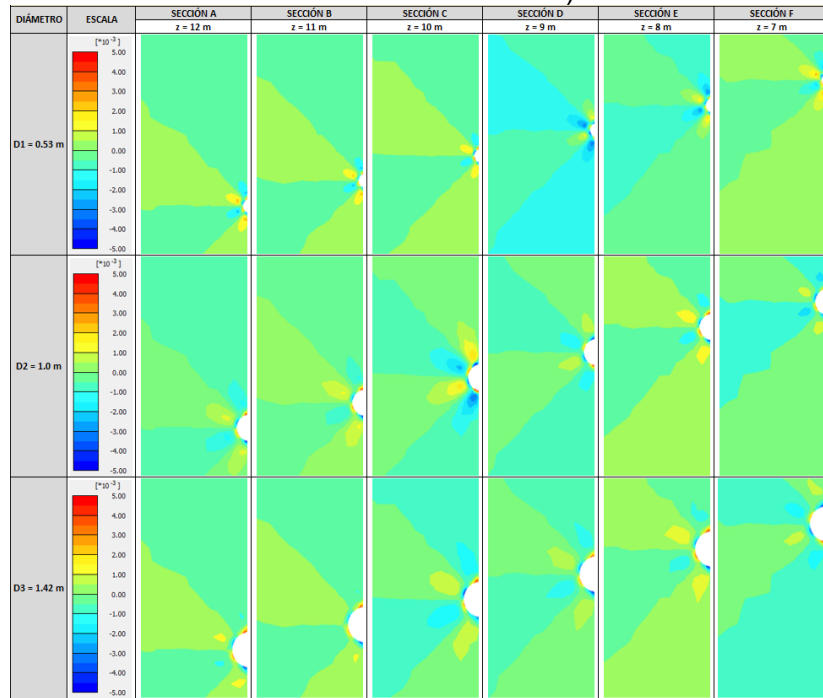


Figura 5-6. Deformaciones cortantes calculadas para el modelo de análisis 3.1 a profundidades diferentes. Escenario 3 – Arena suelta (elaborado con base en los resultados en Plaxis 3D).

Con base en los resultados expuestos antes y con el fin de evaluar la relación existente entre las deformaciones totales, el efecto de arco y el mecanismo de deformación, se expone mediante figuras una comparación relativa (sin escala gráfica) de la sección de análisis “A” en dos (2) de los modelos de análisis realizados con el programa Plaxis 3D.

En la Figura 5-7 se puede observar un primer mecanismo de deformación con una variación grande de los esfuerzos verticales totales, mostrando la convergencia de la excavación.

En la Figura 5-8 se ilustra un segundo mecanismo de deformación en donde la variación en los esfuerzos verticales totales es menor y el mecanismo de deformación no indica la convergencia de la perforación, sino que la PHD tiende a experimentar aplastamiento. Es importante notar que las deformaciones cortantes y_{zx} que se observan en la Figura 5-7 no se evidencian en la Figura 5-8.

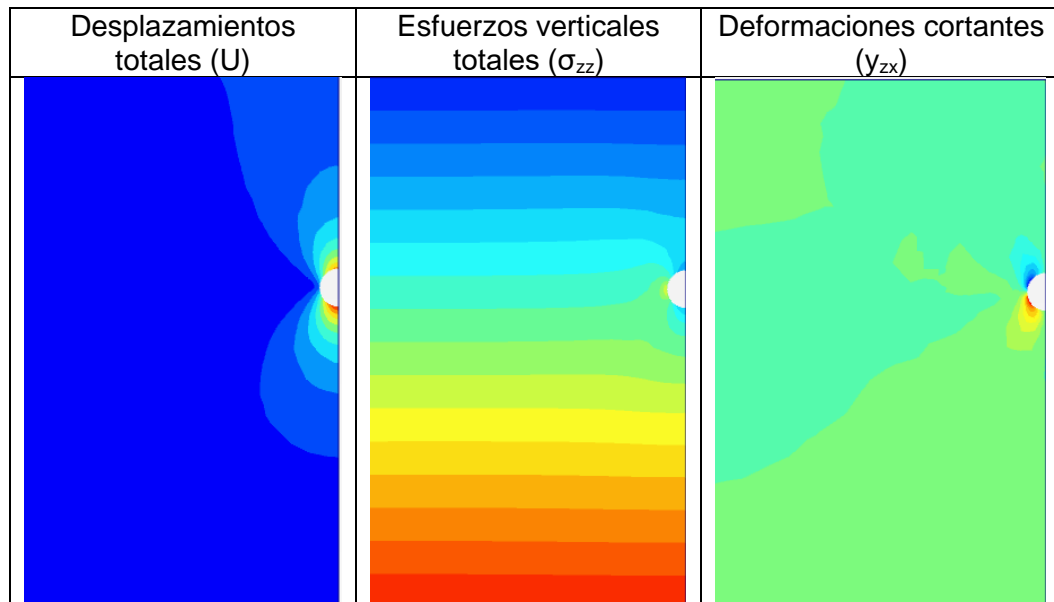


Figura 5-7. Recorte de los resultados de los cálculos del modelo de análisis 1.3. Escenario 1 – Arena densa, diámetro $D3 = 1.42$ m y profundidad $z = 11$ m, sin escala (extraído de modelo en Plaxis3D).

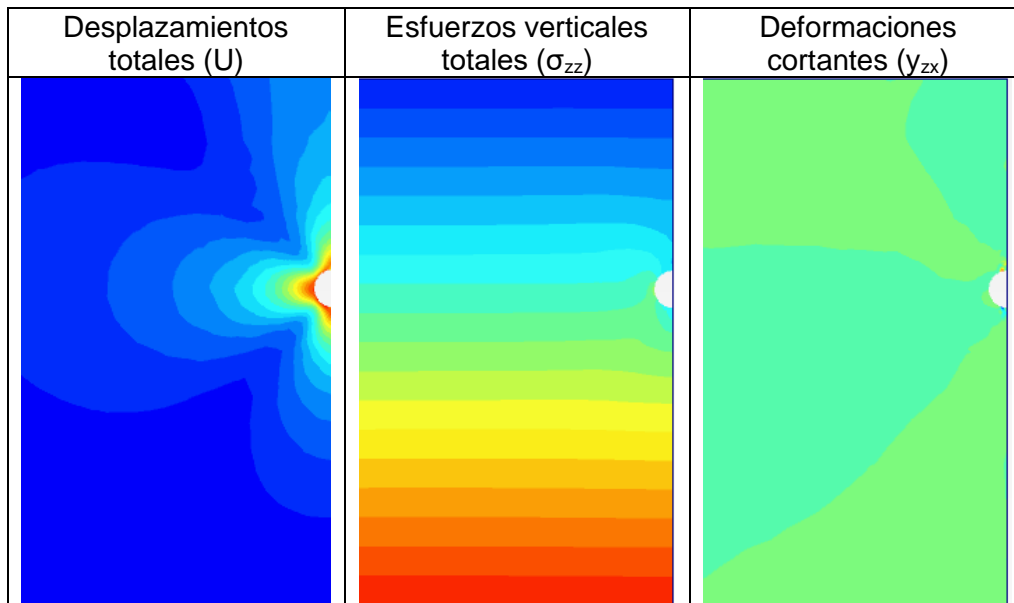
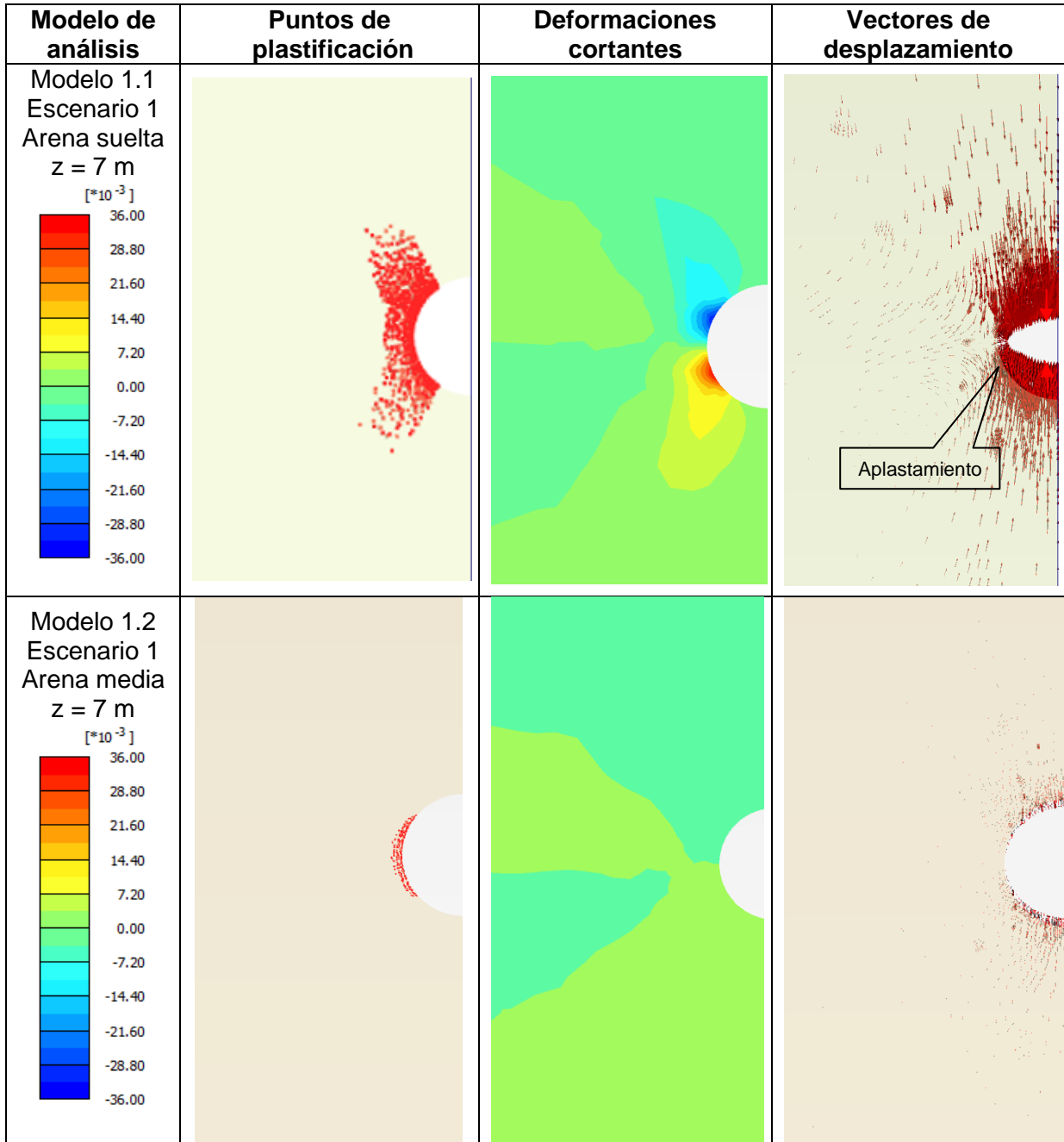


Figura 5-8. Recorte de los resultados de los cálculos del modelo de análisis 3.1. Escenario 3 – Arena suelta, diámetro $D_3 = 1.42$ m y profundidad $z = 11$ m, sin escala (extraído de modelo en Plaxis 3D).

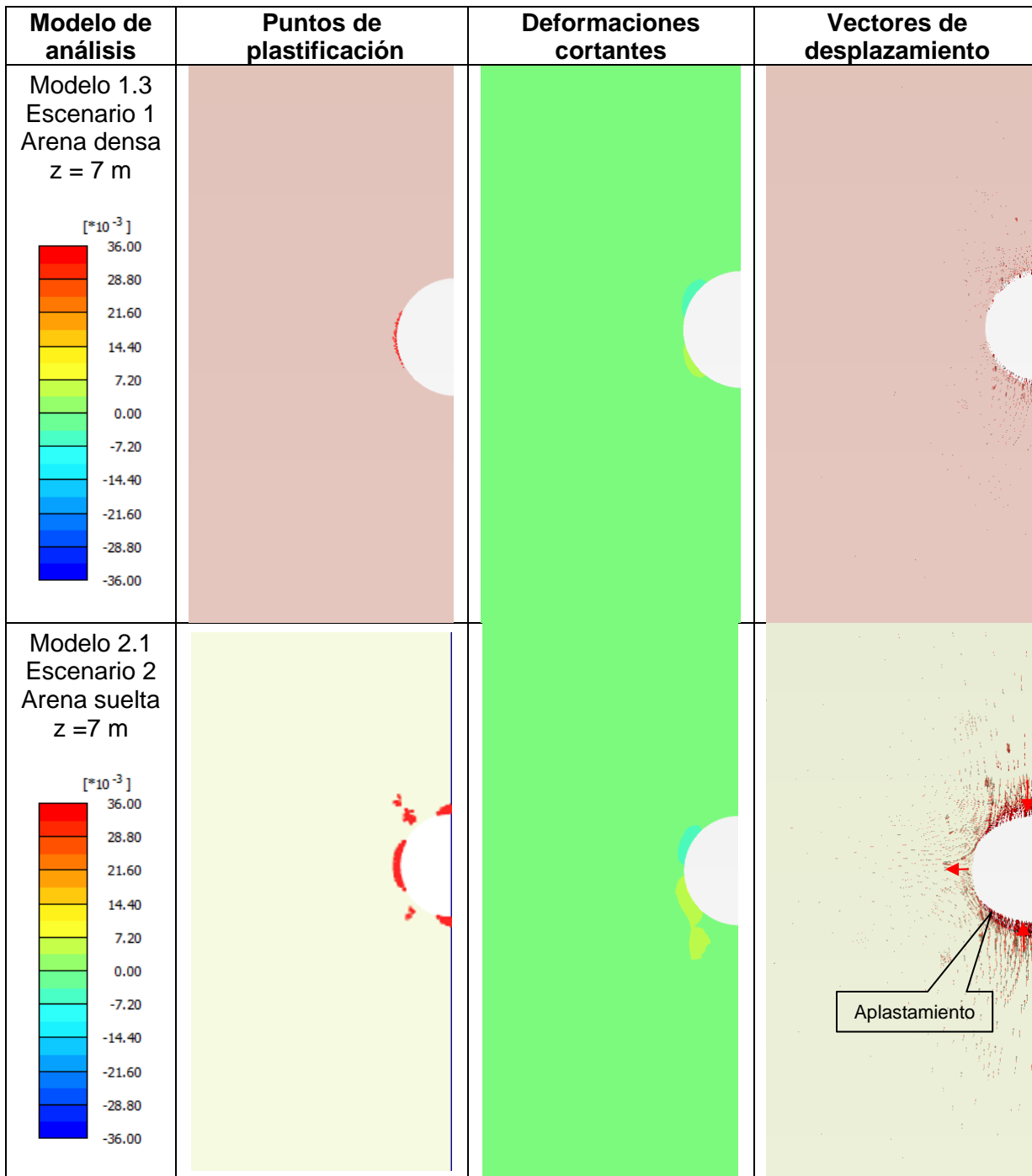
En la Tabla 5-1 se ilustran los puntos de plastificación, las deformaciones cortantes y_{zx} y los vectores de desplazamiento de algunos resultados de los cálculos efectuados con el programa Plaxis 3D para la perforación horizontal dirigida (PHD). Los resultados mostrados en la Tabla 5-1 corresponden a los nueve (9) modelos de análisis de la sección “F”, obtenidos a una profundidad de 7 m y para el diámetro de perforación más grande, es decir $D = 1.42$ m.

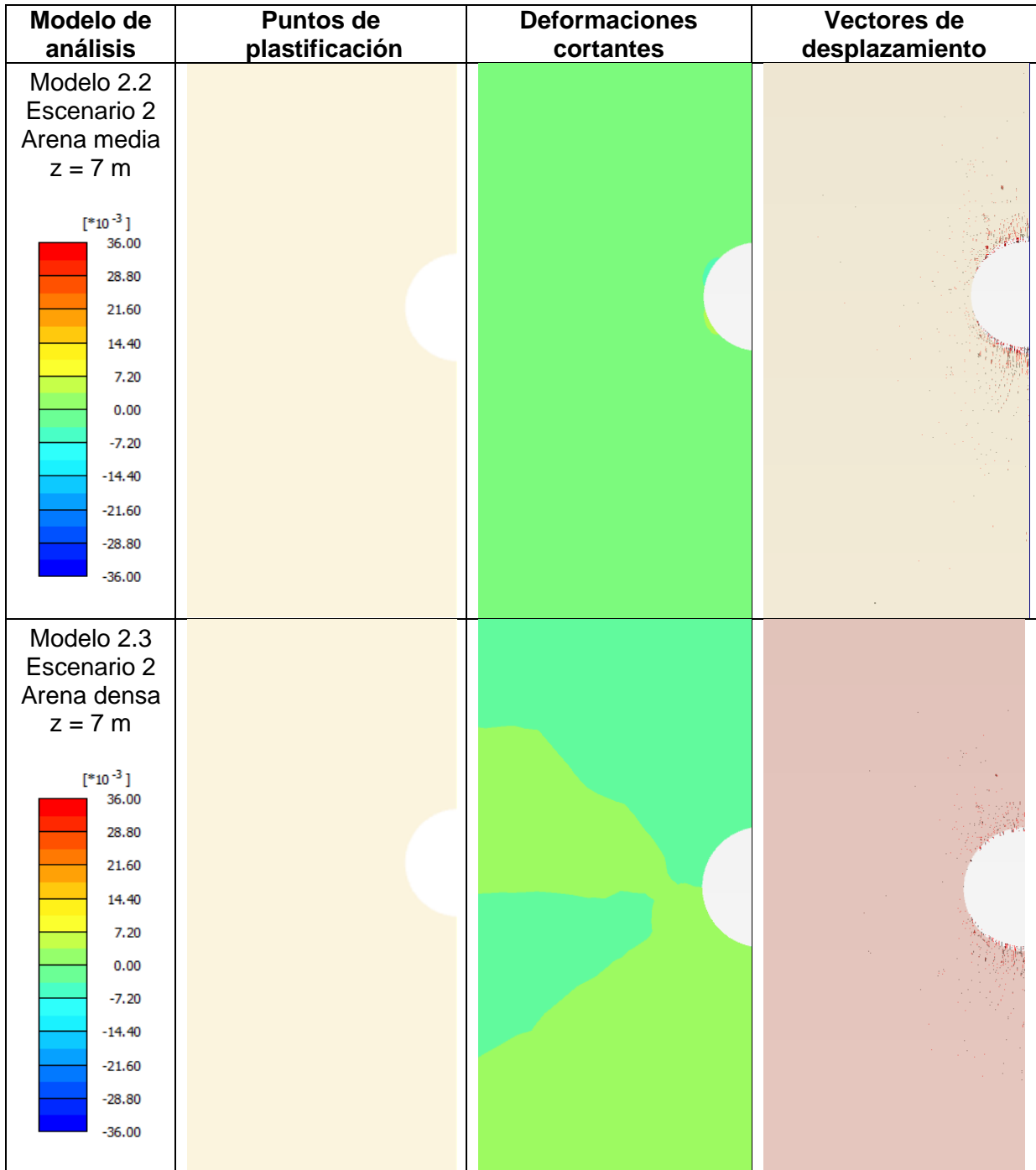
El conjunto de los resultados de los puntos de plastificación, las deformaciones cortantes y_{zx} y los vectores de desplazamiento, para todas las secciones de análisis, se incluyen en los anexos listados en el numeral 7 del trabajo presente. Se debe tener en cuenta que las figuras presentadas en la Tabla 5-1 corresponden a recortes de las secciones del modelo, por lo cual, se aclara que las deformaciones cortantes y los vectores de desplazamiento, no se desarrollan hasta los límites del dominio computacional, véase la escala de la excavación en comparación con el recorte; el área de influencia puede observarse de manera correcta por ejemplo en la Figura 5-1 y Figura 5-3.

Tabla 5-1. Ejemplos de los mecanismos de deformación y puntos de plastificación de una perforación horizontal dirigida (PHD).

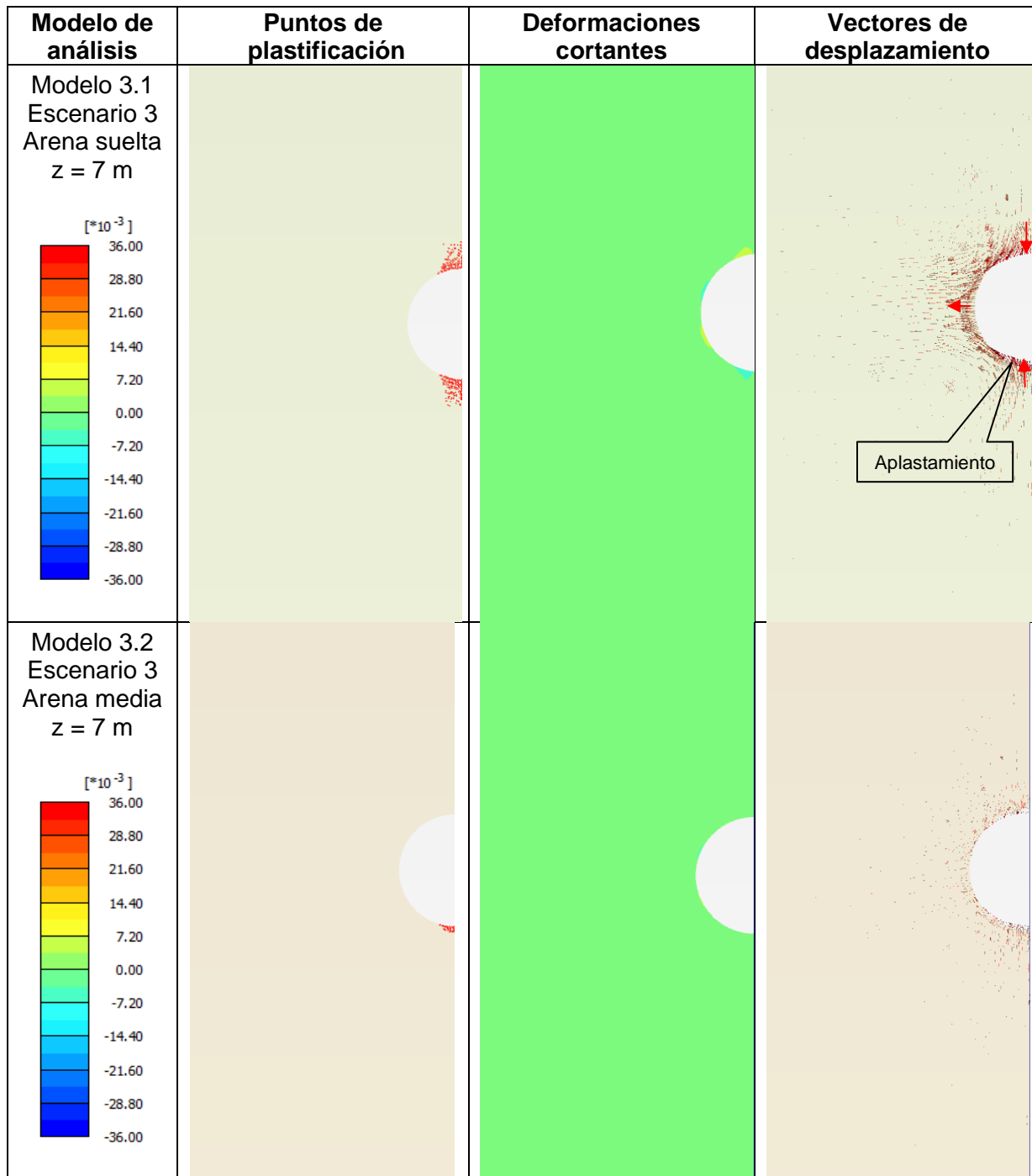


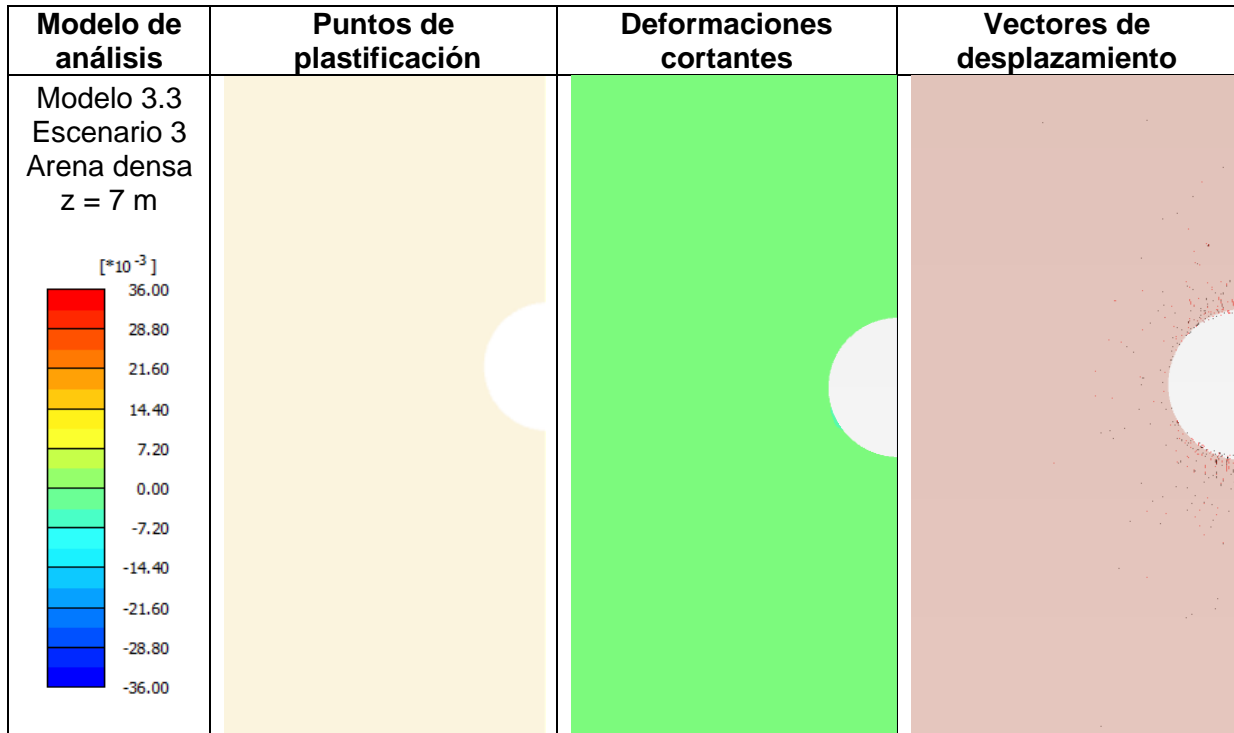
74 Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida





76 Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida





Como se observa en la Tabla 5-1 el mecanismo de deformación que predomina en los modelos de análisis evaluados de la PHD corresponde al de “aplastamiento” de la sección circular de la PHD. Esto ocurre en particular para los modelos de análisis 1.1, 2.1 y 3.1, los cuales corresponden a tres (3) valores de presión de lodos diferentes aplicadas para el soporte de la PHD en una arena suelta.

De igual forma en la Tabla 5-1 es posible concluir que las magnitudes de las presiones de los lodos aplicadas en los escenarios de cálculo “E2” y “E3” (68.7 kN/m² y 78.5 kN/m² respectivamente), son suficientes para limitar la magnitud de los desplazamientos de las tres (3) arenas, de diferente compacidad o resistencia al corte, evaluadas en el trabajo presente. Esto se refleja en las magnitudes pequeñas de los vectores de desplazamientos y de las deformaciones cortantes (las cuales en algunos casos son nulas), así como la existencia de pocos puntos de plastificación, en particular para las presiones de lodos de mayor magnitud y la arena de mayor compacidad o resistencia al corte.

5.1 Desplazamientos verticales

A continuación, se presenta el conjunto de los resultados obtenidos de los análisis numéricos mediante el programa de elementos finitos Plaxis 3D de la perforación horizontal dirigida (PHD) para los desplazamientos verticales. Los resultados se extrajeron empleando la herramienta “Curves Manager” (Output) del programa Plaxis 3D. En la Figura 5-9 se ilustra un ejemplo de la salida del programa Plaxis 3D.

Los resultados de los desplazamientos verticales en los nodos listados en la Tabla 4-9 se procesaron mediante la hoja de cálculo electrónica Microsoft Excel.

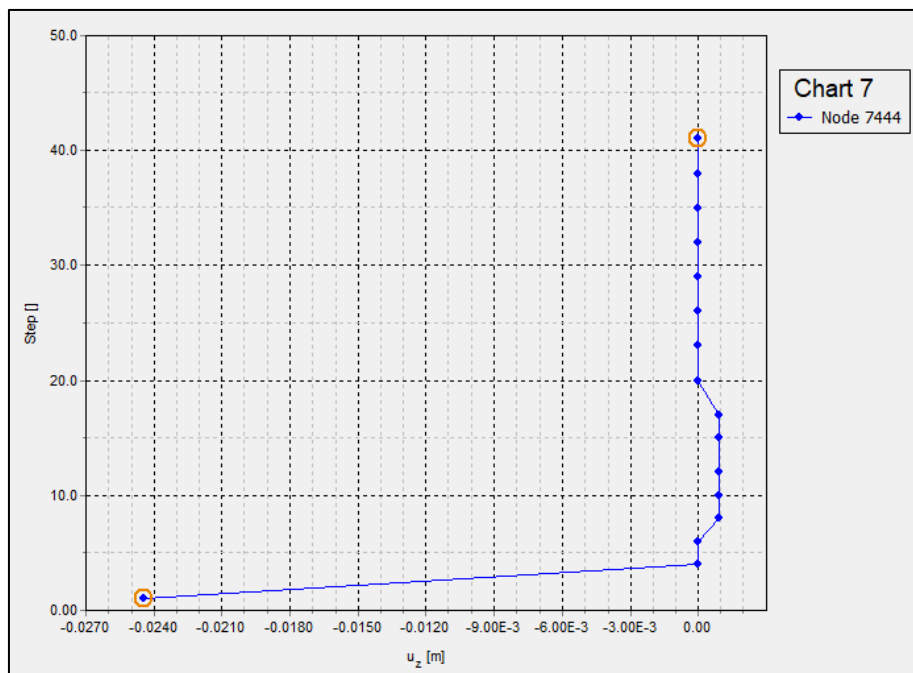


Figura 5-9. Ejemplo de la extracción de los desplazamientos verticales en la herramienta Curves Manager (extraído de modelo en Plaxis 3D).

En la Figura 5-10 se ilustra la variación de los desplazamientos verticales para los tres (3) diámetros evaluados de la perforación horizontal dirigida (PHD) y las seis (6) secciones de análisis entre los 12 m y 7 m en profundidad. En la Figura 5-10 se incluyen los resultados de los desplazamientos verticales de los tres (3) tipos de materiales y los tres (3) escenarios definidos en el numeral 4.6 del documento presente.

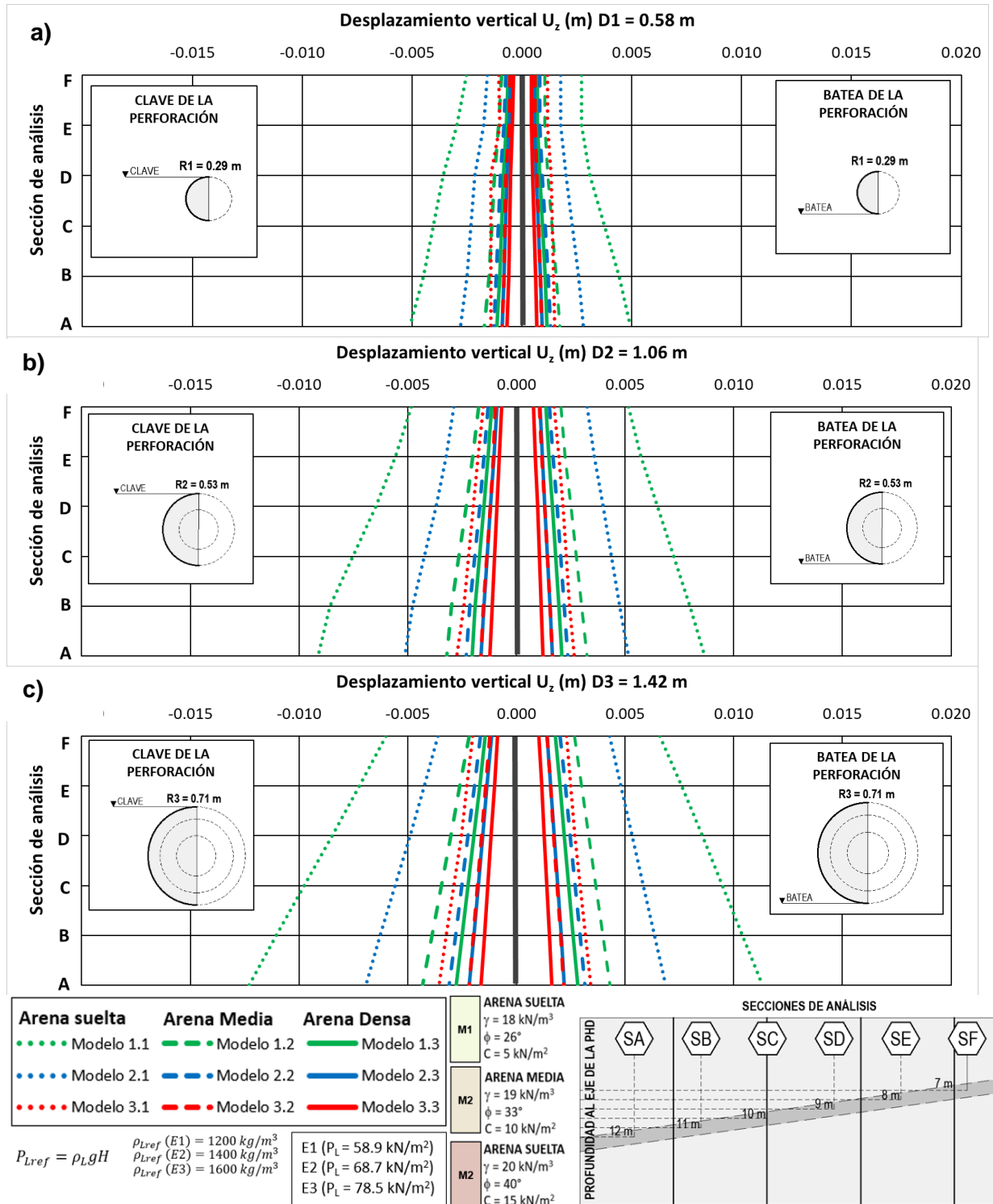


Figura 5-10. Desplazamientos verticales calculados en la clave y la batea de la perforación horizontal dirigida (PHD) de las seis secciones de análisis para los tres diámetros y tres compacidades de suelo.

Con base en los resultados ilustrados en la Figura 5-10 se puede concluir que las magnitudes de los desplazamientos verticales en una PHD son directamente proporcionales al diámetro y a la profundidad de la PHD. Es decir, a mayor profundidad (Sección A) y a mayor diámetro de la perforación (Figura 5-10 c), mayor será la magnitud de los desplazamientos verticales. Estas observaciones son válidas tanto en la clave, como en la batea de la PHD.

Es de resaltar que, si bien la magnitud de los desplazamientos en la batea y en la clave de la PHD son similares para una sección y modelo de análisis, los resultados muestran que las direcciones de los desplazamientos en la clave son inversas a los de la batea. Las direcciones de los desplazamientos obtenidas indican que la PHD tiende a converger en el sentido vertical, lo cual se refleja en el asentamiento de los nodos en la cima de la perforación (clave) y el levantamiento de los nodos de la base de la perforación (batea).

En lo que respecta a la magnitud de los desplazamientos esta se ve influenciada tanto por la densidad (resistencia al corte) de la arena como por la presión de los lodos aplicada en las caras de la PHD. En consecuencia, el material denominado "M1", correspondiente a una arena suelta, experimentó desplazamientos verticales mayores en comparación al material "M3", el cual representa un material de mayor compacidad (arena densa).

Por otra parte, los desplazamientos verticales mayores se obtienen para el escenario "E1", el cual corresponde a la magnitud menor de presión de lodos aplicada. Mientras que para los escenarios "E2" y "E3", de presión de lodos de magnitud mayor se obtuvieron desplazamientos verticales menores. Es decir, entre menor es la presión de lodos, se produce una mayor deformación vertical del suelo.

5.2 Desplazamientos horizontales

En la Figura 5-11 se ilustra la variación de los desplazamientos horizontales en la pared de la perforación para los tres (3) diámetros, las seis (6) secciones de análisis localizadas entre los 12 m y 7 m en profundidad, los tres (3) tipos de materiales y los tres (3) escenarios descritos en el numeral 4.6 del documento presente.

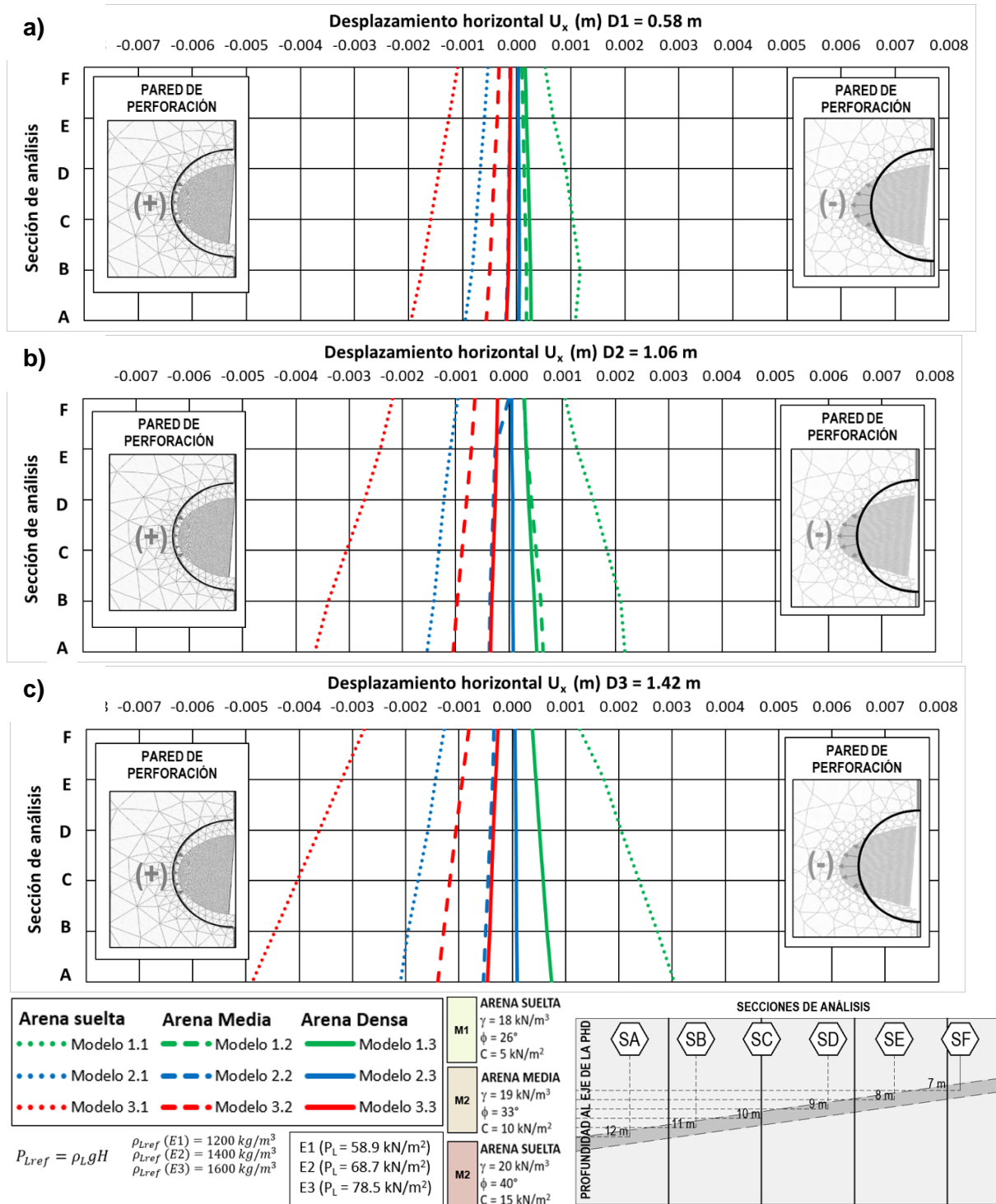


Figura 5-11. Desplazamientos horizontales en la pared de la perforación horizontal dirigida (PHD) para diferentes diámetros y profundidades de la perforación analizadas.

Con base en los resultados obtenidos en la Figura 5-11 se concluye que los desplazamientos horizontales en la pared de una PHD son directamente proporcionales al diámetro y a la profundidad de la PHD. Es decir, a mayor profundidad (Sección A) y a mayor diámetro de la perforación (Figura 5-11c) mayor será la magnitud de los desplazamientos horizontales en la pared de la perforación.

A diferencia de los desplazamientos verticales en donde los resultados indican que la batea asciende y la clave desciende, la pared de la PHD puede tener tanto desplazamientos positivos como negativos. Es decir, se obtuvieron resultados en los cuales algunos de los nodos en la pared de la perforación se desplazan hacia fuera de la PHD mientras que otros se desplazan en dirección al interior de la PHD.

Cuando los desplazamientos horizontales son negativos según el sistema de coordenadas adoptado, los nodos localizados en la pared de la perforación se alejan del centro de la PHD, lo cual, en conjunto con la convergencia de la clave y la batea, generan una sección deformada de la PHD que muestra una tendencia al “aplastamiento”, comportamiento que se obtuvo para los modelos con magnitudes mayores de la presión de lodos. Por otro lado, cuando se obtienen desplazamientos positivos en la pared de la perforación, es decir hacia el interior de la PHD, la perforación puede tender a converger, comportamiento que se produce cuando la presión de los lodos es insuficiente para evitar el cierre de la PHD.

En lo que respecta a la magnitud de los desplazamientos horizontales estos dependen de forma principal de las propiedades de resistencia al corte de la arena, es decir, de la densidad de la arena. Por lo tanto, los desplazamientos horizontales de magnitud mayor se producen en los tres (3) modelos de análisis constituidos por arenas sueltas de resistencia al corte baja.

5.3 Esfuerzos verticales totales

A continuación, se presentan los resultados de los esfuerzos verticales totales extraídos de los análisis de la perforación horizontal dirigida (PHD) realizados mediante el programa Plaxis 3D. Los resultados de los esfuerzos verticales totales se extrajeron en los puntos de Gauss listados en el numeral 4.12, empleando la herramienta “Curves Manager” de

Plaxis 3D. Es importante resaltar que debido a que los esfuerzos en los puntos de Gauss son una variable derivada de los desplazamientos calculados en los nodos, los resultados obtenidos de los esfuerzos verticales totales presentan mayor grado de aproximación. Esto se debe a que los esfuerzos se interpolan en los puntos Gauss de localizados en el interior de los elementos finitos. Por consiguiente, en el área de un mismo elemento existe variación de las magnitudes de los esfuerzos, como se ilustra en los ejemplos de la Figura 5-12 y la Figura 5-13.

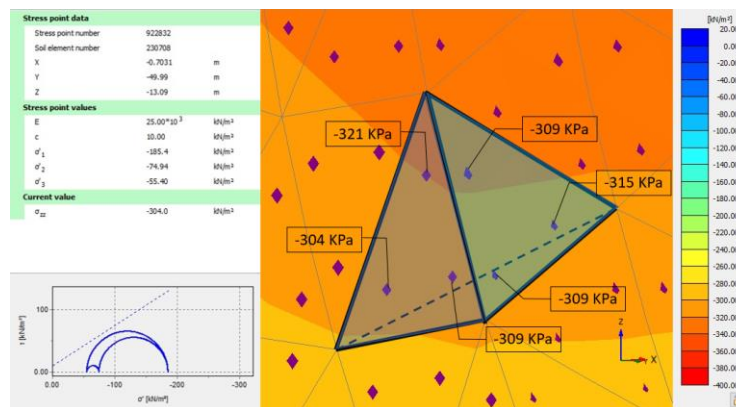


Figura 5-12. Ejemplo de la variación de las magnitudes de los esfuerzos verticales totales en los puntos de interpolación “stress point” en un mismo elemento.

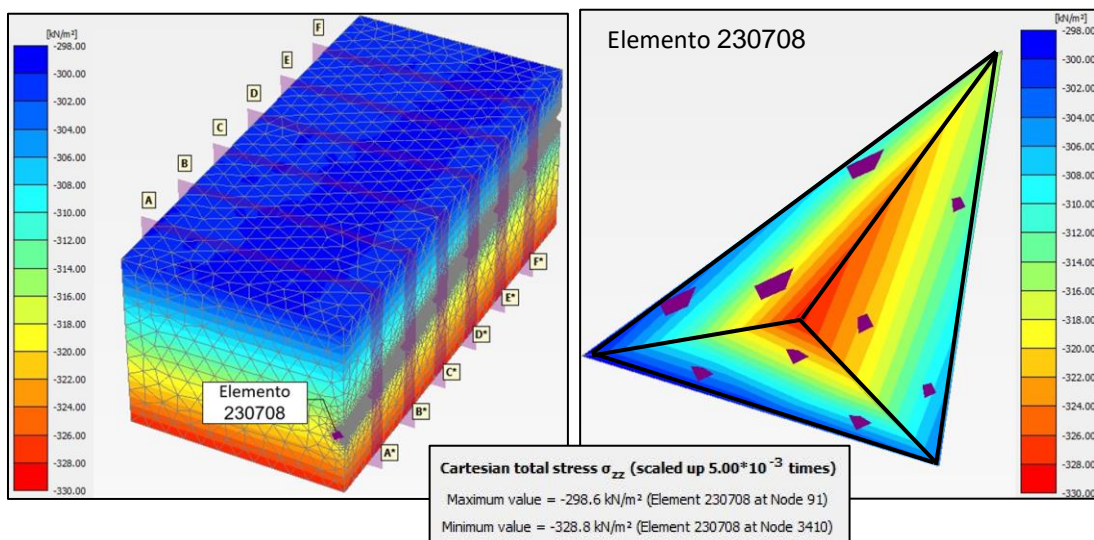


Figura 5-13. Ejemplo de la variación de los esfuerzos verticales totales en un mismo elemento.

5.3.1 Esfuerzos en la clave de la perforación horizontal dirigida (PHD)

En la Figura 5-14 se ilustran los esfuerzos verticales totales iniciales y los esfuerzos verticales totales finales en la clave de la perforación horizontal dirigida (PHD) para los nueve (9) modelos analizados con el programa Plaxis 3D.

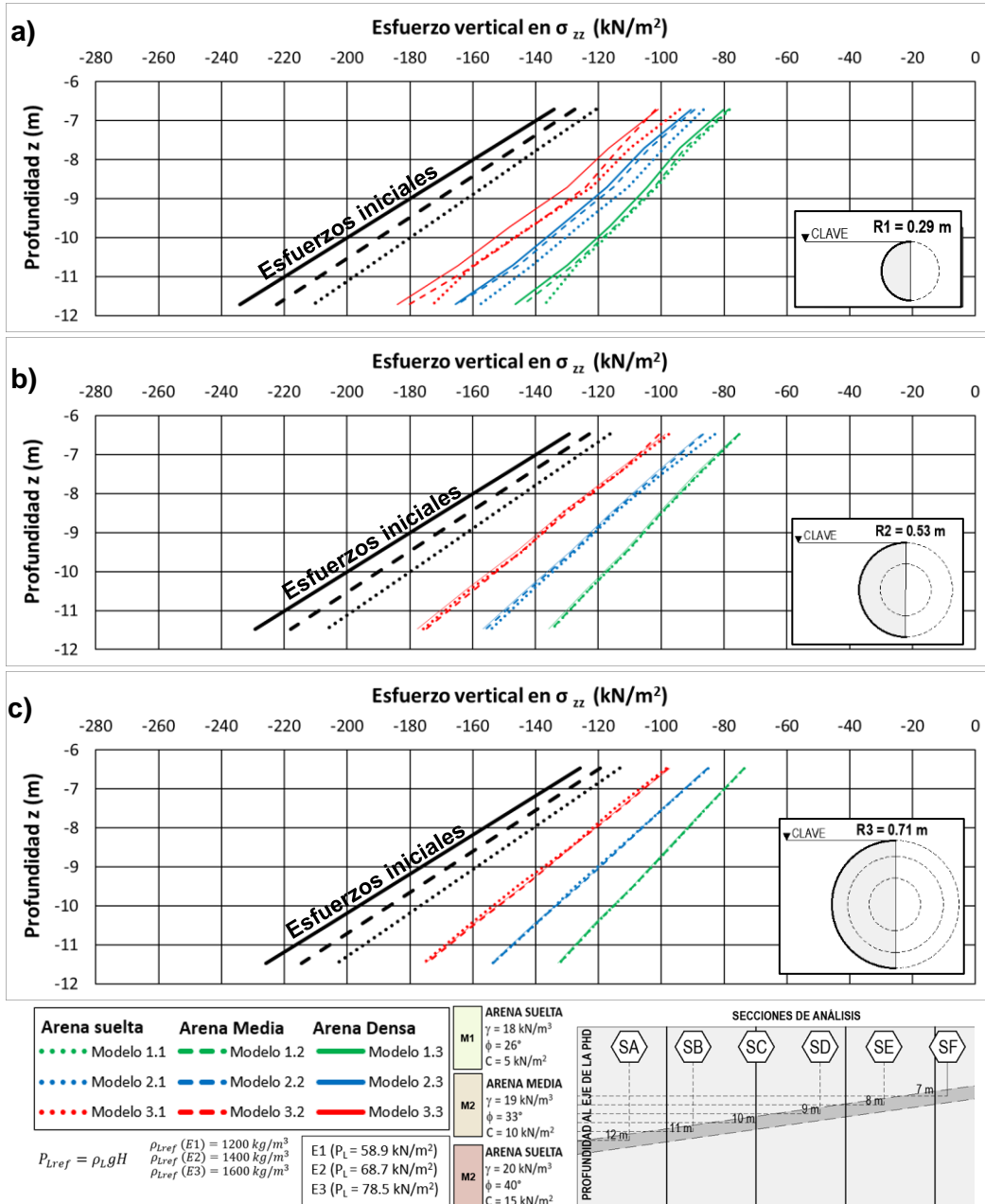


Figura 5-14. Esfuerzo vertical total en la clave de la perforación horizontal dirigida (PHD) para diferentes diámetros y profundidades de la perforación.

5.3.2 Esfuerzos en la batea de la perforación horizontal dirigida (PHD)

En la Figura 5-15 se ilustran los esfuerzos verticales totales iniciales y los esfuerzos verticales totales finales en la batea de la perforación horizontal dirigida (PHD) de los resultados obtenidos mediante el programa Plaxis 3D para los nueve (9) modelos de análisis calculados.

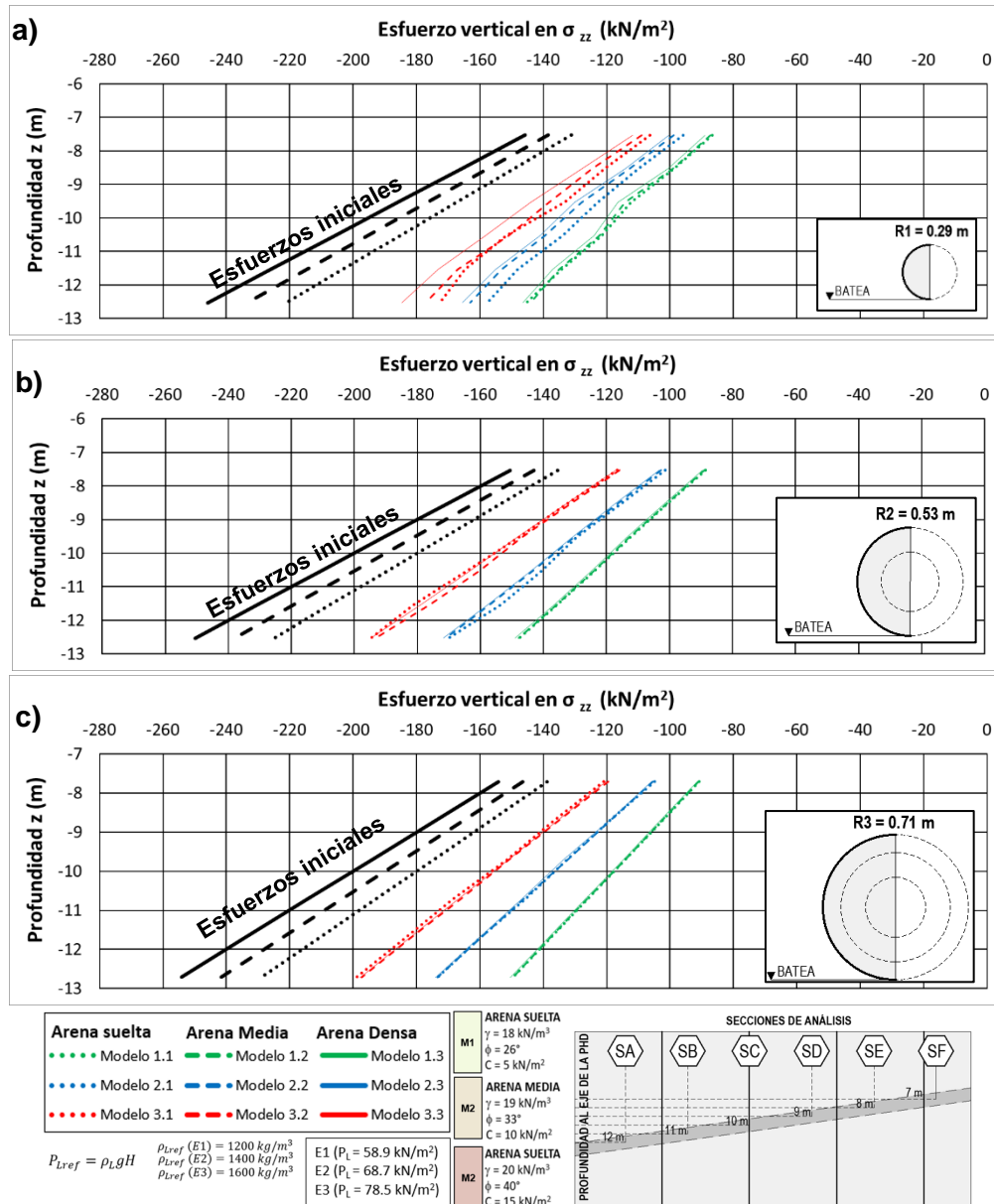


Figura 5-15. Esfuerzo vertical en la batea de la perforación horizontal dirigida (PHD) para diferentes diámetros y profundidades de la perforación.

5.3.3 Esfuerzos en la pared de la perforación horizontal dirigida (PHD)

En la Figura 5-16 se ilustran los esfuerzos verticales totales iniciales y los esfuerzos verticales totales finales en la pared de la perforación horizontal dirigida (PHD) de acuerdo con los resultados de los cálculos efectuados mediante el programa Plaxis 3D para los nueve (9) modelos de análisis.

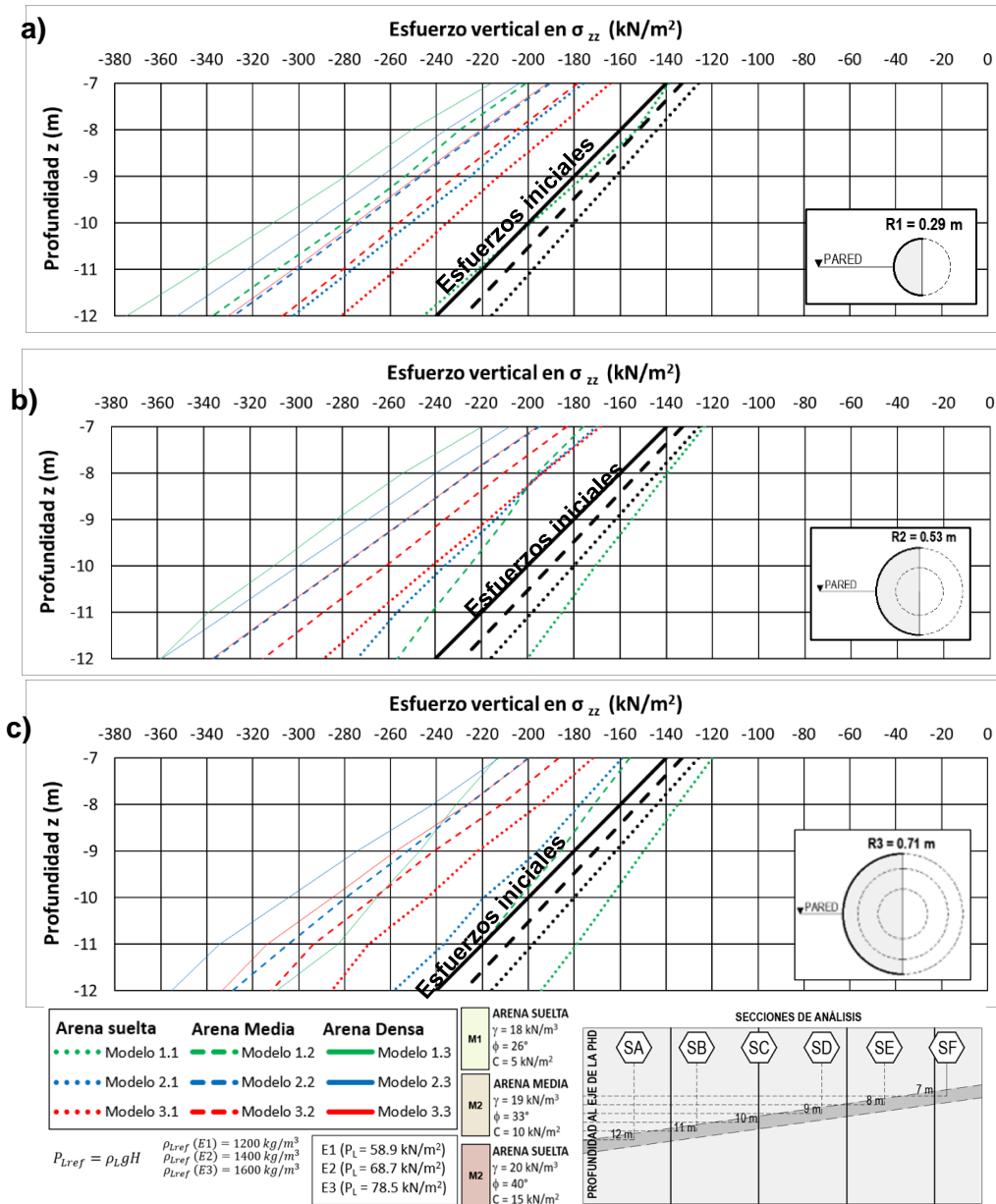


Figura 5-16. Esfuerzo vertical en la pared de la perforación horizontal dirigida (PHD) para diferentes diámetros y profundades de perforación.

5.3.4 Análisis de los resultados obtenidos de los esfuerzos en la clave, la batea y las paredes de la perforación horizontal dirigida (PHD)

A continuación, se efectúan comentarios sobre la Figura 5-14, la Figura 5-15 y la Figura 5-16 sobre los resultados obtenidos de los esfuerzos en la clave, la batea y las paredes de la perforación horizontal dirigida (PHD):

- a) De acuerdo con la Figura 5-14 y la Figura 5-15, los esfuerzos verticales totales debidos a la construcción de una perforación horizontal dirigida (PHD), en todos los casos analizados, son siempre menores a los esfuerzos iniciales, tanto en la clave como en la batea de la PHD. Esto se debe a la redistribución de los esfuerzos alrededor de la perforación.
- b) Como se observa en la Figura 5-14 y Figura 5-15, existe una reducción en los esfuerzos verticales totales, la cual depende en menor grado de la profundidad. Se observa que las líneas que representan los esfuerzos iniciales (líneas negras) son casi paralelas a las líneas que muestran los esfuerzos verticales totales finales. En todo caso, de acuerdo con los resultados obtenidos, a mayor profundidad, mayor es la diferencia entre los esfuerzos iniciales y finales.
- c) La magnitud del diámetro de la PHD tiene una influencia directamente proporcional en la reducción de los esfuerzos verticales totales en la clave y la batea de la perforación. Sin embargo, este efecto es porcentualmente despreciable, en comparación con la magnitud de la influencia de la presión de los lodos aplicada en las paredes de la PHD, razón por la cual la variación observada entre la Figura 5-14a, la Figura 5-14b y la Figura 5-14c es mínima.
- d) De manera opuesta al comportamiento obtenido en la clave y en la batea de la PHD, la Figura 5-16 muestra que los esfuerzos verticales totales finales en la pared de la PHD se incrementan como resultado de la ejecución de la PHD.

- e) En cuanto a la influencia de las propiedades de resistencia al corte de las arenas, esta es directamente proporcional, es decir, a mayor densidad (resistencia al corte) de la arena, mayor es el incremento en los esfuerzos verticales totales en la pared de la perforación.
- f) A diferencia de los esfuerzos verticales totales en la batea y la clave de la perforación, los esfuerzos verticales en la pared de la perforación se reducen a medida que el diámetro de la perforación se incrementa.
- g) Finalmente, se debe resaltar que, a mayor magnitud en la presión de los lodos de perforación, menor será el incremento en los esfuerzos verticales en la pared de la PHD, es decir su influencia es inversamente proporcional.

5.4 Evaluación del efecto de arco en una perforación horizontal dirigida (PHD)

Con el fin de evaluar la diferencia entre los esfuerzos verticales iniciales y los esfuerzos verticales finales tras la modelación de la perforación horizontal dirigida (PHD), se define la variación de los esfuerzos verticales totales como la resta entre los esfuerzos iniciales estimados en la Tabla 4-10 y los esfuerzos verticales totales, estos últimos extraídos de los resultados obtenidos mediante el programa Plaxis 3D en los puntos de interpolación “Stress point” listados en la Tabla 4-9.

Teniendo en cuenta que el efecto de arco corresponde a la redistribución de los esfuerzos debido al desplazamiento relativo entre los volúmenes de suelo, el efecto de arco en el trabajo presente se evalúa con base en la variación de los esfuerzos verticales en la clave, la batea y la pared de la perforación.

En la Figura 5-17 se ilustra el efecto de arco medido como el porcentaje en que se reducen los esfuerzos verticales totales en la clave de la perforación horizontal dirigida (PHD). Por otra parte, en la Figura 5-18 el efecto de arco se estima como el porcentaje en que se reducen los esfuerzos verticales totales en la batea de la PHD. Además, en la Figura 5-19,

el efecto de arco se cuantifica con base en el incremento del porcentaje del esfuerzo vertical total en la pared de la perforación.

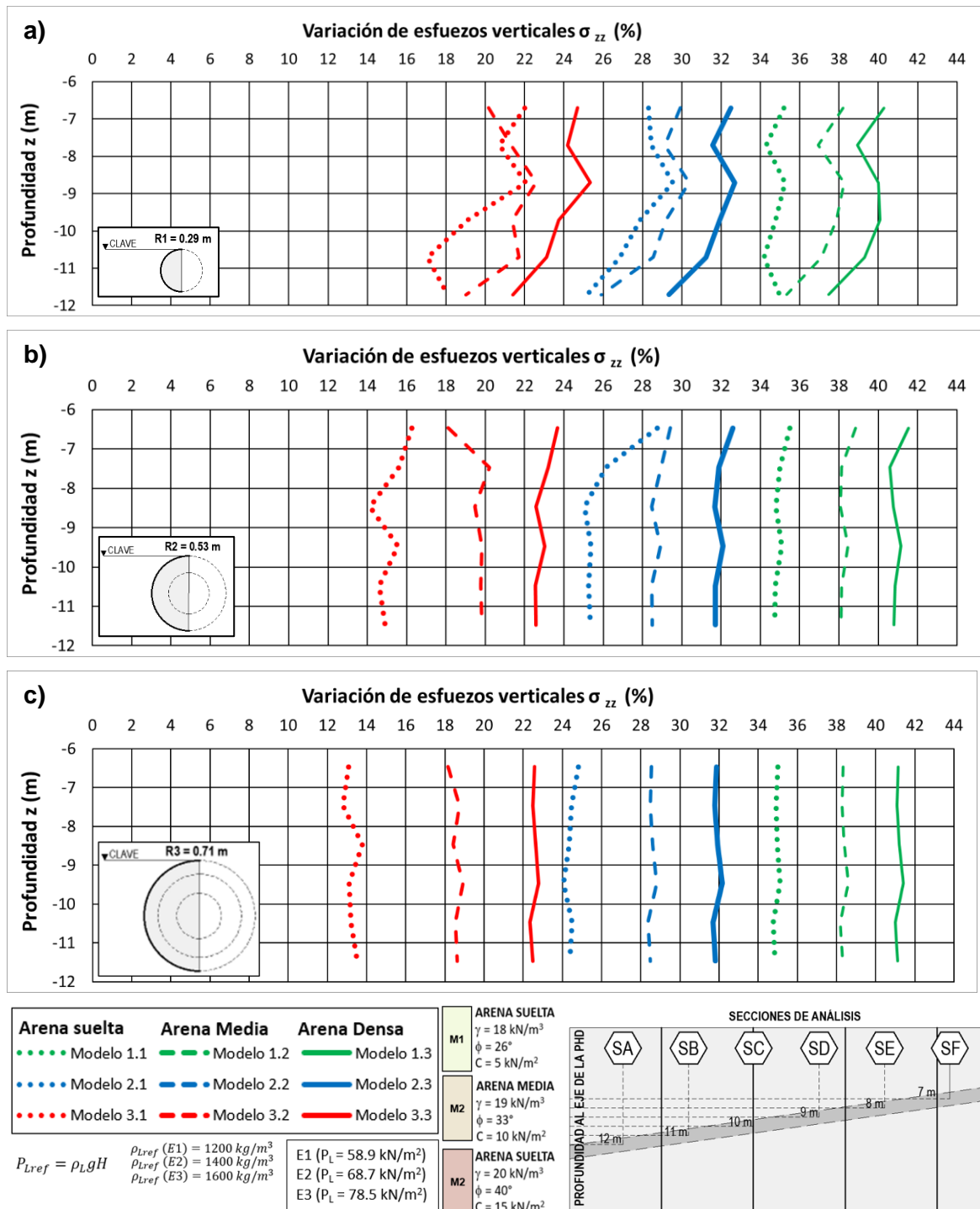


Figura 5-17. Efecto de arco en la clave de la PHD para diferentes diámetros y profundades de la perforación.

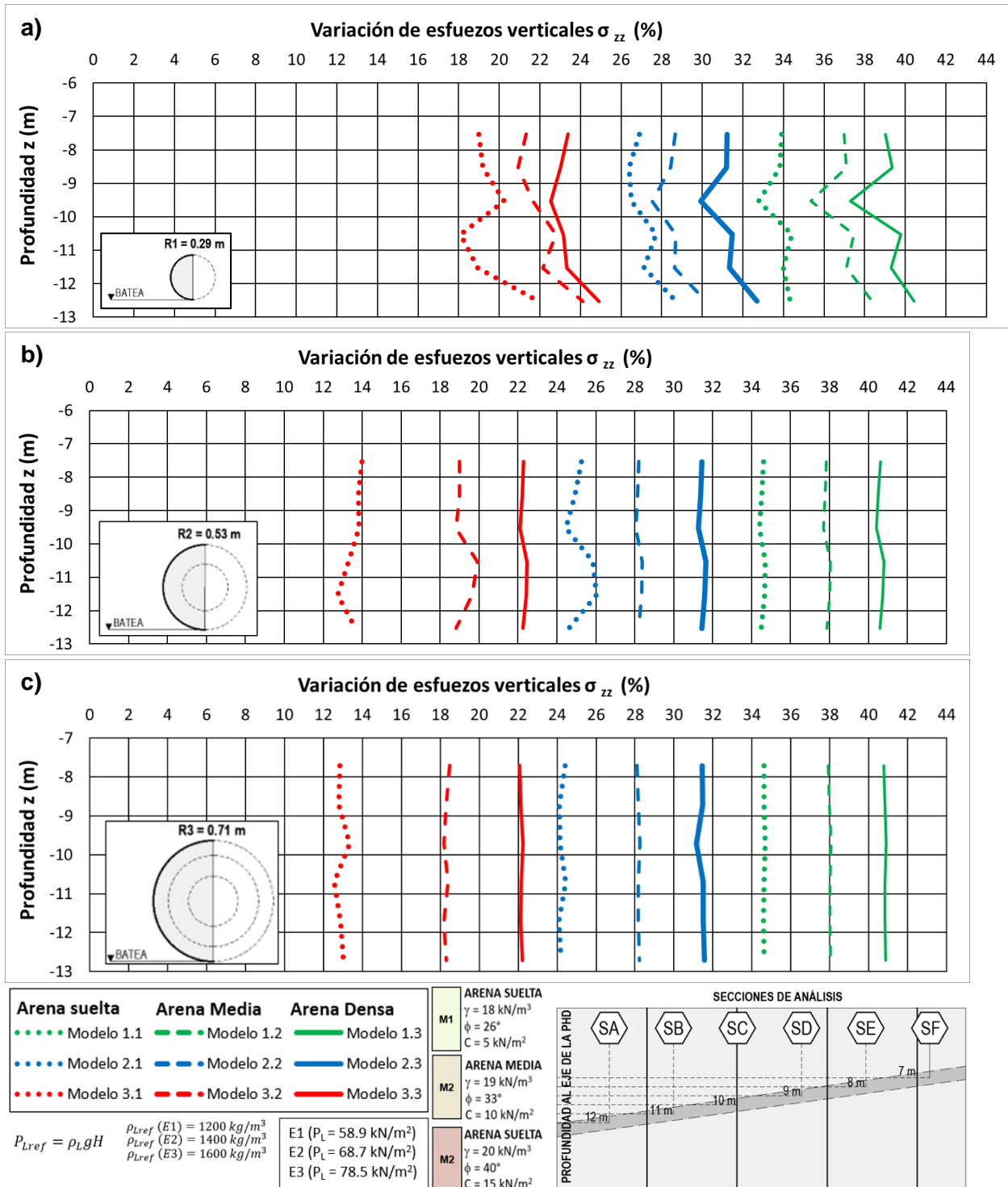


Figura 5-18. Efecto de arco en la batea de la perforación horizontal dirigida (PHD) para diferentes diámetros y profundidades de la perforación.

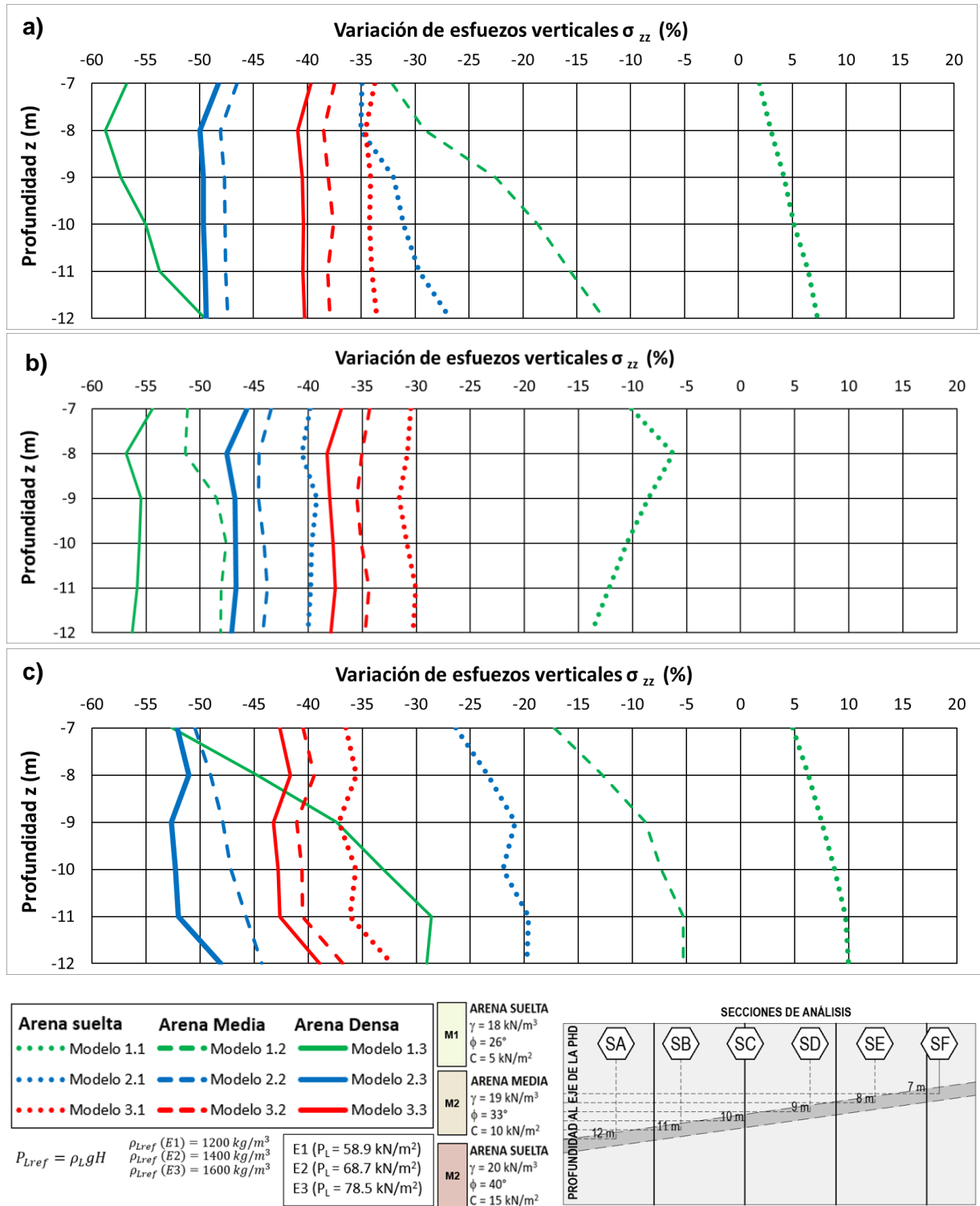


Figura 5-19. Efecto de arco en la pared de la perforación horizontal dirigida (PHD) para diferentes diámetros y profundidades de la perforación.

Como se observa en la Figura 5-17 y la Figura 5-18, la resistencia al corte de las arenas contribuye en forma directamente proporcional a la reducción de los esfuerzos verticales totales en la clave y la batea de la perforación. Esto es, a mayor densidad de la arena (o resistencia al corte), mayor es la variación entre los esfuerzos verticales totales y los finales, y por tanto mayor es el efecto de arco. Esta reducción en el esfuerzo vertical total sobre la clave y la batea de la PHD oscila entre cerca del 15 % al 40 %.

En el caso de los esfuerzos verticales totales en la pared de la PHD se calcularon incrementos hasta cerca de un 55 %. Este porcentaje es variable de acuerdo con la magnitud de la presión de los lodos aplicada y las propiedades de resistencia al corte (o densidad) del suelo.

En cuanto a la influencia de la resistencia al corte de las arenas en el efecto de arco, esta es directamente proporcional, es decir, a mayor densidad (o resistencia al corte) de la arena, mayor será la reducción del esfuerzo vertical en la clave de la perforación y mayor será el incremento en los esfuerzos verticales totales en la pared de la perforación, es decir mayor será el efecto de arco. En función de la densidad de la arena, el incremento obtenido en los análisis efectuados con el programa Plaxis 3D de los esfuerzos verticales totales sobre las paredes de la perforación oscila entre un 40 % a un 55 %.

De acuerdo con los resultados obtenidos para el rango de las densidades de las arenas, la magnitud de la presión de los lodos de perforación y la geometría asumida de la perforación horizontal dirigida (PHD), se obtiene que el efecto de arco debido a la construcción de una PHD tiene una variación baja en función de la profundidad y el diámetro de la perforación, en comparación al efecto de arco desarrollado a causa de la densidad del material y la magnitud de la presión de los lodos aplicados en las paredes de la PHD.

En general, la variable de mayor importancia en la reducción de los esfuerzos verticales actuantes sobre la tubería corresponde a la magnitud de la presión de los lodos de perforación. Como ejemplo de esto se identifica en la Figura 5-14, una mayor reducción en los esfuerzos verticales totales en los modelos 1.1, 1.2 y 1.3 (Escenario 1 - E1), en

comparación con los modelos 3.1, 3.2 y 3.3 (Escenario 3 - E3), en donde la presión base de los lodos aplicada para cada escenario corresponde a 58.9 kN/m² y 78.5 kN/m² respectivamente.

En la Figura 5-20, la Figura 5-21 y Figura 5-22 se ilustra un ejemplo en tres dimensiones del efecto de arco desarrollado como consecuencia del proceso de construcción de una perforación horizontal dirigida (PHD). En resumen las zonas que experimentan desplazamientos mayores (Figura 5-20) y magnitudes grandes de esfuerzos cortantes (Figura 5-21), tienen una reducción mayor en los esfuerzos verticales totales (Figura 5-22), lo cual se interpreta como efecto de arco.

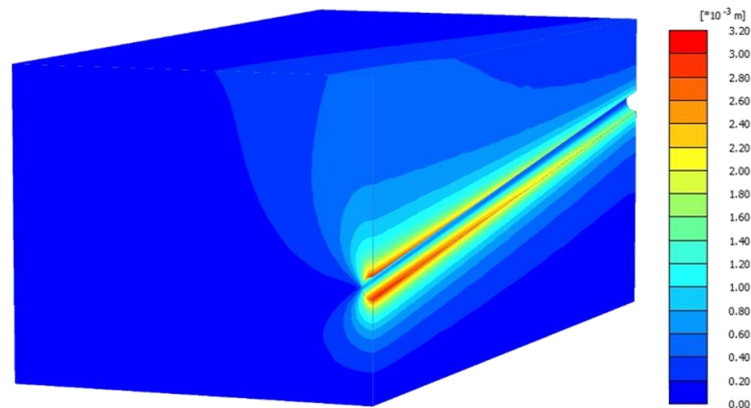


Figura 5-20. Desplazamientos totales relacionados con el efecto de arco debido a la construcción de una perforación horizontal dirigida (PHD).

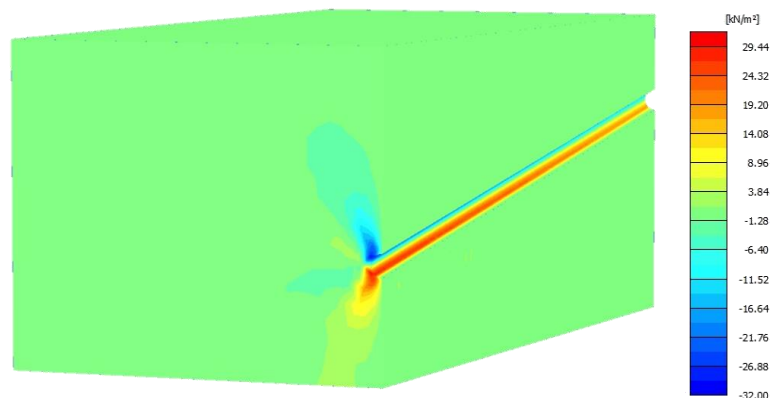


Figura 5-21. Ejemplo del efecto de arco debido a la construcción de una perforación horizontal dirigida (PHD), relacionado con el desarrollo de los esfuerzos cortantes.

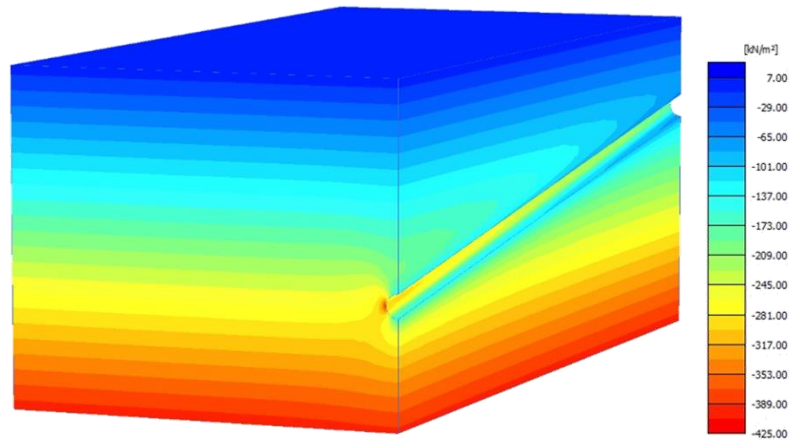


Figura 5-22. Ejemplo del efecto de arco generado debido a la construcción de una perforación horizontal dirigida (PHD), relacionado con la redistribución de los esfuerzos verticales totales.

6. Conclusiones

6.1 Preliminares

La perforación horizontal dirigida (PHD) es una tecnología que permite la instalación de las tuberías sin la ejecución de zanjas, por lo que tiene grandes ventajas para el paso de obstáculos tales como los ríos o las zonas inestables. Debido a que es un proceso en el cual se realiza la excavación del suelo de forma subterránea, la evaluación del mecanismo de deformación y de los esfuerzos finales que actuarán sobre la tubería es de gran importancia durante el proceso de construcción, para evaluar la estabilidad de la perforación, proyectar su instalación correcta y planear la integridad de la tubería durante su vida útil.

6.2 Desarrollo del efecto de arco en el suelo

Para que el efecto de arco se produzca en una PHD, debe existir el desplazamiento relativo suficiente de un volumen del suelo, es decir, se deben producir zonas de corte en las cuales se desarrolle la resistencia friccional, y que por consiguiente se induzca la redistribución de los esfuerzos en el suelo. Debido a la concentración de las deformaciones en el suelo como producto de la construcción de la PHD, las zonas plastificadas (falladas) experimentan descarga de esfuerzos, mientras que las zonas rígidas o con menor desplazamiento incrementan su carga.

Considerando que el efecto de arco es un problema de deformaciones y que una PHD es una perforación cuyo alineamiento no es horizontal, para su análisis geotécnico es recomendable el empleo de la modelación numérica tridimensional. Una PHD durante su construcción experimentará diferentes estados de esfuerzos (trayectorias de esfuerzos), derivados del cambio en profundidad y del desarrollo de las etapas constructivas de ensanchamiento de la perforación del túnel piloto, y la instalación de la tubería.

6.3 Efecto de arco en el suelo y la presión de lodos

Como resultado de la modelación de tres (3) escenarios con tres (3) magnitudes diferentes de la presión de lodos aplicada a las paredes de la perforación para su soporte, los análisis efectuados muestran que la magnitud de la presión de los lodos es la variable principal en el desarrollo del efecto de arco en la construcción de una PHD, dado que ésta presión determina la forma de los mecanismos de deformación y los desplazamientos relativos de los volúmenes de suelo estacionarios y en movimiento.

La presión de los lodos además de ser fundamental para la estabilidad de la perforación durante la construcción de la PHD determina en gran medida la magnitud del desarrollo del efecto de arco. Lo anterior se midió en la totalidad de los modelos de análisis numéricos evaluados. Se determinó una variación grande en la extensión del efecto de arco generado comparando los escenarios "E1" y "E3", en los cuales se incluyó el efecto de las presiones de los lodos de perforación, mediante la aplicación en las paredes de una perforación horizontal dirigida de una presión igual a 58.9 kN/m^2 y 78.5 kN/m^2 respectivamente.

De acuerdo con los análisis efectuados de una perforación horizontal dirigida (PHD) mediante el programa Plaxis 3D, a menor presión de lodos aplicada sobre las paredes de la perforación, se permite una mayor concentración de las deformaciones, y en consecuencia ocurre una mayor redistribución de los esfuerzos. Esta redistribución se traduce en una mayor diferencia entre el estado de esfuerzos iniciales y el estado de esfuerzos finales después de la construcción de la PHD.

6.4 Efecto de arco en el suelo y la resistencia al corte

Otro aspecto que influye en el efecto de arco es por supuesto la resistencia al corte del suelo, la cual ha sido ampliamente evaluada en la literatura, y constituyen una de las primeras variables analizadas. En muchos de los casos de estudio revisados se ha empleado el modelo constitutivo Mohr Coulomb. En el estudio presente los parámetros de resistencia al corte intercepto de cohesión c y ángulo de fricción ϕ no se evaluaron de manera independiente, en su lugar se seleccionaron tres (3) tipos de material arenoso con resistencias al corte ($c - \phi$) y densidades (compacidades) diferentes.

Los resultados obtenidos de los análisis numéricos mediante el programa Plaxis 3D de la construcción de una PHD, permiten concluir que se produce una variación mayor en los esfuerzos verticales en la arena densa en comparación con los calculados en la arena suelta. Cabe resaltar que dicha variación es de menor magnitud comparada con la producida por la aplicación de las presiones de lodos.

6.5 Efecto de arco en el suelo y la geometría de la PHD

Finalmente, la geometría de la PHD es otra variable que influye en la producción del efecto de arco. De acuerdo con los cálculos numéricos realizados existen solo diferencias ligeras en la extensión del efecto de arco desarrollado para los diámetros menor (túnel piloto) y mayor de la PHD.

6.6 Consecuencias del efecto de arco en el suelo producido en la construcción de una PHD

De acuerdo con los resultados obtenidos de la modelación numérica realizada del proceso constructivo de una perforación horizontal dirigida (PHD) mediante el programa Plaxis 3D, se calculó una reducción en los esfuerzos verticales totales variable en el suelo sobre la tubería entre el 15 % y el 40 % debido al efecto del arco. Es importante notar que este porcentaje de reducción de esfuerzos usualmente no se considera en los diseños del espesor de la tubería que será instalada al interior de la PHD. Esto podría traducirse en un sobredimensionamiento en el diseño mecánico de las tuberías.

Es importante notar que el efecto de arco depende en gran proporción de la magnitud de los desplazamientos que se producen en el suelo en el perímetro de la perforación, así como de la densidad y la resistencia al corte del suelo. El efecto de arco permite transmitir a ambos lados de la tubería un gran porcentaje del peso total propio del suelo localizado por encima de la PHD. Esta redistribución del esfuerzo vertical se desarrolla durante el proceso de construcción de la excavación, de tal forma que una vez se instala la tubería en la PHD, esta soportará esfuerzos menores al esfuerzo geostático calculado a la profundidad de instalación de la tubería.

Debido a que durante el proceso constructivo de una PHD se desarrollan deformaciones cortantes producidas por el movimiento relativo entre los volúmenes de suelo con alto grado de deformación y aquellos volúmenes que tienden a permanecer estacionarios, las zonas del suelo con concentración de deformaciones cortantes alrededor del túnel se plastifican o fallan. Este comportamiento mecánico se calculó en la mayoría de los modelos de análisis evaluados mediante el programa Plaxis 3D, y es similar al reportado en el artículo “Study of ground collapse induced by large-diameter horizontal directional drilling in sand layer using numerical modeling”, publicado por Shu y Ma (2015), quienes con base en la evaluación de una PHD mediante el programa FLAC3D determinaron zonas de falla en regiones de concentración de deformaciones cortantes en forma de “x”, semejantes a las calculadas mediante la evaluación utilizando el programa Plaxis 3D en el proyecto presente.

6.7 Limitaciones del trabajo presente

Los resultados y los análisis expuestos en este documento se limitan a arenas con tres magnitudes diferentes de densidad (resistencia al corte), así como a un rango en la presión de lodos de perforación, la cual es función de la densidad del fluido entre 1200 kg/m^3 a 1600 kg/m^3 . Otros materiales, tales como los suelos cohesivos, las rocas fracturadas o los suelos con comportamiento especial no fueron evaluados, motivo por el cual las conclusiones del trabajo presente sobre una perforación horizontal dirigida (PHD) no son aplicables para este tipo de materiales.

Como consecuencia de la premisa adoptada en el trabajo presente de la formación del “filter cake” o costra solidificada de los lodos de perforación, la permeabilidad de los materiales evaluados se considera cero, por lo cual en el alcance no se incluye la evaluación de la pérdida de los lodos de perforación.

Debido al rango de los valores de las presiones de lodos de perforación y las propiedades de resistencia al corte evaluadas en el trabajo presente, no se calcularon condiciones críticas de deformaciones que indicaran procesos como el “hidrofracturamiento”. Este proceso podría haberse visto reflejado en el aumento de los esfuerzos promedio del suelo en la totalidad del perímetro de la PHD, lo que hubiese generado en lugar de la tendencia

a la convergencia y al aplastamiento de la tubería obtenido en los resultados, la compresión del suelo alrededor de la PHD, mecanismo de deformación que hubiese evitado el desarrollo del efecto de arco, el cual fue calculado en los nueve (9) modelos numéricos evaluados en el trabajo presente.

6.8 Recomendaciones para trabajos futuros

Debido a que el efecto de arco se desarrolla durante la construcción de la PHD, las modelaciones realizadas no incluyen la instalación de la tubería al interior de esta. Por lo anterior se recomienda en trabajos futuros la modelación de la tubería con diferentes espesores y materiales como acero y PVC. De igual modo se sugiere la evaluación de los esfuerzos cortantes y momentos sobre la tubería, así como el estudio de la tubería al pandeo o aplastamiento.

Adicionalmente durante la instalación de la tubería en la PHD, se desarrollan fuerzas resistentes debidas a la fricción entre el suelo y la tubería, el cambio en la dirección de la PHD y el arrastre de los lodos de perforación, estas fuerzas conocidas como fuerzas de halado no son incluidas en el trabajo presente por lo que constituyen un tema adicional de investigación en trabajos futuros.

Dado que el objetivo del presente documento es evaluar la influencia de los lodos de perforación y el efecto de arco en la construcción de una perforación horizontal dirigida (PHD), el alcance no incluye la evaluación de otros procesos que pueden ocurrir durante la ejecución de una PHD, como lo son el hidrofracturamiento y la extrusión de los lodos de la perforación. El proceso de hidrofracturamiento no ocurre debido a que no es permitido por el rango en las propiedades de resistencia al corte y las densidades de los lodos de perforación evaluadas, para futuros trabajos se recomienda la evaluación de materiales de resistencia al corte menor en conjunto con densidades de lodos superiores.

El modelo elástico perfectamente plástico utilizado en la modelación presenta algunas limitaciones al considerar que la rigidez del suelo no se ve influenciada por la presión de lodos aplicada, ignorando las distorsiones angulares causadas por los cambios en la

100 Modelación numérica del efecto de arco y la presión de lodos en una perforación horizontal dirigida

presión de confinamiento durante el desarrollo de la perforación horizontal dirigida. Pese a ello, el modelo realizado fue suficiente para permitir la plastificación del suelo alrededor de la perforación, y dar lugar a la redistribución de los esfuerzos, logrando evidenciar el efecto de arco. Se recomienda para futuros trabajos considerar estas limitaciones para revisar como se desarrolla el efecto de arco en un material con endurecimiento por deformación, bajo el efecto de diferentes presiones de lodos, y la inclusión de las fuerzas de fricción de la tubería con el material excavado.

7. Anexos

- Anexo 1.1 Secciones de análisis modelo 1.1- Escenario 1- Arena suelta
- Anexo 1.2 Secciones de análisis modelo 1.2- Escenario 1- Arena media
- Anexo 1.3 Secciones de análisis modelo 1.3- Escenario 1- Arena densa
- Anexo 2.1 Secciones de análisis modelo 2.1- Escenario 2- Arena suelta
- Anexo 2.2 Secciones de análisis modelo 2.2- Escenario 2- Arena media
- Anexo 2.3 Secciones de análisis modelo 2.3- Escenario 2- Arena densa
- Anexo 3.1 Secciones de análisis modelo 3.1- Escenario 3- Arena suelta
- Anexo 3.2 Secciones de análisis modelo 3.2- Escenario 3- Arena media
- Anexo 3.3 Secciones de análisis modelo 3.3- Escenario 3- Arena densa
- Anexo 4.1 Resultados Escenario E1 - Arena suelta
- Anexo 4.2 Resultados Escenario E1 - Arena media
- Anexo 4.3 Resultados Escenario E1 - Arena densa
- Anexo 4.4 Resultados Escenario E2 - Arena suelta
- Anexo 4.5 Resultados Escenario E2 - Arena media
- Anexo 4.6 Resultados Escenario E2 - Arena densa
- Anexo 4.7 Resultados Escenario E3 - Arena suelta
- Anexo 4.8 Resultados Escenario E3 - Arena media
- Anexo 4.9 Resultados Escenario E3 - Arena densa
- Anexo 5.1 Graficas consolidado Diámetro D1
- Anexo 5.2 Graficas consolidado Diámetro D2
- Anexo 5.3 Graficas consolidado Diámetro D3

8. Bibliografía

- Baumert, M. E., & Allouche, E. N. (2002). Methods for Estimating Pipe Pullback Loads for Horizontal Directional Drilling (HDD) Crossings. *Journal of Infrastructure Systems*, 8(1), 12–19. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1076-0342\(2002\)8:1\(12\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1076-0342(2002)8:1(12))
- Baumert, M. E., Allouche, E. N., & Moore, I. D. (2005). Drilling Fluid Considerations in Design of Engineered Horizontal Directional Drilling Installations. *International Journal of Geomechanics*, 5(4), 339–349. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1532-3641\(2005\)5:4\(339\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1532-3641(2005)5:4(339))
- Cai, L., Xu, G., Polak, M. A., and Knight, M. (2017). Horizontal directional drilling pulling forces prediction methods – A critical review. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 69(November 2015), 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.05.026>
- Deltares, K. (2009). The trenchless technique horizontal directional drilling Soil related risks and risk mitigation. *In Proceeding of the 4th Pipeline Technology Conference*, 99–109. <http://ezproxy.upm.edu.my:2260/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=13&sid=74bed4d9-8c93-4c38-8a77-49b6923eb9dc%40sessionmgr113&hid=124>
- Elwood, D. (2008). Hydraulic fracture experiments in a frictional material and approximations for maximum allowable mud pressure. 1988, 1681–1688. <http://qspace.library.queensu.ca/handle/1974/1343>
- Faghih, A., Yi, Y., Bayat, A., & Osbak, M. (2015). Fluidic Drag Estimation in Horizontal Directional Drilling Based on Flow Equations. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 6(4), 1–8. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ps.1949-1204.0000200](https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000200)
- Finite, A. C., Program, E., Stability, G., and Analysis, D. (n.d.). Geotechnical Analysis Software Complete Geotechnical Deformation.*
- Guohui, L., Xiaocheng, M., & Chunling, Y. (2016). Engineering innovation of a length of nearly 3300m large diameter pipeline installed by HDD. *Earth Sciences Research Journal*, 20(1), P1–P5. <https://doi.org/10.15446/esrj.v20n1.54504>
- Han, J., Wang, F., Al-Naddaf, M., & Xu, C. (2017). Progressive Development of Two-Dimensional Soil Arching with Displacement. *International Journal of Geomechanics*, 17(12), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001025](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001025).
- LbSTT, Aspectos generales de la perforación horizontal dirigida. Asociación Ibérica de tecnología SIN Zanja. Universidad Politécnica de Valencia. Madrid (2015).
- Klaus-Jurgen Bathe - Finite Element Procedures in Engineering Analysis (Prentice-Hall civil engineering and engineering mechanics series) (1982).pdf. (n.d.).
- James A. McKelvey. (1994). The anatomy of soil arching. *Geotextiles and Geomembranes*, 13(5), 317–329. [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(94\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0266-1144(94)90026-4)
- Lawrence, K., & Knight, M. (1998). Addressing geotechnical considerations of horizontal directional drilling using the new design. 981–985.

- Mohd Norizam, M. S., Nuzul Azam, H., Helmi Zulhaidi, S., Abdul Aziz, A., & Nadzrol Fadzilah, A. (2017). Literature review of the benefits and obstacle of horizontal directional drilling. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 271(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012094>
- More, D. (2012). Innovations in Design, Construction, Operations, and Maintenance — Doing More with Less. Pipelines 2012, 307–318.
- Pardo, G. S., & Sáez, E. (2014). Experimental and numerical study of arching soil effect in coarse sand. Computers and Geotechnics, 57, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.01.005>
- PLAXIS 3D Reference Manual. Bentley Systems International Limited, Dublin, 2020.
- Registry, W., & Goldenberg, I. (2013). HD D – H o r i z o n t a l D i r e c t i o n a l D r i l l i n g . T R E N C H L E S S T E C H N O L O G Y F O R A S A F E A N D E F F I C I E N T I N S T A L L A T I O N O F P I P E L I N E S
- Robert, E. S. (n.d.). *Estudio experimental y numérico del efecto de arco*.
- Sargand, S. M., and Masada, T. (2007). Soil Arching over Deeply Buried Thermoplastic Pipe. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1849(1), 109–123. <https://doi.org/10.3141/1849-13>
- Shu, B., and Ma, B. (2015). Study of ground collapse induced by large-diameter horizontal directional drilling in a sand layer using numerical modeling. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(10), 1562–1574. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0388>
- Siddiquee, M. S. A., and Dhar, A. S. (2007). *Determination of Pipe Pullback Load for Horizontal Directional Drilling (HDD) Crossings by Finite Element Method*. 2006, 1–17. [https://doi.org/10.1061/40934\(252\)110](https://doi.org/10.1061/40934(252)110)
- Sterling, R. L. (2018). ScienceDirect Developments and research directions in pipe jacking and microtunneling. *Underground Space*. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.09.001>
- Stuedlein, A. W., and Meskele, T. (2013). *Analysis and Design of Pipe Ramming Installation*. 710.
- Tien, H. (1996). *A Literature Study of the Arching Effect*. 1990.
- Viehöfer, T., Linthof, T., Bezuijen, A., Box, P. O., and Delft, A. B. (n.d.). *STABILITY OF A BOREHOLE DURING HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING 2 . TEC Tunnel Engineering Consultants , P . O . Box 747 , 3900 AS Veenendaal , .*
- Wang, X., and Sterling, R. L. (2007). Stability analysis of a borehole wall during horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(5–6), 620–632. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.01.002>
- Wijeyesekera, D. C., and Warnakulasuriya, S. (2000). *Effects of soil arching on the behaviour of flexible pipes buried in trenches of varying widths*. April.

- Wong, S. K., Giorgini, J. D., You, T. H., Lim, L., & Chadbourne, P. (1994). Navigating through the Venus atmosphere. *Advances in the Astronautical Sciences*, 87(2), 633–645.
- Wu, J., Liao, S. M., and Liu, M. B. (2019). An analytical solution for the arching effect induced by ground loss of tunneling in sand. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83(October 2018), 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.025>
- Wu, Y., Lü, G., Xu, L., Zhang, P., and Mao, N. (2014). Engineering difficulties and technical innovation in the Jiangyin Yangtze River Crossing Project 3300 m HDD. *Natural Gas Industry*, 34(4), 105–110. <https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2014.04.017>
- Xia, H. (2009). Investigation of maximum mud pressure within sand and clay during horizontal directional drilling. 272.
- Xu, G., Cai, L., Ji, R., and Wang, Z. (2018). Numerical simulation of pipe-soil interaction during pulling back phase in horizontal directional drilling installations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 76(June 2017), 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.03.022>
- Yan, X., Ariaratnam, S. T., Dong, S., and Zeng, C. (2018). Horizontal directional drilling: State-of-the-art review of theory and applications. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72(October 2017), 162–173. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.10.005>
- Yang, C. J., Zhu, W. D., Zhang, W. H., Zhu, X. H., & Ren, G. X. (2011). *Determination of Pipe Pullback Loads in Horizontal Directional Drilling Using an Advanced Computational Dynamic Model*. 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000749](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000749).
- Zhang, C., Hu, J., Qian, L., and Zhang, J. (2018). Local Dent Behavior of Directional Crossing Pipeline Caused by the Boulder in Stratum. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 18(4), 988–997. <https://doi.org/10.1007/s11668-018-0490-9>
- Zhu, X. H. (2015). Failure analysis and solution studies on drill pipe thread gluing at the exit side of horizontal directional drilling. *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Oil and Gas Industry*, 33, 153–173. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100117-2.00004-2>
- Zou, J., Chen, G., and Qian, Z. (2019). Tunnel face stability in cohesion-frictional soils considering the soil arching effect by improved failure models. *Computers and Geotechnics*, 106(October 2018), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.10.014>