



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

**ANÁLISIS NUMÉRICO Y ANALÍTICO DE LA FALLA DE FONDO POR
SUBPRESIÓN EN UNA LUMBRERA CONSTRUIDA EN SUELOS.**

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

**PRESENTA:
JUAN CARLOS VALENZUELA MEZA**

**TUTOR (ES) PRINCIPAL(ES)
EDGAR MONTIEL GUTIÉRREZ
ALEXANDRA OSSA LÓPEZ
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**

CIUDAD DE MÉXICO, MARZO 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO

Secretario: M.I. AGUSTÍN DEMÉNEGHI COLINA

1^{er.} Vocal: M.I. EDGAR MONTIEL GUTIÉRREZ

2^{do.} Vocal: DRA. ALEXANDRA OSSA LÓPEZ

3^{er.} Vocal: DR. MIGUEL ÁNGEL MÁNICA MALCOM

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

TUTOR DE TESIS:

M.I. EDGAR MONTIEL GUTIÉRREZ

FIRMA

CO-TUTOR DE TESIS:

DRA. ALEXANDRA OSSA LÓPEZ

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, que siempre me ha dado su respaldo en todos los proyectos de mi vida.

A mis tutores de tesis, El M.i. Edgar Montiel Gutiérrez y la Dra Alexandra Ossa López por su acompañamiento incondicional, motivación e instrucción en la realización de este trabajo, así como su confianza y amistad.

Al Dr. Miguel Mánica, por su gran contribución a este trabajo.

A el Dr. Rigoberto Rivera Constantino y al M.i. Agustín Deméneghi Colina por los comentarios y correcciones que mejoraron este trabajo.

Al instituto de Ingeniería de la UNAM

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el valioso apoyo económico para la obtención de este grado académico.

A mis compañeros y amigos de la Maestría e Instituto de Ingeniería, por su ayuda y enseñanzas en este nuevo campo de conocimiento.

A todos aquellos que contribuyeron de manera positiva en la finalización de este proyecto.

Gracias.

CONTENIDO

Resumen.

1. Introducción.	1
2. Objetivos.	2
2.1. Objetivo principal.	2
2.2. Objetivos específicos.	2
3. Marco teórico.	3
3.1. Las lumbreras y sus componentes.....	3
3.1.1. Lumbreras.....	3
3.1.2. Componentes de una lumbrera.	4
3.2. Diseño de lumbreras.	5
3.3. Construcción de lumbreras.	5
3.3.1. Proceso constructivo.....	5
3.3.2. Técnicas de construcción.....	6
3.4. Estado límite de falla.	15
3.4.1. Métodos analíticos para el análisis de fallas.....	15
3.4.2. Modelado numérico para el análisis y diseño de una lumbrera.....	27
3.5. Reseña de construcción de lumbreras en los suelos del valle de México y presencia de fallas.	31
3.5.1. Reseña de construcción de lumbreras en los suelos del valle de México.....	31
3.5.2. Reporte de presencia de fallas lumbreras en los suelos del valle de México.	32
4. Metodología de trabajo.....	36
4.1. Caso de estudio.	36
4.2. Elección del método constructivo para el análisis.	37
4.3. Análisis de la ecuación analítica del factor de seguridad.	38
4.3.1. Análisis de riesgo.	39
4.3.2. Condiciones de análisis.	41
4.3.3. Resultados del análisis de riesgo de la ecuación analítica.....	42
4.3.4. Análisis de sensibilidad	44
4.3.5. Análisis del factor de adherencia.....	45

4.4.	Modelado numérico.	48
4.4.1.	Rock and soil V0.9.	48
4.4.2.	Modelización del caso de estudio.	48
4.4.3.	Requerimientos para el desarrollo del mecanismo de falla por subpresión. ..	52
4.4.4.	Procedimientos para simulación de la falla por subpresión.	53
4.4.5.	Criterio para la determinación de la falla.	55
4.4.6.	Criterio de convergencia.	57
4.4.7.	Influencia del valor de la tolerancia.	59
5.	Resultados de los procedimientos.	61
5.1.	Resultados de la simulación de reducción de resistencia.	61
5.1.1.	Discusión del procedimiento de reducción de resistencia.	61
5.2.	Resultados de la disminución de la fuerza del lodo en el fondo de la lumbrera.	62
5.3.	Resultados de la presurización del estrato permeable.	66
5.3.1.	Inclusión de una fuerza en el estrato permeable.	68
5.4.	revisión los de los procedimientos.	70
5.5.	Variación del espesor del estrato impermeable.	71
5.6.	Variación De la resistencia al corte no drenada en el estrato impermeable.	74
5.7.	variación del diámetro de la lumbrera.	77
5.8.	Variación del espesor del estrato permeable.	79
5.9.	Análisis del procedimiento de reducción de resistencia con la presurización del estrato.	79
6.	Comparacion de los resultados analiticos y numericos.	81
7.	Conclusiones.	84
8.	Sugerencias y recomendaciones.	87
9.	Bibliografía.	88

ANEXO1. Estado límite de servicio y estado límite de falla.

ANEXO 2. Selección de la ecuación analítica y comparación del comportamiento de las ecuaciones con las variables de entrada.

ANEXO 3. Distribuciones de las variables de la ecuación analítica.

ANEXO 4. Secuencia de plastificación en las simulaciones para la falla de subpresión.

ANEXO 5. Modelos numéricos con modificaciones de las variables estudiadas en el mecanismo de falla por subpresión.

LISTA DE FIGURAS.

FIGURA 3.1. LUMBRERA DESDE VISTA CENIT.	3
FIGURA 3.2. ESQUEMA DE PARTES DE UNA LUMBRERA (CFE AND II-UNAM 2018)	4
FIGURA 3.3. PASOS DE LA PRIMERA ETAPA, TÉCNICA SOLUM (ZEMVA 2011).....	7
FIGURA 3.4. EXCAVACIÓN DEL NÚCLEO, TÉCNICA SOLUM(ZEMVA 2011)	8
FIGURA 3.5. ESQUEMA DE PROCESO DE EXCAVACIÓN, TÉCNICA SOLETANCHE(ZEMVA 2011). 9	
FIGURA 3.6. SECCIONES DE COLADO, TÉCNICA SOLETANCHE (ZEMVA 2011).	9
FIGURA 3.7. CONSTRUCCIÓN DE COLUMNA, PRIMER ANILLO Y PRIMERA SERIE DE COLUMNAS (ZEMVA 2011).	10
FIGURA 3.8. A) TRAZADO DE BROCALES B) EXCAVACIÓN DE ZANJA Y MURO PANTALLA (ORDUÑO AND AUVINET 2010).	11
FIGURA 3.9. PASOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA LUMBRERA MÉTODO CRAVIOTO (ORDUÑO AND AUVINET 2010).	13
FIGURA 3.10. TIPOS DE ANILLOS DE MÉTODO DE ANILLOS PREFABRICADOS. A) DE FONDO. B) DE ACCESO. C) SUPERIORES (ZEMVA 2011).....	14
FIGURA 3.11. A) INSTALACIÓN DEL PRIMER ANILLO. B) VISTA GENERAL DE LOS TODOS LOS ANILLOS TERMINADOS (ZEMVA 2011)	15
FIGURA 3.12. ESQUEMA DE FUERZAS DE NASH Y JONES (CFE AND II-UNAM 2018).....	17
FIGURA 3.13. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL CRITERIO DE G. AAS (CFE AND II-UNAM 2018).....	17
FIGURA 3.14. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD. CRITERIO DE ALBERRO Y AUVINET (CFE AND II- UNAM 2018).....	18
FIGURA 3.15. ESQUEMA DE FALLA DE NÚCLEO (CFE AND II-UNAM 2018).....	19
FIGURA 3.16. ESQUEMA DE LA FALLA DE FONDO POR SUBPRESIÓN (RAMÍREZ DÍAZ 2013)....	20
FIGURA 3.17. ESQUEMA DE FALLA DE FONDO POR CORTANTE (ZEMVA 2011).	21
FIGURA 3.18. ESQUEMA DE FALLA DE FONDO POR CORTANTE CON PRESENCIA DE ESTRATO RESISTENTE PRÓXIMO AL FONDO DE LA LUMBRERA (TAMEZ GONZÁLEZ 2001).	22
FIGURA 3.19. ESQUEMA DE FALLA DE SUBPRESIÓN (ZEMVA 2011)	23
FIGURA 3.20. ESQUEMA DEL MECANISMO DE FALLA DE FONDO POR CORTANTE DEL MANUAL CFE. (CFE AND II-UNAM 2018).....	24
FIGURA 3.21. ESQUEMA DEL MECANISMO DE FALLA DE FONDO POR SUBPRESIÓN. (CFE AND II-UNAM 2018).	25
FIGURA 3.22. SUPERFICIE DE FALLA DE PARED CON EL PROCEDIMIENTO DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA (CFE AND II-UNAM 2018).....	29
FIGURA 3.23. SUPERFICIE DE FALLA DE NÚCLEO CON EL PROCEDIMIENTO DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA.	30
FIGURA 3.24. ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA ESTABILIDAD DEL FONDO POR CORTANTE CON EL PROCEDIMIENTO DE REDUCCIÓN DE PARÁMETROS (AUVINET GUICHARD AND RODRÍGUEZ 2011).	31
FIGURA 3.25. A) ESQUEMA DE FALLA DE LA LUMBRERA 6, B). ESQUEMA DE FALLA DE LA LUMBRERA 7. (ZEMVA 2011),(MORENO-FERNÁNDEZ 1991).	33

FIGURA 4.1. ESQUEMA DEL MODELO GEOTÉCNICO Y DE LAS DIMENSIONES DE LA LUMBRERA.	38
□ FIGURA 4.2. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADO.	41
FIGURA 4.3. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA LA CONDICIÓN 1.	43
FIGURA 4.4. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA LA CONDICIÓN 2.	43
FIGURA 4.5. DIAGRAMA DE TORNADO PARA LA CONDICIÓN 1.	45
FIGURA 4.6. DIAGRAMA DE TORNADO PARA LA CONDICIÓN 2.	45
FIGURA 4.7. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL FACTOR DE ADHERENCIA.	46
FIGURA 4.8. DISTRIBUCIÓN PARA LA VARIABLE INDEPENDIENTE DEL FACTOR DE ADHERENCIA	46
FIGURA 4.9. DIAGRAMA DE TORNADO PARA LA CONDICIÓN 1 FA INDEPENDIENTE.	47
FIGURA 4.10. DIAGRAMA DE TORNADO PARA LA CONDICIÓN 2 CON FA INDEPENDIENTE.	47
FIGURA 4.11. MALLADO Y CONDICIONES DE FRONTERA PARA EL MODELO NUMÉRICO AXISIMÉTRICO.	50
FIGURA 4.12. ETAPAS DE MODELIZACIÓN.	52
FIGURA 4.13. VARIACIÓN DE LA ALTURA DEL LODO A) ETAPA 4, B) ETAPA DE FALLA	54
FIGURA 4.14. PERFIL DE PRESIÓN DE PORO, A) ETAPA 4, B) ETAPA PRESURIZADA	55
FIGURA 4.15. INCREMENTO DE CARGA HIDRÁULICA VS DESPLAZAMIENTO MÁXIMO.	56
FIGURA 4.16. INCREMENTO DE CARGA HIDRÁULICA VS DESPLAZAMIENTO MÁXIMO, PARA VARIOS PUNTOS EN EL ESTRATO IMPERMEABLE.	58
FIGURA 4.17. RESPUESTA DE UN RESORTE NO LINEAL A CARGAS APLICADAS (ROCSCIENCE INC 2019).	59
FIGURA 4.18. EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA EN LA TOLERANCIA.	60
FIGURA 5.1. DESPLAZAMIENTOS TOTALES RESULTANTES DE LA SIMULACIÓN DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA.	61
FIGURA 5.2. DESPLAZAMIENTOS TOTALES RESULTANTES DE LA SIMULACIÓN DE DISMINUCIÓN DE CARGA DE LODO.	63
FIGURA 5.3. ELEMENTOS PLASTIFICADOS POR TENSIÓN Y POR CORTANTE.	63
FIGURA 5.4. DESPLAZAMIENTOS TOTALES RESULTANTES DE LA SIMULACIÓN DE DISMINUCIÓN DE CARGA DEL LODO, CON INCREMENTO DE TENSIÓN.	64
FIGURA 5.5. RESULTADOS DE LA DISMINUCIÓN DE CARGA EN LA ETAPA DE FALLA. A) PORCENTAJE DE PLASTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS. B) DISTRIBUCIÓN DE $\sigma'3$.	64
FIGURA 5.6. DESPLAZAMIENTOS INCREMENTALES EN LA ETAPA DE FALLA POR DISMINUCIÓN DE CARGA DEL LODO.	65
FIGURA 5.7. DEFORMACIÓN CORTANTE MÁXIMA DE LA DISMINUCIÓN DE CARGA DE LODO, A) ETAPA 4. B) ETAPA DE FALLA.	65
FIGURA 5.8. DESPLAZAMIENTOS TOTALES RESULTANTES DE LA SIMULACIÓN DE POR PRESURIZACIÓN.	66
FIGURA 5.9. RESULTADOS DE LA PRESURIZACIÓN DEL ESTRATO EN LA ETAPA DE FALLA. A) PORCENTAJE DE PLASTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS. B) DISTRIBUCIÓN DE $\sigma'3$.	67

FIGURA 5.10. DESPLAZAMIENTOS INCREMENTALES EN LAS ETAPAS DE FALLA POR PRESURIZACIÓN DEL ESTRATO.	68
FIGURA 5.11. DEFORMACIÓN CORTANTE MÁXIMA DE LA SIMULACIÓN POR PRESURIZACIÓN, A) ETAPA 4. B) ETAPA DE FALLA.	68
FIGURA 5.12. MODELO PARA LA FALLA DE SUBPRESIÓN CON LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA FUERZA.	69
FIGURA 5.13. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE INCREMENTO DE CARGA EN LA ETAPA DE FALLA.	69
FIGURA 5.14. RESULTADOS DEL INCREMENTO DE CARGA HIDRÁULICA PARA LOS MODELOS CON MODIFICACIONES DEL ESPESOR DEL ESTRATO IMPERMEABLE.	72
FIGURA 5.15. DEFORMACIONES MÁXIMAS DE CORTE INCREMENTALES A PARTIR DE LA ETAPA 4, HASTA LA ETAPA DE FALLA, PARA UN ESPESOR DE 11.9 M.	73
FIGURA 5.16. DEFORMACIONES INCREMENTALES A PARTIR DE LA ETAPA 4, A LA ETAPA DE FALLA, PARA UN ESPESOR DE 11.9 M.	74
FIGURA 5.17. RESULTADOS DEL INCREMENTO DE CARGA HIDRÁULICA CON LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADO EN LA SECCIÓN DE SUELO IMPERMEABLE. ESPESOR DEL ESTRATO 5.3 M.	75
FIGURA 5.18. RESULTADOS DEL INCREMENTO DE CARGA HIDRÁULICA CON LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADO EN LA SECCIÓN DE SUELO IMPERMEABLE. ESPESOR DEL ESTRATO IMPERMEABLE DE 8.5 M.	76
FIGURA 5.19. RESULTADOS DEL INCREMENTO DE CARGA HIDRÁULICA CON LA VARIACIÓN DEL DIÁMETRO, PARA UN ESPESOR DE 5.3 M.	77
FIGURA 5.20. RESULTADOS DEL INCREMENTO DE LA CARGA HIDRÁULICA CON LA VARIACIÓN DEL DIÁMETRO, PARA UN ESPESOR DE 5.3 M, 6 M, 8.5 M.	78
FIGURA 5.21. FACTOR DE SEGURIDAD (MÉTODO DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA) VS MODELO INICIAL CON INCREMENTO DE CARGA HIDRÁULICA (5.3 M DE ESPESOR).	80
FIGURA 5.22. FACTOR DE SEGURIDAD (MÉTODO DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA) VS MODELO INICIAL CON INCREMENTO DE CARGA HIDRÁULICA (8.5 M DE ESPESOR).	81
FIGURA A0.1. VARIACIÓN DEL FS CON LA MODIFICACIÓN DE DISTINTAS VARIABLES, EN LAS 3 ECUACIONES.	94
FIGURA A2.2. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DE LAS VARIABLES DE LA ECUACIÓN ANALÍTICA.	95
FIGURA A5-3. SECUENCIA DE PLASTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE GAUSS EN LOS ELEMENTOS PARA EL PROCEDIMIENTO DE DISMINUCIÓN DE CARGA DE LODO.	96
FIGURAA5-4. SECUENCIA DE PLASTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE GAUSS EN EL PROCEDIMIENTO DE DISMINUCIÓN DE CARGA, CON RESISTENCIA A LA TENSIÓN.	97
FIGURA A5-5. SECUENCIA DE PLASTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE GAUSS EN LOS ELEMENTOS DEL SUELO CON EL PROCEDIMIENTO DE PRESURIZACIÓN	98
FIGURA A5-6. SECUENCIA DE PLASTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE GAUSS CON EL PROCEDIMIENTO DE PRESURIZACIÓN Y 3.9 M DE ESTRATO IMPERMEABLE	99
FIGURA A5-7. SECUENCIA DE PLASTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE GAUSS CON EL PROCEDIMIENTO DE PRESURIZACIÓN Y 11.9 M DE ESTRATO IMPERMEABLE	100

FIGURA A6-8. MODELOS NUMÉRICOS CON DIFERENTES ESPESORES DEL ESTRATO IMPERMEABLE. A) ESPESOR DE 3.9 M. B) ESPESOR DE 6 M. C) ESPESOR DE 11.9 M.....	101
FIGURA A6-9. A) MODELO NUMÉRICO CON LA ADICIÓN DEL NUEVO MATERIAL. B) PERFIL DE VARIACIÓN DE SU PARA UN VALOR MENOR AL ESTABLECIDO.	102
FIGURA A6-10. MODELOS NUMÉRICOS CON DIFERENTES DIÁMETROS. A) DIÁMETRO DE 18 M. B) DIÁMETRO DE 30 M	102
FIGURA A6-11. MODELOS NUMÉRICOS CON DIFERENTES ESPESORES DEL ESTRATO PERMEABLES. A) ESPESOR DE 1.8 M B) ESPESOR DE 7.4 M.....	103

LISTA DE TABLAS.

TABLA 1. FACTORES PARA LA REVISIÓN DE LA FALLA DE FONDO POR CORTANTE.....	25
TABLA 2. PROPIEDADES DEL MODELO GEOTÉCNICO A ANALIZAR.	36
TABLA 3. PARÁMETROS PARA EL ANÁLISIS NUMÉRICO.	50
TABLA 4. FS MINIMO ALCANZADO CON LA VARIACION DE LOS PARAMETROS DE ENTRADA EN LA ECUACION ANALITICA.	82
TABLA 5. VALOR NECESARIO DE LOS PARAMETROS PARA ALCANZAR LOS FACTORES DE SEGURIDAD PROPUESTOS Y SUS EQUIVALENTES EN EL MODELO NUMERICO.	82
TABLA 6. ECUACIONES ANALÍTICAS PRESELECCIONADAS PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO. ..	93

RESUMEN.

Con la finalidad de analizar el desarrollo del mecanismo de falla por subpresión, en el proceso constructivo de una lumbrera en suelos blandos, en el presente trabajo se elaboró una sección introductoria. En esta, se expone los conceptos y herramientas necesarias para que el lector se familiarice y determine la utilidad e importancia de este estudio. Dentro de la sección introductoria se discuten los conceptos básicos de las lumbreras, su procedimiento de diseño, las técnicas de construcción y el estado límite de falla. En este último se hace hincapié en el análisis analítico y numérico de la falla por subpresión, así como la contextualización del mecanismo de falla. Adicionalmente se presenta un breve recuento de las lumbreras construidas y las fallas reportadas en suelos similares al caso de estudio.

La evaluación de la falla por subpresión se realizó a través de métodos analíticos y numéricos para un caso de estudio. A nivel analítico se realizó un análisis de riesgo y sensibilidad utilizando la simulación Montecarlo con el programa de análisis @risk. A nivel numérico se realizó un análisis en elementos finitos utilizando el programa de cómputo de Rs2 (Rocscience). En el análisis numérico se evaluaron distintos procedimientos para simular el mecanismo de falla. Adicionalmente se evaluó la influencia de las variables que intervienen en la estabilidad de la presencia de la falla en dichos procedimientos.

Derivado de los resultados, dentro de un enfoque analítico, se destaca que: En la ecuación analítica la variable de salida, F_s , presenta una baja sensibilidad con las modificaciones de las variables de entrada. Adicionalmente que los valores mínimos de F_s , para estar del lado de la seguridad, son conservadores. Dentro de un enfoque numérico se destaca que: El procedimiento numérico de presurización del estrato permeable es aquel con mayor representatividad del mecanismo de falla a simular. En este procedimiento se encontró la existencia de valores críticos, bajo los cuales se desarrolla el mecanismo de falla por subpresión. Finalmente, se concluye que para evaluar la falla por subpresión es necesaria la implementación de un análisis numérico, que permita obtener una visión de la probabilidad de ocurrencia de esta falla.

1. INTRODUCCIÓN.

El diseño de una lumbrera involucra la selección de un procedimiento constructivo acorde con los requerimientos del proyecto y las condiciones geotécnicas del sitio. Para una solución determinada, es necesaria la evaluación, a través de distintas metodologías, de la respuesta que la construcción de la lumbrera impondrá al terreno circundante. Dicha respuesta deberá cumplir con los estados límites de falla y de servicio establecidos para el proyecto.

Entre las etapas de construcción de una lumbrera, la etapa de excavación y sostenimiento es aquella que induce las mayores modificaciones a la condición de equilibrio, y en donde la ocurrencia de una falla es crítica (Puller 2003). A medida que se profundiza la excavación, la probabilidad de desarrollo de un determinado mecanismo de falla incrementa. La fase entre la finalización de la excavación y la construcción de la losa de fondo es el momento crítico para la ocurrencia de una falla de fondo por subpresión o por cortante. Estas fallas presentan un enorme impacto en el avance de una obra debido a la dificultad de los trabajos de reacondicionamiento que involucran (Montiel et al. 2018).

En la práctica la evaluación de la falla por subpresión se realiza acorde a manuales, como se observa en los trabajos realizados por (Acevedo Valle and Aguilar Téllez 2019) (Vargas et al. 2019) (Aguilar Téllez and Acevedo Valle 2018). En estos manuales se delimita un factor de seguridad mínimo para estar de lado de la seguridad. Este factor de seguridad se evalúa empleando ecuaciones analíticas basadas en análisis de equilibrio límite.

Dentro de la revisión del caso de estudio que evalúa la presencia de la falla y su respectivo factor de seguridad se observa que, la evaluación de la falla por subpresión implementando la ecuación analítica puede llegar a sobreestimar el riesgo de presencia de esta. Por otro lado, los lineamientos para la simulación numérica de la falla por subpresión son escasos y generalmente se enfocan en la simulación de medidas preventivas al desarrollo de la falla (Auvinet Guichard and Rodríguez 2011)(CFE and II-UNAM 2018).

Con base en lo anterior y en la escasa bibliografía que presenta evidencia de la ocurrencia de la falla por subpresión, en este documento se procede a realizar, un análisis estadístico a la ecuación analítica, en el que se evalúa su representatividad y la sensibilidad de la ecuación a las variables de entrada. Posteriormente se plantean procedimientos que permitan simular numéricamente la falla por subpresión. Finalmente, se evalúa la influencia de las variables que intervienen en el desarrollo de la falla en los procedimientos implementados.

2. OBJETIVOS.

2.1. OBJETIVO PRINCIPAL.

- Analizar el desarrollo del mecanismo de falla por subpresión, en el proceso constructivo de una lumbrera en suelos blandos, implementando ecuaciones analíticas y análisis numéricos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Revisar la correlación existente entre las fallas que acontecen en el fondo de la excavación de la lumbrera, durante el proceso constructivo.
- Recopilar y analizar las distintas expresiones analíticas para la evaluación del mecanismo de falla por subpresión.
- Seleccionar una ecuación analítica para la falla por subpresión, con base en su relevancia, y evaluar su comportamiento a partir de la incertidumbre de sus variables de entrada, empleando un análisis de riesgo.
- Obtener el grado de incidencia de cada una de las variables que intervienen en la ecuación analítica, empleando un análisis de sensibilidad.
- Plantear procedimientos, con análisis numéricos, que permitan reproducir el mecanismo de falla por subpresión, evaluando su aplicación numérica y su representatividad de las características del entorno a simular.
- Plantear un factor de seguridad para cada uno de los procedimientos que modelizan numéricamente el mecanismo de la falla por subpresión.
- Evaluar la incidencia de las variables que intervienen en el mecanismo de falla por subpresión en los procedimientos planteados en el análisis numérico.
- Comparar los resultados de la ecuación analítica con los resultados obtenidos en la evaluación numérica para la falla por subpresión.
- Concluir el nivel de importancia de realizar la evaluación de la falla de subpresión a través de los análisis numéricos.

3. MARCO TEÓRICO.

3.1. LAS LUMBRERAS Y SUS COMPONENTES.

En este apartado se realiza una descripción de la definición de lumbrera, sus componentes y sus funciones, garantizando un manejo de los términos utilizados en el transcurso del texto, la visualización de su estructura y la determinación de la utilidad e importancia de su estudio.

3.1.1. Lumbreras.

Las lumbreras son pozos verticales o inclinados de gran diámetro que poseen diversidad de formas geométricas, siendo las cilíndrica la forma preponderante por el efecto de arqueo. Las lumbreras poseen un amplio rango de diámetro y profundidad acorde a su función a desempeñar. La geometría en conjunto con las características del terreno en el que construya (roca o suelo) determinan la técnica de construcción adecuada a implementar (Jiménez Argüelles et al. 2016)(Chandrasegaran and Bachy Soletanche 2013). En la Figura 3.1 se muestra la imagen de una lumbrera.

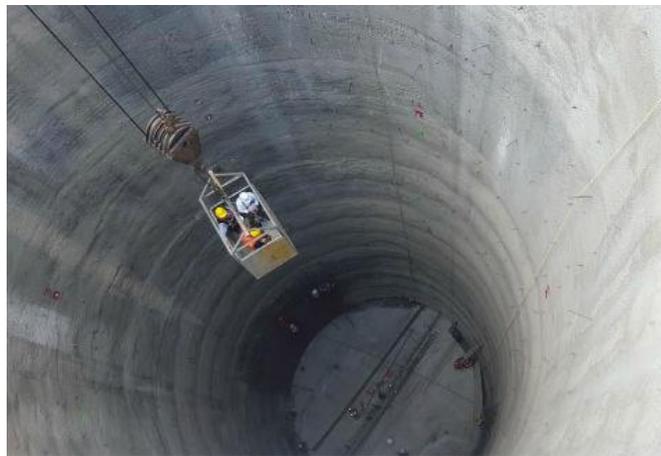


Figura 3.1. Lumbrera desde vista cenit.

Las lumbreras principalmente se encuentran en obras asociadas a la minería y obras civiles. Dentro de las obras civiles las lumbreras están presentes en la realización de túneles y sistemas de drenaje profundos (Puller 2003). En la elaboración de túneles las lumbreras se emplean durante la etapa de construcción y operación. En la etapa de construcción cumplen un papel primordial en actividades como: excavación, ventilación, bombeo, transporte vertical de material de construcción y de personas, instalación eléctrica y de aire comprimido. En la etapa de operación las lumbreras se emplean como medio de ventilación y de acceso de emergencia (Jiménez Argüelles et al. 2016). Las lumbreras en los sistemas de drenaje comunican las aguas de canales colectores superficiales a drenajes profundos, contienen estaciones de bombeo y estaciones de tratamiento de aguas residuales (Luna 2010).

3.1.2. Componentes de una lumbrera.

Las lumbreras se conforman por: una losa de fondo, un muro definitivo, una losa tapa y una estructura de empotramiento para su conexión. Dependiendo de factores como: la geometría y dimensiones de la lumbrera, estratigrafía, tipo de terreno y la condición piezométrica, estas obras subterráneas poseen elementos adicionales específicos de cada proyecto (CFE and II-UNAM 2018). En la Figura 3.2 se encuentra un esquema con los componentes de una lumbrera. A continuación, se describen los elementos más comunes en las lumbreras.

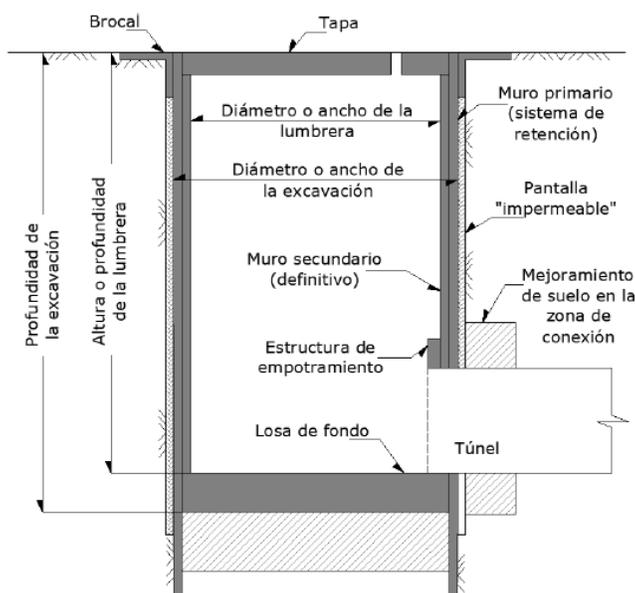


Figura 3.2. Esquema de partes de una lumbrera (CFE and II-UNAM 2018) .

Brocales. Son elementos estructurales de mayor resistencia que el terreno circundante, comúnmente de concreto armado, que se ubican en la superficie y delimitan el diámetro de la lumbrera. Se construyen dos tipos de brocal, el interior y el periférico, para guiar la excavación anular. Adicionalmente los brocales estabilizan el terreno, impiden el agrietamiento y son elementos de soporte para estructuras, herramientas y maquinaria (Aguilar Téllez and Acevedo Valle 2018)

Losa de fondo. Es una estructura en el fondo de la lumbrera, que constituye la base de la estructura comúnmente de concreto armado. Se elabora en el exterior de la lumbrera (técnica de lumbrera flotada) o en el interior de la lumbrera, colado in situ, en condiciones secas o sumergidas (Chandrasegaran and Bachy Soletanche 2013).

Revestimiento definitivo. Son los revestimientos finales de la lumbrera que deben impermeabilizar el interior de esta y resistir el empuje proporcionado por el terreno.

Revestimiento temporal. Son revestimientos que se emplean para soportar los empujes del terreno a corto plazo, para ser reforzados posteriormente con un revestimiento definitivo. Estos revestimientos mitigan las deformaciones y son utilizados en la técnica de construcción de anillos prefabricados y en la técnica Icos.

Muro pantalla. Es un muro auxiliar de baja calidad realizado previo a la excavación del núcleo con profundidad mayor a la del fondo de la lumbrera. Este reduce la probabilidad de la falla de las paredes, falla de fondo por cortante y la posible extrusión del suelo a través de juntas.

Obras auxiliares. Para el proceso de excavación se requiere fosos para el almacenamiento de lodo bentonítico hidratado y el espacio propicio para el equipo de mezcla y dosificación del mismo.

3.2. DISEÑO DE LUMBRERAS.

El diseño de una lumbrera involucra la selección de un procedimiento constructivo acorde con los requerimientos del proyecto y las condiciones geotécnicas del sitio. Para una solución determinada es necesaria la evaluación, a través de distintas metodologías, de la respuesta que la construcción de la lumbrera impondrá al terreno circundante. Dicha respuesta deberá cumplir con los estados límites de falla y de servicio establecidos para el proyecto. Los lineamientos de la evaluación de fallas, el factor de seguridad máximo y los criterios para la elección de una técnica de construcción de lumbreras propuesta por el manual de obras subterráneas de la CFE se encuentra en el Anexo 1. Con la finalidad de evaluar la presencia de la falla por subpresión, el desarrollo de esta y los factores que influyen en su desarrollo, a continuación, se describirá las técnicas de construcción de lumbreras y las metodologías de evaluación de respuesta en el suelo circundante (analítica y numérica).

3.3. CONSTRUCCIÓN DE LUMBRERAS.

En el proceso constructivo se destacan 2 etapas, la etapa de excavación y la de armado de la estructura (Puller 2003). Las técnicas de construcción se pueden clasificar en: convencionales, de elementos de retención, mixtas y compensadas. A continuación, se describe los procesos y las principales técnicas de construcción de lumbreras.

3.3.1. Proceso constructivo.

3.3.1.1. Métodos de excavación.

Excavación a mano. Esta excavación se realiza con un gran número de personas, que emplean herramientas manuales para la extracción del material. Actualmente este tipo de excavación es poco usada debido a su alto costo e inseguridad laboral. Sin embargo, puede ser rentable y segura, si se realiza en suelos con alta estabilidad, ausencia de agua, poca profundidad y mano de obra de costo moderado.

Excavación mecánica. Esta excavación se realiza con ayuda de máquinas mecánicas. En suelos generalmente se utiliza una excavadora tipo almeja suspendida de grúas o torres de perforación. Si la excavación presenta mayor profundidad puede ser necesaria la implementación de taladros. Para rocas se emplea taladros con brocas tricónicas de mayor potencia y resistencia, montados en bastidores plegables.

3.3.1.2. Armado de estructuras.

La estabilidad de las paredes y el fondo es parte primordial dentro del procedimiento de excavación. Las lumbreras en rocas secas y sanas generalmente presentan gran estabilidad y se hace innecesario la construcción de un revestimiento. Por el contrario, si la roca se encuentra fracturada o la obra se está realizando en suelos no estables se requiere adicionar un sistema de soporte. Los elementos empleados para la estabilidad son: tablestacas, partes prefabricadas de concreto, moldes de hierro, acero soldado, revestimientos segmentados, paredes de diafragma, revestimiento de hormigón insitu y anclaje en rocas (Puller 2003).

3.3.2. Técnicas de construcción.

Como resultado de las características, propiedades y dimensiones de las lumbreras, su construcción ha presentado un reto ingenieril que demanda el uso de nueva tecnología y nuevas técnicas de construcción. Por lo cual, distintos autores han perfeccionado técnicas acordes a las condiciones del medio, la optimización de recursos, la garantía de buen funcionamiento y estabilidad de la obra.

3.3.2.1. Técnicas convencionales.

En las técnicas convencionales la excavación se realiza a cielo abierto por medios mecánicos o manuales. La excavación se ejecuta en etapas, en la primera etapa se realiza una excavación central a una profundidad determinada, dejando una berma perimetral. En la segunda etapa se retira la berma en sectores alternados, si es necesario se coloca un revestimiento primario de concreto lanzado, reforzado con malla y anclas cortas. Este revestimiento debe colocarse inmediatamente después de haber excavado cada uno de los sectores. Estas etapas se iteran hasta la profundidad deseada (CFE and II-UNAM 2018). Para las técnicas convencionales se requiere, ausencia de agua al interior de la lumbrera y un estudio previo de seguridad de falla en las paredes y falla de fondo.

3.3.2.2. Técnicas de elementos de retención.

En las técnicas de elementos de retención previo a la excavación de la lumbrera, se construye elementos de retención como muros colados in situ, tablestacas y muros de pilas secantes. Los elementos de retención previenen la falla de las paredes por pérdida de confinamiento del material y disminuyen la probabilidad de falla de fondo (CFE and II-UNAM 2018). Dentro de las técnicas más conocidas de elementos de retención se encuentran: la técnica Solum, Soletanche e ICOS.

3.3.2.2.1. Técnica Solum.

Esta técnica se puede sintetizar en 3 etapas, 1) Etapa de excavación del muro exterior. Esta etapa consiste en realizar una delimitación en planta del muro de la lumbrera y su división en 6 partes iguales (secciones). Posteriormente se realiza la construcción del brocal exterior e interior. Con los brocales terminados se procede a realizar perforaciones en cada una de las secciones, finalizadas las perforaciones se retira el material remanente entre estas y adiciona lodo bentonítico para estabilizar. Al terminar la extracción de una sección se introduce una estructura de acero y se cuele el cemento. El procedimiento se realiza de forma alternada entre las secciones hasta completar el perímetro (Paniagua, 2002). La descripción grafica de la secuencia de actividades se presenta en la Figura 3.3.

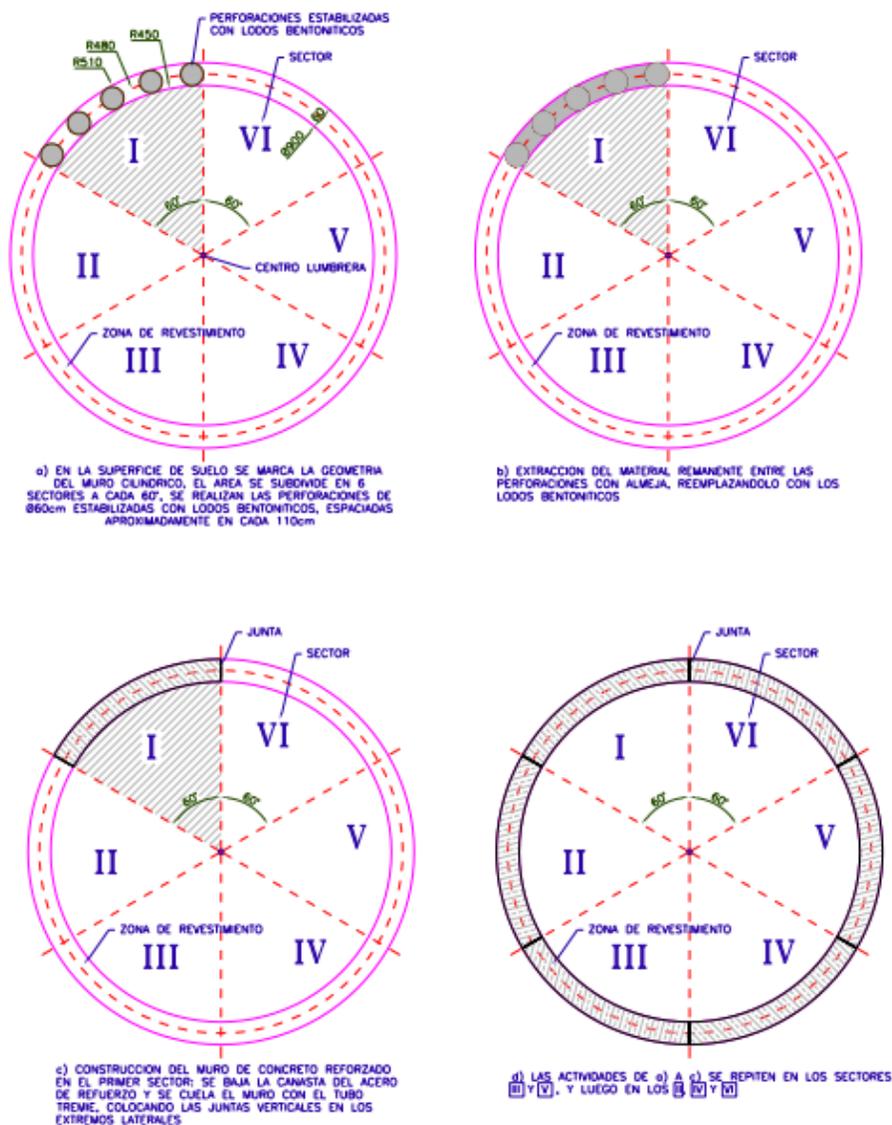


Figura 3.3. Pasos de la primera Etapa, técnica Solum (Zemva 2011).

2) Etapa de excavación del núcleo. Consiste en excavar el núcleo en seco con una excavadora tipo almeja hasta una profundidad menor al punto de desequilibrio y posible bufamiento. Al alcanzar el punto de desequilibrio se debe remplazar el suelo del núcleo extraído por un fluido que ejerza presión hidrostática compensatoria. El esquema representativo de esta etapa se presenta en la Figura 3.4.

3) Construcción de la estructura. Consiste en realizar el colado de una losa de fondo que funciona como un tapón. Posteriormente se coloca una plantilla de acero reforzado que tendrá la función de una segunda losa y fondo definitivo. Al terminar, se extrae el lodo del interior de la lumbrera y se procede a sellar la losa de fondo para evitar filtraciones. Por último, se procede a colar con concreto la losa definitiva y los anclajes en los muros de la lumbrera.

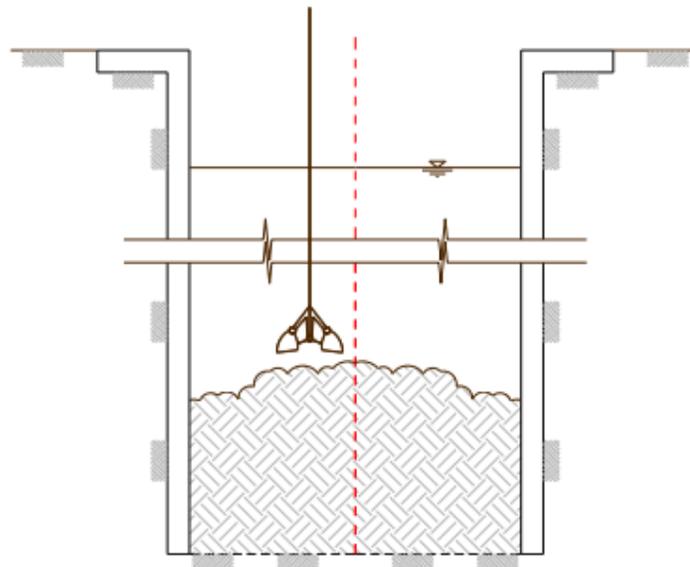


Figura 3.4. Excavación del núcleo, técnica Solum(Zemva 2011)

3.3.2.2.2. *Técnica Soletanche.*

El procedimiento de esta técnica es similar al desarrollado en la técnica Solum. Las diferencias se encuentran en la etapa 1). En esta etapa se emplea un taladro barrenador guiado sobre una vía para la excavación. El material de excavación se extrae mediante una broca rotatoria, extrayendo una mezcla de rezaga con bentonita a través de la tubería de succión, para este proceso es necesaria la inyección de bentonita. Figura 3.5. Adicionalmente en los extremos de cada sección se realiza perforaciones de mayor diámetro, en las que se introduce

una tubería para delimitar cada sección e introducir las parrillas de acero y colarlas posteriormente (Trigo, 2009), (Chandrasegaran & Bachy Soletanche, 2013), Figura 3.6.

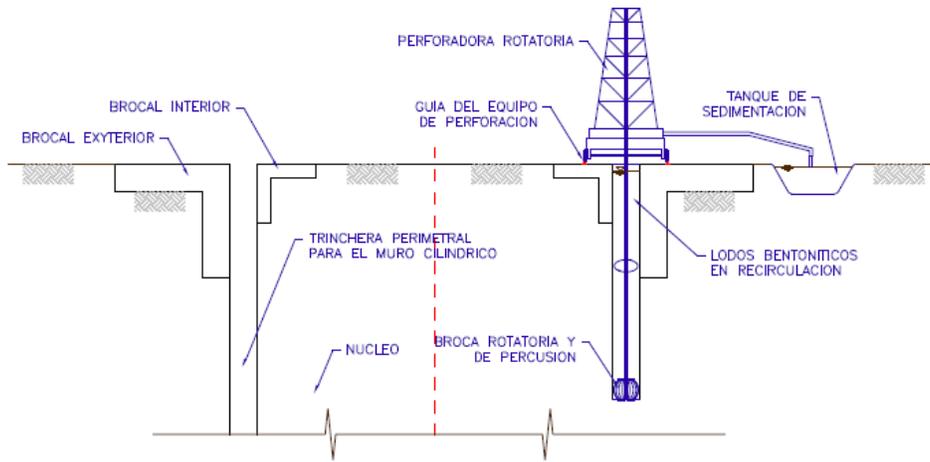


Figura 3.5. Esquema de proceso de excavación, técnica Soletanche(Zemva 2011)

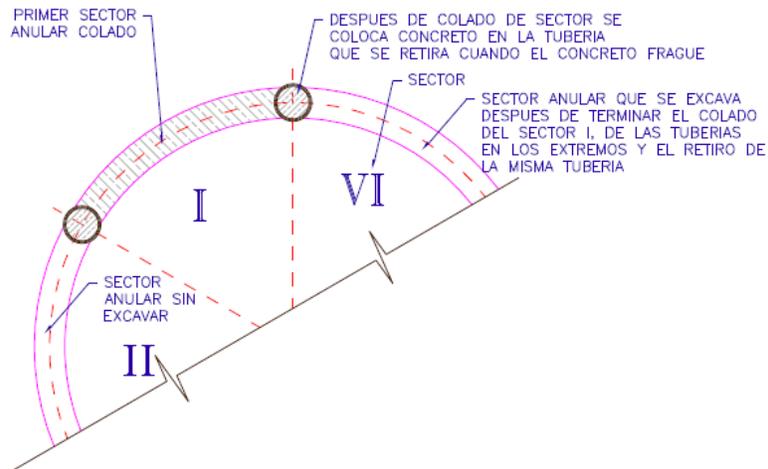


Figura 3.6. Secciones de colado, técnica Soletanche (Zemva 2011).

3.3.2.2.3. Técnica ICOS.

El procedimiento de esta técnica difiere en todas las etapas de la técnica Solum, presentando diferencias sustanciales en las etapas 2) y 3). En la etapa 1), la traza superficial del brocal corresponde a un hexágono circunscrito a un círculo, dando una forma exterior de hexaedro a la lumbrera. En esta etapa también se implementa un revestimiento primario y secundario.

En la etapa 2 y 3 después de colar las paredes del hexágono se excava una corona circular. Esta corona presenta un colado monolítico junto con el primer anillo del revestimiento secundario, obteniendo un anclaje a la pared del hexágono. Terminada su construcción, se

excava el núcleo de la lumbrera hasta una profundidad de 3 m desde la parte inferior del anillo. Esta profundidad es determinada con el fin de colar en las esquinas de las paredes del hexágono columnas, cuyo armado se ancla al de las paredes del revestimiento. Las columnas disminuyen las filtraciones, separan anillos y proporcionan mayor rigidez a la estructura. El procedimiento alternado de anillos y columnas se repite hasta llegar a una profundidad de 25 m. A partir de este nivel ya no se colarán columnas y solo se continuará con la construcción de anillos. La profundidad máxima para esta técnica es 40 m. (Auvinet Guichard 2006) . Por último, se procede a colar la losa de fondo. Este procedimiento se esquematiza en la Figura 3.7.

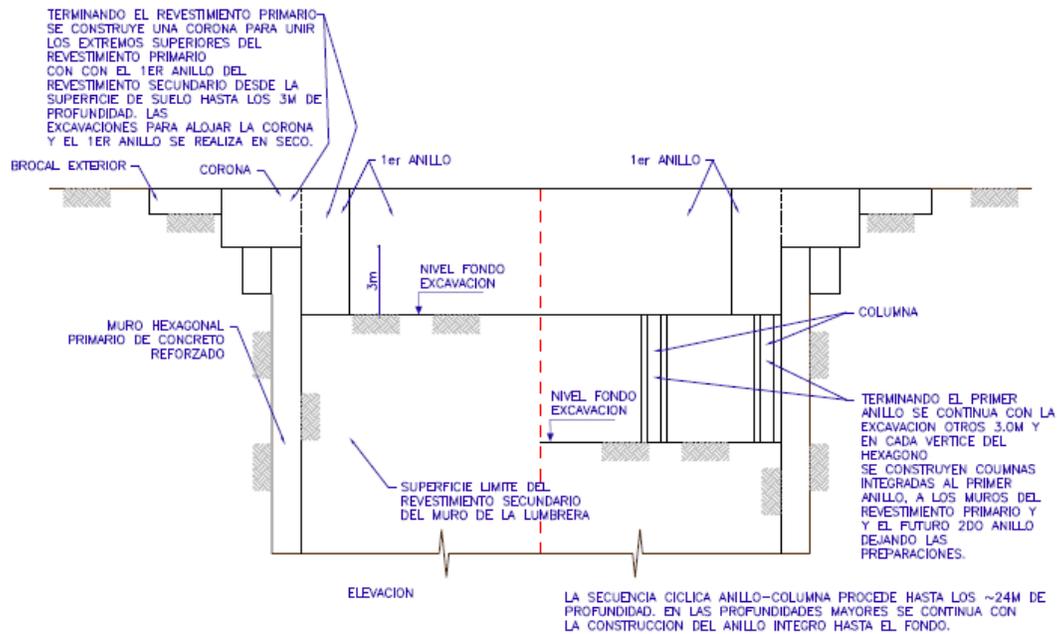


Figura 3.7. Construcción de columna, primer anillo y primera serie de columnas (Zemva 2011).

3.3.2.3. Técnicas mixtas.

Las técnicas mixtas consisten en una combinación de las técnicas de elemento de retención con convencionales. Estas técnicas se emplean cuando la excavación de la lumbrera es inestable hasta una determinada profundidad y posterior a está el suelo es auto estable. Al igual que las técnicas convencionales se requieren un estudio previo de no presencia de falla de paredes y principalmente de falla de fondo.

3.3.2.4. Técnicas compensadas.

Las técnicas compensadas se caracterizan por tener en todo momento un fluido estabilizador dentro de la excavación del núcleo y del anular. Esto elimina la posibilidad de falla de las paredes por extrusión y disminuye de manera drástica la probabilidad de falla de fondo por

cortante. Dentro de las técnicas más conocidas se encuentran la técnica de lumbrera flotante y de anillos prefabricados.

3.3.2.4.1. *Técnica Cravioto (lumbrera flotada)*

Esta técnica fue planteada por los ingenieros Jorge Cravioto y Abel Villareal en 1969, para lumbreras en suelos blandos, respondiendo a los problemas experimentados en estos suelos. La técnica elimina la posibilidad de falla por extrusión y de fondo (Vargas Moreno et al. 2018). Los resultados obtenidos con este procedimiento en arcillas de la ciudad de México, han sido lumbreras de hasta 19 m de diámetro y 30 m de profundidad (Orduño and Auvinet 2010). El procedimiento para la construcción de la lumbrera flotante es el siguiente.

Se traza en superficie el perímetro de la lumbrera y se construye un brocal de concreto armado, formado por dos coronas concéntricas. Los brocales permiten excavar, con precisión, una trinchera poligonal de 19, 25, o más lados. En los vértices se perfora hasta la profundidad de desplante de la lumbrera, llenando siempre con lodo bentonítico. En la actualidad el trazo en la superficie se realiza de manera circular, como se observa en la Figura 3.8. Subsecuentemente con excavadora tipo almeja (guiada, preferiblemente), se retira el suelo entre dos perforaciones, por tramos alternados, sustituyendo el material con lodo bentonítico. Las excavaciones y la extracción de suelo se realizan hasta concluir la excavación anular (Moreno-Fernández 1991). Actualmente es habitual construir un muro pantalla con una mezcla autoajutable de lodo y cemento antes de realizar la excavación del núcleo. Esta pantalla aumenta la seguridad contra fallas en la pared y permite prevenir el agrietamiento del suelo (Auvinet Guichard and Rodríguez 2011)

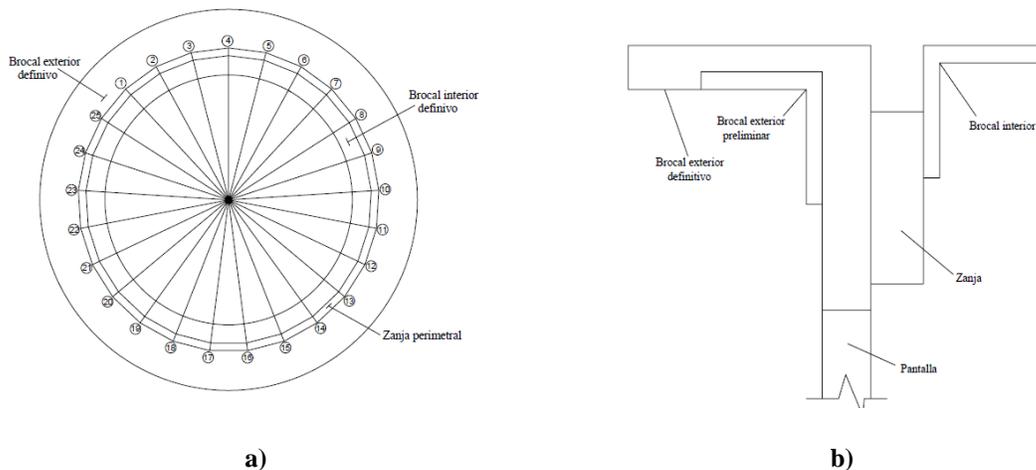


Figura 3.8. a) Trazado de brocales b) Excavación de zanja y muro pantalla (Orduño and Auvinet 2010).

Posteriormente se demuele el brocal interior y se excava el núcleo de la lumbrera con una excavadora tipo almeja, Figura 3.9 a. La estabilidad de la excavación se realiza teniendo

siempre llena la excavación con lodo bentonítico de densidad constante, Figura 3.9 b. Culminada la excavación se instala en la parte superior una estructura de acero con forma de tanque cilíndrico invertido. El tanque funciona como cámara de aire y base para la construcción de la lumbrera. En la parte superior del tanque se arma y cuele la losa de fondo y un primer tramo del muro. El conjunto tanque y tramo del muro se sujeta y mantiene nivelado mediante unas viguetas de acero unidas al brocal. Después del fraguado se descimbra y se inyecta aire al tanque, desplazando la bentonita de la excavación, hasta que el conjunto flote (Aguilar Téllez and Acevedo Valle 2018), Figura 3.9 c.

Finalmente, se separa de las viguetas y se sumerge la estructura al extraer el aire. La estructura se sumerge hasta alcanzar la posición adecuada, en la cual se sujeta nuevamente por las viguetas del brocal y se cuele una nueva sección de muro. Los ciclos de colado de tramos adicionales e inmersión del conjunto flotante se repiten, hasta la profundidad proyectada. Cuando el empuje de flotación tiende a ser mayor que el peso del conjunto, la estructura se llena con el agua para poder sumergirla, Figura 3.9 d.

Terminado el ciclo de colados e inmersiones, se conecta la estructura con el brocal exterior mediante unas vigas de concreto dispuestas radialmente en la periferia. La conexión lumbrera brocal adiciona peso a la lumbrera para evitar su emersión, Figura 3.9 e. Posteriormente, se inyecta en el fondo y en el espacio anular, comprendido entre las paredes de la estructura y las paredes de la excavación o el muro pantalla, mortero que sustituye la bentonita remanente, Por último, se retira el fluido del interior de la estructura y se procede con actividades adicionales. (Orduño and Auvinet 2010) Figura 3.9 f.

3.3.2.4.2. *Técnica de anillos Prefabricados de concreto.*

Esta técnica es una adaptación de la técnica de construcción de túneles en suelos blandos con baja resistencia al esfuerzo cortante, alta compresibilidad y presencia de agua subterránea. Los procedimientos en los que se fundamenta esta técnica consisten: 1) Realizar una excavación que sea estable, con el propósito de evitar el colapso y los desplazamientos excesivos del suelo. 2) Implementar un revestimiento en la mayor brevedad posible (definitivo o temporal), creando un ambiente estable a corto y mediano plazo. Una buena opción son los revestimientos prefabricados. 3) Colocar un revestimiento definitivo capaz de soportar cargas y desgastes del servicio a largo plazo y cumpla con las normas y códigos establecidos. Las actividades que se realizan en esta técnica son:

Trazar en la superficie el perímetro de la lumbrera. Con la traza se procede a excavar, ensamblar y colar el brocal exterior e interior. Posteriormente con una excavadora tipo almeja se realiza la excavación de la trinchera hasta la profundidad deseada. Esta excavación se lleva a cabo en forma de espiral lineal con pendiente definida, en un solo paso, estabilizando la excavación con lodo bentonítico. Terminado la excavación de la lumbrera se procede a demoler el brocal interior y excavar el núcleo, remplazando el suelo por lodo bentonítico (Zemva 2011). De manera simultánea al proceso de excavación y construcción de los

brocales se realiza la construcción de los anillos segmentados. Estos anillos deben estar listos al momento de la terminación de la excavación.

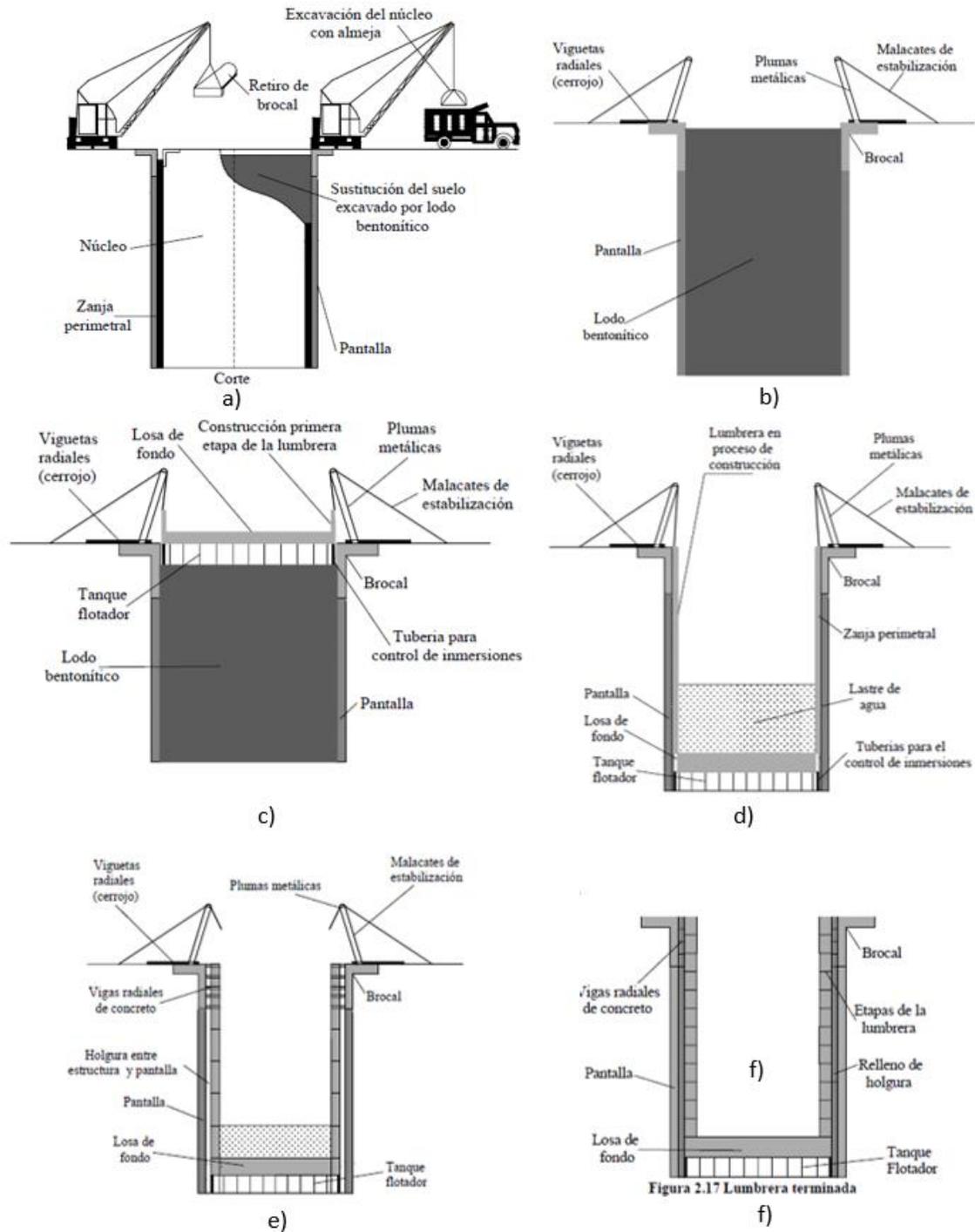


Figura 3.9. Pasos para la construcción de una lumbreira método Cravioto (Orduño and Auvinet 2010).

Existen tres tipos de anillos para la construcción de la lumbrera, el anillo de fondo, los anillos de acceso y los anillos superiores. El anillo de fondo está compuesto de 8 dovelas de concreto reforzado de iguales dimensiones y 8 conexiones metálicas que conectan a cada una de las dovelas. Junto al anillo de fondo se introduce las traves verticals de estructura tipo cajón, con alta resistencia a la flexo-tensión biaxial combinada con torsión. En el interior del anillo se encuentra la estructura con disposición geométrica de estrella para el colado de la primera losa de fondo Figura 3.10 a. Los anillos intermedios con estructuras de acceso están conformados por el número de dovelas acordes al número de conexiones. Las dovelas se encuentran conectadas por estructuras metálicas con placas guías que se adaptan a las traves verticals. Los espacios de las dovelas que poseen accesos son rellenos con mortero para su estabilidad e instalación. En el interior de la lumbrera se incluye un marco de soporte de la sección correspondiente al mortero. Figura 3.10 b. Los anillos superiores están compuestos por 8 dovelas y 8 conexiones metálicas con placa guía ajustable a la trave vertical. Figura 3.10 c.

Terminada la excavación y la construcción de los anillos se procede a la instalación del primer anillo. Previo a la instalación se realiza una limpieza exhaustiva de la lumbrera evitando cualquier obstrucción al introducir la estructura. La instalación del primer anillo se ejecuta a través de placas guías ancladas en el brocal que encajan en las traves verticals. La estructura del primer anillo queda separada a una distancia de 60 cm de la base de la lumbrera, con lo cual se procede a cimentar una primera losa de fondo, que cubre la estructura en forma de estrella, a través de tubos tremie Figura 3.11 a; una vez el cemento fragüe un determinado porcentaje se procede a adicionar los anillos intermedios y superiores con ayuda de las traves verticals y de los conectores metálicos de las dovelas, Figura 3.11b.

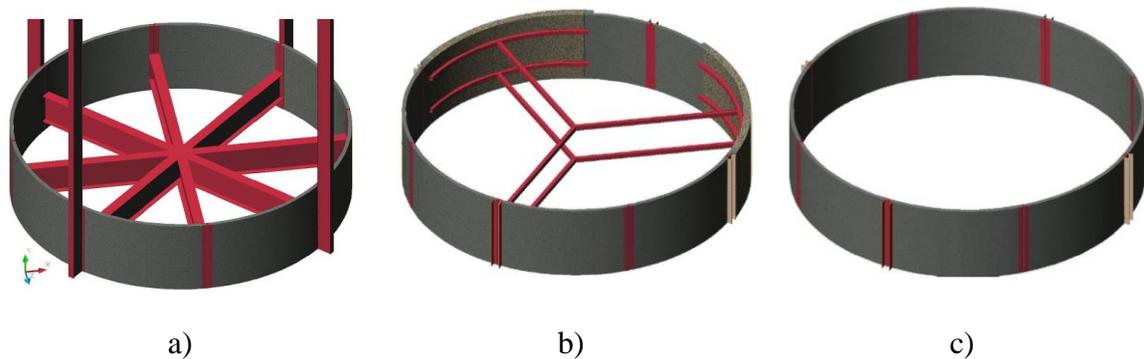


Figura 3.10. Tipos de anillos de método de anillos prefabricados. a) De fondo. b) De acceso. c) Superiores (Zemva 2011)

Con la ubicación de todos los anillos al interior de la excavación se coloca una mezcla de mortero y bentonita entre la parte exterior de los anillos y el suelo. Terminada la estructura se realiza el revestimiento definitivo, el cual se diseña sin contar los aportes de resistencia de la estructura de anillos a razón de un factor de seguridad. El revestimiento definitivo se realiza en etapas utilizando una cimbra metálica, que se retira una vez el material alcance

30% de la resistencia de diseño, llenando previamente las secciones de futuros accesos con mortero.

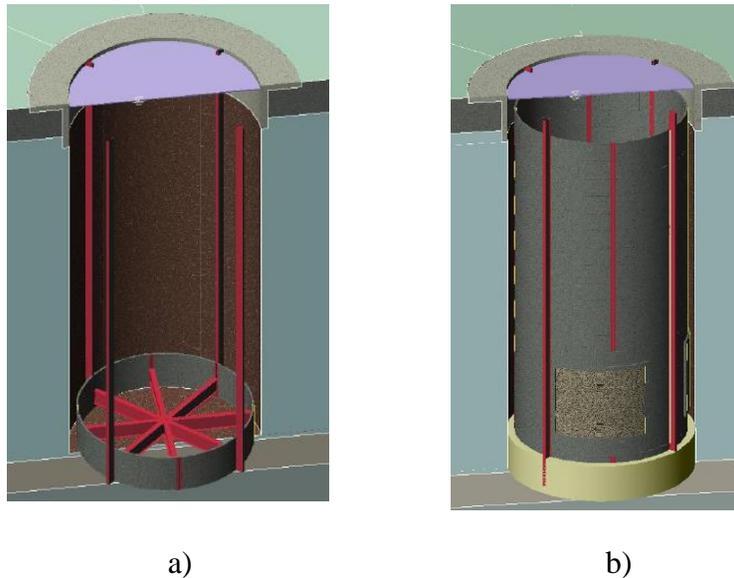


Figura 3.11. a) Instalación del primer anillo. b) vista general de los todos los anillos terminados (Zemva 2011)

3.4. ESTADO LÍMITE DE FALLA.

Entre las etapas de construcción de una lumbrera, la etapa de excavación y sostenimiento es aquella que induce las mayores modificaciones a la condición de equilibrio, y en donde la ocurrencia de una falla podría ser crítica para el proyecto. Por tal razón en esta etapa se realiza los análisis de los mecanismos de falla presentes en las lumbreras, los cuales se contemplan acorde a la técnica de construcción. Una descripción de las fallas que se deben evaluar en la construcción de una lumbrera acorde al manual de la CFE se presenta en el Anexo 1. Se debe tener en cuenta que la probabilidad de ocurrencia de determinado tipo de falla está relacionada con el grado de avance de la etapa de excavación y sostenimiento. A continuación, se describen las principales fallas detectadas en la construcción de las lumbreras y los métodos analíticos y numéricos para evaluarlas.

3.4.1. Métodos analíticos para el análisis de fallas.

En el planteamiento de los métodos analíticos se emplea habitualmente el método simple de equilibrio límite. Este método propone la existencia de una superficie de falla, (plana, circular o logespiral), con un criterio de falla constante a lo largo de la superficie. El método también supone que la masa del suelo o de la roca se puede dividir en bloques, en los que no se contemplan los esfuerzos al interior y solo se evalúa el equilibrio global de estos. El problema se reduce a encontrar la posición más crítica para la superficie de deslizamiento (Potts and Zdravkovic 2009).

Una vez encontrada la superficie de falla se procede a definir un índice de factor de seguridad (Fs). Este Fs se puede evaluar para los parámetros que contribuyen a la estabilidad o inestabilidad de los problemas analizados. El mecanismo del Fs consiste en relacionar el valor del parámetro calculado en las condiciones dadas con su valor crítico. El valor crítico del parámetro se obtiene al inicio de un resultado inaceptable, resultado relacionado con la "seguridad" y generalmente asociado a la falla. Por convención, un índice de factor de seguridad mayor que uno indica condiciones aceptables. (Itasca Consulting Group Inc 2016). El aporte de mayor importancia al usar un Fs se obtiene al comparar valores de Fs evaluados al variar el mismo parámetro. De no ser así es posible llegar a valores de FS distintos para una misma situación.

3.4.1.1. *Falla asociada a la construcción del brocal.*

La excavación de la trinchera perimetral para el brocal es la primera etapa de construcción en una lumbrera. Esta excavación se realiza convencionalmente a una profundidad de 2 m sin sustitución del material excavado. El análisis de la falla se basa en la estabilidad de un talud vertical, sometido a esfuerzos de tensión, esfuerzos cuyo valor se maximiza en las zonas cercanas a la superficie. En el momento en que estos esfuerzos de tensión sobrepasan la resistencia del suelo, se generan grietas verticales en la cercanía de la superficie. La profundidad crítica para las grietas se calcula a través del criterio de altura crítica planteado por Coulomb. La Ecuación (1) permite calcular la altura crítica.

$$H_{cr} = \frac{4c}{\gamma} \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (1)$$

Donde c = cohesión, ϕ =ángulo de fricción y γ es el peso específico del suelo.

En el caso de que la altura crítica sea mayor a la profundidad necesaria para la construcción del brocal, el suelo debe ser sustituido por un material competente como grava reforzada, material geo sintético o suelo cemento. Posterior a que la trinchera tenga las dimensiones necesarias para la construcción del brocal se procede a la construcción de este y al análisis de estabilidad por adición de sobrecargas locales al brocal.

3.4.1.2. *Falla en las paredes de la excavación.*

El momento crítico para esta falla ocurre en la excavación de la trinchera perimetral. En esta excavación perimetral el suelo es remplazado por lodo bentonítico que estabiliza el suelo. Sin embargo, la fuerza que ejerce el lodo cambia a lo largo del proceso, generando un desequilibrio que puede desembocar en la falla. Para el cálculo del factor de seguridad de esta falla se han planteado varios métodos analíticos los cuales se presentan a continuación.

Criterio de Nash y Jones (1963). Este criterio se utiliza para un suelo puramente cohesivo,(suelo en donde la resistencia se caracteriza por la resistencia al corte no drenado, condición no drenada) la zona aledaña a la excavación está delimitada por el triángulo como se observa en la Figura 3.12. El factor de seguridad planteado para este criterio se

fundamenta en un análisis de fuerzas en dirección z para un estado de reposo. La ecuación que determina dicho factor de seguridad es la Ecuación (2).

$$F_s = \frac{4 Su}{H^2(\gamma_s - \gamma_l)} \quad (2)$$

Donde, F_s = factor de seguridad. Su = resistencia al corte no drenado. γ_s = peso específico del suelo. γ_l = peso específico del lodo.

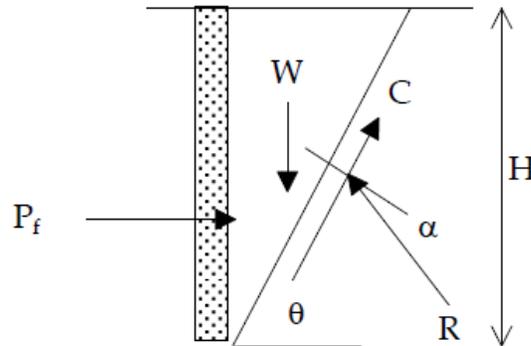


Figura 3.12. Esquema de fuerzas de Nash y Jones (CFE and II-UNAM 2018).

Criterio de Aas (1976). Este criterio del instituto Geotécnico de Noruega, considera un esquema de falla que divide la zona aledaña a la lumbrera en dos bloques. El bloque superior presenta un desplazamiento vertical y el bloque inferior un desplazamiento horizontal. Este criterio considera un estado de falla activo, en el que la resistencia al corte en toda la superficie de falla es la resistencia medida obtenida de ensayos triaxiales. En la Figura 3.13 se esquematiza un diagrama de cuerpo libre para la falla con un plano de falla 45°.

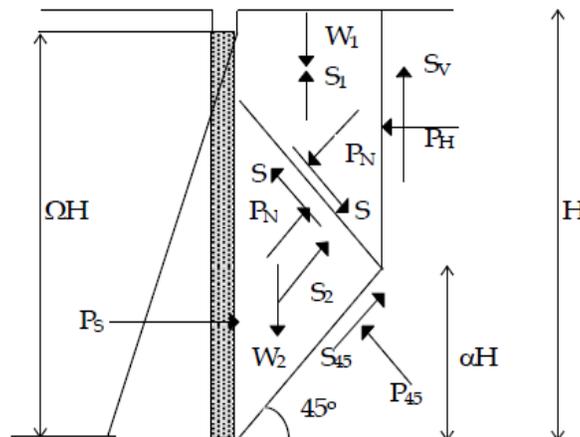


Figura 3.13. Análisis de estabilidad del criterio de G. Aas (CFE and II-UNAM 2018).

Para el cálculo del factor de seguridad se asume un valor de $\alpha \approx 0.5$ y $\Omega \approx 2\alpha$. Ecuación (3).

$$F_s = \frac{S_u}{H \left(\gamma_s - \Omega^2 \gamma_l + \frac{4Q}{2HL} \right)} N_s \quad (3)$$

Donde, N_s = número de estabilidad que refleja la geometría de la trinchera. Q = carga admisible. S_u = resistencia al corte no drenado medida a lo largo de la superficie potencial de falla. El valor de N_s está determinado por:

$$N_s = 2 + 0.94 \frac{H}{L} \quad (4)$$

Criterio de Alberro y Auvinet (1984). Este criterio considera una trinchera de largo L y ancho B . En él se plantea las condiciones de estabilidad de una masa prismática truncada por un plano de deslizamiento a 45° , tal como se muestra en la Figura 3.14.

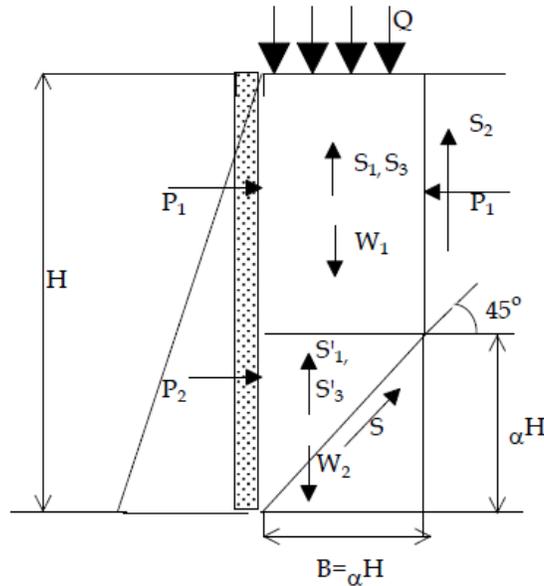


Figura 3.14. Análisis de estabilidad. Criterio de Alberro y Auvinet (CFE and II-UNAM 2018).

Para la evaluación del factor de seguridad a través de este criterio se plantean 3 casos posibles, los cuales, se fundamentan en un equilibrio de fuerza actuante sobre el bloque prismático. Caso 1. Cohesión del terreno constante sin sobrecarga. El factor de seguridad para estas condiciones queda expresado por la Ecuación (5).

$$F_s = \frac{2c}{(\gamma_s - \gamma_l)H} \left[\frac{1 + \alpha}{\alpha(2 - \alpha)} + \frac{H}{L} \right] \quad (5)$$

Caso 2. Cohesión del terreno constante con sobrecarga uniformemente distribuida. El factor de seguridad para estas condiciones queda expresado por la Ecuación (6).

$$F_s = 2c \frac{L(1 + \alpha) + \alpha H(2 - \alpha)}{(\gamma_s - \gamma_l)HL\alpha(2 - \alpha) + 2Q\alpha L} \quad (6)$$

Caso 3. Cohesión variable con la profundidad y sobrecarga en la superficie. Para esta condición se considera dos valores de cohesión. La cohesión de la prueba de veleta, la cual se utilizará en el plano vertical del prisma y la cohesión de una prueba triaxial no drenada que se utilizará como la resistencia al corte en el plano de falla de 45°. Se estima que estas cohesiones presentan un comportamiento lineal con la profundidad. Al igual que para los casos anteriores por medio de un análisis de fuerzas el factor de seguridad queda determinado por la Ecuación (7).

$$F_s = \frac{C_u[(2\alpha H + L)(1 - \alpha)^2 + \alpha^2 H(2 - \alpha)] + C_T[2\alpha L(2 - \alpha)]}{(\gamma_s - \gamma_l)L\alpha H(2 - \alpha) + 2Q\alpha L} \quad (7)$$

3.4.1.3. *Falla del núcleo.*

El momento crítico de esta falla ocurre durante la construcción de la trinchera perimetral y está determinada por el peso específico y la altura del lodo. Para el análisis de la estabilidad del núcleo los factores de seguridad pueden ser calculados por los criterios descritos en la falla de las paredes. Sin embargo, se debe considerar que el plano de falla a desarrollarse no llegará hasta la superficie, si no a la pared opuesta del núcleo, reduciendo las fuerzas resistentes. Un esquema de la falla de núcleo en una lumbrera se encuentra en la Figura 3.15.

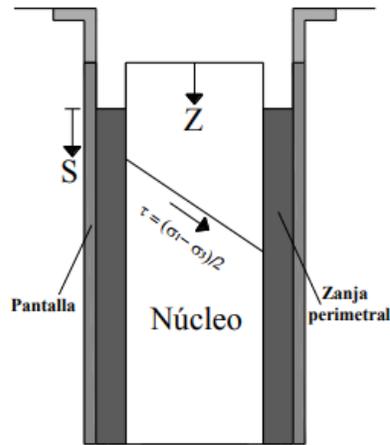


Figura 3.15. Esquema de falla de núcleo (CFE and II-UNAM 2018).

La presencia de esta falla se encuentra asociada a la técnica de construcción, específicamente para lumbrera flotada o anillos prefabricados. Dentro del proceso constructivo la presencia de esta falla es de menor impacto, debido a que en etapas posteriores el núcleo será removido. No obstante, su ocurrencia trae consigo complicaciones en la excavación del núcleo y una posible pérdida de resistencia del suelo de las paredes (CFE and II-UNAM 2018).

3.4.1.4. *Falla por flotación.*

En procesos constructivos como la lumbrera flotada o anillos prefabricados, una vez armada la estructura de la lumbrera, el interior de esta contiene lodo estabilizador que requiere ser removido. Esta remoción genera un desequilibrio en el sistema que puede ocasionar una falla en las paredes de la estructura, como resultado del empuje que experimenta al estar en un medio saturado, acorde al principio de Arquímedes. Para que la falla por flotación se desarrolle es necesario que el empuje del agua sea mayor al peso de la lumbrera más la adherencia de las paredes de la estructura con el suelo circundante. Este efecto de flotación puede presentarse de manera inmediata o a largo plazo. El esquema de la falla por flotación se encuentra en la Figura 3.16 y la ecuación de F_s asociada al esquema es la Ecuación (8).

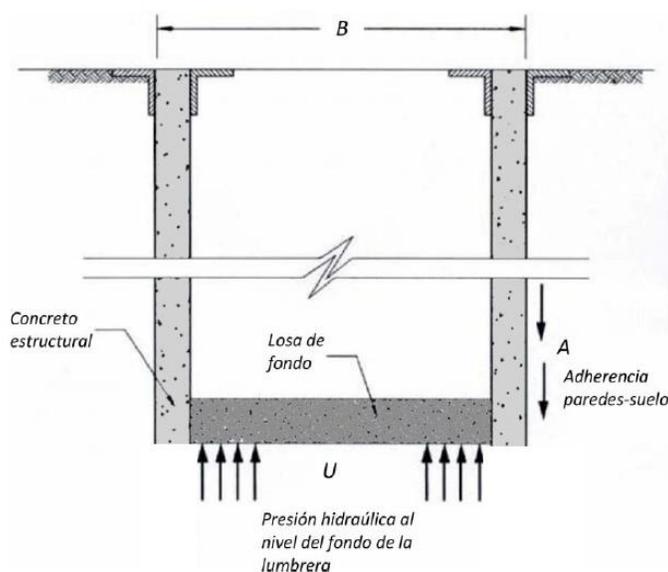


Figura 3.16. Esquema de la falla de fondo por subpresión (Ramírez Díaz 2013)

Como medida de corrección de esta falla es común la implementación de una losa de fondo como lastre, brocales de grandes dimensiones o a paredes concéntricas para aumentar el peso de la estructura.

$$F_s = \frac{W_l + C \cdot H \cdot \pi B}{(H - na f) \gamma_w \pi \frac{B^2}{4}} \quad (8)$$

3.4.1.5. *Falla del fondo por cortante y subpresión.*

Durante la construcción de una lumbrera al momento de terminar la excavación del núcleo, esta se puede ver afectada por dos distintos mecanismos de falla, la falla por subpresión y la falla por cortante. Estos dos mecanismos inducen inestabilidad en el fondo de la excavación. No obstante, como se verá posteriormente, la forma más fácil de contextualizarlos es

alcanzada analizándolos por separado. La fase entre la finalización de la excavación y la construcción de la losa de fondo es el momento crítico para la ocurrencia de una falla de fondo por subpresión o por cortante. Esta fase debido a las propiedades de permeabilidad y duración de construcción, es representadas por un análisis a corto plazo que corresponde a una condición no drenada. La descripción de cada uno de estos mecanismos se realiza a continuación.

3.4.1.5.1. Falla de fondo por cortante.

El desarrollo de esta falla se produce al existir un desequilibrio de fuerzas entre el interior y exterior de la lumbrera, actuando a la profundidad de desplante del muro pantalla. Para que esta falla se produzca la carga externa debe exceder la carga interna más la resistencia del terreno en la superficie de la falla de fondo por cortante. El esquema del mecanismo de falla se presenta en la Figura 3.17.

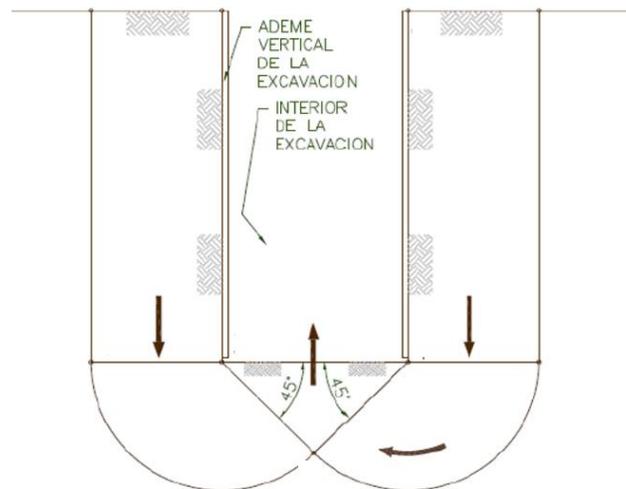


Figura 3.17. Esquema de falla de fondo por cortante (Zemva 2011).

La profundidad de la superficie de falla dependerá tanto del diámetro de la lumbrera, así como del espesor de los estratos que esta llegue a atravesar. Si dentro de la geología del sitio existiera un estrato de mayor resistencia cercano al fondo de la lumbrera, es evidente que las dimensiones de dicha superficie de falla disminuirían (Tamez González 2001), tal como se observa en la Figura 3.18.

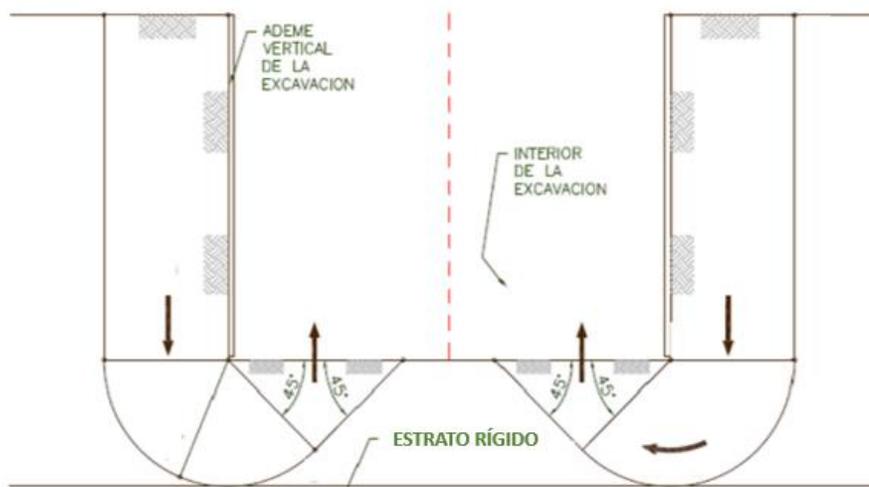


Figura 3.18. Esquema de falla de fondo por cortante con presencia de estrato resistente próximo al fondo de la lumbrera (Tamez González 2001).

Así, la distancia entre el fondo de la lumbrera y el estrato resistente se vuelve determinante sobre la estabilidad ante el mecanismo de falla mencionado, pues si esta distancia es lo bastante corta, el radio de influencia de la superficie de falla no presentaría riesgo (Zemva 2011). No obstante, de acuerdo con Auvinet (Auvinet Guichard and Rodríguez 2011), si la distancia entre el fondo de la lumbrera y el estrato resistente con mayor permeabilidad, es muy corta, la condición hidrogeológica del estrato será determinante en la estabilidad, pues se generarán fuerzas de subpresión en el fondo de la lumbrera, cuando a esta profundidad las presiones de poro sean artesianas o hidrostáticas, incluso menores a las hidrostáticas por efecto de bombeo (en combinación con algún evento imprevisto que altere el equilibrio de fuerzas). Es evidente que de existir artesianismo, esta sería la condición más desfavorable.

3.4.1.5.2. Falla de fondo por subpresión.

Acorde a lo mencionado, la falla por subpresión puede ocurrir cuando el fondo de una excavación, realizada en un suelo de baja permeabilidad, se encuentra a una corta distancia de un estrato con alta permeabilidad (estrato permeable) sujeto a una determinada condición hidrogeológica. La presión del agua en el estrato permeable puede llegar a levantar el fondo de la excavación, si esta no puede ser contrarrestada por el peso del suelo entre el estrato permeable y el fondo de la excavación, el peso del fluido estabilizador dentro de la excavación (si es el caso), y la resistencia al corte no drenado del suelo entre el fondo de la excavación y el estrato permeable (Valenzuela et al. 2019). En el caso de que las paredes o muro pantalla de la excavación se proyecten más allá del fondo, la adherencia entre el suelo y estructura también actuará como un mecanismo resistente. El esquema con mayor consenso en la literatura del mecanismo de falla por subpresión es el que se encuentra en la Figura 3.19.

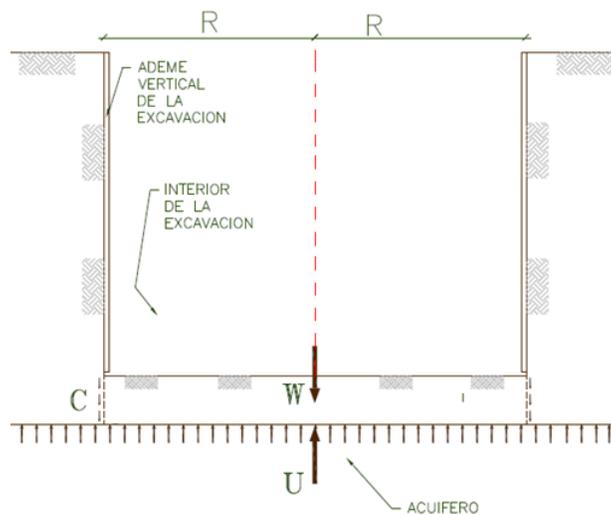


Figura 3.19. Esquema de falla de subpresión (Zemva 2011)

Acorde a la Figura 3.19, el mecanismo de falla por subpresión corresponde a un levantamiento de la sección de suelo entre el fondo de la lumbrera y el estrato permeable. La forma de esta sección para lumbreras circulares corresponde a una sección cilíndrica. Para el desplazamiento de la sección de suelo se requiere que las fuerzas actuantes en el estrato permeable, presión de poro, sobrepasen las fuerzas resistentes correspondientes al peso del lodo, el peso de la sección de suelo y la resistencia al corte no drenado en las paredes de la sección de suelo. Adicionalmente la fuerza actuante debe sobrepasar la resistencia a la tensión del estrato permeable, generando así el desprendimiento de la base de la sección cilíndrica.

De lo expuesto anteriormente se puede inferir que el desarrollo de la falla de fondo por cortante y la falla por subpresión está determinado por la distancia entre el fondo de la excavación y el estrato resistente-permeable (siempre que esta distancia esté en un rango de afectación de la superficie de falla por cortante). Resulta evidente que el contraste de resistencias entre el estrato permeable e impermeable es una condición un tanto subjetiva; pues la geometría de la lumbrera, las características geotécnicas e hidrogeológicas del sitio y el procedimiento de excavación; serán los responsables de establecer el grado de modificación de equilibrio que tenga el terreno al realizar la lumbrera (Montiel et al. 2018).

Las fallas por subpresión y por cortante descritas anteriormente deben ser consideradas dentro de un marco de revisión de estabilidad de fondo, como resultado de la zona de afectación de las fallas, correspondiente al fondo de la lumbrera, y de la interrelación existente entre ellas. Esta interrelación se evidencia en los siguientes casos: 1) La presencia de cualquier falla puede detonar el desarrollo del mecanismo de la falla restante. 2) Las medidas correctivas enfocadas a una determinada falla repercuten en la otra, 3) La modificación de variables que mitigan el desarrollo de una falla pueden facilitar o mitigar el desarrollo de la falla restante,

un caso de esto último se observa en la variación del espesor de la sección del suelo y la profundidad del muro pantalla.

Factor de seguridad de la falla de fondo por cortante. En la práctica, la evaluación de la falla por cortante se realiza a través de expresiones que determinan un cociente entre las fuerzas internas, sobre las fuerzas externas. Un ejemplo de estas expresiones es la planteada en el manual de obras civiles de la CFE, Ecuación (9), a partir del esquema de la Figura 3.20.

$$F_s = \frac{S_u(q_u S_c + \eta J)}{\gamma H + q_s - h_l \gamma_l} \quad (9)$$

Donde, S_u = Resistencia al corte no-drenada media a lo largo de la superficie de falla, kPa, q_u = Capacidad de carga a la profundidad estimada, η es el factor de adherencia lumbrera-suelo, $\sigma'z$ = Presión vertical efectiva debida al peso del suelo a la profundidad media del sistema de retención ($H/2$), en kPa, q_s = Sobrecarga en la superficie del terreno, en kPa. h_l = altura del fluido estabilizador, en m, γ_l = peso volumétrico del fluido estabilizador, en kN/m³, H' = Profundidad del sistema de retención, en m. D = Ancho o diámetro de la lumbrera, en m. $HLum$ = Profundidad desde la superficie hasta el fondo de la lumbrera, en m. L = longitud de la lumbrera, en m. d = Profundidad de empotre del sistema de retención, en m. S_c = Factor de forma de acuerdo con la Tabla 1, adimensional. J = relación de superficies definida en la Tabla 1, adimensional.

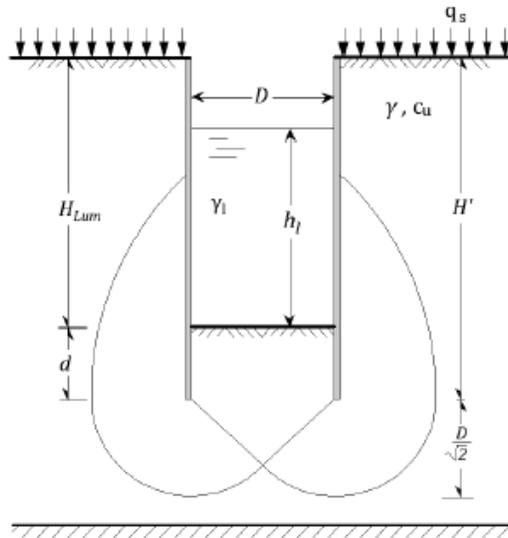


Figura 3.20. Esquema del mecanismo de falla de fondo por cortante del manual CFE. (CFE and II-UNAM 2018)

En el anterior esquema la superficie de falla difiere de la planteada en la Figura 3.17, esto depende del criterio de capacidad de carga y desarrollo de la superficie de falla que se elija.

Tabla 1. Factores para la revisión de la falla de fondo por cortante.

Forma de sección transversal de la lumbrera	s_c	J
Rectangular	$1 + 0.2 \frac{D}{l}$	$2d + \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{D}\right)$
Cuadrada	1.2	$4 \frac{d}{D}$
Circular	1.5	$4 \frac{d}{D}$

Factor de seguridad de la falla de fondo por subpresión. En la práctica, la evaluación de la falla por subpresión se realiza a través de expresiones que determinan un cociente entre las fuerzas resistentes y la presión del agua en el estrato permeable, asumiendo el desplazamiento de la sección de suelo entre el fondo de la lumbrera y el estrato permeable (mecanismo de falla cilíndrico). Dicho cociente se interpreta como un factor de seguridad ante la falla por subpresión, en donde valores entre 1.5 y 2 se consideran apropiados. Un ejemplo es la expresión planteada en el manual de obras civiles de la CFE, Ecuación (10), que se obtiene a partir del esquema de la Figura 3.21.

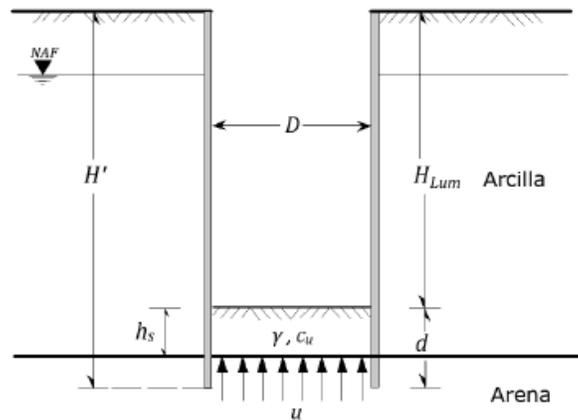


Figura 3.21. Esquema del mecanismo de falla de fondo por subpresión. (CFE and II-UNAM 2018).

$$F_S = \frac{\gamma_s h_s + \eta S_u J}{u} \quad (10)$$

$$\eta = 0.4 \sqrt{\frac{\sigma'_z}{S_u}} \quad (11)$$

Donde, γ_s = peso volumétrico del suelo del fondo de la excavación, en kN/m^3 , h_s = Altura del suelo impermeable, en m. η = Factor de adherencia lumbrera-suelo, adimensional. S_u = Resistencia al corte no-drenada medida a lo largo de la superficie de falla, kPa. J es un factor de forma de la sección transversal de la lumbrera definida en la Tabla 1, donde $d = h_s$. u = Presión de poro en el lecho inferior de la capa impermeable, en kPa. σ'_z = Presión vertical

efectiva debida al peso del suelo a la profundidad media del sistema de retención ($H_{lum} + d/2$) en kPa, sí $h_s < d$ entonces d se remplacea por h_s .

En el esquema planteado por el manual de la CFE, Figura 3.21, se observa que el muro pantalla tiene una profundidad mayor a la frontera superior del estrato permeable. Lo anterior supone una pérdida de continuidad del suelo, generando una sección suelo de forma cilíndrica “tapón”, ubicada entre el fondo de la excavación y el estrato permeable. La pérdida de continuidad de suelo y la interacción suelo-muro en la sección cilíndrica se ven representadas en la Ecuación (10) por el factor de adherencia η .

Se debe señalar que la Ecuación (10) es representativa para la configuración de la Figura 3.21 (Profundidad del muro pantalla superior o igual al estrato permeable). Sin embargo, en gran cantidad de ocasiones el muro pantalla no alcanza la profundidad del estrato permeable. Para estos casos el manual no realiza ningún comentario, dando pie a que se genere incertidumbre en la aplicabilidad de la ecuación y se emplee de manera indistinta para cualquier configuración, como se ve en los trabajos de (Vargas et al. 2019) y (Aguilar Téllez and Acevedo Valle 2018).

Adicional al manual de CFE, en diversos trabajos se han planteado Fs para la falla por subpresión, como el realizado por Zemva (2011) En este trabajo se analiza una lumbrera cilíndrica en un suelo con resistencia no drenada (Condición a corto plazo), sin lodo en el interior y con un muro pantalla de profundidad igual al fondo de la lumbrera (esquema de la Figura 3.19). En este análisis las fuerzas resistentes son el peso del suelo de la sección cilíndrica y la resistencia al corte no drenado en el área perimetral de la sección cilíndrica, Ecuación (12). Al igual que la Ecuación (10) esta ecuación es representativa de una determinada configuración, correspondiente a una profundidad de muro pantalla igual a fondo de la lumbrera.

$$F_S = \frac{\gamma_s \cdot \pi R^2 D + S_u \cdot D \cdot 2\pi R}{\eta \pi R^2} \quad (12)$$

En el trabajo de Tamez (2007), se presenta dos ecuaciones para la falla de subpresión, cada ecuación se encuentra planteada para una forma distinta de lumbrera, circular o cuadrada. En estas ecuaciones se incluye un factor de expansión de suelo F_e y se presenta un enfoque general que considera la profundidad del muro pantalla, a través de la afectación parcial del factor de adherencia F_c al espesor de la sección cilíndrica (Tamez González et al. 2007). La ecuación que determina el Fs en este trabajo para una lumbrera circular se encuentra en la Ecuación (13), donde ht es la distancia entre el fondo del muro pantalla y el estrato permeable y Δu es el decremento de presión de poro en el estrato arcilloso con relación al hidrostático

$$F_S = \frac{4 \frac{S_u F_e}{D} (ht + (hs - ht)F_c) + \gamma_l h_l + \gamma_s h_s}{H + hs - Na_f - \Delta u} \quad (13)$$

En el trabajo desarrollado por Víctor Orduño (2009) (Orduño and Auvinet 2010), se considera un suelo puramente cohesivo, lumbrera cilíndrica, existencia de lodo en el interior de la

lumbreira, condición hidrostática para el estrato permeable y una profundidad del muro pantalla igual a la del estrato permeable. El F_s queda determinado por la Ecuación (14). En esta ecuación se presenta un factor que afecta la resistencia al corte no drenado, representada por F_c , correspondiente a un cociente del perímetro de fondo de la lumbreira, sobre el área de la misma.

$$F_s = \frac{(H - H_l)\gamma_l + h_s \cdot \gamma_s + F_c \cdot S_u}{(H + h_s - Naf)\gamma_w} \quad (14)$$

$$F_c = \left[\frac{\pi \cdot D \cdot h_s}{0.25\pi D^2} \right] \quad (15)$$

En análisis adicionales se menciona que algunos autores consideran propicio despreciar el aporte de la resistencia no drenada bajo un criterio conservador (Tamez González et al. 2007)(Ramírez Díaz 2013), sin embargo esto puede llevar a tomar acciones correctivas innecesarias, sobreestimando el costo de la lumbreira y llevando a una inoperancia económica.

Generalidades de las ecuaciones analíticas de la falla por subpresión. Las ecuaciones previas del F_s para la falla por subpresión describen un mismo mecanismo de falla, que corresponde al desprendimiento de una sección de suelo en forma cilíndrica, sección ubicada entre el fondo de la lumbreira y el estrato permeable. La mayoría de estas ecuaciones son representativas de un esquema específico que se desea analizar. En estas ecuaciones no se presenta un consenso en la definición de factor de adherencia suelo- muro ni de la incidencia de la profundidad del muro en el valor de la resistencia al corte no drenado que actúa como fuerza resistente. Por otro lado, las demás variables, peso de lodo, peso del suelo, presión de poro y resistencia al corte no drenado, si presentan un consenso. En términos generales el F_s de esta falla se podría describir a través de la Ecuación (16).

$$F_s = \frac{w_s + w_l + F_c \cdot S_u}{Fa} \quad (16)$$

Donde w_s = peso del suelo, w_l = peso del lodo del interior de la lumbreira, S_u = resistencia al corte no drenado, F_c = factor de modificación de la resistencia al corte no drenado por concepto de interacción suelo-muro, incidencia en de diámetro y configuración, e incidencia de la profundidad del muro, Fa = fuerza del agua sobre el área en que se propicia la falla.

3.4.2. Modelado numérico para el análisis y diseño de una lumbreira.

Dentro de los modelos numéricos se puede incluir consideraciones adicionales a las que se presentan en las ecuaciones analíticas como: medios estratificados, elementos estructurales (muros, losas, brocales, pantallas), etapas constructivas y elementos de interfaz. Adicionalmente estos modelos permiten calcular los desplazamientos del medio en análisis a corto y largo plazo, empujes sobre una estructura, etc. Las consideraciones de mayor relevancia en el modelamiento numéricos son: la representatividad del modelo constitutivo del material a modelar, la obtención de los parámetros necesarios para dicho modelo, las

condiciones de frontera y el estado inicial de esfuerzos (Abramson et al. 2012). Generalmente la simulación numérica de las lumbreras se realiza empleando una condición axisimétrica o una configuración 3D. La estabilidad de estas simulaciones se evalúa empleando el procedimiento de reducción de parámetros de resistencia. Con base a lo anterior a continuación se procede hacer una breve mención de los conceptos necesarios para la evaluación numérica de las fallas que acontecen en una lumbrera.

3.4.2.1. *Modelo axisimétrico.*

El uso de los modelos axisimétricos dentro de la geotecnia se ha empleado en la modelización de zapatas circulares, pilas, pruebas triaxiales, taludes convexos y cóncavos, excavaciones cilíndricas etc. Esto como resultado de la representatividad de los fenómenos por los modelos axisimétricos y por el ahorro de carga computacional frente a un modelo 3D. Sin embargo, los modelos axisimétricos presentan una limitante al momento de simular cargas locales, como las ejercidas por una grúa durante el proceso constructivo de una lumbrera. Existen algunas modificaciones que se pueden realizar al modelo axisimétrico modificándolo con series de Fourier, sin embargo, dicha modificación es aplicable para modelos puramente elásticos (Auvinet Guichard and Rodríguez 2004).

El modelo axisimétrico permite analizar un comportamiento en 3-D, a partir de un modelo 2-D (Rocscience inc. 2019). Este análisis axisimétrico se plantea en coordenadas cilíndricas r (dirección radial), z (vertical dirección) y θ (dirección angular). Como resultado de la simetría no existen desplazamientos en la dirección θ y los desplazamientos en la dirección r y z son independientes de θ (Potts and Zdravkovic 2009) por lo tanto las deformaciones se reducen a:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}; \varepsilon_z = \frac{\partial v}{\partial z}; \varepsilon_\theta = -\frac{u}{r}; \gamma_{rs} = \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial z}; \gamma_{r\theta} = \gamma_{r\theta} = 0 \quad (17)$$

Donde u y v son el desplazamiento in la dirección r y z respectivamente.

3.4.2.2. *Procedimiento de reducción de parámetros de resistencia.*

En un modelo numérico habitualmente se emplea en la evaluación de la falla en el procedimiento de reducción de parámetros de resistencia, obteniendo a partir de este un factor de seguridad (Griffiths and Lane 1999). Este procedimiento es uno de los más populares dentro del área de geotecnia en el contexto de materiales Mohr Coulomb y uno de los procedimientos de mayor facilidad de ejecución dentro de los modelos numéricos. La implementación de este procedimiento se ha extendido por los distintos programas computacionales de modelización numérica, implementando subrutinas prediseñadas para su ejecución (Itasca Consulting Group Inc 2016).

En este procedimiento, los parámetros de resistencia se reducen iterativamente, mediante un factor de reducción de resistencia global, hasta alcanzar la condición de falla. El inverso del factor de reducción se interpreta como un factor de seguridad. La determinación de la

condición de falla varía acorde al método numérico utilizado. Para elemento finito, al aplicar el procedimiento de reducción de parámetros de resistencia a un modelo inicialmente estable, la no convergencia del código identifica la falla (Brinkgreve et al. 2019). Para diferencias finitas la falla corresponde a un análisis continuo (en continuo movimiento) (Itasca Consulting Group Inc 2016).

3.4.2.3. *Falla de brocal.*

En el análisis de estabilidad, un brocal puede ser considerado como un sólido con simetría axial, permitiendo plantear su análisis bajo una condición bidimensional. La simulación bidimensional corresponde a un caso axisimétrico en 2-D sin carga locales (Auvinet Guichard and Rodríguez 2004). No obstante, este método puede extenderse al caso de sólidos axisimétricos con cargas no axisimétricas, desarrollando en serie de Fourier los desplazamientos de cada círculo nodal. Este método se detalla en el artículo de (Wilson 1965).

3.4.2.4. *Fallas de las paredes*

Es posible verificar numéricamente la estabilidad general de las paredes en una lumbrera implementando el procedimiento de reducción de los parámetros de resistencia c y ϕ , descrito en párrafos anteriores. Este procedimiento permite determinar la superficie potencial de falla. En el caso de lumbreras cilíndricas el análisis puede realizarse en condiciones de Axisimetría. Para trincheras, es necesario realizar un análisis tridimensional en el que se pueda evaluar el efecto de la longitud de la misma sobre la estabilidad. Un ejemplo del procedimiento de reducción de resistencia en un modelo axisimétrico para la falla de pared se observa en la Figura 3.22.

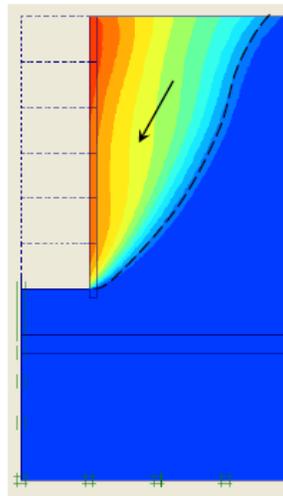


Figura 3.22. Superficie de falla de pared con el procedimiento de reducción de resistencia (CFE and II-UNAM 2018).

3.4.2.5. *Falla de núcleo.*

Es posible verificar numéricamente la estabilidad del núcleo central empleando el procedimiento de reducción de parámetros, determinando la superficie potencial de falla. En el caso de lumbreras cilíndricas el análisis puede realizarse en condiciones de Axisimetría y en 3 D, un ejemplo de este procedimiento se observa en la Figura 3.23.

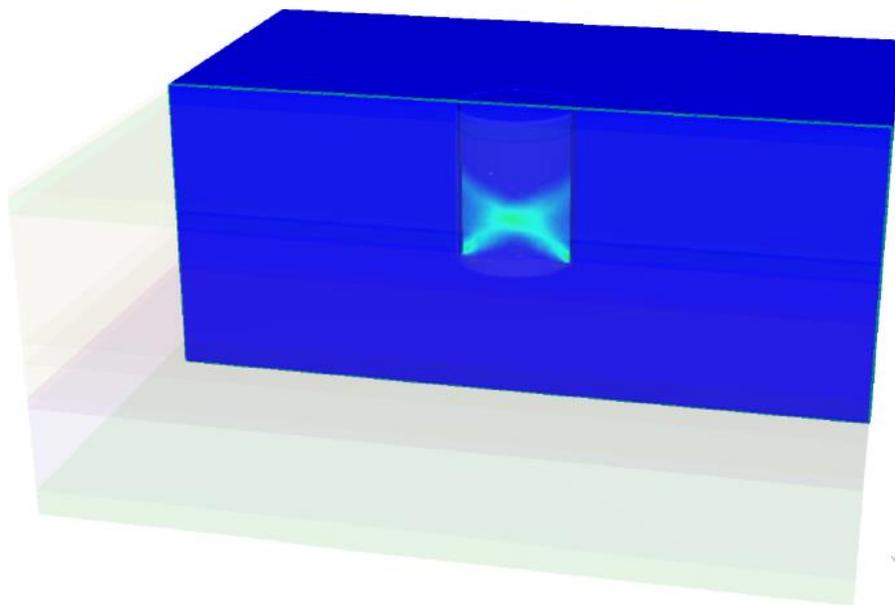


Figura 3.23. Superficie de falla de núcleo con el procedimiento de reducción de resistencia.

En la Figura 3.23 se observa varias superficies de falla resultantes de la condición de homogeneidad y simetría del modelo. Sin embargo, en la práctica solo se llega a desarrollar una de estas superficies. La representatividad del análisis en 3D con respecto al análisis de equilibrio límite recae en que: la modelación en 3D presenta un aumento del esfuerzo lateral que ejerce el lodo estabilizador con el aumento de la profundidad. Por el contrario el análisis de equilibrio límite considera al núcleo como una probeta de suelo ensayada en una prueba de compresión triaxial, en la cual, el esfuerzo lateral se mantiene constante. (Montiel et al. 2018).

3.4.2.6. *Falla de fondo por cortante y subpresión.*

Análogamente a las anteriores fallas es posible verificar numéricamente la estabilidad del fondo por cortante en un modelo axisimétrico empleando el método de reducción de resistencia, como se observa en la Figura 3.24. En lo concerniente al modelado numérico de la falla por Subpresión, tanto en el manual de la CFE como en los trabajos en los que se menciona esta falla realizados por distintos autores (Tamez González et al. 2007) (Orduño and Auvinet 2010) (Auvinet Guichard et al. 2010) (Ramírez Díaz 2013)(Aguilar Téllez and Acevedo Valle 2018), no se hace alusión a los lineamientos que se debe tener al momento de

modelar numéricamente una falla por subpresión. Sin embargo, se menciona un análisis numérico de flujo de agua transitorio para evaluar el bombeo del estrato permeable previo y durante la excavación. Dando por sentado que, de excavar la lumbrera sin bombeo el factor de seguridad no cumplirá con los valores mínimos de este. Los valores sugeridos por el manual de la CFE para que la lumbrera pase la revisión del estado límite de falla para cada uno de los mecanismos de falla se encuentra en el Anexo 1.

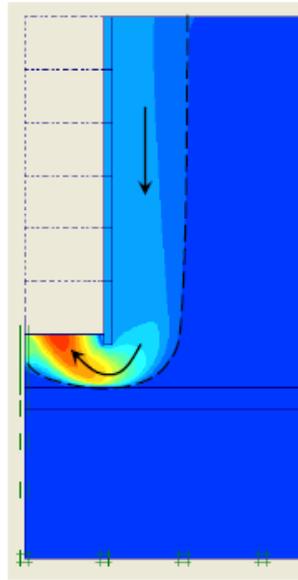


Figura 3.24. Análisis numérico de la estabilidad del fondo por cortante con el procedimiento de reducción de parámetros (Auvinet Guichard and Rodríguez 2011).

3.5. RESEÑA DE CONSTRUCCIÓN DE LUMBRERAS EN LOS SUELOS DEL VALLE DE MÉXICO Y PRESENCIA DE FALLAS.

3.5.1. Reseña de construcción de lumbreras en los suelos del valle de México.

Desde sus inicios la ciudad de México ha presentado problemas para desalojar las aguas que confluyen en ella. Esta problemática se debe a la ubicación geográfica de valle de gran altura que conforma una cuenca hídrica sin salidas naturales, donde se presentan temporadas de lluvias intensas y de corta duración. Los primeros habitantes de la ciudad tuvieron dificultades con el aumento del nivel del agua, dando una solución inicial de diques y bordos para contener el agua (Auvinet Guichard 2006). Con el aumento de la población y las constantes inundaciones que afectaron la ciudad desde el siglo XVI, se hizo necesario la construcción de un sistema evacuación del agua, incentivando la construcción de túneles y por consiguiente de lumbreras. Este aumento en la construcción dio pie a que esta ciudad se convirtiera en el futuro, en un foco de desarrollo e innovación en la construcción de lumbreras en suelos de baja resistencia al corte y de alta compresibilidad, características de los suelos de la ciudad de México.

Dentro del registro, el primer túnel de gran magnitud empleado para la evacuación de agua data de 1607, que corresponde a un socavón 560 m comprendidos entre el tajo de Zumpango y el tajo de salida. Para esta obra se abrieron 42 lumbreras con una profundidad máxima de 47 m. Este socavón presentó un colapso a causa de la creciente del río Cuatitlán, que saturó los materiales tobáceos del socavón por falta de recubrimiento, llevando a la decisión de remplazarlo por un solo tajo, el tajo de Nochistongo finalizado en el año de 1789 (Santoyo Villa et al. 2005). A mediados del siglo XIX, las inundaciones siguieron afectando a la población de la Ciudad de México, por lo que se planteó la construcción de un gran canal y el primer túnel de Tequisquiac. Estas obras que iniciaron en 1866 y que se culminaron en 1900, el túnel se planteó inicialmente con una longitud de casi 10 km y la implementación de 24 lumbreras, las cuales presentaron problemas de control de agua, con gastos superiores a 38 lt/min.

Posterior a la revolución mexicana, la explosión demográfica que experimentó la Ciudad de México hizo que el sistema de drenaje sea ineficiente, situación agravada por la problemática del hundimiento regional. Como resultado, se hizo necesaria la ampliación del gran canal y la construcción del segundo túnel de Tequisquiac entre 1937 y 1942 (Santoyo Villa et al. 2005). Para aumentar la capacidad de drenaje solicitada por la ciudad en la década de los 60 se dio la construcción del túnel interceptor y emisor de poniente que descargaban las aguas en el tajo de Nochistongo. En estos túneles se utilizaron lumbreras circulares con diámetros de 9 m y 6 m y con profundidad de hasta 60 m, revestidas con concreto reforzado, siendo la mayoría construidas en arcillas propias del Valle de México.

Como medida de solución al creciente hundimiento de la ciudad y, por consiguiente, a la necesidad de bombear el agua para su evacuación, se planteó la construcción de un drenaje profundo ajeno a los efectos del hundimiento de la ciudad. En la construcción del drenaje profundo se emplearon 40 lumbreras en un trazo de 67.9 Km de túneles entre los años de 1967 a 1975, dentro de las lumbreras siete se construyeron en suelos blandos arcillosos de la Zona de Transición y de la Zona de Lago, con muros de concreto armado. En años recientes el personal del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, reportó un funcionamiento hidráulico inadecuado en el sistema de drenaje, a causa del deterioro de revestimiento de las obras, lo que trajo consigo la proyección y construcción de un nuevo drenaje profundo llamado túnel Emisor de Oriente (TEO) de 62 Km de longitud y 7 m de diámetro que tendrá una capacidad de 150 m³/s en promedio.

3.5.2. Reporte de presencia de fallas lumbreras en los suelos del valle de México.

Dentro de las fallas reportadas en lumbreras existe un informe titulado Lumbreras y túneles en suelos, experiencias innovadoras en la ingeniería mexicana realizado por el ingeniero Andrés Moreno y Fernández, que fue elaborado con la finalidad de ingresar a la academia mexicana de ingeniería en 1991 (Moreno-Fernández 1991). Este informe ha sido uno de los pioneros en el área de descripción de la ocurrencia de fallas de lumbreras y de los métodos de adecuación para la corrección de los problemas ocurridos en México, siendo citado en gran cantidad de trabajos relacionados con la temática de fallas en lumbreras.

En el documento el autor relata la experiencia de la falla de dos lumbreras y la readecuación de estas, en el proyecto del túnel interceptor de oriente. Las fallas documentadas corresponden a la Lumbreira 6 y 7, construidas con la técnica Solum. En ambos casos hubo extrusión de la arcilla por una de las juntas entre los muros, durante la excavación del núcleo de la lumbreira. Tanto las condiciones estratigráficas del subsuelo, típicas de la Zona del Lago; la geometría y dimensiones de las lumbreras y la profundidad a la que se presentaron las fallas fueron similares en las dos lumbreras.

En la lumbreira 6, la falla se presentó durante la excavación del núcleo, a los 19.5 m de profundidad. A través de una junta, lo que provocó, desde los 14.0 m de profundidad, la rotura de los muros adyacentes, el nivel del suelo en el interior subió hasta los 15 m de profundidad. Simultáneamente, en la superficie se formó una depresión, con un diámetro similar al de la lumbreira y un desplazamiento vertical de 4 m. Figura 3.25 a). En la lumbreira 7 la falla ocurrió cuando la excavación del núcleo llegó a los 20 m de profundidad, esta se produjo a través de una de las juntas, provocando una depresión superficial de 0.5 m. Figura 3.25 b).

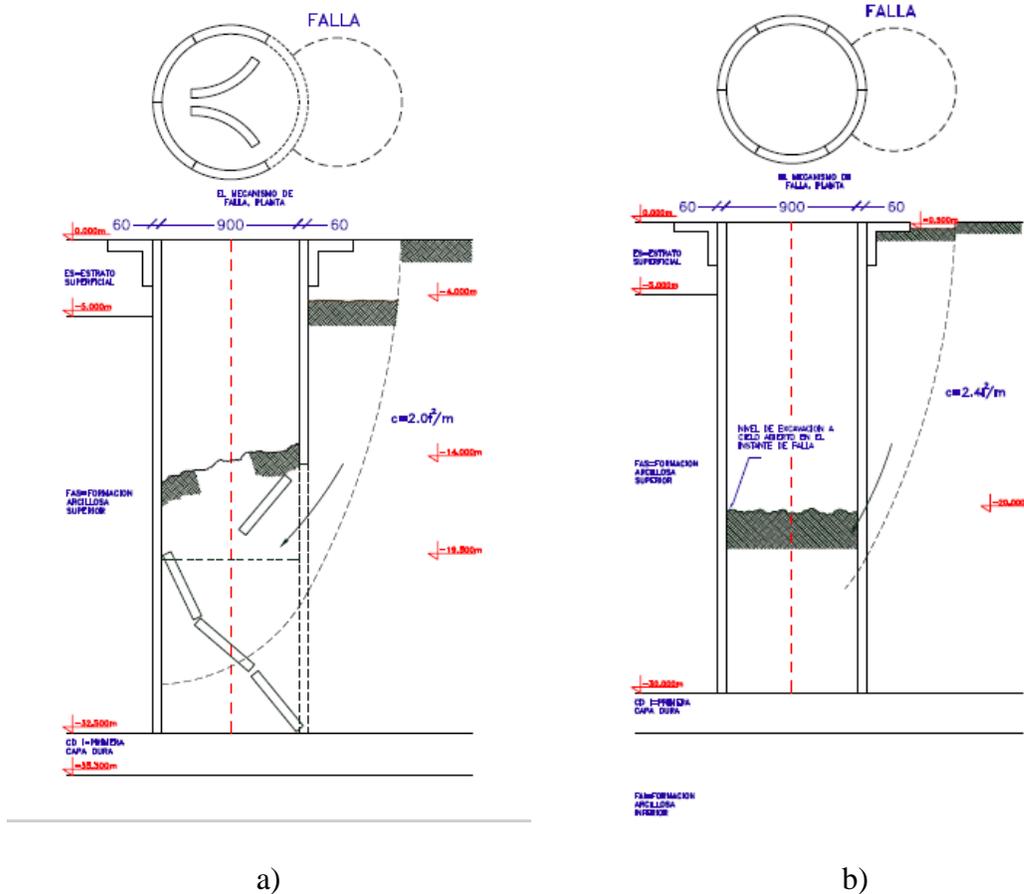


Figura 3.25. a) Esquema de falla de la lumbreira 6, b). Esquema de falla de la lumbreira 7. (Zemva 2011),(Moreno-Fernández 1991).

El proceso de rehabilitación en las dos lumbreras consistió en la construcción de una nueva lumbrera, concéntrica, alrededor de la falla. La separación anular entre ambas fue de 0.7 m. Se utilizó, básicamente, el mismo método constructivo, pero las nuevas juntas se ubicaron al centro de los anteriores muros utilizando tubos de 0.6 m de diámetro, logrando uniones machihembradas con superficies cilíndricas de sección semicircular. En la rehabilitación de la lumbrera 6 en el momento de excavación del núcleo a la profundidad de 28.5 m, los inclinómetros indicaban una nueva falla, por lo que se tomó la medida de inundar la lumbrera para prevenir un problema mayor. En la rehabilitación de la lumbrera 7 aconteció sucesos similares y se inundó la lumbrera, reanudando la excavación hasta alcanzar la profundidad proyectada. En las dos lumbreras la etapa final de excavación y el colado de la losa de concreto armado del fondo, se realizaron bajo el agua.

En la construcción del drenaje profundo del valle de México y las plantas de bombeo de aguas negras, se construyeron una serie de lumbreras con la técnica de anillos prefabricados. Los diámetros interiores típicos de las lumbreras construidas son de 5 m para las captaciones, 12 m para los túneles de drenaje profundo y hasta los 16 m para las plantas de bombeo. En algunas lumbreras destinadas como cárcamos de bombeo y lumbreras de rejillas se implementaron pilotes penetrantes de tensión con resistencia a la fricción y de punta controlados, con el propósito de lograr el empotramiento sísmico, la disminución de los desplazamientos diferenciales, y en contra de los empujes de subpresión hidráulica en el nivel de fondo. Durante las construcciones de las lumbreras de anillos prefabricados acontecieron situaciones problemáticas con relativa frecuencia dentro de las que se encontraron principalmente:

- La pérdida repentina del nivel de lodo bentonítico en el interior de las excavaciones, como consecuencia de la formación de las grietas radiales alrededor de las excavaciones.
- Acumulación de azolves en el fondo de las excavaciones con lodo bentonítico. Esta problemática acontece principalmente por la pérdida de estabilidad en las paredes, de las cuales se desprenden caídos, derrumbes de los bloques, fragmentos y granos de suelo en un tiempo relativamente corto. El azolve acumulado en el fondo de la excavación puede impedir una construcción exitosa.

La presencia de proyecciones de bloques de materiales de suelo, de difícil detección pueden obstruir el descenso de los anillos a el lugar proyectado (Zemva 2011). En lumbreras construidas empleando la técnica de lumbrera flotada, se han observado varias fallas, pero ninguna catastrófica. Durante la construcción de lumbreras del Drenaje profundo y de las Plantas de bombeo de la DGCOH-DDF, se presentaron problemas relacionados con la estabilidad del fondo de las excavaciones, sedimentación del suelo producto de caídos de las paredes de la excavación en el fondo, inestabilidad rotacional de la plataforma y escape de lodos de las excavaciones durante las primeras etapas del sumergimiento de las lumbreras.

Un fenómeno curioso que ha sido observado en varias ocasiones es el levantamiento del núcleo al realizarse el último corte perimetral. Este fenómeno puede atribuirse al hecho de

que la presión lateral transmitida por el lodo es superior al esfuerzo horizontal existente en el lugar previamente al corte. En por lo menos tres ocasiones se ha observado la falla del núcleo durante la excavación del mismo, lo que no ha tenido mayores consecuencias, ya que se pudo proceder con la excavación (Orduño and Auvinet 2010).

4. METODOLOGÍA DE TRABAJO.

Para la evaluación de la falla por subpresión en este trabajo se presenta un caso de estudio de una lumbrera en un medio circundante susceptible a la presencia de la falla. Para este caso se elegirá la técnica de construcción adecuado para el análisis. La evaluación de la falla se llevará a cabo en el campo analítico, con un análisis de riesgo y sensibilidad de la ecuación de Fs, y en el campo numérico, en donde se propondrán procedimientos para su evaluación.

4.1. CASO DE ESTUDIO.

El caso de estudio corresponde a una lumbrera del sistema de drenaje del proyecto del nuevo aeropuerto de la ciudad de México (NAIM); la lumbrera posee una forma cilíndrica, con dimensiones de 23.1 m de profundidad y 21.4 m de diámetro. El modelo geotécnico del suelo para el análisis, es un suelo típico del valle de la ciudad de México en la zona de lago virgen, zona clasificada acorde al libro “Síntesis geotécnica de la cuenca del valle de México” (Santoyo Villa et al. 2005). El modelo geotécnico consta de una costra seca (CS), una formación arcillosa superior (FAS), una capa dura (CD), una formación arcillosa inferior (FAI); se considera un nivel freático inicial común para todos los estratos, es decir una condición de presiones iniciales hidrostáticas. A continuación, se presenta una descripción somera de cada una de las unidades geológicas y en la Tabla 2 se presentan los valores de sus propiedades.

Tabla 2. Propiedades del modelo geotécnico a analizar.

Unidad	Profundidad (m)		Espesor (m)	γ (kN/m ³)	Su (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)
	De	A					
UG-1 (CS)	0	1	1	13	-	5	28
UG-2 (FAS-1)	1	3.5	2.5	11.6	10.0	-	-
UG-2 (FAS-2)	3.5	28.4	24.9	11.6	25.0	-	-
UG-3 (CD)	28.4	30.2	1.8	16	-	10	38
UG-4 (FAI)	30.2	46.7	16.5	11.9	50.0	-	-

- **Costra Seca (CS).** Compuestas por depósitos del fondo del lago fuertemente consolidados, a causa de exposición a los rayos solares en algún momento de su existencia.
- **Formación arcillosa superior (FAS).** Compuesta por arcillas de baja resistencia al corte, baja permeabilidad y alta compresibilidad, divisible en dos principales estratos las arcillas superficiales pre consolidadas (FAS-1) y las arcillas normalmente consolidadas (FAS-2). Generalmente presente en esta formación se encuentran lentes de mayor resistencia y de escaso espesor.

- **Capa Dura (CD)**. Compuesta por limos arenosos con algo de arcilla y ocasionales gravas con cementación de carbonatos de calcio muy errática. Esta capa tiene intercalados lentes de arcilla (Santoyo Villa et al. 2005)
- **Formación arcillosa inferior (FAI)**. Secuencia de estratos de arcilla separados por lentes duros, en un arreglo semejante al de la serie arcillosa superior.

4.2. ELECCIÓN DEL MÉTODO CONSTRUCTIVO PARA EL ANÁLISIS.

Como es de conocimiento, los métodos constructivos desempeñan un papel preponderante en la reducción de efectos adversos durante la construcción de una lumbrera, específicamente en suelos compresibles y de baja resistencia al esfuerzo cortante (Auvinet Guichard et al. 2010), características correspondientes al caso de estudio. En la elección del método constructivo se tomó como premisa el método constructivo de menor riesgo para la falla por subpresión, en una configuración suelo-lumbrera susceptible a la presencia de dicha falla. Para esto, se analizó las técnicas de construcción en el momento crítico de la ocurrencia de la falla, correspondiente al tiempo que transcurre entre la terminación de la excavación del núcleo y la colocación de la losa de fondo de la lumbrera.

En las técnicas de construcción mencionadas, las técnicas convencionales y mixtas quedan excluidas del análisis por requerir el conocimiento previo de la no presencia de la falla por subpresión. Las técnicas de construcción con estructuras de retención presentan condiciones críticas, debido a la no contemplación de un fluido compensatorio en la excavación del núcleo. La medida correctiva para este suceso es la adición este fluido, no obstante, esto puede traer complicaciones con la construcción de la losa de fondo que ahora será en condiciones sumergidas. Las técnicas compensadas presentan mayor control, como resultado de la compensación del material del núcleo excavado con lodo bentonítico. Las técnicas compensadas (lumbrera flotada y anillos prefabricados) durante el lapso de tiempo de mayor riesgo de la falla poseen una condición similar de equilibrio, asumiendo un mismo nivel y densidad de lodo utilizado, aunque estas técnicas de construcción presentan una variación en la cantidad de tiempo crítico.

La técnica de construcción seleccionada para el análisis, acorde a lo descrito anteriormente es la técnica compensada de lumbrera flotada, dentro de esta técnica es habitual la implementación de un muro pantalla previo a la excavación del núcleo, el cual evita la presencia de fallas en las paredes de la excavación. Sin embargo, esto aumenta la posibilidad de falla de fondo por cortante y subpresión (Zemva 2011)(Auvinet Guichard and Rodríguez 2011). Con las consideraciones mencionadas se incluyó a la configuración de la lumbrera un muro pantalla de 1.5 m de espesor y 26.3 m de profundidad, es decir 3.2 m por debajo de la base de la lumbrera excavada. Por su parte el lodo estabilizador se consideró con un peso específico de 10.5 kN/m³. El esquema de las características de la lumbrera y el modelo geotécnico se presentan en la Figura 4.1.

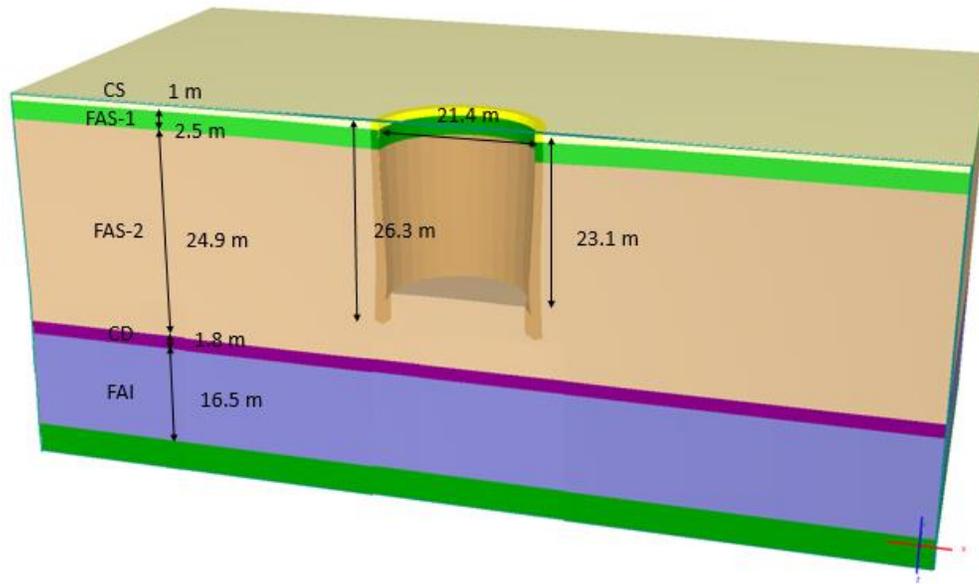


Figura 4.1. Esquema del modelo geotécnico y de las dimensiones de la lumbrera.

4.3. ANÁLISIS DE LA ECUACIÓN ANALÍTICA DEL FACTOR DE SEGURIDAD.

Las ecuaciones analíticas empleadas en la evaluación de factores de seguridad presentan un papel primordial al establecer un valor límite, valor alcanzado por un conjunto de variables propias de un sistema. Estas ecuaciones se obtienen regularmente de un análisis de equilibrio límite, en el que se contraponen las fuerzas actuantes contra las fuerzas resistentes. Debido al gran número de variables y a la complejidad de los sistemas de equilibrio planteados, es común realizar simplificaciones y esquematizaciones para alcanzar una ecuación analítica de fácil y rápida implementación, que permita realizar análisis de sensibilidad de variables en corto tiempo. Sin embargo, en ocasiones las simplificaciones y los esquemas realizados se alejan de los fenómenos que se desean representar, dando como resultado valores de F_s no representativos.

Con la finalidad de evaluar la representatividad de las simplificaciones realizadas, la incidencia de las variables en el F_s y la sensibilidad del F_s con las modificaciones en los parámetros de entrada de la ecuación analítica, en este trabajo se realiza un análisis de riesgo y sensibilidad empleando un análisis estadístico con la simulación Montecarlo. Esta simulación contempla la generación de valores aleatorios para las variables de entrada a partir de distribuciones probabilísticas asignadas a dichas variables. Con estos valores se calcula la variable de salida, el número de iteraciones requerido. En cada iteración se emplea un grupo diferente de valores asignados acorde a la distribución probabilística de las variables de entrada. El resultado de la simulación da una distribución de probabilidad de la variable de salida (Palisade n.d.). La simulación Montecarlo empleada en este trabajo se realizó a través

de la herramienta de análisis probabilístico del programa Excel @risk en la que se implementó en promedio 5000 iteraciones para cada una de las variables.

El análisis de sensibilidad y riesgo se aplicó a una determinada ecuación analítica. La elección se realizó dentro de las ecuaciones recopiladas en secciones anteriores. Los criterios de selección de esta ecuación partieron de la representatividad de la ecuación al problema a representar y la implementación de estas ecuaciones reportadas en la literatura. El proceso de selección y un análisis comparativo del comportamiento de las ecuaciones analíticas analizadas con las variables de entrada se presentan en el Anexo 2. Resultado del análisis se eligió la Ecuación 9 del manual de diseño de obras civiles de la CFE. A la ecuación se adiciona la fuerza que ejerce el lodo al interior de la lumbrera con el fin de representar en mayor medida el equilibrio de fuerzas que actúan en el tiempo crítico (Ecuación 18). En la Ecuación (18) el denominador se encuentra planteado bajo una condición hidrostática; de no ser representativa, es pertinente modificarlo por la presión registrada en el estrato.

$$F_S = \frac{\gamma_s h_s + \gamma_l h_l + S_u \eta l}{\gamma_w h_w} \quad (18)$$

Donde γ_w es el peso volumétrico del agua, h_w es la distancia entre el nivel freático y la parte superior del estrato impermeable y η se encuentra definido por la siguiente ecuación.

$$\eta = 0.4 \sqrt{\frac{\sigma_z}{S_u}} \quad (19)$$

Dentro de las variables que intervienen en la Ecuación (18), las que se pueden modificar en el proceso constructivo son: la altura y el peso volumétrico del lodo. Estas variables se ven alteradas principalmente a causa de acontecimientos como: procesos de evaporación, filtración, no disponibilidad de suministro, fracturamiento hidráulico o cavidades presentes en el suelo. Las variables restantes corresponden a valores que se determinan por las formaciones geológicas y las dimensiones de la lumbrera.

4.3.1. Análisis de riesgo.

En este trabajo el análisis de riesgo corresponde al uso sistemático de los valores de entrada dentro de las distribuciones asignadas, para determinar la frecuencia de los valores de la variable de salida. Para esto se asignó una distribución de probabilidad a cada una de las variables de entrada, la cual, se encuentra acorde con las limitaciones constructivas o los valores típicos encontrados para el caso de estudio.

Peso específico del lodo (γ_l). Para esta variable se eligió una distribución normal con media aritmética de 10.5 kN/m^3 y una desviación estándar de $\sigma = 0.222$, que corresponde a una variación en el 90 % de probabilidad de $\pm 0.7 \text{ kN/m}^3$. Se empleó una distribución normal representativa de las desviaciones asociadas a la adquisición de medidas. El rango de valores para el peso específico del lodo está acorde a los valores usuales de campo. El valor mínimo corresponde al peso específico del agua y el valor máximo corresponde al valor alcanzado

por un lodo compuesto estrictamente de bentonita (Paniagua 2002). La cota superior estipulada es inferior al peso específico máximo necesario para que el lodo sea desplazado por la lechada de cemento, valor correspondiente a 12.3 kN/m^3 (Zemva 2011), y es inferior al peso específico de fracturamiento hidráulico para el suelo de análisis.

Altura del lodo (h_l). Para esta variable se eligió una distribución uniforme con media aritmética de 22.1 m y una variación de ± 1 m. Se empleó una distribución uniforme como resultado de una probabilidad casi ecuánime en la variación de la altura. El rango de la variable es consecuente con la detallada supervisión que se posee durante la construcción y con reportes de caudales de filtración de lodo.

Espesor del estrato impermeable (h_s). Esta variable corresponde al espesor de la sección de suelo entre el fondo de la lumbrera y el estrato permeable. Para esta variable se eligió una distribución uniforme con media aritmética de 5.3 m y una variación de ± 1.7 m. Se empleó una distribución uniforme para evaluar de manera ecuánime la variación del espesor sobre el valor del F_s . El rango de la variable se eligió como un valor considerable para la afectación al F_s y para considerar posibles variaciones topológicas del estrato permeable.

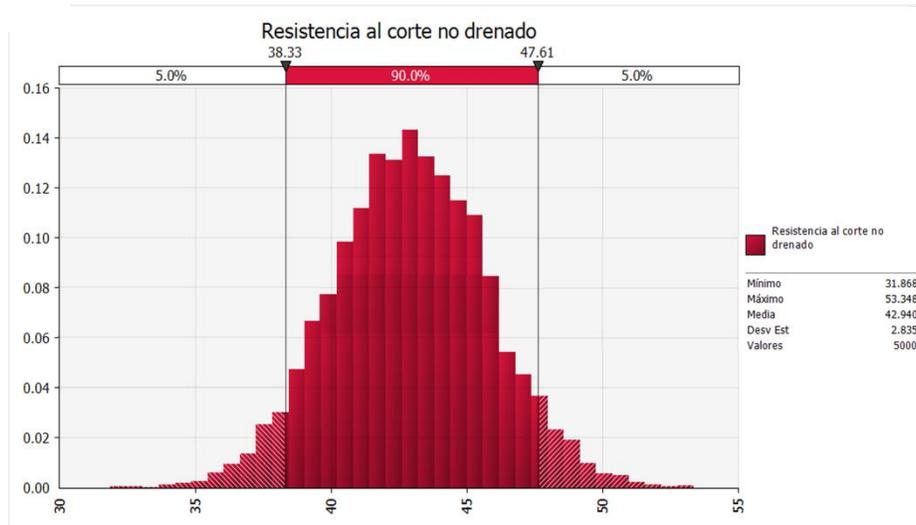
Peso específico del estrato impermeable (γ_s). Para esta variable se eligió una distribución normal con media aritmética de 12 kN/m^3 y una desviación estándar de $\sigma = 0.6$, que corresponde a una variación en el 90 % de probabilidad de $\pm 1.5 \text{ kPa/m}$. Se empleó una distribución normal debido a que esta representa de manera satisfactoria el comportamiento variacional de los parámetros de diseño geotécnico (Hita María 2015). El rango de la distribución se tomó con relación a valores característicos de los pesos específicos entre los que varía la arcilla analizada.

Presión de poro (u). Para esta variable se eligió una distribución uniforme, con media aritmética correspondiente a la presión hidrostática de la profundidad del estrato y una variación de ± 2 m de carga hidráulica o $\pm 19.62 \text{ kPa}$. Se empleó la distribución uniforme para evaluar de manera ecuánime la variación de u en el estrato permeable, el rango de la variable se eligió acorde al posible comportamiento estacionario de un estrato permeable.

Resistencia al corte no drenado (S_u). El valor de esta variable es medido a la mitad de la sección del suelo impermeable, por lo cual, en cada una de las iteraciones en las que cambia el espesor impermeable el valor de S_u se modifica, obteniendo una covarianza entre estos dos parámetros. Para simular esta correlación se propuso el valor de S_u como una función lineal de los esfuerzos efectivos, que a su vez dependen de la profundidad. Esta proporcionalidad lineal para las arcillas de México, normalmente consolidadas, se ha reportado en varios trabajos como el de Santoyo (Santoyo et al. 2015).

Para la caracterización de S_u se asignó una distribución normal a la constante de proporcionalidad lineal. Esta distribución permite obtener una distribución de probabilidad de S_u con un rango y distribución representativas de su variación. Los resultados se presentan en la Figura 4.2, en estos se obtiene una distribución de probabilidad correspondiente a una

distribución normal de media aritmética de 43 kPa y una desviación estándar de $\sigma = 2.835$ equivalente a una variación de aproximadamente ± 5 kPa, dentro del 90 % de probabilidad.



• **Figura 4.2. Distribucion de probabilidad de la resistencia al corte no drenado.**

Esfuerzo efectivo (σ_z). El esfuerzo efectivo se calcula a la profundidad media de la sección de suelo impermeable, el valor en el análisis de riesgo para esta variable depende del espesor del estrato impermeable y del peso específico del suelo. Las gráficas de distribución de cada una de las variables se presentan en el Anexo 3.

Es importante destacar que los resultados de los análisis de riesgo y sensibilidad se ven afectados en mayor medida por los rangos de las variables de entrada y en menor medida por sus distribuciones o por sus valores medios. Por lo cual, de sobreestimarse o subestimarse estos valores se obtendrá una repercusión significativa en los resultados. Esta incidencia de las características de las variables de entrada en los resultados del análisis estadístico se reporta en (Simpson 2011).

4.3.2. Condiciones de análisis.

Para el análisis se consideraron dos condiciones. En la primera condición existe una covarianza entre la profundidad del estrato permeable y su carga hidráulica, caso hidrostático (Condición 1). En esta condición la media aritmética de la distribución de la presión de poro se modifica con el espesor del estrato permeable. En la segunda condición existe una variación de carga hidráulica en el estrato permeable independiente de la profundidad de este, condición abatida o artesiana (condición 2). En esta condición la media aritmética de presión de poro se mantiene constante al valor inicial (Valenzuela et al. 2019). Estas condiciones son representativas de dos circunstancias distintas en la naturaleza. La condición 1 representa un acuífero sometido a una carga hidrostática y la condición 2 representa un acuífero abatido,

artesiano o un comportamiento estacional, siendo la condición más desfavorable el comportamiento artesiano.

4.3.3. Resultados del análisis de riesgo de la ecuación analítica.

Los resultados del análisis se encuentran en las distribuciones de probabilidad graficadas en la Figura 4.3 y Figura 4.4, para la condición 1 y 2 respectivamente. Estas distribuciones de probabilidad se ven representadas por una función de densidad con el comportamiento de una ecuación gaussiana, que para este caso se aproxima a una distribución normal. En las distribuciones resultantes se observa que un 0.2% y 0.9% se encuentra dentro de la probabilidad de un F_s menor 1, para la condición 1 y 2 respectivamente. Por otro lado, la probabilidad de que el F_s alcance un valor de 2, valor mínimo para estar del lado de la seguridad en falla por subpresión, es nulo, teniendo como valores máximos 1.35 y 1.45 para cada una de las condiciones. De igual forma, se obtiene que dentro del 90% de los valores probables, la variación del F_s respecto a la media aritmética alcanza un ± 0.075 para la condición 1 y ± 0.09 del valor medio para la condición 2.

Con los resultados descritos y considerando que los valores medios y las variaciones estándar de las variables empleadas en este análisis de riesgo son representativas de las condiciones estratigráficas del suelo estudiado y de los procesos característicos en la construcción de una lumbrera, para este caso de estudio se puede concluir que:

- La probabilidad de que las combinaciones menos favorables de los parámetros den como resultado un valor de F_s menor a 1, no alcanza el 1%, indiferente de la condición 1 o 2. Concluyendo que la ocurrencia de falla por subpresión bajo las consideraciones de la ecuación analítica, es poco probable.
- La desviación estándar de los resultados de la condición 1 y 2, presenta un valor inferior a 0.07, con lo cual la mayor parte de los datos se encuentran cerca a la media aritmética. Esta desviación da un rango de variabilidad del F_s , considerando un 90 % de probabilidad, inferior a ± 0.1 . Esto refleja la baja sensibilidad de la variable de salida con los cambios en las variables de entrada.
- Bajo el escenario más favorable del análisis de riesgo, para cualquiera de las condiciones planteadas, no se alcanza el F_s mínimo reportado en el manual de CFE, encontrándose una gran distancia a este valor. Esto permite concluir que en el caso de estudio y en casos similares dentro del rango de variación propuesto para cada una de las variables, las lumbreras no alcanzarán a pasar por falla por subpresión
- Basados en que la condición 2 presenta mayor porcentaje de probabilidad de obtener un F_s menor a 1 y que en esta condición se encuentran el F_s con mayor magnitud, con respecto a la condición 1. Se concluye que los resultados encontrados son representativos de las consideraciones iniciales, en las cuales, el caso menos favorable es el artesiano, y el más favorable es el abatido, situaciones representadas en la condición 2.

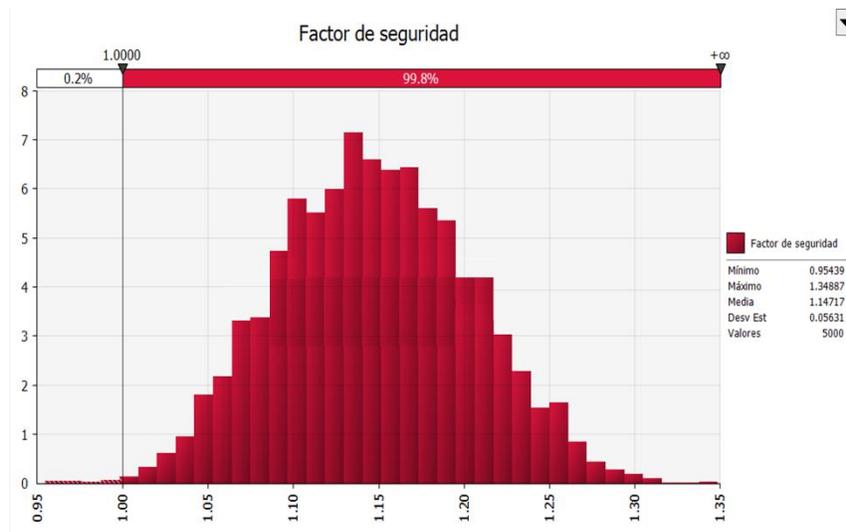


Figura 4.3. Distribución de probabilidad del Factor de seguridad para la condición 1.

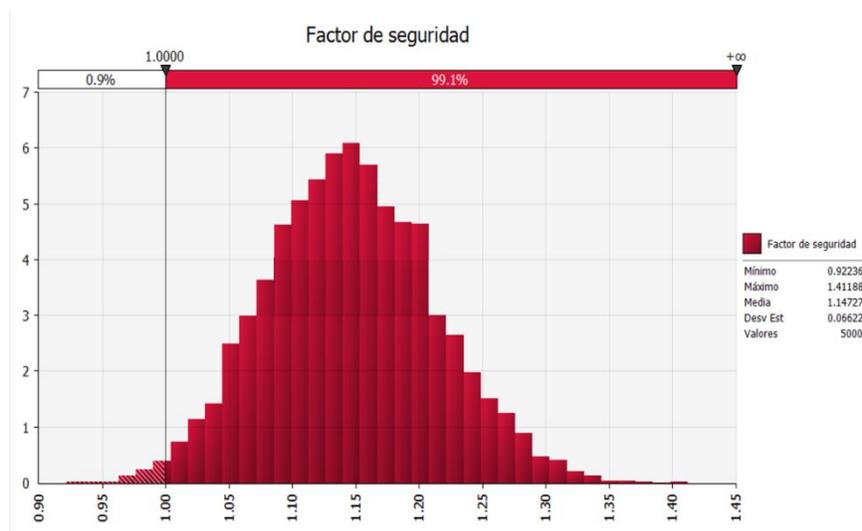


Figura 4.4. Distribución de probabilidad del Factor de seguridad para la condición 2.

Con el fin de alcanzar el Fs requerido acorde al manual de la CFE, se prosiguió a evaluar, para la condición hidrostática, las variables modificables dentro del procedimiento constructivo, altura y peso específico del lodo. La variación de la altura del lodo se encuentra limitada al valor de la profundidad de la lumbrera, valor máximo considerado en el análisis de riesgo, siendo este un valor insuficiente para un Fs de 2. Por otro lado, considerando la altura máxima del lodo, el peso específico necesario, para el $Fs = 2$, corresponde a 20 kN/m^3 , ($Fs=1.5-14.7 \text{ kN/m}^3$) peso que se encuentra por encima del necesario para desplazar el lodo por la mezcla fraguante, del peso mínimo de fracturamiento hidráulico y de los valores típicos de construcción. Es importante resaltar que dentro de las condiciones que me permiten alcanzar el Fs, el peso específico del lodo necesario es 167% el peso del suelo insitu, un valor

elevado considerando que la condición previa a la excavación (con peso del suelo insitu) es estable.

Partiendo de los resultados que se obtuvieron del análisis de riesgo de la ecuación analítica, baja probabilidad de un $F_s < 1$, nula probabilidad de valores superiores a $F_s = 2$, baja desviación estándar de las funciones de densidad resultantes, y altos valores de los parámetros necesarios para alcanzar el F_s . Se puede sugerir que para el caso de estudio el valor mínimo del factor de seguridad necesario para estar del lado de la seguridad en la falla por subpresión es muy alto, (considerando que en un $F_s=1$ la probabilidad de falla es de 50 %). Esta afirmación puede ser corroborada al calcular el F_s en las condiciones iniciales previas a la excavación, situación en la que el sistema está en equilibrio y para la que $F_s = 1.3$. La sugerencia sobre un valor excesivo de F_s límite para el caso de estudio puede llegar aplicarse a otros casos de lumbreras construidos en suelos. Sin embargo, esto requiere el análisis de mayor número de casos de estudio y la evaluación de ingenieros con alta experiencia sobre el riesgo perceptible en dichas obras.

4.3.4. Análisis de sensibilidad

En el análisis de sensibilidad se empleó los diagramas de tornado, los cuales permiten evaluar la incidencia que tiene cada una de las variables en la ecuación analítica del F_s . En estos diagramas se presenta el valor mínimo y máximo de la variable de salida correspondiente a la variación mínima y máxima de una determinada variable de entrada, considerando las variables restantes como constantes y utilizando su valor medio aritmético. Los diagramas de tornado resultantes del análisis se presentan en la Figura 4.5 y Figura 4.6 para la condición 1 y 2 respectivamente.

En los diagramas de tornado se observa que: las variables de mayor relevancia en la modificación del valor del F_s , presentes en la condición 1 y 2, son la presión de poro y el peso específico del suelo. La variable de menor relevancia es la resistencia al corte no drenado. Las variables de incidencia media son la altura y peso específico del lodo, siendo estas las variables modificables durante el proceso de construcción. De igual forma cabe destacar que bajo ninguna iteración en el diagrama de tornado el F_s es menor a 1.

Por otro lado, el espesor del suelo h_s juega un papel preponderante en la condición 2 y un papel de menor importancia en la condición 1. La variación del rol de h_s en las condiciones es consecuencia de la covarianza existente en la condición 1. Esta covarianza se refleja en la ecuación analítica con la variación proporcional del numerador y denominador al cambio de h_s . La proporcionalidad mencionada hace que al aumentar el h_s , aumente las fuerzas resistentes y a la vez las fuerzas actuantes, trayendo consigo un mínimo cambio en la variable de salida F_s (Valenzuela et al. 2019). Por el contrario, en la condición 1 no existe la covarianza, con lo cual, al aumentar h_s solo se modifica el numerador, esta independencia con el denominador resulta en el aumento del grado de incidencia en el F_s . De lo anterior se concluye que la importancia del h_s señalada en la literatura es aplicable solo en los escenarios de la condición 2, al aplicar la ecuación analítica analizada.

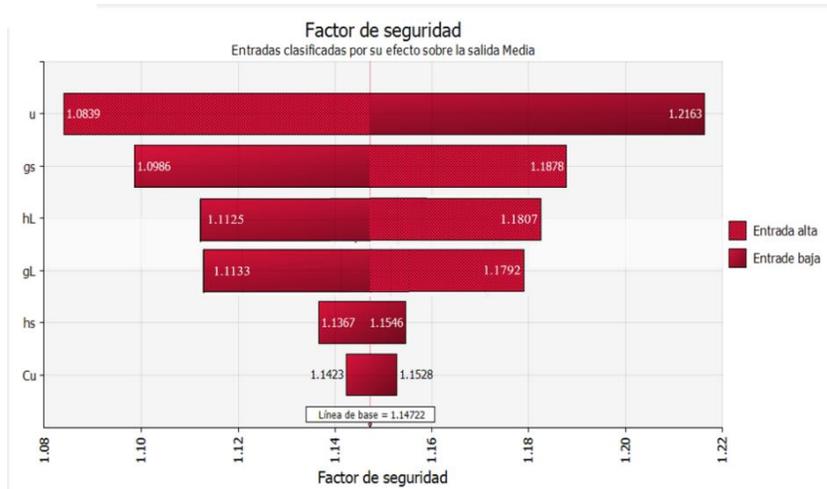


Figura 4.5. Diagrama de tornado para la condición 1.

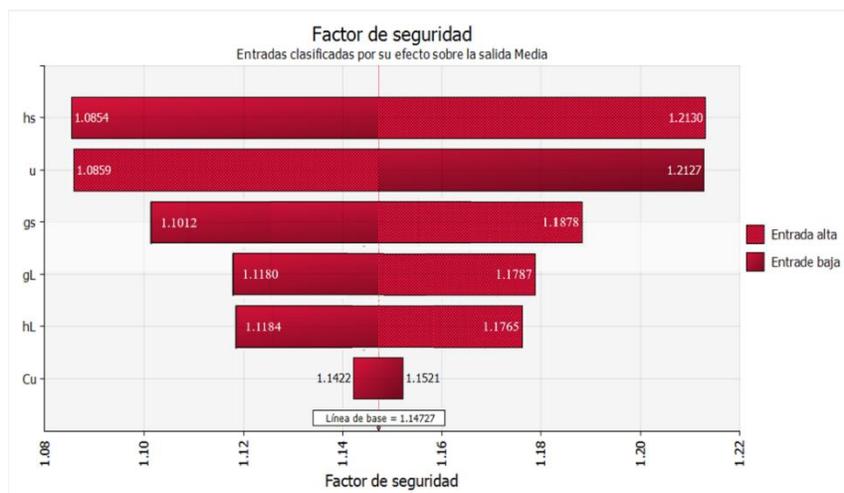


Figura 4.6. Diagrama de tornado para la condición 2.

El grado de influencia del peso volumétrico y la altura del lodo, presentan un comportamiento similar, siendo esto resultado del rango de probabilidad determinado para cada variable. Esta similitud es de interés, ya que en análisis análogos de estabilidad de excavaciones la variación del peso del lodo con respecto a la variación de altura del mismo presenta una repercusión mínima en el valor de Fs, como se menciona en el trabajo de Paniagua (Paniagua 2002).

4.3.5. Análisis del factor de adherencia.

En los trabajos en los que se plantean expresiones analíticas para la evaluación de la falla por subpresión, uno de los principales focos de discordancia es la implementación de un factor de adherencia suelo lumbrera y su definición en función de variables conocidas. Por consiguiente, en este análisis se procede a evaluar la influencia del factor de adherencia como variable independiente. Para este análisis se parte del caso de estudio y la ecuación analítica del manual de la CFE (Ecuación 18).

Para el análisis del factor de adherencia como variable independiente se empleará una nueva variable de entrada η con su respectiva distribución de probabilidad. Esta nueva variable es independiente del valor del esfuerzo efectivo y la resistencia al corte no drenado. La distribución de probabilidad de η se obtuvo realizando un análisis de riesgo a la variable η con las distribuciones de probabilidad del esfuerzo efectivo y la resistencia al corte no drenado empleado la Ecuación (19). Los resultados del análisis de riesgo se presentan en la Figura 4.7. Esta distribución de probabilidad resultante se implementa para definir la función de densidad de la nueva variable η como se observa en la Figura 4.8.

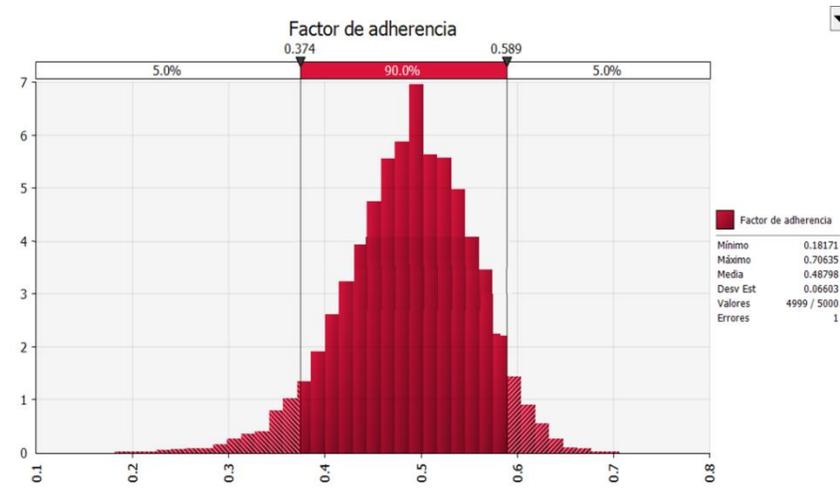


Figura 4.7. Resultados del análisis de sensibilidad al Factor de adherencia.

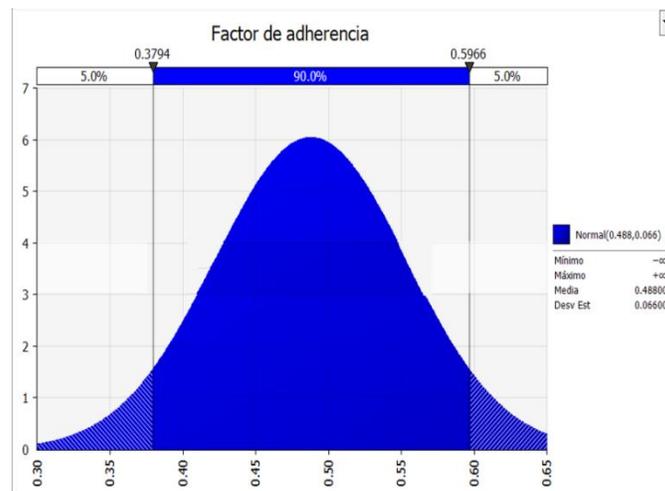


Figura 4.8. Distribución para la variable independiente del factor de adherencia

Los diagramas de tornado para los análisis de sensibilidad con la inclusión del factor de adherencia como variable independiente se presentan en la Figura 4.9 para la condición 1 y en la Figura 4.10 para la condición 2

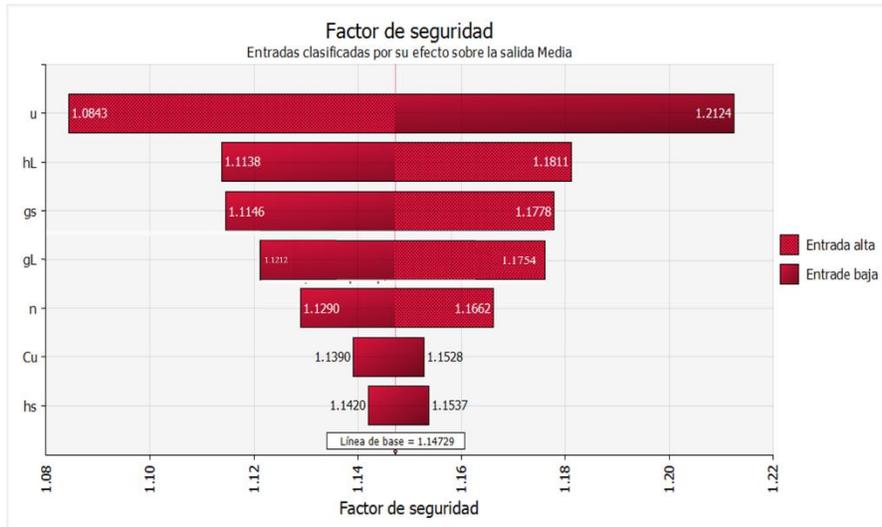


Figura 4.9. Diagrama de tornado para la condición 1 FA independiente.

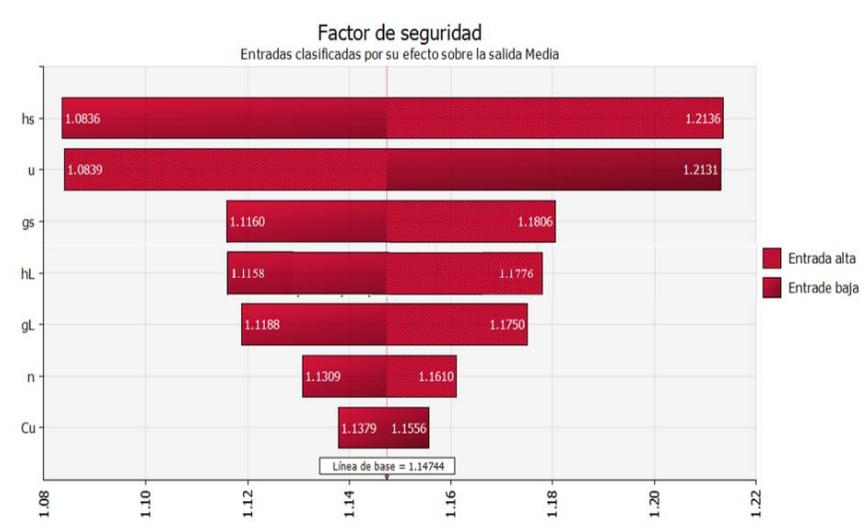


Figura 4.10. Diagrama de tornado para la condición 2 con FA independiente.

En el diagrama de la Figura 4.9 se observa que la incidencia del peso específico del suelo y del espesor del estrato disminuye al considerar el factor de adherencia como una variable independiente. La disminución de la incidencia del peso específico del suelo es resultado de que esta variable incide en el valor del factor de adherencia a través de la determinación de los esfuerzos efectivos. Por otra parte, la disminución de la incidencia del espesor del estrato permeable es resultado de que esta variable incide en el valor del factor de adherencia a través de la modificación de la profundidad de medición de los esfuerzos efectivos y la S_u . En el diagrama de la Figura 4.10 se observa que la incidencia que tienen las variables sobre el F_s no presentan cambios considerables en comparación con el diagrama de la Figura 4.6. En los

dos diagramas Figura 4.9 y 4.10 se presenta la adición de la variable del factor de adherencia, siendo esta una variable de baja incidencia en el Fs.

De este análisis de sensibilidad se concluye que: en ninguna iteración en la cual se considere el peor escenario para una sola variable, el Fs es inferior a 1. La variación de las variables modificables en el diseño del proceso constructivo, altura y densidad de lodo, presentan una incidencia de mediano grado en el Fs. La resistencia al corte no drenado es la variable de menor incidencia en el Fs. La incidencia en el Fs del espesor del estrato impermeable es determinante en los escenarios en los cuales la presión de poro del estrato permeable es independiente de la profundidad del mismo. La incidencia del factor de adherencia, al considerarse una variable independiente, no representa una variación significativa en el Fs.

4.4. MODELADO NUMÉRICO.

La simulación numérica se llevó a cabo empleando un modelo en dos dimensiones axisimétrico, que representa en gran medida las condiciones que se desean analizar dentro del caso de estudio. Estas condiciones son: simetría con el eje de revolución y ausencia de cargas locales. Adicionalmente se posee la ventaja de la menor carga computacional sobre un modelo en 3D. Para la modelización se empleó el Programa computacional de elemento finito enfocado al análisis y diseño geotécnico, Rock and Soil RS².

4.4.1. Rock and soil V0.9.

RS² o Phase ² es un programa en 2D de elemento finito perteneciente a la paquetería de Rocscience. RS² se implementa en una amplia gama de proyectos ingenieriles geotécnicos en el área de aplicaciones civiles y mineras. Dentro de estas aplicaciones se encuentran el diseño de excavaciones, análisis de estabilidad de taludes, flujo de agua subterránea, análisis probabilistas, consolidación, análisis dinámicos, etc. (Rocscience inc. 2019).

RS² inicialmente enfocado en el análisis de rocas ha ampliado su rango de trabajo a suelos con la inclusión de nuevas características. Dentro de las nuevas características están los modelos constitutivos incluidos en Programas de cómputo para el análisis de suelos como: el modelo de hardening and soild, Small soft soil, Soft Soild Creep, del software Plaxis y CY soil and Ch soil de FLAC y modelos visco elastoplásticos. Otras de las características implementadas son: estructuras de análisis de flujo y discretización de presión de poro acorde al material. Por último y como tema de interés para este trabajo, RS² tiene la metodología de reducción de parámetros de resistencia totalmente automatizada, aplicada a criterios de falla, como el criterio de Mohr-Coulomb y Hoek-Brown (Rocscience inc. 2019).

4.4.2. Modelización del caso de estudio.

4.4.2.1. Condiciones del análisis.

- El análisis empleado para la representación de la falla por Subpresión corresponde a un análisis a corto plazo, en donde los materiales arcillosos se caracterizaron en

términos de su resistencia no drenada. Esta caracterización se realiza debido a que durante el tiempo de análisis la arcilla presenta un comportamiento de suelo impermeable.

- El criterio de falla implementado es Mohr Coulomb que representa de manera eficiente el análisis de estabilidad a corto plazo. En este criterio la caracterización de materiales impermeables se realiza asumiendo $\phi=0^\circ$ y $c_u=S_u$, donde ϕ es el ángulo de fricción, c_u es la cohesión, y S_u es la resistencia al corte no drenado. En otras palabras, los materiales impermeables fueron caracterizados con un criterio de falla tipo Tresca. Los materiales permeables que presentan cierta cementación, se caracterizaron en términos de ϕ y c .
- El comportamiento de los materiales empleados se considera como elastoplástico perfecto, con lo cual sus parámetros de resistencia pico son iguales que los residuales, trayendo consigo que la superficie de fluencia no presente variación alguna con el incremento de esfuerzos. Se asume que los materiales son isotrópicos y homogéneos
- El campo de esfuerzos es axisimétrico. En este caso el esfuerzo fuera del plano es igual al esfuerzo radial y su variación es proporcional a este.
- El esfuerzo vertical mayor se definió utilizando el peso específico del suelo y el esfuerzo horizontal se definió empleando el coeficiente de presión de tierra en reposo K_0 . Para el coeficiente se empleó la ecuación de Mayne and Kulhawy, que ofrece mayor representatividad para arcillas pre consolidadas que expresiones como la ley de Jaky o el K_0 en función de la relación de poisson con las cuales el estado de esfuerzos resultante es cercano a la superficie de fluencia (Rocscience inc. 2019).

4.4.2.2. Parámetros del caso de estudio.

Como se ha mencionado las características del caso de estudio son iguales para el análisis de la ecuación analítica y para el análisis numérico. No obstante, para que el análisis numérico sea representativo de la configuración de la lumbrera y el modelo geotécnico se requieren características adicionales que se presentan en la Tabla 3. En el modelo las propiedades de las arcillas varían con la profundidad, a una razón de 1 kPa/m de cohesión para la FAS y 10 kPa/m para la FAI y de 50 kPa/m de Modulo de Young para la FAS y FAI.

4.4.2.3. Mallado y condiciones fronteras.

Para el mallado del modelo se utilizó elementos cuadrangulares con 4 nodos en una malla uniforme, los elementos de la malla se eligieron acorde a la superficie de falla esperada para aumentar la velocidad de convergencia del modelo. En la malla resultante se obtuvo 9579 nodos y 9384 elementos. La dimensión del modelo es aproximadamente, en la dirección del eje y el doble de la profundidad de la lumbrera y en dirección del eje x , tres veces el diámetro máximo de la lumbrera, cumpliendo con las consideraciones planteadas en el manual de la CFE para modelización de lumbreras. Las condiciones de frontera del modelo son: restricción de desplazamiento en ambas direcciones para el fondo del modelo y en el sentido horizontal en la parte lateral del modelo. Estas características se presentan en la Figura 4.11.

Tabla 3. Parámetros para el análisis numérico.

Unidad	Profundidad (m)		Espesor	γ	Eu	E'	ν'	c'	ϕ'	Su	OCR	ko
	De	A										
UG-1 (CS)	0	1	1	13	2856	2550	0.25	5	28	22.00	1.50	0.64
UG-2 (FAS-1)	1	3.5	2.5	11.6	3500	-	0.33	2	38	10.00	2.50	0.68
UG-2 (FAS-2)	3.5	28.4	24.9	11.6	4750	-	0.33	2	38	25.00	2.14	0.61
UG-3 (CD)	28.4	30.2	1.8	16	3200	3084	0.33	10	38	-	-	0.38
UG-4 (FAI)	30.2	46.7	16.5	11.9	5000	-	0.33	2	38	50.00	1.00	0.38
UG-5 (SES)	46.7	50	3.3	15	5000	5000	0.33	10	42	-	-	0.33

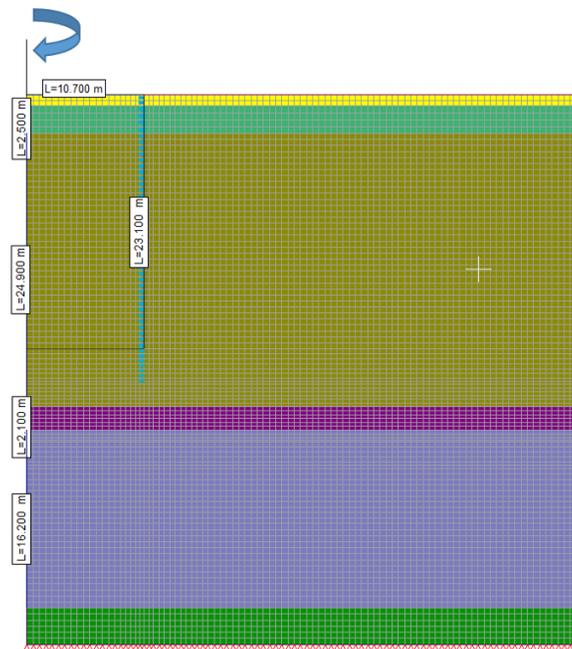


Figura 4.11. Mallado y condiciones de frontera para el modelo numérico axisimétrico.

4.4.2.1. Estado inicial de los elementos en el modelo.

El estado inicial de los elementos está compuesto por el esfuerzo inicial y la fuerza de cuerpo. La fuerza de cuerpo corresponde a la fuerza que se ejerce por el peso propio de los materiales. El esfuerzo inicial es la fuerza interna de cada elemento acorde al estado de esfuerzos en el que se encuentre. Estas fuerzas se equilibran para mantener un balance interno en el elemento y evitar asentamientos o expansiones en la etapa inicial del modelo, en la que no se producen

dichos cambios. Para esto, en el programa RS² se manejó la opción field stresses and body force con la intención de equilibrar el modelo inicial a las condiciones de una excavación cercana a la superficie.

4.4.2.2. Etapas de modelización.

La falla por subpresión se modelizó a través de una serie de etapas representativas de la técnica de construcción seleccionada, que permiten reproducir el estado de esfuerzos que se posee al finalizar la excavación del núcleo. Las etapas modelizadas son:

- **Etapas 1:** En esta etapa se modelizó la estratigrafía del modelo con las propiedades de cada uno de los materiales y la ubicación del nivel freático, estableciendo la condición de equilibrio entre las fuerzas de cuerpo y el estado de esfuerzo inicial.
- **Etapas 2.** En esta etapa se adiciona el muro pantalla acorde a la técnica de construcción. Este muro se modeliza como un elemento estructural, liner, para aligerar la carga numérica, en comparación con la implementación de un elemento volumétrico. Asimismo, se modelizó una interfaz entre el muro y el suelo. Esta interface corresponde a un elemento de volumen de espesor de 0.7 m al rededor del muro, las propiedades de este elemento de volumen son las del suelo original con una reducción del 30% en sus parámetros de resistencia.
- **Etapas 3.** En esta etapa se realiza la excavación de la lumbrera en un solo paso y se adiciona el lodo estabilizador, el cual se modelizó como una fuerza triangular distribuida en las paredes y uniforme en la base de la excavación. Si bien esta forma de colocar la carga del lodo y realizar la excavación en una sola etapa se reconoce como súbita, esto puede ser representativa de la técnica de excavación, que para este caso corresponde a una lumbrera flotada.
- **Etapas 4.** En esta etapa se reinicia las deformaciones para visualizar las deformaciones que se presentan al intentar simular la falla.

La etapa de la técnica de construcción correspondiente al momento crítico de las fallas en el fondo es la etapa 4, esta etapa corresponde al punto de partida de la simulación de la falla, con la modificación del estado de esfuerzos resultante del proceso constructivo de la lumbrera. Es importante mencionar que para las condiciones del modelo y las propiedades de los materiales en la etapa 4 el modelo es estable, por lo cual, para evaluar la presencia de la falla por subpresión se requiere propiciar el desequilibrio modificando los valores de las variables que intervienen en la falla. En la Figura 4.12 se presenta las 3 etapas de la modelización de la lumbrera.

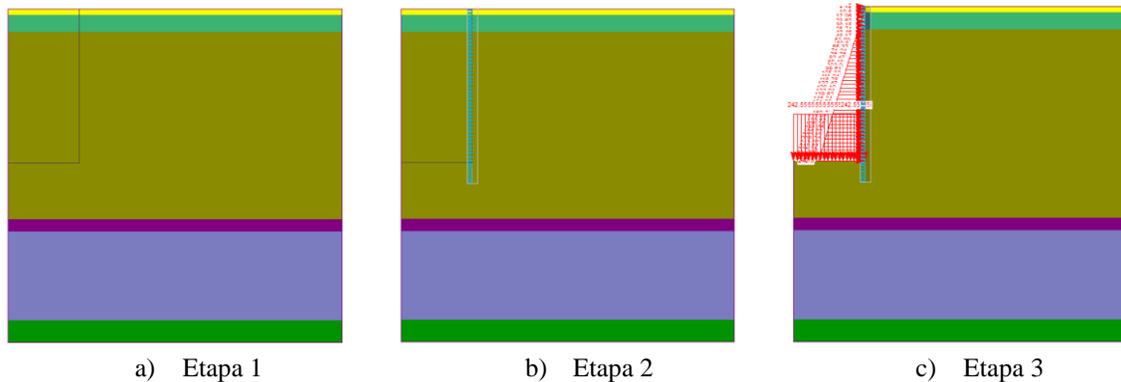


Figura 4.12. Etapas de modelización.

4.4.3. Requerimientos para el desarrollo del mecanismo de falla por subpresión.

Acorde a lo descrito en el apartado de falla por subpresión para que se induzca el desarrollo del mecanismo de falla, el suelo entre el estrato impermeable y las paredes de la excavación debe presentar deformaciones hacia la cara libre de la excavación. Para que esto ocurra y dada la naturaleza mecánica de los geomateriales se requiere el cumplimiento de dos condiciones físicas:

- 1.- La existencia de presión de poro en el estrato permeable, que interactuará con la resistencia a la tensión de este estrato.
- 2.- El desarrollo de esfuerzos desviadores que interactúen con la resistencia al corte en el suelo entre el estrato impermeable y las paredes de la excavación.

En el modelo numérico implementado para el análisis del mecanismo de falla por subpresión, en el cual se implementó el criterio de falla de Mohr-Coulomb y el comportamiento elastoplástico perfecto de los materiales, las condiciones físicas necesarias para la producción de la falla se satisfacen cuando:

- 1.- En el estrato permeable, la presión de poro genere una modificación del esfuerzo principal menor, tal que este alcance el valor de la resistencia a la tensión de este estrato. Conociendo que para el caso de estudio la resistencia a la tensión del estrato permeable es nula, basta con que el esfuerzo principal menor sea igual a cero.
- 2.- Entre el estrato impermeable y las paredes de la excavación, los esfuerzos desviadores en las paredes de la sección cilíndrica alcancen la superficie de falla. La superficie de falla para el caso de estudio se encuentra determinada por la resistencia al corte no drenado. Esta resistencia aumenta con la profundidad.

La falla o inestabilidad en esta condición existirá siempre y cuando las condiciones 1 y 2 en su conjunto propicien el desequilibrio del sistema. Este desequilibrio se establece en función

de la convergencia del modelo, tomando en consideración las limitantes físicas de estabilidad que existan en el método numérico que se decida usar.

4.4.4. Procedimientos para simulación de la falla por subpresión.

Como se ha mencionado en la literatura, el modelado numérico de la falla por subpresión no se ha sido tratado a fondo y los lineamientos para su modelización son escasos. Generalmente en los textos en los que se hace alusión a la falla, se enfatiza en un análisis numérico de flujo transitorio para evaluar las acciones de bombeo del estrato permeable previo y durante la excavación. Por lo tanto, para modelizar la falla por subpresión, en este trabajo se contemplan tres procedimientos que intentan inducir el mecanismo de falla por subpresión: 1) El método de reducción de resistencia, 2) La reducción de carga del lodo, y 3) La presurización del estrato permeable.

4.4.4.1. Procedimiento de reducción de resistencia

El primer procedimiento corresponde al método de reducción de resistencia (Griffiths and Lane 1999). En él, los parámetros de resistencia se reducen iterativamente, mediante un factor de reducción de resistencia global, hasta alcanzar la condición de falla, generalmente identificada por la falta de convergencia del problema de contorno. El inverso del factor de reducción se interpreta como un factor de seguridad. Este método es el más extendido en análisis de estabilidad de problemas geotécnicos empleado en el método de elementos finitos (Itasca Consulting Group Inc 2016).

4.4.4.2. Carga del lodo en el fondo de la lumbrera.

El segundo procedimiento corresponde a la disminución de la carga del lodo en el fondo y las paredes de la lumbrera. Esta carga está determinada por la variación de la densidad y altura del lodo, variables susceptibles a modificaciones resultantes de procesos como: evaporación, filtración, no disponibilidad de suministro, fracturamiento hidráulico y presencia de cavidades. La modificación de estas variables es representativa de los posibles acontecimientos durante el proceso constructivo de una lumbrera, como se ha mencionado en trabajos de análisis de sensibilidad de fallas en lumbreras (Vargas Moreno et al. 2018) (Aguilar Téllez and Acevedo Valle 2018).

La modificación de la carga de lodo se puede simular a través de varios caminos, entre los que se encuentran: la modificación de la densidad con altura constante, la modificación de la altura con densidad constante, y una variación de altura y densidad simultánea. No obstante, los tres caminos llevan a la misma modificación en el fondo de la lumbrera, lugar de interés del análisis. Acorde a lo anterior basta con elegir una opción. Para esta simulación se optó por la variación de la altura con densidad constante, siendo la opción más simple en su implementación y sin restricciones de uso. La simulación de este procedimiento parte de la etapa 4 y posteriormente se disminuye la altura del lodo en varias etapas hasta alcanzar la falla, como se observa en la Figura 4.13.

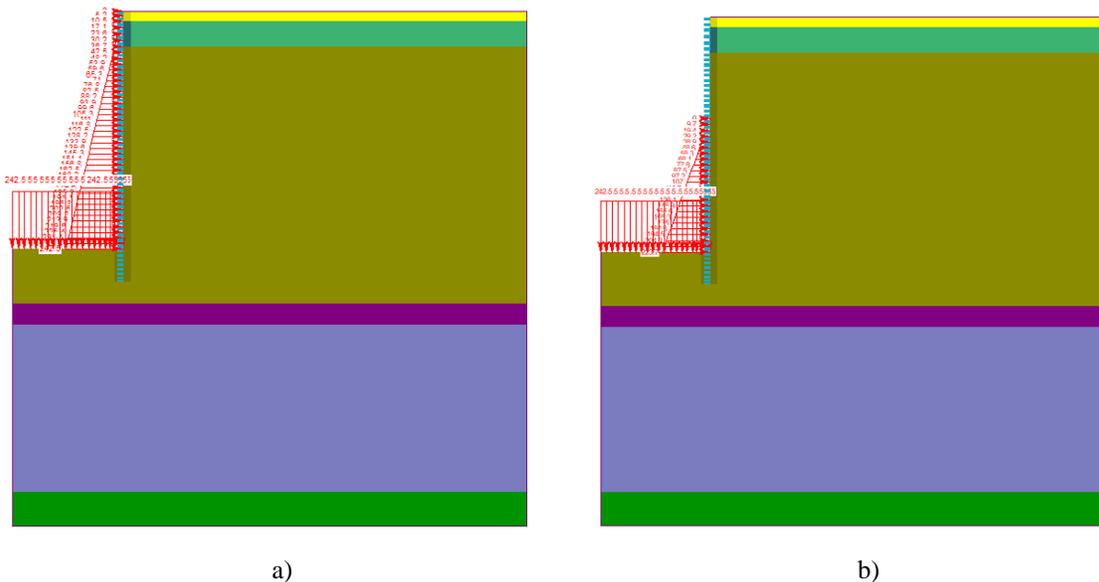


Figura 4.13. Variación de la altura del lodo a) etapa 4, b) etapa de falla

4.4.4.3. Presurización del estrato permeable.

El tercer procedimiento corresponde al incremento de la presión de poro en el estrato permeable (presurización), este procedimiento se encuentra descrito en un artículo realizado previo a este trabajo (Montiel et al. 2018). En este procedimiento se incrementa uniformemente la presión de poro en cada una de las etapas subsiguientes a la etapa 4. En estratigrafías que poseen un acuífero estacionario o artesiano, la presurización presenta alta asertividad al simular la falla por subpresión, permitiendo visualizar el efecto de la presión de poro en la base de la lumbrera, y su distribución en el estrato permeable, reconociendo las implicaciones que tendría dicha presión en la zona de excavación y las repercusiones que puede tener la remoción del material en el centro de la lumbrera y su sustitución con lodo. De igual forma la presurización permite considerar las variaciones topológicas del estrato durante la simulación de la falla por subpresión, tales como geometría, espesor y trayectoria de la falla (Montiel et al. 2018).

La presurización se realizó en etapas, en cada etapa se incrementa 1 m de carga hidráulica en el estrato permeable, este incremento se reduce a 0.1 m conforme el modelo se aproxima a la falla. El aumento de carga hidráulica se realiza sin alterar el comportamiento hidrostático de las demás unidades geológicas. Este incremento de la carga hidráulica es representativo de un análisis de flujo desacoplado, que ignora la variación de la presión de poro causada por las deformaciones asociadas a la presurización. Si bien la condición desacoplada no resulta representativa del fenómeno, los trabajos de Pinyol (Pinyol et al. 2008) han mostrado que esta evaluación proporciona las presiones de poro máximas que se pueden generar en un análisis, obteniendo así los resultados más desfavorables. El perfil de la presión de poro en

el modelo en la etapa 4 y en la etapa presurizada se observa en la Figura 4.14 a) y b) respectivamente.

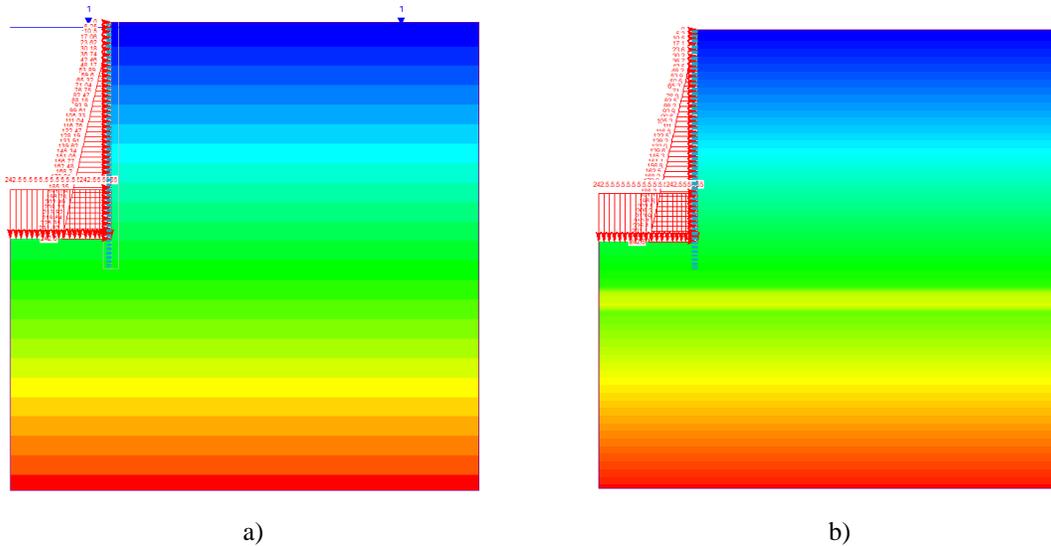


Figura 4.14. Perfil de presión de poro, a) Etapa 4, b) Etapa presurizada

4.4.4.4. *Representatividad de los procedimientos para el caso de estudio.*

Para enmarcar los procedimientos planteados en el modelo geotécnico de la ciudad de México, se sabe que en la publicación del National Research Council (1995) titulada: “Abastecimiento de agua en la Ciudad de México: Mejorando las perspectivas de sostenibilidad”; la capa dura, UG3, en el siglo XIX dio origen a los primeros pozos artesianos al explotar por primera vez el agua del subsuelo. Sin embargo, se sabe que el bombeo de agua en la ciudad de México tiene efectos enormes en temas como consolidación y asentamientos, por lo cual existe baja probabilidad de la ocurrencia de una presión artesiana en la capa dura. Consecuentemente con lo anterior es importante mencionar que los procedimientos planteados no intentan reproducir situaciones reales que pudieran presentarse durante la construcción, sino que intentan inducir numéricamente la condición de falla por subpresión, con el fin de poder determinar qué tan lejos de la inestabilidad se encuentra el sistema mediante el cálculo de un factor de seguridad

4.4.5. **Criterio para la determinación de la falla.**

El método numérico de elementos finitos discretiza un sólido en un conjunto de elementos. Esta desratización y la evolución de los esfuerzos en el problema de contorno, trae consigo que la condición de falla pueda ser un fenómeno progresivo en el que no todos los elementos fallan al mismo tiempo. Lo anterior conlleva a que la falla abarque un rango, comprendido desde la cedencia del primer elemento del conjunto hasta el estado de falla final donde todos los elementos han fallado (Abramson et al. 2012). Como resultado de este amplio rango, se

han desarrollado criterios de determinación de falla en MEF. Entre los criterios más populares se encuentran:

El criterio de desplazamiento máximo, que establece una tolerancia límite para los desplazamientos en una determinada superficie. El criterio límite de esfuerzos de corte en la superficie de la falla potencial. El criterio de no convergencia de la solución, el cual, permite indicar el colapso de los elementos bajo la imposibilidad de las condiciones de carga (Zienkiewicz & Taylor, 1989) (Griffiths and Lane 1999). Estos criterios se han discutido para el análisis de estabilidad de taludes, no obstante, es posible implementarlos en otras configuraciones modeladas en MEF.

En las simulaciones realizadas en este trabajo, se ha empleado el criterio de no convergencia como un indicador adecuado de la falla. Esta no convergencia implica que el problema de contorno no puede encontrar una distribución de esfuerzos que satisfaga simultáneamente el equilibrio puntual de cada elemento bajo el criterio de falla de Mohr Coulomb y el equilibrio global. En las etapas en las que el problema de contorno no alcanza la convergencia, se dice que ha ocurrido la falla, la cual se encuentra acompañada por un aumento drástico de los desplazamientos.

Se debe tener en cuenta que en algunos modelos la no convergencia del problema de contorno se presenta como el resultado de una inconsistencia numérica y no de la ocurrencia de una falla. Con el fin de corroborar que, en el modelo empleado la no convergencia se produce por la presencia de una falla, se realizó un análisis del comportamiento de los desplazamientos con el incremento de carga hidráulica en el estrato permeable. Inicialmente se graficó el comportamiento de los desplazamientos máximos (ubicados en la sección de suelo inferior a la lumbrera) con el incremento de carga hidráulica (aplicado en el estrato permeable) para cada una de las etapas del modelo. Los resultados obtenidos se encuentran en la Figura 4.15.

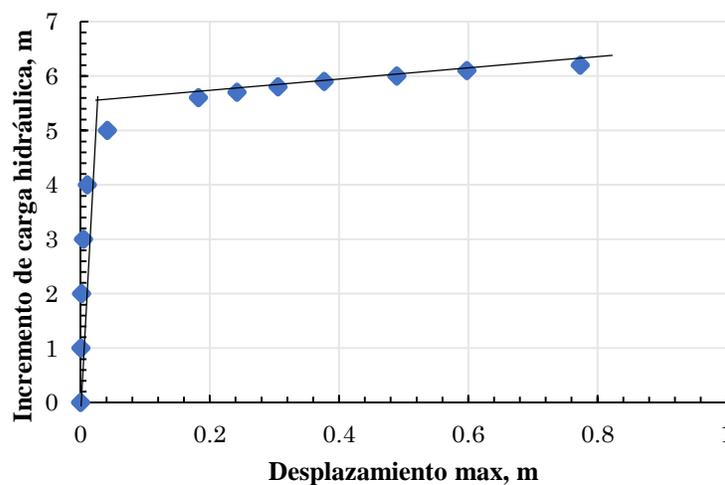


Figura 4.15. Incremento de carga hidráulica vs desplazamiento máximo.

La Figura 4.15 permite identificar el cambio de comportamiento elástico a plástico en un elemento de suelo. Este cambio de comportamiento para un elemento con un modelo constitutivo elastoplástico perfecto representa la falla de dicho elemento. Sin embargo, como se observa en la figura el elemento presenta etapas y desplazamientos posteriores al incremento de carga hidráulica correspondiente al cambio de comportamiento. Estas etapas adicionales se presentan debido a que el desequilibrio global energético no se alcanza con el cambio de comportamiento de un solo elemento. Acorde a lo anterior, en el modelo implementado, al momento de desequilibrio energético una proporción considerable de elementos deben presentar un comportamiento plástico. Los elementos en régimen plástico más alejados de los primeros elementos plastificados, exhibirán un número menor de etapas posteriores al cambio del comportamiento, como se observa en la Figura 4.16.

Teniendo en cuenta que, al momento de no convergencia del modelo, la sección de suelo en el que se presenta la falla exhibe un fenómeno progresivo de falla de los elementos, como se ha descrito anteriormente, y un excesivo desplazamientos de los elementos en etapas próximas a la no convergencia, se puede determinar que para este modelo la no convergencia se produce por la incapacidad del código de adicionar una fuerza que satisfaga el equilibrio energético global y no por una inconsistencia numérica.

4.4.6. Criterio de convergencia.

El criterio para establecer la convergencia en el MEF corresponde al criterio de fuerza y energía absoluta. En este, la convergencia de un problema de contorno requiere que se cumplan el criterio de energía y el criterio de fuerza de manera simultánea. Para comprender de mejor manera estos criterios, se empleará un ejemplo en el que se aplica una fuerza a un resorte con comportamiento no lineal, Figura 4.17. En el ejemplo se desea conocer el desplazamiento ΔU con la aplicación de la carga $P_{(n+1)}$. Para esto, a partir del incremento de carga y la rigidez del resorte se calcula un primer desplazamiento $\Delta U_{(1)}$. Con el nuevo estado de desplazamiento se encuentra la energía interna $F_{(1)}$. Si la diferencia entre el incremento de carga aplicado y la energía interna es muy grande, se procede a iterar hasta que este valor se reduzca o sea cero (Rocscience Inc 2019).

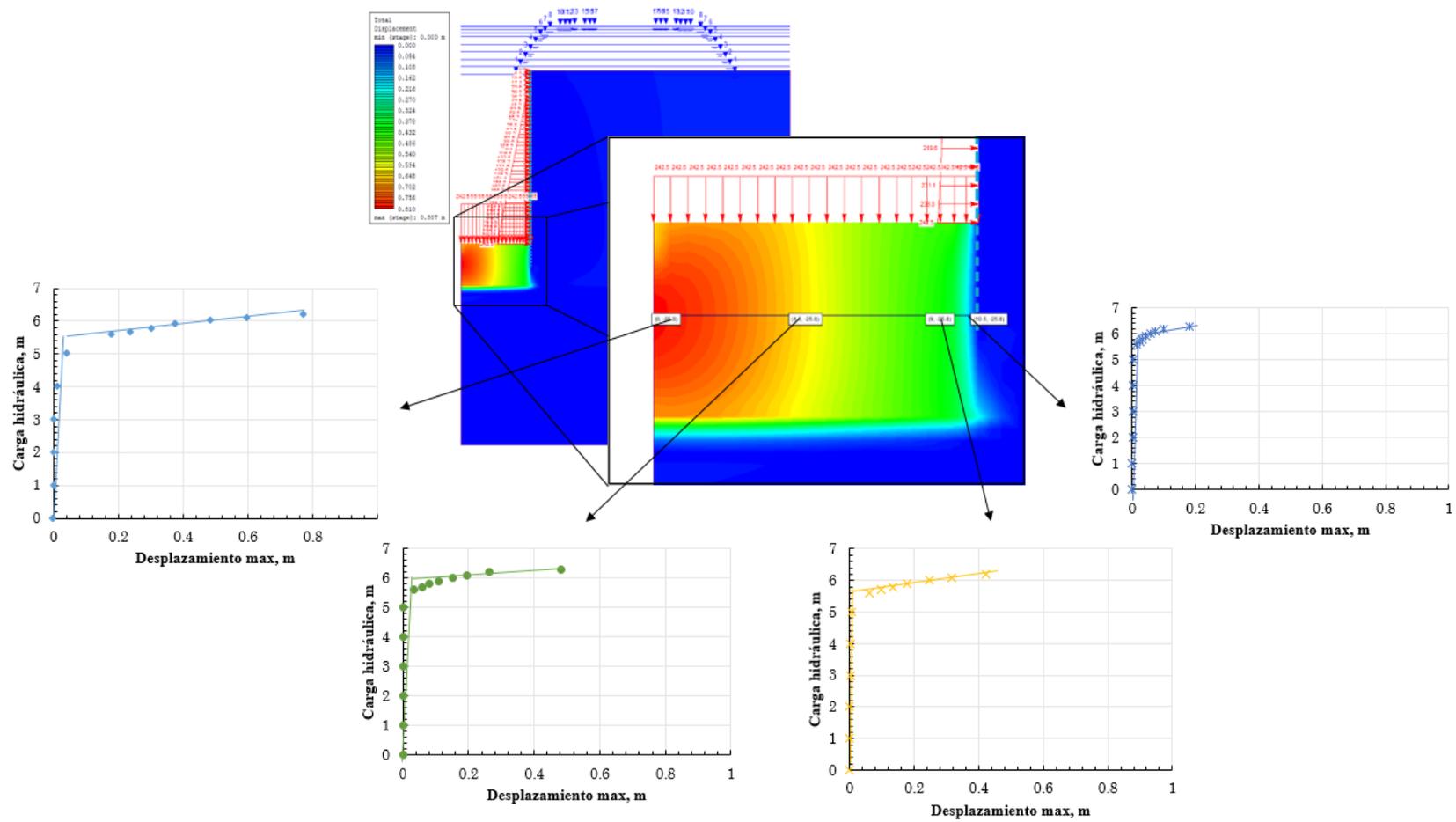


Figura 4.16. Incremento de carga hidráulica vs desplazamiento máximo, para varios puntos en el estrato impermeable.

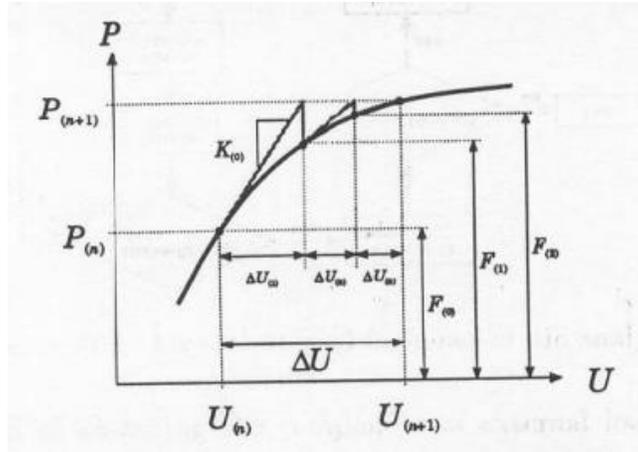


Figura 4.17. Respuesta de un resorte no lineal a cargas aplicadas (Rocscience Inc 2019).

Con base al ejemplo y para un caso sencillo, el criterio de fuerza se cumple cuando en un número determinado de iteraciones, el valor absoluto de la fracción de la diferencia entre la carga total aplicada y la energía interna calculada en el paso i , sobre la carga total, es menor a una tolerancia específica, Ecuación (20). El criterio de energía se cumple cuando en un número determinado de iteraciones, el valor absoluto de la fracción del desequilibrio de energía en el paso i sobre el desequilibrio de la energía inicial (primera iteración), es menor a una tolerancia específica (Ecuación 21).

$$\left\| \frac{P_{(n)} - F_{(i)}}{P_{(n)}} \right\| < (\text{tolerancia}) \quad (20)$$

$$\left\| \frac{\Delta U_{(i)}^T (P_{(n)} - F_{(i)})}{\Delta U_{(0)}^T (P_{(n)} - F_{(0)})} \right\| < (\text{tolerancia}) \quad (21)$$

Donde $P_{(n)}$ es la carga aplicada, $F_{(i)}$ son las fuerzas internas, ΔU es el cambio de desplazamientos, y el subíndice 0 representa el valor inicial, i el incremento en cada paso y n el incremento total de la carga inicial.

4.4.7. Influencia del valor de la tolerancia.

En el caso de estudio se evaluó la influencia de la tolerancia en los análisis de convergencia, específicamente en el análisis de presurización del estrato. Para evaluar esto, se eligió un análisis que posteriormente se presentará, en el cual, se comparó el aumento de la carga hidráulica necesario para la presencia de la falla con la variación del espesor del estrato impermeable, en cada una de las simulaciones realizadas se asignó una tolerancia de 0.01, 0.001 y 0.0001, Figura 4.18. Los resultados muestran que conforme se reduce el valor de la tolerancia, las variaciones entre los incrementos de la carga hidráulica necesaria para la presencia de la falla, con respecto a la tolerancia anterior, disminuyen. Por otro lado, al aumentar la tolerancia se presenta un incremento considerable en el tiempo de la simulación. Debido a la convergencia de los resultados con la disminución de la carga y del tiempo de

cálculo, la tolerancia empleada para los análisis fue 0.001, correspondiente a 0.1% de la energía disipada por el aumento de la aplicación de la fuerza total, y cuyo valor es el recomendado para análisis de estabilidad.

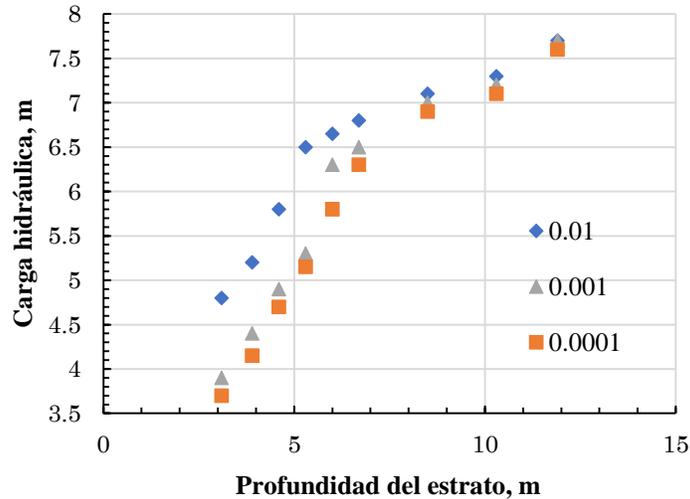


Figura 4.18. Evaluación de la incidencia en la tolerancia.

Como se mencionó anteriormente para alcanzar la convergencia, los criterios de energía y fuerza deben ser menores a la tolerancia especificada en un número determinado de iteraciones. Con lo cual, la convergencia también depende del número de iteraciones. Para este análisis se estableció un número de 500 iteraciones, número recomendado en la literatura. No obstante, se realizaron análisis con mayor número de iteraciones (1000 y 2000), obteniendo una variación insignificante con los resultados de la Figura 4.18.

5. RESULTADOS DE LOS PROCEDIMIENTOS.

5.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA.

El mecanismo de falla obtenido mediante el procedimiento de reducción de resistencia, sin contemplar el efecto del peso del muro, se muestra en la Figura 5.1, en términos de los desplazamientos totales. Es evidente que el mecanismo de falla obtenido no corresponde al mecanismo de falla por subpresión, sino al mecanismo de falla de fondo por cortante. El factor de seguridad para esta condición es de 27.13.

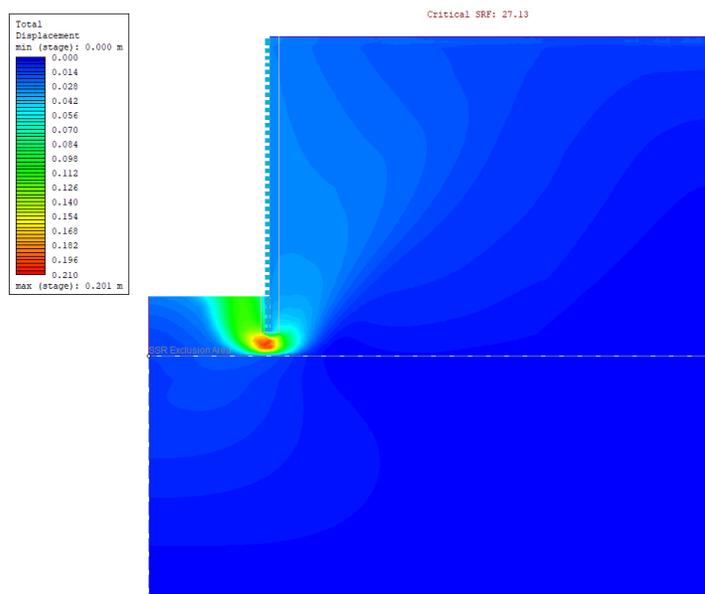


Figura 5.1. Desplazamientos totales resultantes de la simulación de reducción de resistencia.

5.1.1. Discusión del procedimiento de reducción de resistencia.

Cabe resaltar, que la metodología de reducción de parámetros de resistencia se ha desarrollado para el análisis de taludes, en los cuales, ha presentado una acogida unánime en el cálculo de F_s . De igual forma, esta metodología aplicada en taludes ha demostrado equivalencia con el análisis de equilibrio límite. Por otro lado, la aplicación de esta metodología en obras subterráneas aún se encuentra en discusión con innumerables opiniones a favor y en contra, salvo en algunos casos como la falla de frente en túneles, en los cuales si se tiene un consenso a favor. Dentro de los programas de cómputo enfocados al modelado geotécnico, se menciona la aplicación de este procedimiento como una alternativa de gran utilidad en la evaluación de estabilidad de obras subterráneas. Sin embargo, en la mayoría los programas no se hace alusión a la implementación del procedimiento en ejemplos de obras subterráneas, ni al análisis de sus resultados.

Por otro lado, el DR Evert Hoek menciona, no ver futuro en la aplicación del procedimiento de reducción de resistencia en el diseño de túneles y obras subterráneas en rocas, esto se debe a que en la practicidad de los túneles se requiere que el diseñador comience con una serie de preguntas de sentido común, las que determinan los métodos que mejor se adaptan para proporcionar una solución confiable y práctica. Dentro de estas preguntas se incluyen cuál es: la naturaleza del terreno, el probable mecanismo de falla, el método y secuencia de excavación, el método de soporte, la influencia del agua, entre otras. Estas interrogantes no son abordadas en la mayoría de los casos en los que se aplica el procedimiento de reducción de resistencia, con lo cual el Fs que ofrece este procedimiento es un numero interesante que puede tener o no un significado físico, pero que de hecho, no responde a ninguna de las preguntas descritas anteriormente (Rocscience inc. 2019).

Al implementar la metodología de reducción de resistencia a los análisis de equilibrio límite, partiendo del equilibrio de fuerzas que actúan en la falla, se observa que la reducción de los parámetros de resistencia solo afecta a una fracción de las fuerzas resistentes, correspondiente a la resistencia al corte no drenado en la superficie de falla. Esta afectación parcial a las fuerzas resistentes trae consigo la necesidad de grandes reducciones de parámetros resistentes para alcanzar el desequilibrio en el cual el modelo falle. Las grandes reducciones se ven reflejadas en el elevado Fs. Lo anterior concuerda con la baja incidencia de la resistencia al corte no drenado en el Fs del análisis de sensibilidad realizado.

5.2. RESULTADOS DE LA DISMINUCIÓN DE LA FUERZA DEL LODO EN EL FONDO DE LA LUMBRERA.

Al ejecutar el procedimiento de disminución de carga sobre el fondo de la lumbrera, los elementos del suelo contiguos al fondo experimentan esfuerzos de tensión. La tensión desarrollada propicia plastificación en estos elementos, ocasionando la no convergencia del modelo. Esta situación no permite alcanzar el mecanismo de falla cilíndrico propuesto a partir del análisis de equilibrio límite. Los resultados que se obtuvieron de la disminución de la carga del lodo se observan en la Figura 5.2, en términos de los desplazamientos totales. La disminución de carga para la no convergencia es 34.9 kPa, que bajo un peso específico de lodo de 10.5 kN/m^3 , corresponde a 3.3 m de altura del lodo. La determinación de la no convergencia de la simulación a causa de la plastificación de los elementos del suelo contiguos al fondo, se evidencia en la evolución de la plastificación a través de las diferentes etapas de la simulación, que se muestra en el Anexo 4 A).

Para simular el mecanismo de falla cilíndrico empleando este procedimiento, se procedió a incrementar la resistencia a la tensión del estrato impermeable hasta que los elementos cercanos al fondo de la lumbrera no plastifiquen, y por consiguiente no sean los causantes de la no convergencia del modelo. Con la resistencia a la tensión mayor a los esfuerzos de tensión desarrollados, se obtiene la plastificación por tensión en el estrato permeable y la plastificación por cortante en las paredes de la sección cilindro de suelo, como se muestra en la Figura 5.3.

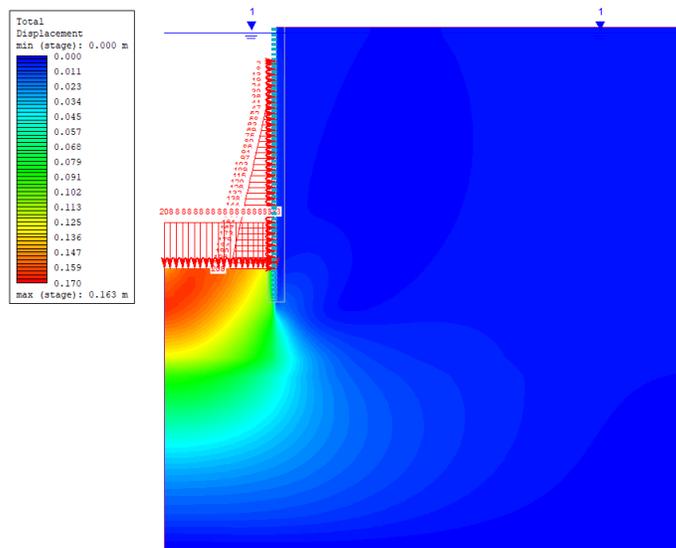


Figura 5.2. Desplazamientos totales resultantes de la simulación de disminución de carga de lodo.

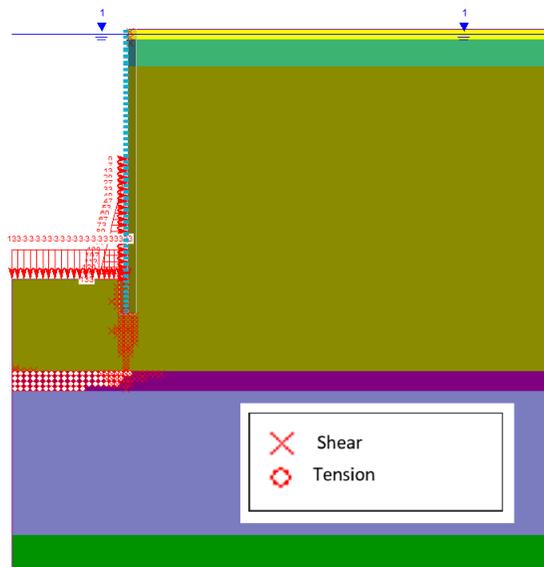


Figura 5.3. Elementos plastificados por tensión y por cortante.

Los desplazamientos totales (a partir de la tapa 4) que describen el mecanismo de falla se muestran en la Figura 5.4. La disminución de carga necesaria para la presencia de la falla es 81.85 kPa, que bajo un peso específico de lodo de 10.5 kN/m^3 corresponde a 7.8 m de altura del lodo. El factor de seguridad para este procedimiento, planteado como la relación entre la carga del lodo inicial sobre la carga de lodo en la falla, es de 1.51, valor que difiere en un 25% respecto al calculado con la ecuación analítica, que es 1.21. Este valor de F_s analítico considera la influencia de la profundidad de la pata del muro, como se presenta en el artículo de Tamez (Tamez González et al. 2007). La evolución de la plastificación a través de las diferentes etapas de simulación se muestra en el Anexo 4 B).

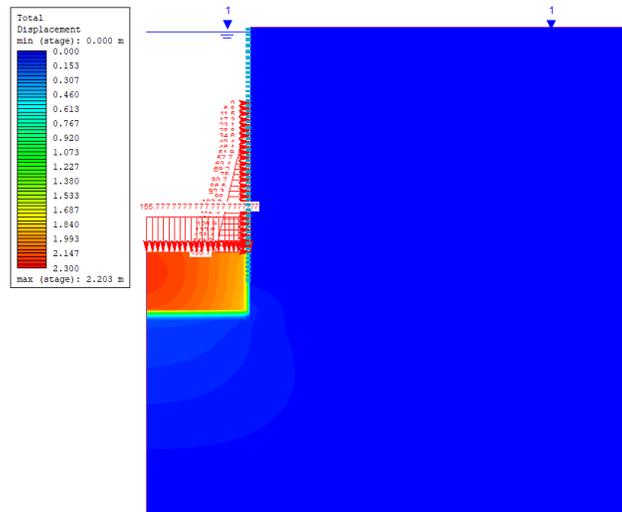


Figura 5.4. Desplazamientos totales resultantes de la simulación de disminución de carga del lodo, con incremento de tensión.

Al ejecutar este procedimiento con la adición de la resistencia a la tensión se observa el cumplimiento de las condiciones para el desarrollo del mecanismo de falla cilíndrico, esto se describe a continuación: La condición 1 ocurre al presentarse una modificación del estado de esfuerzos en estrato permeable, que conlleva a una plastificación por tensión de los elementos de este estrato, como se observa a en la Figura 5.5 a). Atado a lo anterior el esfuerzo σ'_3 en el estrato permeable es igual a cero, como se observa en la Figura 5.5 b). La modificación del esfuerzo σ'_3 se produce por la reducción de la carga de lodo en el fondo de la lumbrera. Cabe resaltar que el esfuerzo σ'_3 puede y de hecho es menor a cero en la sección de suelo del estrato impermeable, a causa del incremento de la resistencia a la tensión de este material.

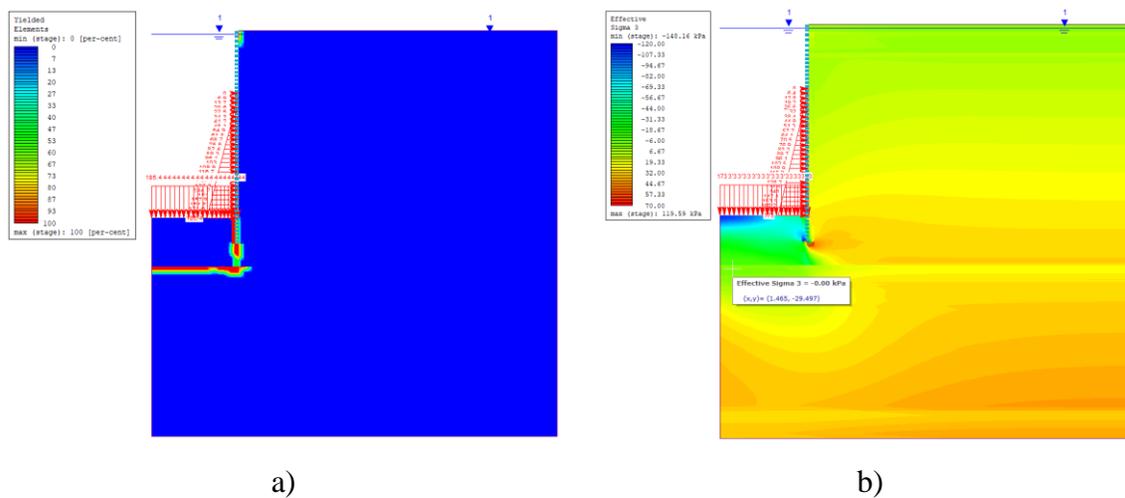


Figura 5.5. Resultados de la disminución de carga en la etapa de falla. a) Porcentaje de plastificación de los elementos. b) Distribución de σ'_3 .

La condición 2. Se lleva a cabo al momento que los esfuerzos desviadores alcanzan el valor de la resistencia no drenada y se plastifica por cortante los elementos entre el suelo impermeable y la pared de la excavación, esto se observa en la secuencia de plastificación presente en el Anexo 4 B) y en la Figura 5.3. En los distintos análisis se llegó a constatar que inmediatamente se producían las dos condiciones para la falla la simulación entraba en desequilibrio y no convergía el modelo. Esta no convergencia se ve acompañada de un gran incremento de los desplazamientos en las últimas etapas de la simulación, como se presenta en Figura 5.6.

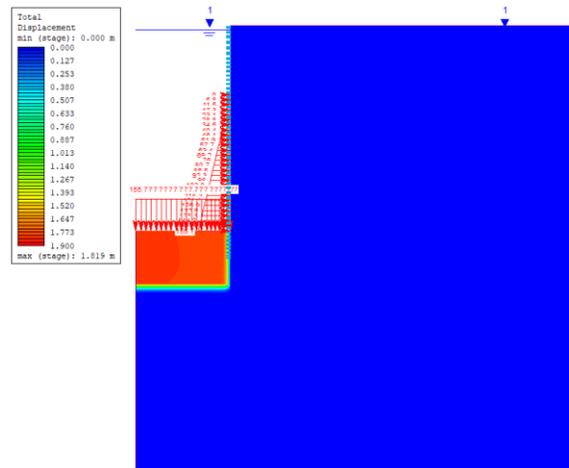


Figura 5.6. Desplazamientos incrementales en la etapa de falla por disminución de carga del lodo.

Adicionalmente se graficó las deformaciones cortantes máximas para la etapa 4 y la etapa de falla, como se observa en la Figura 5.7 a) y b) respectivamente. Estas deformaciones máximas de corte permiten bosquejar la superficie de falla de un determinado problema de contorno.

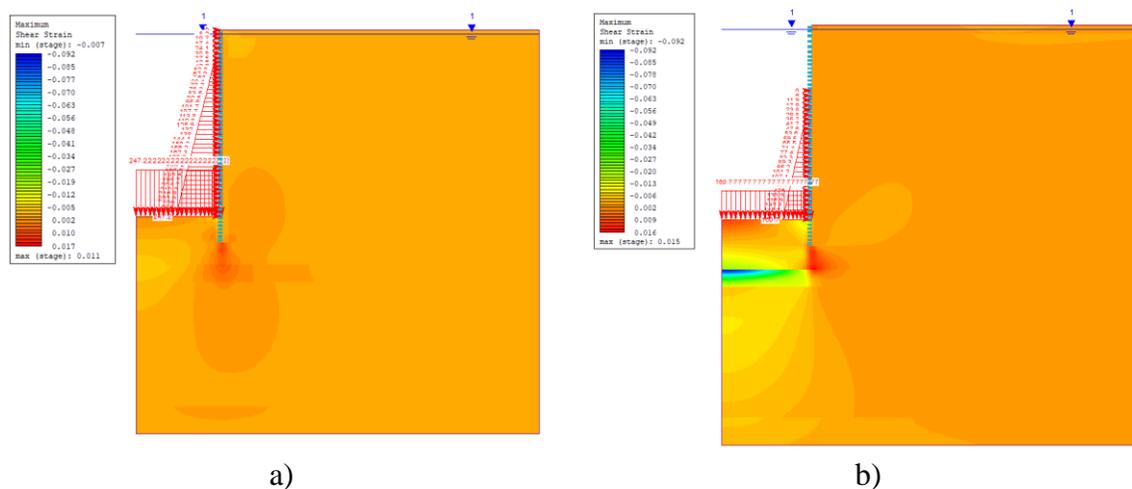


Figura 5.7. Deformación cortante máxima de la disminución de carga de lodo, a) etapa 4. b) etapa de falla.

Al comparar las gráficas a) y b) de la Figura 5.7, se observa que al acercarse a la falla por subpresión, las deformaciones de corte aumentan en el fondo de la sección cilíndrica y las paredes de esta, siendo el aumento de las deformaciones de corte en el fondo mayor que el experimentado en las paredes. Se debe mencionar, que las deformaciones de corte en el estrato permeable presentan valores negativos, siendo esto resultado del sistema de ejes coordenados empleado en el programa de cómputo.

5.3. RESULTADOS DE LA PRESURIZACIÓN DEL ESTRATO PERMEABLE.

El mecanismo de falla obtenido mediante el procedimiento de presurización, se muestra en la Figura 5.8, en términos de los desplazamientos totales (Desplazamientos a partir de la etapa 4). Este mecanismo está acorde con el mecanismo de falla cilíndrico, descrito en el análisis de equilibrio límite. El incremento de carga hidráulica necesario para la presencia de la falla por subpresión es de 6.3 m. El factor de seguridad para este procedimiento, planteado como la relación entre la carga hidráulica en la etapa de falla sobre la carga hidráulica inicial, es de 1.22, valor que difiere en un 0.8% del calculado con la ecuación analítica, 1.21 El valor de F_s analítico considera la influencia de la profundidad de la pata del muro, como se presenta en el artículo de Tamez (Tamez González et al. 2007).

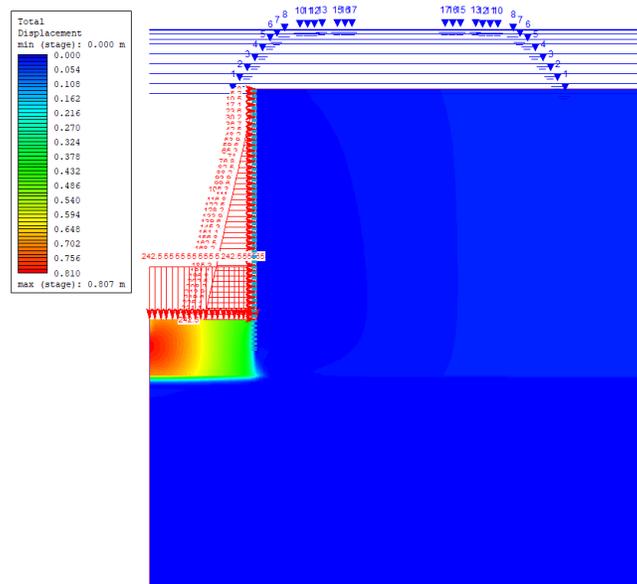


Figura 5.8. Desplazamientos totales resultantes de la simulación de por presurización.

Al ejecutar este procedimiento se observa que, los requerimientos para el desarrollo del mecanismo de falla descrito del análisis de equilibrio límite se cumplen, como se describe a continuación: La condición 1 ocurre al presentarse una modificación del estado de esfuerzos en el estrato permeable, que conlleva a una plastificación por tensión de los elementos de este estrato, como se observa a en la Figura 5.9 a). Atado a lo anterior el esfuerzo σ'_3 en el estrato permeable es igual a cero, como se observa en la Figura 5.9 b). La modificación del

esfuerzo σ'_3 se produce por la presurización del estrato permeable. Esta disminución se explica empleando el principio de esfuerzos efectivos de Terzaghi, en el que, para un esfuerzo total constante, un incremento de presión de poro trae consigo la reducción de los esfuerzos efectivos. A diferencia del procedimiento de disminución de carga de lodo, en este procedimientos en la sección de suelo impermeable el valor de σ'_3 es mayor a 0 y la plastificación del estrato permeable se produce en todo el estrato y no solo en el área inferior a la lumbrera.

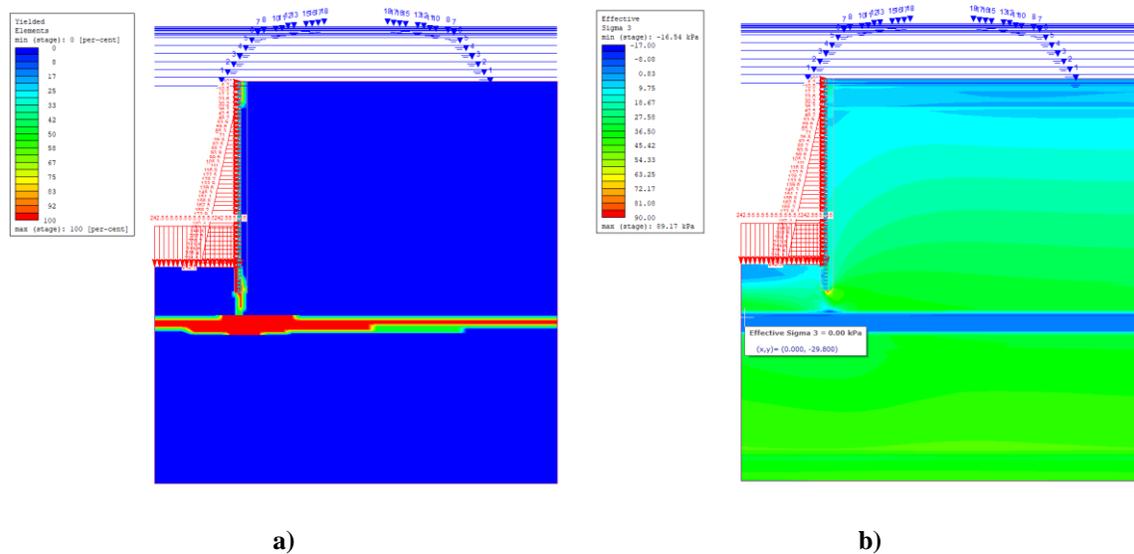


Figura 5.9. Resultados de la presurización del estrato en la etapa de falla. a) Porcentaje de plastificación de los elementos. b) Distribución de σ'_3 .

La condición 2. Se lleva a cabo en el momento que los esfuerzos desviadores alcanzan el valor de la resistencia no drenada y se plastifica por cortante los elementos entre el suelo impermeable y la pared de la excavación, como se observa en la secuencia de plastificación presente en el Anexo 4 C). La modificación del estado de esfuerzos, que conduce a un esfuerzo desviador igual a la superficie de fluencia, corresponde a la aplicación de una carga externa a la sección de suelo impermeable. Esta carga es consecuencia de la presurización del estrato permeable subyacente. Esta no convergencia se ve igualmente acompañada del incremento de los desplazamientos en las últimas etapas de la simulación, como se presenta en Figura 5.10.

Adicionalmente se graficó las deformaciones cortantes máximas para la etapa 4 y la etapa de falla, como se observa en la Figura 5.11 a) y b) respectivamente. Estas deformaciones máximas de corte permiten bosquejar la superficie de falla de un determinado problema de contorno. Al comparar las gráficas a y b de la Figura 5.11, se tiene que al acercarse a la falla por subpresión, las deformaciones de corte aumentan en el fondo de la sección cilíndrica y las paredes de esta, siendo el aumento de las deformaciones de corte en el fondo mayor que el experimentado en las paredes.

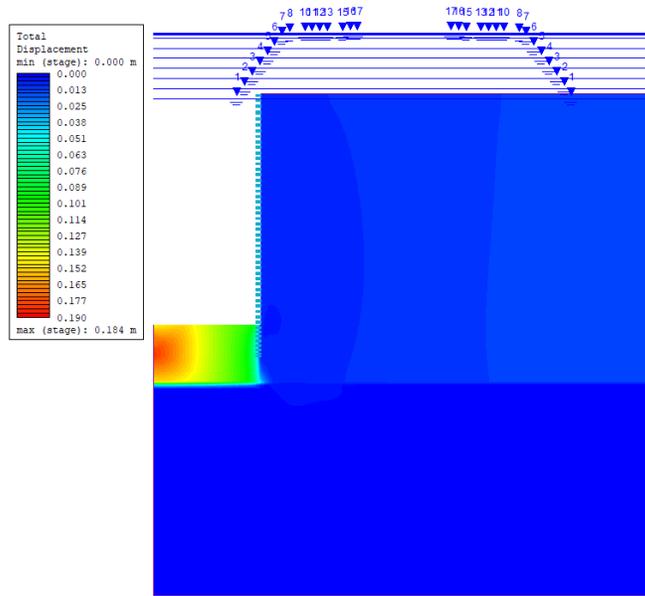


Figura 5.10. Desplazamientos incrementales en las etapas de falla por presurización del estrato.

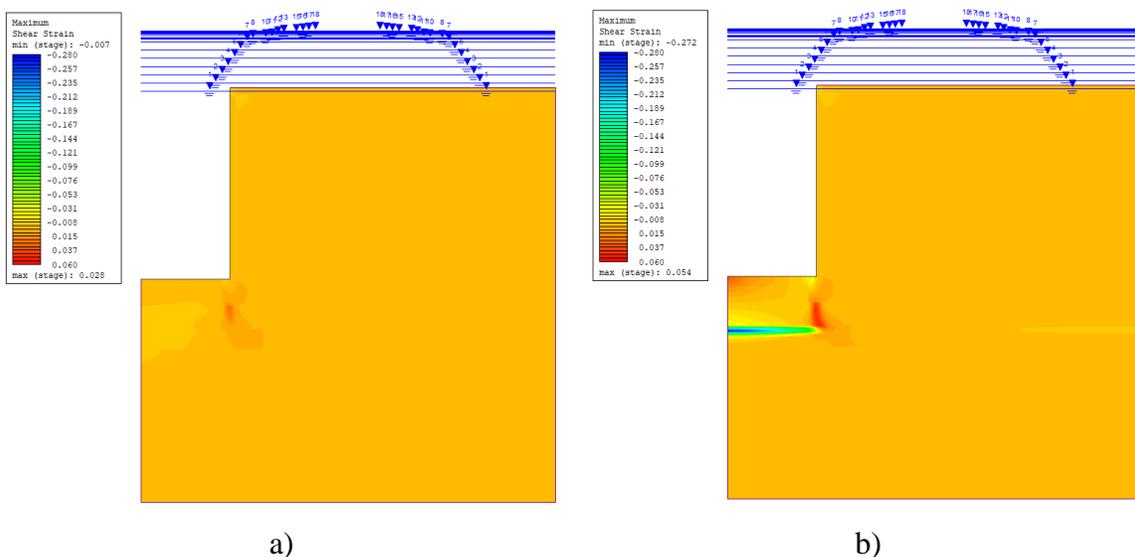


Figura 5.11. Deformación cortante máxima de la simulación por presurización, a) etapa 4. B) etapa de falla.

5.3.1. Inclusión de una fuerza en el estrato permeable

Un procedimiento análogo a la presurización que propicie la presencia del mecanismo de falla por subpresión, es la inclusión de una fuerza en el estrato permeable en dirección de las fuerzas actuantes. Este procedimiento se llevó a cabo con un incremento de la fuerza en etapas, en las que, progresivamente se aumentó la magnitud de esta. El número de etapas y la magnitud de fuerza es equivalente al empleado en el análisis de presurización, esto último

con la finalidad de poseer un punto de comparación de estas dos simulaciones. El modelo con inclusión de una fuerza se presenta en la Figura 5.12.

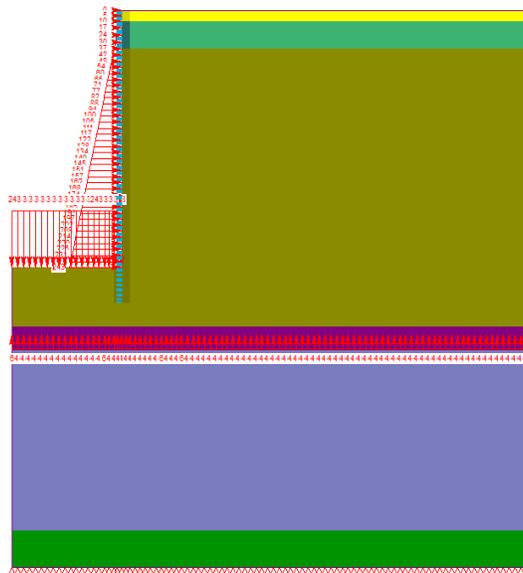


Figura 5.12. Modelo para la falla de Subpresión con la implementación de una fuerza.

El mecanismo de falla obtenido mediante el procedimiento de la inclusión de fuerza, se presenta en la Figura 5.13 a) en términos de los desplazamientos totales (desplazamientos a partir de la etapa 4). El incremento de carga necesaria para la presencia de la falla por subpresión es 64.7 kPa, correspondientes a 6.6 m de carga hidráulica. Las deformaciones de corte máximas obtenidas con este procedimiento se presentan en la Figura 5.13 b).

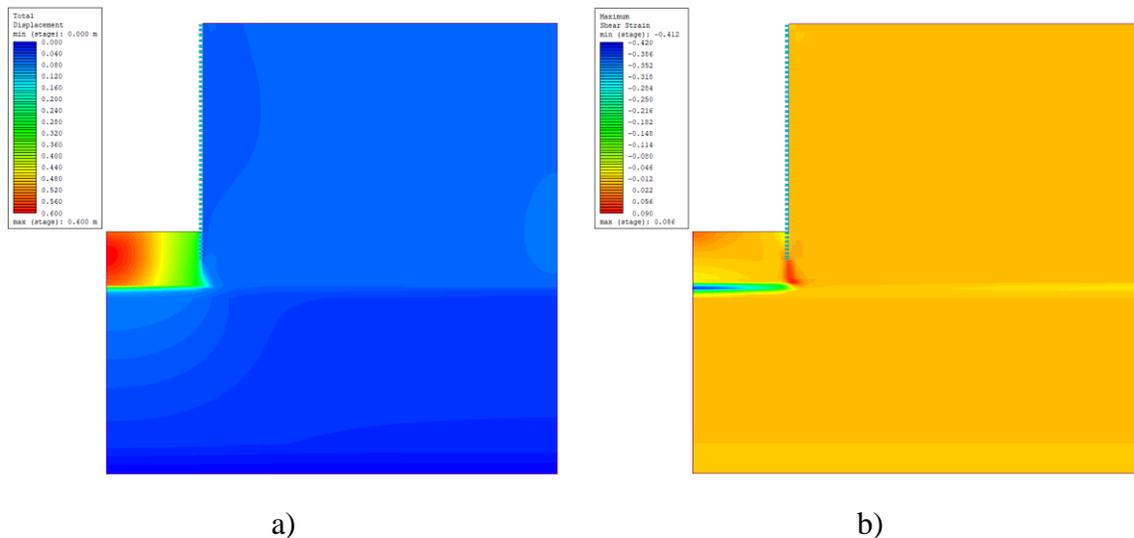


Figura 5.13. Resultados de los análisis de incremento de carga en la etapa de falla.

Al comparar los resultados del procedimiento de incremento de fuerza y de presurización del estrato se tiene que, el desequilibrio para la ocurrencia de la falla, en términos de incremento de carga hidráulica, difiere en 0.3 m entre los dos procedimientos, dando una postura conservadora al procedimiento de presurización. La diferencia registrada entre los dos procedimientos no es representativa con respecto al valor total del incremento de carga. Adicionalmente, al comparar los resultados de las deformaciones de corte máximas se observa que en el procedimiento de incremento de fuerza la UG5 presenta deformaciones de corte, las cuales no aparecen en el análisis de presurización.

De la comparación de estos dos procedimientos se concluye que es preferible implementar el procedimiento de presurización del estrato permeable. Esta elección se basa en los resultados conservadores de la presurización y el comportamiento distante del esperado para el desarrollo del mecanismo de falla presente en el procedimiento de inclusión de la fuerza, que involucra deformaciones de corte y desplazamientos incipientes en locaciones no debidas.

5.4. REVISIÓN LOS DE LOS PROCEDIMIENTOS.

A partir de los resultados obtenidos en los procedimientos analizados para la simulación de la falla por subpresión, se llega a la conclusión que el procedimiento que mejor representa el mecanismo de falla (planteado a partir del análisis de equilibrio limite) y que permite establecer un factor de seguridad coherente, es el procedimiento de presurización del estrato permeable. Los motivos que respaldan esta conclusión se presentan a continuación:

- La ejecución del procedimiento de reducción de resistencia da como resultado el mecanismo de falla de fondo por cortante.
- La ejecución del procedimiento de disminución de carga de lodo no permite desarrollar el mecanismo de falla cilíndrico. Por lo cual, para reproducir el mecanismo de falla por subpresión se requiere la adición de la resistencia a la tensión del suelo. Esta adición resulta poco representativa de la realidad debido a que los suelos poseen baja resistencia a la tensión.
- La ejecución del procedimiento de presurización del estrato permeable, permite simular de manera eficiente y práctica el mecanismo de falla. Adicionalmente, el factor de seguridad que se obtiene a partir de este procedimiento presenta un alto grado de representatividad, esto se debe a que las modificaciones realizadas al balance general del sistema, correspondientes a la variación de la carga hidráulica, alteran todas las fuerzas actuantes sobre el equilibrio.

Es de importancia resaltar que en las anteriores afirmaciones: (1) El procedimiento de disminución de carga representa, con base en la literatura, el acontecimiento de mayor riesgo para la presencia del mecanismo de falla, por lo cual, resulta paradójico que al representar la secuencia de este procedimiento en MEF se tenga que realizar adecuaciones para que el mecanismo de subpresión se desarrolle. Una posible justificación del comportamiento encontrado puede ser la no contemplación de la resistencia a la tensión en los análisis de

equilibrio límite. (2) El procedimiento de presurización, permite representar el mecanismo de falla. Sin embargo, este mecanismo de falla se desarrolla como resultado del comportamiento hidrogeológico del estrato permeable, el cual debe ser estacionario o artesiano, de no tener esta condición, el mecanismo de falla cilíndrico no se desarrollaría.

Comentando con mi asesor principal de tesis sobre los valores necesario para que se produzca la falla en el caso de estudio, que se obtuvieron a través del análisis numérico, él mencionó que “Teniendo en cuenta que la probabilidad de alcanzar el desequilibrio que propicie la falla por subpresión, excede la praxis del procedimiento constructivo de una lumbrera, el cumplimiento del valor mínimo del F_s necesario para estar de lado seguro es injustificado, requiriendo la evaluación para cada análisis de la probabilidad de la variación de los factores detonantes de esta falla”

5.5. VARIACIÓN DEL ESPESOR DEL ESTRATO IMPERMEABLE.

Una de las variables de gran envergadura para el desarrollo del mecanismo de falla es el espesor del suelo impermeable. Este espesor se localiza entre el fondo de la excavación de la lumbrera y el límite superior del estrato permeable. El cambio del espesor modifica las fuerzas resistentes, tanto en el peso del suelo, como en el área sobre la cual actúa la resistencia al corte no drenado. Inicialmente se contempló la modificación de esta variable como un procedimiento para inducir el mecanismo de falla por subpresión. Sin embargo, después de varias simulaciones se identificó que, debido al perfil hidrostático del modelo el desequilibrio generado por esta variable no es suficiente para inducir el mecanismo de falla. Como resultado de esto se procedió a evaluar la influencia del espesor del estrato en la magnitud del desequilibrio necesario para el mecanismo de falla en los procedimientos analizados previamente, esto se describe a continuación:

Al ejecutar el procedimiento de reducción de resistencia se encontró que, indiferente del espesor del estrato el mecanismo de falla obtenido seguía correspondiendo al mecanismo de falla de fondo por cortante. Al ejecutar el procedimiento de reducción de carga de lodo se encontró que, variando el espesor del estrato, se continuaba presentando la plastificación en los elementos contiguos al fondo de la lumbrera. Al ejecutar el procedimiento de presurización se encontró que existe una influencia en el aumento de la carga hidráulica necesaria para el desarrollo del mecanismo de falla. Las modificaciones pertinentes para la evaluación del espesor del estrato en el procedimiento de presurización se presentan a continuación.

En los modelos con modificación del estrato impermeable, se mantuvo la profundidad de la excavación de la lumbrera constante y se varió la profundidad del estrato permeable, con la finalidad de no alterar la configuración de la lumbrera y tener un punto de comparación con los análisis precedentes. Para este caso la variación del grosor del estrato impermeable puede representar la variación de la profundidad del estrato permeable. Las modificaciones realizadas al modelo de la Figura 4.10, se encuentran en el Anexo 5 A). Los resultados del

aumento de carga hidráulica necesaria para que se produzca la falla acorde al cambio del espesor del estrato, se presentan en la Figura 5.14.

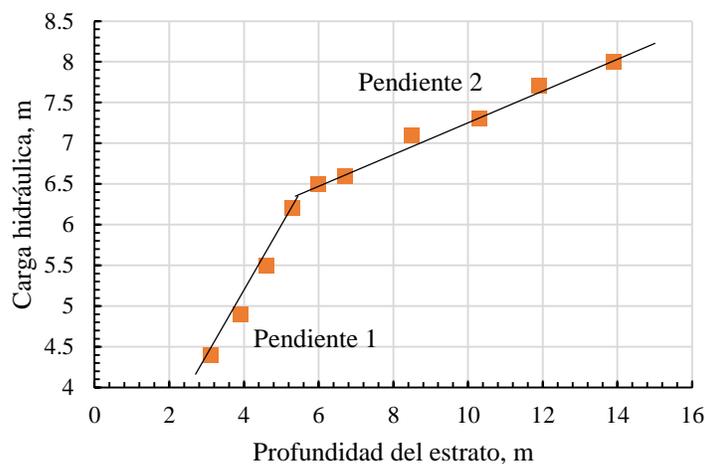


Figura 5.14. Resultados del incremento de carga hidráulica para los modelos con modificaciones del espesor del estrato impermeable.

En la Figura 5.14, se observa una proporcionalidad entre el aumento de la carga hidráulica necesaria para la falla y el aumento de la profundidad del estrato. La proporcionalidad encontrada está acorde a lo esperado, donde el aumento del espesor del estrato incrementa las fuerzas resistentes. El comportamiento proporcional de los resultados exhibe 2 pendientes, una para espesores bajos y una para espesores altos, con una frontera aproximada en 5.8 m. Al analizar los resultados se llegó a la conclusión, en la cual, los modelos encontrados dentro de cada una de estas pendientes presentan comportamientos globales similares. Estos comportamientos se describen a continuación:

En los modelos dentro de la pendiente 1 se encontró que, todas las simulaciones realizadas exhiben un mecanismo de falla similar al obtenido para el caso de estudio y se cumplen las condiciones estipuladas para el desarrollo del mecanismo de falla por subpresión. Además, se encontró que en las etapas cercanas a la falla el estrato impermeable presenta elementos plastificados, los cuales, incrementan en porcentaje conforme se reduce el espesor del estrato, un ejemplo de esto se observa en el Anexo 4 C).

En los modelos dentro de la pendiente 2 se encontró que la condición 2 para el mecanismo de falla por subpresión no se cumple. Para evidenciar estos incumplimientos se tomó como ejemplo un modelo dentro de la pendiente 2, modelo con espesor de 11.9 m. En este modelo el incumplimiento de la condición 2, se evidencia en la secuencia de plastificación, presente en el Anexo 4 D), en la cual, la mayoría de los elementos cercanos a la pared del cilindro no plastifican por compresión. De igual forma, este incumplimiento se evidencia al analizar el incremento de las deformaciones de corte máximas. Estas deformaciones de corte se presentan en la Figura 5.15, deformaciones incrementales entre la etapa 4 y la etapa de falla.

En esta figura se observa una variación marcada de las deformaciones en el estrato permeable bajo el área de la lumbrera, no obstante, no se presenta una variación significativa en los elementos contiguos a las paredes del cilindro.

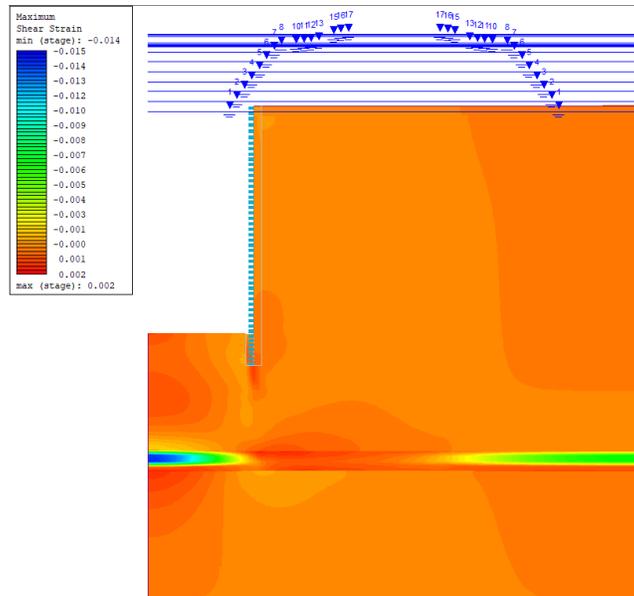


Figura 5.15. Deformaciones máximas de corte incrementales a partir de la etapa 4, hasta la etapa de falla, para un espesor de 11.9 m.

Al analizar el incremento de desplazamientos totales en la etapa de falla se encontró que, los desplazamientos se concentran en toda el área superior al estrato permeable y no solo en el fondo de la sección cilíndrica, como se observa en la Figura 5.16. Esta concentración de desplazamientos sugiere un mecanismo de falla distinto al mecanismo de falla por subpresión. Con lo anterior se puede deducir que la no convergencia del modelo se genera por el mecanismo de falla que desplaza el bloque superior al estrato permeable.

Al analizar los resultados obtenidos se puede concluir que, el cambio de pendiente encontrado en la Figura 5.14, se atribuye a la presencia de un mecanismo de falla distinto en los modelos de la pendiente 1 y los modelos de la pendiente 2. En la pendiente 1 el mecanismo de falla es por subpresión y en la pendiente 2 el mecanismo es el desplazamiento total del suelo sobre el estrato permeable, lo que indica que para la configuración de los modelos de la pendiente 2 la falla por subpresión no ocurre. De igual forma, se concluye que el mecanismo de falla por subpresión, que se desea simular empleando el procedimiento de presurización del estrato permeable, exhibe un espesor del estrato permeable crítico. Este espesor crítico determina que modelos con espesores mayores al valor crítico no desarrollarán el mecanismo de falla por subpresión y su no convergencia se alcanzará por el desplazamiento del bloque suprayacente.

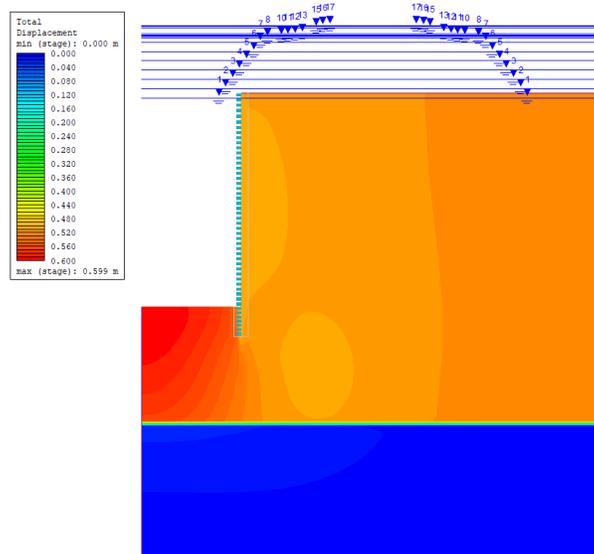


Figura 5.16. Deformaciones incrementales a partir de la etapa 4, a la etapa de falla, para un espesor de 11.9 m.

5.6. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA EN EL ESTRATO IMPERMEABLE.

Otra variable de importancia para el desarrollo del mecanismo de falla es la resistencia al corte no drenado. La modificación de esta variable, solo afecta la condición 2, correspondiente a la plastificación de los elementos en las paredes de la sección cilíndrica. Por esta razón su modificación por sí sola no generará que el mecanismo de falla se desarrolle, tal como se evidenció en el procedimiento de reducción de resistencia. Acorde a lo anterior, se procedió a evaluar la influencia de la resistencia al corte no drenado en la magnitud del desequilibrio necesario para producir el mecanismo de falla, empleando los procedimientos analizados. Sin embargo, debido a los resultados negativos, obtenidos previamente en los dos primeros procedimientos, solo se evaluará la influencia de esta variable en el procedimiento de presurización. Las modificaciones realizadas al modelo para la evaluación de la influencia de este parámetro se presentan a continuación:

En los modelos con modificación del valor de la resistencia al corte no drenado se implementó un nuevo material con las mismas propiedades del suelo impermeable y una disminución de S_u . Este material se colocó en los elementos de la sección cilíndrica de falla y en la zona circundante a esta. La ubicación del material se eligió para evitar el desarrollo de otro tipo de mecanismos de falla, como se observó en el análisis de reducción de resistencia. Las modificaciones realizadas al modelo geotécnico se encuentran en el Anexo 5 B). Los resultados de este análisis se encuentran graficados en la Figura 5.17. En esta grafica se presenta el incremento de carga hidráulica necesaria para la falla vs el valor de la resistencia al corte no drenado medida en la profundidad del fondo de la lumbrera.

En la Figura 5.17, se observa que para valores bajos de S_u existe un incremento de la carga hidráulica conforme aumenta S_u . Este incremento se atenúa para valores altos de S_u hasta llegar a ser cero, punto en el cual el comportamiento se torna paralelo al eje x. El valor de S_u a partir del cual la carga hidráulica no presenta cambios es 45 kPa. Acorde a lo planteado en el análisis de equilibrio limite, al aumentar la resistencia al esfuerzo cortante, el desequilibrio necesario para la ocurrencia de la falla debe aumentar, este comportamiento se presenta para valores bajos de S_u , sin embargo, en valores altos el desequilibrio necesario se mantiene constante con el aumento de S_u . Para comprender estos resultados se analizó por separado las simulaciones menores a 45 kPa y las mayores a este valor, en donde se encontró que:

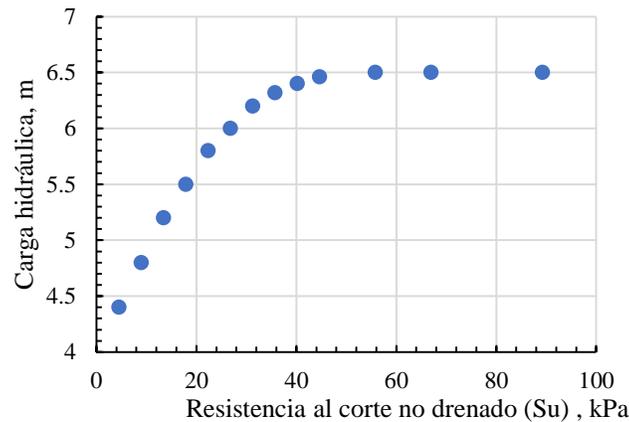


Figura 5.17. Resultados del incremento de carga hidráulica con la variación de la resistencia al corte no drenado en la sección de suelo impermeable. Espesor del estrato 5.3 m.

En los modelos con S_u menor a 45 kPa, dentro de los que se encuentra el caso de estudio, se exhibe un mecanismo de falla por subpresión, cumpliendo con las condiciones estipuladas para esta falla. Adicionalmente, en estos modelos se observó que en las etapas cercanas a la falla el estrato impermeable presenta elementos plastificados, los cuales incrementan en porcentaje conforme se reduce la resistencia al corte no drenado.

En los modelos con S_u mayor a 45 kPa no se cumplen las condiciones para el mecanismo de falla por subpresión. Este incumplimiento es el resultado del aumento de la resistencia al corte no drenado que moviliza la superficie de fluencia del material, trayendo consigo, el requerimiento de un esfuerzo desviador mayor en los elementos para alcanzar la superficie. Esta movilización de la superficie de fluencia conlleva a que el desequilibrio aplicado no genere la plastificación de los elementos cercanos a la pared de la lumbrera, con lo cual, no se cumple la condición 2, previo a la no convergencia del modelo. Esta no convergencia o falla en los modelos con S_u mayor a 45 kPa se produce de manera análoga a la presente en los modelos del análisis anterior con un espesor del estrato permeable mayor a 5.8 m. Modelos en los cuales la presurización del estrato permeable genera no convergencia por el desplazamiento del bloque de suelo que se encuentra sobre él.

De forma análoga, el análisis de variación de S_u en el estrato impermeable se realizó en un modelo con un espesor del estrato impermeable de 8.5 m. Este espesor corresponde a los modelos de la pendiente 2 de la Figura 5.14. El análisis se realizó con la finalidad de observar la incidencia de S_u en un modelo, en el cual, se sabe de antemano que previo al mecanismo de falla por subpresión se desarrolla la no convergencia por el desplazamiento del bloque superior al estrato presurizado. Los resultados que se obtuvieron se presentan en la Figura 5.18.

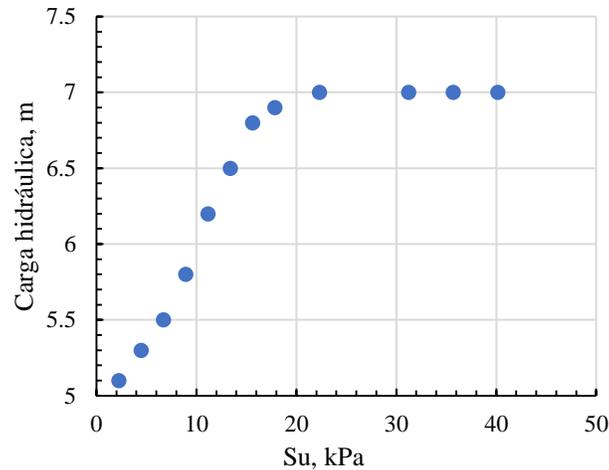


Figura 5.18. Resultados del incremento de carga hidráulica con la variación de la resistencia al corte no drenado en la sección de suelo impermeable. Espesor del estrato impermeable de 8.5 m.

En la Figura 5.18, se observa un comportamiento similar al descrito en el análisis del caso de estudio. En estos resultados los modelos que poseen un S_u menor a 18 kPa desarrollan el mecanismo de falla de subpresión y los modelos con valores de S_u superiores a 18 kPa no convergen por el desplazamiento del bloque suprayacente a causa de la presurización del estrato permeable. La diferencia existente entre los resultados de la Figura 5.17 y la Figura 5.18 es el valor crítico, en el cual existe un cambio de pendiente y el cual define que para valores de S_u superiores a este se desarrolla un mecanismo de falla distinto previo al mecanismo de falla por subpresión.

Al analizar los resultados obtenidos se puede concluir que el mecanismo de falla por subpresión que se desea simular, empleando el procedimiento de presurización del estrato permeable, exhibe una resistencia al corte no drenado crítica, que para el caso de estudio es 45 kPa. Este valor crítico es análogo al encontrado en el análisis de variación del espesor del estrato. Adicional a esto se observa que, para modelos con espesores altos en los que se determinó la no presencia del mecanismo de falla por subpresión, este mecanismo de falla se puede desarrollar si se disminuye la resistencia al corte no drenado a un determinado valor. Con lo anterior se concluye que los valores críticos para el desarrollo de la falla por subpresión son específicos para un determinado caso de estudio y están ligados a la magnitud de las variables que intervienen en su desarrollo.

5.7. VARIACIÓN DEL DIÁMETRO DE LA LUMBRERA.

Dentro de las ecuaciones analíticas propuestas para el mecanismo de falla por subpresión, varias contemplan la incidencia del diámetro de la lumbrera en el cálculo del F_s . No obstante, no se posee un consenso sobre la influencia de esta variable, existiendo posturas que no la contemplan. Con el fin de evaluar la incidencia del diámetro en el desequilibrio necesario para el desarrollo de la falla por subpresión, se ha realizado el análisis numérico del cambio de diámetro de la lumbrera empleando el procedimiento de presurización, teniendo en cuenta los resultados de las variables ya analizadas.

Para este análisis, al modelo del caso de estudio se modificó la configuración inicial aumentando el diámetro de la lumbrera. Este procedimiento se realizó sin alterar ninguna otra especificación, con el fin de tener resultados acordes a los obtenidos. En la modificación de los modelos se procuró la no alteración de la malla empleada en los análisis previos, esto se llevó a cabo incluyendo líneas de estado que reducen en gran medida la modificación de la malla. El modelo empleado y las modificaciones acordes al diámetro de la lumbrera se encuentran en el Anexo 5 C). Los resultados obtenidos entre la carga hidráulica y la variación del diámetro de la lumbrera se presentan en la Figura 5.19.

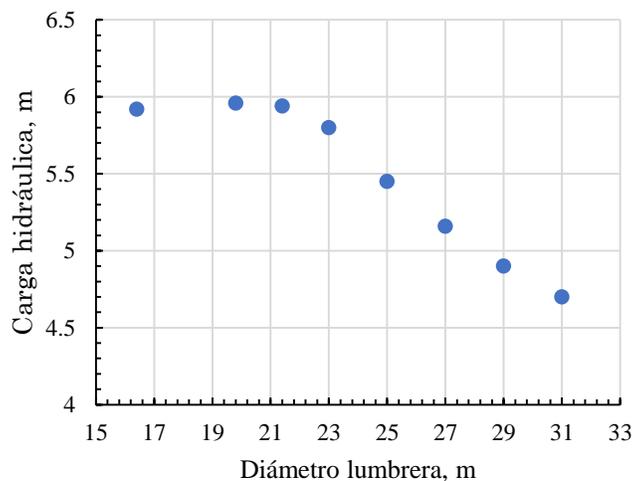


Figura 5.19. Resultados del incremento de carga hidráulica con la variación del diámetro, para un espesor de 5.3 m.

Los resultados de la Figura 5.19, presentan dos comportamientos con la variación del diámetro, un comportamiento decreciente de la carga hidráulica para diámetros mayores a 21 m y un comportamiento casi constante para valores menores a este diámetro. Al analizar los resultados se encontró que los modelos presentes dentro de cada uno de estos dos comportamientos tienen características similares, como se describe a continuación:

En los modelos con diámetro mayor a 21 m se desarrolla el mecanismo de falla por subpresión, cumpliendo todas las condiciones para la falla. En el comportamiento general de

estos modelos se observa un incremento de carga hidráulica conforme se reduce el diámetro. El anterior comportamiento es razonable al considerar el incremento de estabilidad de una excavación al reducir su diámetro. Este incremento de estabilidad trae consigo que el desequilibrio a implementar para desarrollar la falla por subpresión sea mayor para un menor diámetro.

En los modelos con diámetro menor a 21 m, se encontró que no se cumplen las condiciones para el desarrollo del mecanismo de la falla por subpresión. Este incumplimiento se produce por el ya mencionado aumento de estabilidad de la excavación, que ocasiona que la simulación no converja previo a que las condiciones de la falla por subpresión se cumplan. Esta no convergencia o falla en los modelos con diámetro menor a 21 m se produce de manera análoga a los modelos con un espesor del estrato permeable mayor a 5.8 m y con una S_u mayor a 45 kPa. Modelos en los que la presurización del estrato permeable no converge por el desplazamiento del bloque del suelo que se encuentra sobre él.

Adicionalmente este análisis se realizó para dos modelos con diferentes espesores del estrato permeable, un espesor de 6m, el cual, se encuentra en el límite entre la pendiente 1 y 2 de la Figura 5.14, y un espesor de 8.5 m, que se encuentra en la pendiente 2. Los resultados de estos análisis se presentan en la Figura 5.20. En los resultados el análisis con espesor de 6 m tiene un comportamiento similar al análisis con espesor de 5.3 m, con la diferencia del valor del diámetro crítico hasta el que la falla por subpresión se desarrolla. En los resultados del análisis con 8.5 m de espesor, se observa que el límite del diámetro para el desarrollo de la falla no se alcanza dentro de los diámetros propuestos en el análisis. Cabe destacar que para el modelo con 8.5 m de espesor y diámetro de 22 m, al aplicar el procedimiento de presurización no se desarrollaba el mecanismo de falla por subpresión.

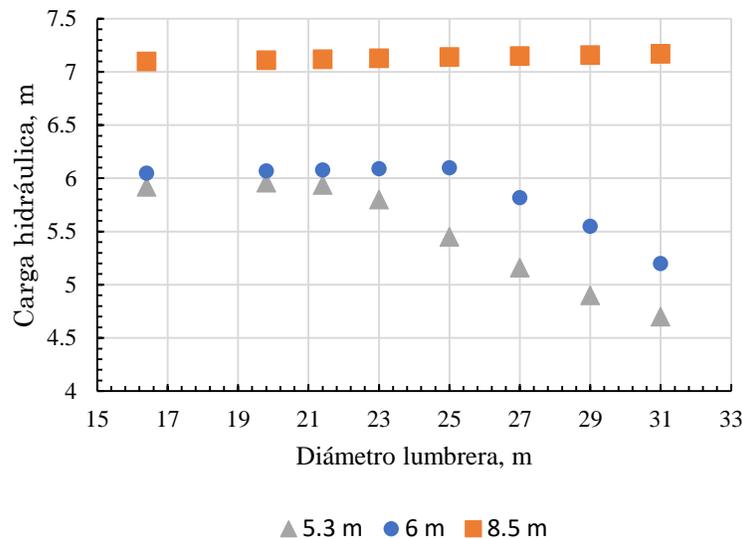


Figura 5.20. Resultados del incremento de la carga hidráulica con la variación del diámetro, para un espesor de 5.3 m, 6 m, 8.5 m.

Con el análisis del diámetro se encuentra un nuevo valor crítico para el desarrollo del mecanismo de falla por subpresión en el caso de estudio. De igual forma la variabilidad de estos valores críticos por modificaciones del modelo geotécnico o de la lumbrera, rectifican que las condiciones necesarias para la falla por subpresión son particulares de cada uno de los proyectos. Todos estos resultados refuerzan cada vez más la necesidad de realizar un análisis numérico específico para cada lumbrera, en el cual, se intente modelar de forma eficaz y veraz las condiciones del terreno y las dimensiones de la lumbrera. Con el fin de evaluar la posible presencia del mecanismo de falla por subpresión o del mecanismo que se presente previo a esta falla.

5.8. VARIACIÓN DEL ESPESOR DEL ESTRATO PERMEABLE.

Adicional a las variables estudiadas, se analizó la influencia del espesor del estrato permeable en el desequilibrio necesario para generar el mecanismo de falla por subpresión, empleando el procedimiento de presurización. Para este análisis se modificó el modelo del caso de estudio, variando el espesor del estrato permeable y conservando la profundidad del límite superior de este. Esto con la finalidad de evitar cualquier otro tipo de alteración del modelo inicial. El modelo empleado y las modificaciones del espesor del estrato permeable se encuentran en el Anexo 5 D).

En los resultados de las simulaciones se encontró que, indiferente del espesor del estrato permeable el incremento de carga hidráulica necesaria para la falla es constante. Al analizar estos resultados se determinó que los elementos contiguos a los elementos menos profundos del estrato permeable, son aquellos que experimentan falla por tensión y mayores deformaciones de corte. Esta falla por tensión y deformaciones en los elementos se puede interpretar como la zona en la que ocurre el desprendimiento de la sección de suelo cilíndrica. Lo anterior trae consigo que, al aumentar el espesor del estrato permeable, la zona de desprendimiento no se vea alterada y el incremento de la carga hidráulica necesaria para la falla tampoco. Se esperaría que, en un análisis con mayor rigurosidad, en el cual, se presente una simulación acoplada ocurra un grado de variación, debido a que el aumento del espesor del estrato puede propiciar una disminución de presión de poro al aumentar las deformaciones en este estrato.

5.9. ANÁLISIS DEL PROCEDIMIENTO DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA CON LA PRESURIZACIÓN DEL ESTRATO.

Adicionalmente, se evaluó el F_s con el procedimiento de reducción de parámetros, para cada una de las etapas de presurización del estrato permeable. Esto se realizó con la finalidad de evaluar, si en una condición con mayor probabilidad de desequilibrio, carga hidráulica mayor a la hidrostática en el estrato permeable, el procedimiento de reducción de resistencia desarrollaba el mecanismo de falla por subpresión y ofrecía valores de F_s congruentes con el incremento de la carga hidrostática. Para obtener estos resultados se tomó cada una de las etapas de presurización como modelos de partida, a los cuales se les implementó el análisis de reducción de resistencia. El resultado de este análisis se presenta en la Figura 5.21.

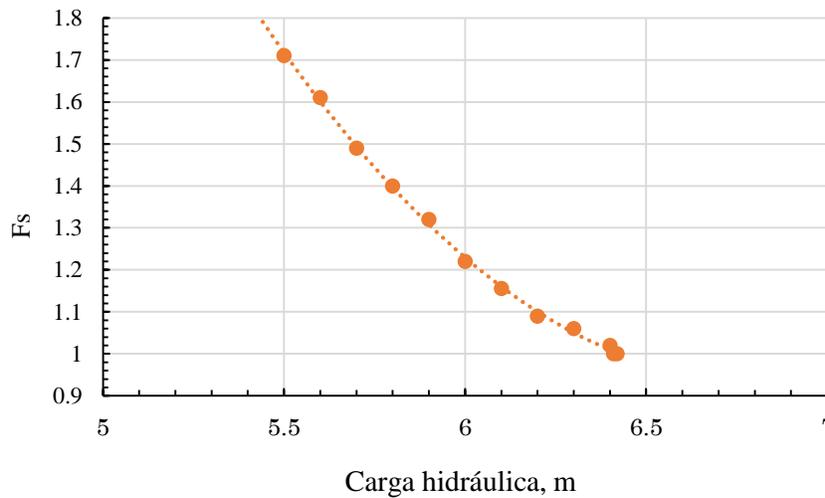


Figura 5.21. Factor de seguridad (método de reducción de resistencia) vs modelo inicial con incremento de carga hidráulica (5.3 m de espesor).

En los resultados de la Figura 5.21 no se presentan los resultados de los modelos con una etapa de presurización menor a 5.4 m, debido a que no existe una tendencia clara en el comportamiento del Fs y que en estos modelos al aplicar la reducción de resistencia no se desarrolla el mecanismo de falla por subpresión. Los resultados presentes corresponden a modelos con una etapa de presurización mayor a 5.4 m, en los que se obtiene el mecanismo de falla por subpresión.

La razón por la cual la reducción de la resistencia genera el mecanismo de falla por subpresión en los modelos con presurización mayor a 5.4 m, se atribuye a que en la etapa inicial del análisis de estos modelos la presurización ha propiciado la plastificación por tensión en los elementos del estrato permeable. Al tener esta plastificación el procedimiento de reducción de resistencia genera la plastificación de los elementos de las paredes del cilindro, logrando que se desarrolle el desprendimiento de la sección de suelo cilíndrica y se cumplan las condiciones para la falla por subpresión.

La tendencia que presenta el Fs en la Figura 5.21 está acorde a lo esperado, disminuyendo el Fs conforme aumenta la carga hidráulica y tendiendo a 1 al acercarse a la carga hidráulica de no convergencia del modelo. Esta concordancia entre los dos procedimientos al momento de localizar la presencia de la falla puede avalar la implementación del criterio de no convergencia como criterio para determinar la falla. Adicionalmente se realizó este análisis a un modelo cuyo espesor del estrato impermeable se encuentra en la pendiente 2, de la Figura 5.14, que corresponde al espesor de 8.5 m. El resultado de este análisis se presenta en la Figura 5.22.

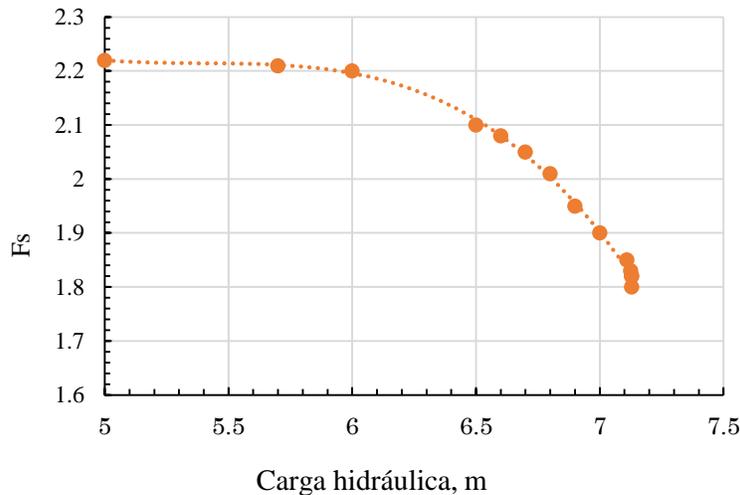


Figura 5.22. Factor de seguridad (método de reducción de resistencia) vs modelo inicial con incremento de carga hidráulica (8.5 m de espesor).

En la Figura 5.22 se observa un comportamiento polinómico entre el F_s y el incremento de carga hidráulica, el cual se torna asintótico con respecto al eje vertical al alcanzar la carga hidráulica en la que el modelo no converge. Sin embargo, para el incremento de carga hidráulica máxima el $F_s = 1.8$. El valor de F_s mayor a 1 se debe a que la no convergencia del modelo presurizado se propicia por el desplazamiento del bloque superior al estrato y no solo por la sección cilíndrica. Con lo anterior, al propiciar el mecanismo de falla de subpresión con la reducción de resistencia, para una etapa de presurización avanzada, se obtiene un F_s para este mecanismo, sin embargo, el incremento de carga hidráulica máxima del procedimiento de presurización corresponde a un mecanismo diferente. Con lo anterior se deduce que el F_s que se obtiene del procedimiento de reducción de resistencias difiere del valor del incremento de carga hidráulica, debido a que se está calculando factores de seguridad para distintos mecanismos de falla.

6. COMPARACION DE LOS RESULTADOS ANALITICOS Y NUMERICOS.

Teniendo en cuenta los análisis realizados a las ecuaciones analíticas y al modelado numérico del mecanismo de falla por subpresión, se realizó una comparación del factor de seguridad de estos métodos. Para esta comparación se partió de los valores de las variables del caso de estudio y se escogieron tres factores de seguridad objetivos, $F_s = 1.0, 1.5, 2.0$. Para cada F_s , se evaluó en la ecuación analítica planteada por el profesor Tamez (Tamez González et al. 2007) el valor necesario de una determinada variable para alcanzar el F_s , manteniendo las demás constantes. Posteriormente se realizó el modelo numérico correspondiente, con el valor de la variable encontrada y se calculó el F_s acorde al procedimiento de presurización. Los resultados para el $F_s=1$ se presentan en la Tabla 4 y para $F_s=1.5$ y 2 se presentan en la Tabla 5.

Tabla 4. Fs mínimo alcanzado con la variación de los parámetros de entrada en la ecuación analítica.

Variable	Unidad	Valor de modificación Max - Min	FS Alcanzado
D	m	∞	1.111
h_{Muro}	m	28.4	1.267
Naf	m	0	1.191
γ_s	kN/m ³	9.62	1.135
α	-	0	1.173
S_u	kPa	0	1.111
h_s	m	3.2	1.148
h_l	m	17.52	1
u	kPa	273.7	1

En la tabla 4 se observa que solo la modificación de la altura del lodo y la presión de poro en el estrato permeable, presentan valores que se encuentran dentro del rango de modificación que permite alcanzar un $Fs = 1$. Estos dos casos fueron previamente modelados numéricamente, encontrando no convergencia de la simulación en la disminución del lodo y un factor de seguridad superior a 1 para el procedimiento por presurización del estrato permeable.

Tabla 5. Valor necesario de los parámetros para alcanzar los factores de seguridad propuestos y sus equivalentes en el modelo numerico.

Variable	Unidad	Ecuación analítica (valor necesario)		Modelado numérico (FS obtenido)	
		Fs=1.5	Fs=2	Fs=1.5	Fs=2
D	m	5.59	2.45	N/A	N/A
γ_s	kN/m ³	22.97	52.2	1.5	N/A
h_s	m	16.2	62.43	N/A	N/A
S_u	kPa	205.2	366.6	N/A	N/A
h_l	m	30.56	43.59	1.21	1.21
u	kPa	221.5	166.12	1.3	1.7

En la tabla 5 se observa que las variables requeridas para alcanzar los Fs propuestos, se alejan de los valores típicos en la naturaleza y del procedimiento constructivo de una lumbrera. También, que no para todos los escenarios propuestos en los que se alcanza el Fs en la ecuación analítica, se puede establecer un Fs con el modelo numérico empleando el procedimiento de presurización del estrato permeable. La descripción de los resultados para cada una de las variables se presenta a continuación:

- **Diámetro:** El valor de esta variable en la ecuación analítica requerido para el $Fs=1.5$ y 2.0 es menor al diámetro crítico encontrado en la Figura 5.19. Por lo cual, al reducir el modelo numérico a este diámetro el mecanismo de falla no corresponde al mecanismo de falla por subpresión.
- **Peso específico:** El valor de esta variable en la ecuación analítica requerido para el $Fs =1.5$ se incorporó en el modelo numérico, encontrando en la simulación de presurización un Fs idéntico. Para el $Fs =2.0$ el modelo numérico no encontró convergencia en la etapa de excavación, etapa 4.
- **Espesor del estrato impermeable:** El valor de esta variable en la ecuación analítica requerido para el $Fs=1.5$ y 2.0 es mayor al valor crítico en el cual se produce el mecanismo de falla por subpresión, conforme a la Figura 5.14.
- **Resistencia al corte no drenado:** El valor de esta variable en la ecuación analítica requerido para el $Fs=1.5$ y 2.0 es mayor al valor crítico en el cual se produce el mecanismo de falla por subpresión, conforme a la Figura 5.17.
- **Altura del lodo:** El valor de esta variable en la ecuación analítica requerido para el $Fs =1.5$ y $Fs =2$ se incorporó en el modelo numérico, encontrando en la simulación de presurización un $Fs = 1.21$, para los dos escenarios. Este valor de Fs no corresponde al mecanismo de falla por subpresión, si no, a la no convergencia del modelo. Esta no convergencia ocurre por el desplazamiento total del bloque suprayacente al estrato permeable, consecuencia del aumento del equilibrio del modelo, producida por el incremento de fuerza en el fondo de la lumbrera. Cabe destacar que la altura con la que se trabaja es superior a la profundidad de la lumbrera.
- **Presión de poro:** El valor de esta variable en la ecuación analítica requerido para el $Fs =1.5$ se incorporó en el modelo numérico, encontrando en la simulación de presurización un Fs de 1.3 . Para el $Fs =2$, se incorporó el valor de la variable en el modelo numérico obteniendo un $Fs=1.7$.

7. CONCLUSIONES.

En la ejecución del análisis analítico y numérico de la falla por subpresión, en el proceso constructivo de una lumbrera en suelos blandos, inicialmente se realizó una contextualización de los temas a desarrollar en el análisis. Dentro de esta contextualización se llegó a las siguientes conclusiones:

- La falla de fondo por cortante y por subpresión se deben considerar dentro de un mismo marco de estabilidad de fondo, esto como resultado de la zona de afectación y la interdependencia entre fallas.
- Las características del estrato permeable son esenciales para el desarrollo de las fallas en el fondo, siendo la condición de contraste de resistencia determinante para la falla por cortante y la presión de poro de este estrato permeable determinante para la falla por subpresión.
- La distancia del estrato permeable con el fondo de la lumbrera juega un papel preponderante en el desarrollo de estas fallas, la cual es una variable que aumenta la probabilidad de ocurrencia de una falla disminuyendo la probabilidad de la otra.
- En las distintas ecuaciones analíticas reportadas en la literatura se encontró que estas describen un mismo mecanismo de falla, correspondiente al desprendimiento de una sección de suelo en forma cilíndrica, para lumbreras cilíndricas.
- La mayoría de las ecuaciones analíticas analizadas son representativas de un determinado caso de estudio.
- En las ecuaciones analíticas no se presenta un consenso en la definición de factor de adherencia suelo-muro, el diámetro de la lumbrera, ni de la incidencia de la profundidad del muro en el valor de la resistencia al corte no drenado. Por otro lado, las demás variables, peso de lodo, peso del suelo, presión de poro y resistencia al corte no drenado, si presentan consenso.

En el análisis estadístico de riesgo realizado a la ecuación analítica de la falla por subpresión se llegó a las siguientes conclusiones:

- Para el caso de estudio y para casos similares, la probabilidad que las combinaciones de la simulación Montecarlo sean menores a 1 son inferiores a 1%. De igual forma, la probabilidad de tener un F_s mayor o igual a 2 es nula, con un alto margen de diferencia entre el valor requerido y el calculado.
- La ecuación analítica analizada presenta una baja sensibilidad de la variable de salida, F_s , con las modificaciones de las variables de entrada.
- Los valores mínimos de F_s para estar del lado de la seguridad acorde al manual de construcción de CFE, son conservadores; esta conclusión se fundamenta en la baja movilidad del factor de seguridad y los exorbitantes valores de las variables de entrada, necesarios para alcanzar el F_s mínimo, que en muchos casos superan las condiciones previas a la excavación.

En el análisis estadístico de sensibilidad realizado a la ecuación analítica se llegó a las siguientes conclusiones:

- La resistencia al corte no drenado es la variable que presenta menor influencia, las variables modificables dentro del proceso constructivo, densidad y altura del lodo, presentan una incidencia media, la presión de poro y el peso específico del suelo son las variables de mayor incidencia.
- El espesor del estrato permeable solo tiene un papel de gran incidencia en la variable de salida del factor de seguridad para la condición 2, condición de no covarianza entre la profundidad del estrato y la carga hidráulica.
- La incidencia del factor de adherencia, al considerarse esta como una variable independiente, no representa una variación significativa en el F_s .

En el análisis numérico de la falla por subpresión se planteó 3 procedimientos para simular la falla de fondo por subpresión. Estos procedimientos corresponden a la reducción de resistencia, disminución de la fuerza del lodo en el fondo de la lumbrera y la presurización para el estrato permeable. Las conclusiones a las que se llegó para cada procedimiento son:

- Reducción de resistencia. En este procedimiento el mecanismo de falla obtenido fue el mecanismo de falla de fondo por cortante, el cual difiere del mecanismo de falla esperado.
- Disminución de fuerza del lodo en el fondo de la lumbrera. En este procedimiento el mecanismo de falla que se obtuvo dista del correspondiente a la falla de estudio. Por lo cual, para reproducir el mecanismo de falla por subpresión se requiere la adición de la resistencia a la tensión del suelo impermeable. Esta adición resulta poco representativa de la realidad, debido a que, los suelos poseen baja resistencia a la tensión.
- Presurización del estrato permeable. Este procedimiento permite simular de manera eficiente y práctica el mecanismo de falla de subpresión. Sin embargo, este mecanismo de falla se desarrolla como resultado del comportamiento hidrogeológico del estrato permeable, el cual debe ser estacionario o artesiano, de no tener esta condición, el mecanismo de falla cilíndrico no se desarrollaría.

En lo concerniente al factor de seguridad calculado por los distintos procedimientos se obtiene que:

- Para el procedimiento de reducción de resistencias, de calcularse un factor de seguridad este arrojaría valores elevados, debido a que, solo modifica una parte de las fuerzas actuantes, requiriendo así grandes valores para alcanzar la falla.
- Para el procedimiento de disminución de fuerzas. El factor de seguridad podría dar valores no representativos del problema, como resultado de la adición de la resistencia a la tensión del suelo impermeable.
- Para la presurización del estrato permeable. El factor de seguridad presenta un alto grado de representatividad, esto se debe a que las modificaciones realizadas, correspondientes

a la variación de la carga hidráulica, alteran todas las fuerzas actuantes del sistema de análisis para la falla por subpresión.

Al evaluar la incidencia de los parámetros influyentes en el mecanismo de falla por subpresión, empleando el procedimiento de presurización, se llega a las siguientes conclusiones:

- Existen valores críticos para las variables del espesor del estrato impermeable, la resistencia al corte no drenado y el diámetro de la lumbrera. Estos valores críticos determinan que, para valores superiores o inferiores a estos, según sea la variable estudiada, el mecanismo de falla de fondo por subpresión no se desarrollará. En los casos en los que no se desarrolla la falla por subpresión se da la presencia de una falla previa, correspondientes a la elevación del bloque suprayacente al estrato permeable.
- Los valores críticos encontrados se ven alterados por las modificaciones realizadas al modelo geotécnico y a la configuración de la lumbrera, rectificando que estos valores son específicos para cada uno de los casos de estudio.
- La presencia de los valores críticos en la modelización de la falla y la disparidad de los resultados encontrados al comparar las ecuaciones analíticas y el modelo numérico de la falla por subpresión, refuerzan la necesidad de realizar un análisis numérico específico para cada lumbrera. Este análisis debe modelar de forma eficaz y veraz las condiciones del terreno y las dimensiones de la lumbrera.

Consecuente con la mayor comprensión del fenómeno de la falla por subpresión que se ha obtenido con la implementación del análisis numérico, en el cual, se han determinado: valores críticos, condiciones hidrogeológicas, parámetros necesarios para propiciar el desequilibrio, que se encuentran fuera de la praxis del proceso constructivo de una lumbrera, se llega a la conclusión que, para evaluar la falla por subpresión es necesaria la implementación de un análisis numérico, que permita obtener una visión de la probabilidad de ocurrencia del mecanismo de la falla. Esto último con la finalidad de evitar el sobredimensionamiento del diseño de lumbreras. Sobredimensionamiento que se asume frecuentemente con la implementación del drenaje del estrato permeable como solución a priori al problema de la falla por subpresión.

8. SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES.

Dentro de sugerencias y recomendaciones que se obtuvieron en este trabajo se encuentran:

- La realización del análisis numérico acoplado, a fin de evaluar si la deformación del estrato permeable puede reducir sustancialmente la presión en la base y la influencia del espesor del estrato permeable.
- La recopilación de futuros casos registrados de este mecanismo de falla que permitan replantear el valor mínimo del factor de seguridad para estar de lado seguro, empleando métodos analíticos y numéricos.
- La realización del análisis numérico en 3D para contemplar la posible influencia de cargas localizadas en la superficie del terreno o el brocal y su incidencia en la falla por subpresión.
- La realización de modelos físicos a escala que puedan mostrar las peculiaridades de esta falla, debido a la escasa presencia de ejemplos de fallas de este tipo, que sirvan para una validación física del problema.
- La realización de pruebas de falla por subpresión controladas en lumbreras reales, en las cuales, la lumbrera atraviese varios estratos permeables. Esta falla consiste en permitir el desarrollo controlado de la falla de la sección de suelo cilíndrica superior, drenando el estrato permeable inferior para estar de lado de la seguridad.

9. BIBLIOGRAFÍA.

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., and Boyce, G. M. (2012). *Slope stability and stabilisation methods*. Chichester.
- Acevedo Valle, E., and Aguilar Téllez, M. A. (2019). “Criterios de diseño para determinar factores de seguridad en lumbreras construidas con el procedimiento constructivo de ‘ lumbreras flotadas ’ en suelos blandos.” *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*, 0, 1271–1278.
- Aguilar Téllez, M. A., and Acevedo Valle, M. E. (2018). “Experiencias en el diseño y construcción de lumbreras , flotadas y con muros milán, en suelos blandos.” *Geotecnia*, 251, 16–25.
- Auvinet Guichard, G. (2006). “Notas del curso de Mecánica de Suelos aplicada, Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería, UNAM.” Ciudad de México.
- Auvinet Guichard, G., and Rodríguez, J. F. (2004). “Analysis of shafts subjected to local loads.” *Proceedings, XXIIth National Soil Mechanics Meeting, AMMS, Guadalajara, México*, 2, 317–322.
- Auvinet Guichard, G., and Rodríguez, J. F. (2011). “Analysis , design , construction and behaviour of underground structures.” *2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference*.
- Auvinet Guichard, G., Rodríguez Rebolledo, J. F., and Rangel Núñez, J. L. (2010). “Construction of deep tunnel shafts in Mexico city soft clays by the flotation method.” *Acta Geotechnica*, 5(1), 63–68.
- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., Zampich, L., and Manoj, N. R. (2019). “Plaxis 2D Reference Manual 2019.” *Rotterdam, Netherlands, Balkema*, 87–100.
- CFE, and II-UNAM. (2018). “Túneles y lumbreras en suelos.” *Manual de diseño de obras civiles*, Ciudad de México.
- Chandrasegaran, and Bachy Soletanche. (2013). *Optimizationb of Shaft Desing*. Singapore.
- Griffiths, D. V., and Lane, P. A. (1999). “Slope stability analysis by finite elements.” *Geotechnique*, 49(3), 387–403.
- Hita María, J. L. (2015). “Aplicación de métodos estadísticos a la ingeniería de túneles y obras subterráneas, (Doctorado), Universidad Politécnica de Madrid.”
- Itasca Consulting Group Inc. (2016). “Factor of Safety.” *User’s Guide*, Minneapolis. USA, 1–58.
- Jiménez Argüelles, V., Díaz González, F., Juárez García, H., and Bernal Gómez, A. (2016). “Riesgos laborales implícitos en la construcción de las lumbreras para el túnel emisor oriente en México.” *Revista Ciencias Estratégicas*, 24, 379–402.
- Luna, O. (2010). “Consideraciones generales en la ingeniería geotécnica de túneles y lumbreras.” *Simposio sobre túneles y lumbreras en suelos y rocas. Memoria Técnica*,

SMIG-AMITOS., Ciudad de México.

- Montiel, E., Valenzuela, J., Ossa, A., and Tlalonini, A. (2018). “Evaluación numérica de falla por sub-presión en lumbreras construidas en suelos.” *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica- León, Guanajuato*, 515–522.
- Moreno-Fernández, A. (1991). “Lumbreras y túneles en suelos, Experiencias innovadoras en la ingeniería mexicana, trabajo de ingreso a la Academia Mexicana de Ingeniería.”
- Orduño, V. D., and Auvinet, G. (2010). “Confiabilidad de lumbreras realizadas por el método de flotación.” *XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Acapulco*, 67–74.
- Palisade. (n.d.). “Simulación de Monte Carlo -.” <https://www.palisade-ita.com/risk/simulacion_monte_carlo.asp> (Sep. 24, 2019).
- Paniagua, W. (2002). “Manual de construcción geotécnica. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos SMMS.” Ciudad de México.
- Pinyol, N. M., Alonso, E. E., and Olivella, S. (2008). “Rapid drawdown in slopes and embankments. Water resources research.” *Water resources research*, 44.
- Potts, D. M., and Zdravkovic, L. (2009). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory*. Thomas Telford, London.
- Puller, M. (2003). *Deep Excavations, A practical manual*. Thomas Telford Ltd, London.
- Ramírez Díaz, M. (2013). “Revisión de la estabilidad de una lumbrera en la zona del lago del Valle de México,(Especialidad), Universidad nacional autonoma de México.”
- Rocscience inc. (2019). “Shear Strength Reduction, User’s Guide.” <https://www.rocscience.com/help/rs2/#t=Knowledge_Base%2FSSR_KB.htm> (Aug. 20, 2019).
- Rocscience Inc. (2019). “Convergence Criteria,.” *User’s Guide*.
- Santoyo, E., Xue, R. L., and Ovando Shelley, E. (2015). *El cono en la exploración geotécnica*. México D.F.
- Santoyo Villa, E., Ovando Shelley, E., Mooser, F., and León Plata, E. (2005). *Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. Tgc.
- Simpson, B. (2011). “Reliability in geotechnical design – some fundamentals.” *International symposium on geotechnical safety and risk 2011 - Bundesanstalt für Wasserbau- © 2011 Bundesanstalt für Wasserbau*, 393–399.
- Tamez González, E. (2001). *Ingeniería de Cimentaciones-Conceptos Básicos de la práctica*. Mexico DF.
- Tamez González, E., Auvinet Guichard, G., Rangel Nuñez, J., and López Bautista, F. (2007). “Diseño geotécnico de lumbreras en suelos blandos: procesos constructivos y métodos de análisis.” *Memorias conmemorativas 50 años de la SMMS*.
- Valenzuela, J., Montiel, E., and Ossa, A. (2019). “Análisis numérico y analítico de la falla

por sub-presión en lumbreras construidas en suelos.” *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*, 1330–1337.

Vargas, C., Guillén, J., Bernal, R., and Luna, O. (2019). “Geotechnical Analysis and Design of Tunnel Shafts in Difficult Soft Soil Conditions at Mexico City.” *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*, 0, 1379–1391.

Vargas Moreno, C. O., Guillen Guillen, J. B., Berna Luna, R., and Luna Gonzales, O. (2018). “Análisis y diseño geotécnico de una lumbrera flotada en la zona lacustre de la Ciudad de México.” *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, 553–562.

Wilson, E. (1965). “Structural analysis of axisymmetric solids.” *AIAAJ*, 3, 2269–2274.

Zemva, S. (2011). “Diseño y Construcción de Lumbreras en Suelos Blandos por el procedimiento de los Anillos Prefabricados,(Maestria), Universidad nacional autonoma de México.”

ANEXO1.

ESTADO LÍMITE DE SERVICIO Y ESTADO LÍMITE DE FALLA.

Tabla A1-1. Mecanismos de falla a evaluar para las obras subterráneas de túneles y lumbreras del manual de diseño de obras civiles (CFE and II-UNAM 2018).

Tipo de estructura subterránea	Estado límite de falla
Túnel	<ul style="list-style-type: none"> - Falla del frente y de las paredes de la excavación. - Falla estructural de los revestimientos ⁽¹⁾.
Lumbrera	<ul style="list-style-type: none"> - Falla de las paredes de la excavación. <ul style="list-style-type: none"> - Falla por extrusión del suelo. - Falla del núcleo de la excavación. - Falla del fondo de la excavación por cortante. <ul style="list-style-type: none"> - Falla del fondo por sub-presión. - Falla de la estructura por flotación. - Falla estructural del muro de retención y de la losa de fondo ⁽¹⁾.
Conexión	Falla estructural de los elementos de la conexión ⁽¹⁾ .

Tabla A1-2 Factores de seguridad mínimos en la evaluación del estado límite de falla del manual de diseño de obras civiles (CFE and II-UNAM 2018).

Tipo de estructura subterránea	Tipo de revisión	Factor de Seguridad, FS
Túnel	Estabilidad del frente y de las paredes	≥ 1.5
Lumbrera	Estabilidad de las paredes	≥ 1.5
	Estabilidad por extrusión	≥ 1.2
	Estabilidad del núcleo ⁽¹⁾	≥ 1.1
	Estabilidad del fondo por cortante	≥ 1.5
	Estabilidad del fondo por sub-presión	≥ 2.0
Conexión	Estabilidad por flotación	≥ 1.5
	Falla estructural de los elementos de la conexión ⁽¹⁾ .	C15

Tabla A1-3. Criterio para selección de la técnica de construcción de lumbreras en función de las condiciones geotécnicas de la zona de estudio del manual de diseño de obras civiles (CFE and II-UNAM 2018).

Tipo de suelo	Condición del agua	Tipo de revisión				Posible afectación a estructuras colindantes	Procedimiento constructivo recomendable	Tipo de bombeo
		Falla de pared	Falla de fondo por cortante	Falla de fondo por sobrepresión	Falla por extrusión			
Fino	Sin	No	No	----	----	No	1	----
		No	No	----	----	Si	2, 3	----
		Si	No	----	----	Si	2, 3, 4 ^A	----
	Presencia del NAF	No	No	No	No	No	1	Achique
		No	No	Si	No	No	1	Achique y profundo
		No	No	No	No	Si	2, 3 ^B	Achique
		Si	No	No	No	Si, No	3 ^B , 4 ^A	Achique
		Si	No	Si	No	Si, No	3 ^B , 4 ^A	Achique y profundo
		Si	Si	No	No	Si, No	3 ^{B,C}	Achique
		Si	Si	Si	No	Si, No	3 ^{B,C} , 5, 6	No se requiere
		Si	Si	Si	Si	Si, No	3 ^{B,C} , 5 ^D , 6 ^D	No se requiere
Granular	Sin	Si	No	----	----	No, Si	2, 3	----
	Presencia del NAF	Si	No	----	----	No, Si	2, 3	Profundo

- 1- Métodos convencionales
- 2- Pozo indio
- 3- Métodos de retención previos a la excavación
- 4- Métodos mixtos
- 5- Lumbrera flotada
- 6- Método de los anillos

- A- Pared inestable hasta cierta profundidad
- B- Se requiere el uso de juntas estancas
- C- Requiere de fluidos durante la excavación del núcleo o de mejoramiento del suelo del fondo de la excavación
- D- Posiblemente se requiera de pantallas para la excavación del núcleo

ANEXO 2.

SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN ANALÍTICA Y COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS ECUACIONES CON LAS VARIABLES DE ENTRADA.

La selección de la ecuación analítica para la ejecución del análisis estadístico se rigió por los siguientes criterios: La implementación de la ecuación en análisis de estabilidad reportado en la literatura y el rango de aplicación de la ecuación a los distintos escenarios de análisis de lumbreras. Para la evaluación de estos criterios se eligió 2 de las ecuaciones reportadas en capítulos anteriores. Estas ecuaciones se presentan en la Tabla 6. La Ecuación (9) se eligió como resultado de su presencia en un manual de diseño de obras civiles de la CFE y su implementación en varios trabajos de análisis de estabilidad en lumbreras (Aguilar Téllez and Acevedo Valle 2018),(Vargas Moreno et al. 2018), (Acevedo Valle and Aguilar Téllez 2019),(Montiel et al. 2018). La Ecuación (21) se eligió por su versatilidad para representar distintos escenarios en el proceso constructivos de las lumbreras.

Tabla 6. Ecuaciones analíticas preseleccionadas para el análisis estadístico.

Nombre de la serie	Ecuación	Número de la ecuación
Ecu 1	$F_s = \frac{\gamma_s h_s + \gamma_l h_l + \eta S_u J}{u}$	(9)
Ecu 2	$F_s = \frac{4 \frac{S_u F_e}{D} (ht + (h_s - ht)Fc) + \gamma_l h_l + \gamma_s h_s}{H + h_s - Naf - \Delta u}$	(12)

Como criterio adicional para la elección de la ecuación analítica se analizó y comparó el comportamiento del F_s para cada una de las ecuaciones. El análisis se realizó evaluando el F_s resultante de la modificación de una variable de entrada, con las variables restantes constantes y correspondientes a los valores reportados en el caso de estudio. Las variables modificadas fueron: el espesor del estrato impermeable, el peso volumétrico del suelo, la resistencia al corte no drenado y la altura del lodo. Para este análisis se adicionó la fuerza ejercida por el lodo, correspondiente a la técnica de construcción de lumbrera flotada, Para la Ecuación (12) se propuso un $F_e = 1$. Los resultados del comportamiento del F_s con la variación de los parámetros de entrada se presentan en la Figura A0.1.

De los resultados generales de este análisis se obtiene que la Ecuación (1) presenta resultados conservadores con relación a la Ecuación 2, esto debido a la no discretización de la incidencia del factor de adherencia, variables que aumentan las fuerzas resistentes para que se produzca la falla. Como consecuencia de los resultados conservadores y de los criterios implementados previamente, se elige como ecuación a implementar para el análisis la Ecuación (9).

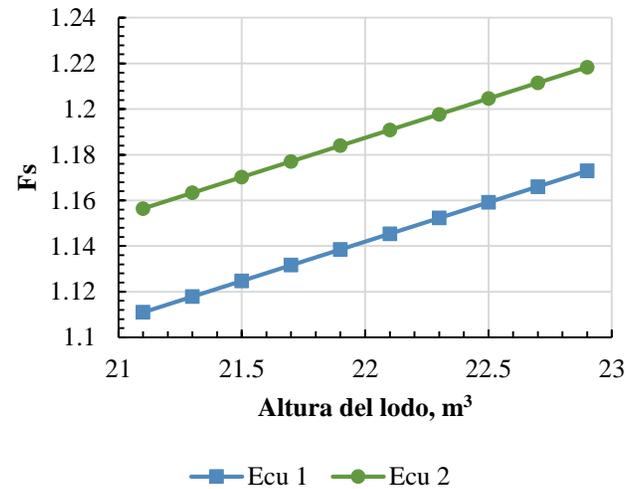
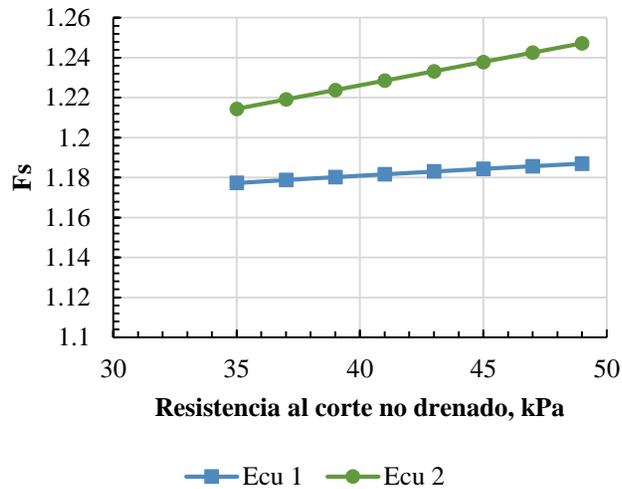
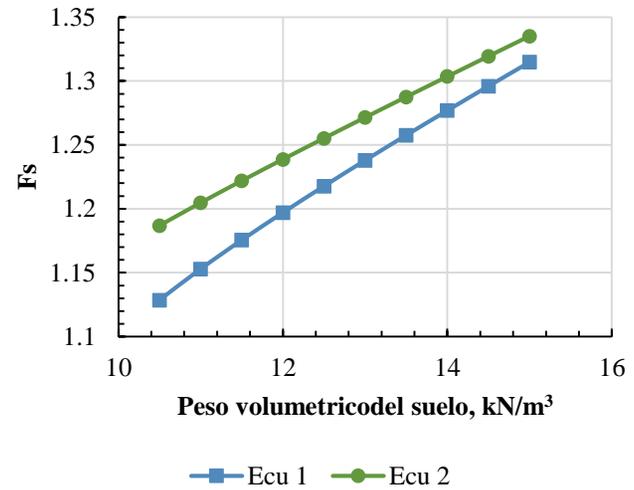
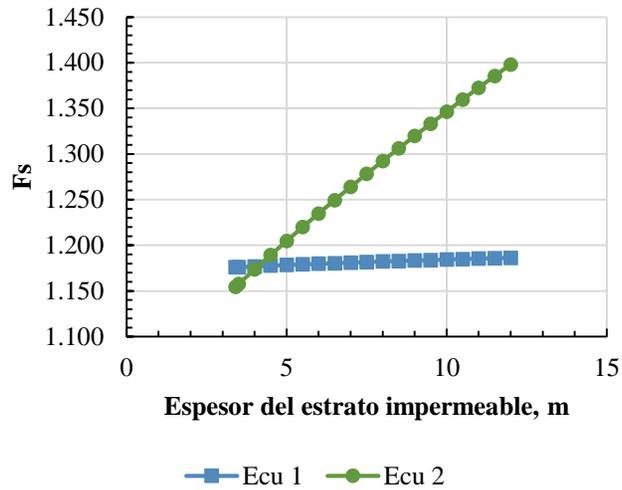


Figura A0.1. Variación del F_s con la modificación de distintas variables, en las 3 ecuaciones.

ANEXO 3.

DISTRIBUCIONES DE LAS VARIABLES DE LA ECUACIÓN ANALÍTICA.

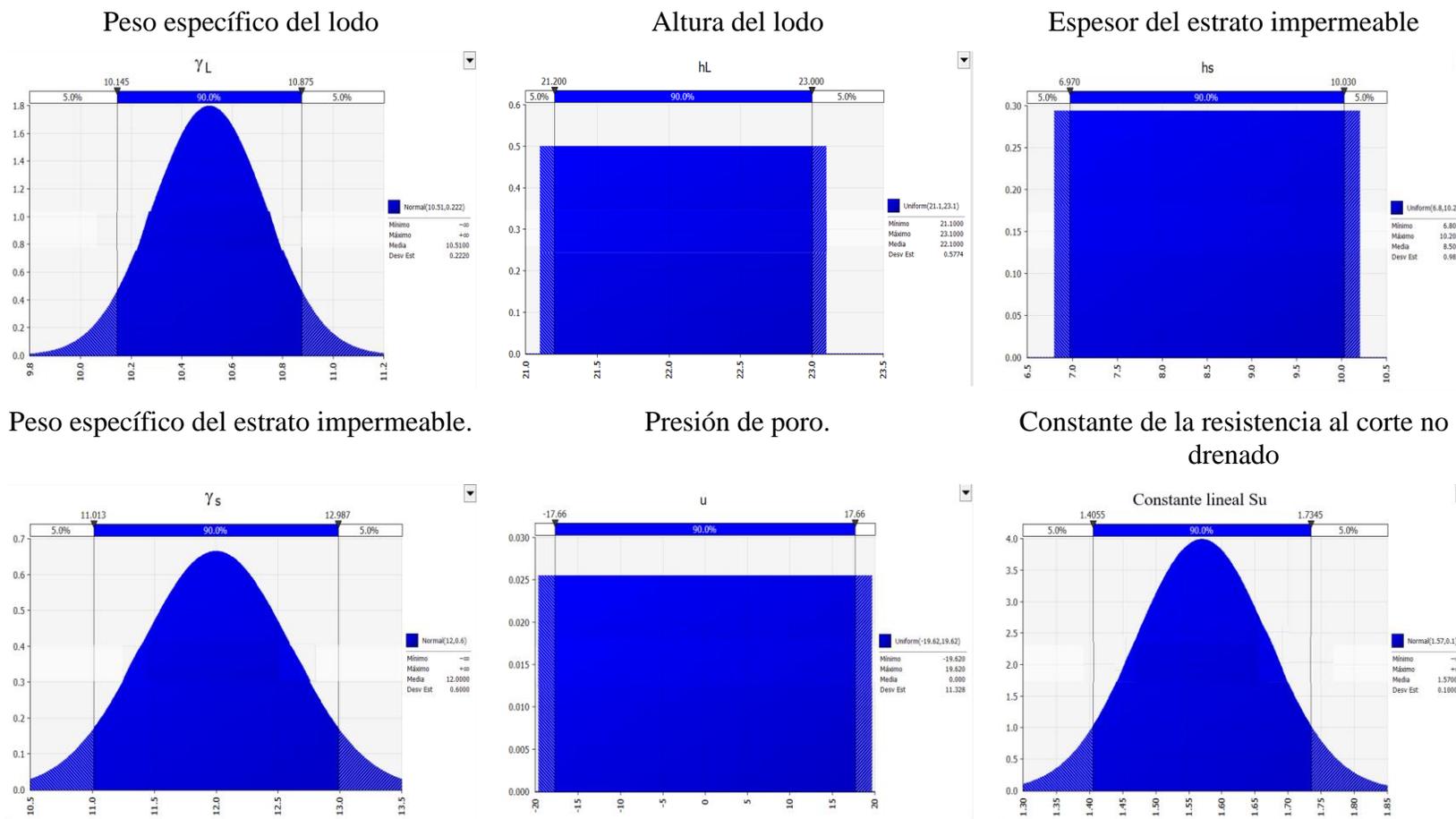


Figura A2.2. Distribuciones de probabilidad de las variables de la ecuación analítica.

ANEXO 4.

SECUENCIA DE PLASTIFICACIÓN EN LAS SIMULACIONES PARA LA FALLA DE SUBPRESIÓN.

A) Secuencia de plastificación de los puntos de Gauss en los elementos para el procedimiento de disminución de carga de lodo.

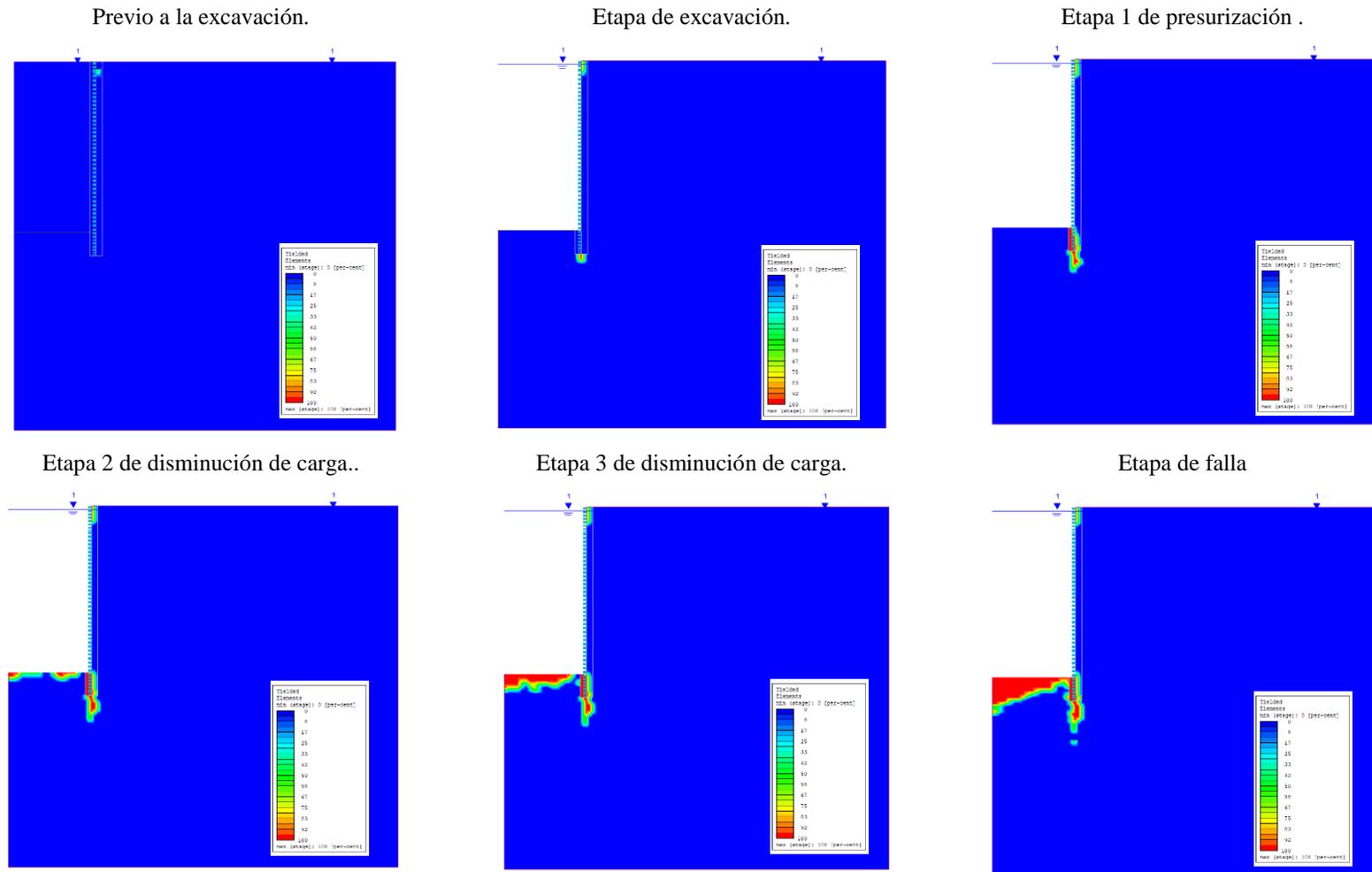
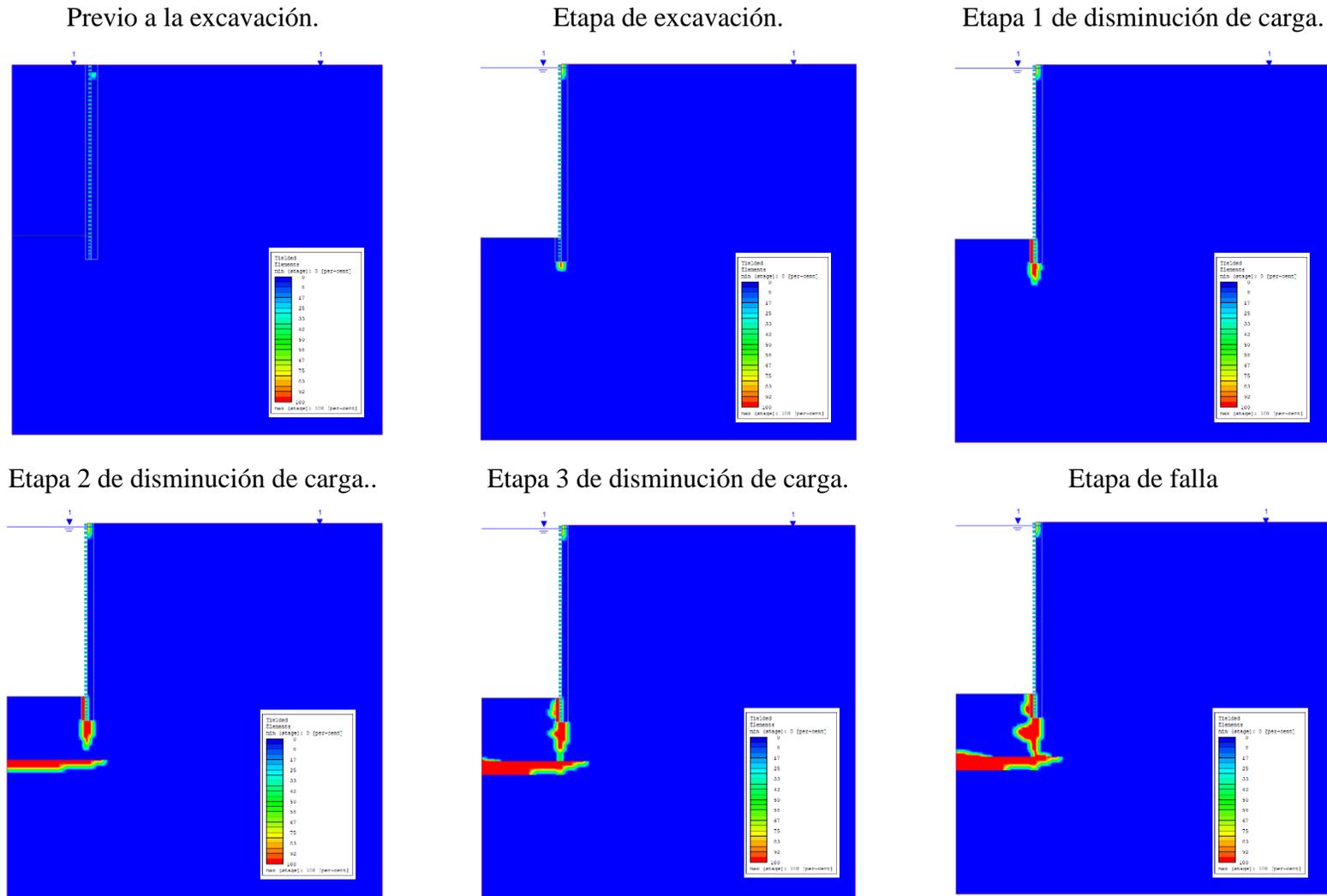


Figura A5-3. Secuencia de plastificación de los puntos de Gauss en los elementos para el procedimiento de disminución de carga de lodo.

B) Secuencia de plastificación de los puntos de Gauss para el procedimiento de disminución de carga, con resistencia a la tensión.



FiguraA5-4. Secuencia de plastificación de los puntos de gauss en el procedimiento de disminución de carga, con resistencia a la tensión.

C) Secuencia de plastificación de los puntos de Gauss en los elementos del suelo con el procedimiento de presurización.

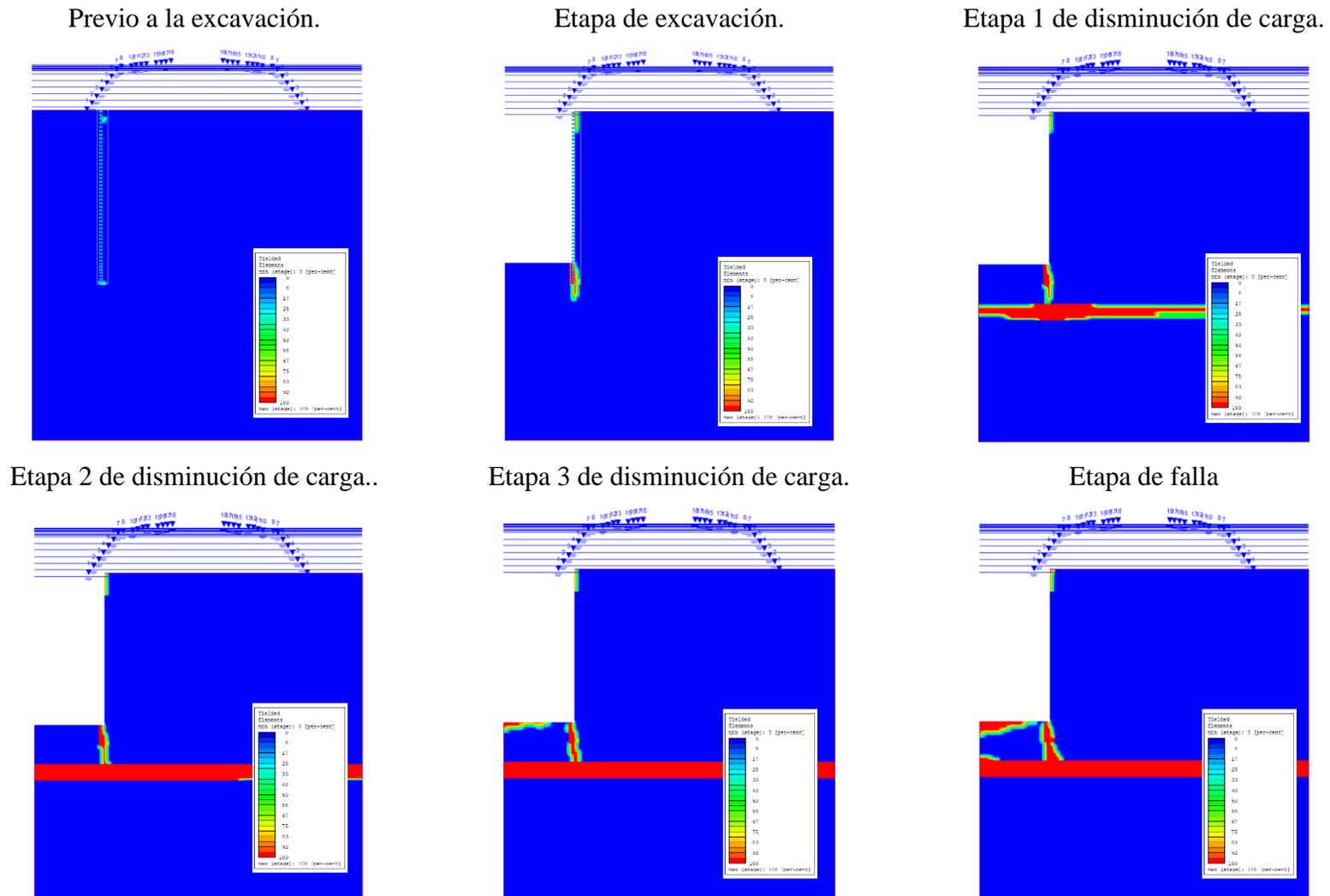


Figura A5-5. Secuencia de plastificación de los puntos de Gauss en los elementos del suelo con el procedimiento de presurización

D) Secuencia de plastificación de los puntos de Gauss con el procedimiento de presurización y 3.9 m de estrato impermeable.

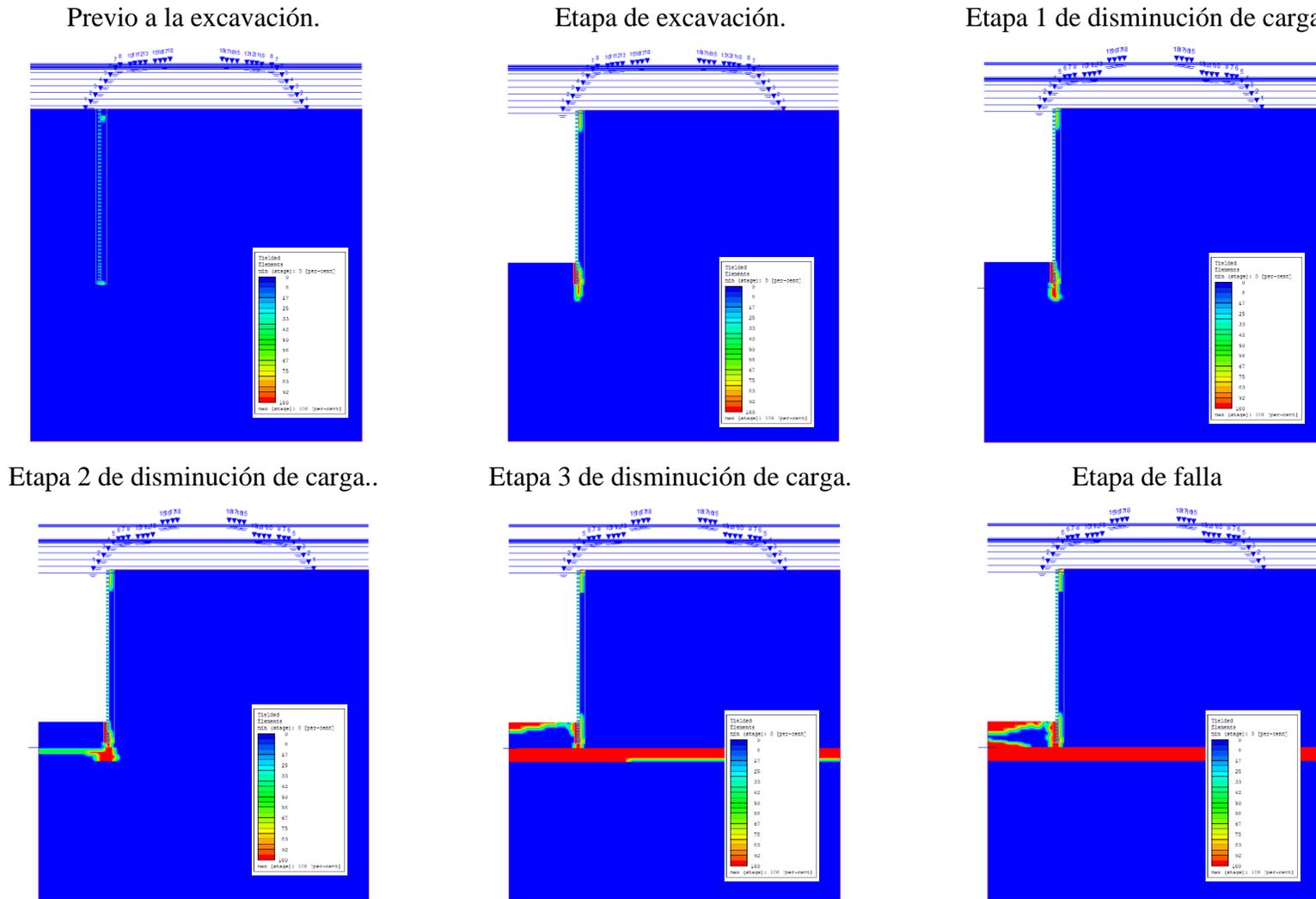


Figura A5-6. Secuencia de plastificación de los puntos de Gauss con el procedimiento de presurización y 3.9 m de estrato impermeable

E) Secuencia de plastificación de los puntos de Gauss con el procedimiento de presurización y 11.9 m de estrato impermeable.

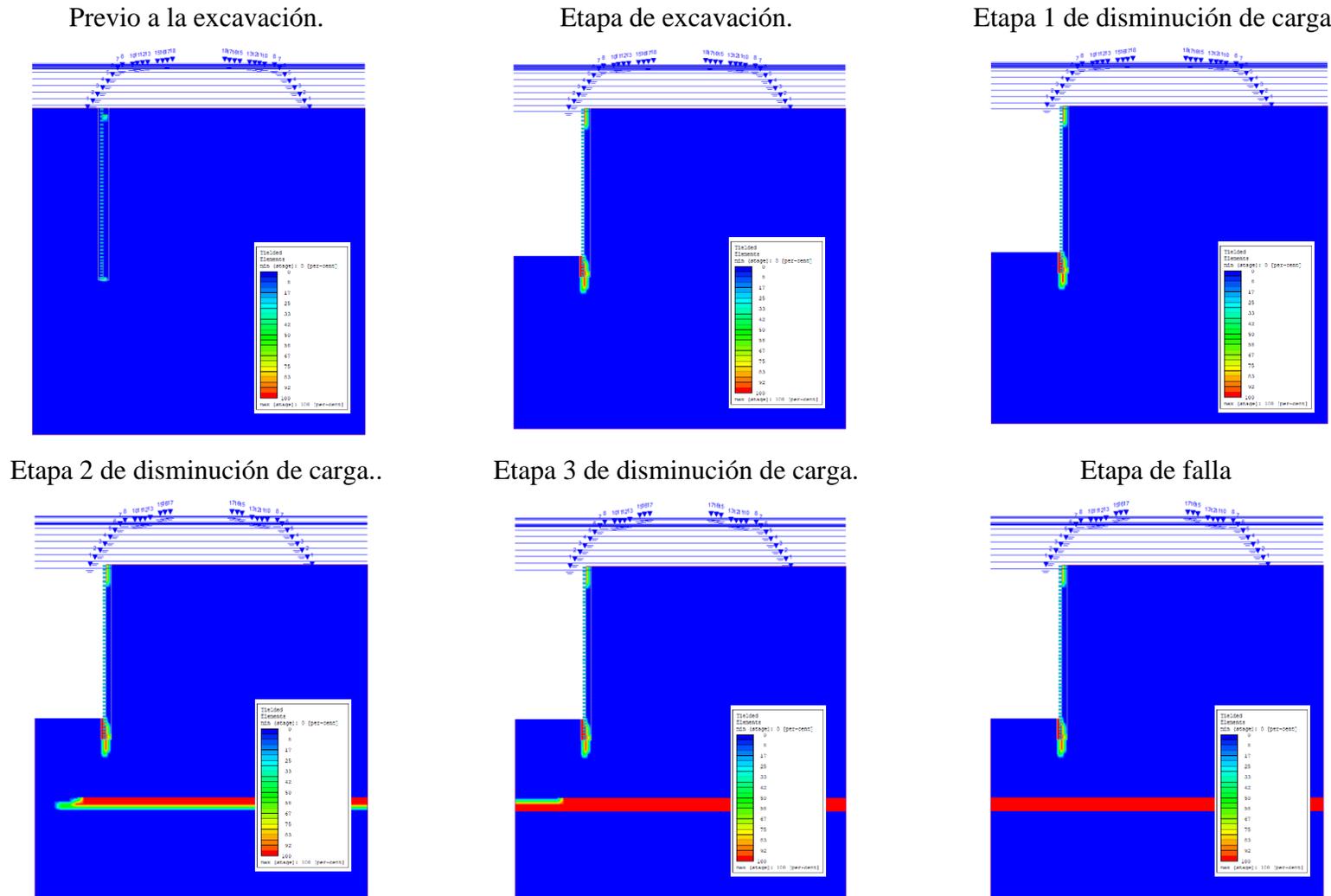


Figura A5-7. Secuencia de plastificación de los puntos de Gauss con el procedimiento de presurización y 11.9 m de estrato impermeable

ANEXO 5.

MODELOS NUMÉRICOS CON MODIFICACIONES DE LAS VARIABLES ESTUDIADAS EN EL MECANISMO DE FALLA POR SUBPRESIÓN.

A) Modificación del espesor del estrato impermeable.

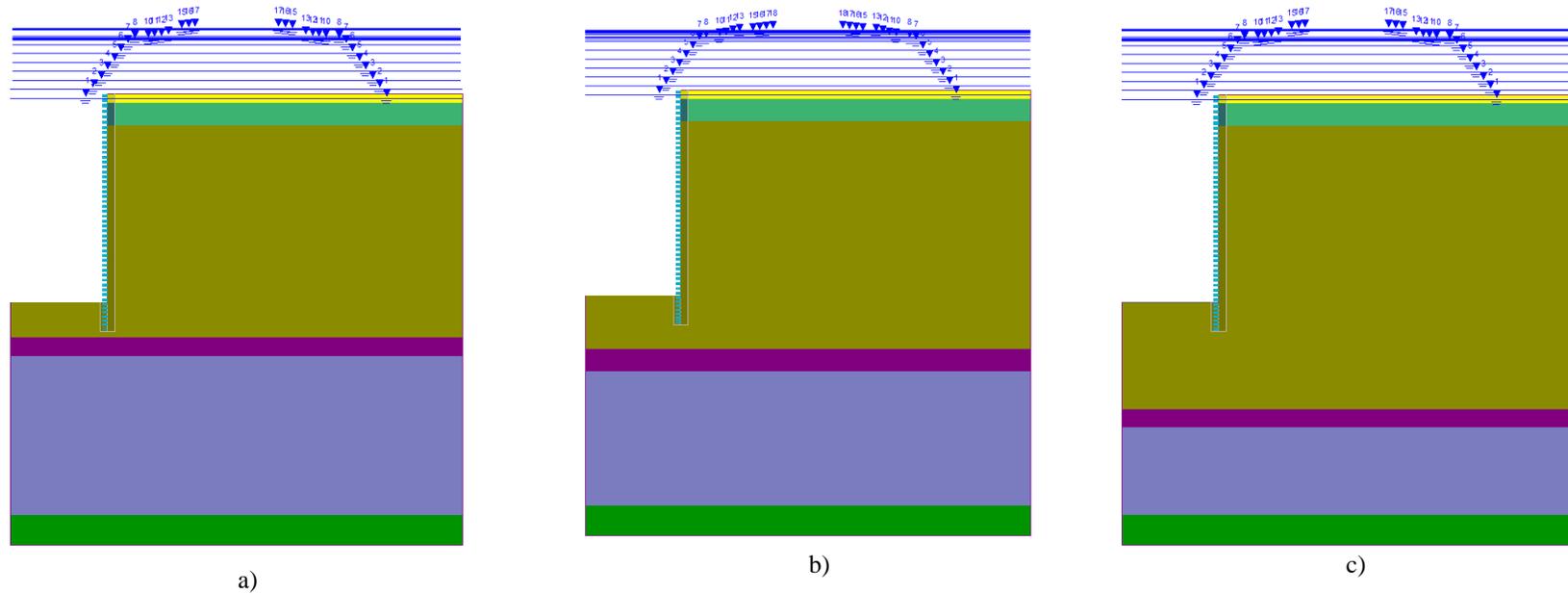


Figura A6-8. Modelos numéricos con diferentes espesores del estrato impermeable. a) Espesor de 3.9 m. b) Espesor de 6 m. c) Espesor de 11.9 m

B) Modificación de la resistencia al corte no drenado

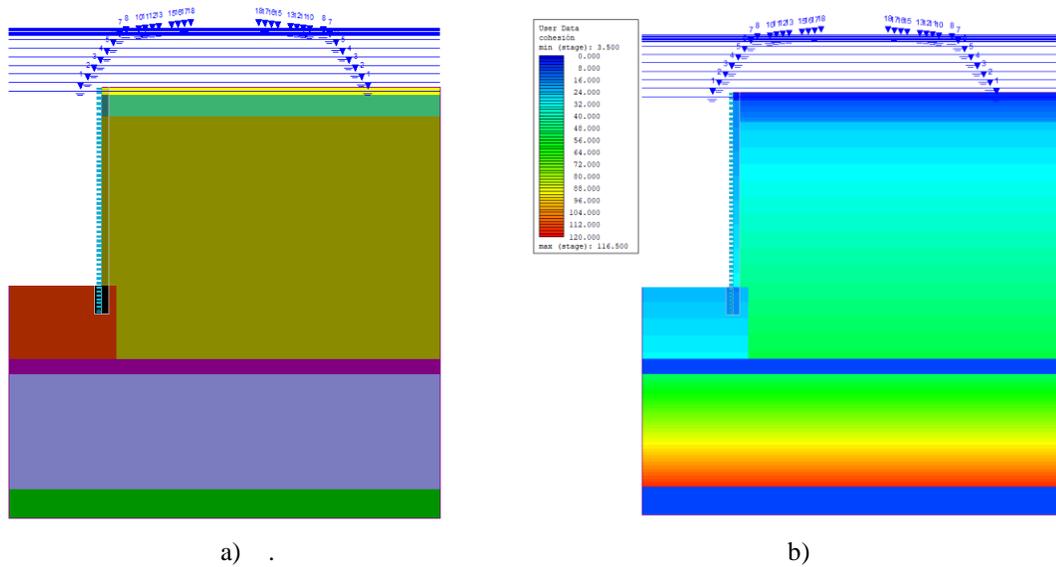


Figura A6-9. a) Modelo numérico con la adición del nuevo material. b) Perfil de variación de S_u para un valor menor al establecido.

C) Modificación del diámetro de la lumbrera.

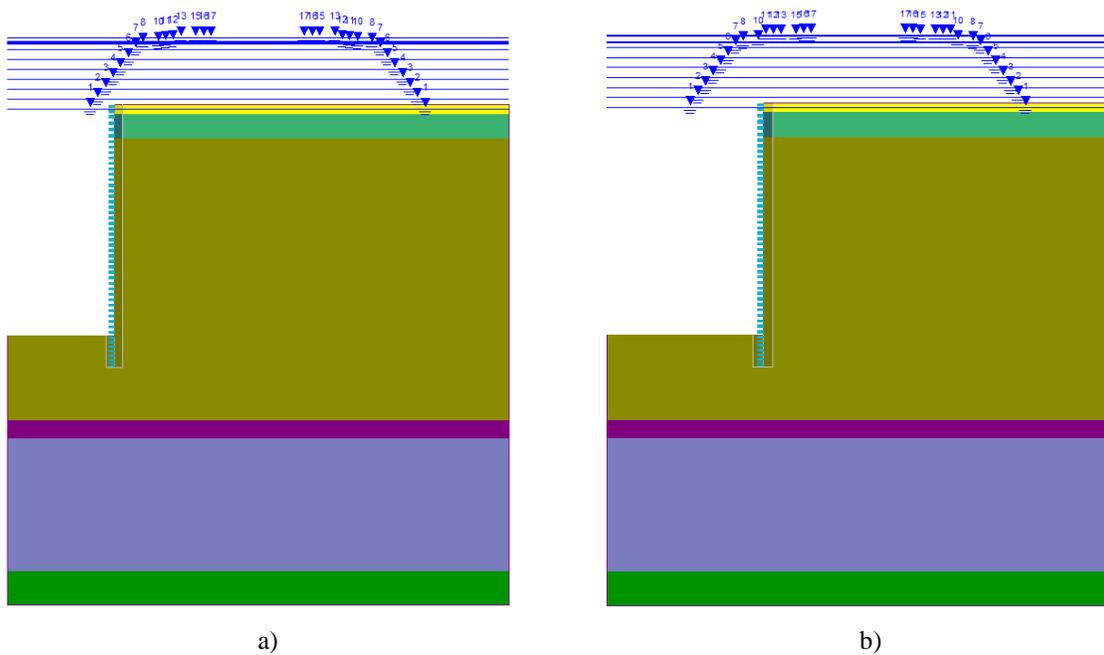


Figura A6-10. Modelos numéricos con diferentes diámetros. a) Diámetro de 18 m. b) Diámetro de 30 m

D) Modificación del espesor del estrato permeable.

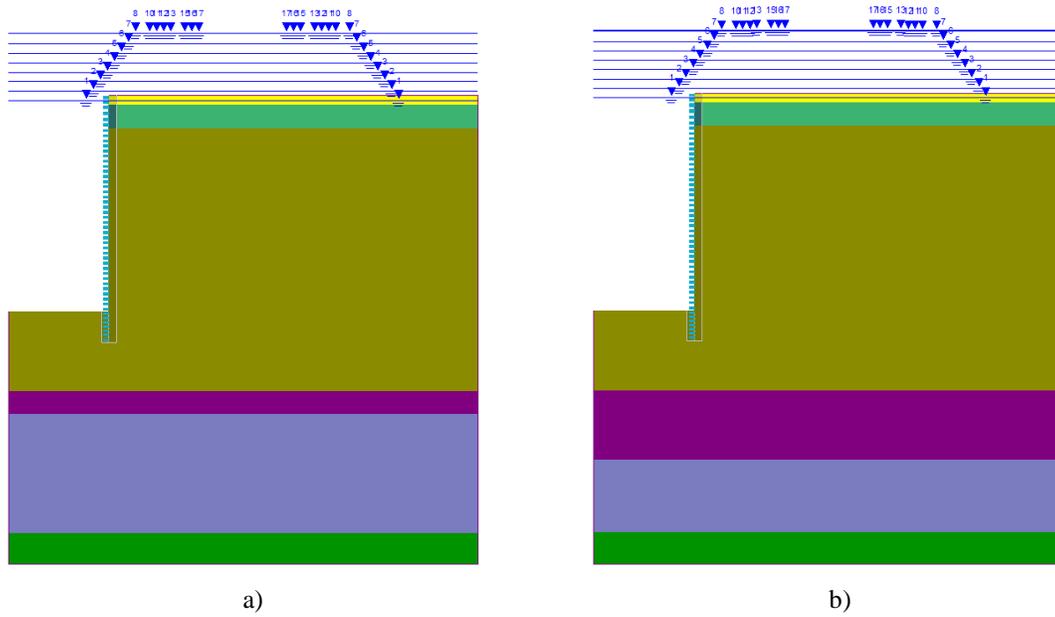


Figura A6-11. Modelos numéricos con diferentes espesores del estrato permeables. a) espesor de 1.8 m b) Espesor de 7.4 m