

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DEL SUELO NO SATURADO  
EN EL ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN Y ESTABILIDAD DE UNA PILA  
DE LIXIVIACIÓN CON ALTO CONTENIDO DE FINOS**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil**

**AUTORA:**

Huarcaya Quiquia, Rosario Belen

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil**

**AUTOR:**

Lucas Gonzales, Emerson Raul

**ASESOR:**

Menacho Caso, Jeferson Ever

Lima, setiembre 2024

## Informe de Similitud

Yo, Jeferson Menacho Caso, docente de la Facultad de Ingeniería Civil de la Pontificia

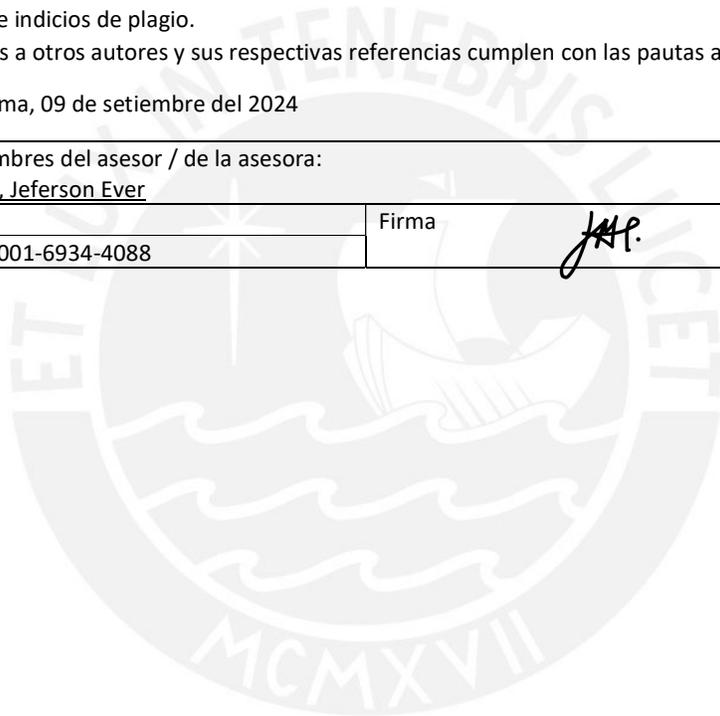
Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DEL SUELO NO SATURADO EN EL ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN Y ESTABILIDAD DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN CON ALTO CONTENIDO DE FINOS, de los(as) autores(as) Rosario Huarcaya Quiquia y Emerson Lucas Gonzales

Dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 21%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 02/09/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 09 de setiembre del 2024

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Menacho Caso, Jeferson Ever</u>	
DNI: 44851113	Firma
ORCID: 0000-0001-6934-4088	



## RESUMEN

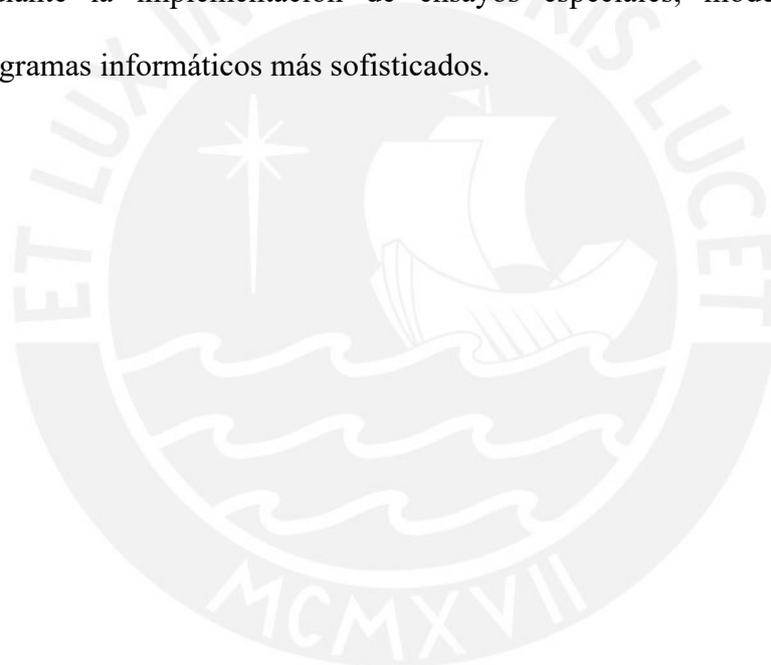
En la industria minera, es fundamental asegurar que las pilas de lixiviación sean diseñadas de manera óptima para mejorar la eficiencia en la extracción de minerales y proteger el entorno. Sin embargo, la influencia de los parámetros de suelo parcialmente saturado en el diseño de la infiltración y estabilidad de estas estructuras, especialmente en aquellas con alto contenido de finos, ha sido poco explorada. Esta tesis se enfoca en abordar esta necesidad de comprensión al evaluar cómo los parámetros de suelos parcialmente saturados influyen en la infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos, utilizando un modelo geotécnico en elementos finitos en Plaxis 2D.

La metodología empleada en la investigación se estructuró en varias etapas clave. En primer lugar, se llevó a cabo una caracterización geotécnica del suelo, abordando parámetros de resistencia, deformación y permeabilidad para comprender su comportamiento. Posteriormente, se procedió a la calibración de parámetros mediante modelos específicos. Seguidamente, se construyeron modelos desacoplados para el análisis de infiltración y estabilidad, los cuales fueron previamente validados y verificados utilizando modelos simples. Una vez completado este proceso, se aplicaron estos modelos al caso de estudio de la pila de lixiviación, centrándose en la evaluación de la infiltración, estabilidad y deformación. Finalmente, se interpretaron los resultados obtenidos para comprender la influencia de los parámetros no saturados en los análisis realizados.

Los resultados obtenidos revelan que los parámetros del suelo parcialmente saturado, como la succión, influyen tanto en la infiltración de la solución lixiviada como en la estabilidad estructural. Se observa que la variación en la permeabilidad, debido a la succión del cuerpo mineral, incide significativamente en la velocidad de infiltración y, por ende, en la eficiencia de la recuperación del mineral. Además, se constata que la succión contribuye positivamente a

la estabilidad de la estructura al aumentar el factor de seguridad, lo que implica un incremento en la resistencia al corte del suelo.

Este estudio sugiere que la integración de la mecánica de suelos parcialmente saturada en el diseño de pilas de lixiviación es fundamental para la toma de decisiones, tanto en términos de seguridad como de economía del proyecto. Se recomienda que este enfoque sea complementario a los análisis comúnmente realizados mediante la mecánica de suelos clásica, que considera al suelo en un estado completamente saturado o seco. Además, se recomienda continuar la investigación en este campo, con el objetivo de mejorar la caracterización geotécnica mediante la implementación de ensayos especiales, modelos constitutivos avanzados y programas informáticos más sofisticados.



## DEDICATORIA

*A mis padres por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional.*

*Gracias por ser mi mayor soporte en todo momento. A mis hermanos Jorge y Martín por sus enseñanzas y ser ejemplo de perseverancia para alcanzar mis metas. A mis amigos por su cariño y acompañamiento en mi etapa universitaria. Esta tesis está dedicada a ustedes, con profundo agradecimiento y humildad.*

***Rosario Belen Huarcaya Quiquia***

*Dedico este trabajo a mí mismo, como testamento de mi dedicación y esfuerzo en la búsqueda del conocimiento y la mejora continua. A mis padres y hermana, quienes han sido mi apoyo incondicional en cada paso de este camino académico. A mis dos angelitos, mi abuela Angelica y mi tío Washington, cuyo amor y sabiduría siguen guiándome desde el cielo. Su inspiración y legado siempre estarán presentes en cada logro que alcance.*

***Emerson Raul Lucas Gonzales***

## AGRADECIMIENTO

*En el trayecto de esta tesis, nos hemos beneficiado del valioso aporte de una red diversa de personas e instituciones que han sido pilares fundamentales en su realización. Por ello, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Msc. Jeferson Menacho Caso, cuya disposición para compartir sus conocimientos, brindar orientación constante y revisar nuestros avances con meticulosidad fueron elementos cruciales que nos impulsaron hacia nuestros objetivos.*

*Asimismo, extendemos nuestro reconocimiento a la empresa Anddes por facilitarnos la información esencial que sustentó esta investigación. En particular, agradecemos al Ing. Denys Parra Murrugarra por su destacada labor como docente y su generosidad al colaborar con estudiantes interesados en la investigación en el Perú. También expresamos nuestra gratitud al Ing. Ronald Landa, quien, en su rol de asesor, contribuyó significativamente a través de su revisión experta de nuestros avances.*

*Además, queremos agradecer a todas las demás personas que, en momentos específicos, nos brindaron su apoyo, consejo e información clave. Cada interacción y contribución, por mínima que haya sido, fue fundamental para el desarrollo y la calidad de esta tesis.*

*Gracias por ser parte de este viaje y por hacer posible la realización de esta tesis.*

## ÍNDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>i</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>iv</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Justificación.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2.1. Objetivo general.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2.2. Objetivos específicos .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Hipótesis.....</b>	<b>3</b>
<b>1.4. Alcance .....</b>	<b>3</b>
<b>1.5. Metodología .....</b>	<b>4</b>
<b>1.5.1. Estudio del caso.....</b>	<b>4</b>
<b>1.5.2. Caracterización geotécnica .....</b>	<b>5</b>
<b>1.5.3. Implementación del modelo en Plaxis 2D .....</b>	<b>5</b>
<b>1.5.4. Evaluación de Resultados.....</b>	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. Pilas de lixiviación.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.1. Generalidades.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.2. Análisis geotécnicos en pilas de lixiviación .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.3. Hidrología superficial y balance de agua.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2. Suelos parcialmente saturados .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.1. Introducción .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.2. Fases de un suelo parcialmente saturado.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.3. Conceptos básicos de succión.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.4. Soil Water Characteristic Curve (SWCC) .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.5. Función de conductividad hidráulica.....</b>	<b>27</b>

2.2.6.	Resistencia al corte en suelos no saturados.....	29
2.3.	Análisis de infiltración .....	32
2.3.1.	Fenómeno del flujo en medios porosos.....	32
2.3.2.	Flujo en estado estacionario .....	33
2.3.3.	Flujo en estado transitorio .....	35
2.4.	Análisis de estabilidad de taludes .....	36
2.4.1.	Mecanismos de falla de taludes.....	37
2.4.2.	Métodos de Evaluación de estabilidad .....	38
2.4.3.	Criterios de aceptabilidad .....	40
2.5.	Método de elementos finitos.....	41
2.5.1.	Consideraciones teóricas .....	42
2.5.2.	Tipos de cálculos mecánicos: deformación plana y axilsimetría .....	43
2.5.3.	Método de reducción de resistencia lineal .....	45
2.5.4.	Modelo constitutivo Mohr Coulomb .....	46
2.5.5.	Modelo constitutivo Hardening Soil.....	47
2.6.	Estado del arte.....	49
<b>CAPÍTULO 3: CASOS DE VALIDACIÓN Y VERIFICACIÓN .....</b>		<b>54</b>
3.1.	Caso I: Esfuerzos efectivos de Bishop .....	54
3.1.1.	Descripción .....	54
3.1.2.	Modelo conceptual .....	55
3.1.3.	Propiedades del material.....	56
3.1.4.	Resultados y discusión .....	57
3.2.	Caso II: Análisis de estabilidad de taludes con infiltración por lluvia .....	60
3.2.1.	Descripción .....	60
3.2.2.	Modelo conceptual .....	60
3.2.3.	Propiedades del material.....	61
3.2.4.	Resultados y discusión .....	62

<b>3.3. Caso III: Consolidación unidimensional.....</b>	<b>65</b>
3.3.1. Descripción .....	65
3.3.2. Modelo conceptual .....	65
3.3.3. Propiedades del material.....	67
3.3.4. Resultados y discusión .....	67
<b>3.4. Caso IV: Análisis de consolidación de un terraplén sobre suelo blando .....</b>	<b>70</b>
3.4.1. Descripción .....	70
3.4.2. Modelo conceptual .....	70
3.4.3. Propiedades del material.....	71
3.4.4. Resultados y discusión .....	72
<b>3.5. Caso V: Análisis de infiltración transitoria.....</b>	<b>74</b>
3.5.1. Descripción .....	74
3.5.2. Modelo conceptual .....	74
3.5.3. Propiedades del material.....	75
3.5.4. Resultados y discusión .....	78
<b>CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO: PILA DE LIXIVIACIÓN .....</b>	<b>84</b>
4.1. Descripción .....	84
4.2. Modelo conceptual .....	85
4.3. Propiedades del material.....	87
<b>CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>92</b>
5.1. Análisis de infiltración .....	92
5.2. Análisis de estabilidad .....	92
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>98</b>
6.1. Conclusiones .....	98
6.2. Recomendaciones .....	100
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>101</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama de la metodología empleada.....	4
Figura 2	Ciclo de lixiviación en una pila .....	7
Figura 3	Perfil típico de una pila de lixiviación .....	9
Figura 4	Balance de agua para pilas de lixiviación .....	12
Figura 5	Fases del suelo parcialmente saturado .....	14
Figura 6	Medida de la succión total, mátrica y osmótica en una arcilla compactada .....	17
Figura 7	Sistema de placa de succión.....	19
Figura 8	Método de traslación de ejes.....	20
Figura 9	Histéresis de la curva característica de la curva suelo agua.....	21
Figura 10	Modelo general de la curva característica suelo-agua .....	22
Figura 11	Curva característica suelo-agua bimodal .....	23
Figura 12	Resistencia al corte no lineal en suelos no saturados.....	30
Figura 13	Criterio de falla de Mohr Coulomb Extendido .....	31
Figura 14	Principio de continuidad .....	35
Figura 15	Falla en talud.....	37
Figura 16	Mecanismo de falla de un talud .....	38
Figura 17	Métodos de cálculo de estabilidad de taludes .....	40
Figura 18	Tensor de tensiones.....	43
Figura 19	Representación de la deformación plana y axilsimetría.....	44
Figura 20	Falla de un talud y análisis con el círculo de Mohr .....	45
Figura 21	Proceso del análisis de estabilidad de taludes.....	46
Figura 22	Superficie de fluencia Mohr Coulomb.....	47
Figura 23	Principales características del modelo Hardening Soil .....	49
Figura 24	Modelo conceptual para el caso I.....	55
Figura 25	Resultados de esfuerzos efectivos y succión en Plaxis .....	59
Figura 26	Modelo conceptual para el caso II .....	60
Figura 27	Resultados de análisis de estabilidad del escenario 1 .....	63

Figura 28	Resultados de análisis de estabilidad del escenario 2 .....	63
Figura 29	Resultados de análisis de estabilidad del escenario 3 .....	64
Figura 30	Resultados de desplazamientos totales del escenario 3 .....	64
Figura 31	Resultados de saturación del escenario 3 .....	65
Figura 32	Modelo conceptual para el caso III.....	66
Figura 33	Resultados de exceso de presión de poros para $t=0.2$ días, $t=2$ días y $t=20$ días .....	68
Figura 34	Resultados de exceso de presión de poros en el tiempo .....	69
Figura 35	Resultados de exceso de presión de poros relativo para cada tiempo de consolidación y por método numérico y analítico .....	69
Figura 36	Modelo conceptual para el caso IV.....	70
Figura 37	Resultados de desplazamiento total del modelo en Plaxis.....	72
Figura 38	Exceso de presión de poros en el tiempo .....	73
Figura 39	Desplazamiento vertical en el tiempo .....	73
Figura 40	Modelo conceptual para el caso V .....	75
Figura 41	Curva característica suelo agua.....	77
Figura 42	Función de conductividad hidráulica.....	77
Figura 43	Perfil de succión en estado estacionario .....	79
Figura 44	Resultados de succión obtenidos en Plaxis y ejemplo en Lu & Likos (2004) .....	80
Figura 45	Resultados de succión para $I=0.1ks$ en Plaxis .....	81
Figura 46	Resultados de succión y saturación para $I=0.1Ks$ .....	82
Figura 47	Perfiles de succión y saturación para $t=20$ h con diferentes tasas de infiltración .....	83
Figura 48	Modelo conceptual para el caso de estudio.....	85
Figura 49	Ajuste lineal de esfuerzo normal y esfuerzo de corte .....	88
Figura 50	Curva de ajuste con Van Genuchten (1980) .....	90
Figura 51	Función de permeabilidad relativa del mineral.....	90
Figura 52	Resultados de la saturación para los 5 primeros lifts de mineral .....	87
Figura 53	Resultados de la saturación para los 5 últimos lifts de mineral .....	88
Figura 54	Resultados de la succión para los 5 primeros lifts de mineral .....	90
Figura 55	Resultados de la succión para los 5 últimos lifts de mineral.....	91

Figura 56	Factor de seguridad en el último ciclo de riego .....	92
Figura 57	Factor de seguridad al cierre .....	93
Figura 58	Desplazamientos totales al cierre de la pila .....	94
Figura 59	Desplazamientos totales al cierre de la pila .....	94
Figura 60	Desplazamiento total en la zona de interfase .....	95
Figura 61	Resultados de esfuerzos totales y efectivos verticales .....	96
Figura 62	Diagrama de esfuerzos efectivos, esfuerzos totales y presión de poros.....	97

### LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Modelos de ajuste de la curva característica .....	26
Tabla 2	Modelos de estimación de la función de conductividad hidráulica.....	27
Tabla 3	Factores de seguridad.....	40
Tabla 4	Resumen de condiciones de borde del modelo .....	55
Tabla 5	Parámetros para el modelo lineal elástico .....	56
Tabla 6	Parámetros de ajuste de la SWCC (Van Genuchten Model).....	56
Tabla 7	Resumen de condiciones de borde del modelo .....	61
Tabla 8	Parámetros para el modelo Hardening soil.....	61
Tabla 9	Resumen de condiciones de borde del modelo .....	66
Tabla 10	Parámetros para el modelo lineal elástico.....	67
Tabla 11	Resumen de condiciones de borde del modelo .....	71
Tabla 12	Parámetros para el modelo Mohr Coulomb para el terraplén .....	71
Tabla 13	Resumen de condiciones de borde del modelo .....	75
Tabla 14	Parámetros para el modelo lineal elástico.....	76
Tabla 15	Parámetros para la curva característica suelo agua.....	76
Tabla 16	Parámetros del modelo de Van Genuchten de la curva característica del suelo .....	78
Tabla 17	Resumen de tiempo de construcción e infiltración de la pila .....	86
Tabla 18	Resumen de condiciones de borde del modelo .....	86

Tabla 19	Parámetros para el modelo Hardening Soil .....	88
Tabla 20	Parámetros de Van Genuchten de la curva característica del mineral .....	91

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A	Resultados de laboratorio.....	106
ANEXO B	Calibración del modelo constitutivo hardening soil model .....	129
ANEXO C	Ajuste de la curva característica suelo agua y de la función de conductividad hidráulica .....	132



## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Justificación**

El sector minero en el Perú ha desempeñado un papel fundamental en el crecimiento económico y el desarrollo del país, representando una porción significativa de las exportaciones totales y contribuyendo de manera sustancial al Producto Bruto Interno (PBI) con un 14.9 % (Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, 2022). En consonancia con su importancia económica, el sector ha reafirmado su compromiso con prácticas sostenibles y la preservación del medio ambiente.

Este compromiso se ha visto reforzado por la creciente demanda de las autoridades nacionales de la minería para que las empresas adopten estándares más rigurosos en el diseño, construcción, operación y control de las estructuras asociadas a su actividad. Esto se debe en parte a la necesidad de prevenir posibles desastres ambientales, como el caso de la presa de relaves Fundao en Brasil, cuya ruptura en 2015 causó graves daños ambientales en sus alrededores (Constantino da Vitória et al., 2019). En este contexto, un ejemplo de estructuras críticas son las pilas de lixiviación, cuyo análisis exhaustivo debe considerar el control del flujo resultante de las precipitaciones y las tasas de riego, dado que dichos factores pueden dar lugar a la formación de zonas atrapadas o bolsones de solución ácida, comprometiendo la estabilidad y reduciendo la eficiencia en la recuperación del mineral lixiviado.

En respuesta a estas demandas y desafíos, el desarrollo de técnicas computacionales y modelos numéricos basados en la mecánica de suelos parcialmente saturada se ha convertido en una herramienta valiosa para comprender y predecir el comportamiento de estructuras complejas. Estos modelos permiten una evaluación más precisa de la distribución de esfuerzos efectivos, grado de saturación, contenidos volumétricos de agua, potencial de succión, estado de deformaciones y estado tensional del suelo, acercándose así a las condiciones reales del terreno.

Todo lo expuesto anteriormente motivó la realización de este estudio, el cual busca mostrar la influencia de la succión al analizar la infiltración bajo un régimen de flujo transitorio, y la estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos considerando parámetros de la mecánica de suelos no saturada. Los resultados de este estudio no solo ampliarán la comprensión de los efectos de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de estabilidad e infiltración, sino que también proporcionarán directrices más precisas para el diseño de estructuras críticas como las pilas de lixiviación, evitando así el sobredimensionamiento inherente a la aplicación exclusiva de la mecánica de suelos clásica.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Analizar y evaluar la influencia de los parámetros de suelo parcialmente saturado en la infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos, mediante la implementación de un modelo geotécnico por elementos finitos.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Determinar y seleccionar los parámetros geotécnicos requeridos para el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos
- Ajustar la curva característica suelo-agua (SWCC) del mineral dispuesto en una pila de lixiviación empleando el modelo de Van Genuchten (1980)
- Desarrollar un modelo geotécnico en elementos finitos de una pila de lixiviación en el programa Plaxis 2D para simular las condiciones de flujo no saturado, determinar las deformaciones y calcular el factor de seguridad, utilizando el modelo constitutivo elastoplástico Hardening Soil y la función de conductividad hidráulica del modelo de Van Genuchten (1980)

- Identificar la formación de bolsones de solución ácida y el grado de saturación de la pila durante sus etapas de recrecimiento y/o operación a través del modelo de infiltración

### **1.3. Hipótesis**

- Las condiciones de suelo parcialmente saturado y flujo transitorio impactan directamente en la tasa de infiltración y en la resistencia al corte de una pila de lixiviación con alto contenido de finos.
- La tasa de infiltración disminuye en función al recrecimiento de los bancos de la pila generando el incremento del grado de saturación de la estructura durante su operación.
- La succión o presión de poro negativa, aplicada en el análisis de estabilidad, aumenta el factor de seguridad ya que genera una cohesión aparente que incrementa su resistencia cortante.

### **1.4. Alcance**

El objetivo de esta investigación es analizar en detalle la aplicación de la Mecánica de Suelos Parcialmente Saturados en el diseño de una pila de lixiviación con alto contenido de finos, ubicada en la sierra norte del Perú. Se ofrecerá un marco teórico integral que incluirá los principios de ingeniería relacionados con las pilas de lixiviación, así como los métodos para analizar la infiltración y la estabilidad de taludes, junto con la utilización del método de elementos finitos en geotecnia. Asimismo, se implementarán modelos computacionales en el software Plaxis 2D, considerando parámetros clave de la mecánica de suelos no saturados, como las curvas características suelo-agua y la función de conductividad hidráulica. Finalmente, se presentarán las conclusiones basadas en los resultados obtenidos, junto con recomendaciones específicas para mejorar el diseño de estas estructuras.

## 1.5. Metodología

Para conseguir los objetivos planteados, se propone seguir la metodología que se muestra en la Figura 1.

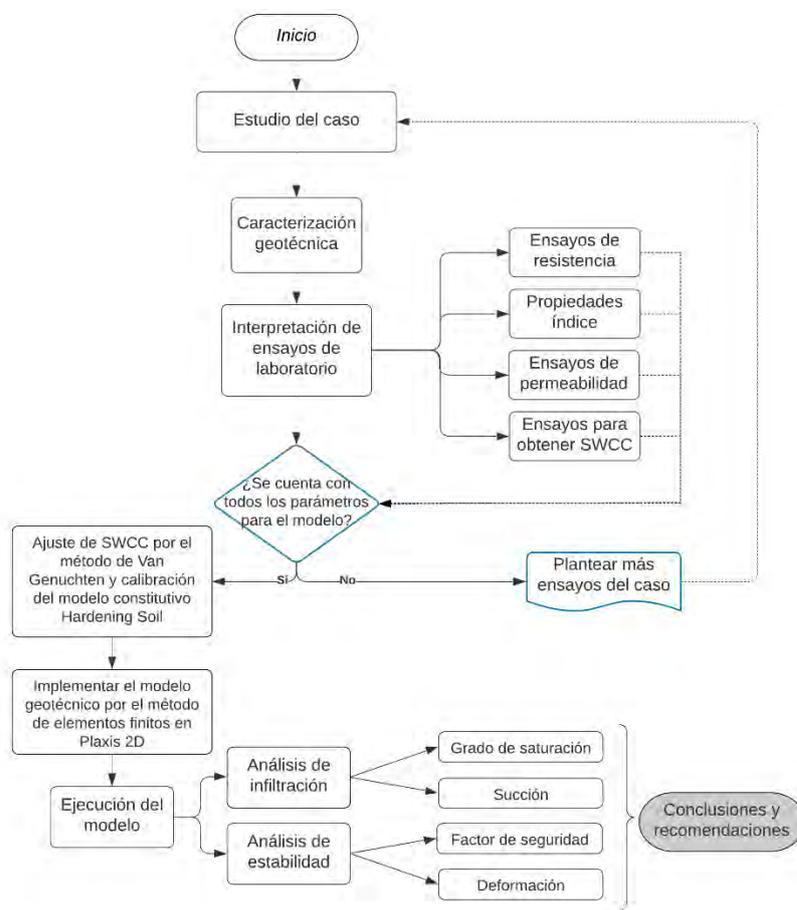


Figura 1 Diagrama de la metodología empleada

Fuente: Elaboración propia

### 1.5.1. Estudio del caso

La recopilación y evaluación de datos relevantes para el diseño de la pila de lixiviación se llevará a cabo a partir de una variedad de informes técnicos, ensayos de laboratorio y tesis de grado. Esta recopilación inicial incluirá la geomorfología de la zona, la descripción litológica, las condiciones climáticas y resultados de campo y laboratorio de campañas geotécnicas.

### **1.5.2. Caracterización geotécnica**

A partir del mapeo geológico-geotécnico y una serie de ensayos de laboratorio, se determinará los parámetros geotécnicos necesarios para el análisis de la pila de lixiviación. Estos parámetros incluirán propiedades índices del material, resistencia al corte, la curva característica de suelo (SWCC), la función de conductividad hidráulica, pesos específicos y otros factores clave para el diseño y la evaluación precisa de la estructura.

### **1.5.3. Implementación del modelo en Plaxis 2D**

Utilizando los datos y parámetros obtenidos durante la caracterización geotécnica, se desarrollará un modelo detallado de la pila de lixiviación en el software de elementos finitos Plaxis 2D. Este proceso incluirá la definición de los materiales y sus parámetros correspondientes, la construcción de malla del modelo, la asignación de condiciones de borde específicas y la creación de escenarios detallados para los análisis. El modelo constitutivo utilizado para la simulación es el modelo elastoplástico (Hardening soil model), el cual ha sido calibrado mediante resultados de ensayos triaxiales CD o consolidados drenados.

### **1.5.4. Evaluación de Resultados**

La etapa final de la metodología comprenderá una evaluación exhaustiva de los resultados de flujo de agua y factores de seguridad derivados de los análisis de infiltración y estabilidad. Además, se verificarán las deformaciones en la cimentación. Este proceso permitirá confirmar las hipótesis iniciales y presentar conclusiones y recomendaciones relevantes para perfeccionar el diseño y la implementación de la pila de lixiviación.

## **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE**

### **2.1. Pilas de lixiviación**

#### **2.1.1. Generalidades**

Una pila de lixiviación funciona como un reactor de lecho de partículas, operando bajo condiciones transitorias de flujo no saturado. En este proceso, la solución lixivante se aplica en la parte superior de la pila y se filtra a través de los espacios entre las partículas minerales (Guevara & Hermoza, 2015). Desde una perspectiva de ingeniería civil, puede describirse como una estructura construida de manera escalonada y por fases, en la cual se depositan materiales extraídos a cielo abierto (ROM) sobre canchas impermeables. Estas pilas pueden alcanzar alturas de entre 60 y 80 metros, aunque se han documentado casos donde superan los 120 metros.

De manera resumida, el proceso de lixiviación en pilas comienza con la aplicación de una solución ácida al terreno mediante un sistema de riego, que puede ser por goteo, aspersion o una combinación de ambos. Esta solución percola por gravedad a través del medio poroso, disolviendo el mineral y transportándolo hacia el fondo de la pila, donde es captado por un sistema de recolección de solución implementado en la base de la estructura.

Este sistema lleva la solución “rica” o PLS (Pregnant Leaching Solution) hacia las pozas de proceso a través de unos canales de derivación. En las pozas de proceso se procede a la obtención de los metales y a la recuperación de la solución “gastada o pobre”, que serán nuevamente conducidas a una poza de refinado, que se usa como solución para un nuevo ciclo de riego.

En la Figura 2 se muestra una representación gráfica del ciclo de lixiviación en un pad de lixiviación de pilas con material de mina aglomerado.

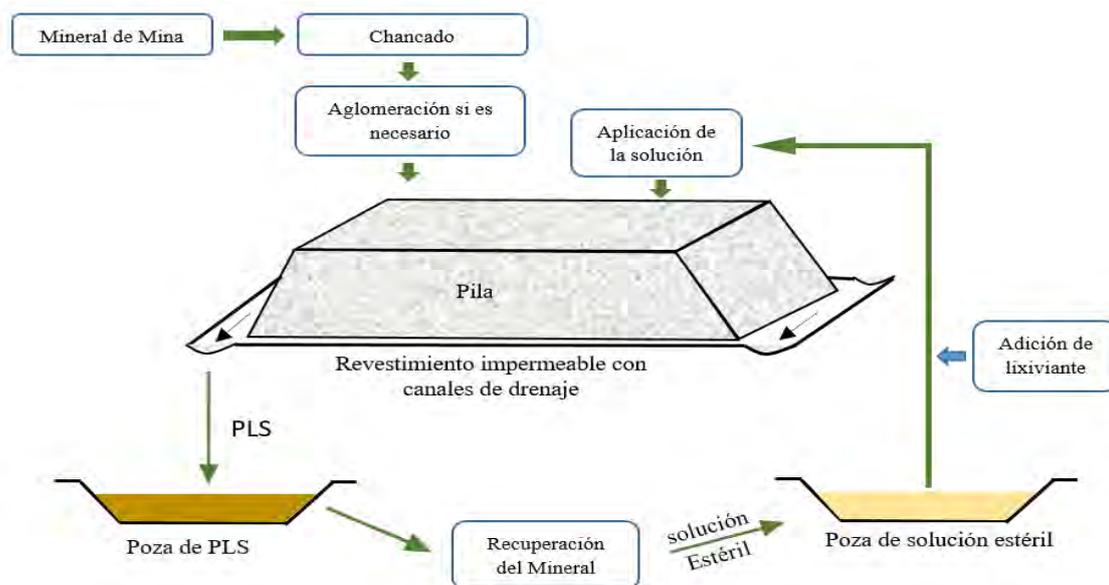


Figura 2 Ciclo de lixiviación en una pila

Fuente: Dirk & van Zyl (1988)

## I. Componentes de una pila de lixiviación

### a. Relleno mineral:

La conformación de la pila involucra la disposición del relleno mineral en capas sueltas, controladas y con un nivel de humedad reducido, apiladas en su estado natural. El tamaño de las partículas varía desde rocas obtenidas directamente del minado hasta tamaños tipo gravas y arenas obtenidas mediante un proceso de chancado o trituración. La colocación del mineral puede darse con la implementación de fajas transportadoras o simplemente por el acarreo y nivelación de un bulldozer y/o cargador frontal.

### b. Cimentación:

La fundación debe ser evaluada mediante estudios geotécnicos tanto de campo como de laboratorio. Se debe remover todo material inadecuado, como suelos orgánicos, turbas, arcillas expansivas o colapsables, y limos blandos. El criterio de inspección para determinar el nivel de cimentación adecuado es encontrar un basamento rígido o un material que no ceda, capaz de soportar las cargas y prevenir los asientos diferenciales significativos.

**c. Sistema de subdrenaje:**

Consiste en una red de tubos ranurados fabricados con polietileno de alta densidad, con diámetros que oscilan entre 100 y 300 milímetros. Estas tuberías se colocan dentro de una zanja que se rellena con grava y se cubre con un geotextil no tejido. Este sistema de subdrenaje está diseñado para recoger las corrientes de agua subterráneas aledañas a la construcción del pad, dirigiéndolas hacia una poza destinada al monitoreo del subdrenaje o posibles fugas.

**d. Sistema de revestimiento:**

Se compone de una geomembrana con textura en una sola cara (SST), fabricada con polietileno lineal de densidad baja. Se coloca sobre la superficie de un suelo poco permeable o un Geosintético como el GCL (Geosynthetic Clay Liner). Este suelo de baja permeabilidad puede ser obtenido de canteras cercanas o adquirido externamente, siempre que cumpla con los criterios especificados en las normas de diseño.

Para proteger la geomembrana de posibles perforaciones o daños por impactos durante la colocación del relleno mineral, se puede aplicar una capa de material drenante de sobrevestimiento (overliner).

Según Ale, Clariá y Bonalumi (2011), si el sistema de revestimiento presenta una baja resistencia al corte, es recomendable emplear pendientes más suaves en la subrasante. De lo contrario, es necesario realizar mejoras en la estabilidad del pie del apilamiento, ya que esta es la zona más propensa a fallos.

**e. Sistema de colección del PLS:**

Se compone de una serie de tuberías sistemáticamente distribuidas sobre el revestimiento. Estas tuberías, clasificadas comúnmente como laterales y principales, están hechas de polímeros tipo HDPE perforadas de pared doble. Su función principal es la de coleccionar la solución lixiviada y dirigirlas hacia las pozas de procesos ya sea de forma directa o mediante



### **2.1.2. Análisis geotécnicos en pilas de lixiviación**

El análisis abarca una serie de evaluaciones fundamentales que garantizan la integridad y el correcto funcionamiento de la estructura. Estas evaluaciones incluyen la revisión de la infiltración para reducir la pérdida de soluciones lixiviadas, el estudio de la estabilidad de los taludes para evitar deslizamientos, el monitoreo de las deformaciones para asegurar la integridad estructural, y la evaluación del riesgo de licuación y colapso para gestionar los riesgos asociados con las condiciones del suelo y la carga hidráulica. Estos procesos son esenciales para prevenir fallos y asegurar tanto la seguridad como la eficiencia en las operaciones de lixiviación.

#### **I. Análisis de infiltración**

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua se desplaza desde la superficie hacia el interior del suelo, influenciada principalmente por dos fuerzas: la gravedad y la acción capilar. En el contexto de las pilas de lixiviación, este análisis cobra relevancia cuando el proyecto está sometido a precipitaciones o a un sistema de riego de soluciones, ya que es necesario comprender las trayectorias del flujo de fluidos dentro del medio poroso.

#### **II. Análisis de estabilidad**

El estudio de la estabilidad de taludes es uno de los análisis más comunes y obligatorios en numerosos proyectos de ingeniería. Su objetivo principal es identificar la capacidad del suelo para resistir esfuerzos de cizalla, garantizando que pueda soportar las tensiones que podrían desencadenar fallos o deslizamientos. Este análisis puede llevarse a cabo teniendo en cuenta diferentes variables, como la actividad sísmica, el flujo de agua, la interacción entre el suelo y la estructura, así como las fases constructivas, entre otros factores.

En el caso de las pilas de lixiviación, este tipo de análisis es fundamental para evaluar la seguridad de las operaciones en cada fase o ciclo de producción previsto. Por lo tanto, es crucial implementar un modelo computacional que analice la estabilidad y contar con un sistema

adecuado de monitoreo y control, que también funcione como base para futuros estudios retrospectivos.

### **III. Potencial de licuación y de colapso del suelo**

Una pila de lixiviación puede sufrir el fenómeno de licuación si el mineral a lixiviar concentra zonas saturadas con imposibilidad de drenaje, las cuales ante un movimiento sísmico podrían reorganizar sus partículas provocando un incremento de las presiones intersticiales. Estas presiones, al igualarse a los esfuerzos totales, generan que la resistencia al corte se haga nula y se formen fallas focalizadas en la pila. Por esta razón, es necesario realizar un análisis de licuación cuando se presentan materiales granulares poco densos o suelos finos mal gradados con un alto nivel de saturación.

El riesgo de colapso en las pilas de lixiviación puede originarse por diversos factores, tales como la saturación excesiva del material, un incremento abrupto de la carga debido a condiciones hidráulicas desfavorables, y la presencia de materiales finos propensos a la compresión y licuefacción. La acumulación de líquidos y la insuficiencia de un drenaje adecuado pueden reducir la carga de soporte del suelo, incrementando así la probabilidad de colapso de la estructura. Por lo tanto, una gestión eficaz de la permeabilidad del suelo es esencial para prevenir este tipo de fallas.

#### **2.1.3. Hidrología superficial y balance de agua**

El análisis de la hidrología superficial y del balance hídrico está intrínsecamente ligado a las características particulares de cada sitio. Las condiciones climáticas varían según la ubicación geográfica, mientras que la configuración del terreno determina si es necesario desviar el agua superficial o implementar otras estrategias para su manejo (Ministerio de Energía y Minas, 2009). Aunque la gestión de estas variables puede ser compleja, su estimación es posible utilizando datos meteorológicos y fisiográficos específicos de la zona de estudio.

El balance hídrico en una pila de lixiviación comprende dos circuitos principales: el circuito del proceso de lixiviación y el ciclo natural del agua. El primero se refiere al flujo de fluidos dentro del proceso de lixiviación, que suele ser constante y predecible, e incluye la solución, el agua de reposición y la adición de reactivos. El segundo circuito considera las fluctuaciones aleatorias a lo largo del tiempo, como las ocasionadas por la precipitación, el deshielo y la evaporación, que afectan la pila. La Figura 4 ilustra estos circuitos.

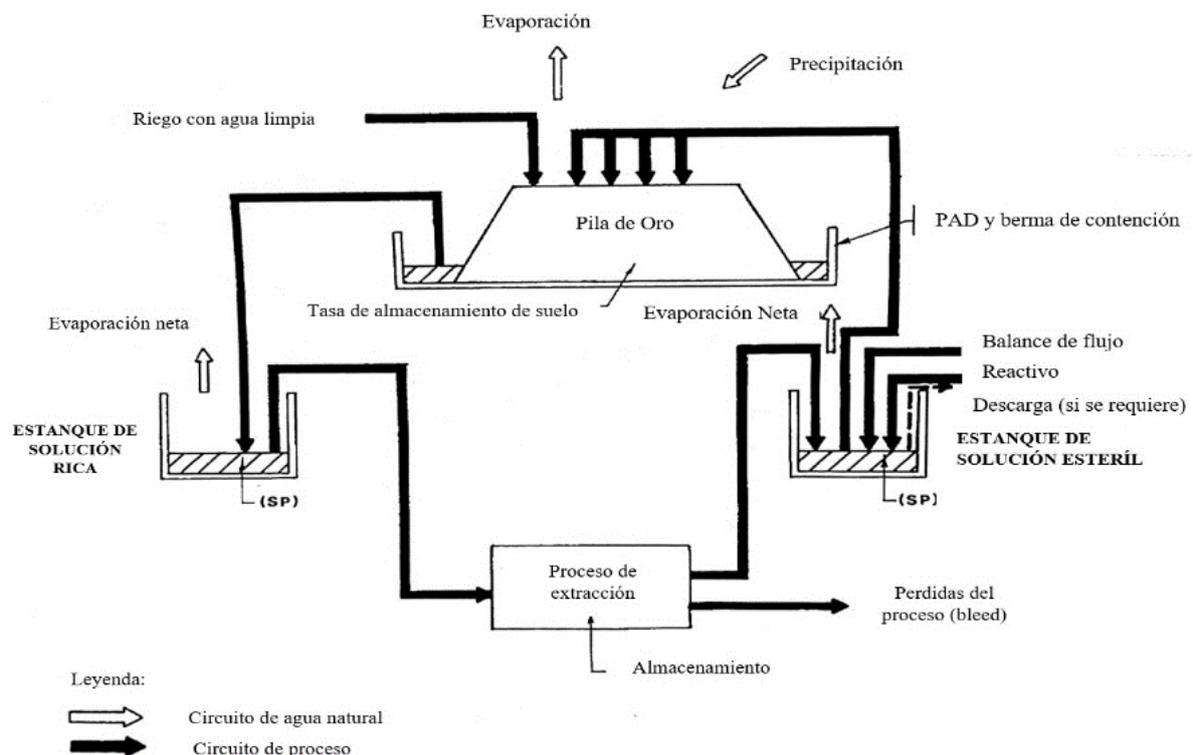


Figura 4 Balance de agua para pilas de lixiviación

Fuente: Dirk & van Zyl (1988)

## 2.2. Suelos parcialmente saturados

### 2.2.1. Introducción

A lo largo de los últimos 50 años, ha surgido la necesidad de replantear la mecánica de suelos clásica, el cual solía representar al suelo exclusivamente en estados saturados o secos, lo cual evidentemente simplificaba el comportamiento natural del suelo. La mecánica de suelos no saturados ha ganado relevancia como un campo de estudio intermedio, centrado en la interacción dinámica entre las partículas sólidas, el contenido de agua y el aire.

Este tipo de suelos se encuentra en la franja comprendida entre el nivel freático y la superficie, donde las presiones en los poros son negativas debido a la succión, una propiedad que está directamente relacionada con la capacidad del suelo para retener agua. Estos suelos se pueden encontrar en cualquier depósito geológico. La principal fuente de formación de este suelo se debe a factores climáticos locales y regionales, que al interactuar con el suelo por un proceso de evaporación o evapotranspiración mediante las cubiertas vegetales provoca la formación de presiones negativas.

Un suelo insaturado podría ser un suelo residual, un depósito lacustre, una formación de roca madre, entre otros. Sin embargo, hay ciertas categorías geológicas de suelos con presiones negativas en los poros que han sido objeto de considerable atención en la investigación, tales como los suelos expansivos y los residuales.

Los fenómenos asociados a los terrenos no saturados pueden ser clasificados en flujo, esfuerzo y deformación. El estudio del flujo comprende las propiedades hidráulicas y los principios físicos de interacción entre las fases. En cuanto a los esfuerzos, los suelos parcialmente saturados no siguen el principio de tensiones efectivas propuesta por Terzaghi, por lo que es necesario considerar los efectos de succión en su análisis. La deformación, por su parte, está altamente influenciado por las variaciones del contenido de humedad del terreno, el cual es un problema notorio de los suelos expansivos o colapsables (Lu and Likos, 2004).

### **2.2.2. Fases de un suelo parcialmente saturado**

Los suelos saturados y los suelos secos forman un sistema de dos fases: partículas sólidas y agua en el caso de los suelos saturados, y partículas sólidas y aire en los suelos secos. En situaciones intermedias, cuando el suelo está parcialmente saturado o no saturado, se introducen tres fases en interacción: partículas sólidas, agua y aire. Según Fredlund y Morgenstern (1977), se puede considerar incluso una cuarta fase, que es la interfase aire-agua,

o membrana contráctil, la cual, debido a sus propiedades únicas y su contorno definido, puede ser tratada como una fase adicional.

Desde la perspectiva del peso y el volumen, los suelos no saturados pueden considerarse un sistema trifásico, ya que el volumen de la membrana contráctil es insignificante y su peso prácticamente imperceptible.

En la Figura 5, se muestra las cuatro fases distintivas de un suelo no saturado.

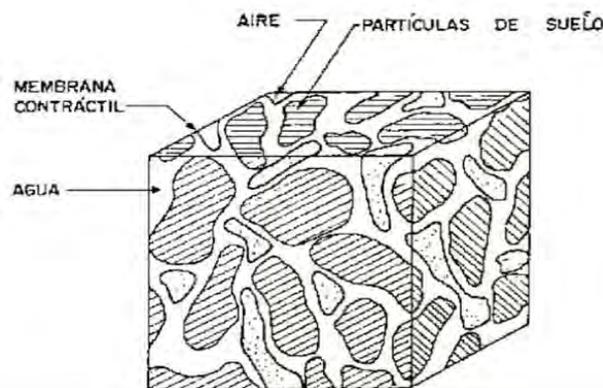


Figura 5 Fases del suelo parcialmente saturado

Fuente: Fredlund & Rahardjo (1993)

- I. **Fase sólida:** compuesta por partículas sólidas que constituyen la estructura del suelo. Estas partículas pueden diferenciarse por su forma, composición, tamaño, mineralogía, textura, entre otras características.
- II. **Fase líquida:** generalmente constituida por agua, que puede contener sales sustanciales disueltas que comúnmente presenta repercusión en la resistencia y el cambio de volumen del suelo. El agua puede ser clasificado en agua capilar, agua absorbida y agua gravitacional.
- III. **Fase gaseosa:** compuesta por aire y vapor. En lo que respecta al aire, la característica que lo define es su compresibilidad. Es importante medir este parámetro en los ensayos de laboratorio, pues en base a estos cálculos se hace una mejor representatividad del estado no saturado del suelo.

**IV. Fase de membrana contráctil:** La característica más notable de la membrana contráctil es su capacidad para generar una fuerza de tracción. Se comporta como una membrana elástica bajo tensión que se intensifica en toda la estructura del suelo (Davies & Rideal, 1963). Es interesante observar que los insectos como la "water spider" caminan sobre la piel contráctil, y aquellos como el "backswimmer" caminan sobre la parte inferior de la piel contráctil (Milne, L & Milne, M, 1978).

### 2.2.3. Conceptos básicos de succión

Existen múltiples definiciones para el concepto de succión, que varían en complejidad.

Aitchison & Richards (1965) describen la succión total como la cantidad de trabajo necesaria por unidad de agua pura para transportar de manera reversible e isotérmica una cantidad infinitesimal de agua desde un depósito de agua pura a una elevación específica bajo presión atmosférica (López & Mendoza, 2016).

Por su parte, Lee & Wray (1995) definen la succión como la energía que mide la capacidad del suelo para retener agua. Ellos explican que cuando el agua libre se introduce en el suelo, este puede absorberla o retenerla. Para que el agua adsorbida sea liberada, se requiere de una energía externa que contrarreste las fuerzas de retención. Así, la energía aplicada por unidad de volumen de agua se conoce como succión del suelo.

Dado que estas definiciones pueden resultar algo complejas, de manera simplificada se puede definir la succión como la energía requerida para que el suelo retenga el agua, la cual está influenciada por diversos factores como el grado de saturación, la distribución del medio poroso y las condiciones del entorno.

#### I. Componentes de la succión del suelo

Las diferencias de energía entre los medios generan un potencial energético que impulsa el movimiento del fluido desde un medio de mayor energía hacia otro de menor energía. El flujo de agua en los suelos está influenciado por el potencial total del agua presente en el suelo, que

se refiere a la energía libre disponible para realizar trabajo. Este potencial total es el resultado de la suma de varios componentes, ya conocidos en la ecuación de Bernoulli, como los potenciales térmico, gravitacional, cinético, de presión, neumático, mátrico y osmótico, tal como se describe en la Ecuación 1 (Machado y Vilar, 2015).

$$\text{Ecuación 1} \quad \Psi_t = \Psi_{tem} + \Psi_z + \Psi_{cin} + \Psi_p + \Psi_n + \Psi_m + \Psi_{osm}$$

De acuerdo con Calle (2000), en un suelo no saturado que no experimenta cambios de volumen ni de temperatura, y que no está sometido a una presión de gas distinta a la atmosférica, el potencial total del agua en el suelo puede expresarse mediante la Ecuación 2.

$$\text{Ecuación 2} \quad \Psi_t = \Psi_z + \Psi_m + \Psi_{osm}$$

Hernández (2011) explica que la succión mátrica es la resta entre la presión del agua y del aire ( $u_a - u_w$ ), originada por las variaciones en la humedad relativa del suelo. Esta succión proviene de dos mecanismos principales: la capilaridad, que involucra la atracción de moléculas de agua entre sólidos generando un ascenso capilar, y la adsorción, la cual se produce por las fuerzas eléctricas y de Van Der Waals en la interfaz entre el sólido y el líquido (Lu y Likos, 2004).

Por otro lado, Barrera y Garnica (2002) describen la succión osmótica ( $\Psi_{osm}$ ), como la presión negativa necesaria para equilibrar una masa de agua pura con una solución que tiene la misma composición que el agua intersticial, utilizando una membrana semipermeable. Esta succión está vinculada a la presión osmótica creada por los solutos disueltos en el agua. Las sales presentes en el agua del suelo disminuyen la presión de vapor en equilibrio ( $u_v$ ) en comparación con la de un sistema de referencia con agua pura ( $u_{v_0}$ ). En esencia, la succión osmótica representa el cambio en la humedad relativa del suelo debido a su composición química.

La succión mátrica ( $\Psi_m$ ) se equipará a la succión total cuando el agua del suelo tiene una composición parecida al agua en su estado puro, o cuando la solución es idéntica en

composición al agua del suelo, afectando solo la matriz del suelo, es decir, la capilaridad y la adsorción. Por otro lado, la succión osmótica ( $\Psi_o$ ) coincide con la succión total cuando el suelo está completamente sumergido, ya que, en esta condición, la succión mátrica no está presente y la concentración de solutos es el único factor influyente (Alfaro Soto, 2008). La Figura 6 muestra cómo la relación entre la succión y el contenido volumétrico de agua (%) refleja que la suma de la succión mátrica y osmótica se aproxima a la succión total, observándose que, a altos niveles de contenido volumétrico de agua, la succión total y la succión osmótica tienden a igualarse.

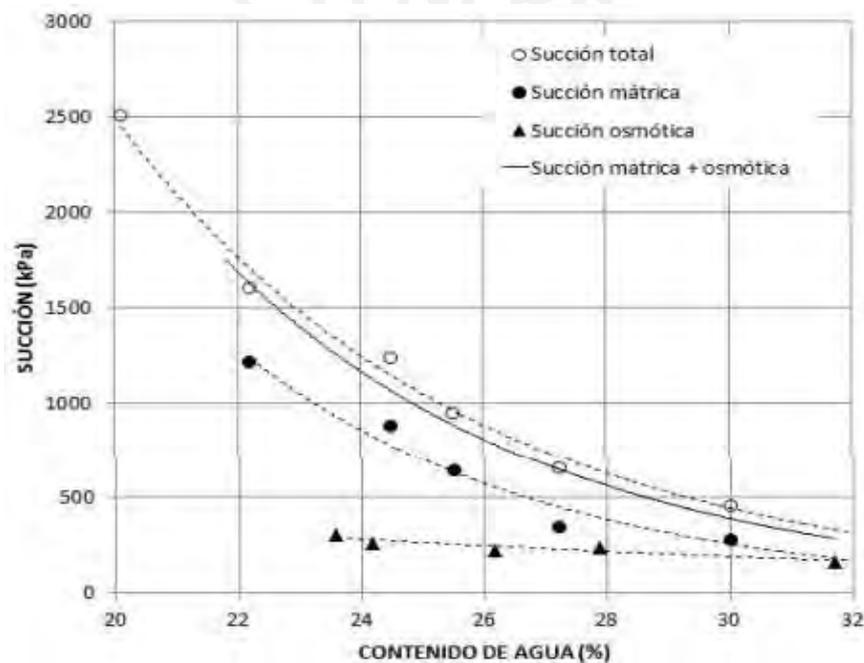


Figura 6 Medida de la succión total, mátrica y osmótica en una arcilla compactada

Fuente: Krahn & Fredlund, citado en López & Mendoza (2016)

La succión mátrica desempeña un papel fundamental en la caracterización del estado de tensión en la mecánica de suelos parcialmente saturados, ya que está directamente asociada con la presión negativa del agua en los poros (Fredlund y Rahardjo, 1993). Debido a esta relación, es común que la succión total se considere principalmente en términos de succión mátrica, simplificando así su tratamiento en el análisis del suelo.

## II. Medición de la succión del suelo

La medición de la succión del suelo fue objeto de estudio desde el siglo XIX. Los primeros estudios fueron aplicados a la agricultura, donde se reconoce los trabajos de Livingston (1906) que en su artículo “The relation of desert plants to soil moisture and to evaporation”, desarrollo un método para la determinación de forma indirecta de la succión utilizando semillas de plantas que funcionaban como elementos de absorción. Posterior a los trabajos de Livingston, autores como Shull (1916), Terzaghi (1925), Hansen (1926) y Gardner (1937), plantearon nuevos instrumentos para medir la succión.

Los métodos más conocidos para medir la succión del suelo se detallan a continuación:

### a. **Tensiómetros:**

Este instrumento consiste en un tubo lleno de agua que se conecta al suelo a través de una piedra porosa, lo que permite que el agua en el suelo y el agua en el tensiómetro alcancen un equilibrio de presión. Al medir la presión del agua dentro del tensiómetro, se obtiene el valor de la succión del suelo. Sin embargo, los tensiómetros presentan una limitación en cuanto a la succión máxima que pueden registrar, debido a un fenómeno conocido como cavitación, que ocurre cuando la succión supera ciertos valores. En general, estos instrumentos son eficaces para medir succiones de hasta 90 kPa, lo que los hace útiles para ciertos rangos de condiciones de suelo.

### b. **Papel filtro:**

El método del papel filtro se destaca por ser uno de los más sencillos y económicos. Este procedimiento estima la succión de manera indirecta, utilizando curvas de calibración que relacionan el contenido de humedad del papel con la succión del suelo. Este método es aplicable para medir succiones en un rango que va desde 10 hasta 30,000 kPa. Marinho (1994) ofrece una explicación más detallada del proceso, abordando aspectos como el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio, la interacción entre el suelo y el papel filtro, así como la calibración

adecuada del método. Asimismo, la norma ASTM-D5298 proporciona una guía útil para implementar correctamente este procedimiento.

**c. Placa de succión:**

La placa de succión tiene un uso adecuado cuando se desea imponer succiones de hasta aproximadamente 80 kPa. El sistema de placa de succión se ilustra en la Figura 7. Cuando se impone una diferencia entre el depósito y la piedra porosa, hay una presión relativa en la piedra por debajo de la presión atmosférica. Esta diferencia de altura ( $h_m$ ) es la carga de presión impuesta. Al multiplicar dicha carga por el peso específico del agua, se calcula la succión generada en la piedra porosa, que a su vez se transfiere al suelo. El valor máximo posible por aplicar se limita a la aparición de cavitación en el sistema, que en general es de 80 kPa. En la práctica, la limitación se debe a condiciones de laboratorio que no siempre permiten la aplicación de diferencias de altura superiores a 4 metros (Marinho 2005).

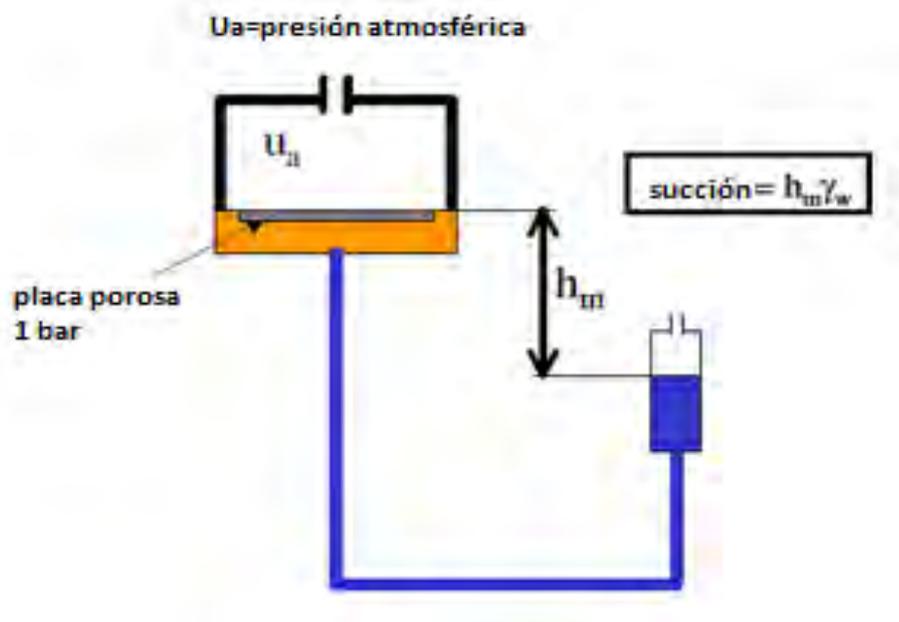


Figura 7 Sistema de placa de succión

Fuente: Marinho (2005)

#### d. Placa de presión:

La placa de presión utiliza la técnica de traslación del eje. Esta técnica tiene como objetivo evitar que ocurra el fenómeno de cavitación en el sistema. La cavitación generalmente ocurre cuando la presión en el agua se acerca al cero absoluto. En términos de succión, la cavitación tiende a ocurrir a niveles de succión cercanos a 80kPa.

La técnica de traslación del eje introduce un incremento en la presión del aire, lo que provoca un desplazamiento en la presión de referencia. Esta metodología, desarrollada por Hilf en 1956, es representada en la Figura 8, donde se muestra cómo la traslación afecta tanto la presión atmosférica de referencia como la presión del aire dentro del sistema de placa de presión. La traslación induce una distancia relativa de la presión medida en relación con el cero absoluto. El procedimiento es equivalente a un “cambio de planeta”, donde la presión atmosférica local sería más alta y el agua permanecería bajo presión por encima del cero absoluto local.

La técnica de transferencia de eje se puede aplicar a varios tipos de equipos utilizados en geotecnia tales como: edómetro, triaxial, corte directo o simplemente un sistema que tiene como objetivo determinar la curva característica.

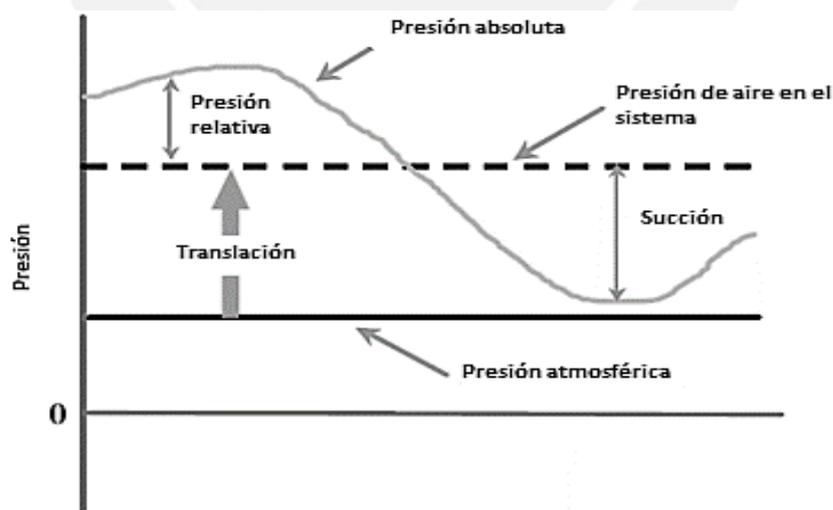


Figura 8 Método de traslación de ejes

Fuente: Marinho (2005)

### III. Histéresis

La histéresis se define como la diferencia en la relación entre succión y contenido de agua en el suelo durante un proceso de humectación y secado del suelo, lo que genera curvas características de los suelos distintos para cada ciclo.

Dinnen y Ridley (1999) explicaron esta diferencia en función del tamaño de los poros en cada estado. Durante la trayectoria de humedecimiento, la succión se relaciona con poros más pequeños, ya que inicialmente estos están llenos de aire; mientras que, en la trayectoria de secado, la succión está asociada a poros más grandes, debido a que el suelo comienza completamente saturado de agua. La Figura 9 detalla la curva de histéresis de la SWCC.

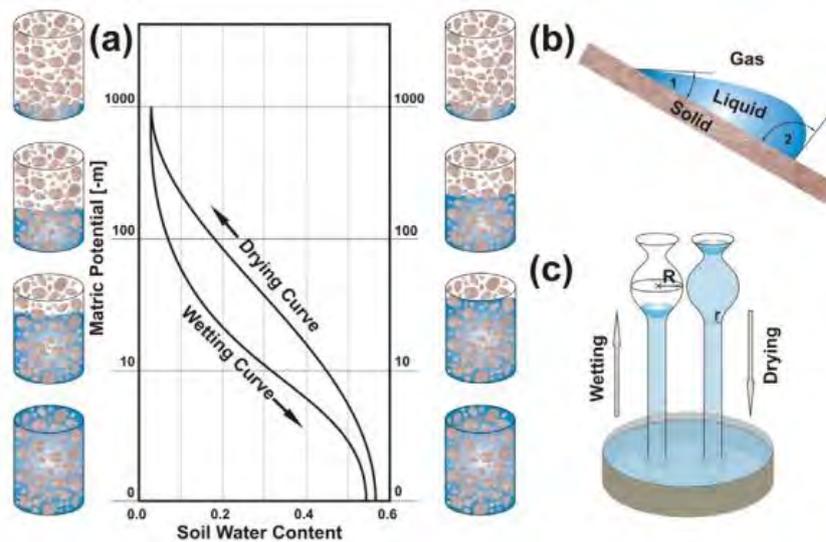


Figura 9 Histéresis de la curva característica de la curva suelo agua

Fuente: Markus Tuller (2003)

#### 2.2.4. Soil Water Characteristic Curve (SWCC)

La curva de retención, también conocida como curva característica suelo-agua o SWCC (por sus siglas en inglés), representa la relación entre la succión y el contenido volumétrico de agua en el suelo. Esta curva refleja cómo las propiedades del material, como la distribución del tamaño de poros, la granulometría, la densidad, el contenido de materia orgánica, el contenido

de arcilla y la mineralogía, influyen en el comportamiento del suelo en términos de retención de agua (Lu & Likos, 2004).

La curva puede aproximarse en tres segmentos lineales utilizando un arreglo semilogarítmico que relaciona la succión con el grado de saturación del suelo, como se ilustra en la Figura 10.

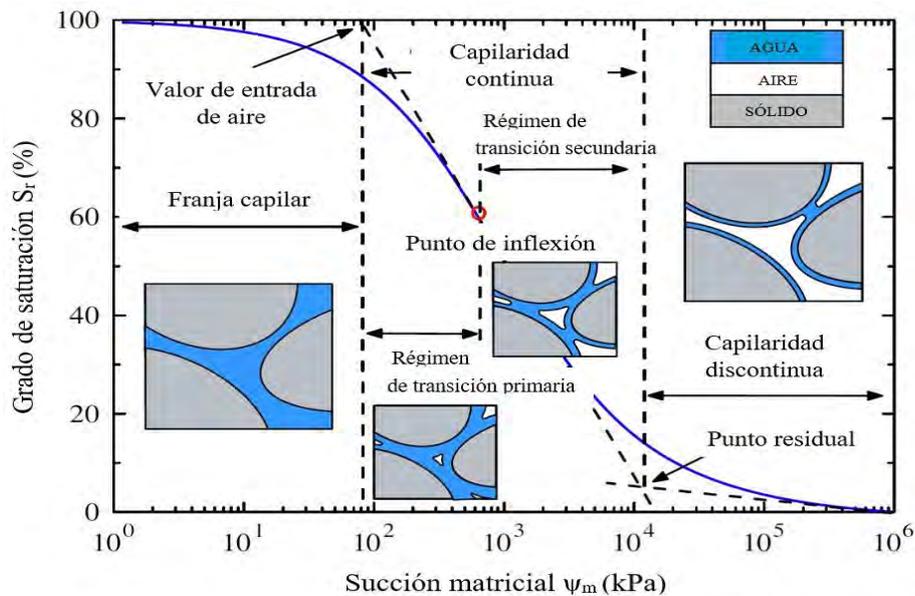


Figura 10 Modelo general de la curva característica suelo-agua

Fuente: Modificado de You Gao et al. (2019)

Cada segmento lineal se identifica por una modificación en la inclinación de la curva en los puntos donde ocurre la transición entre los diferentes regímenes. El primer segmento se denomina régimen capilar, el cual está dominado por mecanismos de retención de agua de poros capilares. El segundo segmento se conoce como régimen de película adsorbida o capilaridad continua, donde el agua se retiene en finas capas sobre las superficies de las partículas del suelo. Por último, el tercer segmento, llamado régimen de fuerte adsorción o capilaridad discontinua, se caracteriza porque el agua de los poros es retenida por enlaces moleculares en las superficies de los minerales del suelo.

Un ejemplo particular de las curvas características suelo-agua es el suelo aglomerado de mina. A diferencia de los suelos convencionales, esta curva presenta un comportamiento

bimodal en lugar de unimodal. Esta singularidad se debe a la interacción compleja entre los componentes de grano grueso y fino dentro de la estructura porosa del material, lo que provoca la aparición de dos valores distintos de entrada de aire. El primer valor corresponde al drenaje del agua de los grandes espacios entre los aglomerados más grandes, mientras que el segundo valor se asocia con la desaturación de los finos adheridos a las rocas de mayor tamaño. Aunque la distribución de tamaño de grano del material no sea bimodal, la curva suelo-agua adopta esta forma. La Figura 11 presenta un ejemplo de una curva característica suelo-agua obtenida de una muestra de aglomerado.

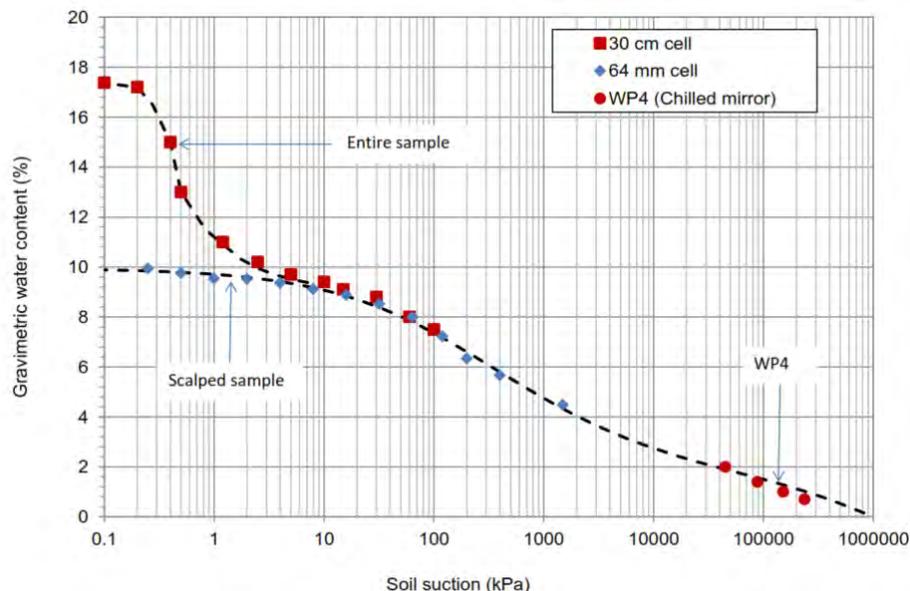


Figura 11 Curva característica suelo-agua bimodal

Fuente: Fredlund. (2014)

## I. Modelos de estimación

Existen una variedad de modelos para estimar de forma empírica la curva característica suelo-agua. Esta se realiza en función de sus relaciones de masa-volumen y granulometría. A continuación, se detallan los modelos más usados para la estimación de la curva de retención.

### a. Modelo de Fredlund y Wilson (1997)

Este modelo se basa en los principios de capilaridad y en las variaciones de las curvas características de diferentes tipos de suelos, sustentándose en tres teoremas. El primer teorema

establece que un suelo con partículas homogéneas y uniformes presenta una única curva característica. El segundo teorema indica que el modelo de capilaridad es el más preciso para estimar el valor de entrada de aire. Finalmente, el tercer teorema señala que, en suelos con partículas de diferentes tamaños, la curva característica es la combinación de las curvas características individuales de cada tamaño de partícula.

**b. Modelo de Aubertin, Mbonimpa, Bussiére y Chapuis (2003) (modificado de Kovacs)**

Este modelo se fundamenta en las propiedades índice del suelo. Primero, se establece como una función del grado de saturación, y posteriormente se desarrolla como una función de almacenamiento del suelo, como se detalla en la Ecuación 3.

$$\text{Ecuación 3} \quad S_a = a_c C_\psi \frac{(h_{co})^{2/3}}{e^{1/3} (\frac{\psi}{\psi_n})^{1/6}}$$

Donde:

$a_c$ : Parámetro debido a la adhesión

$C_\psi$ : Parámetro obtenido de la ecuación de Fredlund y Xing (1994)

$h_{co}$ : Ascensión capilar presente en suelos granulares o cohesivos-plásticos

$\psi_n$ : Parámetro de normalización introducido para la consistencia de unidades

$e$ : Relación de vacíos

$\psi$ : Succión

**c. Correlaciones de Zapata (1999)**

Si no se cuenta con parámetros de ajuste obtenidos de pruebas de laboratorio, se puede recurrir a las correlaciones de Zapata para establecerlos. Estas correlaciones se basan en el modelo de Fredlund y Xing (1994) y se subdivide según los tipos de suelos en función de su índice de plasticidad.

Para suelos granulares ( $IP=0$ ), los parámetros de ajuste se obtienen con la Ecuación 4, Ecuación 5 y Ecuación 6.

$$\text{Ecuación 4} \quad a_f = 0.8627[D_{60}]^{-0.751}$$

Ecuación 5  $m_f = 0.1772 \ln(D_{60}) + 0.7734$

Ecuación 6  $n_f = 7.5$

Donde:

$a_f$ : Parámetro de ajuste relacionado con el punto de inflexión de la curva característica

$m_f$ : Parámetro de ajuste para valores de succiones altas y bajas en la curva característica

$n_f$ : Parámetro de ajuste que depende de la pendiente de la curva característica en el punto de inflexión

$D_{60}$ : Diámetro correspondiente en el que se tiene 60% de suelo en la curva granulométrica

Para suelos con  $IP > 0$ , los parámetros de ajuste se obtienen con las Ecuación 7, Ecuación 8 y Ecuación 9.

Ecuación 7  $a_f = 0.0034[wIP]^{3.35} + 4(wIP) + 11$

Ecuación 8  $m_f = 0.0514[wIP]^{0.465} + 0.5$

Ecuación 9  $n_f = m_f[-2.313(wIP)^{0.14} + 5]$

Donde:

w: Porcentaje de suelo que pasa la malla #200

IP: Índice de plasticidad del laboratorio

#### d. Modelo sólido-poroso

Este modelo micromecánico replica la distribución de poros y la estructura sólida del material. Un ejemplo es el modelo propuesto por Rojas (2013), que permite determinar tanto la distribución del agua en los poros como la curva característica del material. Sin embargo, su implementación requiere equipos de computación avanzados y especializados. En respuesta a esto, se ha desarrollado un modelo sólido-poroso probabilista más accesible.

## II. Modelos de ajuste

Se han desarrollado una variedad de modelos para definir la curva característica, los cuales consideran parámetros de ajustes que proporcionan una mayor flexibilidad al representar los

distintos materiales en modelos numéricos. En la Tabla 1, se indican los modelos de ajustes más comunes.

Tabla 1 Modelos de ajuste de la curva característica

<b>Gardner (1958)</b>
$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) * \left[ \frac{1}{1 + a * (\psi)^n} \right]$
<b>Brooks y Corey (1964)</b>
$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) * \left( \frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda$
<b>Van Genuchten y Mualem (1976)</b>
$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) * \left[ \frac{1}{(1 + (a * \psi)^n)^m} \right]$
<b>Van Genuchten (1980)</b>
$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) * \left[ \frac{1}{(1 + (a * \psi)^n)^m} \right]$
<b>Fredlund y Xing (1994)</b>
$\theta_w = \theta_s * \left( 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \right) * \left[ \frac{1}{(\ln(e + \left( \frac{\psi}{af} \right)^n))^m} \right]$
Donde:
$\theta_r$ : Contenido volumétrico de agua residual
$\theta_s$ : Contenido volumétrico de agua saturado
$a^*$ : Variable que depende del valor de entrada de aire del suelo
$n^*$ : Variable que depende de la velocidad de desaturación del suelo una vez excedido el valor de entrada de aire
$m^*$ : Variable que se relaciona con el contenido de agua residual del suelo
$\Psi$ : Succión del suelo
$\psi_b$ : Presión de aire
$\psi_r$ : Succión residual
$\lambda$ : Índice de tamaño de poros del suelo
$e$ : Número irracional

Nota: (\*) Cada parámetro de ajuste es dependiente de la formulación de cada uno de los autores.

Fuente: Adaptado de López & Mendoza (2016)

### 2.2.5. Función de conductividad hidráulica

La función de conductividad hidráulica describe cómo varía la cantidad relativa de fluido en los poros del sistema (Lu & Likos, 2004). Esta función establece una relación entre la conductividad hidráulica y la succión del suelo. Puede determinarse utilizando la curva característica del suelo a través de modelos de estimación o mediante ensayos de laboratorio.

#### I. Modelos de estimación

Para determinar la función de conductividad hidráulica, se emplean varias técnicas de estimación, que se clasifican en las siguientes categorías:

- a. **Modelos experimentales:** son los que plantean una relación entre la curva característica del suelo y la función de conductividad hidráulica.
- b. **Modelos de correlación:** basados en un parámetro específico del suelo, estos modelos buscan la correspondencia entre la curva característica y la función de conductividad hidráulica.
- c. **Modelos de regresión:** utilizan valores de conductividad hidráulica obtenidos a través de pruebas de laboratorio para desarrollar la función de conductividad hidráulica.
- d. **Modelos estadísticos:** representan el flujo a través de los poros del suelo mediante un modelo físico, utilizando técnicas estadísticas para describir las trayectorias de los poros.

En la Tabla 2, se muestran los principales modelos de estimación, para lo cual se requiere primero determinar la curva característica del material.

Tabla 2 Modelos de estimación de la función de conductividad hidráulica

<b>Van Genuchten y Burdine (1953)</b>
$k(\psi) = k_s * \frac{[1 - (a * \psi)^{n-2} * (1 + (a * \psi)^n)^{-m}]^2}{[1 + (a * \psi)^n]^{2m}}$
<b>Gardner (1958)</b>

$$k(\psi) = \frac{k_s}{1 + a * \left(\frac{\psi}{\rho_w * g}\right)^n}$$

**Brooks y Corey (1964)**

$$k(\psi) = k_s, \psi \leq \psi_{aev}$$

$$k(\psi) = k_s \left(\frac{\psi_{aev}}{\psi}\right)^{2+3\lambda}, \psi > \psi_{aev}$$

**Van Genuchten y Mualem (1976)**

$$k(\psi) = k_s * \frac{[1 - (a * \psi)^{n-1} * (1 + (a * \psi)^n)^{-m}]^2}{[1 + (a * \psi)^n]^{m/2}}$$

**Fredlung & Xing (1994)**

$$k(\psi) = k_s \frac{\int_{\ln \psi}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_{aev})}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy}$$

**Leong & Rahardjo (1997)**

$$k(\psi) = k_s [\Theta d(\psi)]^q$$

Donde:

$k(\psi)$ : Función de conductividad hidráulica

$k_s$ : Coeficiente de conductividad hidráulica

$\lambda$ : Índice de distribución del tamaño de los poros

$\rho_w$ : Densidad del agua

$\Psi$ : Succión del suelo

$\psi_{aev}$ : Succión correspondiente al valor de entrada de aire

$a^*$ : Variable que depende del valor de entrada de aire del suelo

$b$ : Límite superior de integración

$g$ : Aceleración de la gravedad

$y$ : Variable ficticia de integración que representa el logaritmo de la succión

$n^*$ : Variable que depende de la velocidad de desaturación del suelo una vez excedido el valor de entrada de aire

$m^*$ : Variable que se relaciona con el contenido de agua residual del suelo

$e^y$ : Base de los logaritmos naturales a la potencia  $y$

$\theta'$ : Derivada de la función de almacenamiento del suelo

$\Theta(\psi)$ : Contenido de agua volumétrico adimensional, tal que  $\Theta d(\psi) = \theta/\theta_s$

$q$ : Variable basado en correlaciones

Nota: (\*) Cada parámetro de ajuste es dependiente de la formulación de cada uno de los autores.

Fuente: Adaptado de López & Mendoza (2016)

### 2.2.6. Resistencia al corte en suelos no saturados

El esfuerzo efectivo es una variable crucial para determinar el estado de esfuerzos en un suelo en cualquier punto. Según Terzaghi (1943), para suelos saturados, la tensión efectiva se calcula como la resta entre la tensión total y la presión intersticial del agua. Este esfuerzo es uniforme en todas las direcciones y se transmite a través de los contactos entre granos. El principio de tensiones efectivas de Terzaghi es aplicable a suelos saturados, donde la presión de poros del agua, que es positiva, no contribuye a la resistencia al corte.

En los suelos no saturados, la presión negativa del agua (succión) varía con el grado de saturación y produce fuerzas de atracción entre los granos, aumentando así la resistencia al corte. Por eso, el principio de Terzaghi no es completamente aplicable a suelos parcialmente saturados, requiriéndose la inclusión de la succión mátrica en el análisis de la resistencia del suelo (Lu & Likos, 2004).

Bishop (1959) fue uno de los primeros en adaptar el estudio de Terzaghi para suelos parcialmente saturado, introduciendo un parámetro de succión mátrica ( $u_a - u_w$ ) que depende de las características del suelo, representado por  $\chi$ , como se muestra en la Ecuación 10. Este parámetro  $\chi$  varía con el grado de saturación, el tipo de suelo, y otras propiedades, siendo 0 para suelos secos y 1 para suelos completamente saturados. La sustitución de la ecuación de Bishop (1959) en el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb permite formular la resistencia para suelos no saturados, como se detalla en la Ecuación 11.

$$\text{Ecuación 10} \quad \sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)$$

$$\text{Ecuación 11} \quad \tau_{ff} = c' + [(\sigma_f - u_a)_f + \chi(u_a - u_w)_f] \tan \Phi'$$

Fredlund et al. (1978) ampliaron el criterio de ruptura de Mohr-Coulomb para incluir suelos parcialmente saturados, incorporando la succión mátrica y su impacto en el aumento de resistencia. Este ajuste se refleja en la Ecuación 12.

$$\text{Ecuación 12} \quad \tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \Phi' + (u_a - u_w)_f \tan \Phi^b$$

En la Ecuación 12,  $c'$ ,  $\Phi'$  son los parámetros efectivos de resistencia de los suelos saturados y  $(\sigma_f - u_a)_f$  es el esfuerzo normal neto en la falla. El término  $(u_a - u_w)_f$  corresponde a la succión mátrica en la falla y  $\Phi^b$  cuantifica linealmente la tasa de incremento de resistencia en función al incremento de la succión. Según Lu & Likos (2004) es más sencillo determinar  $\Phi^b$  que calcular el parámetro  $\chi$  de la ecuación de Bishop, siendo esta última de aplicación limitada.

Fredlund et al. (2012) mencionan que para zonas de succiones elevadas existe una relación no lineal entre la resistencia de corte y la succión mátrica. De modo que el parámetro  $\Phi^b$  no es constante para todo intervalo de succión y su valor es una aproximación lineal en un régimen saturado. Con esa premisa, se presenta una nueva ecuación sustituyendo  $\Phi^b$  por  $f_1$  para representar dicha relación no lineal entre la resistencia al corte y la succión como se detalla en la Ecuación 13 y se muestra en la Figura 12.

$$\text{Ecuación 13} \quad \tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) f_1$$

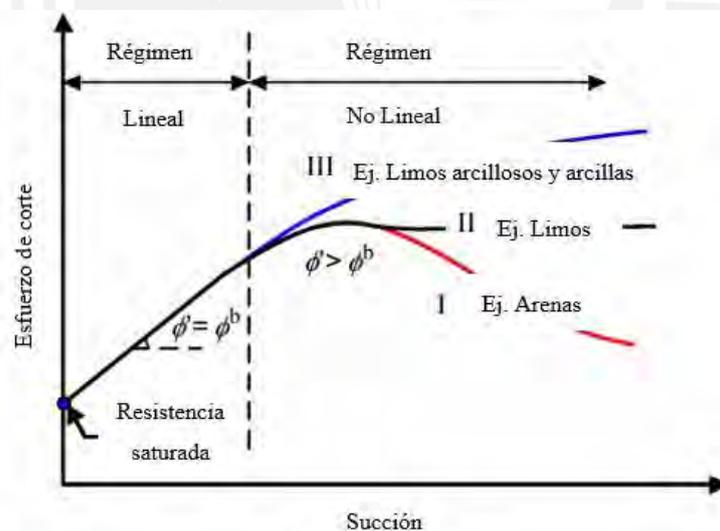


Figura 12 Resistencia al corte no lineal en suelos no saturados

Fuente: You Gao et. al (2020)

En la Figura 13, se muestra el criterio de falla de Mohr Coulomb Extendido para suelos no saturados, siendo representado los esfuerzos de corte en el eje de las ordenadas. En el plano frontal, el eje de las abscisas está representada por el esfuerzo normal neto en condiciones

saturadas ( $\sigma - u_a$ ), donde la succión es cero. En el plano perpendicular, el eje de las abscisas está representada por la función de succión mátrica ( $u_a - u_w$ ), el cual presenta una envolvente lineal que favorece al incremento de la cohesión efectiva por los efectos de capilaridad (cohesión capilar).

Los parámetros de resistencia al corte no saturado se pueden obtener mediante ensayos típicos de resistencia como el ensayo de corte directo o triaxial. Sin embargo, se requieren algunas adaptaciones en los equipos, lo que se traduce en una mayor demanda de tiempo en el ensayo.

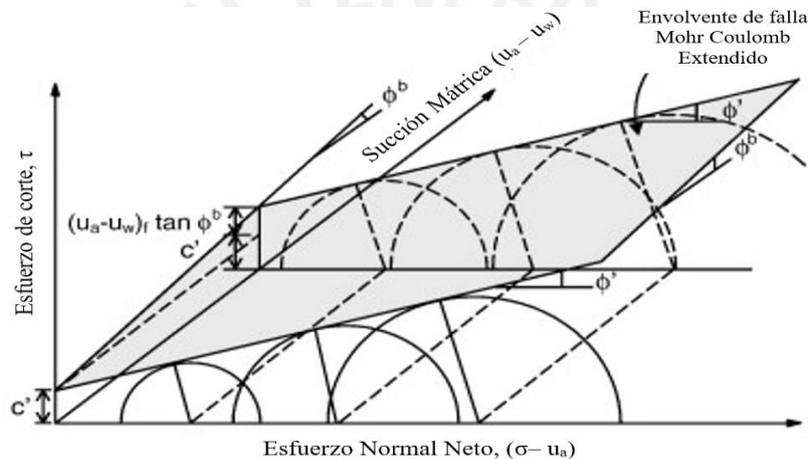


Figura 13 Criterio de falla de Mohr Coulomb Extendido

Fuente: Modificado de Fredlund et. al (1993)

La escasez de pruebas y equipos adecuados para medir experimentalmente los parámetros de suelos no saturados impulsa el uso de enfoques empíricos y semi-empíricos, así como evaluaciones indirectas de la resistencia al corte. Estas metodologías se fundamentan en la relación entre las variaciones de la resistencia no drenada, el contenido volumétrico de agua y la succión del suelo, tal como se describe en la curva característica suelo-agua (Kim y Borden, 2011).

Fredlund et al. (1996) propusieron un modelo para representar la resistencia al corte del suelo no saturado considerando la curva de retención en términos del contenido de humedad volumétrico adimensional  $\Theta$  dado por la Ecuación 14, siendo  $\Theta = \theta(\theta_s)^{-1}$ . Además, se

adiciona un parámetro de ajuste del suelo  $k$ , que según Garven y Vanapalli (2006) puede ser estimada como  $k = -0.0016 I_p^2 + 0.0975 I_p + 1$ , el cual es dependiente del índice de plasticidad de la muestra.

$$\text{Ecuación 14} \quad \tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\Phi' + (u_a - u_w)\Theta^k \tan\Phi'$$

Vanapalli et al. (1996) reescribieron el término lineal  $\Phi^b$  de la Ecuación 12 utilizando el contenido de humedad normalizado  $\Theta_n$ , obtenido a partir de la curva de retención (SWCC) de forma que  $\tan\Phi^b = \Theta_n \tan\Phi'$ . La Ecuación 15 representa la resistencia al corte de un suelo no saturado según Vanapalli et al. (1996).

$$\text{Ecuación 15} \quad \tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\Phi' + (u_a - u_w)\left[\left(\frac{\theta(\Psi) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right) \tan\Phi'\right]$$

Khalili y Khabbaz (1998) extienden la ecuación de Bishop (1959) para estimar la resistencia al corte en un suelo no saturado. Ellos sugieren que el parámetro  $\chi$  está relacionado con la estructura del suelo y de un parámetro volumétrico como el porcentaje de saturación. Por ello, plantean una correlación entre la succión mátrica y el valor de entrada de aire (relación de succión), lo cual se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Ecuación 16} \quad \tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\Phi' + (u_a - u_w)_f [\chi \tan\Phi']$$

Donde:

$$\chi = \left[\frac{(u_a - u_w)_f}{(u_a - u_w)_b}\right]^{-0.55} \quad \text{Para } (u_a - u_w)_f > (u_a - u_w)_b$$

$$\chi = 1 \quad \text{Para } (u_a - u_w)_f < (u_a - u_w)_b$$

## 2.3. Análisis de infiltración

### 2.3.1. Fenómeno del flujo en medios porosos

En ingeniería geotécnica, es crucial entender la dirección y cantidad del flujo de agua en un medio poroso para poder calcular las cargas hidráulicas y la distribución de presión de poro en el suelo. A continuación, se presentan los distintos tipos de flujo descritos en la literatura:

**a. Flujo laminar y turbulento:**

Se basa en la ecuación de Reynolds, derivada de observaciones experimentales. En el flujo laminar, las partículas de agua se desplazan siguiendo trayectorias definidas y paralelas, formando capas o láminas que no se cruzan. En contraste, en el flujo turbulento, las partículas del fluido se mueven de manera caótica en todas las direcciones, interceptándose de forma aleatoria.

**b. Flujo 1D, 2D y 3D:**

Clasificación enfocada al número de planos considerados para el análisis. Es decir, flujo unidireccional, bidireccional y en tres direcciones.

**c. Flujo confinado y no confinado:**

El flujo confinado se refiere al movimiento del agua a través de un medio poroso que está completamente rodeado por capas impermeables o de baja permeabilidad, lo que restringe su flujo a una dirección específica dentro de un acuífero. En contraste, el flujo no confinado ocurre en un acuífero que no está completamente delimitado por capas impermeables, permitiendo que el agua se mueva más libremente hacia la superficie o en diferentes direcciones, con el nivel freático fluctuando según las condiciones de recarga y descarga.

**d. Flujo estacionario y transitorio:**

Se considera un flujo del tipo estacionario o establecido si la carga hidráulica se mantiene constante en el tiempo y será del tipo transitorio, si esta se ve afectado por el tiempo.

### **2.3.2. Flujo en estado estacionario**

La cantidad termodinámica fundamental que gobierna el flujo de agua líquida saturado o insaturado es el potencial total del agua de los poros, más comúnmente descrito en términos de succión o altura totales (Lu and Likos, 2004).

En la mecánica de fluidos, se establece que la altura total de agua en movimiento se calcula como la suma de la altura de presión, la altura de velocidad y la altura gravitacional (Ecuación de Bernoulli). No obstante, en el caso del flujo de agua a través de un suelo poroso, la altura de carga por velocidad puede ser despreciado debido a la baja tasa de filtración. Por lo tanto, la altura total se puede definir como la suma de la altura gravitacional y la altura de presión (presión de poros), según se detalla en la Ecuación 17.

$$\text{Ecuación 17} \quad h_t = h_g + h_{pp} = z + h_{pp}$$

En un medio poroso no saturado, la parte de la energía total del fluido debido a las fuerzas de presión de poros del suelo ( $h_{pp}$ ) se conoce como cabeza de succión ( $\psi$ ), la cual se representa generalmente solo con la componente mátrica ( $\psi_m$ ) tal como se describe en el apartado 2.2.3.

$$\text{Ecuación 18} \quad h_t = z + \psi_m$$

El flujo en estado estacionario o estable está formulado considerando el Principio de conservación de masa y la Ley de Darcy, donde el flujo neto en cualquier punto de la masa es nulo. Es decir, el flujo que ingresa es igual al flujo que sale.

$$\text{Ecuación 19 Flujo neto} \quad \nabla \cdot \bar{q} = 0$$

$$\text{Ecuación 20 Ley de Darcy} \quad \bar{q} = -k_w \nabla h_t$$

$$\text{Ecuación 21 Sustituyendo} \quad \nabla \cdot (k_w \nabla h_t) = 0$$

$$\text{Ecuación 22 Resolviendo}$$

$$k_{wx} \frac{\partial^2 h_t}{\partial x^2} + k_{wy} \frac{\partial^2 h_t}{\partial y^2} + k_{wz} \frac{\partial^2 h_t}{\partial z^2} + \frac{\partial k_{wx}}{\partial x} \frac{\partial h_t}{\partial x} + \frac{\partial k_{wy}}{\partial y} \frac{\partial h_t}{\partial y} + \frac{\partial k_{wz}}{\partial z} \frac{\partial h_t}{\partial z} = 0$$

La Ecuación 22, representa el flujo estacionario tridimensional para un medio poroso anisotrópico saturado ( $k_{wi} = k_{sat}$ ) o parcialmente saturado ( $k_{wi} \rightarrow f(\psi_m)$ ). Donde el cambio de la permeabilidad en el espacio ( $\frac{\partial k_{wi}}{\partial i}$ ) depende del cambio de la succión mátrica ( $\psi_m$ ), el cual, es responsable de la no linealidad de dicha ecuación.

En el caso que se considere un suelo saturado, isotrópico ( $k_{wx} = k_{wy} = k_{wz} = k_{sat}$ ) y homogéneo ( $\left(\frac{\partial k_{wi}}{\partial i}\right) = 0$ ), el estado de flujo solo es dependiente del cambio del gradiente hidráulico ( $\nabla h_t$ ), y la ecuación anterior se reescribe como la Ecuación 23.

$$\text{Ecuación 23} \quad \frac{\partial^2 h_t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h_t}{\partial z^2} = 0$$

### 2.3.3. Flujo en estado transitorio

En el flujo transitorio se presentan cargas hidráulicas variables, las cuales ocurren debido a las variaciones del contenido volumétrico del agua en el tiempo. La ecuación que gobierna el flujo transitorio en un suelo se obtiene mediante la aplicación del principio de continuidad y la generalización de la ley de Darcy (1856).

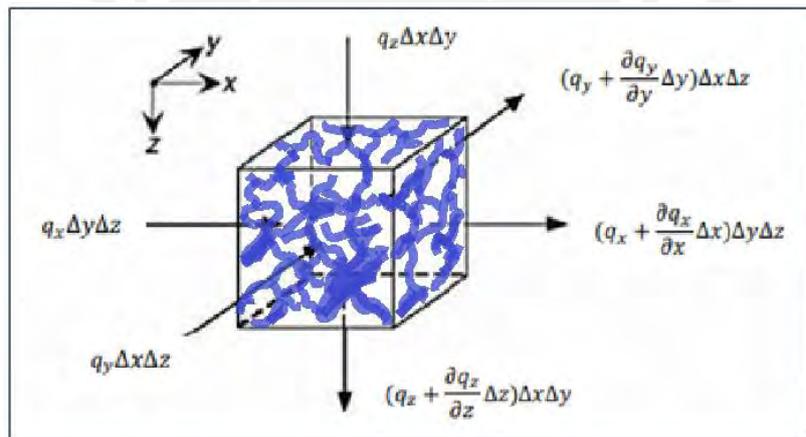


Figura 14 Principio de continuidad

Fuente: Modificado de Lu & Likos (2004)

Para un volumen elemental de suelo, como se muestra en la Figura 14, con porosidad ( $n$ ) y contenido volumétrico de agua ( $\theta$ ), la ecuación de continuidad resultante se expresa como:

$$\text{Ecuación 24} \quad -\rho \left( \frac{dq_x}{dx} + \frac{dq_y}{dy} + \frac{dq_z}{dz} \right) = \frac{d(\rho\theta)}{dt}$$

Ahora, si se asume una condición saturada y de densidad constante ( $\frac{d\rho}{dt} = 1$ ), el contenido volumétrico de agua es igual a la porosidad ( $n$ ), y la Ecuación 25 es equivalente a:

$$\text{Ecuación 25} \quad -\left( \frac{dq_x}{dx} + \frac{dq_y}{dy} + \frac{dq_z}{dz} \right) = \frac{dn}{dt}$$

Si se sustituye la ecuación de la ley de Darcy en Ecuación 25, se obtiene la regla de flujo transitorio para un suelo completamente saturado y de densidad constante en el tiempo.

$$\text{Ecuación 26} \quad k_{wx} \frac{\partial^2 h_t}{\partial x^2} + k_{wy} \frac{\partial^2 h_t}{\partial y^2} + k_{wz} \frac{\partial^2 h_t}{\partial z^2} + \frac{\partial k_{wx}}{\partial x} \frac{\partial h_t}{\partial x} + \frac{\partial k_{wy}}{\partial y} \frac{\partial h_t}{\partial y} + \frac{\partial k_{wz}}{\partial z} \frac{\partial h_t}{\partial z} = \frac{dn}{dt}$$

En el caso de los suelos parcialmente saturados, siguiendo el mismo análisis de los suelos saturados, la regla de flujo transitorio se puede formular mediante la Ecuación 27.

$$\text{Ecuación 27} \quad k_{wx} \frac{\partial^2 h_t}{\partial x^2} + k_{wy} \frac{\partial^2 h_t}{\partial y^2} + k_{wz} \frac{\partial^2 h_t}{\partial z^2} + \frac{\partial k_{wx}}{\partial x} \frac{\partial h_t}{\partial x} + \frac{\partial k_{wy}}{\partial y} \frac{\partial h_t}{\partial y} + \frac{\partial k_{wz}}{\partial z} \frac{\partial h_t}{\partial z} = \frac{d\theta}{dt}$$

Si se reemplaza la Ecuación 18 en Ecuación 27 y se hace un arreglo en el segundo término de la ecuación para incorporar el concepto de capacidad de humedad específica ( $C(h_m) = \frac{d\theta}{dh_m}$ ), la regla de flujo transitorio para suelos parcialmente saturados se puede escribir como:

$$\text{Ecuación 28} \quad \frac{\partial}{\partial x} \left[ kx(hm) \frac{\partial hm}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ ky(hm) \frac{\partial hm}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ kz(hm) \left( \frac{\partial hm}{\partial z} + 1 \right) \right] = C(hm) \frac{\partial hm}{\partial t}$$

La expresión anterior se conoce como la ecuación de Richards (1931). Una solución de dicha ecuación con las condiciones iniciales y de borde apropiadas proporciona una representación adecuada de los campos de succión en el espacio y el tiempo (Lu y Likos, 2004).

#### 2.4. Análisis de estabilidad de taludes

La estabilidad de taludes en terraplenes o excavaciones es un desafío común en la ingeniería geotécnica. Un talud se describe como una superficie de suelo inclinada respecto a la horizontal, la cual puede ser natural o construida (Das, 2013). Esta pendiente siempre está sometida a una energía potencial derivada del peso propio del suelo, lo que genera esfuerzos de confinamiento uniaxiales. En pendientes muy pronunciadas, pueden ocurrir fallas que provocan deslizamientos en una zona específica conocida como superficie de ruptura, donde la fuerza motriz supera la resistencia cortante del suelo. La Figura 15 ilustra las características y componentes asociados a las fallas en un talud.

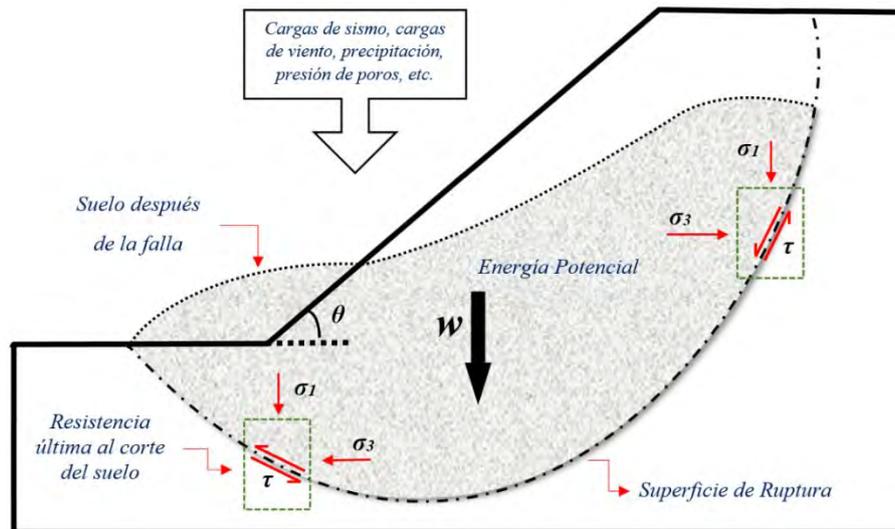


Figura 15 Falla en talud

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la estabilidad de un talud es complejo y depende de diversas variables, como la estratificación del suelo, sus parámetros de resistencia al corte, la filtración y las condiciones de carga, entre otras (Das, 2013).

#### 2.4.1. Mecanismos de falla de taludes

Aunque la mayoría de los taludes parecen estables, en realidad están en constante cambio y pueden volverse inestables con el tiempo, provocando deslizamientos como parte de su proceso natural. El mecanismo de falla describe cómo un talud inicialmente estable se vuelve inestable debido al deterioro y a los agentes activadores (Suarez, 2000). Diagnosticar correctamente el mecanismo de falla es crucial para el análisis de estabilidad, ya que un diagnóstico incorrecto puede resultar en medidas remediales o procedimientos de estabilización ineficaces.

La evaluación del mecanismo de falla parte de comprender una gran cantidad de factores. Una de ellas son las condiciones originales del talud (susceptibilidad), las cuales están definidas por sus propiedades físicas del material y las condiciones del medio. Otra de ellas es el equilibrio o desequilibrio de fuerzas (factor de seguridad), el cual considera las fuerzas resistentes y actuantes, siendo determinante la fuerza de gravedad. El deterioro (modificación de las condiciones originales) es otro factor importante, el cual comprende la alteración física

y química, de forma lenta o rápida, de los materiales del talud y su posterior falla. Finalmente, se evalúa los factores detonantes (activación del movimiento), que vienen a ser elementos externos que alteran el estado de esfuerzo y deformación del medio, que provocan el fallamiento. Algunos de estos factores detonantes son las lluvias intensas y prolongadas, los sismos o vibraciones fuertes, la sobrecarga en el talud, los cortes en el soporte del talud o la combinación de estos. La Figura 16 describe el mecanismo de falla de un talud.

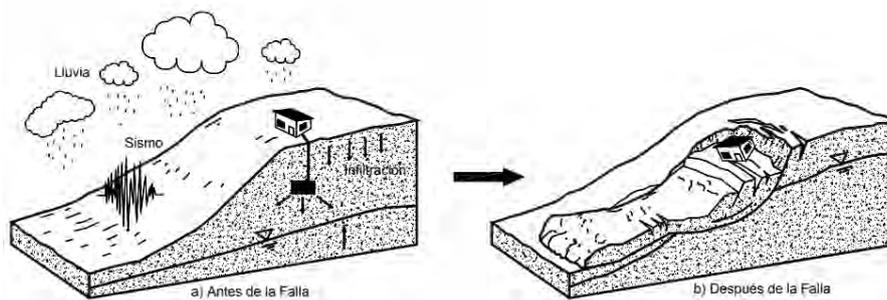


Figura 16 Mecanismo de falla de un talud

Fuente: Suarez (2000)

#### 2.4.2. Métodos de Evaluación de estabilidad

En la práctica, la estabilidad de taludes se evalúa mediante un factor de seguridad (F.S.), que considera aspectos que afectan su estabilidad, como grietas de tracción, cargas dinámicas, flujo de agua, geometría del talud y otros factores externos que puedan amenazar la estructura.

El F.S. refleja la capacidad del talud para resistir fallas en las condiciones más adversas. Según Fellenius (1927), se define como la relación entre la resistencia al corte real ( $\tau$ ), calculada en los materiales del talud, y los esfuerzos de corte críticos ( $\tau_R$ ) que tienden a causar la falla.

De forma simplificada, en el caso que el F.S. sea mayor que 1.0, el talud presenta estabilidad, pues los esfuerzos resistentes son mayores que los esfuerzos movilizados. En el caso que el FS sea igual a 1.0, el talud presenta una inminente ruptura, pues se igualan los esfuerzos. Para el

caso que el F.S. sea menor a 1.0, no hay un significado físico, pues esa condición no puede existir.

De acuerdo con Gercovich (2016), esa forma determinística de evaluar la estabilidad ha sido criticada en los últimos años por no cuantificar la incertidumbre inherente del FS. Por lo que, nuevos métodos buscan incorporar conceptos estadísticos para resolver tales incertezas.

En la actualidad, la tendencia que presentan los especialistas al evaluar la estabilidad de taludes se enfoca en métodos que cuantifican la incertidumbre considerando la variabilidad de las propiedades del material dentro de una distribución probabilística, como aquellos que emplean técnicas de transformación estadística y simulaciones, además de enfoques basados en el desempeño o performance de la estructura.

La falla en los taludes se puede dar en condiciones de suelo drenadas y no drenadas. Las fallas no drenadas son causadas por un cambio de carga en suelos de baja permeabilidad, donde el tiempo es insuficiente para drenar la variación de carga. Los análisis en condiciones drenadas se realizan cuando el suelo, usualmente permeable, permite drenar los cambios de carga sin que este afecte la estabilidad.

Para el análisis de estabilidad de taludes, se utilizan diversos métodos de cálculo, principalmente basados en el método de equilibrio límite y el método numérico. El método de equilibrio límite se centra en la igualdad entre las fuerzas actuantes y las resistentes a lo largo de una superficie de falla, estableciendo un F.S. igual a 1. Por otro lado, el método numérico calcula el estado de tensiones mediante algoritmos que simplifican las operaciones aritméticas, facilitando el análisis (Araujo, 2017). La Figura 17 proporciona un resumen de los métodos de cálculo de estabilidad de taludes más comunes.

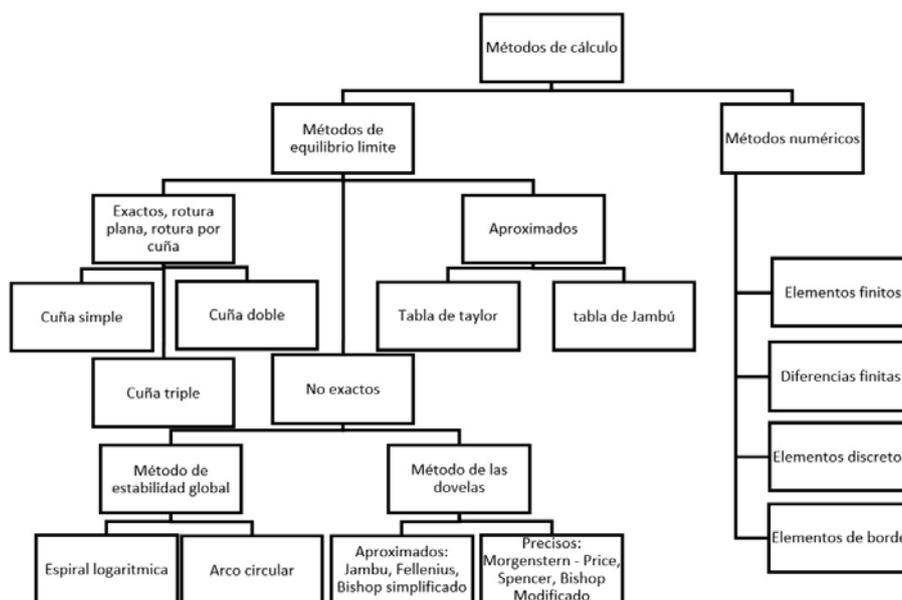


Figura 17 Métodos de cálculo de estabilidad de taludes

Fuente: Olaya (2015)

### 2.4.3. Criterios de aceptabilidad

La evaluación de la estabilidad en una pila de lixiviación se fundamenta principalmente en el factor de seguridad y las deformaciones en la cimentación.

Los factores de seguridad varían según el tipo de análisis realizado, que puede ser estático o pseudoestático, así como el período considerado, ya sea a corto o largo plazo. La Tabla 3 resume los factores de seguridad recomendados en diferentes fuentes bibliográficas.

Tabla 3 Factores de seguridad

FACTOR DE SEGURIDAD									
CASO	NT CE020, 2012	Vector Engineering, Golden, Colorado USA 2005		Guía ambiental, 1996		Bureau of Mining Regulation and Reclamation, 1994	(Ale, Claría, & Bonalmi)	Práctica Estándar	
		Baja peligrosidad	Alta peligrosidad	Controlada	No Controlada			Corto Plazo	Largo plazo
Estático	1.50	1.30	1.50	1.30	1.50	1.30	1.40	1.30	1.50
Pseudoestático	1.25	1.10	1.20	1.00	1.00	1.05	1.00	1.00	1.00

Fuente: Modificada de Cabanillas (2015)

Si el factor de seguridad de un análisis pseudoestático resulta ser inferior a 1, se debe llevar a cabo un análisis de desplazamiento inducido por sismo. Este enfoque, propuesto inicialmente por Newmark (1965), busca evaluar los riesgos específicos del sitio. En la actualidad, se han desarrollado metodologías determinísticas, pseudoprobabilísticas y probabilísticas para calcular los desplazamientos, además de modelos numéricos basados en la teoría de elementos y diferencias finitas.

La literatura y las prácticas estándar de la industria establecen que la deformación permisible en la cimentación es de 16 cm durante la etapa de operación y de 30 cm durante la etapa de cierre. Estos valores se basan en las propiedades de la interfase, principalmente en función de la geomembrana.

## **2.5. Método de elementos finitos**

El método de elementos finitos (MEF), que forma parte de los métodos numéricos, proporciona una aproximación numérica para modelar un medio continuo a través de ecuaciones diferenciales en su forma débil o integral. Este método divide el dominio de estudio en subdominios denominados elementos finitos, creando una discretización del problema.

Cada elemento está asociado a puntos clave llamados nodos. Los nodos adyacentes pertenecen a un mismo elemento, mientras que los nodos de frontera están conectados a varios elementos. La colección de nodos y sus conexiones forma una malla.

La información del modelo se intercambia entre elementos a través de estos nodos, que deben mantener una relación de adyacencia o conectividad, definida por un conjunto de variables conocidas como grados de libertad.

En los análisis mecánicos, los cálculos con elementos finitos se realizan computacionalmente para determinar el campo de desplazamientos, y posteriormente se derivan las deformaciones y tensiones usando relaciones cinemáticas y constitutivas (Moreno, 2018).

### **2.5.1. Consideraciones teóricas**

Los requisitos para resolver teóricamente un modelo de elementos finitos incluyen el equilibrio del sistema, la compatibilidad, el comportamiento constitutivo del material y las condiciones de frontera (de fuerza y desplazamiento).

#### **I. Equilibrio**

Este aspecto se enfoca en la cuantificación de las fuerzas transmitidas a través del medio continuo, utilizando el concepto de esfuerzo (fuerza por unidad de área). Las fuerzas transmitidas dependen de los cambios en magnitud y dirección del esfuerzo, siguiendo reglas específicas.

#### **II. Compatibilidad**

En un medio continuo, la compatibilidad se verifica asegurando que los desplazamientos relativos entre elementos finitos no presenten solapamientos ni vacíos. Matemáticamente, esta condición se expresa en términos de deformaciones.

#### **III. Modelo constitutivo**

Un modelo constitutivo es una representación matemática del comportamiento esfuerzo-deformación del material. Establece la relación entre el equilibrio y la compatibilidad, y puede formularse en términos de parámetros efectivos o totales para capturar el comportamiento del material.

#### **IV. Condiciones de frontera**

Estas condiciones definen variables independientes en el modelo numérico para restringir desplazamientos y giros. Funcionan como valores iniciales en el desarrollo de las ecuaciones diferenciales de cada elemento finito.

### 2.5.2. Tipos de cálculos mecánicos: deformación plana y axilsimetría

El comportamiento del suelo puede ser examinado en función de tres componentes: el esqueleto sólido, el aire y el agua. El esqueleto sólido se evalúa utilizando parámetros efectivos. Por ejemplo, en un análisis tridimensional, las tensiones en un elemento diferencial se pueden representar tal como se ilustra en la Figura 18.

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

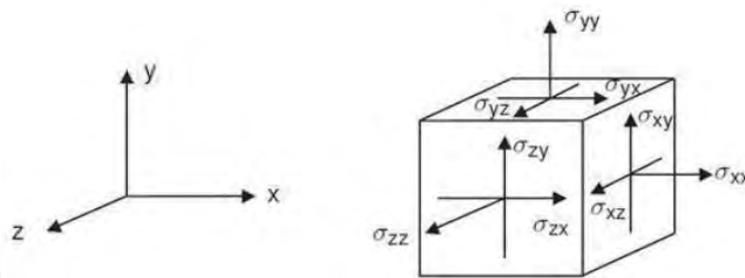


Figura 18 Tensor de tensiones

Fuente: Moreno (2018)

Si se considera un comportamiento elástico, según las ecuaciones de Lamé, se obtiene las siguientes relaciones entre las tensiones y deformaciones:

Ecuación 29  $\sigma_x = \lambda \varepsilon_v + 2G \varepsilon_x$

Ecuación 30  $\sigma_y = \lambda \varepsilon_v + 2G \varepsilon_y$

Ecuación 31  $\sigma_z = \lambda \varepsilon_v + 2G \varepsilon_z$

Ecuación 32  $\tau_{xy} = G \gamma_{xy}$

Ecuación 33  $\tau_{yz} = G \gamma_{yz}$

Ecuación 34  $\tau_{xz} = G \gamma_{xz}$

Siendo  $\lambda$  y  $G$  las constantes de Lamé:

Ecuación 35  $\lambda = \frac{vE}{(1+v)(1-2v)}$

Ecuación 36 
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Siendo otras relaciones muy empleadas en la práctica:

Ecuación 37 Módulo volumétrico 
$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

Ecuación 38 Módulo edométrico 
$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

En un análisis tridimensional, se pueden distinguir tres casos de tensión que simplifican el problema: deformación plana, simetría axial y tensión plana. La deformación plana ocurre cuando una de las dimensiones del cuerpo es significativamente mayor que las otras, permitiendo analizar el cuerpo en dos dimensiones mediante la descomposición en secciones idénticas para calcular la distribución de deformaciones. La simetría axial, también conocida como simetría rotacional, implica una simetría alrededor de un eje, requiriendo la conversión de coordenadas cartesianas a coordenadas polares. En este caso, las tensiones y deformaciones son independientes del ángulo  $\theta$  que define el plano  $\Pi$  con respecto a los ejes cartesianos, como se muestra en la Figura 19. Finalmente, el problema de tensión plana se presenta cuando el cuerpo tiene una dimensión (espesor) mucho menor en comparación con las otras dos dimensiones, y las cargas se aplican en el plano medio del elemento.

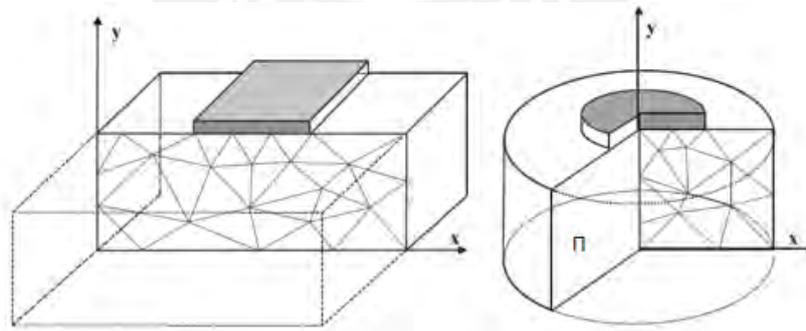


Figura 19 Representación de la deformación plana y axilsimetría

Fuente: Tutorial Plaxis (2011)

### 2.5.3. Método de reducción de resistencia lineal

Para simular la falla de un talud mediante el método de reducción de resistencia, se calcula el factor de seguridad en un punto arbitrario en el que el círculo de Mohr toca la envolvente de falla, como se ilustra en la Figura 20. En este contexto, el estado de tensión en ese punto representa el estado crítico que, al incrementarse, desencadenaría la falla general del talud. En el análisis de elementos finitos, cuando se alcanza este estado límite, se observa una divergencia en los resultados, y el factor de seguridad en este punto corresponde al factor de seguridad mínimo.

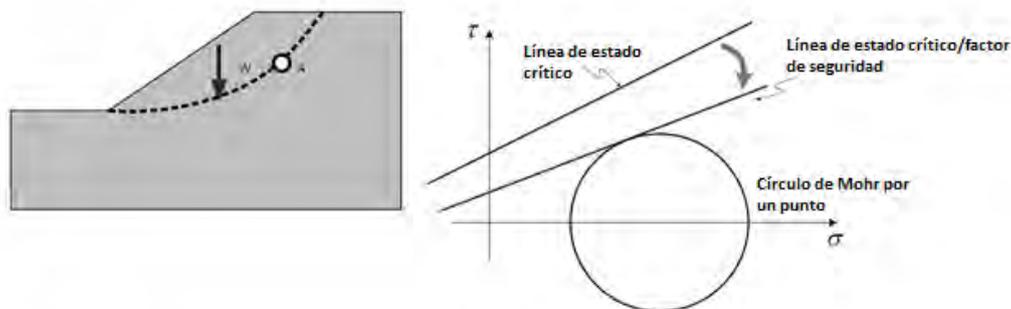


Figura 20 Falla de un talud y análisis con el círculo de Mohr

Fuente: Midas (s.f.)

Un concepto adicional relacionado con la reducción de resistencia es el método de longitud de arco, el cual ha demostrado ser particularmente eficaz en la resolución de problemas estructurales no lineales. Su efectividad se debe a su capacidad para gestionar puntos límite y a la facilidad con la que se puede implementar un tamaño de paso de integración automático. Este método, ilustrado en la Figura 21, está integrado en los principales programas de modelado numérico como Plaxis, FLAC y Midas.

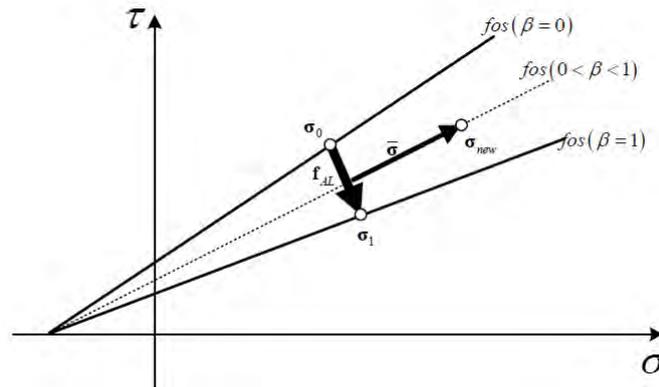


Figura 21 Proceso del análisis de estabilidad de taludes

Fuente: Midas (s.f.)

La expresión para determinar el factor de seguridad mínimo viene dada por la Ecuación 39, donde sus componentes están definidas por la Ecuación 40 y Ecuación 41.

$$\text{Ecuación 39} \quad FS = \frac{\tau}{\tau_f}$$

$$\text{Ecuación 40} \quad \tau = c + \sigma_n * \tan(\phi)$$

$$\text{Ecuación 41} \quad \tau_f = c_f + \sigma_n * \tan(\phi_f)$$

De igual forma, se debe calcular la cohesión ( $c_f$ ) y el ángulo de fricción ( $\phi_f$ ) mediante las Ecuación 42 y Ecuación 43 respectivamente, donde SFR es el factor de reducción de resistencia.

$$\text{Ecuación 42} \quad c_f = \frac{c}{SRF}$$

$$\text{Ecuación 43} \quad \phi_f = \tan^{-1}\left(\frac{\tan(\phi)}{SRF}\right)$$

#### 2.5.4. Modelo constitutivo Mohr Coulomb

El modelo constitutivo de Mohr-Coulomb es una aproximación básica pero efectiva del comportamiento no lineal del suelo, especialmente útil para simular suelos granulares sueltos o finos normalmente consolidados. Este modelo elastoplástico isotrópico combina la elasticidad perfecta, descrita por la ley de Hooke, con el criterio de falla de Mohr-Coulomb en su forma generalizada. La formulación del modelo abarca tanto la plasticidad asociada como

la elasticidad, permitiendo definir claramente la transición entre el comportamiento puramente elástico y el elastoplástico perfecto, como se muestra en la Figura 22. Este criterio de fluencia es una extensión de la ley de fricción de Coulomb aplicada a un estado general de esfuerzos y se expresa en función de los esfuerzos principales (Nieto et al., 2009).

Para su aplicación, el modelo de Mohr-Coulomb requiere cinco parámetros fundamentales: el ángulo de fricción ( $\phi$ ), la cohesión ( $c$ ), el ángulo de dilatancia ( $\psi$ ), el módulo de Young ( $E$ ) y la relación de Poisson ( $\nu$ ). Estos parámetros son ampliamente conocidos y utilizados en la práctica geotécnica, lo que hace de este modelo una herramienta básica pero popular en el campo. No obstante, su capacidad predictiva es limitada en términos de capturar variaciones en la rigidez del suelo y los cambios en las trayectorias de esfuerzos que puedan ocurrir durante la deformación.

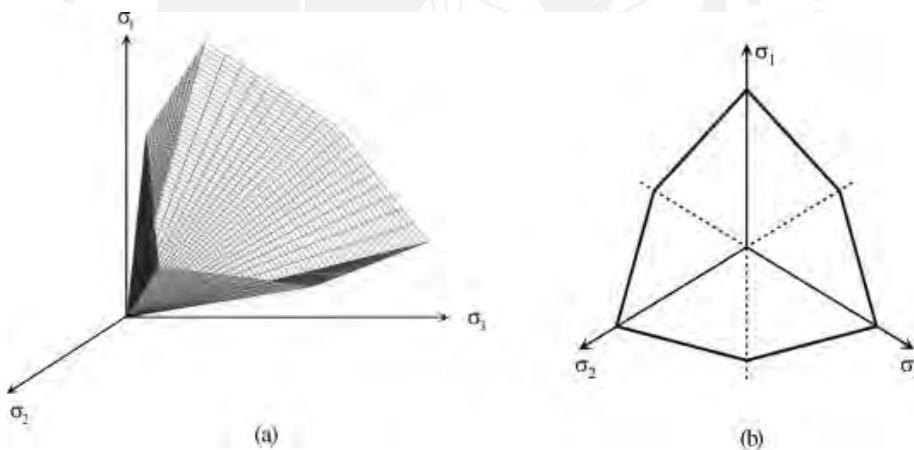


Figura 22 Superficie de fluencia Mohr Coulomb

Fuente: Nieto et al. (2009)

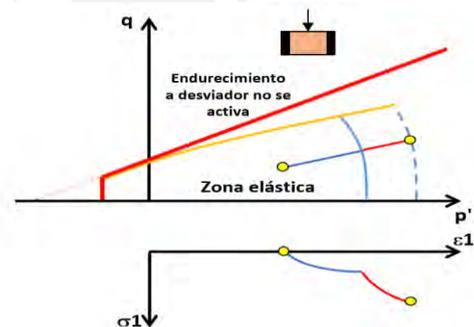
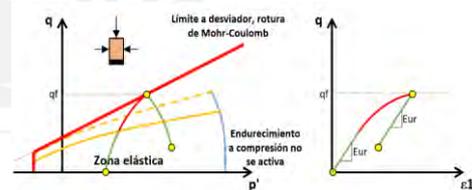
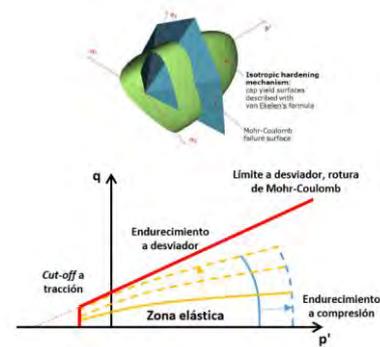
### 2.5.5. Modelo constitutivo Hardening Soil

El modelo constitutivo Hardening Soil (HS y HS-Small) es un modelo elastoplástico no lineal que incorpora endurecimiento tanto a corte como a compresión. Este modelo es capaz de reflejar la dependencia de la rigidez en función del estado de tensión, considerar el efecto de la preconsolidación, calcular las deformaciones plásticas al superar la superficie de fluencia,

contemplar la dilatancia, y capturar tanto la rigidez a pequeñas deformaciones como la degradación en respuesta a cargas cíclicas.

A continuación, se listan las principales características del modelo Harding Soil.

- La zona elástica está delimitada por tres superficies de fluencia: La superficie similar al criterio de Mohr-Coulomb, un cap para cargas isotrópicas y una superficie a tracción (según Rankine).
- Deformaciones plásticas cuando se alcanza la superficie de fluencia de Mohr coulomb.
- Deformaciones plásticas cuando se alcanza la superficie de fluencia a compresión primaria (*volumetric hardening*).
- Ley de fluencia (Flow rule) no asociada para el mecanismo a desviador, asociada para los mecanismos isotrópicos y a tracción. Las superficies de fluencia nunca se contraen, sólo permanecen inmóviles o se expanden (memory of preloading)



- Trayectoria de tensiones efectivas en cálculos no drenados disminuyendo  $p'$ , más realista para arcillas contractivas.
- Rigidez dependiente del estado tensional siguiendo una relación potencial (power law).
- Elasticidad no lineal siguiendo una relación tenso-deformacional casi hiperbólica. Descarga/recarga elástica (modelo HS) o hiperbólica (HS-Small).
- Dilatancia: Ley de fluencia a desviador gobernada por la dilatancia movilizada, que se incrementa desde 0 hasta un valor máximo de  $\psi$ .

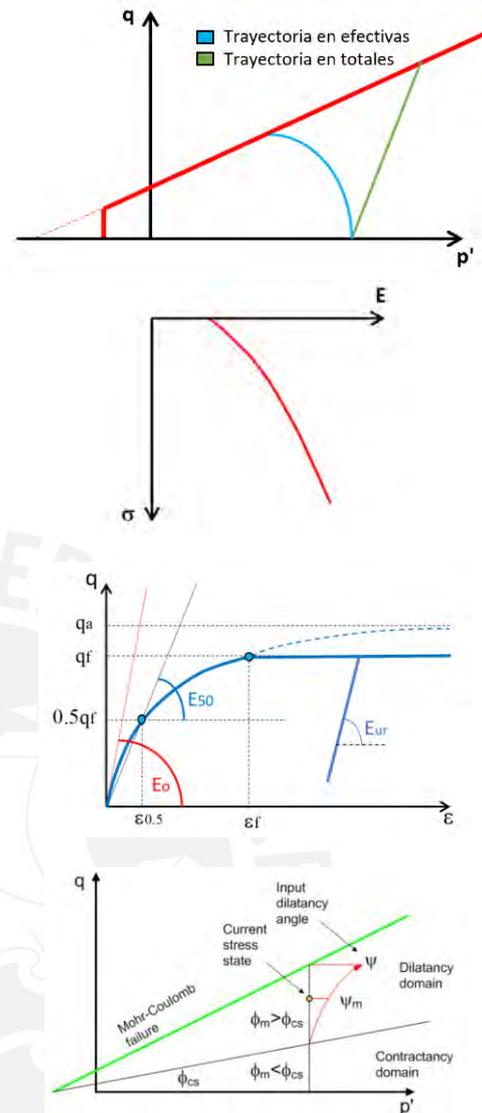


Figura 23 Principales características del modelo Hardening Soil

Fuente: Elaboración propia

## 2.6. Estado del arte

Existen varios trabajos relacionados al análisis de infiltración y estabilidad de taludes para diferentes estructuras mineras; sin embargo, muy pocos consideran las condiciones del suelo parcialmente saturado y el flujo transitorio para el análisis.

A continuación, se ofrece un resumen de los trabajos desarrollados en temas sobre pilas de lixiviación, análisis de infiltración y análisis de estabilidad en condiciones de suelo parcialmente saturado.

- Breitenbach (2004), al evaluar la influencia de la altura en la estabilidad de una pila de lixiviación, en condiciones estables de la fundación y la interfaz, observó que el F.S. incrementaba con la altura, favoreciendo la estabilidad de la estructura en aproximadamente 20%.
- Ale et al (2010), en su artículo sobre el diseño geotécnico sobre pilas de lixiviación, sugieren que se debe realizar un adecuado estudio geológico-geotécnico y de riesgo sísmico en la zona del proyecto, pues de esto dependerá tener análisis representativos al momento de diseñar. De igual modo, sugiere que se realice ensayos de corte a gran escala (ASTM –D5321) de la zona de interfase que se utilizará en el proyecto para distintas situaciones.
- Mostaghimi et al. (2013), realizaron un análisis de infiltración en una pila de lixiviación implementando un modelo computacional que adapta dinámicamente el mallado de los elementos del mineral de forma anisotrópica, el cual se desarrolla a medida que la solución infiltra a través del medio poroso no saturado. En dicha investigación se demostró que el algoritmo de adaptabilidad mejora la precisión numérica de los resultados de manera significativa y que el tiempo de proceso (CPU time) solo se incrementa en un 5 % en comparación a un mallado estático.
- Ludeña (2014), en su trabajo sobre la influencia de bermas y canales en la estabilidad de pilas de lixiviación, concluye que es posible mejorar la estabilidad de este al incluir canales y bermas. Estos canales y bermas deben diseñarse para que la superficie de falla pase por esta en la zona de interfase.
- Cabanillas (2015), en su tesis de grado, concluye que son siete los puntos claves para diseñar geotécnicamente un pad de lixiviados: la investigación de campo, los ensayos de laboratorio, la caracterización de los materiales, las condiciones del lugar, el análisis de esfuerzo-deformación del conjunto y el cumplimiento de la normativa.

- Alonso et al. (1990) desarrollaron un modelo de endurecimiento elastoplástico que depende del campo de esfuerzos efectivos y de dos variables de esfuerzos independientes (esfuerzo total neto y succión mátrica). El modelo refleja los cambios de rigidez del suelo causados por alteraciones de succión, muestra la respuesta irreversible del suelo contra el esfuerzo y las inversiones de succión, y establece las condiciones para el colapso. La formulación de la ley constitutiva depende de nueve constantes, cuatro que describen el modelo de estado crítico y cinco que explican los fenómenos típicamente asociados a un comportamiento parcialmente saturado. El modelo está diseñado para su uso en suelos de moderada a baja plasticidad como arcillas arenosas, arenas y limos arcillosos y suelos granulares.
- Li et al. (2014) plantearon un modelo para estimar la curva característica bimodal y su función de permeabilidad para suelos granulares, el cual utiliza cinco parámetros en base a propiedades físicas del suelo y la relación de vacíos. Este modelo se obtuvo mediante un análisis estadístico de 44 suelos, el cual se puede adaptar a curvas de retención unimodales y bimodales. Las curvas resultantes del modelo no sustituyen las mediciones instrumentales, ya que estas son empíricas; sin embargo, pueden ser utilizadas para análisis preliminares.
- Rojas (2018) planteó un modelo constitutivo totalmente acoplado basado en la teoría del estado crítico y la ecuación de esfuerzos efectivos de Bishop que incluye el fenómeno de colapso por humedecimiento y expansión. El modelo requiere de siete parámetros: la pendiente de la superficie de falla de los ejes ( $M$ ), los índices de compresión y descarga-recarga ( $\lambda, \kappa$ ), la relación de Poisson ( $\nu$ ) y los parámetros de forma de la superficie de fluencia ( $a_1, a_2, r$ ). Los resultados muestran una precisión igual o mayor a la de otros modelos más complejos, que requieren mayor número de parámetros y una calibración previa.

- Tobón et al. (2016) llevaron a cabo un análisis numérico sobre la infiltración de agua en suelos parcialmente saturados, concluyendo que la relación entre la intensidad de la lluvia y la permeabilidad es clave para la disminución de la succión y el aumento de la saturación en suelos. En suelos estratificados, el horizonte menos permeable controla la infiltración, y en taludes homogéneos, la infiltración altera las condiciones de esfuerzo efectivo, afectando la estabilidad y permitiendo identificar con mayor precisión la superficie de falla. Estos resultados destacan la efectividad de las metodologías acopladas de infiltración-deformación para analizar la estabilidad geotécnica.
- Sheikhzadeh et al. (2004) realizaron un modelo computacional de flujo insaturado en una pila de lixiviación, usando los resultados de una prueba de columna. El método utilizó diferencias finitas con elementos discretos para la formulación y calibración del modelo, que simulaba una columna de partículas de oro de 40 cm de altura. Los resultados muestran que el tamaño de poros, la altura del mineral y la permeabilidad influyen en la relación del flujo volumétrico ( $\frac{u_{out}}{u_{in}}$ ), es decir, conforme aumenten los parámetros mencionados, más rápido (t) se alcanza dicha relación. De igual forma, se demuestra que, a menor permeabilidad, se requiere mayor tiempo para llegar al estado estacionario donde el flujo neto es cero y, similar a Tobón et al. (2015), a mayor relación entre la infiltración y la permeabilidad, mayor es el grado de saturación.
- Chávez et al. (2013) recomiendan determinar la curva de retención utilizando la superposición de más de un método, siendo la más sugerida el ensayo de papel filtro, ya que abarca mayores rangos de presión. Asimismo, menciona que, para analizar la estabilidad de taludes con infiltración, es recomendable utilizar la curva de retención por humedecimiento y, en el caso de considerar la evaporación, la curva de retención por secado.

- Según López y Mendoza (2016), en su estudio sobre el flujo de agua en suelos parcialmente saturados, se sugiere disponer de la mayor cantidad posible de datos de laboratorio, como pruebas de índices, curvas granulométricas y permeabilidades del suelo, para estimar adecuadamente las funciones hidráulicas del suelo (SWCC y función de conductividad hidráulica). Además, se señala que, para suelos con altos grados de permeabilidad, puede ser práctico omitir el análisis de estructuras, ya que estos materiales tienden a no converger fácilmente, lo que puede prolongar significativamente el tiempo de procesamiento del análisis numérico (CPU time).
- Carnero et al. (2018) realizaron un análisis de infiltración unidimensional en un suelo residual no saturado. El resultado de su investigación evidencia que, para diferentes condiciones iniciales de saturación, el tiempo de infiltración es variable, siendo mayor en un estado seco o de baja saturación. De igual modo, muestra que, si el material alcanza la saturación en un menor tiempo, mayor es el riesgo de daños por efectos de expansión, lo cual indica que se debe adoptar cuidados especiales cuando el suelo es utilizado en obras de ingeniería.
- Berenguer et al. (2019) concluyeron que los parámetros del suelo parcialmente saturado favorecen a la estabilidad de las estructuras. Para el caso particular de una presa, es posible incrementar el talud aguas abajo sin afectar la seguridad de esta.
- Mendoza (2020) realizó un análisis de estabilidad de talud en condiciones de suelo parcialmente saturado en una región tropical de Brasil. El análisis se realizó en un suelo de arcilla de alta plasticidad con arena (CH) mediante el método de equilibrio límite, considerando el flujo transitorio por efectos de la lluvia del lugar. El análisis concluye que el F.S. disminuye por la saturación del suelo producto de la infiltración de la lluvia e incrementa por efectos de la succión cuando se tiene un flujo estacionario.

## CAPÍTULO 3: CASOS DE VALIDACIÓN Y VERIFICACIÓN

En este capítulo, se lleva a cabo la validación y verificación del programa de cálculo de elementos finitos utilizado para el análisis de la infiltración y estabilidad. Se presentan cinco casos de estudio que ofrecen ejemplos básicos y útiles para comprender el comportamiento del suelo en situaciones específicas. Se ha prestado especial atención a la influencia de la succión matricial en el cálculo de los esfuerzos efectivos, el factor de seguridad y la saturación en un estado transitorio. Estos casos de validación y verificación permitirán comprender de forma más sencilla los resultados finales del diseño de nuestra pila de lixiviación.

### 3.1. Caso I: Esfuerzos efectivos de Bishop

#### 3.1.1. Descripción

En 1959, Bishop propuso una ecuación para determinar los esfuerzos efectivos en suelos parcialmente saturados, la cual se presenta en la Ecuación 10. Posteriormente, en 1963, Bishop & Blight introdujeron una formulación más generalizada que incluye un parámetro adicional, "m", permitiendo calcular los esfuerzos efectivos en las direcciones principales X, Y, Z. La Ecuación 44 refleja esta formulación, que a su vez se encuentra implementada en el software Plaxis.

$$\text{Ecuación 44} \quad \sigma' = \sigma - m[\chi p_w + (1 - \chi)p_\alpha]$$

En el cual,

$$\begin{aligned} \sigma &= [\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \tau_{xy} \quad \tau_{xz} \quad \tau_{yz}]^T \\ \sigma' &= [\sigma'_{xx} \quad \sigma'_{yy} \quad \sigma'_{zz} \quad \tau'_{xy} \quad \tau'_{xz} \quad \tau'_{yz}]^T \\ m &= [1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \end{aligned}$$

Donde,  $\sigma$  y  $\sigma'$  son esfuerzos totales y efectivos,  $p_\alpha$  es la presión del aire,  $p_w$  es la presión del agua y  $\chi$  es el coeficiente de succión mátrica, el cual se determina experimentalmente; sin embargo, cuando no se cuenta con esta información, se asume como la saturación efectiva Seff (Bolzon, Schrefler & Zienkiewicz, 1996).

Ecuación 45 
$$S_{eff} = \frac{S - S_{res}}{S_{sat} - S_{res}}$$

El objetivo del caso es verificar y validar la capacidad del software Plaxis para calcular los esfuerzos efectivos del suelo mediante la ecuación de Bishop & Blight (1963).

### 3.1.2. Modelo conceptual

Se va a modelar una muestra de suelo de 5 cm de ancho y 2 m de alto, en el cual existe una altura de agua en la parte superior e inferior de 1 m y -1 m respectivamente, de tal manera que se genere una succión constante de 10 kPa en toda la muestra. En la Figura 24 se muestra la geometría y el mallado de la muestra.

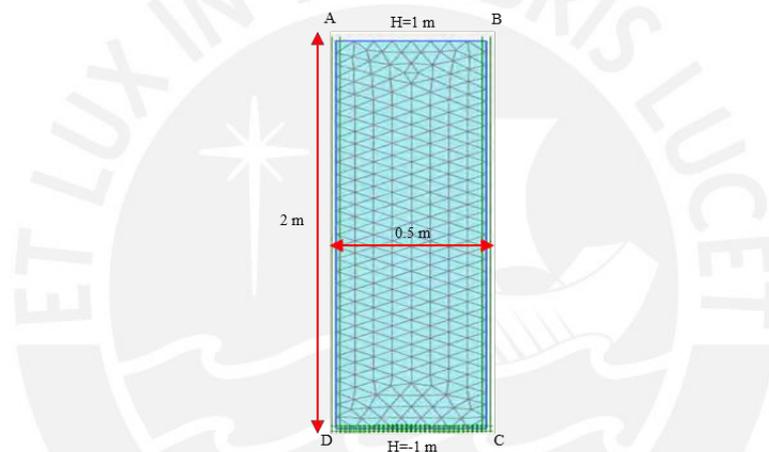


Figura 24 Modelo conceptual para el caso I

Fuente: Elaboración propia

Las condiciones de borde del problema se especifican en la Tabla 4.

Tabla 4 Resumen de condiciones de borde del modelo

Contorno	Mecánica de suelo	Flujo
AB	$u_x=0$	outflow
BC	$u_x=0$	Closed
CD	$u_x=u_y=0$	Seepage
DA	$u_x=0$	Closed

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.3. Propiedades del material

El modelo constitutivo lineal elástico, utilizado para simular la roca, emplea los parámetros detallados en la Tabla 5. Es importante destacar que, para este análisis, se ha asumido un comportamiento drenado del suelo.

Tabla 5 Parámetros para el modelo lineal elástico

Descripción	Símbolo	Unidad	Valor
Módulo de elasticidad	$E^{\text{ref}}$	kN/m <sup>2</sup>	10000
Módulo de Poisson	$\nu$	-	0.2
Índice de vacío inicial	$e_{\text{init}}$	-	0.5625
Peso específico del agua	$\gamma_w$	kN/m <sup>3</sup>	10.0
Peso específico saturado	$\gamma_{\text{sat}}$	kN/m <sup>3</sup>	20.0
Peso específico no saturado	$\gamma_{\text{unsat}}$	kN/m <sup>3</sup>	20.0

Fuente: Elaboración propia

Para el modelamiento del suelo no saturado, también se requiere ingresar los parámetros de la curva característica del suelo. En este caso se ha utilizado el modelo de ajuste de Van Genuchten (1980), cuyos parámetros se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6 Parámetros de ajuste de la SWCC (Van Genuchten Model)

Descripción	Símbolo	Unidad	Valor
Saturación saturada	$S_{\text{sat}}$	-	1.0
Saturación residual	$S_{\text{res}}$	-	0.02
Parámetro de Van Genuchten	$g_n$	-	2.286
Parámetro de Van Genuchten	$g_a$	m <sup>-1</sup>	2.24
Parámetro de Van Genuchten	$g_l$	-	0
Permeabilidad del suelo	$k_x=k_y$	m/día	0.1

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.4. Resultados y discusión

En la Figura 25 (a) y Figura 25 (b), se muestran los resultados de esfuerzos efectivos ( $\sigma'$ ) obtenidos de Plaxis. Se puede observar que el esfuerzo efectivo en la base es de  $-43.26 \text{ kN/m}^2$  y en la parte superior es de  $-3.26 \text{ kN/m}^2$ . Por otro lado, la Figura 25 (c) muestra la succión constante de  $10 \text{ kN/m}^2$  en toda la muestra, tal y como se había asumido al inicio del análisis.

Para verificar y validar los esfuerzos efectivos obtenidos en Plaxis, se procede a utilizar la Ecuación 44. Como se sabe que la succión es  $10 \text{ kN/m}^2$ , se calcula la saturación a partir de la curva característica de la formulación de Van Genuchten (1980), obteniéndose un valor de  $0.3398$ . Reemplazando en la Ecuación 45, se obtiene una saturación efectiva de  $0.326$ . Finalmente, utilizando la Ecuación 44 y asumiendo que  $p_\alpha$  es igual a  $0$  en el nivel de referencia, se calcula los esfuerzos efectivos en la base y en la parte superior de la muestra de la siguiente manera:

$$\sigma'_{top} = 0 - 0.326 \times 10 = -3.26 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{base} = -40 - 0.326 \times 10 = -43.26 \text{ kPa}$$

Estos resultados son iguales a los obtenidos en Plaxis, por lo que se verifica y valida la implementación de la ecuación de Bishop en el programa.

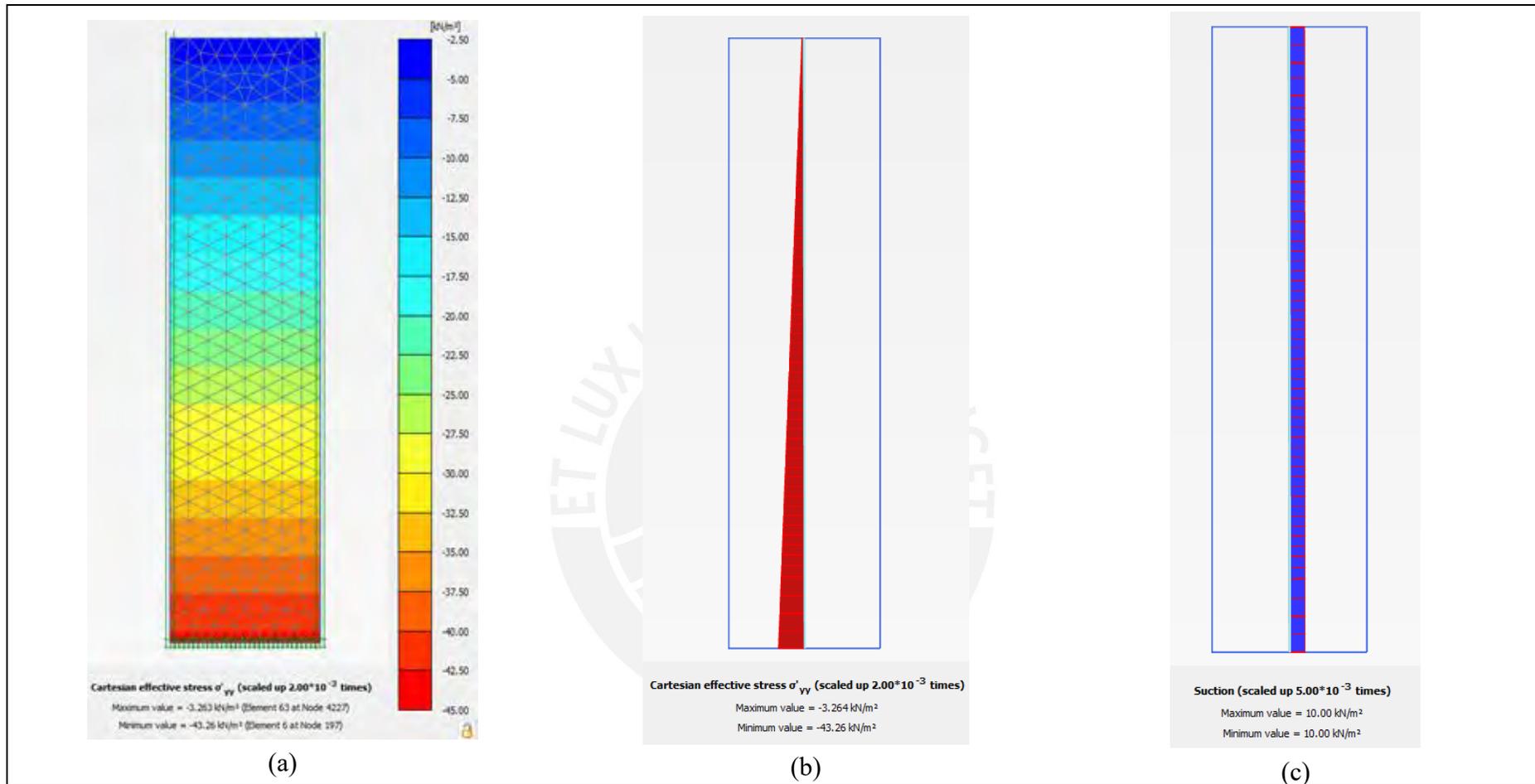


Figura 25 Resultados de esfuerzos efectivos y succión en Plaxis

Fuente: Elaboración propia

## 3.2. Caso II: Análisis de estabilidad de taludes con infiltración por lluvia

### 3.2.1. Descripción

El objetivo del caso de análisis es obtener los FS del talud considerando los efectos de la succión y la lluvia en un tiempo determinado.

### 3.2.2. Modelo conceptual

En este caso se va a modelar un talud de 20 m de ancho y 10 m alto con un nivel freático a 10 m sobre la base. Los lados DE y FA son fronteras impermeables, la base EF es una frontera que permite el paso de flujo, mientras que los lados AB, BC y CD son fronteras permeables. En la Figura 26 se muestra la geometría y el mallado del caso de análisis.

Para el cálculo del factor de seguridad se va a considerar tres escenarios: en el primero se evaluará el talud ignorando la succión y la lluvia, en el segundo se evaluará el talud considerando la succión, pero no la lluvia y en el último se evaluará el talud considerando la succión y el efecto de la lluvia, el cual es de 0.01 m/día durante un periodo total de 1 día.

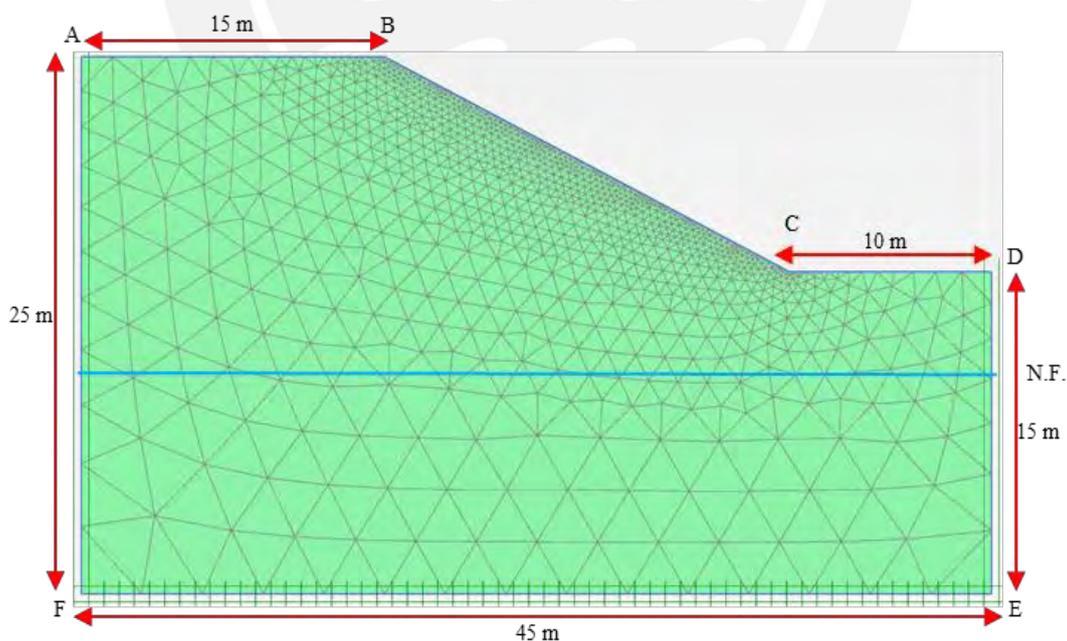


Figura 26 Modelo conceptual para el caso II

Fuente: Elaboración propia

Las condiciones de borde del problema se especifican en la Tabla 7. Cabe mencionar que el mallado en la parte superior del talud en AB y CD se ha refinado a una escala de 0.5 y en BC a una escala de 0.1 respecto al resto del talud.

Tabla 7 Resumen de condiciones de borde del modelo

Contorno	Mecánica de suelo	Flujo
AB	$u_x=0$	Infiltration
BC	$u_x=0$	Infiltration
CD	$u_x=0$	Infiltration
DE	$u_x=0$	Closed
EF	$u_x=u_y=0$	Seepage
FA	$u_x=0$	Closed

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3. Propiedades del material

El modelo constitutivo Hardening Soil, utilizado para simular los lifts minerales, emplea los parámetros detallados en la Tabla 8. Es importante destacar que, para este análisis, se ha asumido un comportamiento drenado del suelo.

Tabla 8 Parámetros para el modelo Hardening soil

Descripción	Símbolo	Unidad	Valor
Módulo de elasticidad	$E_{50}$	$\text{kN/m}^2$	20000
Módulo de elasticidad edométrico	$E_{oed}$	$\text{kN/m}^2$	20000
Módulo de elasticidad	$E_{ur}$	$\text{kN/m}^2$	60000
	m	-	0.5
	$\nu_{ur}$	-	0.2
Cohesión	$c'$	$\text{kN/m}^2$	1
Phi	$\phi$	$^\circ$	30

Descripción	Símbolo	Unidad	Valor
Dilatancia	$\psi$	psi	0
Peso específico saturado	$\gamma_{\text{sat}}$	kN/m <sup>3</sup>	20.0
Peso específico no saturado	$\gamma_{\text{unsat}}$	kN/m <sup>3</sup>	16.0

*Fuente: Elaboración propia*

Para el modelamiento del suelo no saturado, también se requiere ingresar los parámetros de la curva característica del suelo. En este caso se ha utilizado el modelo de ajuste de Van Genuchten (1980) definido por el tipo de suelo en Plaxis. El tipo de suelo es limo con una permeabilidad  $k_x=k_y$  de 0.5996 m/día.

### 3.2.4. Resultados y discusión

En la Figura 27, Figura 28 y Figura 29 se muestran los resultados del F.S. para los 3 escenarios evaluados. Los resultados obtenidos son de 1.233, 2.384 y 1.844 para el primer, segundo y tercer escenario.

Como se puede notar, el efecto de la succión hace que el F.S. aumente en 93% respecto al primer escenario, mientras que el efecto de la lluvia hace que el F.S. disminuya en 23% respecto al segundo escenario. Es decir, al considerar la succión, los esfuerzos efectivos del suelo incrementan, mientras que estas se reducen cuando el suelo tiende a saturarse por la reducción de la succión.

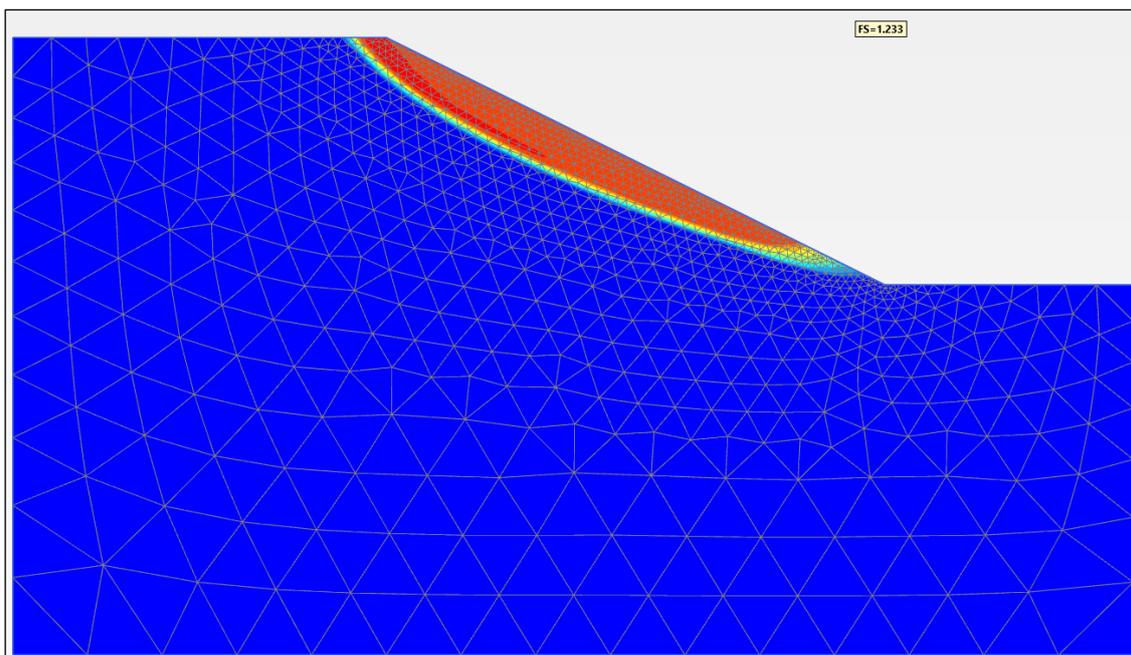


Figura 27 Resultados de análisis de estabilidad del escenario 1

Fuente: Elaboración propia

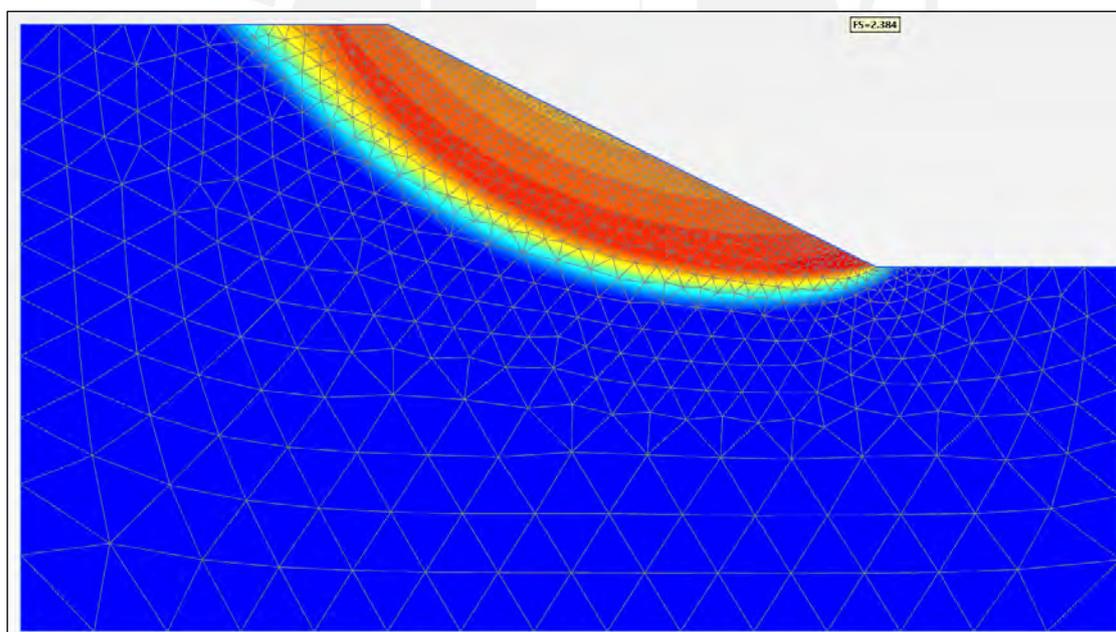


Figura 28 Resultados de análisis de estabilidad del escenario 2

Fuente: Elaboración propia

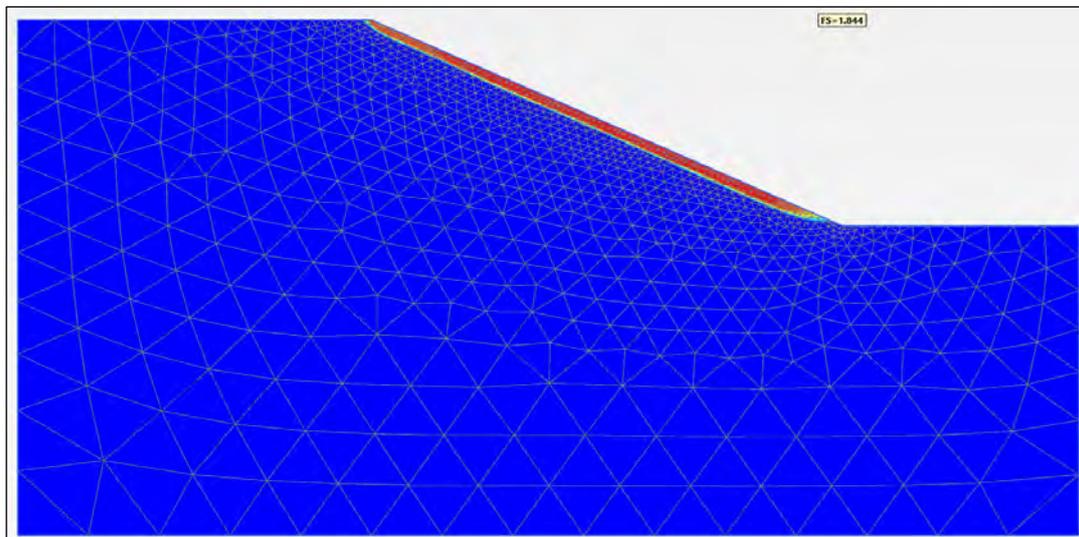


Figura 29 Resultados de análisis de estabilidad del escenario 3

Fuente: Elaboración propia

La Figura 30 muestra los desplazamientos totales obtenidos en el tercer escenario, siendo el máximo desplazamiento de 1.5 mm. La Figura 31 muestra el grado de saturación del talud en un día de lluvia, donde la zona de mayor saturación se encuentra al borde del talud.

La infiltración producto de la lluvia es el causante de la deformación e inestabilidad del talud. Los esfuerzos efectivos se ven reducidos por el incremento de presión de poros debido a la saturación del borde del talud, lo que genera un plano de falla.

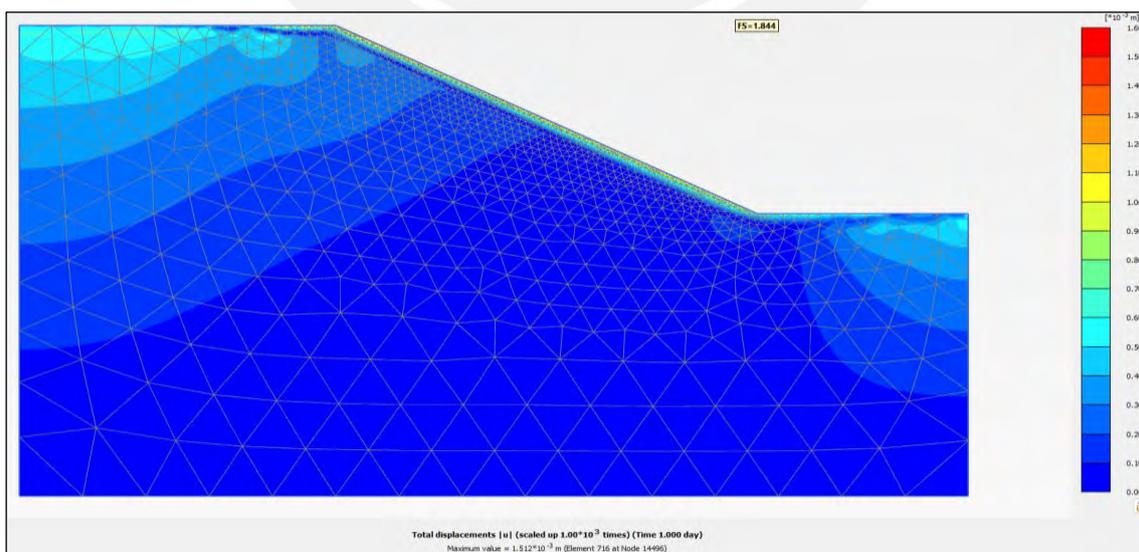


Figura 30 Resultados de desplazamientos totales del escenario 3

Fuente: Elaboración propia

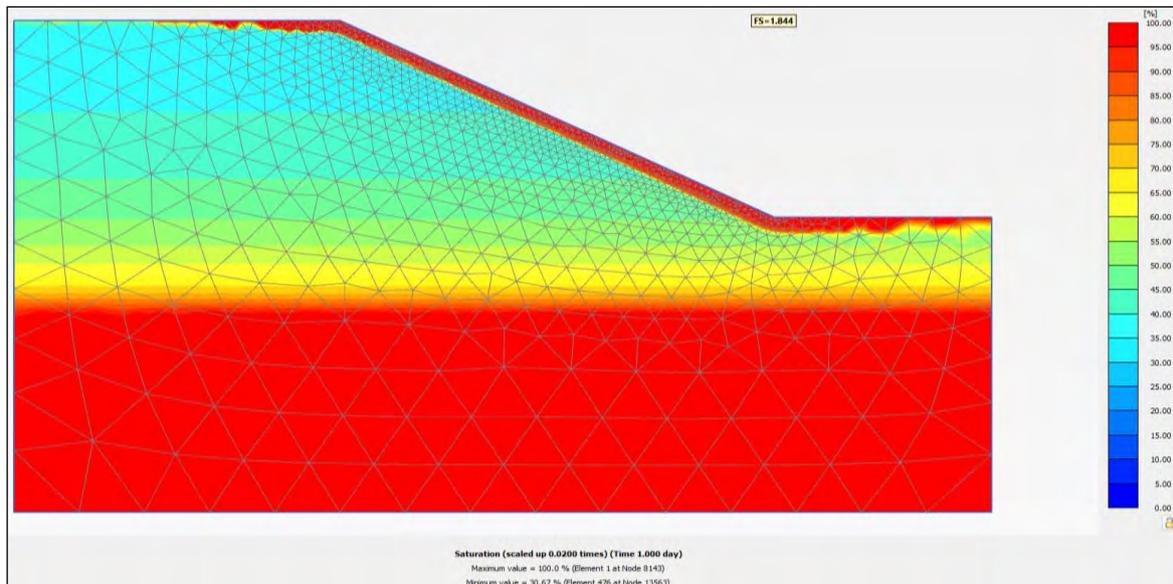


Figura 31 Resultados de saturación del escenario 3

Fuente: Elaboración propia

### 3.3. Caso III: Consolidación unidimensional

#### 3.3.1. Descripción

La consolidación es un proceso de flujo transitorio en el que hay una variación del volumen a medida que el suelo se ajusta al nuevo régimen de tensión efectiva. El proceso de consolidación se puede explicar mediante el método analítico planteada por Verruijt (2001) con la siguiente ecuación:

Ecuación 46

$$\frac{p}{p_0} = \frac{4}{\pi} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^{j-1}}{2j-1} \cos\left[(2j-1)\frac{\pi z}{h}\right] \exp\left[-(2j-1)^2 \frac{\pi^2}{4} \frac{c_v t}{h^2}\right].$$

El objetivo de este análisis es verificar y validar el modelo de consolidación mediante el método de elementos finitos (Plaxis) y el método analítico (Ecuación 46).

#### 3.3.2. Modelo conceptual

En este caso se va a modelar una muestra de 1 m de diámetro por 1 m de altura cargada en la parte superior AB por 100 kPa para generar el exceso de presión de poros. Los lados BC y

AD y la base CD son fronteras impermeables, mientras la parte superior AB es una frontera drenante. Cabe mencionar que el nivel freático se supone en la parte superior AB de la muestra generando un suelo totalmente saturado. En la Figura 32 se muestra la geometría y el mallado del caso de análisis.

Para el análisis se va a considerar 10 etapas de consolidación con intervalos de 0.1, 0.1, 0.3, 0.5, 1, 3, 5, 10, 30 y 50 días.

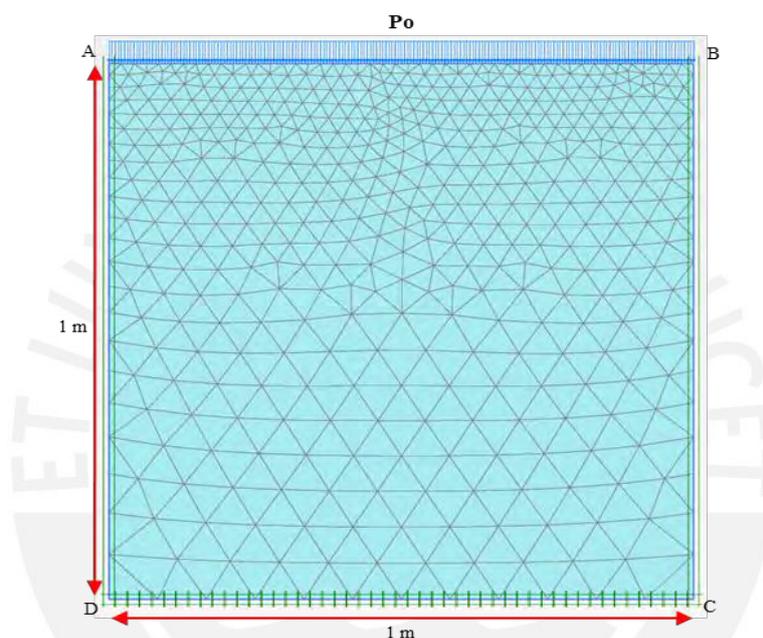


Figura 32 Modelo conceptual para el caso III

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 9 especifica las condiciones de borde o de frontera del modelo.

Tabla 9 Resumen de condiciones de borde del modelo

Contorno	Mecánica de suelo	Flujo
AB	$\theta_n=100$ kPa	Outflow
BC	$u_x=0$	Closed
CD	$u_x=u_y=0$	Closed
DA	Axial simétrico	Axial simétrico

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3. Propiedades del material

El modelo constitutivo lineal elástico, utilizado para simular el basamento rocoso, emplea los parámetros detallados en la Tabla 10. Es importante destacar que, para este análisis, se ha asumido un comportamiento no drenado del suelo.

Tabla 10 Parámetros para el modelo lineal elástico

Descripción	Símbolo	Unidad	Valor
Módulo de elasticidad	E	kN/m <sup>2</sup>	1000
Relación de vacío inicial	$e_{init}$	-	0.5
Módulo cortante	G	kN/m <sup>2</sup>	500
Módulo de elasticidad edométrico	$E_{oed}$	kN/m <sup>2</sup>	1000
Módulo de Poisson	$\nu$	-	0
Permeabilidad	$k_x=k_y$	m/day	0.001

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.4. Resultados y discusión

En la Figura 33, se muestra los resultados de los valores de exceso de presión de poros para un  $t=0.2$  días,  $t=2$  días y  $t=20$  días obtenidos con Plaxis. Se puede observar que, para  $t=0.2$  días, el exceso de presión de poros máximo es de 0.98 kN/m<sup>2</sup>, para  $t=2$  días, es de 0.77 kN/m<sup>2</sup> y, para  $t=20$  días, es de 0.02 kN/m<sup>2</sup>. Es decir, el exceso de presión de poros se va disipando a medida que pasa el tiempo. También se observa que al  $t= 20$  días el exceso de presión de poros se ha disipado bastante hasta ser cercano a 0 kN/m<sup>2</sup> como se muestra en la Figura 34.

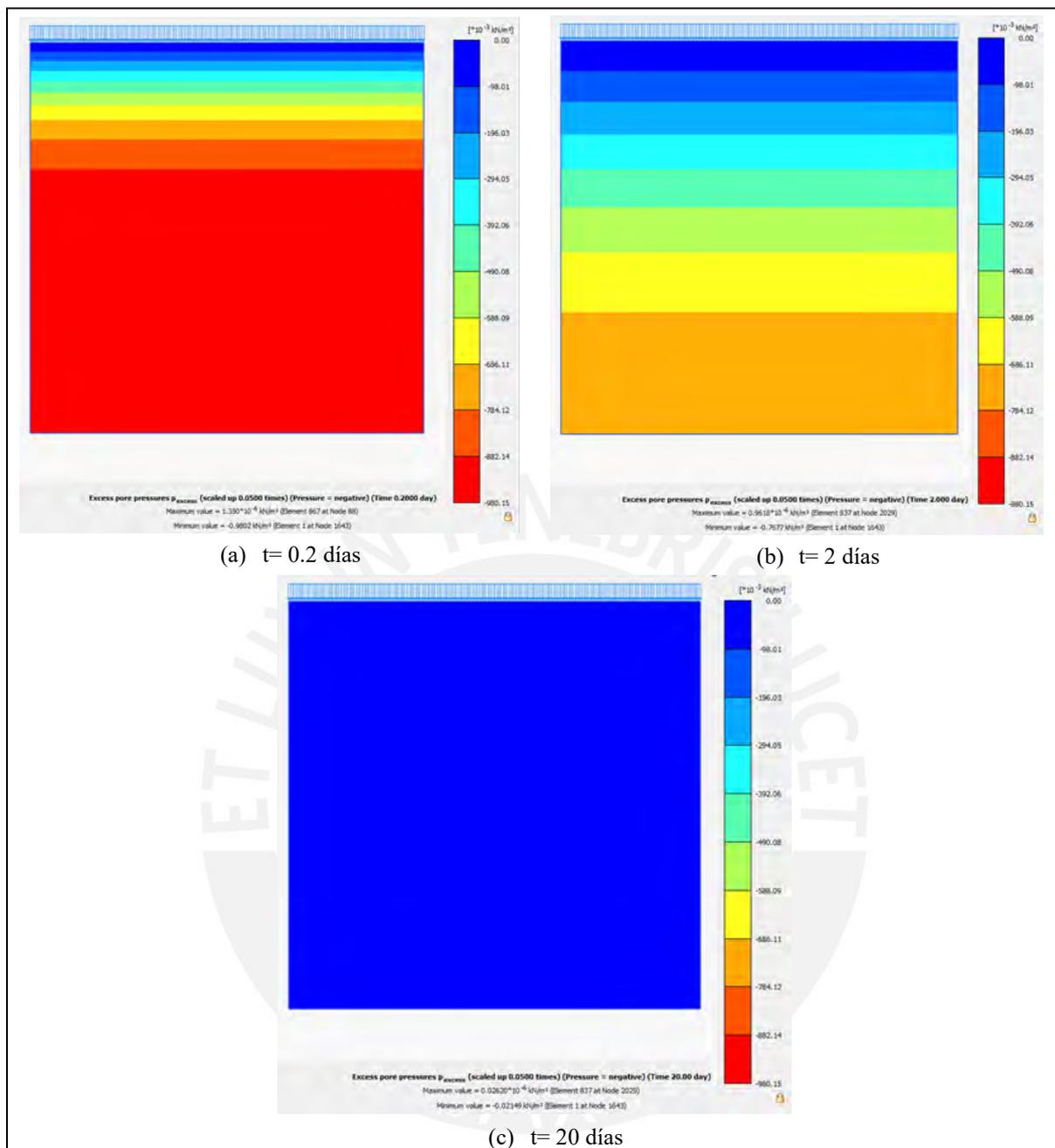


Figura 33 Resultados de exceso de presión de poros para  $t=0.2$  días,  $t=2$  días y  $t=20$  días

Fuente: Elaboración propia

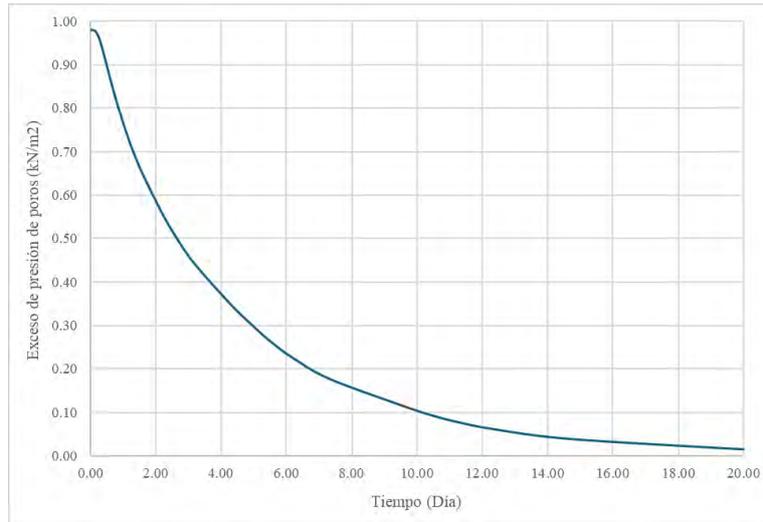


Figura 34 Resultados de exceso de presión de poros en el tiempo

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Ecuación 46, se puede calcular de forma analítica los descensos de presión de poros en el tiempo. En la Figura 35 se muestra con puntos azules el descenso de presión de poros mediante el método analítico y en línea continua lo obtenido por el método de elementos finitos en Plaxis.

Los resultados obtenidos por ambos métodos son similares, por lo que se verifica y valida el fenómeno de consolidación en el programa.

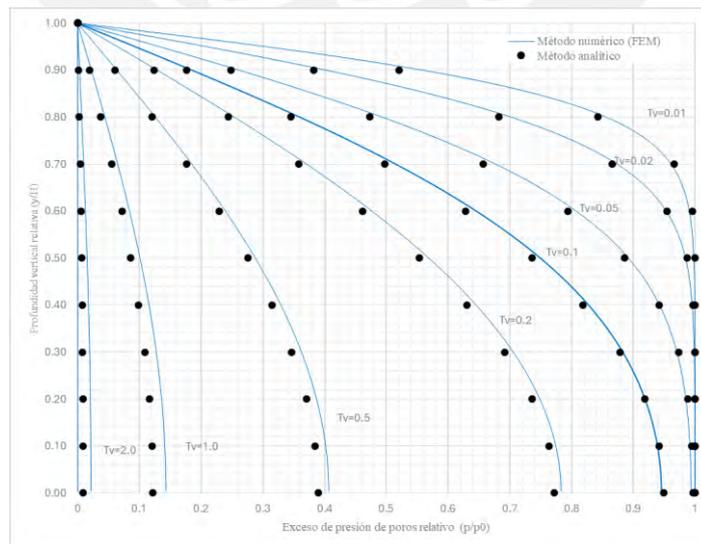


Figura 35 Resultados de exceso de presión de poros relativo para cada tiempo de consolidación y por método numérico y analítico

Fuente: Elaboración propia



Tabla 11 Resumen de condiciones de borde del modelo

Contorno	Mecánica de suelo	Flujo
AB	$u_x=0$	Seepage
BC	$u_x=u_y=0$	Closed
CD	$u_x=0$	Seepage
DE, EF, GH	$u_x=0$	Seepage
FG	$u_x=0, q=23 \text{ kN/m}^2$	Seepage

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.3. Propiedades del material

Los parámetros del suelo utilizados para el modelo constitutivo Mohr Coulomb se presentan en las Tabla 12. Cabe mencionar que para este problema se ha considerado un comportamiento drenado del suelo.

Tabla 12 Parámetros para el modelo Mohr Coulomb para el terraplén

Descripción	Símbolo	Unidad	Terraplén	Cimentación
			Valor	Valor
Módulo de elasticidad	E	$\text{kN/m}^2$	28000	12500
Cohesión	$c'$	$\text{kN/m}^2$	7	7
Phi	$\phi$	$^\circ$	32.5	32.5
Dilatancia	$\psi$	psi	0	0
Módulo de Poisson	$\nu$	-	0.35	0.35
Peso específico saturado	$\gamma_{\text{sat}}$	$\text{kN/m}^3$	22.0	22.0
Peso específico no saturado	$\gamma_{\text{unsat}}$	$\text{kN/m}^3$	20.5	20.5
Permeabilidad	$k_x=k_y$	m/day	0.012	0.02

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.4. Resultados y discusión

En la Figura 37 se muestra los desplazamientos totales verticales al final de las etapas constructivas y luego de aplicar la sobrecarga, cuyo valor máximo de desplazamiento total es de 0.37 m en la parte superior, mientras que el desplazamiento total mínimo en la parte inferior de la cimentación es de 0.03 m.

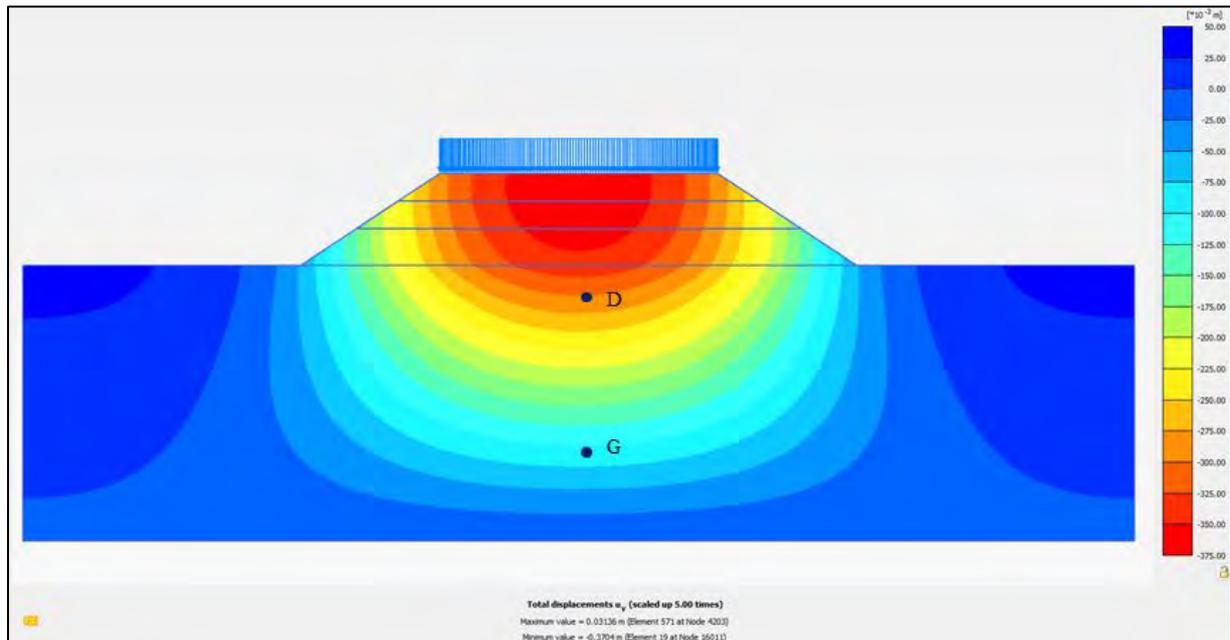


Figura 37 Resultados de desplazamiento total del modelo en Plaxis

Fuente: Elaboración propia

Además, se ha colocado dos puntos de control (D y G) para calcular y observar el exceso de presión de poros y el desplazamiento vertical en la parte inferior y superior de la cimentación. En la Figura 38 se observa que los excesos de presión de poros son mayores en el punto D que en el punto G. Además, se nota que la disipación de exceso de presión de poros es casi completa por cada etapa de recrecimiento del terraplén.

Por otro lado, en la Figura 39 se muestra que el desplazamiento vertical o asentamiento en el punto D y en el punto G, siendo estos de 0.26m y 0.065m respectivamente. En este gráfico, se observa que los máximos incrementos de desplazamiento son producto del recrecimiento (sobrecarga) y no tanto por la consolidación (reducción de la relación de vacíos).

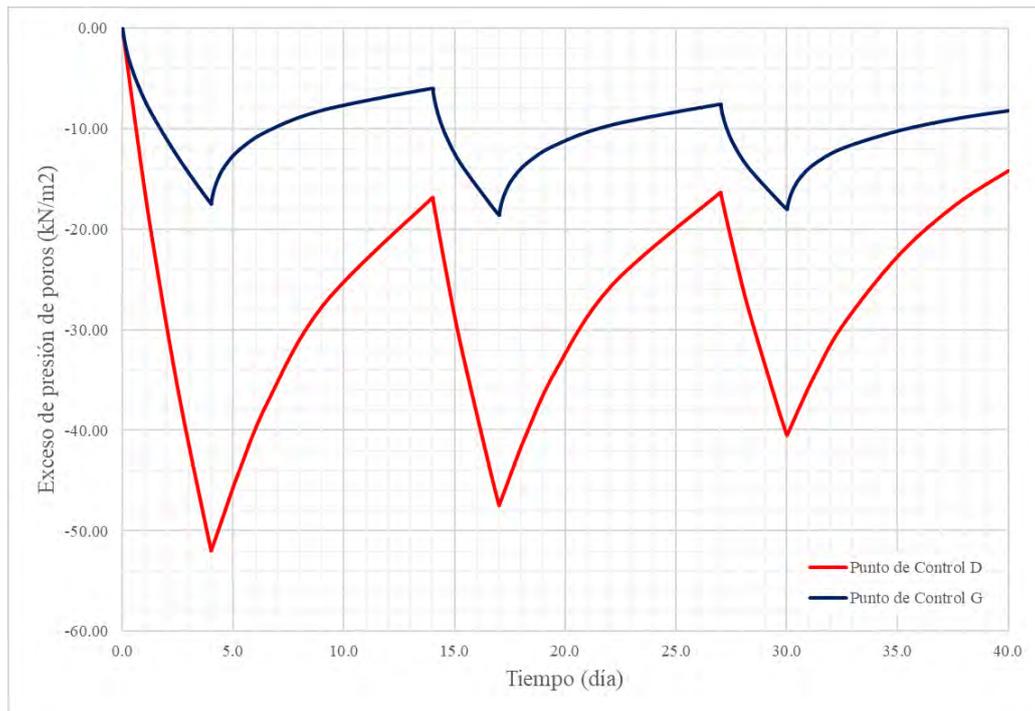


Figura 38 Exceso de presión de poros en el tiempo

Fuente: Elaboración propia

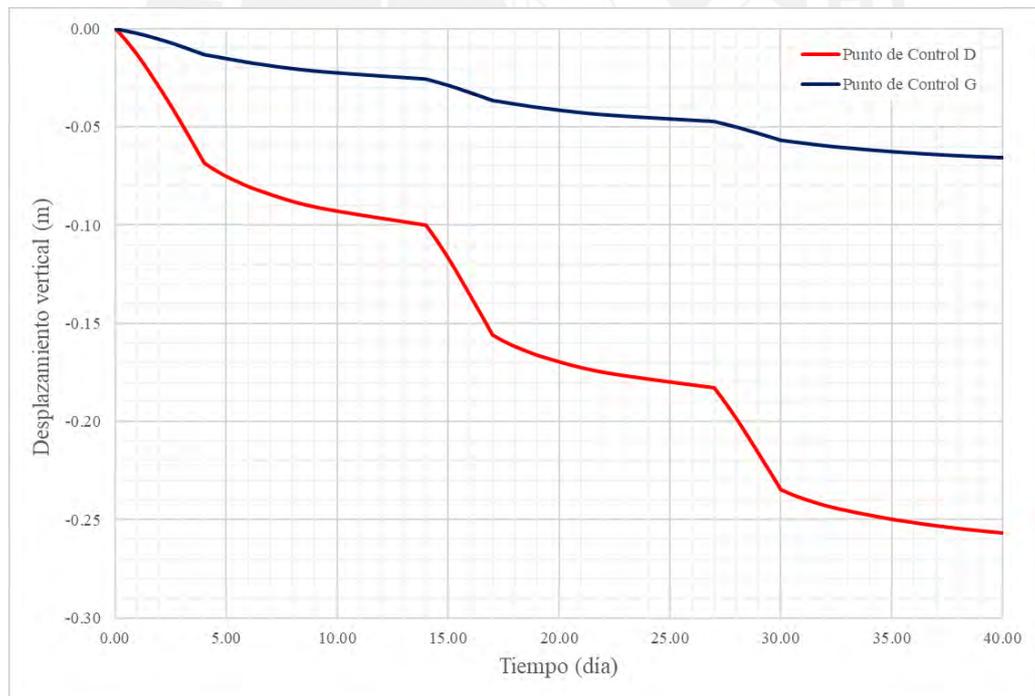


Figura 39 Desplazamiento vertical en el tiempo

Fuente: Elaboración propia

### 3.5. Caso V: Análisis de infiltración transitoria

#### 3.5.1. Descripción

En este caso de análisis, se va a desarrollar dos modelos de flujo transitorio en el software Plaxis. El primer modelo tiene como objetivo validar y verificar la formulación numérica del programa comparándolo con la solución analítica propuesta por Srivastava and Yeh (1991).

El segundo modelo tiene como objetivo mostrar los efectos de la tasa de infiltración en el flujo transitorio de un suelo homogéneo a nivel de succión y saturación.

#### 3.5.2. Modelo conceptual

El modelo conceptual consta de una columna de suelo de 0.5 cm de ancho y 1 m de alto compuesta por un estrato de arena homogénea. El nivel freático se sitúa en la base de la columna. Las condiciones de frontera incluyen restricciones de desplazamiento lateral en los bordes de la muestra, y una restricción bidireccional en la base, mientras que la parte superior se encuentra sin restricciones.

En el primer escenario las condiciones iniciales de flujo se representan con el perfil del estado estacionario para una tasa de infiltración  $I=0.1Ks$  [m/h], mientras que, para tiempos superiores, la tasa de infiltración es de  $I=0.9Ks$  [m/h] en estado transitorio. Los tiempos considerados en este análisis son de 0, 1, 5, 10, 20 y 100 h.

En el segundo escenario las condiciones iniciales de flujo son determinados a partir del nivel freático, posteriormente, se aplican tasas de infiltración variables en la frontera superior de la columna de  $I=0.1ks$ ,  $I=0.3ks$ ,  $I=0.5ks$  y  $I=1ks$  [m/h]. Los tiempos considerados para los análisis son los mismos al primer escenario.

La Figura 40 muestra la representación geométrica de la columna de suelo y el mallado del modelo.

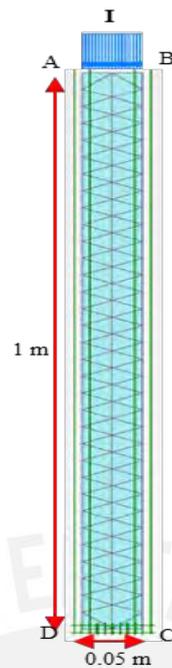


Figura 40 Modelo conceptual para el caso V

Fuente: Elaboración propia

Las condiciones de borde del problema se especifican en la Tabla 13.

Tabla 13 Resumen de condiciones de borde del modelo

Contorno	Mecánica de suelo	Flujo
AB	$u_x=0$	Infiltration
BC	$u_x=0$	Closed
CD	$u_x=u_y=0$	Open
DA	$u_x=0$	Closed

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.3. Propiedades del material

Los parámetros del suelo usados en el modelo constitutivo lineal elástico se detallan en la Tabla 14. Cabe mencionar que para este problema se ha considerado un comportamiento drenado del material.

Tabla 14 Parámetros para el modelo lineal elástico

Descripción	Símbolo	Unidad	Valor
Módulo de elasticidad	E	kN/m <sup>2</sup>	1000
Índice de vacío inicial	e <sub>init</sub>	-	0.66 (Escenario 1) 0.50 (Escenario 2)
Módulo de corte	G	kN/m <sup>2</sup>	500
Módulo de elasticidad edométrico	E <sub>oed</sub>	kN/m <sup>2</sup>	1000
Módulo de Poisson	v	-	0.2

Fuente: Elaboración propia

Para el modelamiento del suelo no saturado, también se requiere ingresar los parámetros de la curva característica del suelo y la función de conductividad hidráulica. En el primer escenario, estos parámetros se obtuvieron de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Ecuación 47} \quad S = S_{res} + (S_{sat} - S_{res})e^{-\alpha\psi}$$

$$\text{Ecuación 48} \quad S = (k_{sat})e^{-\alpha\psi}$$

La curva característica y la función de conductividad hidráulica se presentan en la Figura 41 y Figura 42 respectivamente, la cuales que han sido obtenidas a partir de los parámetros de la Tabla 15.

Tabla 15 Parámetros para la curva característica suelo agua

Descripción	Símbolo	Unidad	Valor
Permeabilidad	K <sub>s</sub>	m/h	0.01
Parámetro de ajuste de curva característica	α	m <sup>-1</sup>	10
Contenido volumétrico saturado	Θ <sub>s</sub>	-	0.4
Contenido volumétrico residual	Θ <sub>r</sub>	kN/m <sup>2</sup>	0.06

Fuente: Elaboración propia

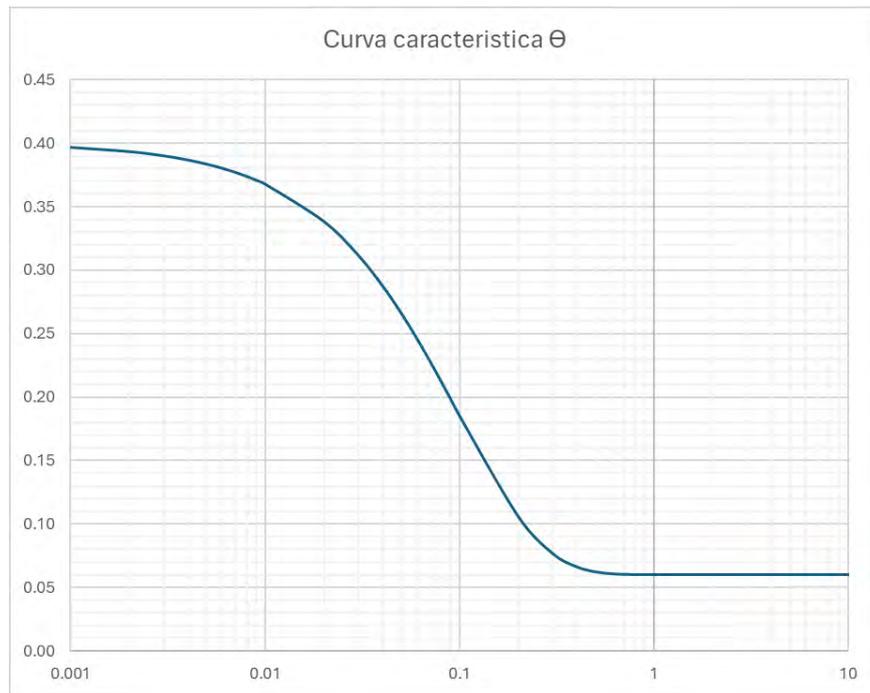


Figura 41 Curva característica suelo agua

Fuente: Elaboración propia

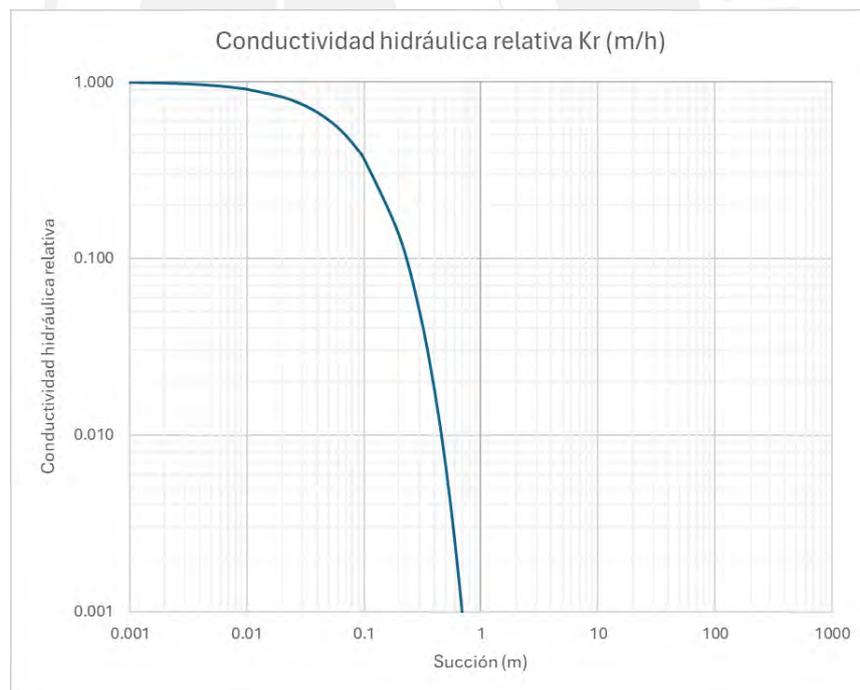


Figura 42 Función de conductividad hidráulica

Fuente: Elaboración propia

Para el segundo escenario, se ha utilizado el modelo de ajuste de Van Genuchten (1980) para determinar la curva característica y la función de conductividad hidráulica, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16 Parámetros del modelo de Van Genuchten de la curva característica del suelo

Descripción	Símbolo	Unidad	Valor
Saturación saturada	$S_{sat}$	-	1.0
Saturación residual	$S_{res}$	-	0.15
Parámetro de Van Genuchten	$g_n$	-	2.2
Parámetro de Van Genuchten	$g_a$	$m^{-1}$	4.5
Parámetro de Van Genuchten	$g_l$	-	0.5
Permeabilidad	$k_x=k_y$	m/h	0.01

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.4. Resultados y discusión

Para el primer escenario de análisis, se ha realizado la verificación y validación del modelo en Plaxis del flujo estacionario como condición inicial y del flujo transitorio, a partir de la solución analítica.

La solución analítica para el flujo estacionario está dada por la presión de poros negativa ( $\phi_p$ ) en función de la posición vertical (Gardner, 1958) según la Ecuación 49.

$$\text{Ecuación 49} \quad \phi_p = -\frac{1}{\alpha} \left[ \left( 1 - \frac{q}{k_{sat}} \right) e^{-\alpha y} + \frac{q}{k_{sat}} \right]$$

Donde  $\phi_p$  es la succión en (m), y es la altura respecto al nivel freático en (m),  $\alpha$  es un parámetro de ajuste de la curva característica en ( $m^{-1}$ ),  $k_{sat}$  es la permeabilidad saturada del suelo en (m/h) y  $q$  es la tasa de infiltración

A partir de lo anterior, en la Figura 43, se muestra con símbolos rojos los resultados del perfil de succión obtenido de forma analítica, mientras que con línea continua azul se muestra el

perfil de succión obtenido de Plaxis. Con estos resultados, se puede notar que los valores de succión son similares, lo que permite verificar y validar el modelo del flujo estacionario mediante métodos numéricos.

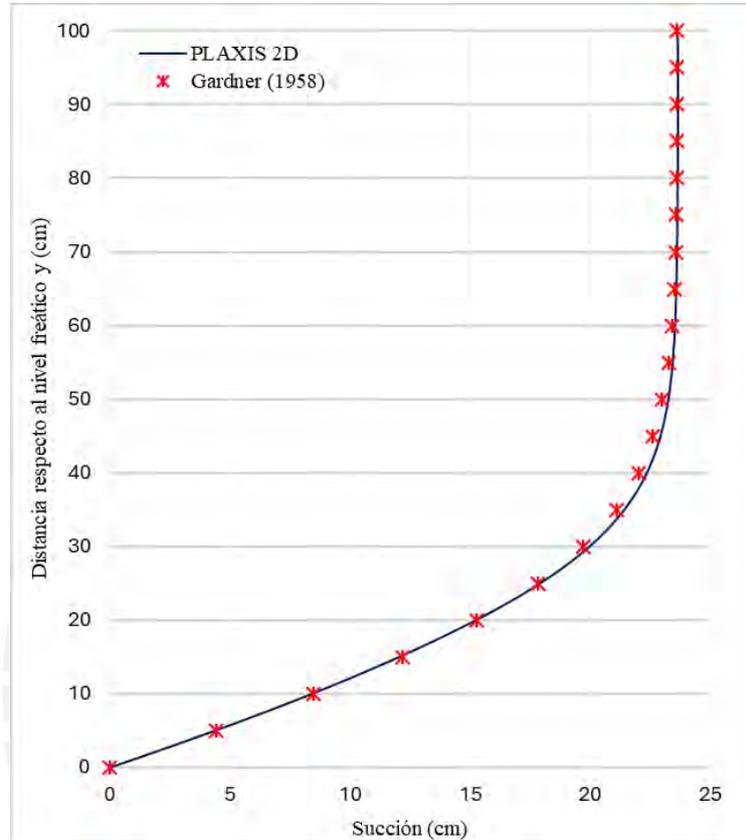


Figura 43 Perfil de succión en estado estacionario

Fuente: Elaboración propia

La solución analítica para el caso de flujo transitorio está dada por la presión de poros negativa ( $\phi_p$ ) en relación al tiempo y de la posición vertical (Srivastava & Yeh, 1991) según la Ecuación 50, para las funciones particulares de permeabilidad y curva característica del suelo dada por las Ecuación 47 y Ecuación 48.

$$\text{Ecuación 50} \quad \phi_p = \frac{\ln R}{\alpha}$$

Donde:

$$R = \frac{q}{k_{sat}} - \left( \frac{q}{k_{sat}} - 1 \right) e^{-y^*} - \frac{4q}{k_{sat}} e^{(L^*-y^*)/2} e^{-t^*/4} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin(\lambda_i y^*) \sin(\lambda_i L^*) e^{-\lambda_i t^*}}{1 + \left( \frac{L^*}{2} \right)^2 + 2\lambda_i^2 L^*}$$

$$t^* = \frac{\alpha k_{sat} t}{n(S_{sat} - S_{res})}$$

$$y^* = \alpha y$$

$$L^* = \alpha L$$

Donde  $n$  es la porosidad,  $\lambda_i$  es la raíz  $i$ -ésima de la ecuación característica y  $t$  es el tiempo.

$$\tan(\lambda L^*) + 2\lambda = 0$$

A partir de lo anterior, se obtiene de forma analítica los resultados de los perfiles de succión calculados para los tiempos 0, 1, 5, 10, 20 y 100h, tal como se muestra en la Figura 44 (a). Mientras que en la Figura 44 (b) se muestra los resultados de los perfiles de succión obtenidos en Plaxis para los diferentes tiempos analizados. Como se puede observar, ambos resultados son similares y muestran una disminución de la succión en el tiempo. A partir de estos resultados, se verifica y valida el modelo numérico en Plaxis para el análisis de flujo transitorio.

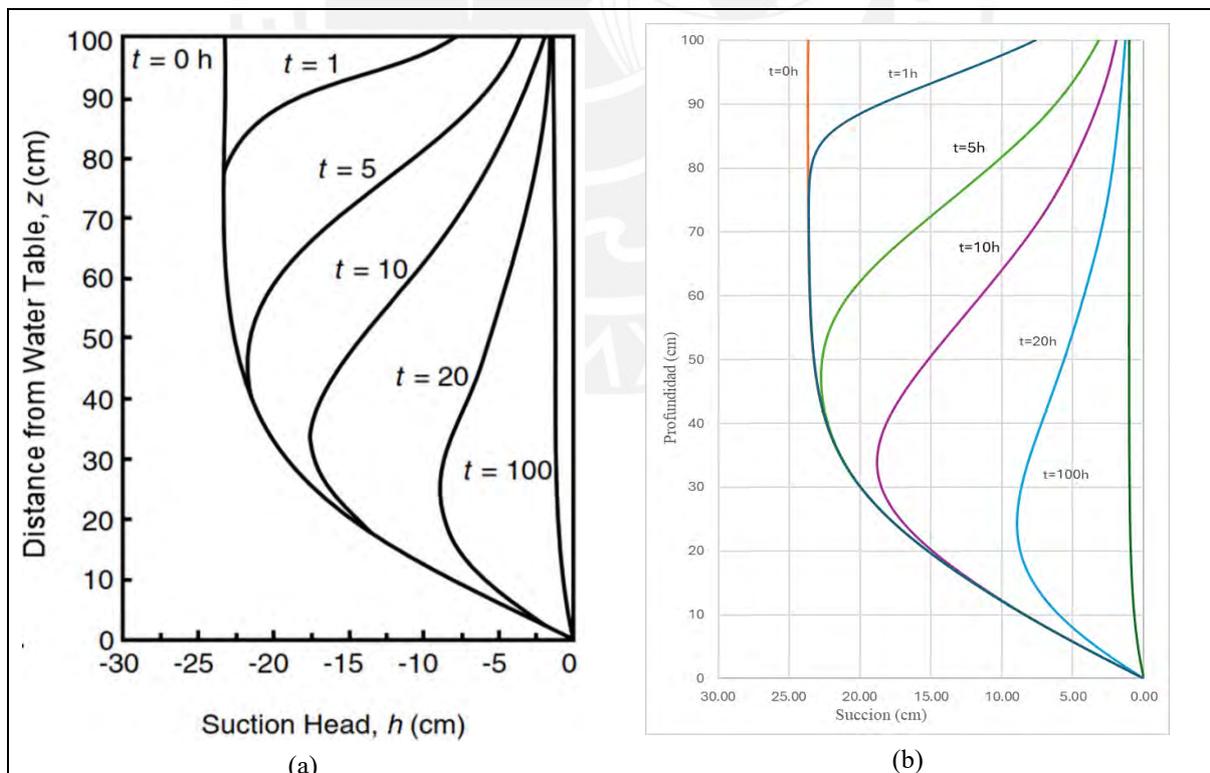


Figura 44 Resultados de succión obtenidos en Plaxis y ejemplo en Lu & Likos (2004)

Fuente: Elaboración propia y Lu & Likos (2004)

Para el segundo escenario, se muestra los resultados obtenidos en Plaxis para el caso de infiltración de  $I=0.1$  ks para los tiempos de 0, 1, 5, 10, 20 y 100h en la Figura 45. Se puede observar que, a medida que pasa el tiempo, la succión disminuye. En las primeras 20h, la reducción de la succión solo afecta los primeros 20 cm. Sin embargo, luego de las 100h, la succión se ve reducida en 55% de la succión inicial ponderada. Asimismo, se observa que en la frontera inferior de la columna del material la succión es nula debido a que el nivel freático hace que esta zona se mantenga saturada.

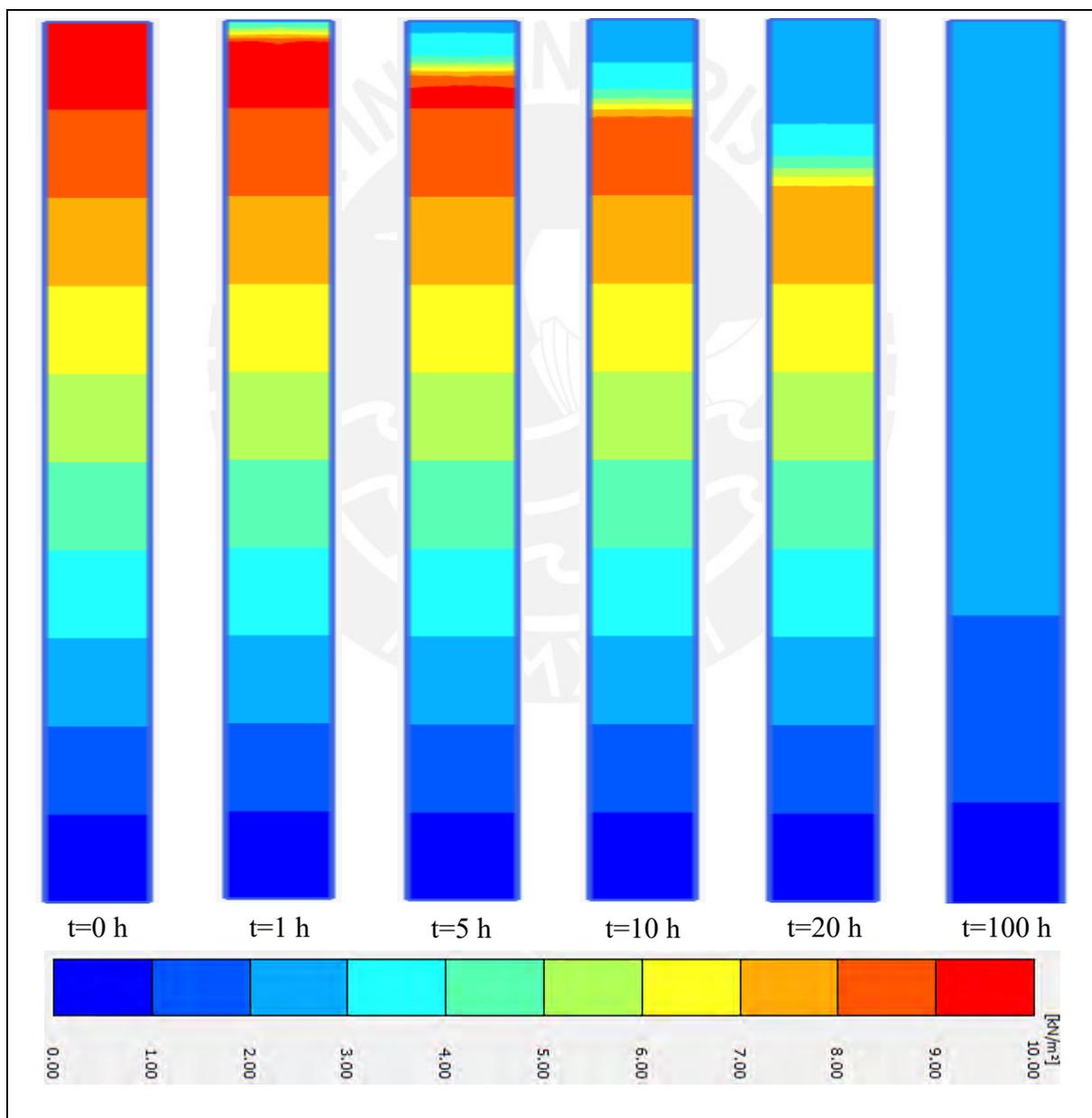


Figura 45 Resultados de succión para  $I=0.1$ ks en Plaxis

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 46 (a) se muestran los resultados de succión obtenidos en Plaxis para los tiempos analizados. Se puede observar que la succión del suelo no es tan variable en el tiempo, ya que la tasa de infiltración aplicada no es muy alta ( $I=0.1Ks$ ) respecto a la permeabilidad del suelo. También se nota que en la parte superior de la muestra la succión es bastante menor debido al ingreso del flujo. Asimismo, para un tiempo de 100h, la succión se mantiene casi constante en toda la profundidad de la muestra.

En la Figura 46 (b) se muestran los resultados de saturación obtenidos en Plaxis para los tiempos analizados. Aquí se puede notar que la saturación en la superficie aumenta desde la primera hora de infiltración disminuyendo en la profundidad conforme e infiltra el flujo en la muestra, lo cual verifica los resultados de succión mostrados anteriormente.

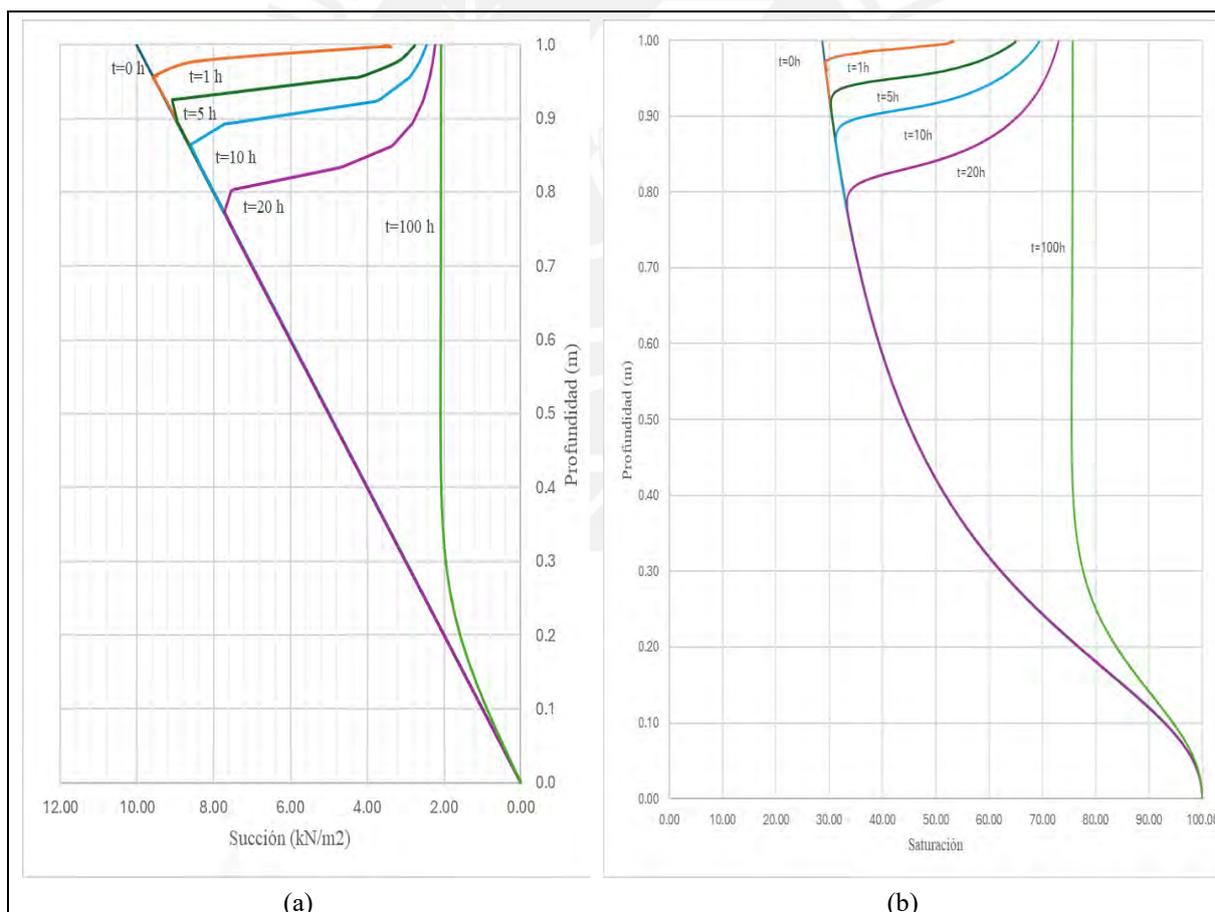


Figura 46 Resultados de succión y saturación para  $I=0.1Ks$

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 47 (a) se muestra el gráfico de la variación de la succión para un  $t=20$  h para los análisis de tasa de lluvia de 0.1ks, 0.3ks, 0.5ks y 1ks, mientras que en la Figura 47 (b) se muestra el gráfico de la variación de la saturación para las mismas condiciones de análisis. De estos gráficos, se puede notar que la succión va disminuyendo conforme aumenta la tasa de lluvia para una misma profundidad. Para el caso de la saturación, se nota lo contrario, es decir, la saturación va disminuyendo conforme aumenta la tasa de lluvia para una misma profundidad.

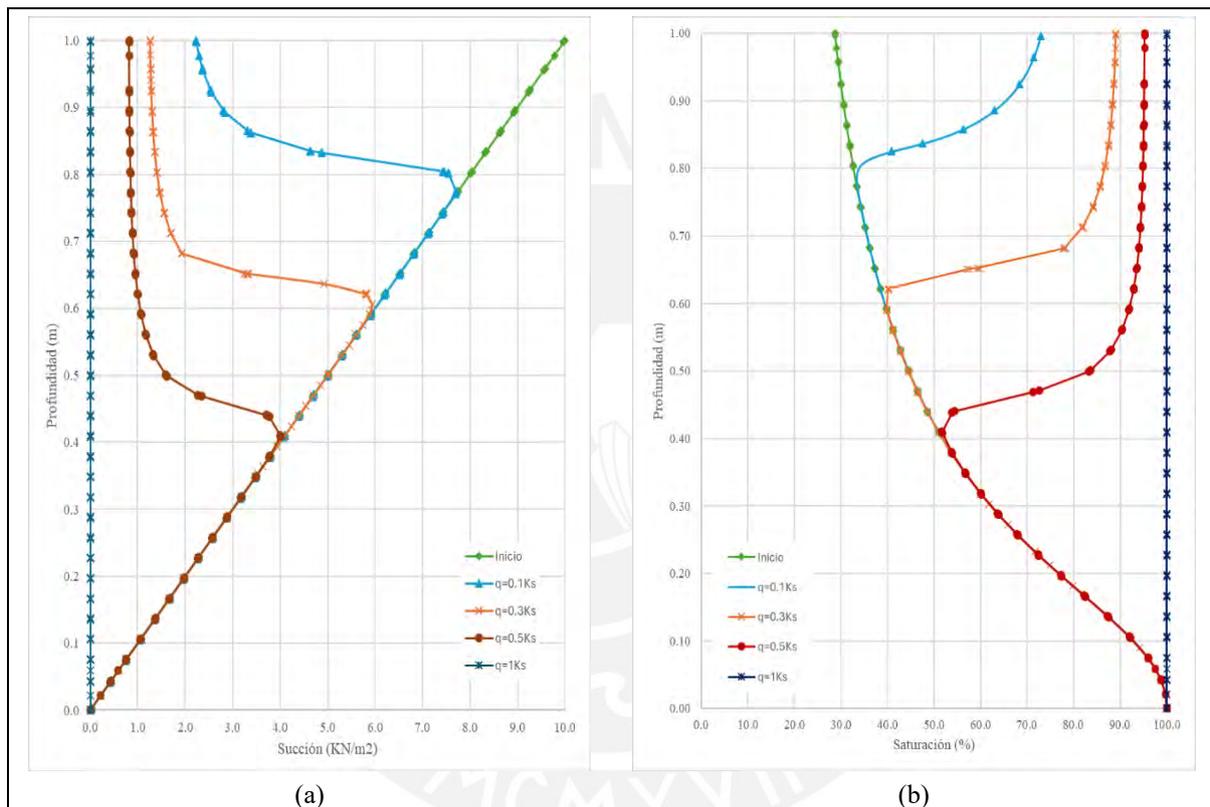


Figura 47 Perfiles de succión y saturación para  $t=20$  h con diferentes tasas de infiltración

Fuente: Elaboración propia

## **CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO: PILA DE LIXIVIACIÓN**

### **4.1. Descripción**

Este capítulo presenta un estudio aplicado a una pila de lixiviación con un alto contenido de finos, ubicada en Cajamarca, a una altitud de 2900 metros sobre el nivel del mar. La región andina donde se encuentra se caracteriza por un clima con temperaturas que oscilan entre 7 y 23 °C, y una precipitación anual de 964.3 mm, con una evaporación total promedio anual de 1200 mm.

La topografía del terreno ha sido esculpida por intensos procesos tectónicos, incluyendo plegamientos, fallas y eventos de intrusión magmática que han afectado el sustrato cretácico. Esto ha resultado en un paisaje con depresiones muy disectadas, valles fluviales con flancos que varían desde suaves hasta encañonados, cerros con cumbres angulosas y amplios conos aluviales.

Litológicamente, la zona contiene secuencias de rocas sedimentarias del Grupo Goyllarizquizga, incluyendo las formaciones Farrat, Carhuaz y Santa del Cretácico inferior, seguidas por lutitas y calizas de las formaciones Inca, Chulec y Pariatambo del Cretácico medio a superior. Encima de estas formaciones se encuentran suelos residuales y depósitos coluviales y aluviales del Cuaternario.

El proyecto se desarrolla en la Zona 3 del Mapa de Zonificación Sísmica de la norma E.030 del Reglamento Nacional de Edificaciones (2016), que corresponde a una zona de alta sismicidad con un factor de zona (Z) de 0.35g.

El objetivo de este caso de estudio es examinar cómo los parámetros del suelo no saturado y el flujo transitorio influyen en la estabilidad y la infiltración de la pila de lixiviación, utilizando un modelo numérico de elementos finitos implementado en Plaxis 2D.

## 4.2. Modelo conceptual

La geometría y las dimensiones de la pila de lixiviación modelada en Plaxis se muestra en la Figura 48. Esta se compone por 10 capas o *lifts* de mineral aglomerado de 10 m de espesor con un talud de reposo de 1.5H:1V. Por encima de la cimentación, se tiene una capa de sob revesti miento de aproximadamente 1 m de espesor, el cual separa el mineral de la capa impermeable.

La formulación que utiliza el programa para el cálculo de los esfuerzos efectivos del suelo se describe en la Ecuación 10 y, para el caso del flujo no saturado, la Ecuación 28. Ambas ecuaciones se verificaron y validaron con los casos aplicativos del capítulo 3.

La malla que se utilizó en el modelado fueron mallas triangulares de 15 nodos, medianamente refinados a diferentes escalas. Se utilizó una escala 0.25 entre capas de mineral y una escala de 0.1 en la zona de interfase o de contacto con la cimentación.

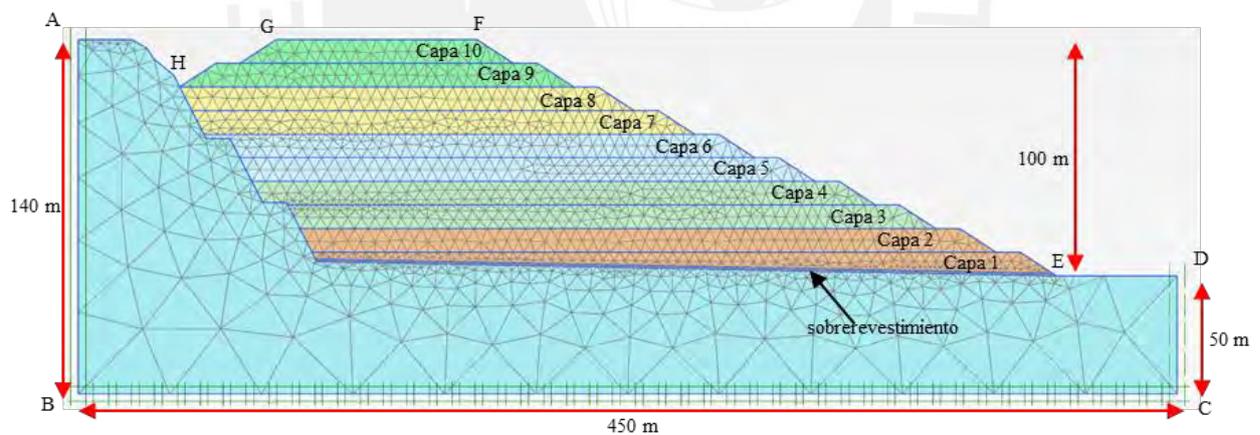


Figura 48 Modelo conceptual para el caso de estudio

Fuente: Elaboración propia

Se ha considerado una frontera de infiltración constante de 0.24 m/día en la parte superior de cada capa de mineral dispuesto, la cual simula la tasa de riego del líquido lixivante percolando sobre el mineral. Cada capa de mineral se mantiene con este riego por 50 días, según el ciclo de lixiviación de diseño para esta pila. Cabe mencionar que no se ha considerado

la tasa de evaporación y precipitación, ya que estas eran mucho menores a la de riego por lo que se despreció para este análisis.

En la Tabla 17 se muestra la secuencia constructiva del apilamiento de los bancos de mineral y los ciclos de lixiviación.

Tabla 17 Resumen de tiempo de construcción e infiltración de la pila

Lift	Construcción		Infiltración	
	Inicio (días)	Final (días)	Inicio (días)	Final (días)
Capa 1	0	10	10	60
Capa 2	60	70	70	120
Capa 3	120	130	130	180
Capa 4	180	190	190	240
Capa 5	240	250	250	300
Capa 6	300	310	310	360
Capa 7	360	370	370	420
Capa 8	420	430	430	480
Capa 9	480	490	490	540
Capa 10	540	550	550	600

Fuente: Elaboración propia

Las condiciones de borde del caso de estudio se especifican en la Tabla 18.

Tabla 18 Resumen de condiciones de borde del modelo

Contorno	Mecánica de suelo	Flujo
FG (para capa de mineral)	$u_x=0$	Infiltration, $q=0.24$ m/día
AB, CD, DA, DE, HA	$u_x=0$	Seepage
BC	$u_x=u_y=0$	Seepage
EF, GH	-	Closed

Contorno	Mecánica de suelo	Flujo
Sobrevestimiento	-	Seepage

*Fuente: Elaboración propia*

### 4.3. Propiedades del material

En la Tabla 19 se detallan los parámetros del mineral y del sobrevestimiento utilizados en el análisis de infiltración y estabilidad. El mineral es una grava arcillosa (GC) con alto contenido de finos (30%) que ha pasado por un proceso de aglomeración. En el caso del sobrevestimiento, el material utilizado es un suelo granular (GP) altamente permeable que favorece la recuperación de la solución lixiviada.

Los parámetros de resistencia y rigidez del mineral y sobrevestimiento ingresados en Plaxis se han obtenido de ensayos de laboratorio (ver ANEXO A), que fueron previamente calibrados a un modelo constitutivo de endurecimiento (Hardening Soil, 1980) que presenta similar comportamiento de estos materiales. Esta calibración del mineral y del sobrevestimiento se ha realizado mediante la herramienta Soil Test de Plaxis a partir de los ensayos triaxiales del tipo CD, en el ANEXO B se muestra con mayor detalle los parámetros obtenidos de esta calibración.

Para modelar la zona de interfase, se debe ingresar un parámetro de interfaz  $R_{inter}$ , el cual calcula las propiedades del material a partir de la reducción de parámetros del material adyacente, en este caso del sobrevestimiento. Esta interfase permite simular el comportamiento de la geomembrana con el suelo de baja permeabilidad.

Para calcular el factor  $R_{inter}$ , se utiliza la Ecuación 51, donde  $\phi_i$  es el ángulo de rozamiento de la interfaz y  $\phi$  es el ángulo del sobrevestimiento. En la Figura 49 se muestra la función de esfuerzo cortante respecto a los esfuerzos normales del material de la interfaz, cuyos puntos se han obtenido del ensayo de corte directo a gran escala. A partir del ajuste lineal, se puede

obtener la tangente del ángulo de rozamiento que es de 0.2744 y reemplazando en la Ecuación 51, se obtiene un Rinter de 0.475.

Ecuación 51  $\tan(\phi_i) = R_{inter} \tan(\phi)$

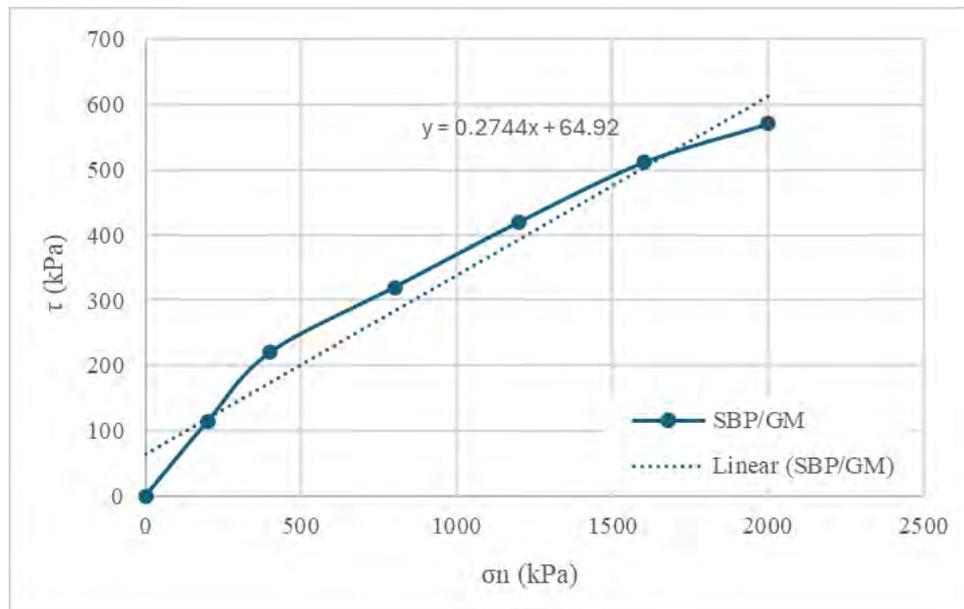


Figura 49 Ajuste lineal de esfuerzo normal y esfuerzo de corte

Fuente: Elaboración propia

Para el material de la cimentación, se utiliza un modelo lineal elástico con módulo de Young (E) de  $19 \times 10^6$  kPa, un módulo de Poisson de 0.25 y un peso específico de  $24.5 \text{ kN/m}^3$ .

Tabla 19 Parámetros para el modelo Hardening Soil

Descripción	Símbolo	Unidad	Mineral	Sobrevestimiento
			Valor	Valor
Módulo de elasticidad	$E_{50}$	$\text{kN/m}^2$	15251.4	25000
Módulo de elasticidad edométrico	$E_{oed}$	$\text{kN/m}^2$	12963.7	20000
Módulo de elasticidad	$E_{ur}$	$\text{kN/m}^2$	61005.5	75000
	m	-	1	0.50
	$\nu_{ur}$	-	0.29	0.20
Cohesión	c	$\text{kN/m}^2$	29.5	1
Phi	$\phi$	°	26	30

Descripción	Símbolo	Unidad	Mineral	Sobrevestimiento
			Valor	Valor
Dilatancia	$\psi$	psi	0	2
Peso específico saturado	$\gamma_{\text{sat}}$	kN/m <sup>3</sup>	20.0	19.0
Peso específico no saturado	$\gamma_{\text{unsat}}$	kN/m <sup>3</sup>	19.0	18.0
Permeabilidad	$k_x=k_y$	m/día	$6.05 \times 10^1$	$8.64 \times 10^3$
			$2.59 \times 10^1$	
			8.64	
			$8.64 \times 10^{-1}$	

*Fuente: Elaboración propia*

Para el modelamiento del suelo no saturado, es necesario introducir los parámetros de la curva característica del mineral, así como los del sobrevestimiento. Esta curva se determina a partir de ensayos o pruebas de succión realizadas a distintas presiones, las cuales luego se ajustan a una curva teórica. Para este estudio, se utilizó el modelo de ajuste de Van Genuchten (1980) tanto para la curva de retención del suelo como para la función de conductividad hidráulica. Los detalles de los cálculos de ajuste se encuentran en el ANEXO C. Además, la Figura 50 y la Figura 51 presentan la curva característica y la función de conductividad hidráulica del mineral respectivamente, mientras que la Tabla 20 muestra los parámetros no saturados que se ingresan al programa. El ANEXO C detalla cada uno de los parámetros obtenidos de este ajuste.

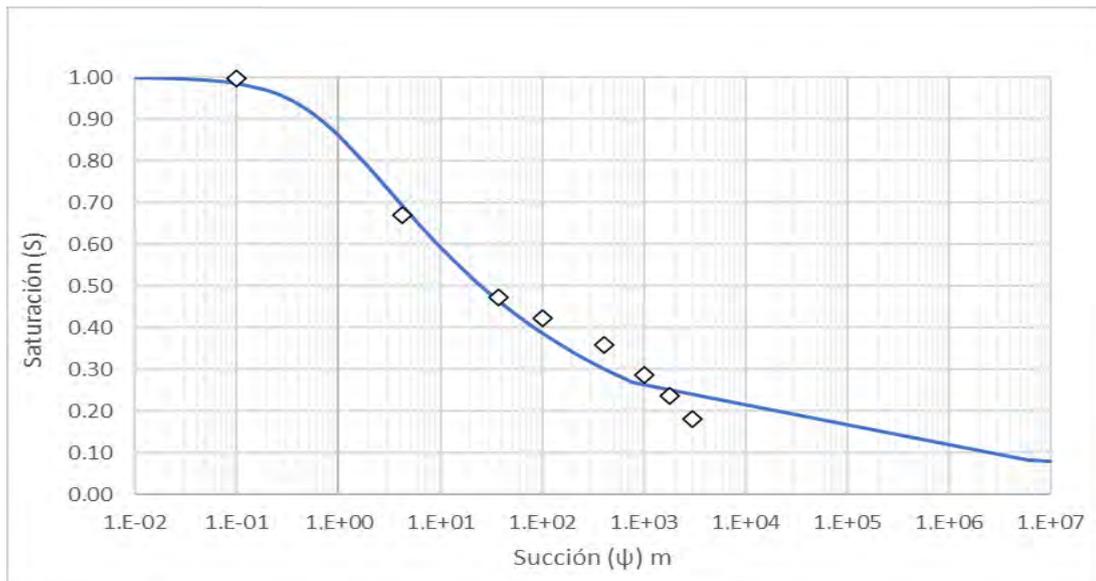


Figura 50 Curva de ajuste con Van Genuchten (1980)

Fuente: Elaboración propia

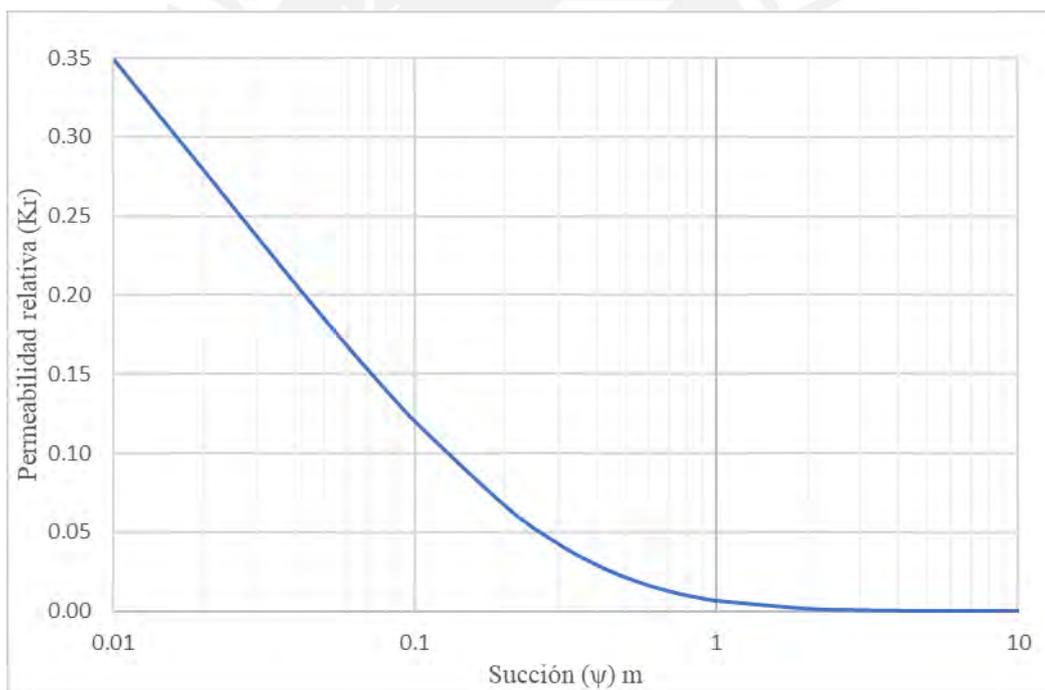


Figura 51 Función de permeabilidad relativa del mineral

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20 Parámetros de Van Genuchten de la curva característica del mineral

Descripción	Símbolo	Unidad	Valor
Saturación saturada	$S_{sat}$	-	1.0
Saturación residual	$S_{res}$	-	0.05
Parámetro de Van Genuchten	$g_n$	-	1.209
Parámetro de Van Genuchten	$g_a$	$m^{-1}$	1.4
Parámetro de Van Genuchten	$g_l$	-	0.5

Fuente: Elaboración propia



## CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

### 5.1. Análisis de infiltración

En la Figura 52 y Figura 53 se muestran los perfiles del grado de saturación para los distintos ciclos de recrecimiento y riego (60 días) de la pila de lixiviación analizada. Asimismo, se muestra un perfil adicional en estado estacionario que representa la saturación final del mineral para una etapa de cierre.

Los resultados muestran que, al iniciar un ciclo de lixiviación, la tasa de infiltración o percolación es lenta en los dos primeros lifts de mineral. Esta condición provoca la saturación de la parte superficial de la pila y un nivel de saturación promedio del 35% en la estructura, lo cual incide en la recuperación más lenta del mineral lixiviado. No obstante, con el recrecimiento de los demás bancos, la saturación en la estructura aumenta y se mantiene por un tiempo prolongado, mejorando así la capacidad de recuperación del mineral lixiviado.

La capacidad de recuperación del mineral lixiviado está intrínsecamente relacionada con la saturación y las propiedades hidráulicas del suelo. Cuando la saturación es mayor, la permeabilidad relativa aumenta, lo que incrementa la velocidad de flujo. Además, si a esto se le suma una alta conductividad hidráulica saturada del material, esta capacidad mejora aún más. Esta es la razón fundamental detrás de la necesidad de aglomerar materiales finos, como en el caso de estudio.

Otro aspecto relevante por evaluar es la posible formación de bolsones de solución lixiviada dentro del cuerpo de la pila, ya que repercute directamente en la tasa de recuperación del mineral. Por tanto, es crucial ubicar su formación a lo largo del tiempo. Estos bolsones suelen originarse cerca del borde de los taludes, especialmente cuando no hay un riego continuo. Sin embargo, los resultados del análisis no mostraron este inconveniente, debido a que la aglomeración mejoró significativamente las propiedades hidráulicas de la estructura. Si bien se

observan estos bolsones o áreas saturadas en el tiempo, estas tienden a disiparse en los ciclos posteriores de recrecimiento y riego.

Finalmente, con el objetivo de determinar la saturación en una etapa de cierre de operaciones, se realizó un análisis de flujo estacionario posterior al último ciclo de lixiviación. El resultado muestra un estado parcialmente saturado en todo el cuerpo de la pila donde en la zona de la cimentación el material se encuentra más saturado (85%) y en el parte superior menos saturado (35%), resultando una saturación promedio de aproximadamente 50%.



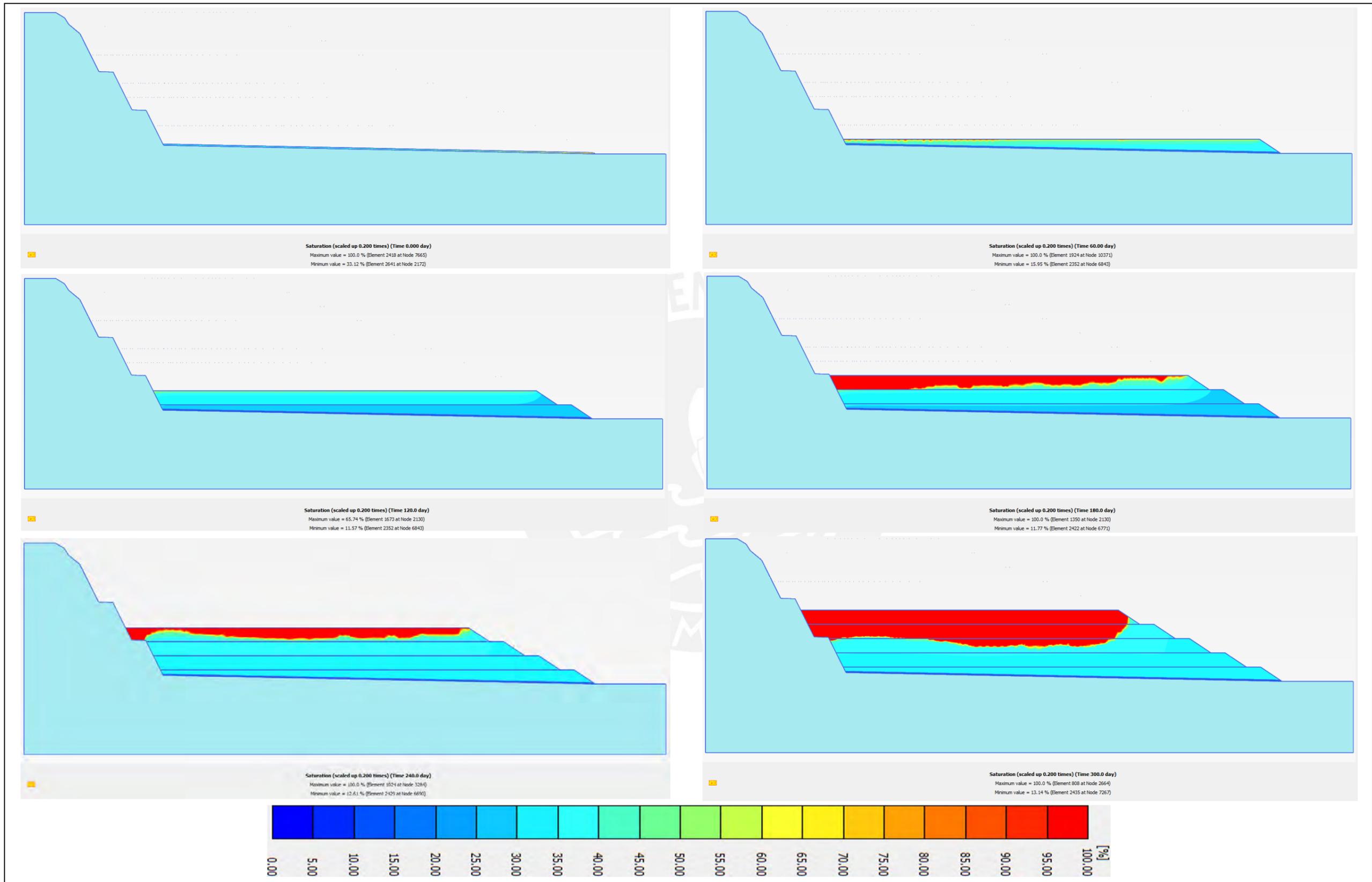


Figura 52 Resultados de la saturación para los 5 primeros lifts de mineral

Fuente: Elaboración propia

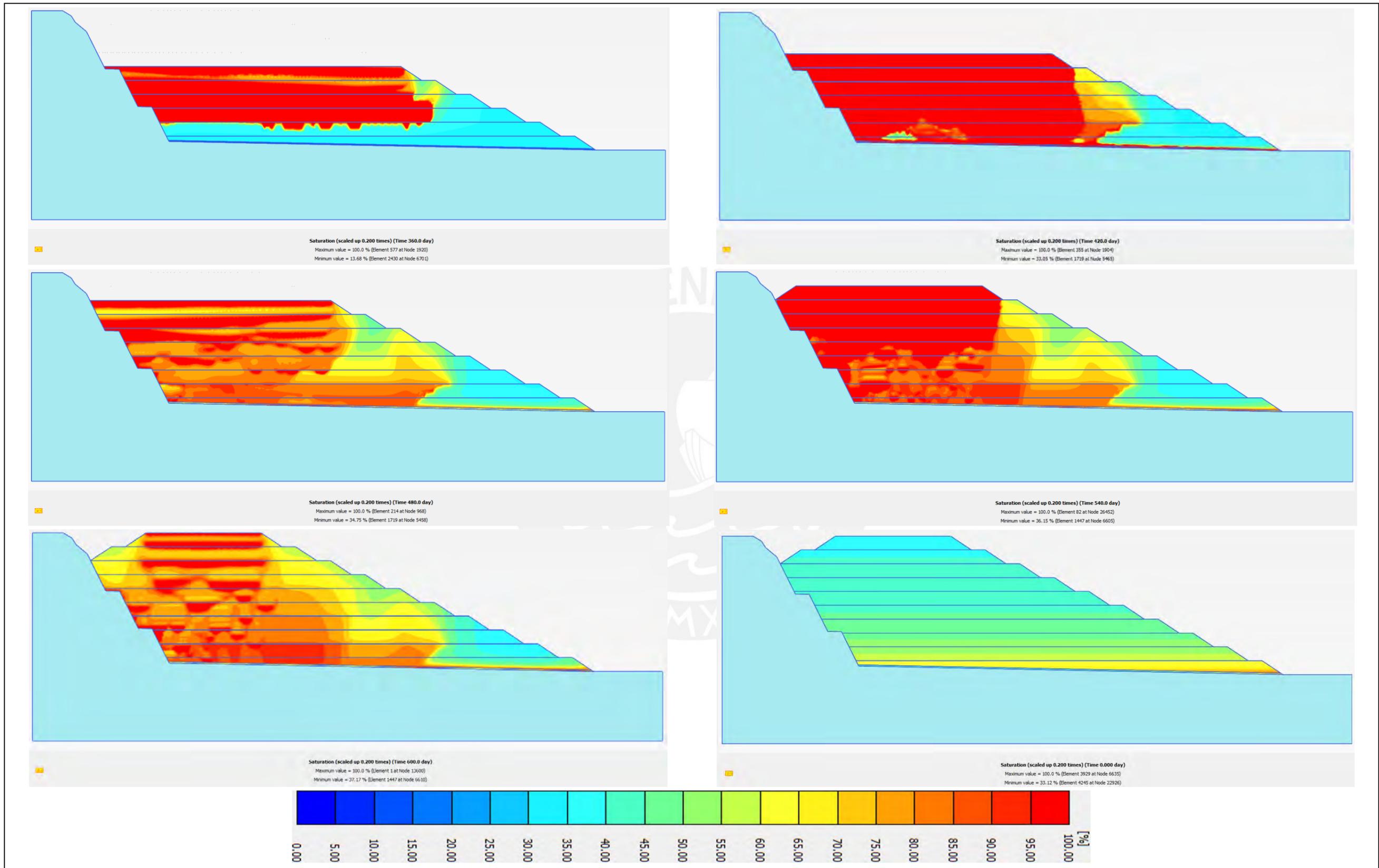


Figura 53 Resultados de la saturación para los 5 últimos lifts de mineral

Fuente: Elaboración propia

De igual manera que los resultados anteriores, la Figura 54 y Figura 55 muestran los perfiles de succión para la etapa de recrecimiento y riego de la pila analizada, así como los resultados para la etapa de cierre.

Los resultados muestran un comportamiento inverso a los perfiles de saturación obtenidos anteriormente. Esta relación se valida a partir de la curva característica suelo-agua ingresada para el material dispuesto en la pila (ver Figura 50), la cual depende del tiempo y la permeabilidad saturada.

En los perfiles, se observa que los bordes de los taludes presentan valores de succión más altos por ser zonas menos saturadas. En estas zonas existe una mayor predisposición de formación de bolsones de solución lixiviada, ya que al estar expuesto a una menor concentración de solución la disipación del mineral lixiviado es más lenta.

Además, se observa que en las primeras etapas de recrecimiento (2 primeros bancos) los valores de succión son más altos que las siguientes etapas, ya que la sobrecarga actuante es menor en las primeras capas haciendo que la permeabilidad sea menor. Este comportamiento fue simulado en el análisis, asignando una permeabilidad saturada variable según el recrecimiento de la estructura. Estos valores de permeabilidad se obtuvieron a partir de ensayos de laboratorio a distintas sobrecargas similares a las cargas actuantes en la pila. Este ejercicio se realiza para reflejar el cambio de permeabilidad en función de la sobrecarga de la estructura, lo cual describe mejor el comportamiento del flujo por la disposición de los bancos de mineral.

En el último perfil se muestra los valores de succión en la etapa de cierre simulado por un análisis de flujo en estado estacionario, en el cual ya no se considera los ciclos de riego. Los resultados muestran una estabilización del grado de succión, siendo mayor en la parte superior de 1000 kN/m<sup>2</sup> y cercana a cero en la parte inferior.

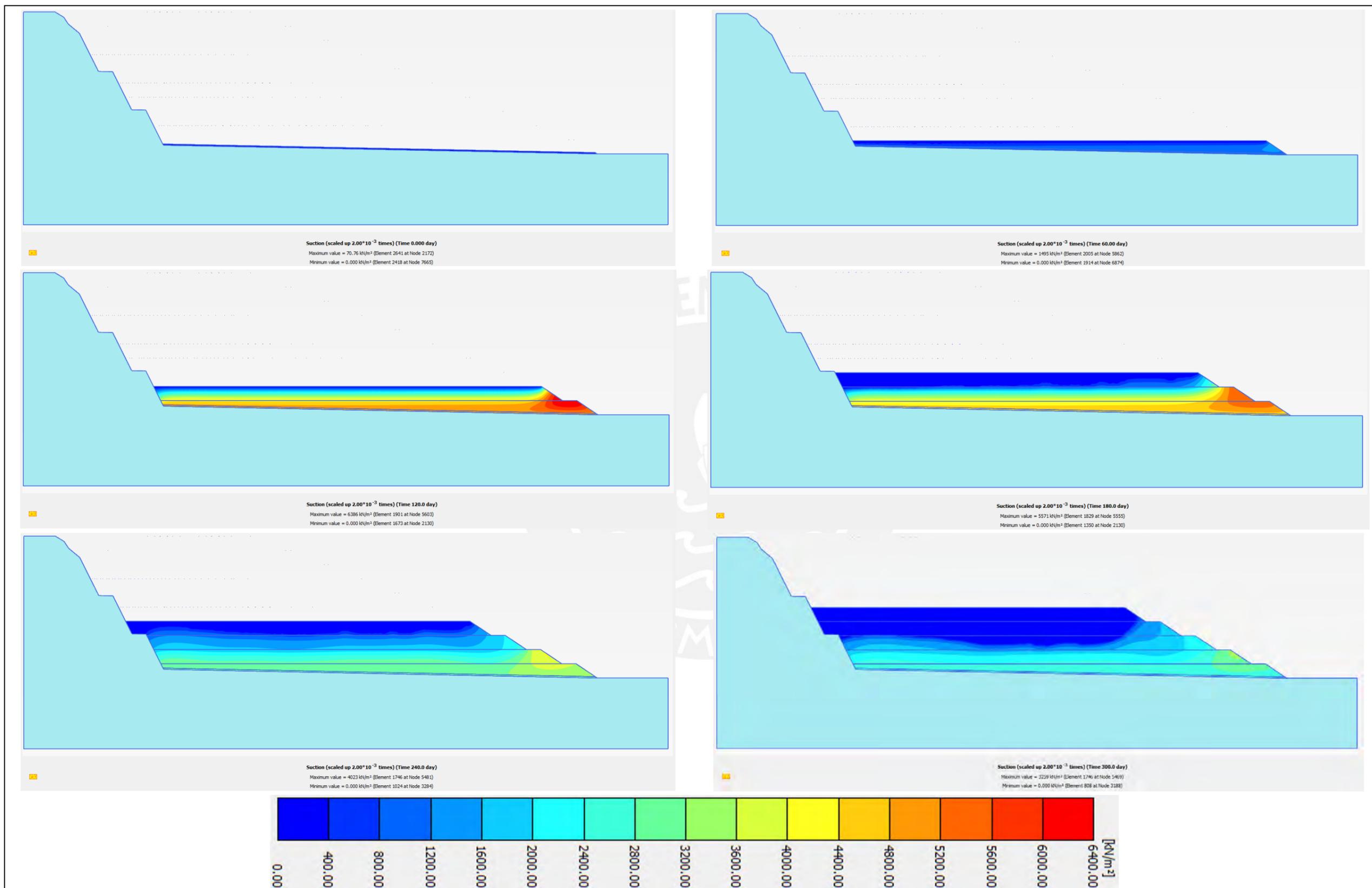


Figura 54 Resultados de la succión para los 5 primeros lifts de mineral

Fuente: Elaboración propia

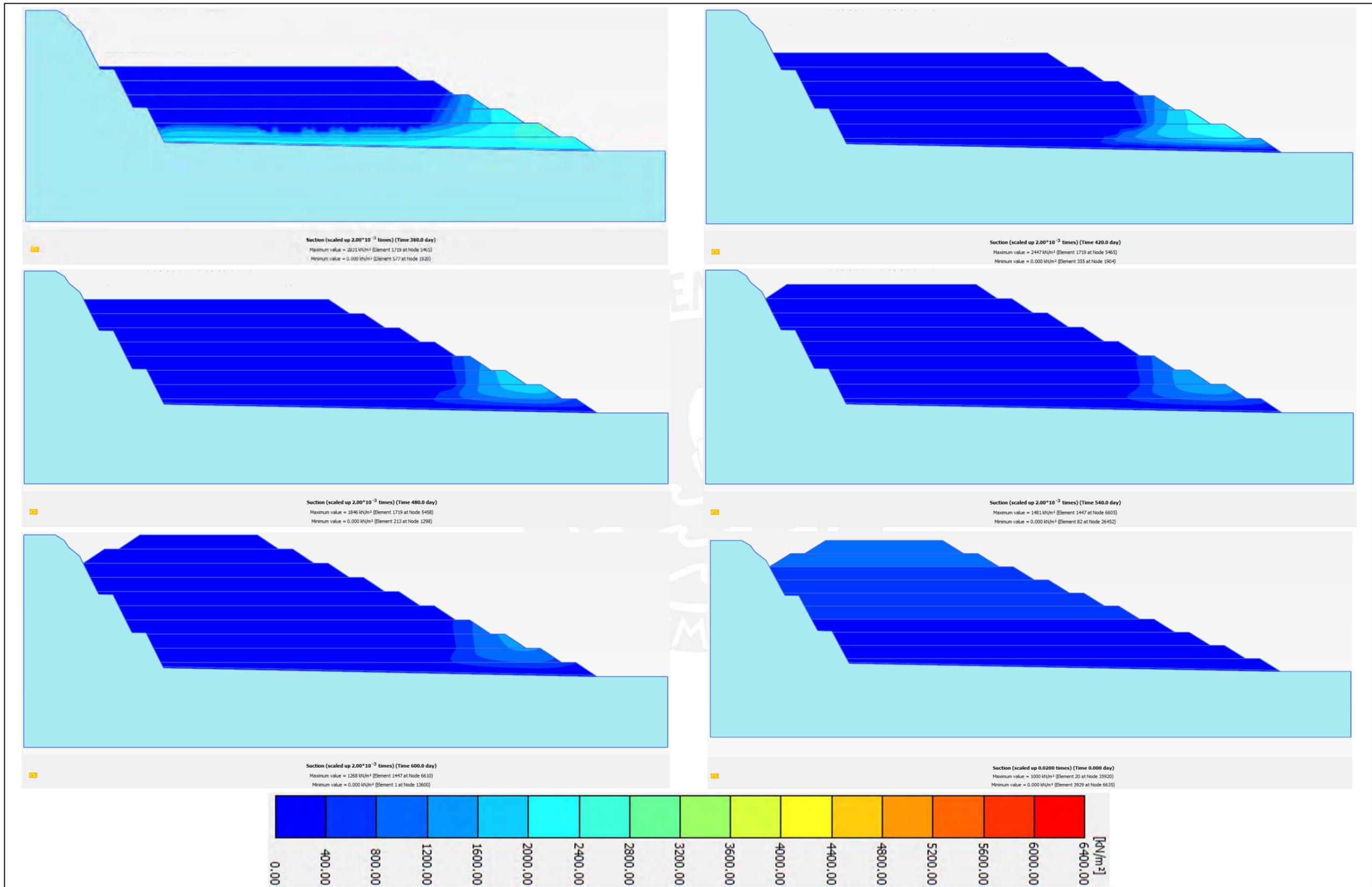


Figura 55 Resultados de la succión para los 5 últimos lifts de mineral

Fuente: Elaboración propia

## 5.2. Análisis de estabilidad

El análisis de estabilidad se centró en evaluar los factores de seguridad (F.S.) del talud y las deformaciones en dos escenarios clave. En el primer escenario, se determinó el F.S. durante la fase final de reecimiento y riego de la pila, y en el segundo, se calculó el F.S. correspondiente a la etapa de cierre.

En la Figura 56 se presenta el plano de falla y el F.S. para el primer escenario, que resultó ser de 1.34. Este cálculo se realizó bajo la suposición de que la pila estaba en una condición saturada, dado que en la última etapa de riego el cuerpo de la estructura alcanzó una saturación promedio del 90%. Debido a esto, no se consideró la succión en la resistencia cortante del suelo. Sin embargo, este F.S. de 1.34 no cumple con el valor mínimo aceptable de 1.50, lo que indica que es necesario analizar las deformaciones totales para obtener una comprensión más completa de la estabilidad de la estructura.

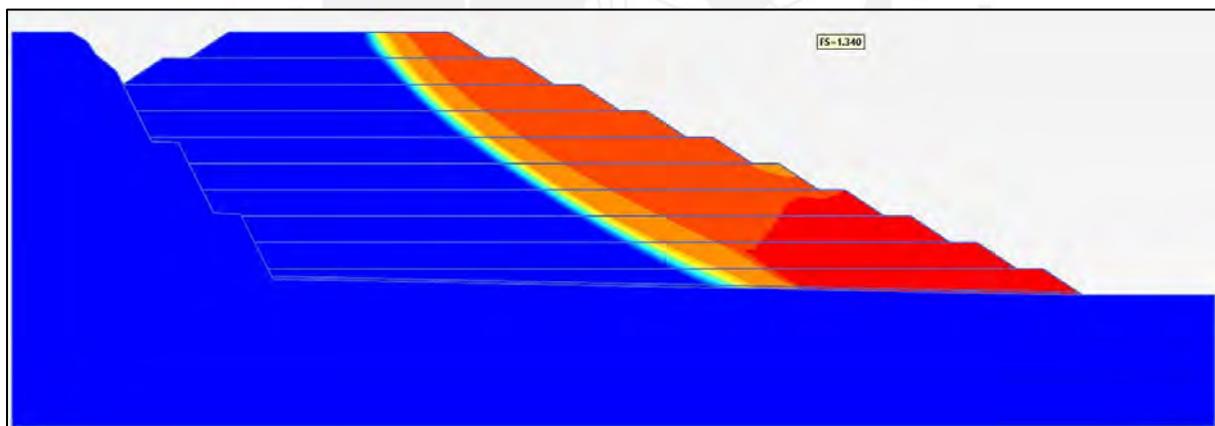


Figura 56 Factor de seguridad en el último ciclo de riego

Fuente: Elaboración propia

La Figura 57 presenta el plano de falla y el valor del F.S. del segundo escenario, siendo este de 1.519. A diferencia del análisis previo, en el cálculo de la estabilidad se consideró un estado parcialmente saturado del cuerpo mineral. Pues al considerarse una condición de cierre, la saturación de la estructura se disipa y los esfuerzos de succión incrementan. El F.S. en esta

condición cumple con el valor permisible de 1.50, por ende, no es necesario evaluar las deformaciones.

Si bien realizar un análisis de estabilidad bajo condiciones saturadas tiende a ser más conservador que en condiciones parcialmente saturadas, ignorar el efecto de la succión al evaluar la estabilidad podría llevar a sobredimensionar la estructura. Este sobredimensionamiento resultaría en costos económicos innecesariamente altos para el proyecto. Por lo tanto, es recomendable evaluar ambas condiciones para lograr un dimensionamiento más preciso y eficiente de la estructura, asegurando un equilibrio entre seguridad y economía.

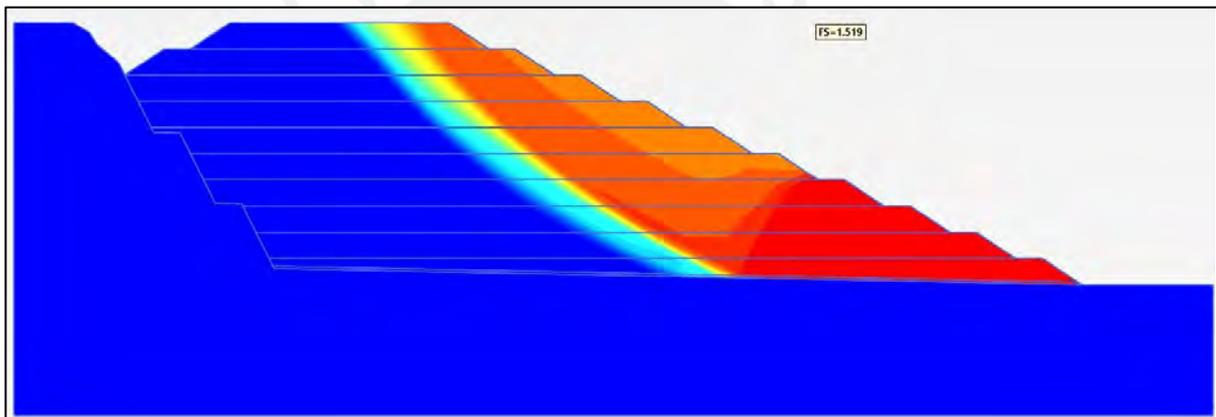


Figura 57 Factor de seguridad al cierre

Fuente: Elaboración propia

Como parte de la evaluación de la estabilidad, también es necesario analizar los desplazamientos máximos que sufre la pila de lixiviación producto de las etapas constructivas.

La Figura 58 muestran los desplazamientos que sufre el cuerpo mineral al final de la construcción de los 10 bancos o lifts. En esta imagen se observa que los máximos desplazamientos se desarrollan en la zona céntrica del cuerpo mineral, pues conforme se va avanzando con la construcción, los desplazamientos se acumulan haciendo que este incremente. El desplazamiento máximo que puede alcanzar la estructura según el análisis numérico fue de 87.6 cm.

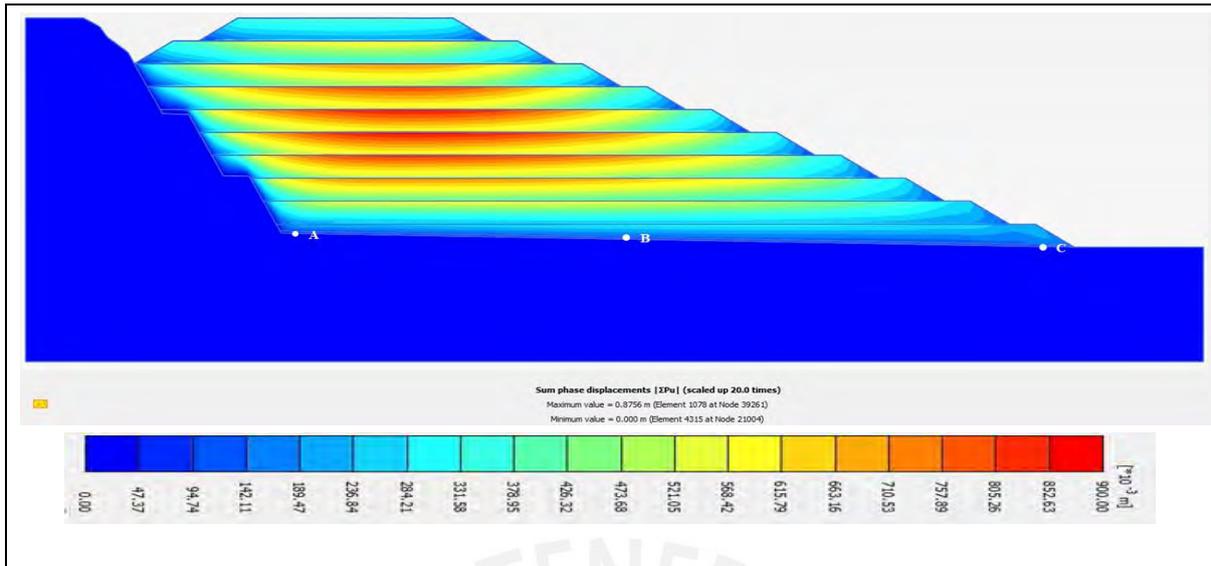


Figura 58 Desplazamientos totales al cierre de la pila

Fuente: Elaboración propia

Para ilustrar de manera más clara los desplazamientos en la cimentación de la estructura, se han analizado tres puntos de control que se muestran en la Figura 59. Este gráfico muestra que los desplazamientos aumentan conforme se aproxima al centro del cuerpo de la pila, y que estos desplazamientos incrementan con el tiempo, en correspondencia con el avance de las etapas constructivas.

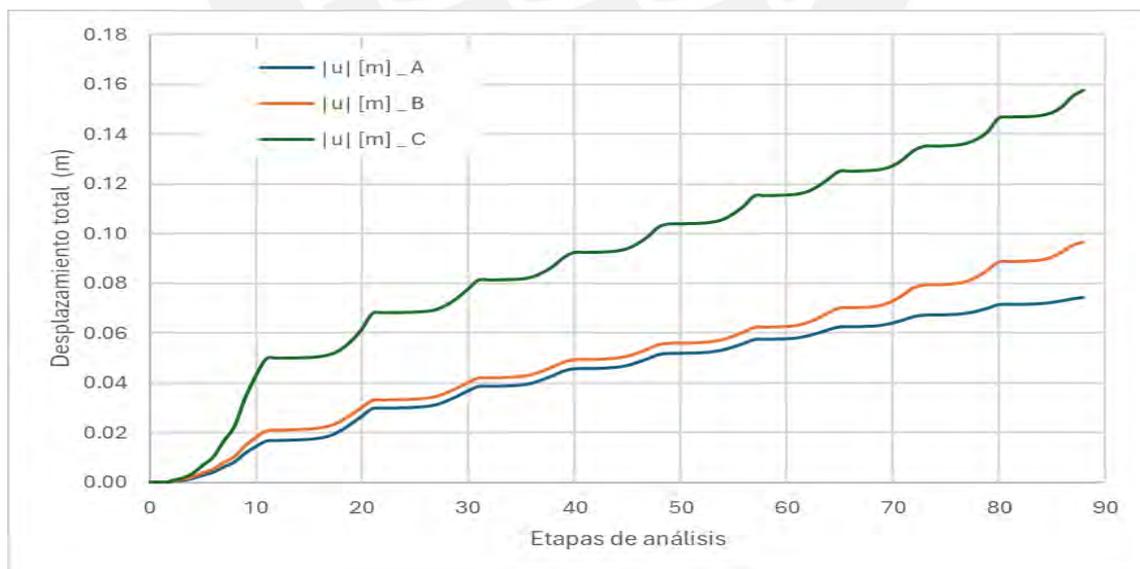


Figura 59 Desplazamientos totales al cierre de la pila

Fuente: Elaboración propia

Un aspecto crucial en el diseño de los Pads de lixiviación es la verificación de las deformaciones en la zona de interfase, especialmente en la geomembrana, que es la parte más vulnerable a fallas. En la Figura 60 se muestra que el desplazamiento total máximo alcanzó los 17.9 cm en la esquina inferior derecha de la interfase. Es importante señalar que este valor está por debajo del límite permisible de 30 cm de desplazamiento establecido para la geomembrana en la etapa de cierre, lo que confirma la validez del diseño y la estabilidad de la estructura.

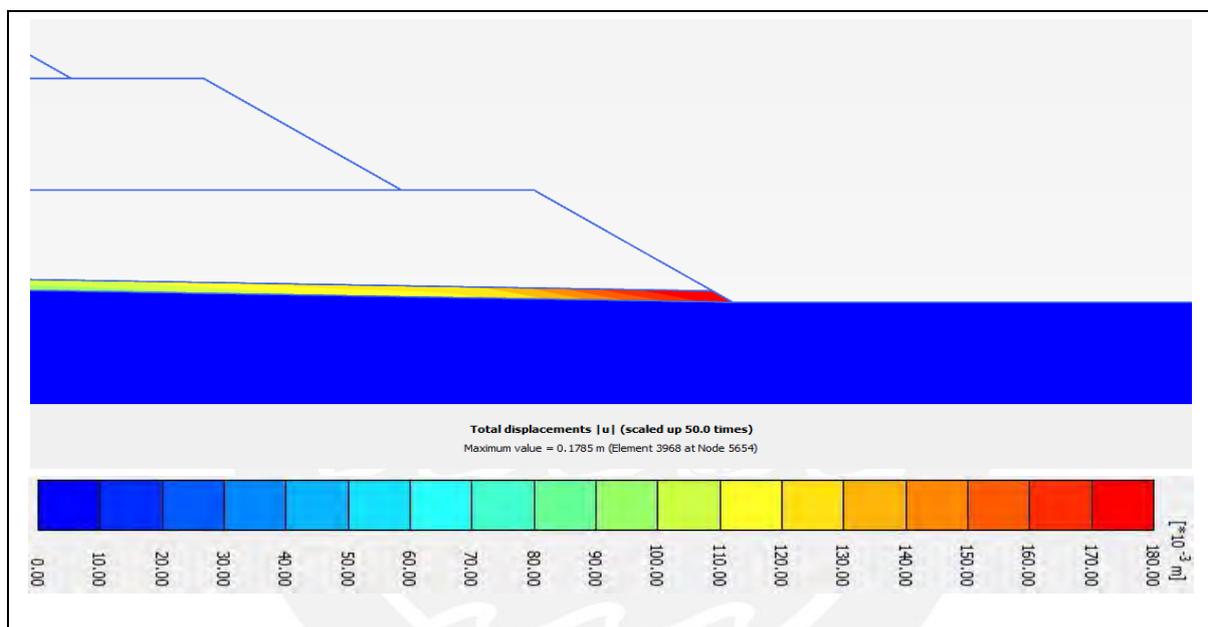


Figura 60 Desplazamiento total en la zona de interfase

Fuente: Elaboración propia

En este análisis, la Figura 61 y Figura 62 revelan que los esfuerzos verticales, tanto totales como efectivos, alcanzan sus máximos en las capas más profundas del mineral, con valores de 1693 kN/m<sup>2</sup> y 1710 kN/m<sup>2</sup>, respectivamente. Es importante destacar que el esfuerzo efectivo superó al esfuerzo total debido a la contribución de la succión, que generó una presión de poros negativa de 17 kN/m<sup>2</sup>. Este fenómeno aumenta el esfuerzo efectivo por encima del esfuerzo total, lo que resulta en una mayor estabilidad de la estructura, ya que es la resistencia efectiva del material la que domina su comportamiento estructural.

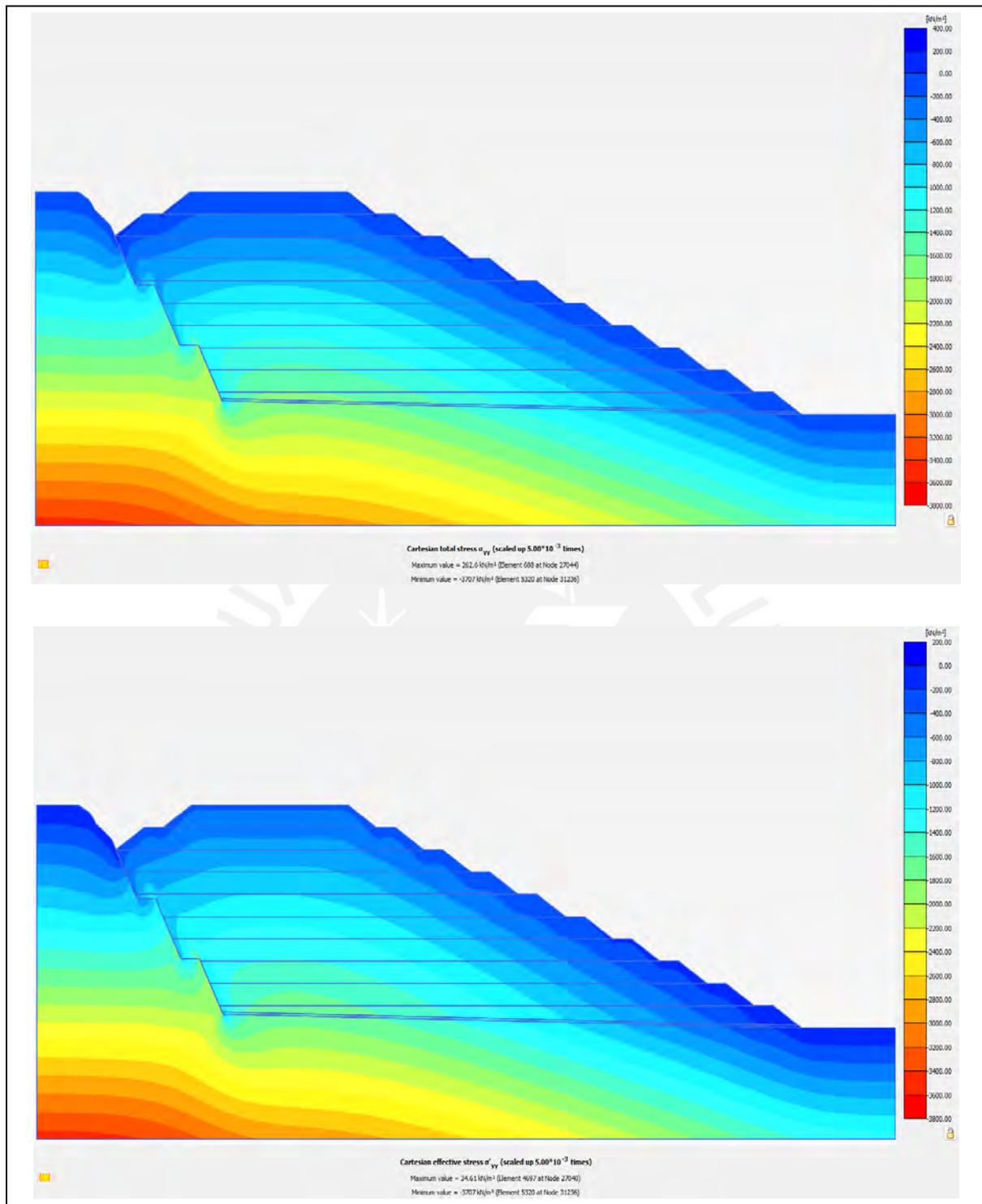


Figura 61 Resultados de esfuerzos totales y efectivos verticales

Fuente: Elaboración propia

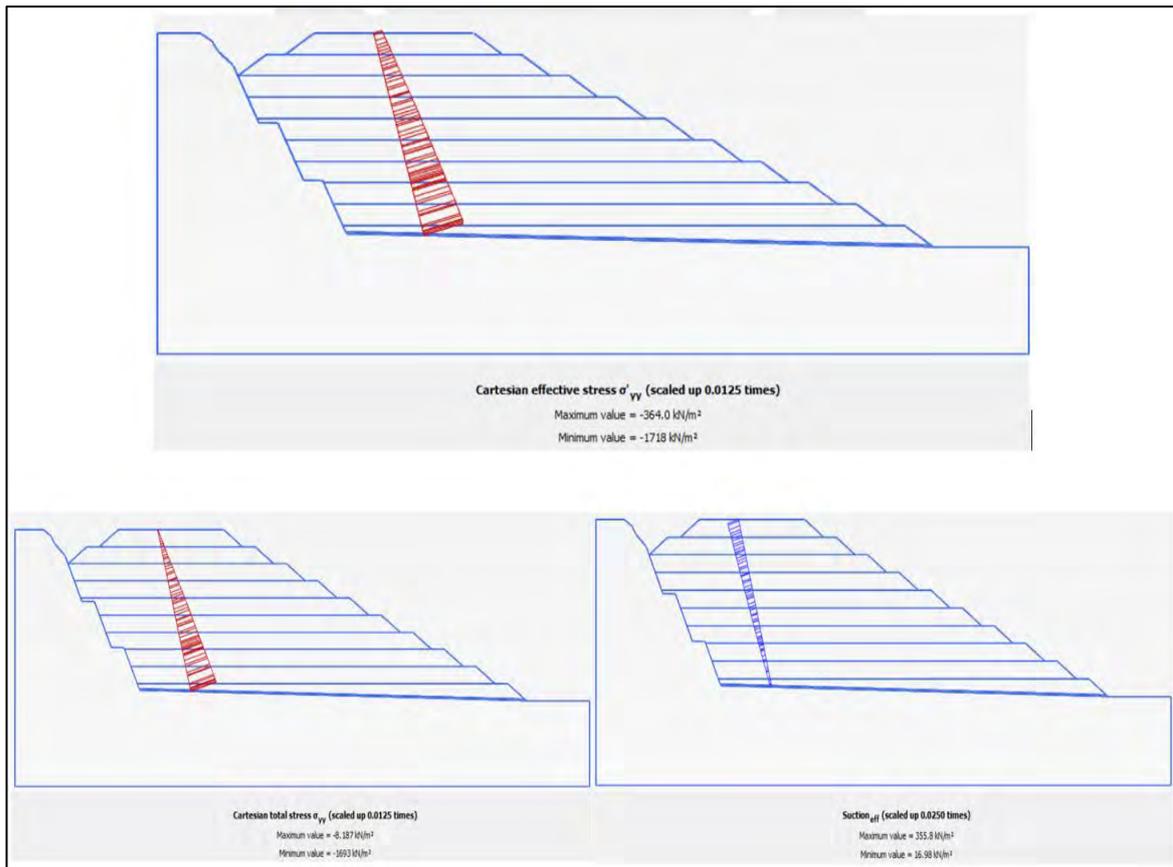


Figura 62 Diagrama de esfuerzos efectivos, esfuerzos totales y presión de poros

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

- El estudio evidencia la influencia de los parámetros del suelo parcialmente saturado en el análisis tanto de infiltración como de estabilidad de una pila de lixiviación. Los resultados destacan que la variación en la permeabilidad del suelo a lo largo del tiempo, afectada por el grado de saturación, juega un rol crucial en la velocidad de infiltración de la solución lixiviada y, por consiguiente, en la tasa de recuperación del mineral. Además, se muestra que la succión en el cuerpo mineral contribuye a la estabilidad del cuerpo mineral, aumentando el factor de seguridad y la resistencia al corte. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar cuidadosamente los parámetros del suelo parcialmente saturado durante el diseño.
- Se empleó el modelo constitutivo Hardening Soil para analizar la estabilidad de la pila de lixiviación, utilizando parámetros calibrados a través de ensayos triaxiales CD y la herramienta Soil Test del software Plaxis 2D. La calibración permitió obtener un buen ajuste en las curvas de esfuerzo-deformación bajo diferentes cargas. Sin embargo, el modelo no logró replicar con precisión la relación entre la deformación axial y la deformación volumétrica observada en los ensayos de laboratorio. Esto sugiere que, aunque el modelo es efectivo para ciertos aspectos del análisis, presenta limitaciones al representar otros comportamientos del material.
- El modelo de Van Genuchten (1980) logró ajustar mejor la curva característica del suelo (SWCC) en rangos de alta succión, pero mostró deficiencias al intentar representar adecuadamente las succiones bajas. Además, se observó que la curva tiene una tendencia bimodal, lo cual es incompatible con los modelos unimodales disponibles en el software Plaxis 2D. Estos resultados indican la necesidad de explorar modelos más sofisticados que

puedan manejar la complejidad y las particularidades de la SWCC en materiales con comportamientos similares.

- Los cálculos realizados sobre la infiltración muestran que la percolación de la solución lixiviante sobre el cuerpo mineral presenta una saturación que aumenta conforme recrece la pila en las fases de operación debido al incremento de la permeabilidad del mineral y del ciclo de riego. Sin embargo, se observa que, al final de la operación y al cesar el ciclo de riego, en poco tiempo (30 días aproximadamente) el flujo se disipa hacia el sobrerrevestimiento de la pila, alcanzando valores de saturación de 85% en la zona de la cimentación y de 35% en la parte superior.
- El análisis de estabilidad de la pila de lixiviación revela F.S. de 1.34 y 1.52 para condiciones totalmente saturadas y parcialmente saturadas, respectivamente. El aumento en el F.S. en el segundo escenario se atribuye a la consideración del aporte de resistencia debido a la succión, cumpliendo satisfactoriamente con las condiciones permisibles de estabilidad comúnmente establecidas en 1.50. Además, se verificaron las deformaciones en la cimentación, específicamente en la interfase de la geomembrana y el sobrerrevestimiento. Los resultados estiman una deformación máxima de 17.9 cm, inferior a los 30 cm recomendados para este tipo de estructuras, validando nuevamente el buen desempeño del diseño de la estructura.
- Los resultados de este estudio indican pocas posibilidades de formación de bolsones de solución ácida en el cuerpo mineral, ya que la aglomeración del mineral contribuye en la mejora significativa de las propiedades hidráulicas de la estructura. Aunque pueden observarse áreas saturadas, estas tienden a disiparse con el tiempo en los ciclos posteriores de recrecimiento y riego. Estos hallazgos subrayan la efectividad de la aglomeración del mineral como medida en la gestión de la lixiviación ácida en este contexto específico.

## 6.2. Recomendaciones

- Se sugiere emplear otros modelos constitutivos que permitan representar de manera más precisa el comportamiento del material en la pila, para así analizar y comparar los resultados con el estudio de caso presentado.
- Es recomendable aplicar modelos de ajuste de la curva característica suelo-agua que capturen el comportamiento bimodal característico de materiales aglomerados, con el fin de mejorar la precisión del análisis.
- Se sugiere emplear parámetros hidráulicos de minerales aglomerados con diversas dosificaciones, con el fin de analizar las ventajas y desventajas de cada una en la evaluación tanto de la infiltración como de la estabilidad del cuerpo mineral en una pila de lixiviados.
- Se aconseja realizar ensayos especializados para determinar de manera precisa los parámetros resistentes y de deformación de la estructura. Se sugieren pruebas como ensayos triaxiales y edométricos con succión controlada, que ofrecerán datos más precisos y representativos, que contribuirán en el análisis del comportamiento geomecánico estructural.
- Se recomienda repetir el análisis empleando un modelo acoplado hidromecánico, además de utilizar un modelo constitutivo avanzado, como el Basic Barcelona Model (BBM), diseñado específicamente para suelos parcialmente saturados. Estas herramientas permitirán evaluar de manera más precisa la interacción entre los procesos hidráulicos y mecánicos, donde la succión juega un papel crucial tanto en la infiltración como en la resistencia del material de forma simultánea.

## REFERENCIAS

- Ale, J. D., Clariá, J. J., & Bonalumi, A.A. (2011). Diseño Geotécnico de Pilas de Lixiviación. Lima, Perú. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/53171627/Diseno-Geotecnico-de-Pilas-de-Lixiviacion>
- Alfaro Soto, M. A. (2008). Geotecnia en suelos no saturados. *Revista Académica Colombiana de Ciencias*, 32(125), 471-481. ISSN 0370-3908.
- Alonso, E. E., Gens, A., & Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), 405-430.
- Anddes. (2020, junio 11). Diseño de pilas de lixiviación. [Transmisión vía Google Meet].
- Araujo, E. (2017, noviembre 30). Métodos numéricos para simulación en la ingeniería. Blog ESSS. Recuperado de <https://www.esss.co/es/blog/metodos-numericos-para-simulacion-en-la-ingenieria/>
- Barrera Bucio, M., & Garnica Anguas, P. (2002). Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres (Publicación Técnica No. 198). Sanfandila, Qro.
- Bolzon, G., Schrefler, B. A., & Zienkiewicz, O. C. (1996). Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states. *Géotechnique*, 46(2), 279–289.
- Breitenbach1, A.J. (2004). “Estabilidad de Taludes de Pilas en Canchas de Lixiviación Impermeabilizadas Desde el Diseño, hasta la Operación y Clausura”. Colorado, USA. Recuperado de [https://www.academia.edu/29103313/Estabilidad\\_de\\_Pilas\\_de\\_Lixiviacion](https://www.academia.edu/29103313/Estabilidad_de_Pilas_de_Lixiviacion)
- Cabanillas, S. (2015). Criterios básicos para el diseño geotécnico de pilas de lixiviación de mineral (Tesis de Licenciatura). Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/5590>
- Calle, J. A. C. (2000). Análise de ruptura de talude em solo não saturado. [Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos].
- Canadian Dam Association. (2014). Technical Bulletin: Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams. Recuperado de: [www.cda.ca](http://www.cda.ca)
- Carnero, E., & Carnero, G. (2018). Análisis numérico de infiltración de agua en un suelo residual no saturado utilizando la curva de retención de agua. *Revistas de Investigaciones Altoandinas*, 20(4), 439-450.

- Chávez, J., Lopez, R., Landaverde, J., & Mendoza, L. (2014). Uso de Curva de Retención Suelo-Agua y Monitoreo en Campo para Caracterizar Tefra Parcialmente Saturada en Área Metropolitana de San Salvador.
- Constantino da Vitória, F., Bandini, B., Rachid da Silva, E., & Ribeiro de Almeida, J. (2019). “Desastre Ambiental Da Barragem De Fundão, Mariana, Mg - Análise De Impactos Socioambientais.” *Revista Internacional de Ciências* 9(3):2–15.
- Das, B. M. (2013). *Fundamentals of Geotechnical Engineering* (4th ed.). Cengage Learning.
- Davies, J. T., & Rideal, E. K. (1963). *Interfacial Phenomena* (2nd ed.). New York: Academic.
- Dirk, J. A. & van, Z. (1988). *Introduction to evaluation, design and operation of precious metal heap leaching projects*. Denver, Colorado: Welsh Engineering Inc.
- Flores Berenguer, I., Castro Martínez, I., García Tristá, J., & González Haramboure, Y. (2019). Influencia de la permeabilidad del suelo no saturado en los taludes de presas de tierra. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 40(3), 86-100.
- Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Canada: John Wiley y Sons, Inc.
- Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R. (1977) Stress State Variables for Unsaturated Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103, 447-446.
- Fredlund, D.G. & Xing, A. (1994). Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521-532. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1139/t94-061>
- Gao, Y., Sun, D., Zhou, A., & Li, J. (2019). Predicting shear strength of unsaturated soils over wide suction range. *International Journal of Geomechanics*, 20(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001555](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001555)
- Guevara, I., & Hermoza, P. (2015). Modelado matemático y diseño óptimo del proceso de lixiviación en pilas. Recuperado de <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3948.9121>
- Hernandez, G. T. (2011). Estimating the soil-water characteristic curve using grain size analysis and plasticity index. *Masters Abstracts International*.
- Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. (2022, noviembre 3). Minería representa casi el 15% del PBI nacional por actividad misma e impacto en otros sectores, afirmó Minem. Recuperado de <https://iimp.org.pe/raiz/mineria-representa-casi-el-15-del-pbi-nacional-por-actividad-misma-e-impacto-en-otros-sectores-afirmo-minem>
- Kim, W. S., & Borden, R. H. (2011). Influencia del tipo de suelo y el estado de tensión en la predicción de la resistencia al corte de suelos no saturados utilizando la curva

- característica suelo-agua. *Revista Geotécnica Canadiense*, 48(12), 1886-1900. <https://doi.org/10.1139/t11-082>
- Lee, H. C., & Wray, W. K. (1995). Technics to evaluate to soil suction - a vital unsaturated soil water variable. En *Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils*, Paris (Vol. II, pp. 65-622).
- Li, X., Li, J. H., & Zhang, L. M. (2014). Predicting bimodal soil–water characteristic curves and permeability functions using physically based parameters. *Computers and Geotechnics*, 57, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.01.004>
- López, N., & Mendoza, J. (2016). Flujo de agua en suelos parcialmente saturados y su aplicación a la ingeniería geotécnica. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería (IIUNAM). Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/303400497>
- Lu, N., & Likos, W. J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. Canada: John Wiley y Sons, Inc.
- Ludeña, L., Parra, D. A., & Mendoza, P.G. (2014). “Influencia de Bermas o Canales en la estabilidad de Pilas de Lixiviación”. 10th World Congress on Computational Mechanics. São Pablo, Brasil. <http://doi.org/10.5151/meceng-wccm2012-19928>
- Machado, S. L., & Vilar, O. M. (2015). Potenciais da água no solo. En J. C. Carvalho et al. (Eds.), *Solos não saturados no contexto geotécnico* (p. 79-96). São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- Marinho, Fernando Antônio Medeiros. (2005). *Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados*.
- Mendoza, W. M. (2020). Estabilidade de um talude rodoviário em solo não saturado: Influência da sucção mátrica nos parâmetros de estabilidade [Trabajo de cierre de curso, Universidad Federal de Ouro Preto].
- Midas. (s.f.). “Chapter 5: Algorithm, Section 9: Slope stability solution”. Manual Midas GTS NX.
- Milne, L. J., & Milne, M. (1978). Insects of the water surface. *Scientific American*, pp. 134-142.
- Ministerio de Energía y Minas. (2009). *Guía Ambiental para proyectos de Lixiviación en Pilas*. Lima, Perú: DGAAM. Recuperado de: [http://www.minem.gob.pe/\\_publicacion.php?idSector=4&idPublicacion=50](http://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=4&idPublicacion=50)

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). Norma Técnica E.050: Suelos y cimentaciones. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones. Recuperado de <http://www.vivienda.gob.pe/>
- Ministerio de Vivienda, construcción y Saneamiento (2012). Norma Técnica CE.020: Estabilización de suelos y taludes. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones. Recuperado de <http://www.vivienda.gob.pe/>
- Moreno, J. (s.f.). Modelización Numérica con Plaxis 2D. Consultado el 29 de mayo del 2020. <https://ingeoexpert.com/cursos/curso-de-modelizacion-numerica-con-plaxis-2d/>
- Mostaghimi, P., Tollit, B. S., Neethling, S. J., et al. (2014). A control volume finite element method for adaptive mesh simulation of flow in heap leaching. *Journal of Engineering Mathematics*, 87(1), 111–121. <https://doi.org/10.1007/s10665-013-9672-3>
- Nieto, Andrés, Javier Camacho, y Edwin Ruiz. 2009. “Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos mohr-coulomb y hardening soil en suelos arcillosos”. *Revista de Ingenierías: Universidad de Medellín* 8(15):75–91.
- Olaya, D. (2015). Notas de clase de estabilidad de taludes [Material de clase]. Universidad de la Gran Colombia.
- Plaxis. (2011). *Plaxis Tutorial*. Plaxis.
- Rojas González, E. (2018). Un modelo general para suelos no saturados totalmente acoplado. *Digital Ciencia UAQRO*, julio-diciembre.
- Sheikhzadeh, G. A., Mehrabian, M., Mansouri, S., & Sarrafi, A. (2005). Computational modelling of unsaturated flow of liquid in heap leaching - Using the results of column tests to calibrate the model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 279-292. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.08.007>
- Srivastava, R., & Yeh, T.-C. J. (1991). Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration toward the water table in homogeneous and layered soils. *Water Resources Research*, 27(5), 753-762. <https://doi.org/10.1029/90WR02772>
- Stianson, J., & Fredlund, D. (2014). The application of unsaturated soil mechanics to heap leach analysis. *ResearchGate*. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/346651231\\_The\\_application\\_of\\_unsaturated\\_soil\\_mechanics\\_to\\_heap\\_leach\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/346651231_The_application_of_unsaturated_soil_mechanics_to_heap_leach_analysis)
- Suárez, J. (2000). Mecanismos de falla. En *Deslizamientos*. Tomo I: Análisis Geotécnico (pp. 37-73). Erosion.com.co. Recuperado de <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico/>

- Taban, A. & Sadeghi, M & Rowshanzamir, Mohamadali. (2017). The Estimation of van Genuchten SWCC Model for Unsaturated Sands by means of the Genetic Programming. *Scientia Iranica*. 25. 10.24200/sci.2017.4206.
- Tobón, W., García, E., & Vega, C. (2016). Análisis numérico del proceso de infiltración de agua y localización de deformación en suelos parcialmente saturados. *Revista EIA*, 13(25), 53-68. <http://doi.org/10.24050/reia.v13i25.1017>
- Tuller, M., & Or, D. (2003). Retention of water in soil and the soil water characteristic curve (Revised 09/13/2003). University of Idaho, Moscow, Idaho, USA; University of Connecticut, Storrs, Connecticut, USA. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/268055840\\_RETENTION\\_OF\\_WATER\\_IN\\_SOIL\\_AND\\_THE\\_SOIL\\_WATER\\_CHARACTERISTIC\\_CURVE](https://www.researchgate.net/publication/268055840_RETENTION_OF_WATER_IN_SOIL_AND_THE_SOIL_WATER_CHARACTERISTIC_CURVE)



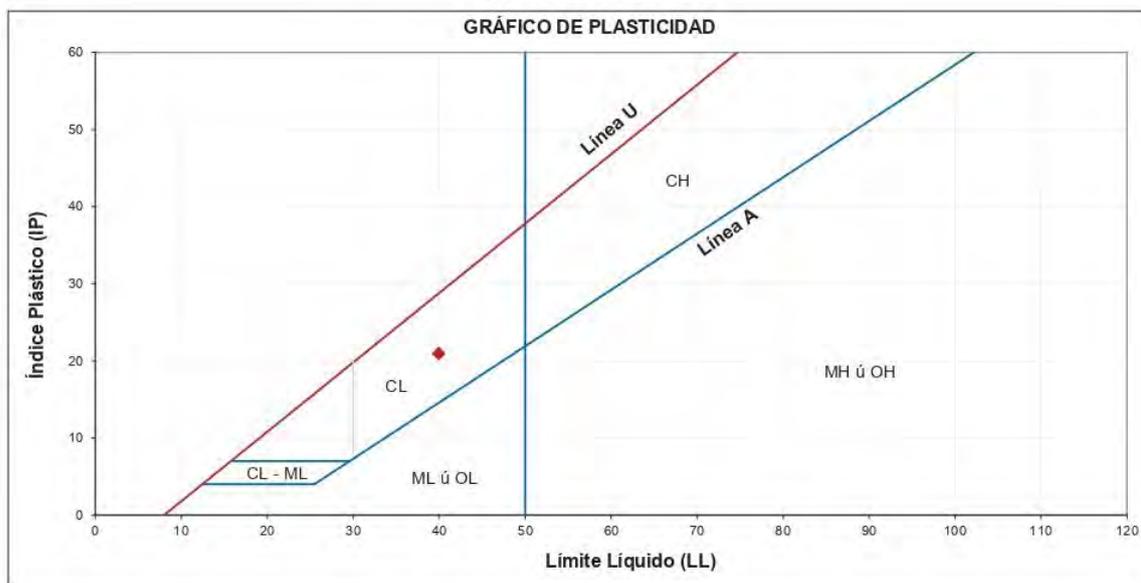
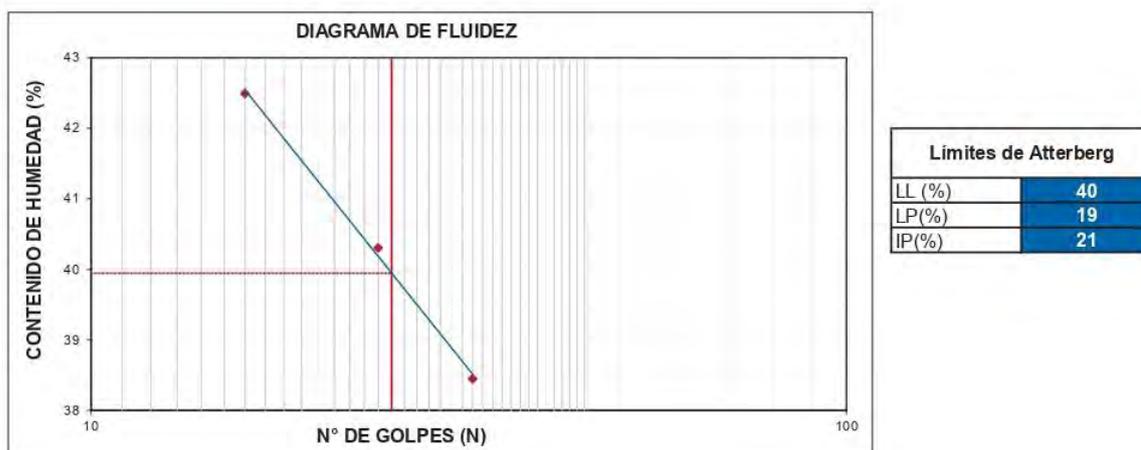


**ANEXO A**

**RESULTADOS DE LABORATORIO**

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
 Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos



**Observación:**

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.  
 La muestra presenta gravas deleznales,

Realizado por:

MR

Ingresado por:

JGF

Revisado por:

CSM

Nº de informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Av. Javier Prado Este Cdra. 48, Edificio Capital Golf, Piso 13, Surco, Lima 33, Perú T: +51 1 317 4900

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
 Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76,200	100,0
2"	50,800	100,0
1 1/2"	38,100	97,0
1"	25,400	85,8
3/4"	19,050	75,4
1/2"	12,700	66,0
3/8"	9,525	61,2
Nº4	4,760	51,6
Nº10	2,000	45,9
Nº20	0,850	43,1
Nº40	0,425	41,8
Nº100	0,150	39,9
Nº200	0,075	38,5

Partículas >3" (%)	---
Grava (%)	48,4
Arena (%)	13,1
Limos y Arcillas (%)	38,5

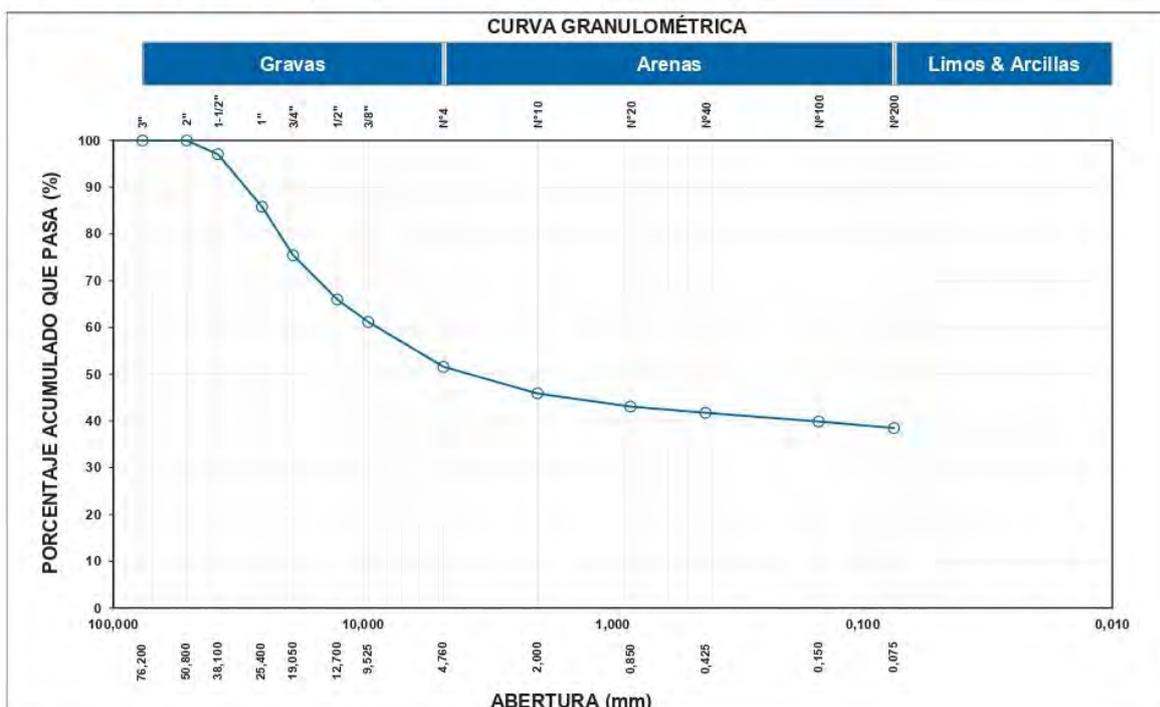
D <sub>10</sub>	
D <sub>30</sub>	
D <sub>60</sub>	8,77
Cu	
Cc	

Límites de Atterberg:	
LL (%)	40
LP (%)	19
IP (%)	21

Humedad (%)	6,0
-------------	-----

SUCS	GC
------	----

Grava arcillosa
-----------------



**Observación:**

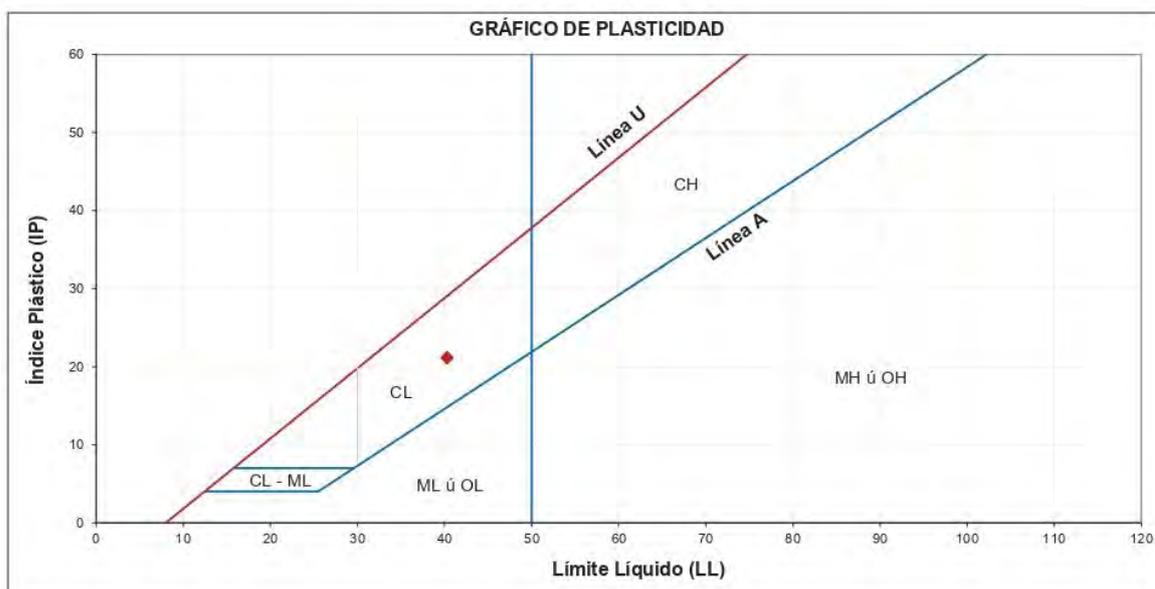
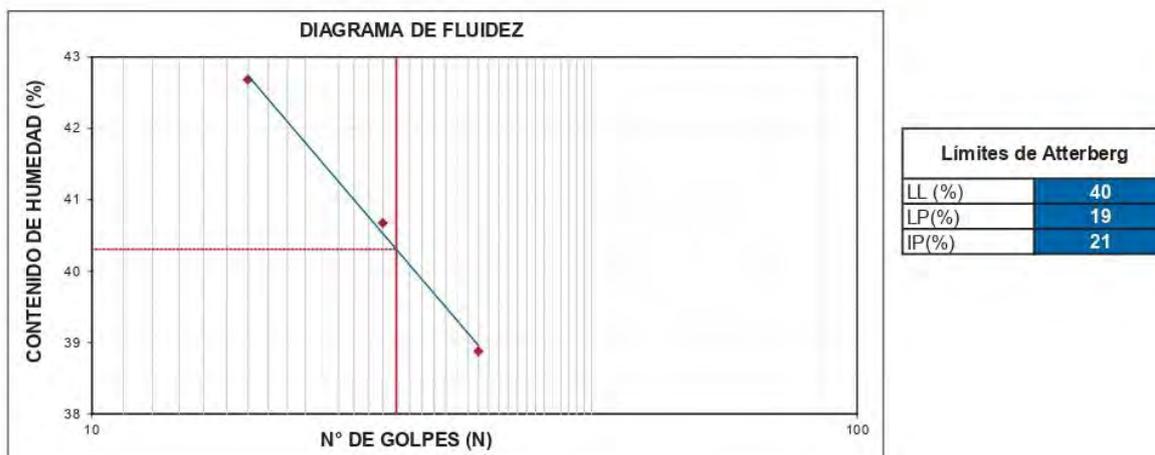
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.  
 La muestra presenta gravas deleznable,

Realizado por: MP      Ingresado por: JGF      Revisado por: CSM      Nº de informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos



**Observación:**

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.  
La muestra presenta gravas deleznales.

Realizado por:

MR

Ingresado por:

JGF

Revisado por:

CSM

Nº de informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76,200	100,0
2"	50,800	100,0
1 1/2"	38,100	98,8
1"	25,400	94,6
3/4"	19,050	91,0
1/2"	12,700	85,3
3/8"	9,525	81,5
Nº4	4,760	71,2
Nº10	2,000	61,6
Nº20	0,850	57,3
Nº40	0,425	55,2
Nº100	0,150	52,8
Nº200	0,075	50,9

Partículas >3" (%)	---
Grava (%)	28,8
Arena (%)	20,3
Limos y Arcillas (%)	50,9

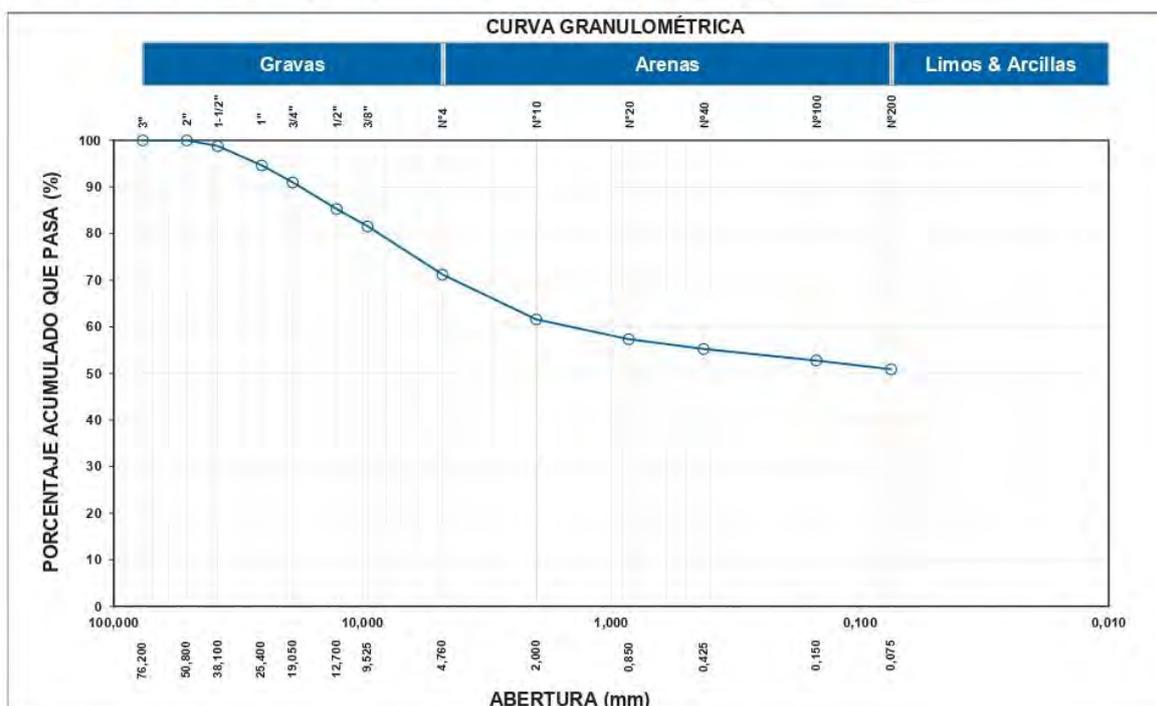
D <sub>10</sub>	
D <sub>30</sub>	
D <sub>60</sub>	1,45
Cu	
Cc	

<b>Limites de Atterberg:</b>	
LL (%)	40
LP (%)	19
IP (%)	21

Humedad (%)	5,4
-------------	-----

SUCS	CL
------	----

Arcilla de baja plasticidad gravosa
-------------------------------------



**Observación:**  
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.  
La muestra presenta gravas deleznales.

Realizado por: MP      Ingresado por: JGF      Revisado por: CSM      Nº de informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
 Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Estado de la muestra

Colocada con ligera compactación

(\*) El promedio corresponde a 10 lecturas pero solo se reportan 4 de éstas.

SUCS	<b>GC</b>
------	-----------

**Datos del Ensayo**

Diámetro (cm)	30,60	Densidad inicial seca(gr/cm <sup>3</sup> )	1,45	Densidad final seca(gr/cm <sup>3</sup> )	1,45
Altura (cm)	38,45	Humedad Inicial (%)	7,2	Humedad final (%)	17,3
Gravedad de Sólidos	2,74	Saturación inicial (%)	22,4	Saturación final (%)	53,7

## Medición del Coeficiente de Permeabilidad

Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,276	1 kPa					
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)	
94,1	83,5	10,6	70,51	250,0	3,55	1,7E-02	19,0	1,8E-02	
94,1	83,5	10,6	70,47	250,0	3,55	1,7E-02	19,0	1,8E-02	
94,1	83,5	10,6	70,37	245,0	3,48	1,7E-02	19,0	1,8E-02	
94,1	83,5	10,6	70,46	250,0	3,55	1,8E-02	19,0	1,8E-02	
<b>Promedio (cm/s) :</b>								<b>1,8E-02</b>	(*)

## Medición del Coeficiente de Permeabilidad

Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,000	300 kPa					
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)	
Para esta carga no pasa el agua									
<b>Promedio (cm/s) :</b>								<b>---</b>	(*)

## Medición del Coeficiente de Permeabilidad

Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,047	600 kPa					
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)	
Para esta carga no pasa el agua									
<b>Promedio (cm/s) :</b>								<b>---</b>	(*)

- Notas:**
- 1) El ensayo se realizó en un permeámetro de pared rígida de 30.5 cm de diámetro. Ensayo de carga constante
  - 2) Material colocado con ligera compactación
  - 3) Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

Realizado por:

BT

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en firmar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
 Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

#### Panel Fotográfico



Muestras proporcionadas por el cliente.



Cuarteo de la muestra.



Muestra preparada para el ensayo.



Ensayo en proceso.

#### Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:

BT

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

Nº de informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
 Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Estado de la muestra

Colocada con ligera compactación

(\*) El promedio corresponde a 10 lecturas pero solo se reportan 4 de éstas.

SUCS	<b>GC</b>
------	-----------

**Datos del Ensayo**

Diámetro (cm)	30,60	Densidad inicial seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1,42	Densidad final seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1,75
Altura (cm)	36,48	Humedad Inicial (%)	4,7	Humedad final (%)	13,8
Gravedad de Sólidos	2,75	Saturación inicial (%)	14,0	Saturación final (%)	66,8

## Medición del Coeficiente de Permeabilidad

Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,066	1 kPa				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
84,9	82,5	2,4	70,45	330,0	4,68	9,7E-02	18,0	1,0E-01
84,9	82,5	2,4	70,40	325,0	4,62	9,5E-02	18,0	1,0E-01
84,9	82,5	2,4	70,40	325,0	4,62	9,5E-02	18,0	1,0E-01
84,9	82,5	2,4	70,40	325,0	4,62	9,5E-02	18,0	1,0E-01
<b>Promedio (cm/s) :</b>								<b>1,0E-01</b>

(\*)

## Medición del Coeficiente de Permeabilidad

Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,705	300 kPa				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
103,4	82,5	20,9	130,40	180,0	1,38	2,7E-03	18,0	2,8E-03
103,4	82,5	20,9	130,48	180,0	1,38	2,7E-03	18,0	2,8E-03
103,4	82,5	20,9	130,38	180,0	1,38	2,7E-03	18,0	2,8E-03
103,4	82,5	20,9	130,49	180,0	1,38	2,7E-03	18,0	2,8E-03
<b>Promedio (cm/s) :</b>								<b>2,8E-03</b>

(\*)

## Medición del Coeficiente de Permeabilidad

Carga

Gradiente hidráulico promedio			---	600 kPa				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
<b>Promedio (cm/s) :</b>								<b>---</b>

(\*)

- Notas:**
- 1) El ensayo se realizó en un permeámetro de pared rígida de 30.5 cm de diámetro. Ensayo de carga constante
  - 2) Material colocado con ligera compactación
  - 3) Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

Realizado por:

BT

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de informe:

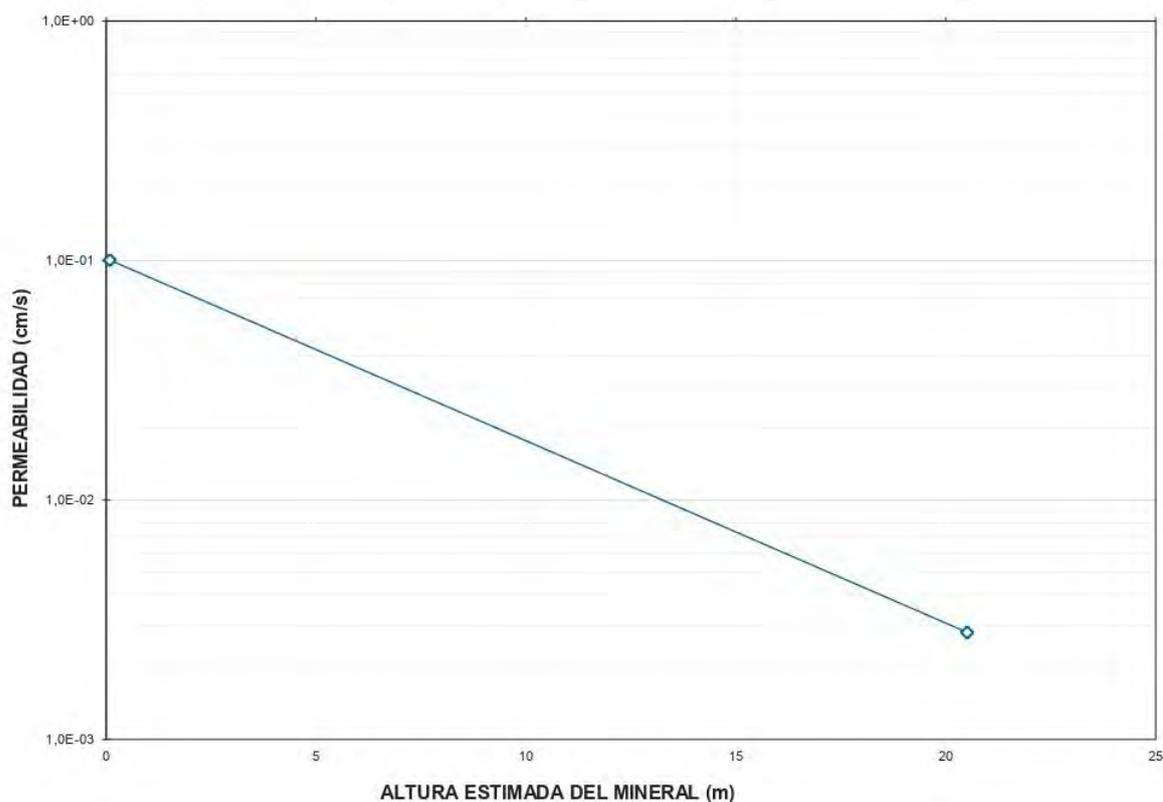
Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Av. Javier Prado Este Cdm. 48, Edificio Capital Golf, Piso 13, Surco, Lima 33, Perú T: +51 1 317 4900

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Nº Ensayo	Contenido de Agua %	Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Altura Estimada del Mineral (m)	Esfuerzo Normal (kPa)	Conductividad Hidráulica (cm/s)
Inicial					
1	4,7	1,42	0	1,0	1,0E-01
2		1,75	21	300,0	2,8E-03
Final	13,8	1,75			



Realizado por: BT      Ingresado por: JCA      Revisado por: CSM      Nº de informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
 Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

#### Panel Fotográfico



Muestras proporcionadas por el cliente.



Cuarteo de la muestra.



Muestra preparada para el ensayo.



Ensayo en proceso.

#### Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Ido por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
BT	JCA	CSM	

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Av. Javier Prado Este Cdra. 48, Edificio Capital Golf, Piso 13, Surco, Lima 33, Perú T: +51 1 317 4900

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
 Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Estado de la muestra Colocada con ligera compactación (\*) El promedio corresponde a 10 lecturas, pero solo se reportan 4 de éstas.

SUCS	<b>GC</b>
------	-----------

**Datos del Ensayo**

Diámetro (cm)	30,60	Densidad inicial seca(gr/cm <sup>3</sup> )	1,42	Densidad final seca(gr/cm <sup>3</sup> )	1,78
Altura (cm)	34,83	Humedad Inicial (%)	5,4	Humedad final (%)	16,3
Gravedad de Sólidos	2,73	Saturación inicial (%)	16,2	Saturación final (%)	83,9

## Medición del Coeficiente de Permeabilidad

## Carga

Gradiente hidráulico promedio			<b>0,043</b>	<b>1 kPa</b>				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta h$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
84,0	82,5	1,5	70,44	360,0	5,11	1,6E-01	20,0	1,6E-01
84,0	82,5	1,5	70,44	360,0	5,11	1,6E-01	20,0	1,6E-01
84,0	82,5	1,5	70,39	360,0	5,11	1,6E-01	20,0	1,6E-01
84,0	82,5	1,5	70,40	360,0	5,11	1,6E-01	20,0	1,6E-01
<b>Promedio (cm/s) :</b>								<b>1,6E-01</b>

## Medición del Coeficiente de Permeabilidad

## Carga

Gradiente hidráulico promedio			<b>0,463</b>	<b>300 kPa</b>				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta h$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
96,0	82,6	13,4	130,36	620,0	4,76	1,4E-02	21,0	1,4E-02
96,0	82,6	13,4	130,36	620,0	4,76	1,4E-02	21,0	1,4E-02
96,0	82,6	13,4	130,37	620,0	4,76	1,4E-02	21,0	1,4E-02
96,0	82,6	13,4	130,40	620,0	4,75	1,4E-02	21,0	1,4E-02
<b>Promedio (cm/s) :</b>								<b>1,4E-02</b>

## Medición del Coeficiente de Permeabilidad

## Carga

Gradiente hidráulico promedio			<b>1,882</b>	<b>600 kPa</b>				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta h$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
135,7	82,5	53,2	130,35	385,0	2,95	2,1E-03	21,0	2,1E-03
135,7	82,5	53,2	130,36	385,0	2,95	2,1E-03	21,0	2,1E-03
135,7	82,5	53,2	130,36	385,0	2,95	2,1E-03	21,0	2,1E-03
135,7	82,5	53,2	130,40	385,0	2,95	2,1E-03	21,0	2,1E-03
<b>Promedio (cm/s) :</b>								<b>2,1E-03</b>

## Medición del Coeficiente de Permeabilidad

## Carga

Gradiente hidráulico promedio			<b>2,326</b>	<b>900 kPa</b>				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta h$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
109,2	44,6	64,6	130,38	370,0	2,84	1,7E-03	21,0	1,7E-03
109,2	44,6	64,6	130,39	370,0	2,84	1,7E-03	21,0	1,7E-03
109,2	44,6	64,6	130,36	370,0	2,84	1,7E-03	21,0	1,7E-03
109,2	44,6	64,6	130,36	370,0	2,84	1,7E-03	21,0	1,7E-03
<b>Promedio (cm/s) :</b>								<b>1,7E-03</b>

- Notas:**
- 1) El ensayo se realizó en un permeámetro de pared rígida de 30.5 cm de diámetro. Ensayo de carga constante
  - 2) Material colocado con ligera compactación
  - 3) Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

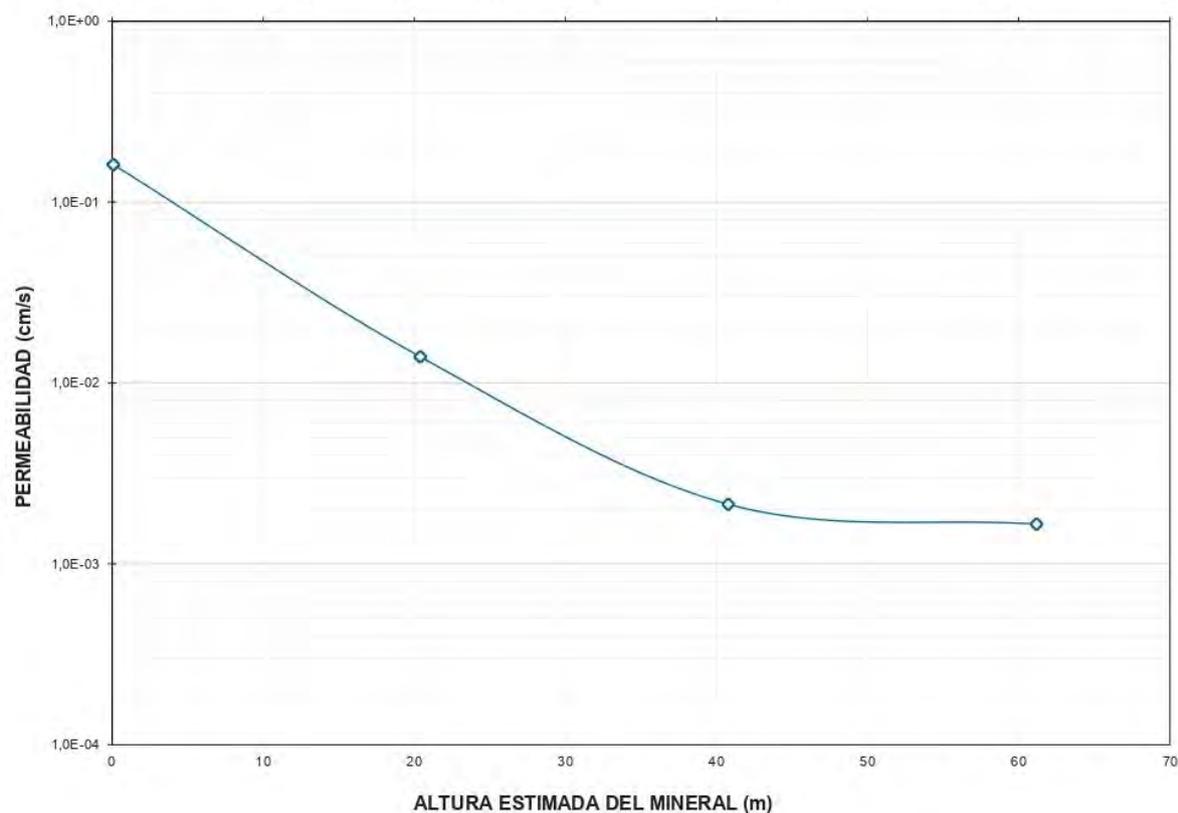
Realizado por: **MP** Ingresado por: **JGF** Revisado por: **CSM** N° de informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no me es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
 Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Nº Ensayo	Contenido de Agua %	Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Altura Estimada del Mineral (m)	Esfuerzo Normal (kPa)	Conductividad Hidráulica (cm/s)
Inicial		-	-	-	-
1	5,4	1,42	0	1,0	1,6E-01
2		1,71	20	300,0	1,4E-02
3		1,75	41	600,0	2,1E-03
4		1,78	61	900,0	1,7E-03
Final	16,3	1,78			



**NOTAS:** 1) Uso permeámetro de 12" de pared rígida 3) Altura, basada en la densidad húmeda inicial promedio  
 2) Ensayo a carga constante 4) Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JGF

Revisado por:

CSM

Nº de informe:

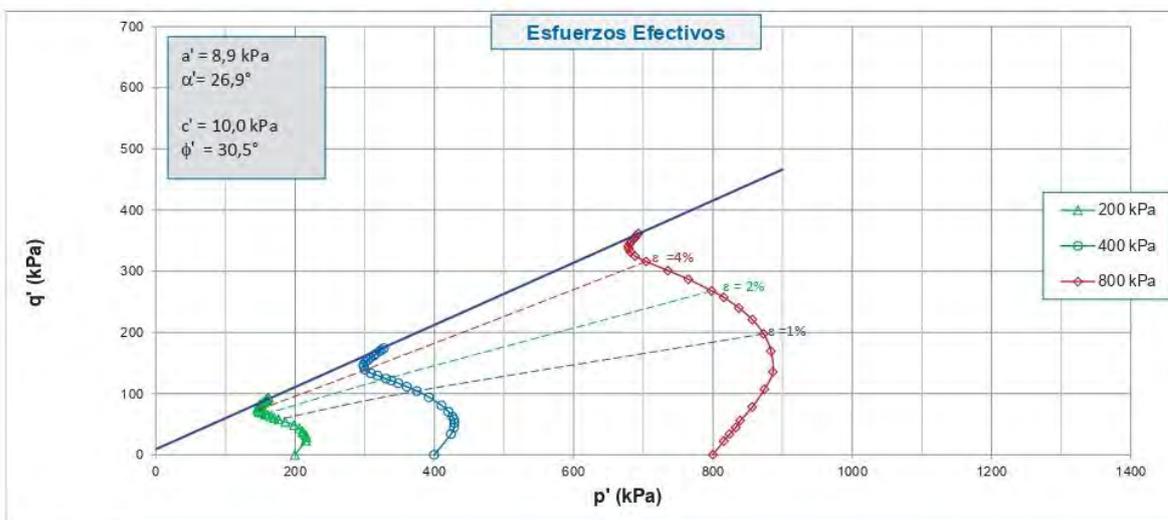
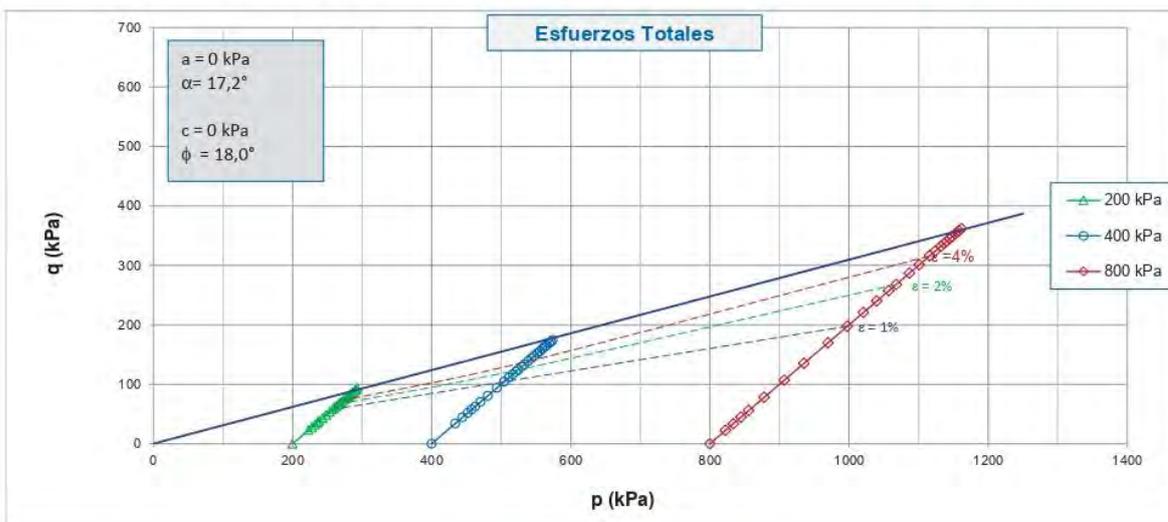
Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Clasificación SUCS: **CL**

Estado : Remoldeado al volteo



**Observaciones:**  
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por: LSA      Ingresado por: JGF      Revisado por: CSM      N° de Informe:

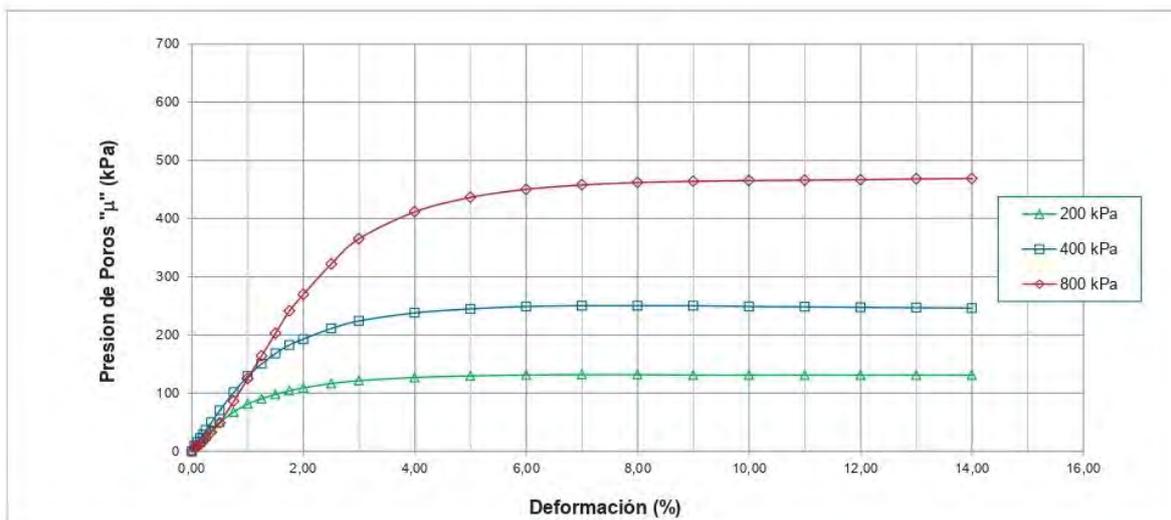
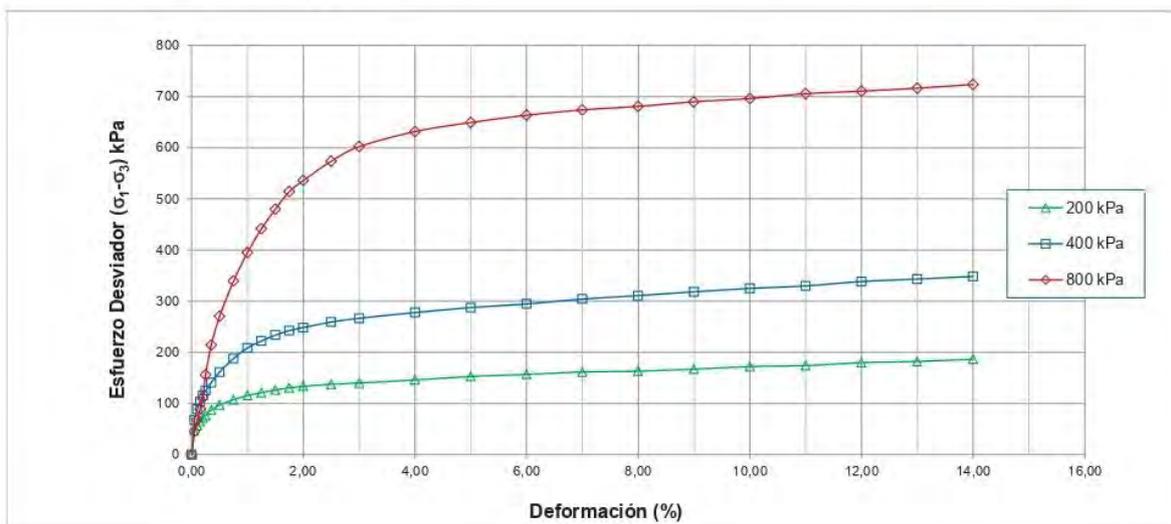
Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Clasificación SUCS: **CL**

Estado : Remoideado al volteo



**Observaciones:**

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por: LSA      Ingresado por: JGF      Revisado por: CSM      Nº de Informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
Bach. HUARCAYA QUIQUILA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Clasificación SUCS: **CL**

Estado : Remoldeado al volteo

Etapa de consolidación		Inicio	Final
Altura	(cm)	20,90	19,32
Diámetro	(cm)	10,04	9,66
Humedad	(%)	13,95	18,26
Densidad seca	(g/cm <sup>3</sup> )	1,260	1,473

Velocidad	0,025	(cm/min)
Parámetro "B"	0,97	
Presión de celda	987	kPa
Contra presión	187	kPa
Esf. Efect. Inicial	800	kPa

Deformación (%)	$\sigma_{desv}$ (kPa)	$\mu$ (kPa)	$p$ (kPa)	$q$ (kPa)	$p'$ (kPa)	$q'$ (kPa)	$q'/p'$	$(\sigma'_1/\sigma'_3)$
0,00	0	0	800,0	0,0	800,0	0,0	0,00	1,00
0,05	45	7	822,5	22,5	815,6	22,5	0,03	1,06
0,10	67	10	833,7	33,7	824,0	33,7	0,04	1,09
0,15	89	12	844,6	44,6	832,9	44,6	0,05	1,11
0,20	112	17	855,8	55,8	839,2	55,8	0,07	1,14
0,25	156	21	878,0	78,0	856,6	78,0	0,09	1,20
0,35	214	33	907,1	107,1	874,0	107,1	0,12	1,28
0,50	270	49	935,2	135,2	886,3	135,2	0,15	1,36
0,75	339	86	969,6	169,6	883,4	169,6	0,19	1,48
1,00	395	125	997,6	197,6	872,8	197,6	0,23	1,59
1,25	442	164	1020,8	220,8	856,7	220,8	0,26	1,69
1,50	480	203	1040,0	240,0	837,3	240,0	0,29	1,80
1,75	514	241	1057,2	257,2	815,9	257,2	0,32	1,92
2,00	536	270	1067,9	267,9	798,3	267,9	0,34	2,01
2,50	574	322	1086,8	286,8	764,8	286,8	0,38	2,20
3,00	602	365	1101,0	301,0	735,6	301,0	0,41	2,39
4,00	632	412	1115,8	315,8	704,2	315,8	0,45	2,63
5,00	649	436	1124,7	324,7	688,2	324,7	0,47	2,79
6,00	664	450	1131,8	331,8	681,5	331,8	0,49	2,90
7,00	674	458	1137,0	337,0	679,2	337,0	0,50	2,97
8,00	681	462	1140,5	340,5	678,5	340,5	0,50	3,01
9,00	690	464	1144,9	344,9	680,9	344,9	0,51	3,05
10,00	696	465	1148,1	348,1	682,7	348,1	0,51	3,08
11,00	706	466	1152,8	352,8	686,7	352,8	0,51	3,11
12,00	711	467	1155,3	355,3	688,6	355,3	0,52	3,13
13,00	716	468	1158,2	358,2	690,1	358,2	0,52	3,16
14,00	724	469	1161,9	361,9	693,0	361,9	0,52	3,19

**Observaciones:**

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:

LSA

Ingresado por:

JGF

Revisado por:

CSM

Nº de Informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
 Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Clasificación SUCS: **CL**

Estado : Remoldeado al volteo

Etapa de consolidación	Inicio	Final
Altura (cm)	20,90	19,68
Diámetro (cm)	10,04	9,73
Humedad (%)	13,95	18,84
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,260	1,424

Velocidad	0,025	(cm/min)
Parámetro "B"	0,93	
Presión de celda	587	kPa
Contra presión	187	kPa
Esf. Efect. Inicial	400	kPa

Deformación (%)	$\sigma_{desv}$ (kPa)	$\mu$ (kPa)	$p$ (kPa)	$q$ (kPa)	$p'$ (kPa)	$q'$ (kPa)	$q'/p'$	$(\sigma_1/\sigma_3)$
0,00	0	0	400,0	0,0	400,0	0,0	0,00	1,00
0,05	68	10	433,8	33,8	424,1	33,8	0,08	1,17
0,10	89	16	444,5	44,5	428,6	44,5	0,10	1,23
0,15	104	23	451,8	51,8	429,1	51,8	0,12	1,27
0,20	115	29	457,6	57,6	428,6	57,6	0,13	1,31
0,25	125	37	462,6	62,6	426,0	62,6	0,15	1,34
0,35	141	50	470,3	70,3	420,6	70,3	0,17	1,40
0,50	161	70	480,7	80,7	410,4	80,7	0,20	1,49
0,75	188	101	493,9	93,9	392,5	93,9	0,24	1,63
1,00	208	129	504,2	104,2	375,3	104,2	0,28	1,77
1,25	222	150	511,1	111,1	360,7	111,1	0,31	1,89
1,50	234	168	516,8	116,8	348,6	116,8	0,34	2,01
1,75	242	183	521,2	121,2	338,5	121,2	0,36	2,12
2,00	248	193	524,2	124,2	331,1	124,2	0,38	2,20
2,50	259	211	529,6	129,6	318,6	129,6	0,41	2,37
3,00	266	224	533,2	133,2	309,1	133,2	0,43	2,51
4,00	278	238	538,8	138,8	300,9	138,8	0,46	2,71
5,00	287	245	543,7	143,7	298,9	143,7	0,48	2,85
6,00	295	249	547,3	147,3	298,4	147,3	0,49	2,95
7,00	304	250	552,0	152,0	301,8	152,0	0,50	3,03
8,00	311	250	555,4	155,4	305,1	155,4	0,51	3,08
9,00	318	250	559,1	159,1	308,8	159,1	0,52	3,13
10,00	325	249	562,4	162,4	313,5	162,4	0,52	3,15
11,00	330	248	564,9	164,9	316,7	164,9	0,52	3,17
12,00	338	248	569,2	169,2	321,7	169,2	0,53	3,22
13,00	343	247	571,6	171,6	324,8	171,6	0,53	3,24
14,00	348	246	574,2	174,2	328,0	174,2	0,53	3,26

**Observaciones:**

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:

LSA

Ingresado por:

JGF

Revisado por:

CSM

Nº de Informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
 Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Clasificación SUCS: **CL**

Estado : Remoldeado al volteo

Etapa de consolidación	Inicio	Final
Altura (cm)	20,90	19,98
Diámetro (cm)	10,04	9,82
Humedad (%)	13,95	19,41
Densidad seca (g/cm3)	1,260	1,378

Velocidad	0,025	(cm/min)
Parámetro "B"	0,92	
Presión de celda	387	kPa
Contra presión	187	kPa
Esf. Efect. Inicial	200	kPa

Deformación (%)	$\sigma_{desv}$ (kPa)	$\mu$ (kPa)	$p$ (kPa)	$q$ (kPa)	$p'$ (kPa)	$q'$ (kPa)	$q'/p'$	$(\sigma'_1/\sigma'_3)$
0,00	0	0	200,0	0,0	200,0	0,0	0,00	1,00
0,05	46	8	223,1	23,1	215,5	23,1	0,11	1,24
0,10	56	12	228,1	28,1	216,4	28,1	0,13	1,30
0,15	65	17	232,3	32,3	215,8	32,3	0,15	1,35
0,20	72	23	235,9	35,9	212,5	35,9	0,17	1,41
0,25	77	28	238,3	38,3	210,7	38,3	0,18	1,44
0,35	87	37	243,4	43,4	206,1	43,4	0,21	1,53
0,50	97	50	248,5	48,5	198,8	48,5	0,24	1,64
0,75	107	68	253,7	53,7	186,1	53,7	0,29	1,81
1,00	115	81	257,7	57,7	176,3	57,7	0,33	1,97
1,25	121	90	260,5	60,5	170,2	60,5	0,36	2,10
1,50	126	98	263,1	63,1	165,2	63,1	0,38	2,24
1,75	130	104	265,1	65,1	161,0	65,1	0,40	2,36
2,00	133	109	266,7	66,7	157,7	66,7	0,42	2,46
2,50	137	117	268,7	68,7	152,2	68,7	0,45	2,65
3,00	140	121	270,0	70,0	148,6	70,0	0,47	2,78
4,00	146	127	272,9	72,9	146,0	72,9	0,50	2,99
5,00	153	130	276,3	76,3	146,7	76,3	0,52	3,17
6,00	157	131	278,4	78,4	147,4	78,4	0,53	3,27
7,00	161	132	280,7	80,7	149,0	80,7	0,54	3,36
8,00	163	132	281,6	81,6	149,9	81,6	0,54	3,39
9,00	167	131	283,5	83,5	152,5	83,5	0,55	3,42
10,00	172	131	286,0	86,0	155,0	86,0	0,55	3,49
11,00	174	131	287,0	87,0	156,0	87,0	0,56	3,52
12,00	180	131	289,8	89,8	158,8	89,8	0,57	3,60
13,00	182	131	291,1	91,1	160,1	91,1	0,57	3,64
14,00	186	131	293,2	93,2	162,2	93,2	0,57	3,70

**Observaciones:**

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:

LSA

Ingresado por:

JGF

Revisado por:

CSM

Nº de Informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

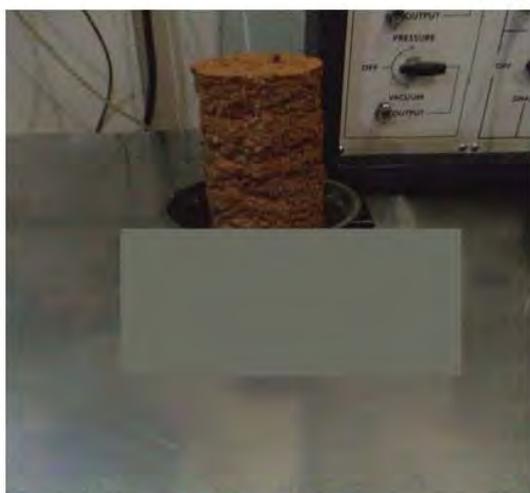
TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
 Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Clasificación SUCS: **CL**

Estado : Remoldeado al volteo

### Panel Fotográfico



Espécimen 200 kPa



Espécimen 400 kPa



Espécimen 800 kPa



Espécimen 200, 400 y 800 kPa

#### Observaciones:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:

LSA

Ingresado por:

JGF

Revisado por:

CSM

Nº de Informe:

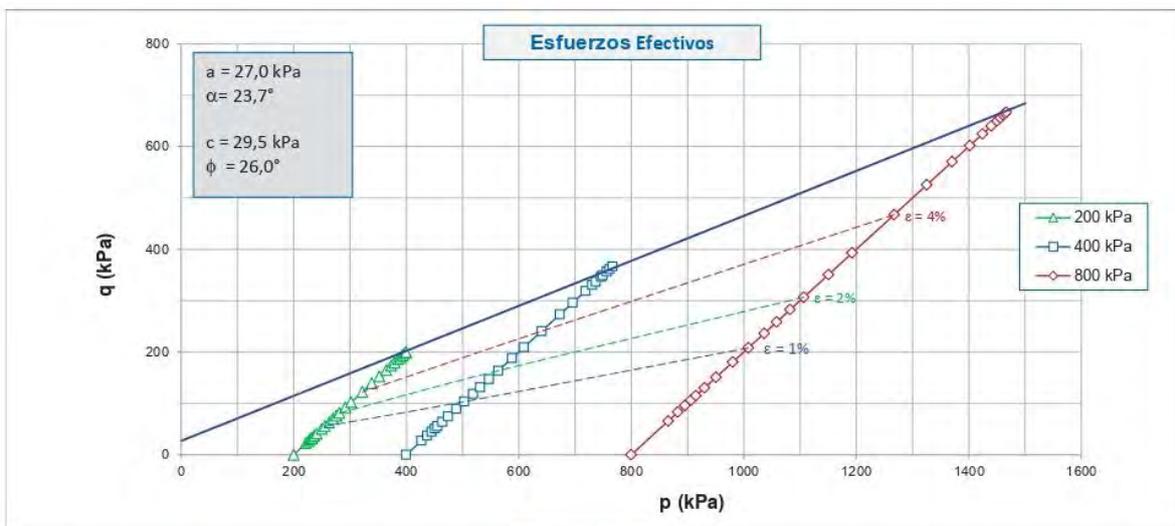
Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Clasificación SUCS: **CL**

Estado : Remoldeado al volteo



Panel Fotográfico



Especimen 200, 400 y 800 kPa

**Observaciones:**

Los datos de densidad y humedad fueron indicados por el solicitante.  
Los parámetros de resistencia cortante reportados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional competente en geotecnia.

Realizado por: LSA      Ingresado por: JGF      Revisado por: CSM      N° de Informe:

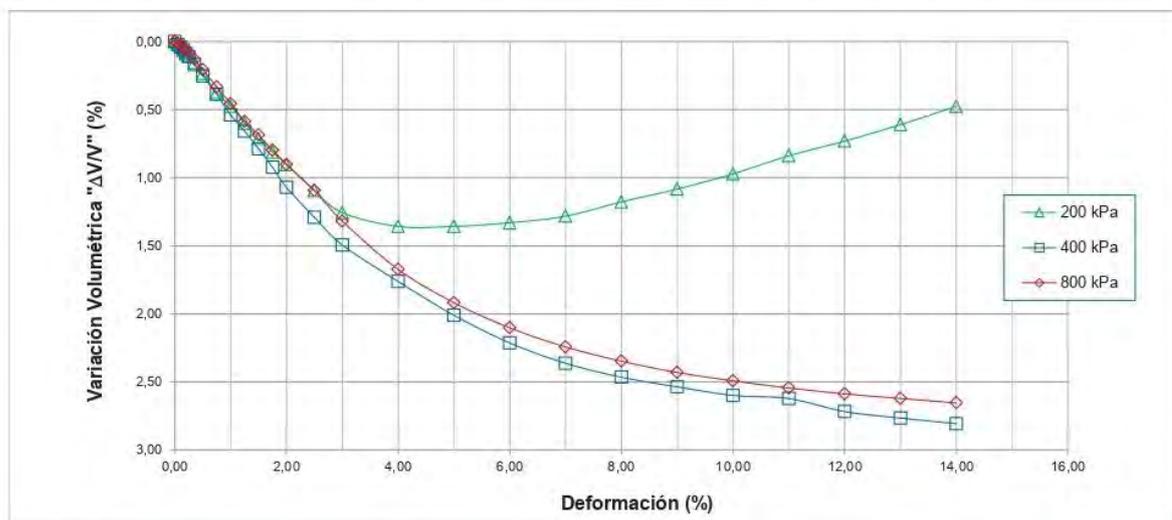
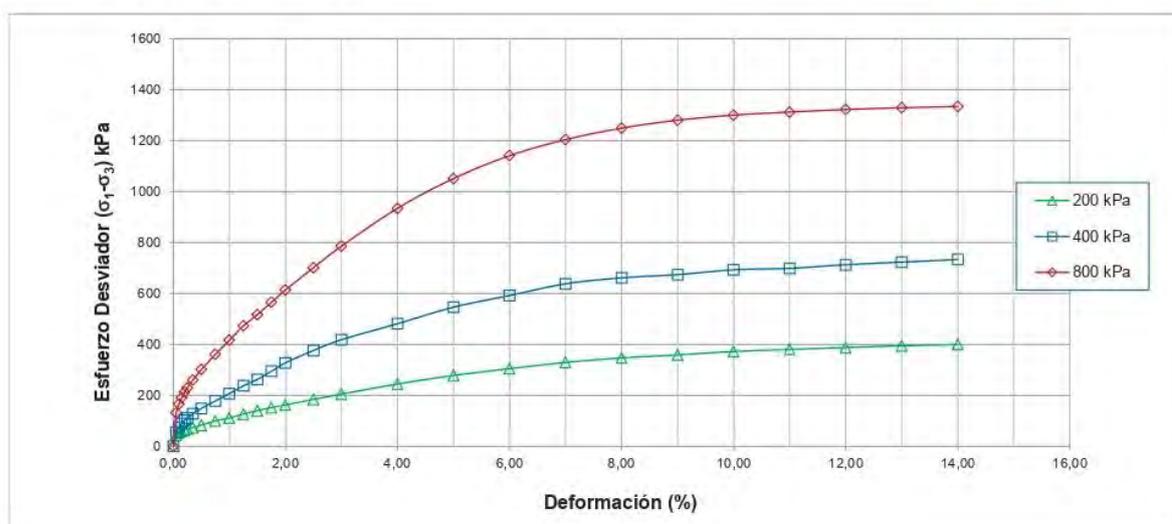
Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
 Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Clasificación SUCS: **CL**

Estado : Remoldeado al volteo



**Observaciones:**

Los datos de densidad y humedad fueron indicados por el solicitante.

Los parámetros de resistencia cortante reportados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional competente en geotecnia.

Realizado por:

LSA

Ingresado por:

JGF

Revisado por:

CSM

Nº de Informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
 Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Clasificación SUCS: **CL**

Estado : Remoldeado al volteo

Etapa de consolidación	Inicio	Final
Altura (cm)	20,90	19,24
Diámetro (cm)	10,04	9,76
Humedad (%)	14,00	15,40
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,259	1,448

Velocidad	0,125	(mm/min)
Parámetro "B"	0,94	
Presión de celda	987	kPa
Contra presión	187	kPa
Esf. Efect. Inicial	800	kPa

Deformación (%)	$\sigma_{desv}$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	( $\sigma'_1/\sigma'_3$ )
0,00	0	800,0	0,0	800,0	0,0	0,00	1,00
0,05	131	865,4	65,4	865,4	65,4	0,08	1,16
0,10	166	882,8	82,8	882,8	82,8	0,09	1,21
0,15	191	895,4	95,4	895,4	95,4	0,11	1,24
0,20	212	906,1	106,1	906,1	106,1	0,12	1,27
0,25	229	914,7	114,7	914,7	114,7	0,13	1,29
0,35	260	930,0	130,0	930,0	130,0	0,14	1,32
0,50	301	950,5	150,5	950,5	150,5	0,16	1,38
0,75	361	980,3	180,3	980,3	180,3	0,18	1,45
1,00	416	1007,9	207,9	1007,9	207,9	0,21	1,52
1,25	472	1036,2	236,2	1036,2	236,2	0,23	1,59
1,50	517	1058,4	258,4	1058,4	258,4	0,24	1,65
1,75	565	1082,5	282,5	1082,5	282,5	0,26	1,71
2,00	613	1106,5	306,5	1106,5	306,5	0,28	1,77
2,50	701	1150,3	350,3	1150,3	350,3	0,30	1,88
3,00	785	1192,7	392,7	1192,7	392,7	0,33	1,98
4,00	934	1267,0	467,0	1267,0	467,0	0,37	2,17
5,00	1051	1325,4	525,4	1325,4	525,4	0,40	2,31
6,00	1140	1370,2	570,2	1370,2	570,2	0,42	2,43
7,00	1204	1401,8	601,8	1401,8	601,8	0,43	2,50
8,00	1249	1424,3	624,3	1424,3	624,3	0,44	2,56
9,00	1280	1439,9	639,9	1439,9	639,9	0,44	2,60
10,00	1300	1449,9	649,9	1449,9	649,9	0,45	2,62
11,00	1312	1455,8	655,8	1455,8	655,8	0,45	2,64
12,00	1322	1460,8	660,8	1460,8	660,8	0,45	2,65
13,00	1329	1464,3	664,3	1464,3	664,3	0,45	2,66
14,00	1334	1466,9	666,9	1466,9	666,9	0,45	2,67

**Observaciones:**

Los datos de densidad y humedad fueron indicados por el solicitante.

Los parámetros de resistencia cortante reportados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional competente en geotecnia.

Realizado por: LSA      Ingresado por: JGF      Revisado por: CSM      N° de Informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
 Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Clasificación SUCS: **CL**

Estado : Remoldeado al volteo

Etapa de consolidación	Inicio	Final
Altura (cm)	20,90	19,98
Diámetro (cm)	10,04	9,66
Humedad (%)	14,00	16,18
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,259	1,423

Velocidad	0,125	(mm/min)
Parámetro "B"	0,94	
Presión de celda	587	kPa
Contra presión	187	kPa
Esf. Efect. Inicial	400	kPa

Deformación (%)	$\sigma_{desv}$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	$(\sigma'_1/\sigma'_3)$
0,00	0	400,0	0,0	400,0	0,0	0,00	1,00
0,05	54	427,1	27,1	427,1	27,1	0,06	1,14
0,10	75	437,5	37,5	437,5	37,5	0,09	1,19
0,15	90	445,0	45,0	445,0	45,0	0,10	1,23
0,20	102	451,1	51,1	451,1	51,1	0,11	1,26
0,25	111	455,3	55,3	455,3	55,3	0,12	1,28
0,35	128	464,0	64,0	464,0	64,0	0,14	1,32
0,50	149	474,3	74,3	474,3	74,3	0,16	1,37
0,75	178	489,1	89,1	489,1	89,1	0,18	1,45
1,00	207	503,4	103,4	503,4	103,4	0,21	1,52
1,25	237	518,6	118,6	518,6	118,6	0,23	1,59
1,50	263	531,3	131,3	531,3	131,3	0,25	1,66
1,75	295	547,3	147,3	547,3	147,3	0,27	1,74
2,00	327	563,7	163,7	563,7	163,7	0,29	1,82
2,50	376	587,9	187,9	587,9	187,9	0,32	1,94
3,00	418	609,1	209,1	609,1	209,1	0,34	2,05
4,00	481	640,5	240,5	640,5	240,5	0,38	2,20
5,00	546	672,9	272,9	672,9	272,9	0,41	2,36
6,00	592	695,8	295,8	695,8	295,8	0,43	2,48
7,00	638	718,8	318,8	718,8	318,8	0,44	2,59
8,00	661	730,5	330,5	730,5	330,5	0,45	2,65
9,00	674	736,8	336,8	736,8	336,8	0,46	2,68
10,00	693	746,3	346,3	746,3	346,3	0,46	2,73
11,00	698	749,1	349,1	749,1	349,1	0,47	2,75
12,00	713	756,3	356,3	756,3	356,3	0,47	2,78
13,00	723	761,3	361,3	761,3	361,3	0,47	2,81
14,00	733	766,5	366,5	766,5	366,5	0,48	2,83

#### Observaciones:

Los datos de densidad y humedad fueron indicados por el solicitante.

Los parámetros de resistencia cortante reportados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional competente en geotecnia.

Realizado por:

LSA

Ingresado por:

JGF

Revisado por:

CSM

Nº de Informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

TESISTAS: Bach. LUCAS GONZALES, Emerson Raul  
 Bach. HUARCAYA QUIQUIA, Rosario Belen

PROYECTO: Influencia de los parámetros del suelo no saturado en el análisis de infiltración y estabilidad de una pila de lixiviación con alto contenido de finos

Clasificación SUCS: **CL**

Estado : Remoldeado al volteo

Etapa de consolidación	Inicio	Final
Altura (cm)	20,90	19,76
Diámetro (cm)	10,04	9,79
Humedad (%)	14,00	17,27
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,259	1,401

Velocidad	0,125	(mm/min)
Parámetro "B"	0,90	
Presión de celda	387	kPa
Contra presión	187	kPa
Esf. Efect. Inicial	200	kPa

Deformación (%)	$\sigma_{desv}$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	( $\sigma'_1/\sigma'_3$ )
0,00	0	200,0	0,0	200,0	0,0	0,00	1,00
0,05	45	222,3	22,3	222,3	22,3	0,10	1,22
0,10	53	226,5	26,5	226,5	26,5	0,12	1,26
0,15	58	229,2	29,2	229,2	29,2	0,13	1,29
0,20	63	231,3	31,3	231,3	31,3	0,14	1,31
0,25	67	233,3	33,3	233,3	33,3	0,14	1,33
0,35	74	236,9	36,9	236,9	36,9	0,16	1,37
0,50	83	241,3	41,3	241,3	41,3	0,17	1,41
0,75	100	249,9	49,9	249,9	49,9	0,20	1,50
1,00	111	255,4	55,4	255,4	55,4	0,22	1,55
1,25	126	263,0	63,0	263,0	63,0	0,24	1,63
1,50	140	270,0	70,0	270,0	70,0	0,26	1,70
1,75	152	275,8	75,8	275,8	75,8	0,27	1,76
2,00	162	281,1	81,1	281,1	81,1	0,29	1,81
2,50	184	291,9	91,9	291,9	91,9	0,31	1,92
3,00	205	302,3	102,3	302,3	102,3	0,34	2,02
4,00	244	322,2	122,2	322,2	122,2	0,38	2,22
5,00	278	338,9	138,9	338,9	138,9	0,41	2,39
6,00	305	352,3	152,3	352,3	152,3	0,43	2,52
7,00	329	364,5	164,5	364,5	164,5	0,45	2,65
8,00	347	373,5	173,5	373,5	173,5	0,46	2,73
9,00	359	379,4	179,4	379,4	179,4	0,47	2,79
10,00	372	386,0	186,0	386,0	186,0	0,48	2,86
11,00	380	390,0	190,0	390,0	190,0	0,49	2,90
12,00	387	393,7	193,7	393,7	193,7	0,49	2,94
13,00	394	397,2	197,2	397,2	197,2	0,50	2,97
14,00	399	399,6	199,6	399,6	199,6	0,50	3,00

**Observaciones:**

Los datos de densidad y humedad fueron indicados por el solicitante.

Los parámetros de resistencia cortante reportados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional competente en geotecnia.

Realizado por:

LSA

Ingresado por:

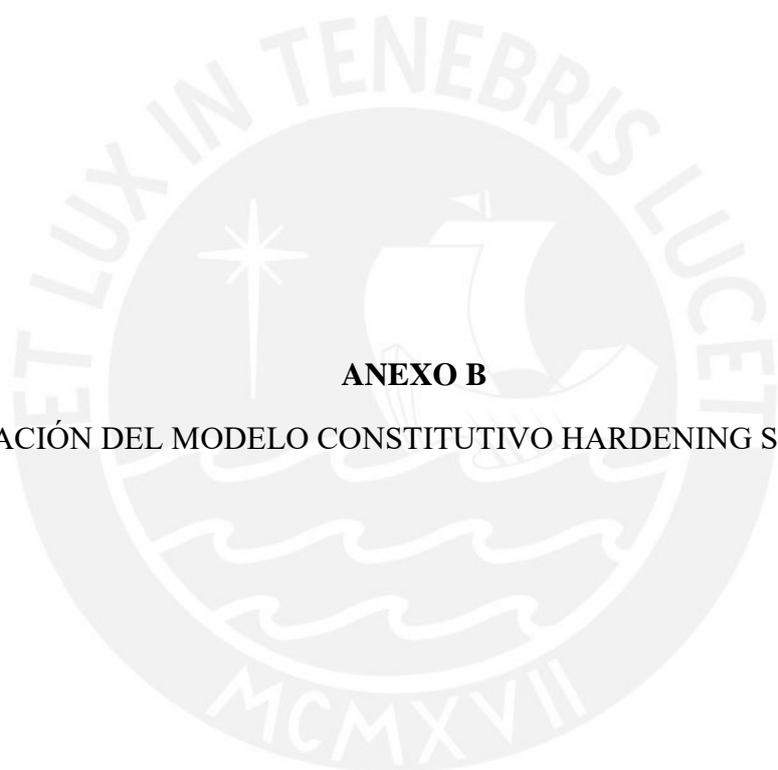
JGF

Revisado por:

CSM

Nº de Informe:

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.



**ANEXO B**

CALIBRACIÓN DEL MODELO CONSTITUTIVO HARDENING SOIL MODEL

## Calibración del modelo constitutivo Hardening Soil

Manual de uso Plaxis 2D (2018)

De los resultados de Laboratorio:

c =	29.5
phi =	26

Muestra:	Aglomerado 1:1.75
----------	-------------------

Determinación del parametro "E50":

ε%	ε	Δσ (Kpa)	Δσ (Kpa)	Δσ (Kpa)	def. Δσ		
		800	400	200	800kPa	400kPa	200kPa
0.00	0	0	0	0	-	-	-
0.05	0.0005	131	54	45	0.0000382	0.0000926	0.00001111
0.10	0.001	166	75	53	0.0000602	0.00001333	0.00001887
0.15	0.0015	191	90	58	0.0000785	0.00001667	0.00002586
0.20	0.002	212	102	62	0.0000943	0.00001961	0.00003175
0.25	0.0025	229	111	67	0.00001092	0.00002252	0.00003731
0.35	0.0035	260	128	74	0.00001346	0.00002734	0.00004730
0.50	0.005	301	149	83	0.00001661	0.00003356	0.00006024
0.75	0.0075	361	178	100	0.00002078	0.00004113	0.00007500
1.00	0.01	416	207	111	0.00002404	0.00004831	0.00009009
1.25	0.0125	472	237	126	0.00002648	0.00005274	0.00009921
1.50	0.015	517	263	140	0.00002901	0.00005703	0.00010714
1.75	0.0175	565	295	152	0.00003097	0.00005932	0.00011513
2.00	0.02	613	327	162	0.00003263	0.00006116	0.00012346
2.50	0.025	701	376	184	0.00003566	0.00006649	0.00013587
3.00	0.03	785	418	205	0.00003822	0.00007177	0.00014634
4.00	0.04	934	481	244	0.00004283	0.00008316	0.00016393
5.00	0.05	1051	546	278	0.00004757	0.00009158	0.00017986
6.00	0.06	1140	592	305	0.00005263	0.00010135	0.00019672
7.00	0.07	1204	638	329	0.00005814	0.00010972	0.00021277
8.00	0.08	1249	661	347	0.00006405	0.00012103	0.00023055
9.00	0.09	1280	674	359	0.00007031	0.00013353	0.00025070
10.00	0.1	1300	693	372	0.00007692	0.00014430	0.00026882
11.00	0.11	1312	698	380	0.00008384	0.00015759	0.00028947
12.00	0.12	1322	713	387	0.00009077	0.00016830	0.00031008
13.00	0.13	1329	723	394	0.00009782	0.00017981	0.00032995
14.00	0.14	1334	733	399	0.00010495	0.00019100	0.00035088

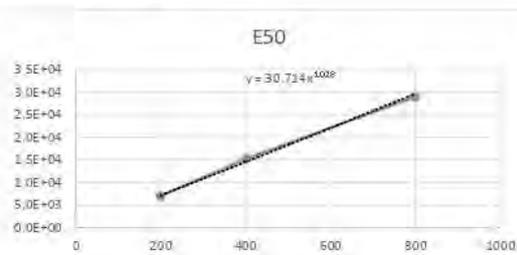
50% Δσ	667	366.5	199.5
ε1	0.0231	0.0240	0.0287
E_50	28914.3	15251.4	6953.5

Determinación del parametro "m":

σ3	E50
200	6953.5
400	15251.4
800	28914.3

m=	1.0280
----	--------



Seleccionamos un estado de esfuerzos que se use como referencia, la bibliografía recomienda un sigma3 = 100 Kpa o una mayor a este:

σ3 ref:	100	Kpa
E50 ref:	15251.4	Kpa

Determinación del parametro "Eedo":

El comportamiento esfuerzo-deformación no es sensible al módulo edométrico, por tanto se puede estimar como una aproximación como el 85% del valor E50 ref:

Eedo_50:	12963.7	Kpa
----------	---------	-----

Determinación del parametro "Eur":

Se esta considerando como 4 veces el E50\_ref:

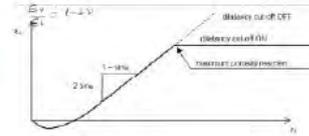
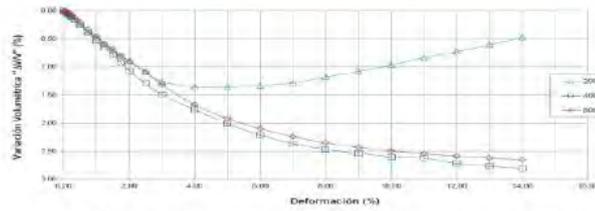
Eur:	61005.5	Kpa
------	---------	-----



## Calibración del modelo constitutivo Hardening Soil

Manual de uso Plaxis 2D (2018)

### Determinación del parámetro "vur" y "Ψ":



$\sigma_3$ :	800	400	200
$\Delta V/V_0$ :	0.0266	0.028	0.0142
70% Ans	0.01862	0.0196	0.00994
$\epsilon_1$ :	0.046	0.048	0.023
70% Ans/ $\epsilon_1$	0.404782609	0.408333333	0.432173913
vur	0.30	0.30	0.28

Poisson = **0.29**

$\Psi$  = **0.00**

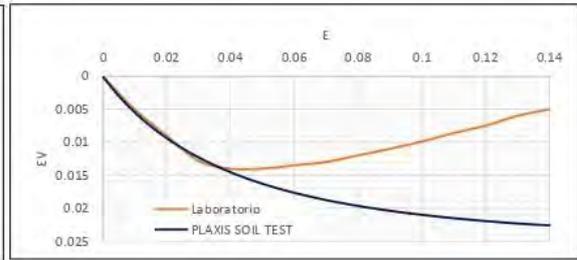
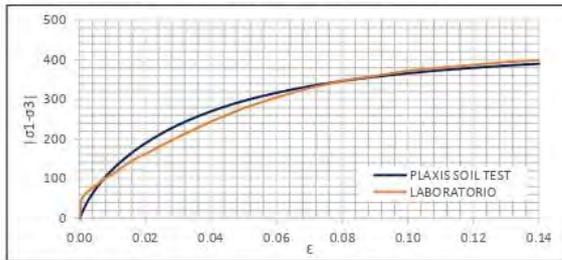
La dilatación comúnmente se asume como 0, por problemas en largas deformaciones.

### TABLA DE RESUMEN :

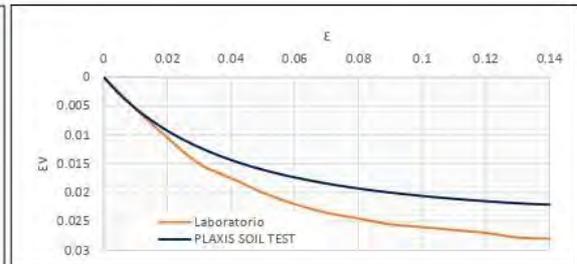
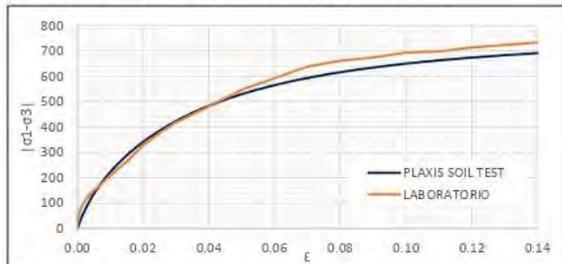
<b>E50</b>	15251.4
<b>Eedo</b>	12963.7
<b>Eur</b>	61005.5
<b>m</b>	1.00

<b>vur</b>	0.29
<b>Ψ</b>	0.00
<b>c</b>	29.5
<b>φ</b>	26

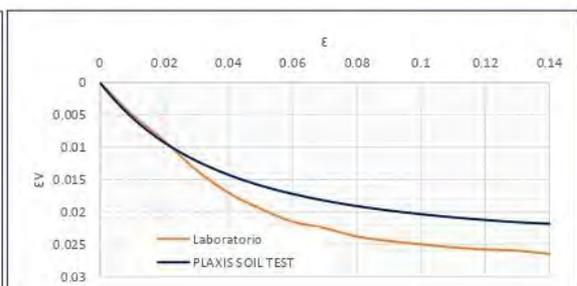
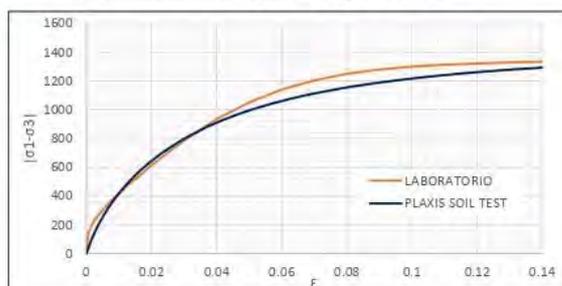
### Calibración del Modelo para una carga de 200 kPa:

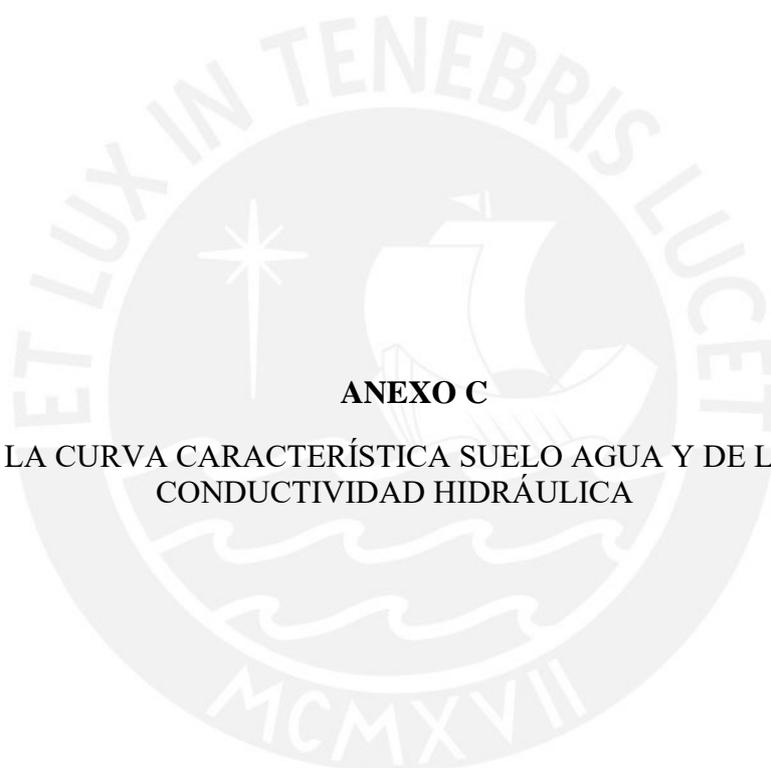


### Calibración del Modelo para una carga de 400 kPa:



### Calibración del Modelo para una carga de 800 kPa:





**ANEXO C**

**AJUSTE DE LA CURVA CARACTERÍSTICA SUELO AGUA Y DE LA FUNCIÓN DE  
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA**

## Ajuste de curva característica suelo agua SWCC

Van Genuchten & Mualem (1976)

Formulaciones:

$$g_c = \frac{1 - g_n}{g_n}$$

$$S = S_{res} + (S_{sat} - S_{res}) [1 + (g_c \psi)^{g_n}]^{g_r}$$

$$K_r = S_{ef}^{g_r} [1 - (1 - S_{ef}^{g_r})^{-1/g_c}]^2 > 10^{-4}$$

Donde:  
 g<sub>c</sub>-ga-g<sub>l</sub>: Parámetros que dependen del terreno  
 S: Grado de saturación  
 S<sub>at</sub>: Grado de saturación residual  
 S<sub>res</sub>: Grado de saturación del agua retenida  
 ψ: Succión  
 K<sub>r</sub>: Permeabilidad relativa  
 S<sub>ef</sub>: Grado de saturación efectivo

<b>Sres</b>	<b>Ssat</b>	<b>gn</b>	<b>ga</b>	<b>gc</b>	<b>gl</b>	<b>R2</b>
0.05	1	1.209	1.4	-0.1728701	0.5	0.98

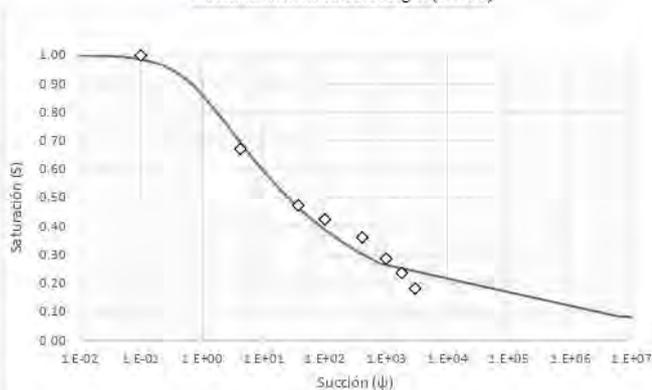
Cálculo de las permeabilidades relativas:

ψ	S	S <sub>ef</sub>	K <sub>r</sub>
0.01	0.99906102	0.9990116	0.34867661
0.02	0.99783878	0.99772503	0.277864938
0.03	0.99648854	0.99630372	0.236117642
0.04	0.99505353	0.99479318	0.206818393
0.05	0.99355663	0.9932175	0.184502514
0.06	0.99201241	0.99159201	0.166665049
0.07	0.99043112	0.9899275	0.151942905
0.08	0.98882042	0.98823202	0.139510332
0.09	0.98718625	0.98651184	0.128828634
0.1	0.9855334	0.984772	0.119526724
0.2	0.96860349	0.96695104	0.065926444
0.3	0.95193044	0.94940047	0.042167524
0.4	0.93609178	0.93272818	0.029146419
0.5	0.9212445	0.91709948	0.021198054
0.6	0.9073953	0.90252137	0.015999509
0.7	0.89449248	0.88893945	0.012426985
0.8	0.88246347	0.87627734	0.009877067
0.9	0.87123128	0.86445398	0.008001078
1	0.86072159	0.85339115	0.006586054
2	0.78327463	0.77186803	0.00160998
3	0.73433354	0.7203511	0.000650906
4	0.69943807	0.68361902	0.000333765
5	0.67269631	0.6554698	0.000196651
6	0.65121339	0.6328562	0.000126923
7	0.63337426	0.61407817	0.0001
8	0.61819385	0.59809879	0.0001
9	0.60503057	0.58424271	0.0001
10	0.59344498	0.57204735	0.0001
20	0.52200117	0.49684333	0.0001
30	0.48416067	0.45701123	0.0001
40	0.4590501	0.43057905	0.0001
50	0.44053329	0.41108767	0.0001
60	0.42600708	0.39579693	0.0001
70	0.41413639	0.38330147	0.0001
80	0.40415014	0.37278962	0.0001
90	0.3955649	0.36375253	0.0001
100	0.38805875	0.35585131	0.0001
200	0.34253985	0.30793669	0.0001
300	0.31879051	0.28293738	0.0001
400	0.30311425	0.26643605	0.0001
500	0.29158549	0.25430051	0.0001
600	0.2825559	0.24479568	0.0001
700	0.27518487	0.2370367	0.0001
800	0.26898864	0.23051436	0.0001
6000000	0.08392729	0.03571294	0.0001
7000000	0.08285166	0.0345807	0.0001
8000000	0.08194751	0.03362896	0.0001
9000000	0.08117067	0.03281123	0.0001
10000000	0.08049178	0.03209662	0.0001

Cálculo del error de Ajuste de la curva :

ψ	S	Scal	e	y-yprom
0.1	0.999	0.9855334	0.00018135	0.29729756
4.2	0.6708	0.69943807	0.00082014	0.0471107
37	0.4732	0.48416067	0.00012014	0.0003783
100	0.4239	0.38805875	0.0012846	0.00089102
410	0.3605	0.30311425	0.00329312	0.00869556
1000	0.2857	0.25901192	0.00071225	0.0282408
1800	0.2356	0.25901192	0.00054812	0.04758942
2980	0.1813	0.23082667	0.00245289	0.074229
Promedio	0.45375	Suma	0.00941261	0.50443238
		R2		0.98

Curva característica Suelo Agua (SWCC)



Función de Conductividad Hídrica Relativa

