

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS TEÓRICO-PRÁCTICO DEL ASENTAMIENTO
POR CONSOLIDACIÓN DE UN SUELO RESIDUAL BAJO
UNA PRESA DE RELAVES**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Franco Orlando Bravo González

ASESOR:

Guillermo José Zavala Rosell

Lima, octubre, 2025

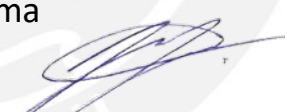
Informe de Similitud

Yo, **Guillermo José Zavala Rosell**, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis titulada **ANÁLISIS TEÓRICO-PRÁCTICO DEL ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN DE UN SUELO RESIDUAL BAJO UNA PRESA DE RELAVES**, del autor **Franco Orlando Bravo González**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 9%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 07/10/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, 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, 7 de octubre de 2025

| | |
|--|---|
| Apellidos y nombres del asesor: Zavala Rosell, Guillermo José | |
| DNI: 07885623 | Firma  |
| ORCID: 0000-0002-2077-5001 | |

Resumen

El presente trabajo de tesis desarrolla un problema de la ingeniería geotécnica relacionado con la construcción de estructuras de contención de relaves sobre suelos tropicales. Dichos suelos, que se caracterizan por su alto nivel de compresibilidad, tienden a sufrir grandes deformaciones en el tiempo, lo que puede comprometer la integridad de las estructuras construidas sobre estos y, en escenarios críticos, llevar a una falla de la estructura. La necesidad de comprender y proyectar los asentamientos en suelos tropicales resulta de gran importancia para garantizar el correcto funcionamiento de estas estructuras.

Con el objetivo de contribuir en la solución del mencionado problema, el presente trabajo realizó un estudio comparativo entre los asentamientos calculados teóricamente mediante el uso de las ecuaciones de asentamiento de Terzaghi y las mediciones de asentamiento reales obtenidas de las lecturas de placas de asentamiento instaladas en una presa de relaves construida en una zona tropical de Ecuador. El presente análisis consideró tiempos de consolidación, lo que permitió evaluar la aplicabilidad y precisión de las ecuaciones teóricas frente al comportamiento observado en campo. Este enfoque combinó la teoría y la práctica para evaluar el desempeño del método teórico en condiciones reales de suelos tropicales.

Los resultados obtenidos muestran que el método teórico posee un gran grado de precisión cuando se aplica a suelos finos, permitiendo estimar con precisión los asentamientos. Sin embargo, se evidenció una gran pérdida de precisión al aplicarse sobre suelos sedimentarios con presencia de gravas y bolones. Estas conclusiones permiten delimitar la aplicabilidad de las ecuaciones empleadas a suelos tropicales finos.

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| Resumen | i |
| Lista de Figuras | iii |
| Lista de Tablas | iv |
| CAPÍTULO 1. GENERALIDADES | 1 |
| 1.1. Introducción..... | 1 |
| 1.2. Planteamiento del problema | 2 |
| 1.3. Justificación..... | 3 |
| 1.4. Objetivos..... | 4 |
| 1.5. Metodología..... | 5 |
| 1.6. Alcance | 5 |
| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO | 7 |
| 2.1. Asentamiento | 7 |
| 2.1.1. Definición y tipos de asentamiento | 7 |
| 2.1.2. Consolidación primaria..... | 8 |
| 2.2. Ensayo de consolidación por odómetro | 9 |
| 2.3. Cálculo del asentamiento por consolidación | 12 |
| 2.4. Valor de influencia para carga de terraplén..... | 15 |
| 2.5. Porcentaje de consolidación | 16 |
| 2.6. Instrumentación | 17 |
| CAPÍTULO 3. MARCO EMPÍRICO | 18 |
| 3.1. Presentación de El Proyecto | 18 |
| 3.2. Condiciones climatológicas..... | 19 |
| 3.3. Estratigrafía | 21 |
| 3.4. La Presa | 25 |
| 3.4.1. Las etapas de la presa y su configuración..... | 28 |
| 3.5. Instrumentos | 29 |
| CAPÍTULO 4. ANALISIS DEL PROYECTO | 33 |
| 4.1. Medición del asentamiento en campo | 33 |
| 4.2. Medición del asentamiento teórico..... | 38 |
| 4.3. Discusión de resultados | 55 |
| CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES | 56 |
| BIBLIOGRAFÍA | 58 |
| ANEXO A: PERFILES ESTRATIGRAFICOS DE EL PROYECTO | 60 |

| | |
|---|----|
| ANEXO B: CERTIFICADOS DE LOS ENSAYOS EMPLEADOS | 63 |
| ANEXO C: CÁLCULOS PARA LA ESTIMACIÓN DE RANGOS | 72 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1-1 Formación del suelo residual y sedimentario. Fuente: (Adaptado de Wesley 2010) | 2 |
| Figura 1-2 La consolidación unidimensional de Terzaghi y la situación bajo una fundación superficial (Adaptado de Wesley 2010)..... | 3 |
| Figura 2-1 Acomodo del odómetro de anillo flotante (Adaptado de Zegarra, 2016)..... | 10 |
| Figura 2-2 Curva de e vs $\log \sigma$ (FCEIA, sf)..... | 11 |
| Figura 2-3 Método grafico para identificar el esfuerzo de pre consolidación (Das, 2012)..... | 13 |
| Figura 2-4 <i>Variación volumétrica por asentamiento de consolidación primaria</i> (Das, sf)..... | 13 |
| Figura 2-5 Esfuerzo generado por un terraplén (Das, 2012)..... | 15 |
| Figura 2-6 Esfuerzo generado por un terraplén (FCEIA, 2011)) | 16 |
| Figura 3-1 Foto de La Presa (KCB, 2021) | 18 |
| Figura 3-2 Localización de las zonas tropicales y áreas tibias, en las cuales los suelos residuales son muy comunes (R.Robles adaptado de Suarez, 2009)..... | 19 |
| Figura 3-3 Precipitación mensual (Adaptado de KCB, 2022) | 20 |
| Figura 3-4 Precipitación máxima diaria mensual (Adaptado de KCB, 2022) | 20 |
| Figura 3-5 Precipitación diaria promedio y temperatura diaria promedio (Adaptado de KCB, 2022) . | 21 |
| Figura 3-6 Rosa de vientos de La Presa (Adaptado de KCB, 2022)..... | 21 |
| Figura 3-7 Plano de las exploraciones realizadas resaltando las pertenecientes a la última campaña (Adaptado de KCB, 2022) | 22 |
| Figura 3-8 Registro de una perforación en La Presa (Adaptado de KCB, 2022)..... | 23 |
| Figura 3-9 Recuperación de una perforación de El Proyecto (KCB, 2022)..... | 23 |
| Figura 3-10 Perfil estratigráfico de una sección de La Presa (Adaptado de KCB, 2022)..... | 23 |
| Figura 3-11 Distribución de los puntos de descarga de relaves (Adaptado de KCB, 2022)..... | 26 |
| Figura 3-12 Sección típica de La Presa (Adaptado de Robles, 2021)..... | 26 |
| Figura 3-13 Disposición de las "zonas" en La Presa (KCB, 2022)..... | 27 |
| Figura 3-14 Usos granulométricos permitidos para cada zona (KCB, 2022) | 27 |
| Figura 3-15 Instalación de un piezómetro en La Presa (KCB, 2022) | 29 |
| Figura 3-16 Instalación de un inclinómetro en La Presa (KCB, 2022)..... | 30 |
| Figura 3-17 Hito Topográfico instalado en El Proyecto (Robles 2022) | 30 |
| Figura 3-18 Instalación de una placa de asentamiento en La Presa (KCB, 2022) | 31 |
| Figura 3-19 Plano de La Presa con la instrumentación instalada (R. Robles, 2022) | 32 |
| Figura 4-1 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-4 (Fuente propia) | 33 |
| Figura 4-2 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-5 (Fuente propia) | 34 |
| Figura 4-3 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-6 (Fuente propia) | 34 |
| Figura 4-4 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-7 (Fuente propia) | 35 |
| Figura 4-5 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-8 (Fuente propia) | 35 |
| Figura 4-6 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-9 (Fuente propia) | 36 |
| Figura 4-7 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-10 (Fuente propia) | 36 |
| Figura 4-8 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-11 (Fuente propia) | 37 |
| Figura 4-9 Resultados del ensayo de consolidación por odómetro para el saprolito superior (Fuente propia)..... | 38 |
| Figura 4-10 Resultados del ensayo de consolidación por odómetro para el saprolito intermedio (Fuente propia)..... | 39 |

| | |
|--|----|
| Figura 4-11 Resultados del ensayo de consolidación por odómetro para el saprolito inferior (Fuente propia)..... | 39 |
| Figura 4-12 Resultados del ensayo de consolidación por odómetro para el coluvial (Fuente propia).. | 39 |
| Figura 4-13 Resultados del ensayo de consolidación por odómetro para las muestras representativas (Fuente propia)..... | 41 |
| Figura 4-14 Estimación del esfuerzo de pre consolidación para la M1 por el método de Casagrande (Fuente propia)..... | 42 |
| Figura 4-15 Estimación del esfuerzo de pre consolidación para la M2 por el método de Casagrande (Fuente propia)..... | 42 |
| Figura 4-16 Estimación del esfuerzo de pre consolidación para la M3 por el método de Casagrande (Fuente propia)..... | 43 |
| Figura 4-17 Estimación del esfuerzo de pre consolidación para la M4 por el método de Casagrande (Fuente propia)..... | 43 |
| Figura 4-18 Estimación del esfuerzo ejercido por la presa como dos terraplenes (Fuente propia) | 44 |
| Figura 4-19 Estimación del esfuerzo ejercido por la presa sobre el SP-04 como tres terraplenes (Fuente propia)..... | 46 |

Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 3-1 Descripción general de los estratos de fundación (Adaptado de KCB, 2022)..... | 24 |
| Tabla 3-2 Configuración de La Presa (Adaptado de Robles, 2021)..... | 28 |
| Tabla 4-1 Resumen de las mediciones de las placas de asentamiento (Fuente propia) | 37 |
| Tabla 4-2 Ubicación de las muestras representativas (Fuente propia)..... | 40 |
| Tabla 4-3 Resultados de ensayos de consolidación para muestras representativas (Fuente propia)..... | 40 |
| Tabla 4-4 Resultados de ensayos índices para muestras representativas (Fuente propia) | 41 |
| Tabla 4-5 Resultados del esfuerzo de pre consolidación, coeficiente Cc y coeficiente Cr para las muestras representativas (Fuente propia)..... | 44 |
| Tabla 4-6 Estratigrafía debajo de los platos de asentamiento para los cuales se hará una estimación (Fuente propia)..... | 45 |
| Tabla 4-7 Características de los terraplenes (Fuente propia) | 46 |
| Tabla 4-8 Estimación del esfuerzo sobre el SP-04 debido a la presa de relaves (Fuente propia)..... | 47 |
| Tabla 4-9 Análisis de asentamiento – SP-04 (Fuente propia)..... | 48 |
| Tabla 4-10 Análisis de asentamiento – SP-05 (Fuente propia)..... | 49 |
| Tabla 4-11 Análisis de asentamiento – SP-06 (Fuente propia)..... | 50 |
| Tabla 4-12 Análisis de asentamiento – SP-07 (Fuente propia)..... | 51 |
| Tabla 4-13 Análisis de asentamiento – SP-08 (Fuente propia)..... | 52 |
| Tabla 4-14 Porcentaje de consolidación de estratos compresibles para cada instrumento (Fuente propia)..... | 54 |
| Tabla 4-15 Comparación de resultados (Fuente propia)..... | 55 |

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

Una presa de relaves es una estructura formada por distintos componentes y sistemas, los cuales varían, entre algunos aspectos, con las condiciones y necesidades del proyecto. Estas variaciones pueden ir desde la impermeabilización del suelo hasta la geometría adoptada por la estructura debido a las condiciones geotécnicas y topográficas. Las presas de relaves son parte fundamental de los procesos extractivos, ya que son el depósito de los desechos generados por dicha actividad. Las presas, también involucran un componente de ingeniería, más allá de la estructura en sí, ya que involucra diversos equipos de especialistas los cuales se encargan de monitorear, controlar y diseñar la estructura, así como los sistemas que la componen de manera permanente y su entorno. Estas estructuras suelen ser diseñadas para permanecer en el tiempo, ya que, dependiendo de la naturaleza de los relaves, algunas veces estos no pueden ser tratados y es necesario que permanezcan aislados por su alto nivel de contaminación que supondría liberarlos al medio ambiente. Una presa de relaves se encuentra expuesta a distintos peligros, es decir que se encuentra expuesta a distintos factores propios que pudiesen comprometer la integridad de la estructura, como lo son los asentamientos, infiltraciones, desplazamientos, entre otros. Además, los peligros no solo se limitan a la estructura, sino también incluyen a su entorno. Este entorno puede incluir estructuras montañosas circundantes, cuencas de captación y, más influyente aun, el suelo sobre el cual se construirá la estructura. La labor de un ingeniero es minimizar la probabilidad de ocurrencia de estos peligros, minimizar el riesgo. Para este propósito y conociendo las características de los materiales, se utilizan las teorías propuestas por diversos autores con el fin de anticipar los peligros y la magnitud de estos para ser considerados al momento de realizar el diseño. El objetivo del presente trabajo es proponer conclusiones relevantes que permitan desarrollar recomendaciones para una óptima estimación de los asentamientos por consolidación en suelos cuyas características se asemejen a las del caso de estudio. Dichas conclusiones y recomendaciones serán elaboradas a partir de la comparación de los asentamientos teóricos con los asentamientos medidos en un suelo, principalmente fino, bajo una presa de relaves de un proyecto en Ecuador.

1.2. Planteamiento del problema

En el mundo, de acuerdo con Burton (1998) hay estructuras que han sido construidas sobre suelo residual tropical de grano fino y aunque se considere un suelo relativamente “bueno”, estos casos son estudiados y discutidos. Por ello, es importante empezar por la definición de un suelo residual.

Burton (1998), en su reporte de master en ingeniería, cita a Blight para la definición de un suelo residual, el cual puede describirse como un material similar al suelo derivado de la meteorización y descomposición de la roca que no ha sido transportada desde su ubicación original.

Es decir, un suelo residual es aquel que se ha mantenido quieto desde su origen mientras que un suelo sedimentario es aquel que surge del transporte del primero de estos, tal como se explica en la Figura 1-1.

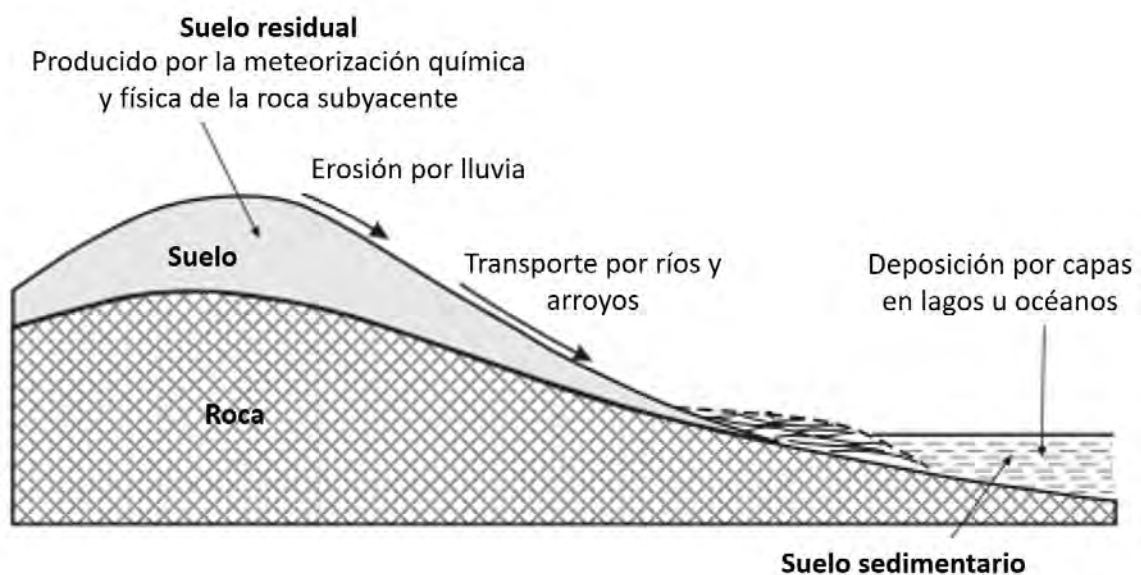


Figura 1-1 Formación del suelo residual y sedimentario. Fuente: (Adaptado de Wesley 2010)

Según Das (2012), los suelos residuales suelen aparecer en lugares donde la intensidad del intemperismo es mayor que la velocidad de transporte del material intemperizado debido al bajo potencial de arrastre de los agentes de transporte.

Dependiendo del proceso de formación de cada suelo, estos adquieren distintas propiedades y características, lo que significa que se comportan de manera distinta ante diferentes sollicitaciones.

Además, Wesley (2010) afirma que las mayores diferencias entre el comportamiento de un suelo residual con el comportamiento de un suelo sedimentario son aquellas que se relacionan con sus características de consolidación, siendo el suelo sedimentario el que presenta una mayor consolidación natural y por ende sufre menores asentamientos. Esto ocurre debido a que un suelo sedimentario se originó luego que el material se depositará constantemente en capas sobre si aumentando la carga sobre este al pasar de los años, permitiendo de dicho modo un mayor acomodamiento y reduciendo los vacíos entre sus partículas.

1.3. Justificación

La conocida teoría de consolidación de Terzaghi, como indico Wesley (2010) no es aplicable para fundaciones finitas ubicadas en estratos profundos, lo cual suele ser el caso de los suelos residuales, ya que ni el asentamiento ni el drenaje ocurren de manera estrictamente vertical, sino de manera radial, tal como se compara en la Figura 1-2.

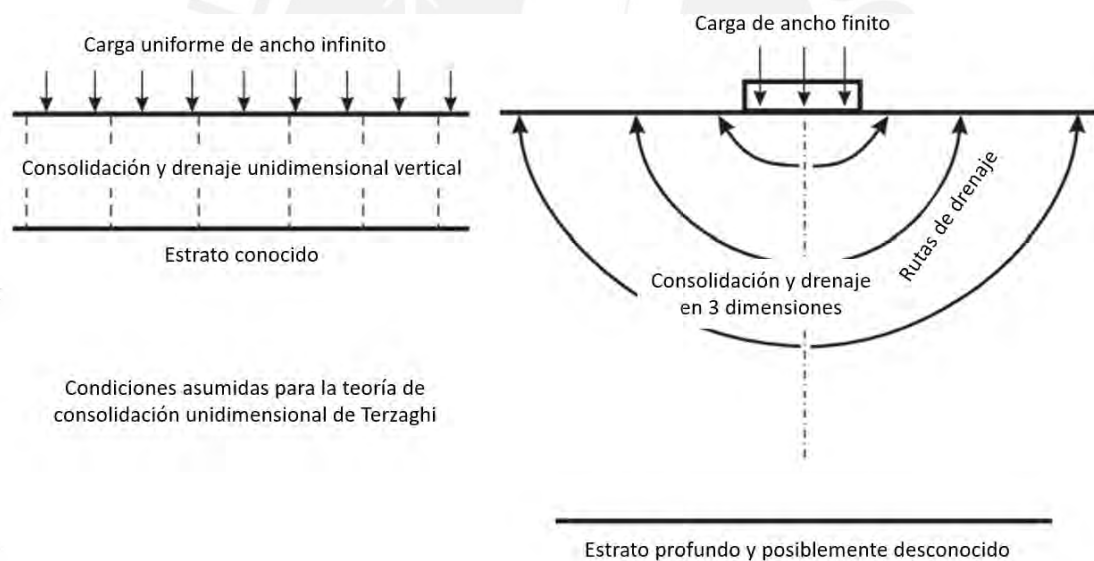


Figura 1-2 La consolidación unidimensional de Terzaghi y la situación bajo una fundación superficial (Adaptado de Wesley 2010)

Además, Wesley (2010) añade que todo el conocimiento que poseemos sobre el suelo convencional no posee ninguna relevancia sobre el suelo residual y lo que es más, no hay ningún método ordenado marco para caracterizar el comportamiento de la consolidación de un suelo residual.

Finalmente, según Das (2012), un ingeniero debe comprender los tipos de suelo de fundación y sus características, ya que las teorías de mecánica de suelo suelen comprender

condiciones idealizadas mientras los suelos realmente son muy heterogéneos. Un ingeniero debe realizar una evaluación inteligente de las condiciones y parámetros del suelo. El buen juicio profesional constituye una parte esencial de la ingeniería y este se adquiere solo con la práctica.

Ya que la consolidación supone un problema para los suelos residuales y que su modelamiento no suele ser representativo en la realidad, se expone la importancia de realizar un comparativo, para el asentamiento y consolidación, entre el calculado de manera teórica y el ocurrido en una presa de relaves en Ecuador.

1.4. Objetivos

Objetivo general:

El objetivo general es evaluar la precisión de la estimación de los asentamientos de un suelo residual bajo una presa de relaves utilizando teoría de consolidación.

Objetivos específicos:

- Determinar la metodología de análisis revisando bibliografía relacionada con asentamientos por consolidación en suelos residuales de estructuras geotécnicas.
- Recopilar y resumir los parámetros del suelo del caso de estudio necesarios para la estimación de los asentamientos por consolidación, así como las lecturas de los asentamientos de la instrumentación existente.
- Calcular los asentamientos por consolidación en el tiempo del suelo del caso de estudio bajo la presa de relaves del proyecto analizado.
- Realizar un análisis comparativo entre los resultados del cálculo teórico y los valores medidos en campo.

1.5. Metodología

La metodología se resume en lo siguiente: Revisión, recopilación y resumen de información disponible, la cual incluye ensayos avanzados de laboratorio, características de la presa de relaves, lecturas históricas de los platos de asentamiento instalados en fundación y revisión de bibliografía afín; todo esto con el fin de caracterizar el suelo y los esfuerzos actuantes sobre este. Luego, se analizan los asentamientos del suelo mediante el método multicapa empleando las ecuaciones propuestas por distintos autores. Una vez realizado esto, se evalúan los resultados en términos de asentamiento y porcentajes de consolidación de acuerdo con el tiempo transcurrido para compararlos con las lecturas obtenidas en los platos de asentamientos y poder discernir si las ecuaciones propuestas permiten estimar los asentamientos de manera precisa. En el caso que se concluya que las ecuaciones no estiman los asentamientos de manera precisa, se identificarán las posibles fuentes de error y los parámetros que deben ser tomados en cuenta. Finalmente, se elaborarán las conclusiones más relevantes según lo obtenido y se expondrán algunas recomendaciones para aumentar la precisión de las ecuaciones en el cálculo de los asentamientos por consolidación en un suelo residual bajo una presa de relaves.

1.6. Alcance

Para lograr el objetivo del trabajo, se realizarán procesos intermedios, como el resumen de los resultados de los ensayos de consolidación de laboratorio y la recopilación de las lecturas registradas por los instrumentos instalados, con el fin de obtener los parámetros del suelo y los asentamientos con los que se compararán los cálculos. Mencionado esto, la tesis se limita a los siguientes alcances:

- Este análisis ha sido elaborado para el suelo residual del caso de estudio, bajo la presa de relaves del proyecto analizado.
- El procedimiento y metodología serán utilizados para realizar un análisis de asentamiento por consolidación primaria para suelos cohesivos y tiempos de consolidación, sin incluir otros tipos de asentamiento.

- Se limitará al tiempo correspondiente hasta el 18 de abril de 2022, tiempo que abarca los dos primeros recrecimientos de la presa de relaves y un periodo de operación previo al inicio del tercer recrecimiento.
- Se utilizará una recopilación de lecturas de los 5 platos de asentamiento con mayor registro histórico y que continúen operativos hasta la fecha de análisis. Asimismo, la elaboración de graficas de dichos registros.
- Los datos empleados en este trabajo son datos reales obtenidos de ensayos de laboratorio o de lecturas de instrumentos de un proyecto en particular. Estos datos no han sido alterados de ninguna forma para reducir las posibles fuentes de error al estimar los asentamientos. Cualquier otra referencia con respecto al origen de las muestras, laboratorios, geoposicionamiento o empresas involucradas han sido eliminadas por motivos contractuales de confidencialidad.
- Los resultados obtenidos en esta investigación están sujetos a las consideraciones y limitaciones tomadas para el análisis. Este trabajo no pretende reemplazar cualquier estudio realizado en el emplazamiento ni afirmar o negar tajantemente la precisión de las ecuaciones empleadas, ya que se realizó con fines aplicativos y de investigación. Esta tesis podría servir como punto de partida para futuras investigaciones si así se requiriese.
- Se formularán las conclusiones más relevantes en base a lo obtenido y se expondrán algunas recomendaciones finales.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Asentamiento

2.1.1. Definición y tipos de asentamiento

Barrios Rosales (2020), define el asentamiento como aquel fenómeno en el cual ocurre la reducción parcial de un volumen de suelo provocado por cargas aplicadas sobre este o flujos que circulan a través de él. Es decir que el asentamiento es un efecto que se produce al aplicar diversas cargas o flujos a través de un suelo ocasionando la pérdida de su volumen.

Das (2012) complementa que el asentamiento proviene de la compresión del suelo que puede ser causado por la deformación, el reacomodo y/o por la expulsión de agua y aire de los vacíos de las partículas del suelo. Además, divide los tipos de asentamiento en tres amplias categorías:

1. Asentamiento inmediato, ocurre por la deformación elástica en cualquier suelo sin variación en el volumen de agua.
2. Asentamiento por consolidación primaria, ocurre por la variación de esfuerzos efectivos que tiene por consecuencia una variación volumétrica por la expulsión de agua de los poros intersticiales en suelos cohesivos saturados.
3. Asentamiento por consolidación secundaria, ocurre por el ajuste plástico en la estructura de suelos cohesivos luego del asentamiento por consolidación primario.

Esto quiere decir que, además de la aplicación de cargas, existen otros factores que van a determinar el tipo de asentamiento que sufra el suelo. Esto dependerá de su porcentaje de saturación, su granulometría, densidad e índice de vacíos.

El presente trabajo de investigación se centrará en los asentamientos por consolidación primaria, que son los que gobernarán los asentamientos en el caso de estudio debido a que es un suelo cohesivo y se encuentra saturado.

2.1.2. Consolidación primaria

De acuerdo con Das (2012), la presión de poros aumenta rápidamente cuando se incrementa el esfuerzo sobre un suelo que se encuentra saturado. Es decir que es el volumen de agua que se encuentra dentro de los vacíos del suelo son los que soportan dicho esfuerzo, ya que el volumen de agua se considera incompresible a comparación de la estructura del suelo. Das (2012) continúa, el agua atrapada en los poros empieza a drenar por la presión ejercida, originando una reducción del volumen del suelo conforme el agua se desplaza fuera de este, pero en suelos cohesivos de baja permeabilidad, dicho drenaje depende el tiempo. Esto permite establecer una relación entre cómo se va aplicando el esfuerzo sobre el suelo y como se va reduciendo los vacíos de este.

Bowles (1997), reconocido autor de diversos libros sobre el análisis de fundaciones afirma que, siempre que un suelo es sometido a nuevas cargas (ya sea por rellenos, otros suelos, presas, etc.) ocurrirán asentamientos. Estos, luego de pasar el rango elástico, se comportarán como una gran carga estática vertical que originará que las partículas de suelo llenen los vacíos originados por el desplazamiento del agua. Aquel fenómeno no es reversible por más que se retiren todas las cargas aplicadas de manera inicial. Finalmente añade que, los asentamientos, dependiendo del suelo, pueden ser muy insignificantes o ser lo suficientemente importantes como para requerir un procedimiento especial de construcción si se desea construir sobre este.

Tal como se mencionó anteriormente, los asentamientos del suelo son un fenómeno que puede (como puede que no) impactar sobre la construcción de una estructura. Teniendo en cuenta la gran inversión que representa la construcción de una presa de relaves y la fatídica consecuencia que supondría la falla de una de estas estructuras, es necesario analizar cualquier posible fenómeno que pueda tener algún tipo de efecto sobre la estructura y de esta forma anticiparse a lo que pueda ocurrir.

2.2. Ensayo de consolidación por odómetro

Para poder realizar modelos que permitan anticipar el comportamiento del suelo con cierta precisión, es necesario ensayar en laboratorio muestras de dicho suelo para poder analizar sus propiedades. Para poder modelar el asentamiento por consolidación, es necesario realizar un ensayo de consolidación mediante odómetro. Pero primero, hay que entender el contexto en el cual se desarrollará el ensayo. De acuerdo con Bowles (1997), hay ciertas asunciones que planteo Terzaghi a mediados de 1920s que deben cumplirse para que la teoría del asentamiento por consolidación tenga validez, estas son:

1. Es estrato de suelo que se consolidará es homogéneo.
2. El suelo se encuentra completamente saturado.
3. No se considera asentamiento elástico. La compresibilidad de las partículas del suelo o agua son insignificantes; sin embargo, el suelo, como estructura, sí es compresible.
4. Las deformaciones son infinitesimales.
5. El flujo de agua es unidimensional.
6. La compresión es unidimensional.
7. Se cumple la ley de Darcy ($v=ki$).
8. Las propiedades del suelo son constantes.
9. La relación entre el esfuerzo y la variación de vacíos es lineal.

Es decir, los puntos anteriormente mencionados deben cumplirse para que la teoría tenga validez. En caso uno no se cumpla, incurriría en posibles fuentes de error epistemológico que alterarían la precisión de los resultados.

La Sociedad Americana para Ensayos y Materiales, más conocida por sus siglas en inglés “ASTM”, es una sociedad que brinda especificaciones a seguir con el fin de estandarizar los métodos de ensayos. La especificación ASTM D2435/D2435M-11 (2011) “Métodos Estándar de Ensayo para las Propiedades de la Consolidación Unidimensional de Suelos Usando Cargas Incrementales”, resume el ensayo de consolidación como un método de ensayo para un espécimen de suelo en el cual se encuentra restringido lateralmente mientras se carga con esfuerzos axiales.

La Figura 2-1 muestra el acomodo del espécimen en un odómetro de anillo flotante. Existen dos tipos: de anillo flotante y anillo fijo, pero para ambos casos el arreglo es el mismo. El procedimiento, indicó Zegarra (2020), para el ensayo es:

- Medir las dimensiones y pesar el anillo.
- Tallar la muestra sobre el anillo y anotar el peso de la muestra con el anillo. La muestra debe corresponder a una muestra inalterada.
- Realizar el armado del odómetro colocando papel filtro y una piedra porosa en cada extremo de la muestra. Ajustar bien y colocarlo sobre el aparato de carga.
- Colocar el dial de deformación y saturar la muestra.
- Aplicar la carga y tomar lecturas de deformación a 6, 15 y 30 segundos, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 minutos, 1, 2, 4, 8, 24 horas.
- Repetir el proceso con las cargas designadas y luego descargar.
- Pesar la muestra al finalizar el ensayo y secar al horno para determinar el peso seco.

(p.70)

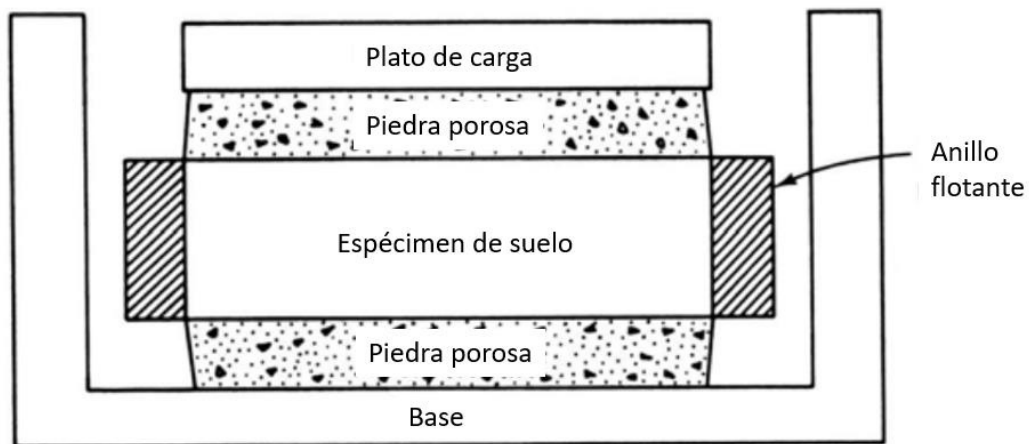


Figura 2-1 Acomodo del odómetro de anillo flotante (Adaptado de Zegarra, 2016)

Cada incremento de esfuerzo se mantiene hasta que la presión de poros se disipa, esto se asume con base en la interpretación de que la deformación se vuelve constante en el tiempo y que la muestra se encuentra 100% saturada. Las mediciones captan el cambio de altura del espécimen expuesto a diferentes cargas y esta data se utiliza para determinar una relación entre el esfuerzo axial y la deformación vertical, que deriva en la variación de

vacíos. Dicha relación se representa de manera grafica en una curva de e vs $\log \sigma$ como se muestra en la Figura 2-2.

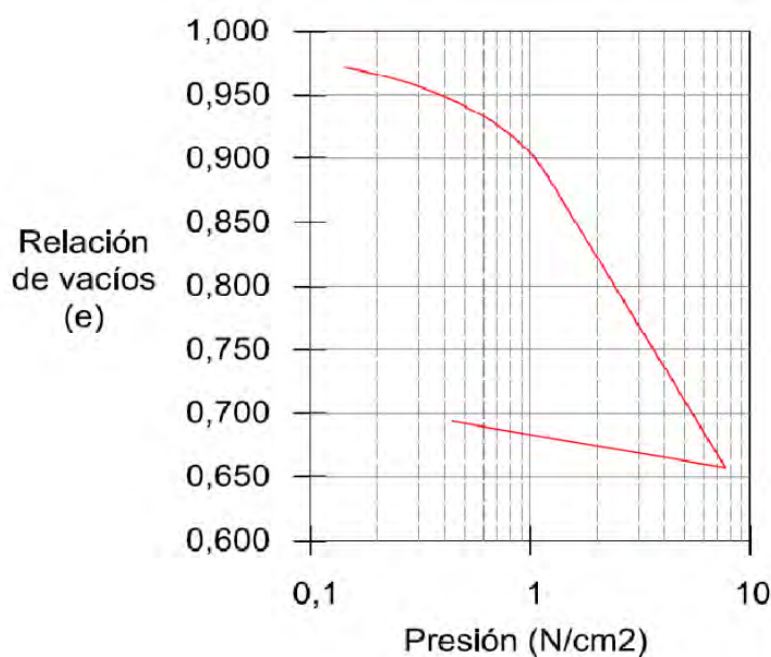


Figura 2-2 Curva de e vs $\log \sigma$ (FCEIA, sf)

Además, el ensayo posee ciertas limitaciones, las cuales son detalladas en la Guía de Laboratorio de Mecánica de Suelos PUCP. En dicha guía, Zegarra (2020) expone las siguientes limitaciones ante el método de ensayo:

- El método de ensayo no toma en cuenta las consolidaciones secundarias;
- El ensayo se realiza de manera unidimensional en el laboratorio, mas esto no es replicable en terreno natural;
- Las cargas incrementales que se aplican deben mantener una relación geométrica, puesto que se ha probado que ante cargas similares el suelo desarrolla cierta resistencia ante esta.

Según Day (2012), las fuentes de error más comunes en el ensayo de consolidación son que la muestra tenga vacíos o partículas de un mayor diámetro, que la carga aplicada no sea concéntrica, que el dial de medición no sea preciso, que no se siga la secuencia de mediciones y que el agua con la que se satura la muestra sea agua común en lugar de agua destilada. Además de los errores antes mencionados, Day cita a Rollings y Rollings (1996) para enumerar cinco errores más. Estos son: que se disturbe la muestra durante el tallado,

que la muestra no encaje en el anillo, que la permeabilidad de las piedras porosas sea muy baja (esto puede suceder si están obstruidas con algún material), que exista excesiva fricción entre la muestra y el anillo o que haya una errada medición de la muestra.

A pesar de ser un ensayo popular, agrega Day (2012), debido a la relativa simpleza de su ejecución, es evidente el cuidado que hay que tener al seguir correctamente los pasos, ya que las fuentes de error más comunes suelen darse debido al descuido en el laboratorio.

2.3. Cálculo del asentamiento por consolidación

Como se mencionó anteriormente, existen diferentes tipos de asentamientos. A pesar de que los de mayor impacto para suelos cohesivos de baja permeabilidad sean los causados por la consolidación primaria, estos suelos también sufren un asentamiento inmediato por deformación elástica. De acuerdo con Das (sf), en su historia geológica, un suelo ya ha estado sometido a cierta presión, que puede ser de mayor, menor o igual magnitud que la sobrecarga existente al momento del muestreo. Cuando el espécimen es sometido a un esfuerzo en laboratorio (lo que busca modelar la realidad a escala), se puede notar una tendencia de asentamiento diferente cuando el esfuerzo es inferior y superior al esfuerzo que ya ha experimentado, este esfuerzo histórico que el suelo ha experimentado se llama esfuerzo de pre consolidación. Con base en lo mencionado, se puede dividir a los suelos en dos categorías:

- Suelos normalmente consolidados, son aquellos donde el esfuerzo efectivo que se está aplicando es el máximo histórico que el suelo ha experimentado.
- Suelos pre consolidados, son aquellos donde el esfuerzo efectivo que se está aplicando es menor al histórico que el suelo ha experimentado.

De acuerdo con Das (2012), Casagrande en 1936, recomendó, a partir de la curva obtenida del ensayo de laboratorio de consolidación por odómetro, un método gráfico para poder estimar el esfuerzo de pre consolidación. Dicha metodología se muestra a continuación y se puede visualizar en la Figura 2-3:

1. Determinar visualmente un punto donde el radio de curvatura sea máximo, punto “a”.
2. Trazar una recta horizontal desde el punto “a”, recta “ab”.
3. Trazar una recta tangente a la curva que pase por el punto “a”, recta “ac”.
4. Trazar una recta bisectriz del ángulo formado entre las rectas “ab” y “ac”, recta “ad”.
5. Extienda la parte recta final de la curva, recta “gh”.

6. Donde se intersequen las rectas “ad” y “gh”, se encontrará el punto “f”. La abscisa de este punto es el esfuerzo de pre consolidación.

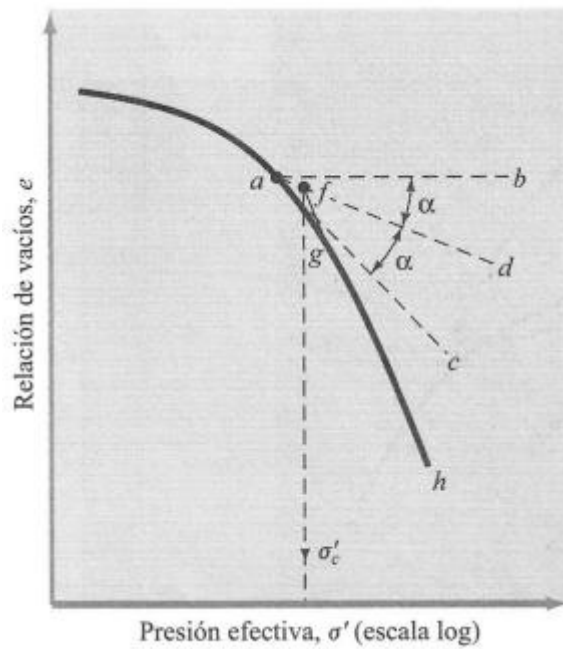


Figura 2-3 Método gráfico para identificar el esfuerzo de pre consolidación (Das, 2012)

Una vez identificado el esfuerzo de pre consolidación, si lo comparamos con el esfuerzo existente, podremos determinar si el suelo que estamos analizando corresponde a un suelo normalmente consolidado o un suelo pre consolidado.

Finalmente, con base en que el asentamiento causado por la consolidación primaria corresponde a una reducción del volumen de vacíos, se puede estimar este asentamiento por relaciones volumétricas, relaciones que se muestran en la Figura 2-4.

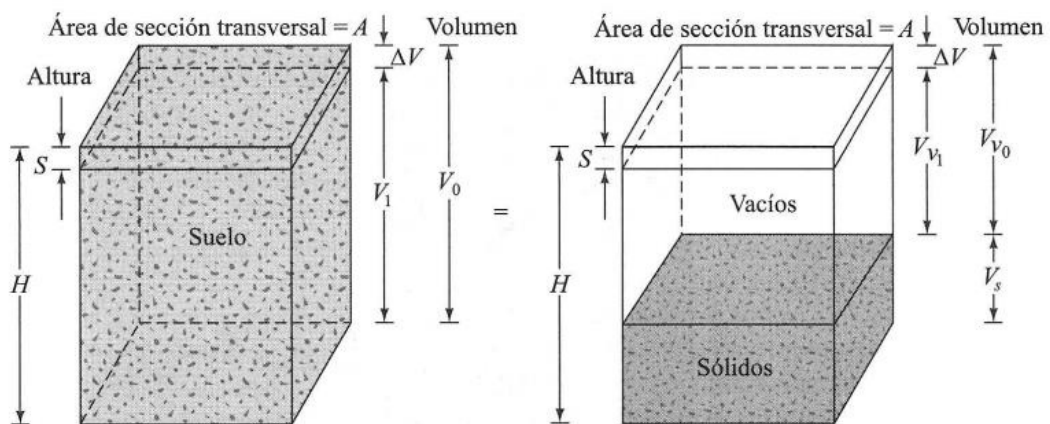


Figura 2-4 Variación volumétrica por asentamiento de consolidación primaria (Das, sf).

Además, si el suelo es normalmente consolidado, la guía del FCEIA (2011) describe la siguiente ecuación para la estimación del asentamiento por consolidación primaria:

$$S = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right)$$

Si el suelo es pre consolidado, Das (sf) describe las siguientes ecuaciones para la estimación del asentamiento por consolidación primaria:

Si $\sigma'_0 + \Delta\sigma' < \sigma'_p$, entonces

$$S = \frac{C_r H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right)$$

Si $\sigma'_0 + \Delta\sigma' > \sigma'_p$, entonces

$$S = \frac{C_r H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_0} \right) + \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_p} \right)$$

Donde, para ambos casos,

S = Asentamiento total del suelo en un tiempo infinito

H = Altura del suelo

e_0 = Vacíos inicial.

C_c = Índice de compresibilidad.

C_r = Índice de recompresión.

σ'_0 = Esfuerzo efectivo actual.

σ'_p = Esfuerzo de pre consolidación.

$\Delta\sigma'$ = Variación de esfuerzo efectivo.

Finalmente, de acuerdo con la guía del FCEIA (sf), los índices de compresibilidad y recompresión se calculan de la curva de consolidación como la pendiente del primer tramo y la pendiente del segundo tramo respectivamente.

2.4. Valor de influencia para carga de terraplén

Como se mencionó en subcapítulos anteriores, el asentamiento por consolidación ocurre por efecto de cargas, tanto internas (el peso propio del suelo) como externas (sobrecargas). El suelo del caso de estudio se encuentra bajo una presa de relaves, lo que representa una importante sobrecarga. Debido a que el bulbo de presiones se va disipando con la profundidad, es necesario estimar la carga que soporta el suelo a cierta profundidad por la sobrecarga de la estructura.

Para esto, Das (2012), basándose en los valores de influencia de Osterberg (1957) para un terraplén, adaptó un conjunto de ecuaciones para calcular el esfuerzo a cierta profundidad bajo un terraplén cuyas variables se muestran en la Figura 2-5.

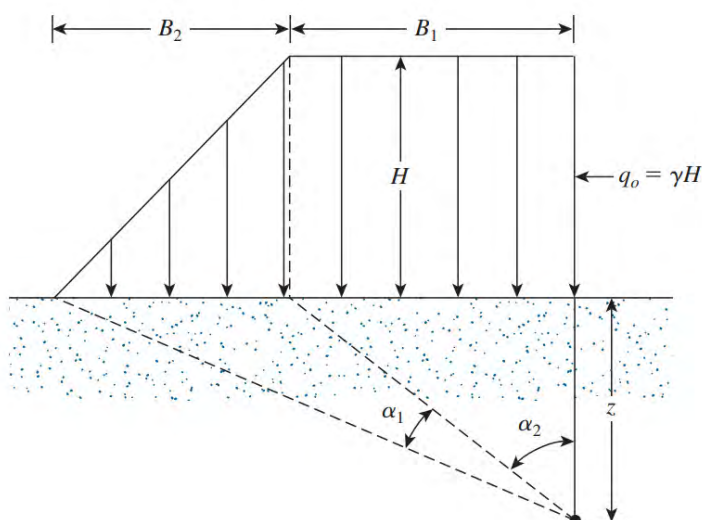


Figura 2-5 Esfuerzo generado por un terraplén (Das, 2012)

Donde

B_1 = Es la longitud de la parte rectangular en metros

B_2 = Es la longitud de la parte triangular en metros

q_0 = La magnitud de la carga distribuida (γH)

γ = Peso específico del suelo del terraplén en kN/m^3

H = Altura del terraplén

Z = Profundidad en metros donde se quiere evaluar el esfuerzo

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{B_1 + B_2}{z}\right) - \arctan\left(\frac{B_1}{z}\right)$$

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{B_1}{z}\right)$$

(α_1 y α_2 en radianes)

Con base en las anteriores variables, Das (2012) propone la siguiente ecuación:

$$\Delta\sigma = \frac{q_0}{\pi} \left[\left(\frac{B_1 + B_2}{B_2} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} (\alpha_2) \right]$$

2.5. Porcentaje de consolidación

Como se detalló anteriormente, la teoría de consolidación de Terzaghi se sustenta en diferentes asunciones de donde podemos resaltar que se considera que el flujo de agua es unidimensional y se cumple la ley de Darcy. De donde se establece, de acuerdo con Angelone (SF), el siguiente gráfico:

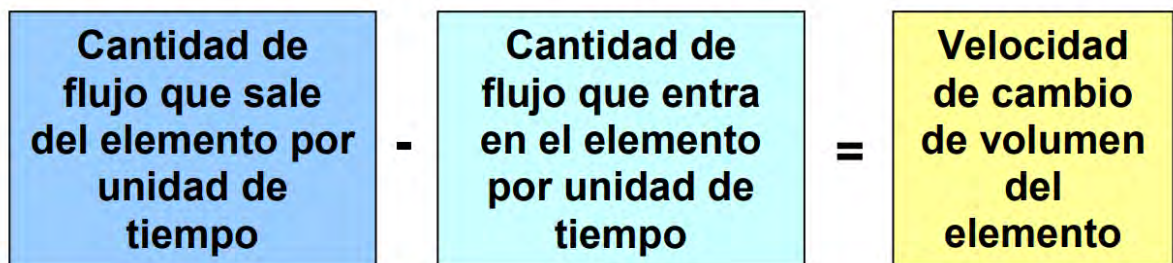


Figura 2-6 Esfuerzo generado por un terraplén (FCEIA, 2011)

Es decir que, el cambio volumétrico depende de la velocidad a la que puede fluir el agua del suelo, por lo que este no será instantáneo. Suelos de baja permeabilidad tardarán más tiempo en permitir que el flujo de agua salga de estos retrasando el proceso de consolidación. Asimismo, la distancia que debe recorrer el flujo para salir del estrato que se está consolidando influirá en el tiempo que tarde el proceso de consolidación, ya que se consolidará más rápido los sectores de suelo cercanos a la frontera drenante donde el flujo debe recorrer pequeñas distancias a los sectores intermedios donde el flujo debe recorrer mayores distancias.

Luego de un largo proceso de integración de las ecuaciones de Darcy, ley de continuidad de un flujo a través de un cuerpo, Day (2012) describe las ecuaciones propuestas por Terzaghi. Primero es necesario hallar el factor T de la siguiente ecuación

$$T = \frac{C_v t}{H_{dr}^2}$$

Donde,

C_v = Coeficiente de consolidación calculado en laboratorio

t = Tiempo en el que ocurre la consolidación

H_{dr} = Distancia que debe recorrer el flujo hasta el estrato drenante

Finalmente, dependiendo del factor “T”, se calcula el porcentaje de consolidación de la siguiente forma

Para $T < 0.2827$

$$U (\%) = \sqrt{\frac{4T}{\pi}}$$

Para $T > 0.2827$

$$U (\%) = 100 \left(1 - \frac{8}{\pi^2} e^{\left(\frac{-\pi^2}{4} T\right)} \right)$$

2.6. Instrumentación

De acuerdo con Day (2012), un tipo común de servicio constructivo desarrollado por ingenieros geotécnicos es la instalación de instrumentos de monitoreo. El objetivo usual de dichos instrumentos es medir el comportamiento de la estructura mientras está siendo construida para prevenir posibles riesgos y entender el comportamiento geotécnico de la presa. Para este fin, se tienen diversos instrumentos como:

- Piezómetros de tubo abierto, para medir los niveles freáticos.
- Piezómetros de cuerda vibrante, para medir la presión de poros.
- Inclínómetros, para medir las deformaciones horizontales.
- Placas de asentamiento, para medir las deformaciones verticales (asentamientos).

CAPÍTULO 3. MARCO EMPÍRICO

3.1. Presentación de El Proyecto

Para poder realizar la comparación entre el asentamiento por consolidación calculado de manera teórica mediante la teoría de Terzaghi y compararlo con asentamientos medidos en la realidad, se usará para la comparación una presa de relaves que, al momento de redactar la presente tesis, está siendo construida. Por motivos de confidencialidad con el cliente, se referirá a la presa de relaves como “La Presa” y al proyecto de manera más amplia como “El Proyecto”, ubicado al sureste de Ecuador. Este fue diseñado y está siendo supervisado por la empresa Klohn Crippen Berger S.A. (KCB). Se puede apreciar en la Figura 3-1 una foto tomada por el equipo de supervisión de KCB de La Presa.



Figura 3-1 Foto de La Presa (KCB, 2021)

Según KCB (2020), El Proyecto corresponde a una unidad minera de tipo subterránea dedicada a la extracción de oro y plata. El proyecto posee una vida útil de extracción de 17 años con una tasa de rendimiento del 17.5%. Esto generará relaves de tipo “Slurry” con un estimado de 38% de sólidos con una densidad de 1.1 toneladas por metro cúbico. Dichos relaves serán descargados y almacenados en una presa de relaves.

3.2. Condiciones climatológicas

De acuerdo con Robles (2021), ingeniero que formo parte del equipo de diseño, La Presa se encuentra ubicada en la región amazónica al norte de los Andes de Sudamérica, caracterizado por tener clima de selva lluviosa tropical. En promedio, la humedad es de 92%. Esto se puede notar en la Figura 3-2.

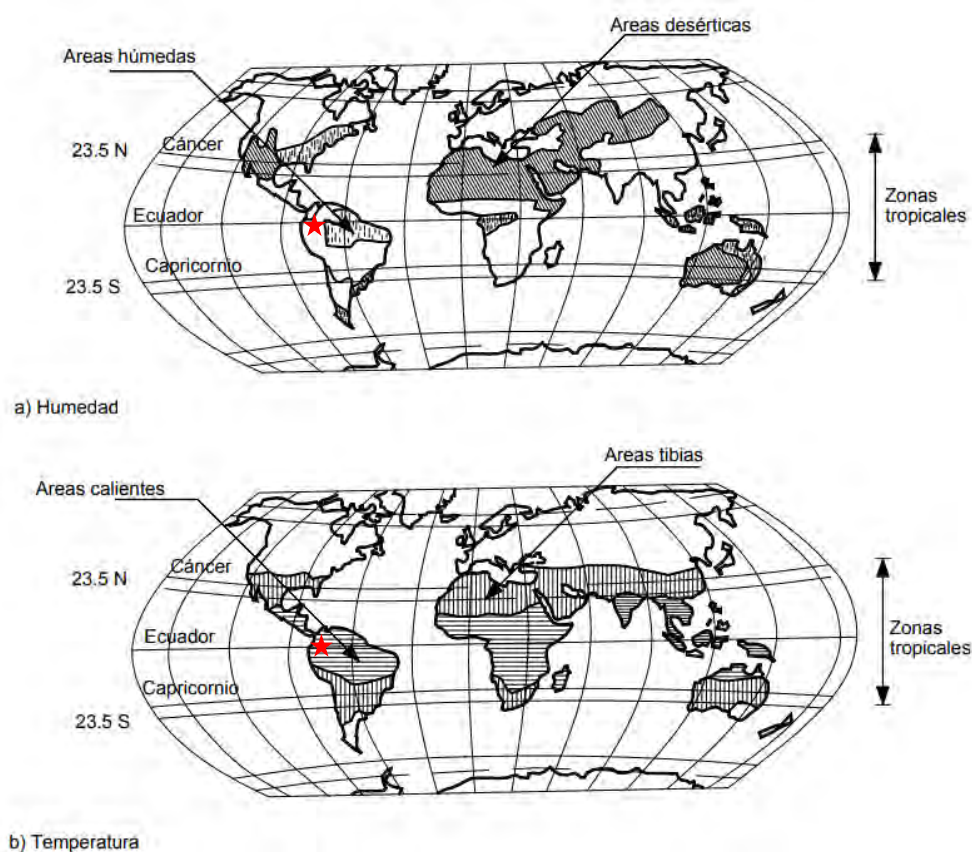


Figura 3-2 Localización de las zonas tropicales y áreas tibias, en las cuales los suelos residuales son muy comunes (R.Robles adaptado de Suarez, 2009)

Debido a la ubicación de El Proyecto, este se encuentra todo el año con fuertes lluvias, lo cual dificulta el proceso constructivo. De acuerdo con KCB (2022), desde enero del año 2020 hasta mayo del 2022 se registró un promedio mensual de 267 mm de lluvia y entre los años 2020 y 2021 se promedió un acumulado anual de 3274 mm de lluvia. Esto se muestra en la Figura 3-3. Además, como se muestra en la Figura 3-4, la máxima precipitación registrada fue de 90 mm el 19 de junio del 2021.

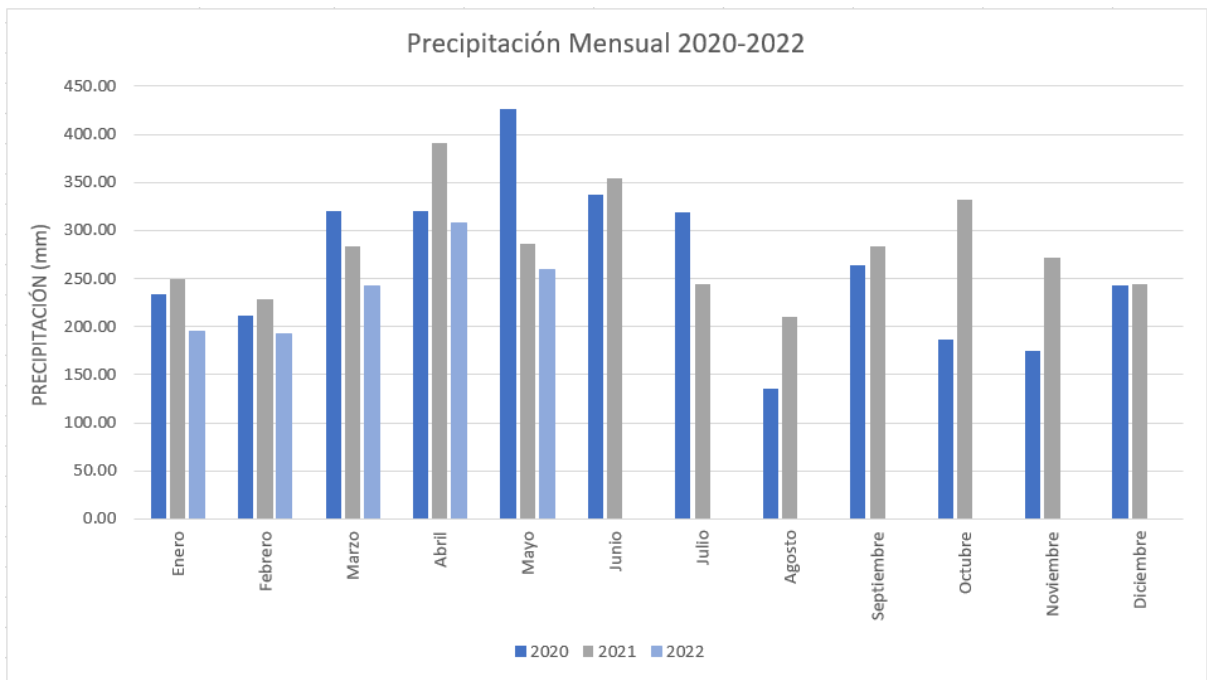


Figura 3-3 Precipitación mensual (Adaptado de KCB, 2022)

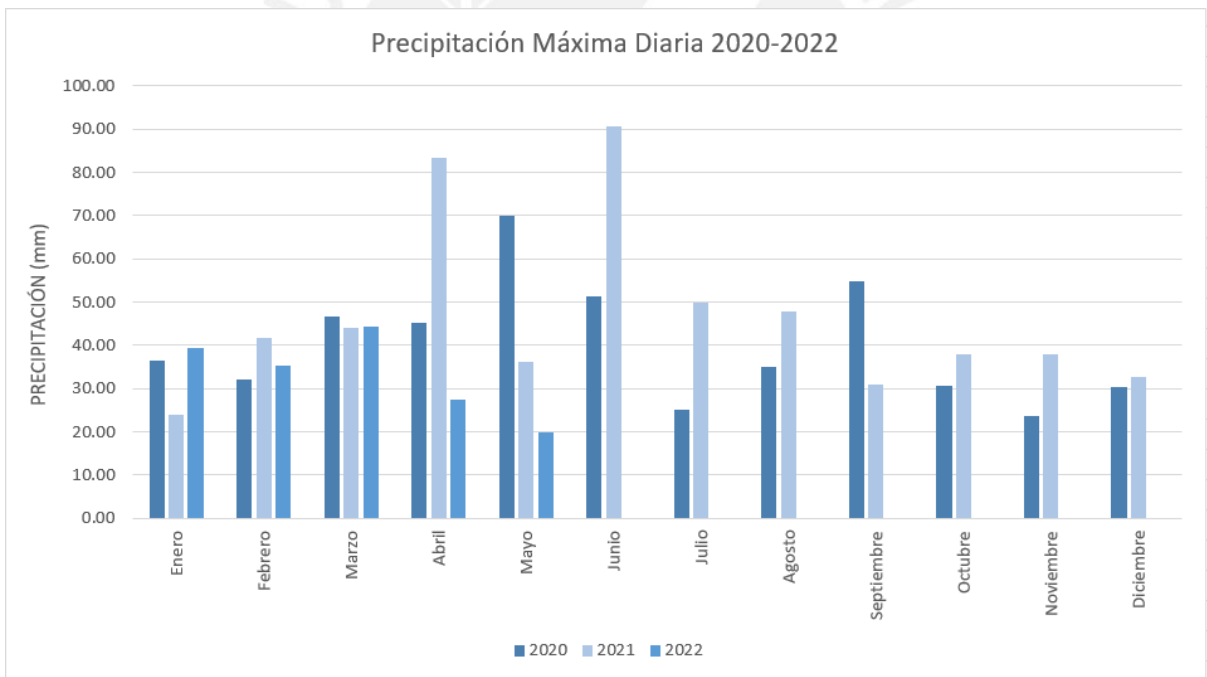


Figura 3-4 Precipitación máxima diaria mensual (Adaptado de KCB, 2022)

La temperatura, tal como indicó KCB (2022), diaria promedio varió entre 13°C y 22°C desde septiembre del 2020 hasta octubre del 2021. En la Figura 3-5 se muestra la precipitación y temperatura. Además, en la Figura 3-6, se muestra la rosa de vientos de La Presa. No se registraron vientos mayores a 2.1 km/h.

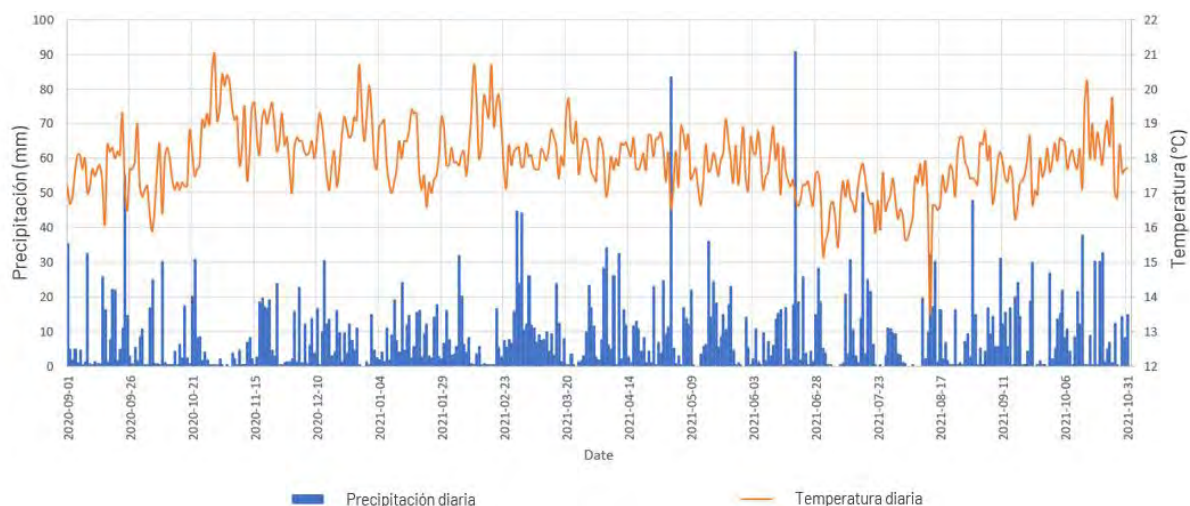


Figura 3-5 Precipitación diaria promedio y temperatura diaria promedio (Adaptado de KCB, 2022)

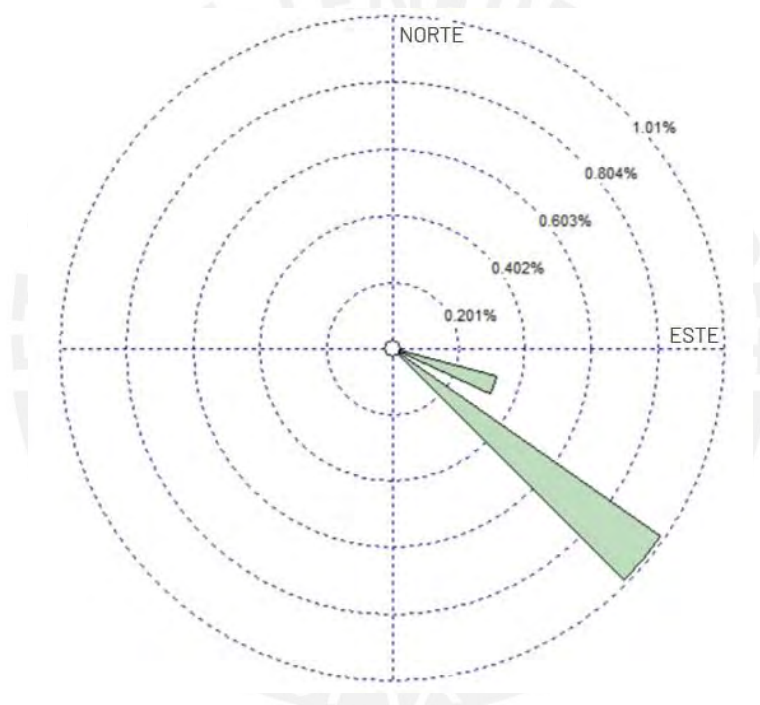


Figura 3-6 Rosa de vientos de La Presa (Adaptado de KCB, 2022)

3.3. Estratigrafía

De acuerdo con KCB (2022), El Proyecto se encuentra fundado sobre un lecho rocoso ígneo intrusivo erosionado del Batolito de Zamora, granodiorita y monzonita, de la Cordillera Oriental del Cóndor y delimitado por la meseta de arenisca de Hollin al norte y este. El perfil de meteorización se extiende un promedio de 40 metros. El lugar tiene una vegetación densa con un sistema de raíces superficiales.

El Proyecto, a lo largo de su desarrollo, ha tenido distintas campañas de exploración para poder ir actualizando los nuevos parámetros de la fundación. Debido a esto, se limitará a la

campana de exploración más reciente realizada a fines del año 2021. Para esta, se realizaron 6 calicatas y 9 perforaciones profundas, las cuales son mostradas en la Figura 3-7.

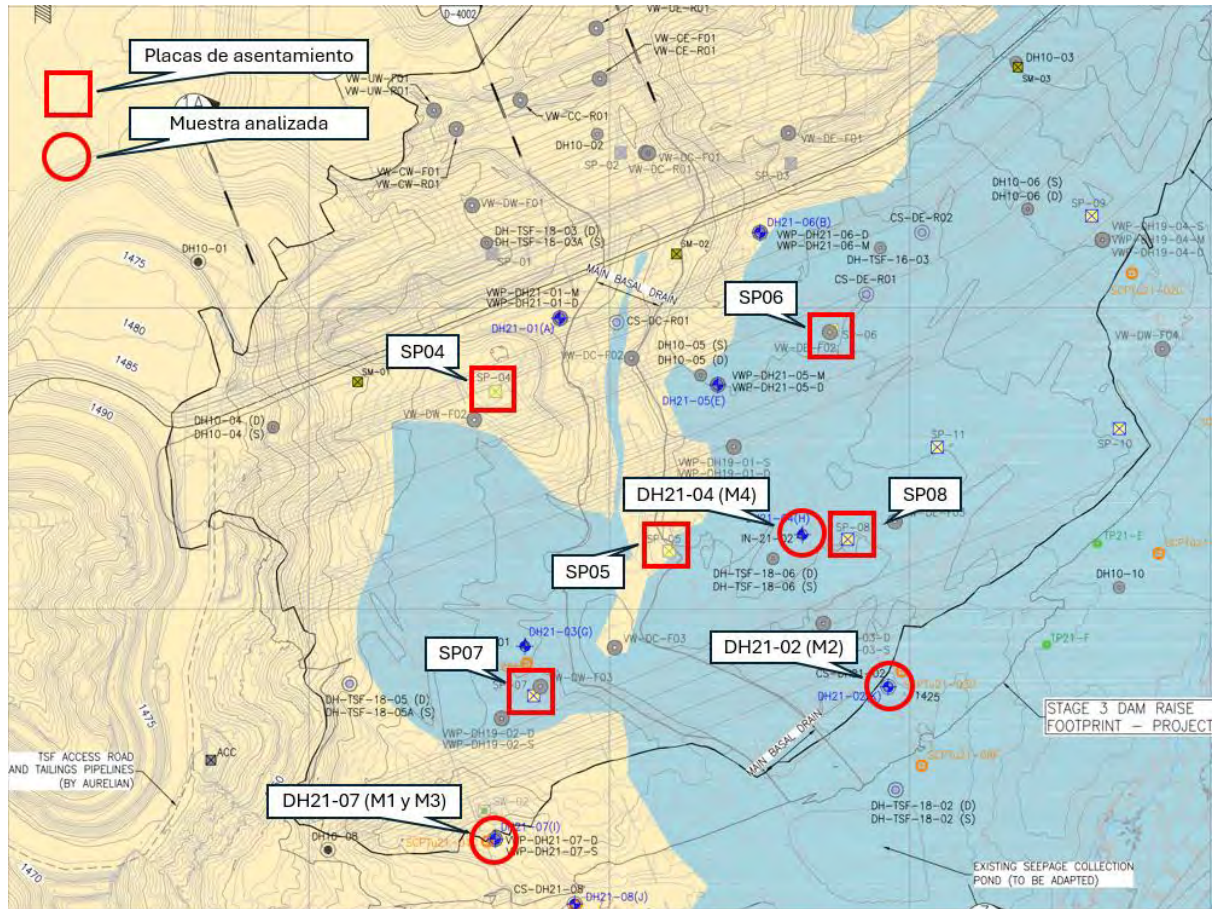


Figura 3-7 Plano de las exploraciones realizadas resaltando las pertenecientes a la última campaña (Adaptado de KCB, 2022)

A partir de los testigos recuperados de los distintos puntos de exploración, se elaboró un perfil para cada uno de estos puntos, así como se muestra en Figura 3-8. A partir de estos, se formaron secciones con las perforaciones cercanas para elaborar perfiles estratigráficos de estas secciones, así como se muestra en la Figura 3-10. En el Anexo A se adjuntan todos los perfiles estratigráficos.

Perforación

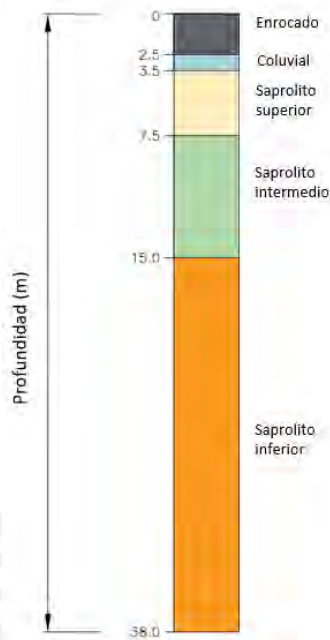


Figura 3-8 Registro de una perforación en La Presa (Adaptado de KCB, 2022)



Figura 3-9 Recuperación de una perforación de El Proyecto (KCB, 2022)

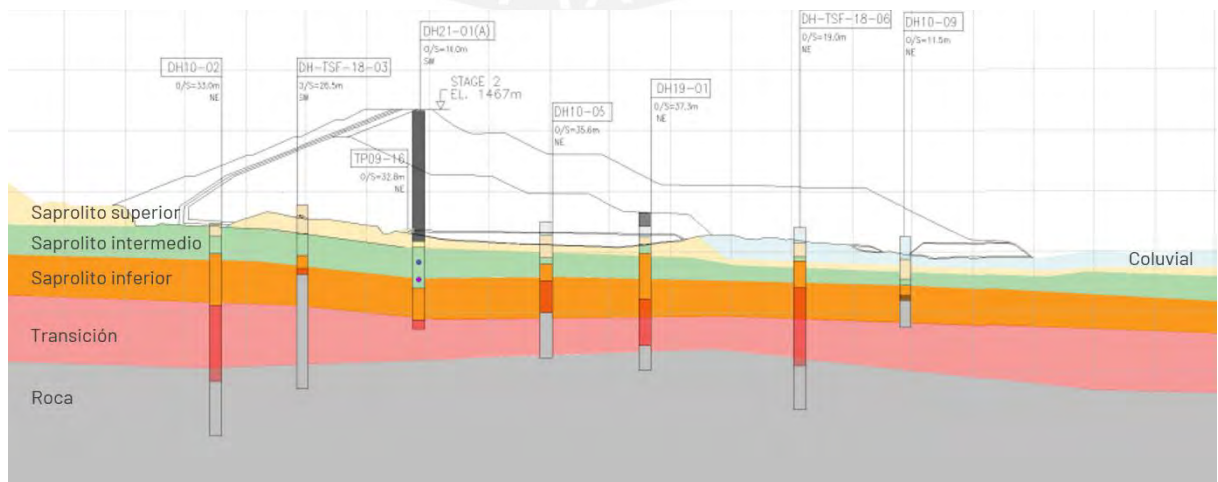


Figura 3-10 Perfil estratigráfico de una sección de La Presa (Adaptado de KCB, 2022)

Con dicha información y complementándola con los ensayos realizados in situ y las muestras ensayadas en laboratorio, se pudo elaborar una descripción general de los estratos de la fundación. Esta se muestra en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Descripción general de los estratos de fundación (Adaptado de KCB, 2022)

| Estrato | Descripción |
|-------------------|--|
| Suelos coluviales | <p>Suelo de partículas angulares del tamaño de una grava a bolonería mezcladas con una matriz de suelo de grano fino y baja plasticidad de consistencia firme a rígida (pero blanda cercana a la superficie). El espesor típico de este estrato llega hasta los 18 metros.</p> |
| Saprolito | <p>Suelo de grano fino (limos arenosos y arenas) de plasticidad media a alta; de blando a muy rígido (la consistencia aumenta en rigidez con la profundidad), con colores que varían dependiendo de la composición principal de la roca madre. El estrato de saprolito muestra signos evidentes de la estructura de la roca madre (suelo residual). El espesor típico de este estrato varía desde 15 metros hasta los 40 metros.</p> <p>En base a la caracterización realizada a partir de las distintas campañas de exploración, el perfil de saprolito se ha separado en 3 estratos (ordenados de manera descendente respecto a la profundidad) considerando las siguientes propiedades físicas y mecánicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El saprolito “superior” posee un espesor típico entre 8 y 10 metros. Es de baja plasticidad, consistencia blanda a firme, un contenido de humedad entre 25% y 45%, hasta 85% de contenido de finos y los valores de SPT se encuentran entre 4 y 10 golpes por pie. • El saprolito “intermedio” posee un espesor típico entre 8 y 20 metros. Es de baja plasticidad, consistencia rígida a muy rígida, un contenido de humedad entre 20% y 40%, hasta 75% de contenido de finos y los valores de SPT se encuentran entre 10 y 30 golpes por pie. • El saprolito “inferior” posee un espesor típico de 20 metros. Posee una consistencia rígida a dura, un contenido de humedad menor a 35%, hasta 40% de contenido de finos con un gran porcentaje de arenas y los valores de SPT se encuentran por encima de 25 golpes por pie. |

| Estrato | Descripción |
|------------|--|
| Transición | <p>Se encuentran materiales variados que van desde “parecidos a suelo” hasta “parecidos a roca” dentro del mismo estrato, con espesores que varían entre 5 y 25 metros.</p> <p>El material similar al suelo son arenas y gravas con algunos limos de baja plasticidad. Los materiales similares a roca consisten en roca fresca a roca moderadamente meteorizada dentro de la matriz de saprolito. La roca son de la roca madre que se encuentra debajo, débiles a medianamente fuertes (R2 a R3).</p> |
| Roca | <p>Se puede encontrar roca levemente meteorizada a roca fresca y es de mediana o medianamente fuerte (R2 o R3) a roca fuerte o muy fuerte (R4 o R5) dependiendo del tipo y la meteorización. Granodiorita y monzonita.</p> |

3.4. La Presa

La Presa, de acuerdo con KCB (2020), es una presa de relaves de gravedad de cero descargas. Inició su construcción y operación en septiembre del 2019 y se estima una vida útil de 16 años. Se espera que, en su última etapa, cuando alcance la cota 1491 msnm, tenga una capacidad total de 11.8 millones de toneladas de relaves. Estos se depositan en La Presa a través de la cresta desde distintos puntos de descarga, así como se muestra en la Figura 3-11. Debido a las altas precipitaciones y su área de captación de 1.4 kilómetros cuadrados, se realiza un proceso de recuperación de agua a través de una barcaza flotante con dos líneas de bombeo. La Presa está clasificada como “extrema” según la Guía de Seguridad de Presas de la Asociación Canadiense de Presas del 2007 (o CDA por sus siglas en inglés, “Canadian Dam Association”). Con base en dicha guía, para su diseño se usó un sismo y tormenta de diseño de 1 en 10 000 años.



Figura 3-11 Distribución de los puntos de descarga de relaves (Adaptado de KCB, 2022)

La estructura de La Presa, de acuerdo con Robles (2021), se compone de un relleno de roca que soporta los materiales granulares usados como filtro inclinado y un núcleo de baja permeabilidad de saprolito. Además, el diseño incluyó un revestimiento parcial con geomembrana de polietileno lineal de baja densidad (LLDPE, por sus siglas en inglés) como primera barrera ante posibles filtraciones. La Figura 3-12 muestra una sección típica de La Presa.

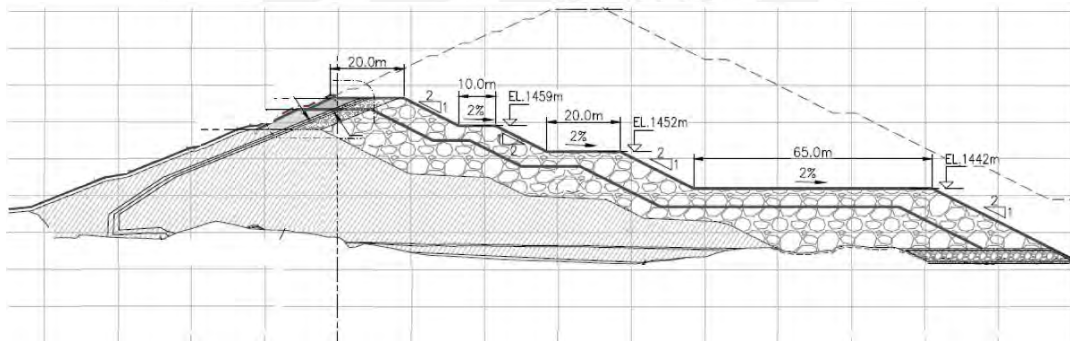


Figura 3-12 Sección típica de La Presa (Adaptado de Robles, 2021)

Dentro del proyecto, así como lo indica KCB (2022), los materiales son designados como “zonas”. De esta manera, para la construcción de La Presa se emplearon 6 zonas:

- Zona 1: corresponde al núcleo de la presa, es un saprolito mezclado con 4% de cemento. El saprolito es obtenido dentro de El Proyecto.
- Zona 2: es arena que corresponde al filtro inclinado, la cual es comprada de canteras cercanas.
- Zona 3: es grava de río que compone el filtro inclinado, es comprado de canteras cercanas.

- Zona 4: corresponde a un gran filtro basal perpendicular a La Presa, es un enrocado obtenido dentro de El Proyecto.
- Zona 5: compone el cuerpo de la presa, es un enrocado seleccionado de mayor diámetro. El valor de diseño es de una densidad de 23 kN/m^3 .
- Zona 5A: permite la compatibilidad de filtros entre la zona 3 y la zona 5, es un enrocado selecto (el mismo de zona 5) pero se le retiran las rocas de mayor diámetro.

La disposición de estos materiales se muestra en la sección la sección típica de La Presa en la Figura 3-13.

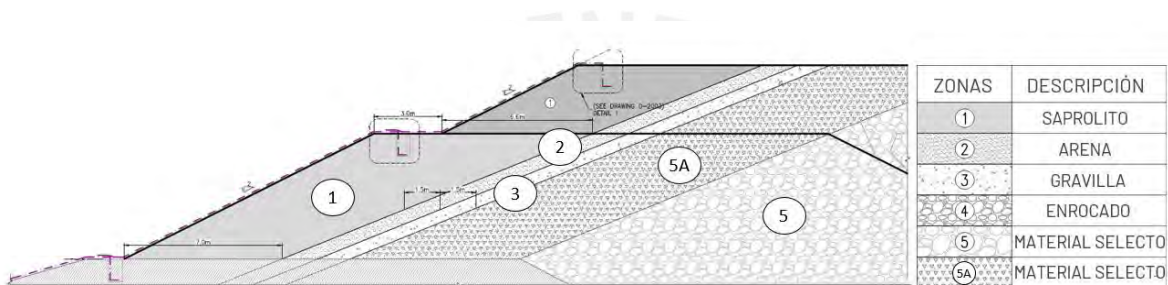


Figura 3-13 Disposición de las "zonas" en La Presa (KCB, 2022)

Parte de la labor de diseño realizado por KCB (2022) es establecer los parámetros de aprobación de las distintas zonas que componen La Presa. A continuación, la Figura 3-14 muestra los usos granulométricos designados para cada zona para una correcta compatibilidad de filtros.

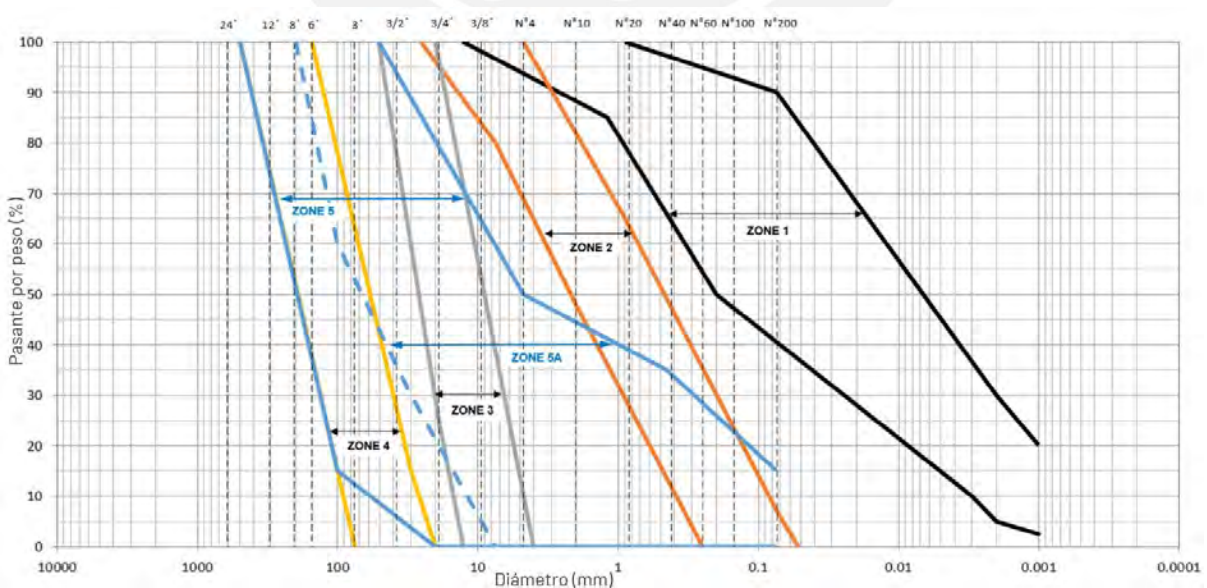


Figura 3-14 Usos granulométricos permitidos para cada zona (KCB, 2022)

3.4.1. Las etapas de la presa y su configuración

De acuerdo con KCB (2022), la primera campaña de exploración para poder investigar el sitio en el cual posteriormente se construiría la presa se realizó en el 2010. Desde entonces, se han realizado 6 campañas de exploración hasta la fecha. Estas se realizaron en el 2010, 2015, 2016, 2018, 2019 y 2021. Sin embargo, no fue hasta setiembre del 2019 que se empezó con la construcción de La Presa.

La estabilidad física general de La Presa, según indicó Robles (2021), está controlada por la resistencia al corte no drenado de la fundación de saprolito y su capacidad de disipar la presión de poros inducida por la construcción. El riesgo que implica que la fundación de saprolito sea más débil en estratos poco profundos a comparación de los más profundos se mitiga con la construcción de banquetas extensas aguas debajo de La Presa. Esto se realizó con la finalidad de que la carga de la construcción permita que la fundación gane resistencia debido a la consolidación y proporcione una configuración más estable para los futuros recrecimientos.

Como se señaló en el alcance, el presente trabajo se limitará a las 3 primeras etapas constructivas que corresponden al Dique de Arranque, Primer Recrecimiento y Segundo Recrecimiento, las cuales serán detalladas en la Tabla 3-2. Al momento de redactar el presente trabajo, el Tercer Recrecimiento se encuentra en construcción.

Tabla 3-2 Configuración de La Presa (Adaptado de Robles, 2021)

| Etapas | Fecha de inicio | Fecha de fin | Elevación de la cresta (msnm) | Altura aproximada (m) | Elevación de las banquetas aguas abajo (msnm) |
|-----------------------|------------------------|---------------------|--------------------------------------|------------------------------|--|
| Dique de Arranque | 28/09/2019 | 31/01/2020 | 1458 | 31 | 1444, 1439, 1432 |
| Primer Recrecimiento | 24/09/2020 | 15/04/2021 | 1463.5 | 36.5 | 1455, 1448, 1437 |
| Segundo Recrecimiento | 16/04/2021 | 30/09/2021 | 1467 | 40 | 1459, 1452, 1442 |
| Tercer Recrecimiento | 18/04/2022 | ≈30/09/2022 | ≈1471 | ≈44 | - |

3.5. Instrumentos

Para poder cuantificar diversos parámetros que ocurren en La Presa se instala instrumentación. De acuerdo con KCB (2022), en la presa se cuenta con:

- Piezómetros de cuerda vibrante: se cuenta con 39 de estos instalados y operativos. Realiza mediciones de frecuencia y temperatura de manera digital y automática, mediante un sensor que se instala a profundidad dentro de una perforación, a fin de poder calcular el nivel freático y la disipación de la presión de poros. Se muestra la instalación de uno de estos en la Figura 3-15.



Figura 3-15 Instalación de un piezómetro en La Presa (KCB, 2022)

- Piezómetros de Casagrande: se cuenta con 15 de estos instalados y operativos. La diferencia con los piezómetros de cuerda vibrante es que las mediciones se tienen que hacer de manera manual.
- Inclínómetros: se cuenta con 2 de estos instalados y operativos. Realiza mediciones de deformación angular de manera digital y automática, mediante una vara de sensores que se instala a profundidad dentro de una perforación, a fin de poder calcular las deformaciones horizontales de La Presa.



Figura 3-16 Instalación de un inclinómetro en La Presa (KCB, 2022)

- Hitos Topográficos: se cuenta con 3 de estos instalados y operativos. Es un dado de concreto con un ojo de pollo que permite realizar mediciones topográficas para poder medir las deformaciones horizontales y verticales de la superficie. Tal como se muestra en la Figura 3-17.

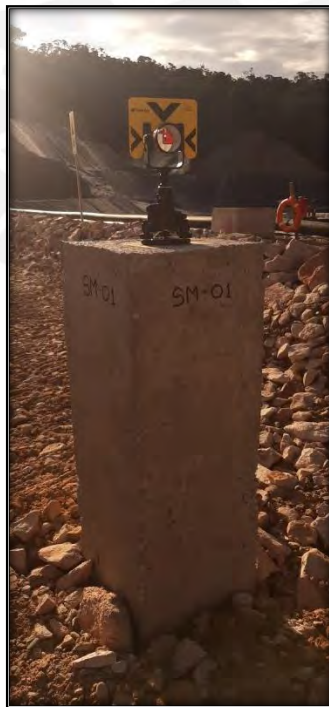


Figura 3-17 Hito Topográfico instalado en El Proyecto (Robles 2022)

- Acelerógrafo: se cuenta con 1 de estos instalados y operativos. Es un instrumento que permite medir las aceleraciones del suelo.
- Placas de asentamiento: se cuenta con 15 de estos instalados y 12 operativos. Es un instrumento que se compone por una placa que se pone sobre el material que se quiera monitorear y un tubo vertical para poder realizar las mediciones. El tubo vertical tiene unas conexiones que permite añadir nuevos tubos para aumentar la elevación y de esta forma poder seguir construyendo sobre el plato y seguir realizando las mediciones. Se instala para poder monitorear los desplazamientos verticales y horizontales. En la Figura 3-18 se muestra la instalación de una placa de asentamiento.



Figura 3-18 Instalación de una placa de asentamiento en La Presa (KCB, 2022)

En la Figura 3-19 se muestra un plano de La Presa con la ubicación de toda la instrumentación instalada.

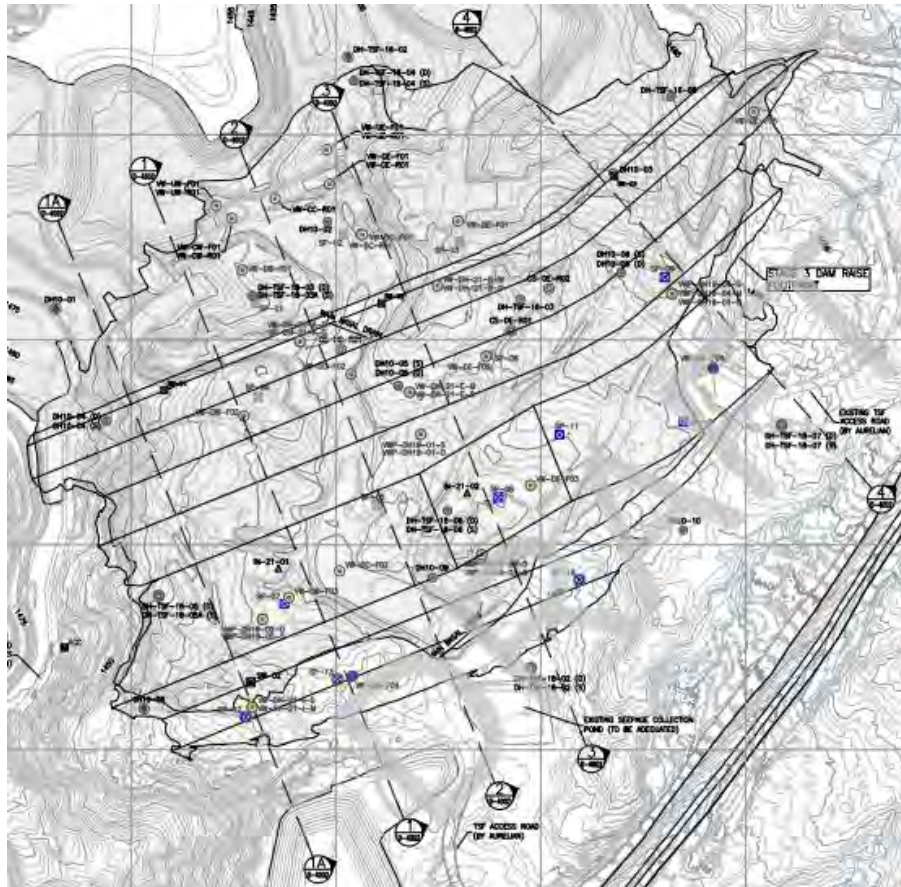


Figura 3-19 Plano de La Presa con la instrumentación instalada (R. Robles, 2022)

La instalación de la placa de asentamiento, según las especificaciones de KCB (2022), deben seguir los lineamientos de la ASTM D6598, además se establece una secuencia:

1. La placa de asentamiento debe instalarse en suelo natural a mínimo 0.3 metros de profundidad desde la fundación ya preparada (luego de retirarse el material orgánico).
2. La base de la placa de asentamiento debe estar cubierta por 0.3 metros de material relleno compactado como mínimo. La tubería de la placa debe mantenerse vertical todo el tiempo. La lectura “cero” debe darse en este momento.
3. Se añadirá 1 metro de material de relleno y se compactará. El resto del material de relleno que se vaya a colocar sobre la placa debe ser colocado en capas de 0.3 metros y compactados antes de colocar la siguiente capa.
4. La tubería debe permanecer siempre vertical y por encima del nivel de relleno para poder recrecerla.
5. El constructor debe proveer e instalar toda la protección requerida para prevenir daño o desplazamiento de los instrumentos. Se recomienda el uso de banderas y barricadas.

CAPÍTULO 4. ANALISIS DEL PROYECTO

4.1. Medición del asentamiento en campo

Luego de instalada la placa de asentamientos, se establece la frecuencia y el punto desde el cual se realizarán las mediciones. La ubicación desde donde se realizarán las mediciones corresponde a un punto fuera de La Presa en el que se establece un punto de referencia o “Benchmark”. La frecuencia es establecida por la supervisión, para El Proyecto se estableció que durante el periodo de construcción se realicen mediciones de manera semanal y durante periodo de no construcción se realice una medición cada dos semanas, además debe realizarse una medición luego de cada evento sísmico.

En El Proyecto se encuentran instalados 15 placas de asentamiento (SP por sus siglas en inglés, “settlement plates”), mas solo se revisarán 8. Esto se debe a que 3 de las placas se decomisaron por quedar muy profundas y las otras fueron instaladas posterior a la fecha máxima que se analizará en la presente tesis.

A continuación, desde la Figura 4-1 hasta la Figura 4-8, se analizarán los asentamientos y desplazamientos horizontales de las distintas placas de asentamiento.

El SP-4 se muestra en la Figura 4-1, este registra un asentamiento máximo de 1296 mm y un desplazamiento horizontal de 530 mm orientado hacia el sur. Sobre este se registra una altura de relleno de 25.6 m. Cuando finaliza cada etapa se observa como continua el proceso de consolidación, este es más evidente luego del segundo periodo de relleno.

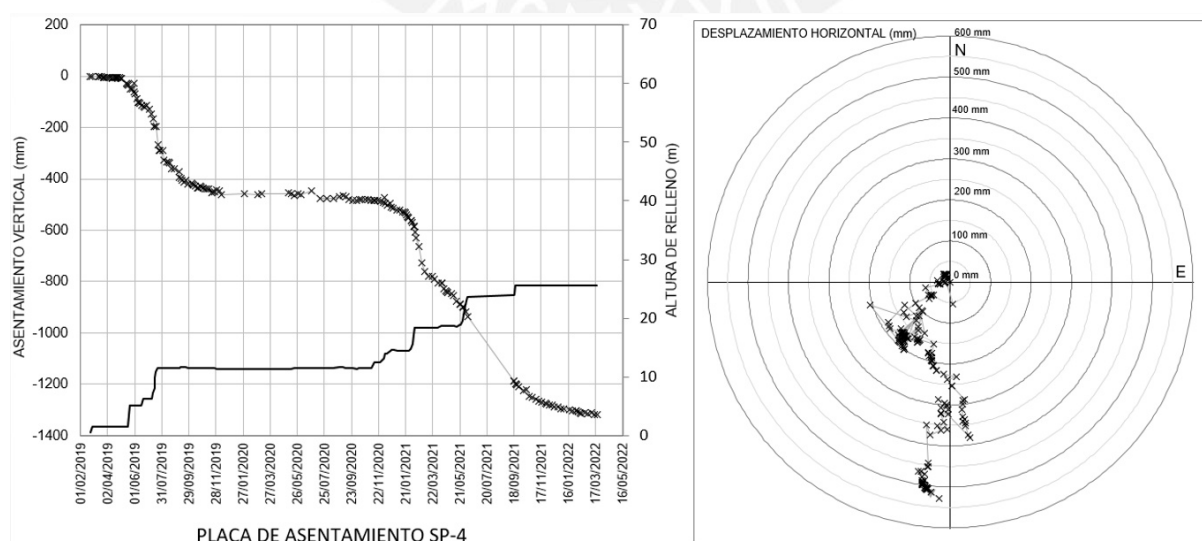


Figura 4-1 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-4 (Fuente propia)

El SP-5 se muestra en la Figura 4-2, este registra un asentamiento máximo de 648 mm y un desplazamiento horizontal de 310 mm orientado hacia el sureste. Sobre este se registra una altura de relleno de 18.6 m. Posee una fuerte relación con las etapas de relleno. A pesar de haber culminado la etapa de relleno, la placa continúa asentándose con una velocidad considerable.

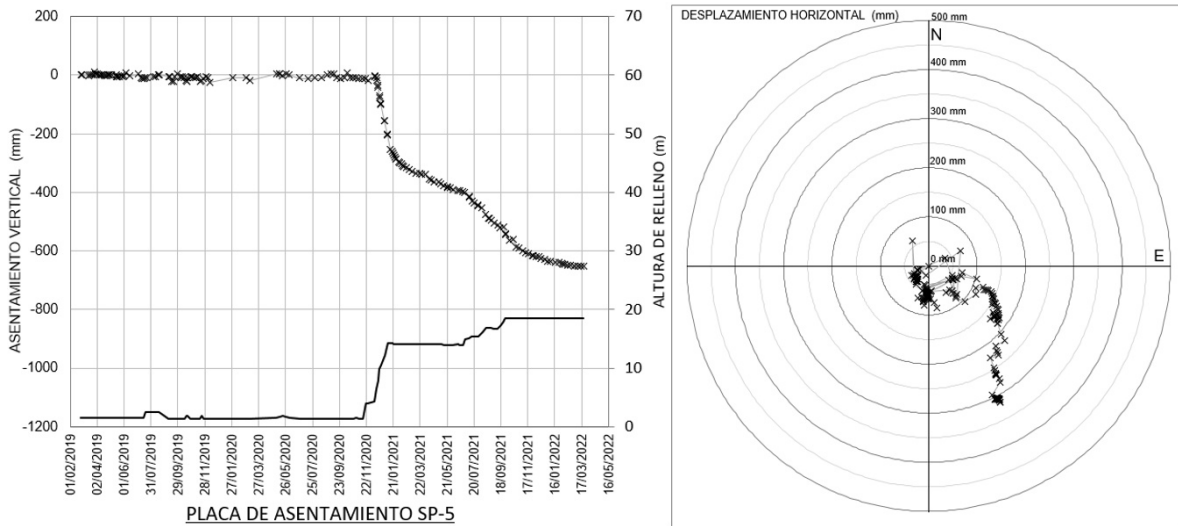


Figura 4-2 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-5 (Fuente propia)

El SP-6 se muestra en la Figura 4-3, este registra un asentamiento máximo de 482 mm y un desplazamiento horizontal de 250 mm orientado hacia el sureste. Sobre este se registra una altura de relleno de 20.7 m. Se observa una única etapa de relleno y como el asentamiento responde a esta con cierto desfase de tiempo. Una vez finalizada, se observa poco asentamiento. En cuanto al desplazamiento, inicialmente tuvo un movimiento errático hacia el noreste pero luego cambio hacia el sureste de manera consistente.

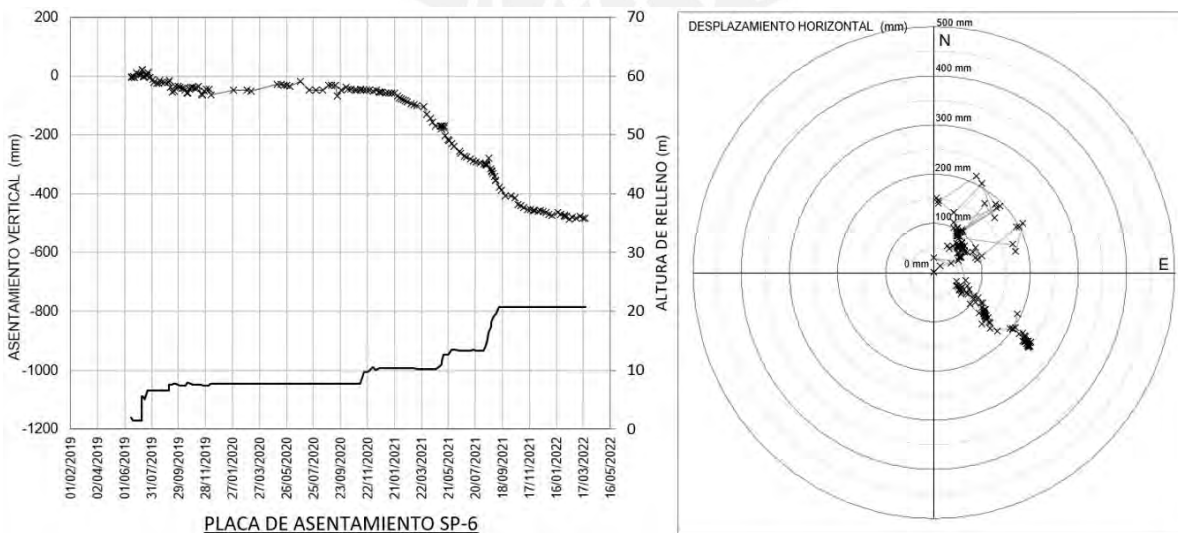


Figura 4-3 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-6 (Fuente propia)

El SP-7 se muestra en la Figura 4-4, este registra un asentamiento máximo de 675 mm y un desplazamiento horizontal de 300 mm orientado hacia el sureste. Sobre este se registra una altura de relleno de 13.5 m. La etapa de relleno se realizó de manera continua. A pesar de haber culminado la etapa de relleno, la placa continúa asentándose.

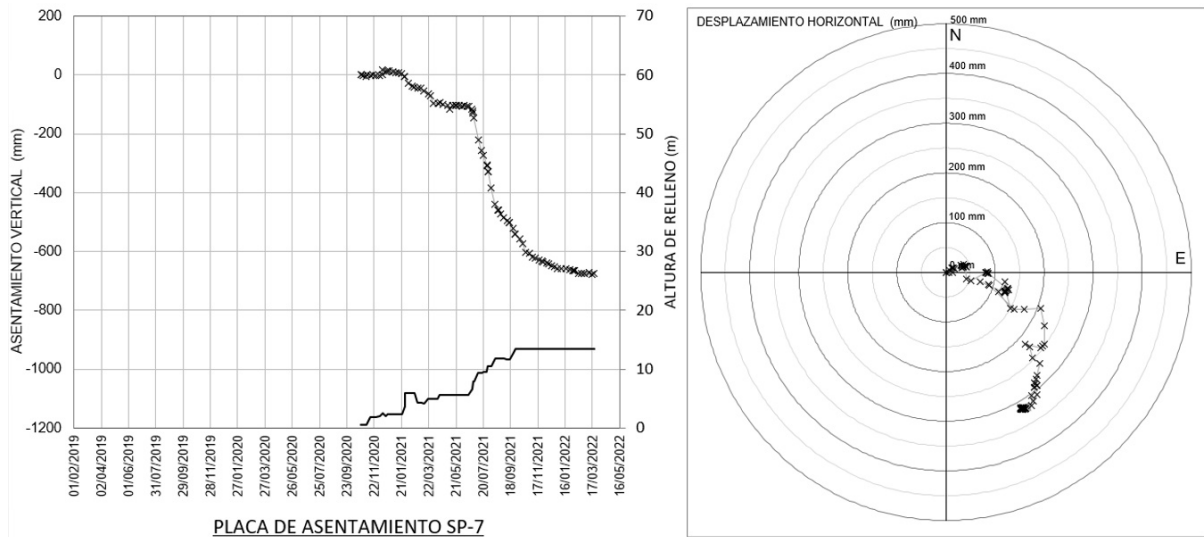


Figura 4-4 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-7 (Fuente propia)

El SP-8 se muestra en la Figura 4-5, este registra un asentamiento máximo de 334 mm y un desplazamiento horizontal de 300 mm orientado hacia el sur. Sobre este se registra una altura de relleno de 16.4 m. A pesar de haber culminado la etapa de relleno, la placa continúa asentándose con una velocidad considerable. Inicialmente, de manera horizontal, tuvo un gran desplazamiento de 100 mm, luego el desplazamiento se ralentizó.

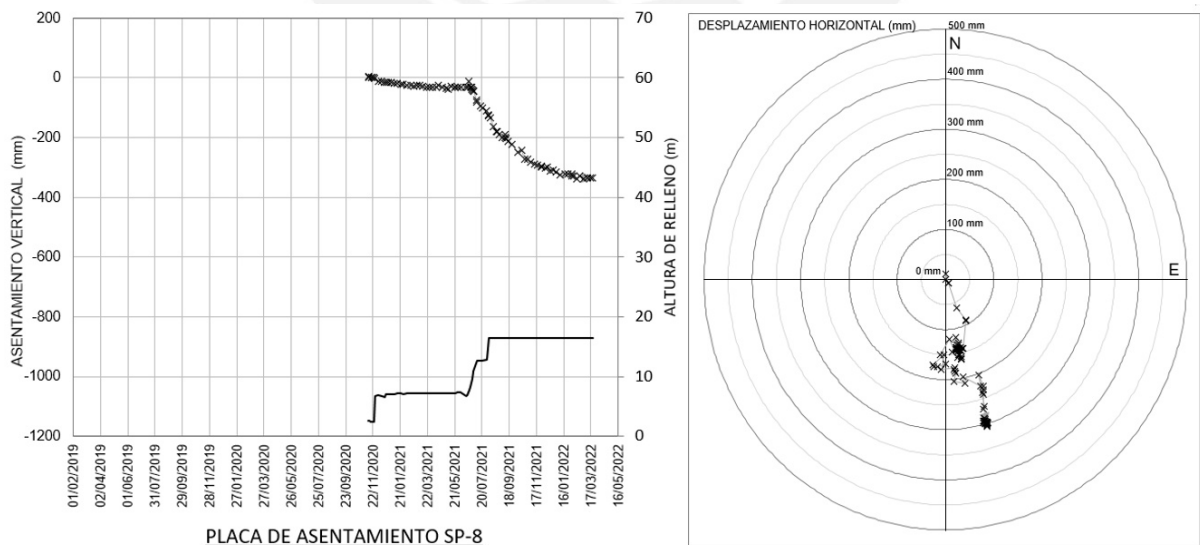


Figura 4-5 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-8 (Fuente propia)

El SP-9 se muestra en la Figura 4-6, este registra un asentamiento máximo de 190 mm y un desplazamiento horizontal de 120 mm orientado hacia el sur. Sobre este se registra una altura de relleno de 7.9 m. Luego de haber culminado la etapa de relleno, la placa disminuyó considerablemente su velocidad de asentamiento. Inicialmente, de manera horizontal, se mantuvo estático, luego tuvo un desplazamiento hacia el sur para mantenerse constante en 120 mm.

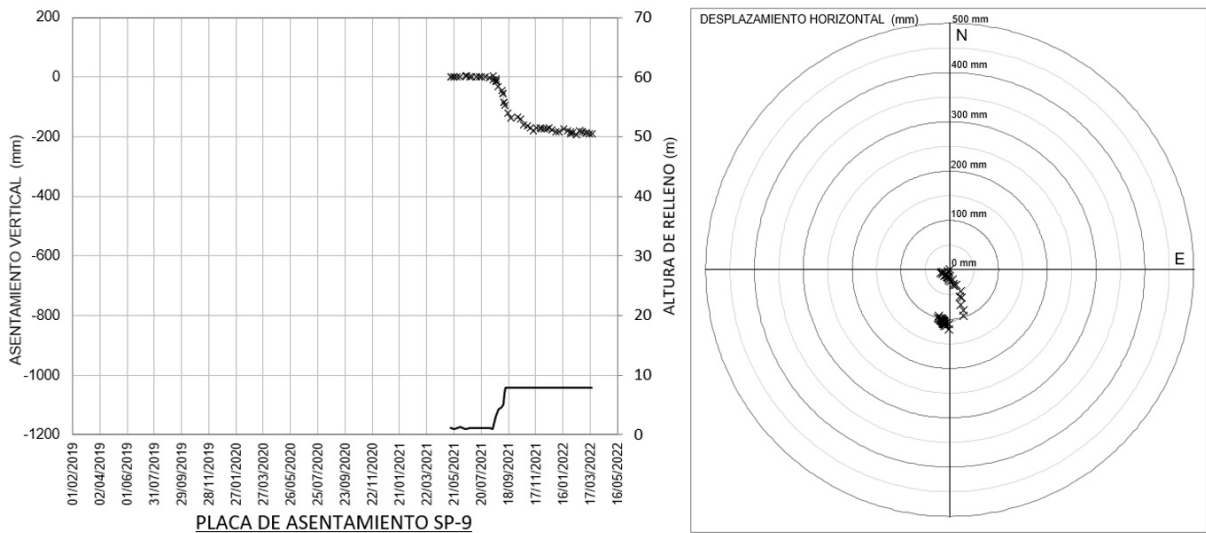


Figura 4-6 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-9 (Fuente propia)

El SP-10 se muestra en la Figura 4-7, este registra un asentamiento máximo de 26 mm y un desplazamiento horizontal de 145 mm orientado hacia el sur. Sobre este se registra una altura de relleno de 5.4 m. La presente placa registró muy poco asentamiento.

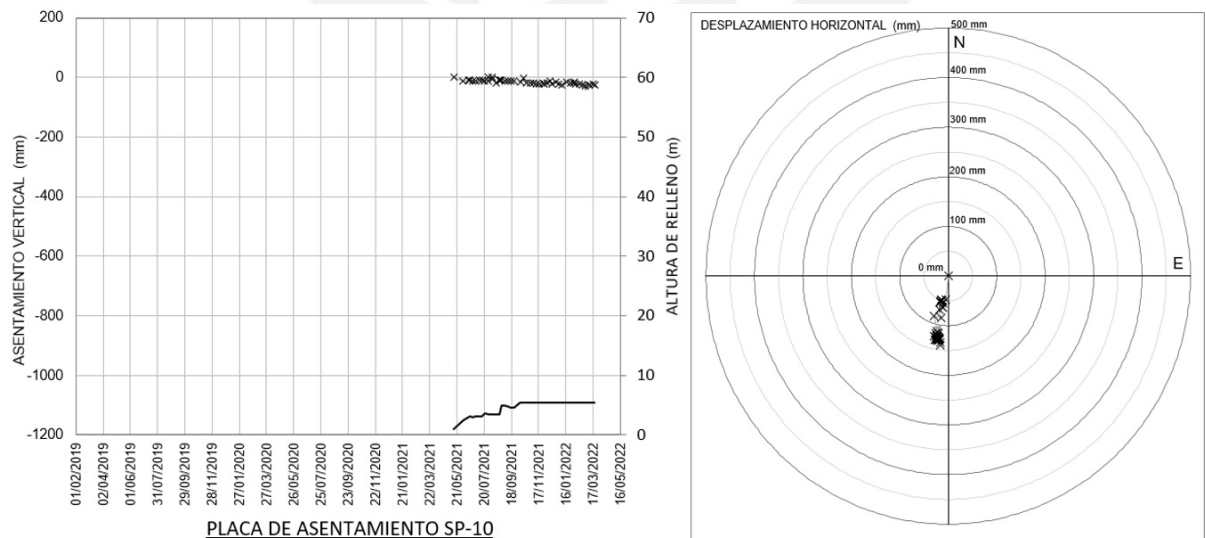


Figura 4-7 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-10 (Fuente propia)

El SP-11 se muestra en la Figura 4-8, este registra un asentamiento máximo de 81 mm y un desplazamiento horizontal de 300 mm orientado hacia el sur. Sobre este se registra una altura de relleno de 12.4 m. A pesar de haber culminado la etapa de relleno, la placa continúa asentándose de manera constante. Inicialmente, de manera horizontal, tuvo un gran desplazamiento de 150mm hacia el sur, luego el desplazamiento se ralentizó hacia el suroeste.

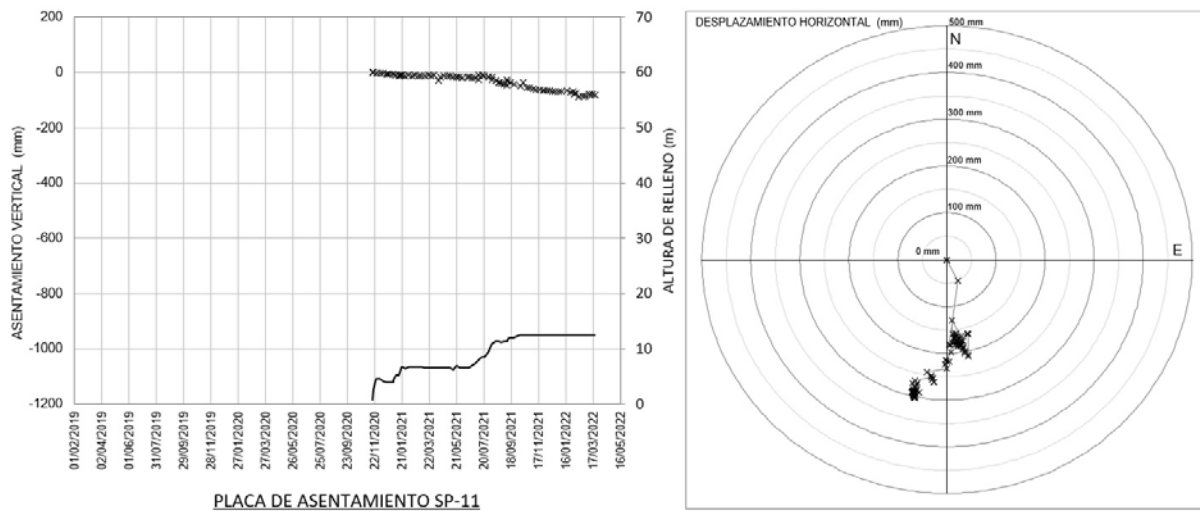


Figura 4-8 Asentamiento y desplazamiento horizontal del SP-11 (Fuente propia)

Luego de haber analizado todas las placas de asentamiento, se puede realizar un cuadro resumen separando las etapas constructivas y los periodos entre estas. Esto se muestra en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Resumen de las mediciones de las placas de asentamiento (Fuente propia)

| Placa de Asentamiento | Asentamiento Total | Relleno Total | Asentamiento durante la construcción del Dique de Arranque | Relleno durante la construcción del Dique de Arranque | Asentamiento entre el Dique de Arranque y el Primer Recrecimiento | Asentamiento durante la construcción del Primer y Segundo Recrecimiento | Relleno durante la construcción del Primer y Segundo Recrecimiento | Asentamiento entre el Segundo Recrecimiento y el 18/04/2022 | Máximo desplazamiento horizontal |
|-----------------------|--------------------|---------------|--|---|---|---|--|---|----------------------------------|
| | (mm) | (m) | (mm) | (m) | (mm) | (mm) | (m) | (mm) | (mm) |
| SP-4 | 1296 | 25.6 | 459 | 11.4 | 24 | 721 | 14.0 | 116 | 530 S |
| SP-5 | 648 | 18.6 | 7 | 1.4 | 4 | 507 | 16.4 | 134 | 310 SE |
| SP-6 | 482 | 20.7 | 46 | 7.7 | 1 | 360 | 12.9 | 76 | 250 SE |
| SP-7 | 675 | 13.5 | - | - | - | 523 | 12.9 | 152 | 300 SE |
| SP-8 | 334 | 16.4 | - | - | - | 224 | 16.4 | 110 | 300 S |
| SP-9 | 190 | 7.9 | - | - | - | 137 | 7.9 | 53 | 120 S |
| SP-10 | 26 | 5.4 | - | - | - | 11 | 4.6 | 15 | 145 S |
| SP-11 | 81 | 12.4 | - | - | - | 41 | 12.0 | 40 | 300 S |

4.2. Medición del asentamiento teórico

Para el cálculo del asentamiento teórico, emplearemos las ecuaciones listadas en el Capítulo 2.3, pero lo primero es definir los parámetros necesarios para cada estrato. Para ello, se usarán los resultados de los ensayos de consolidación por odómetro realizados en un laboratorio de Canadá, cuyas muestras fueron extruidas con láser del tubo Shelby, talladas con un diámetro de 50 mm y altura de 19 mm, para posteriormente ser saturadas y ensayadas. Parte del material obtenido del tallado, se utilizó para realizar ensayos índices. De los resultados obtenidos para cada estrato, se seleccionó el ensayo más representativo bajo los siguientes criterios:

- El ensayo debe contar con etapa de carga y descarga.
- La etapa de carga debe alcanzar como mínimo 1000 kPa.
- Los resultados del ensayo deben mantenerse dentro del rango de los demás ensayos.

A continuación, desde la Figura 4-9 hasta la Figura 4-12, se muestran los resultados de los ensayos para cada estrato y se resalta en color rojo el resultado seleccionado para los análisis debido a su representatividad con base en los criterios mencionados anteriormente.

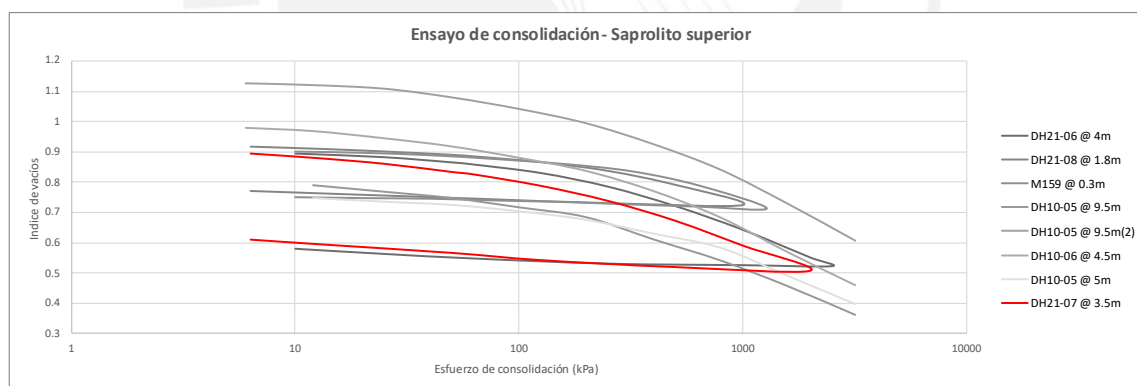


Figura 4-9 Resultados del ensayo de consolidación por odómetro para el saprolito superior (Fuente propia)

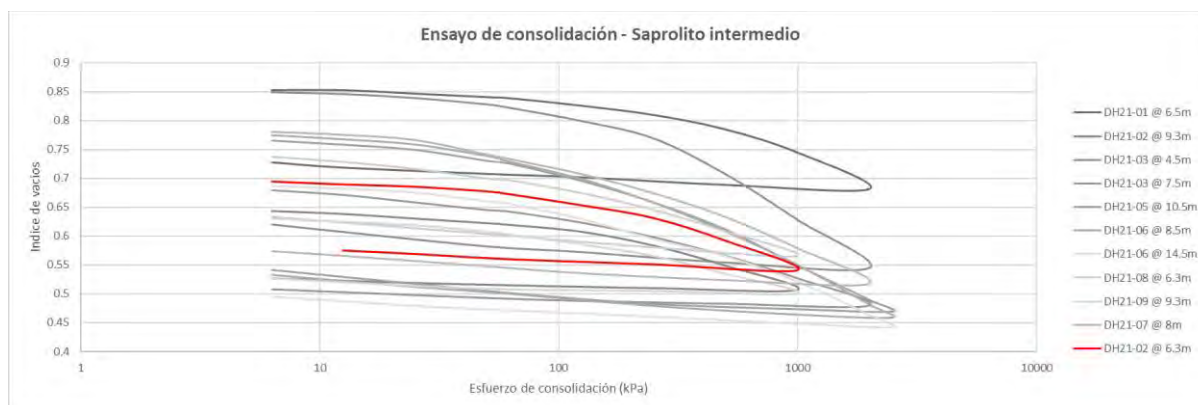


Figura 4-10 Resultados del ensayo de consolidación por odómetro para el saprolito intermedio (Fuente propia)

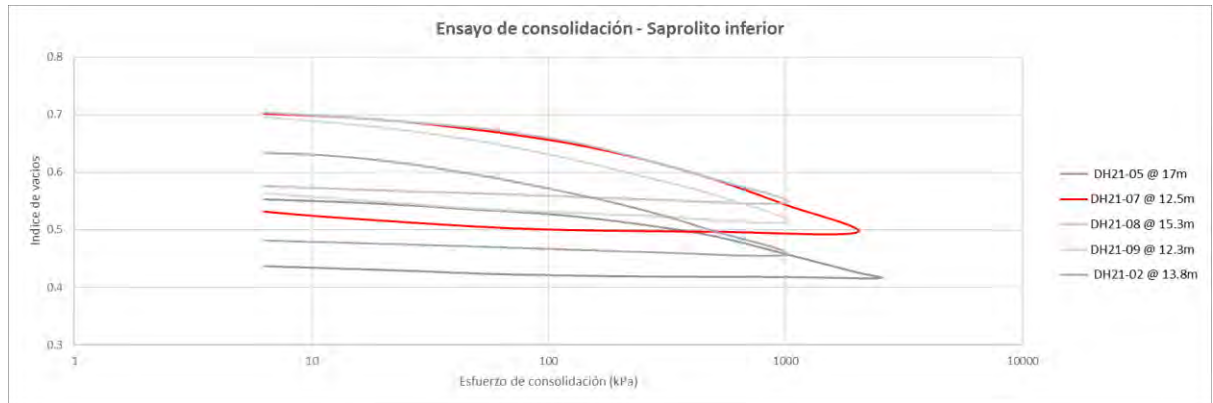


Figura 4-11 Resultados del ensayo de consolidación por odómetro para el saprolito inferior (Fuente propia)

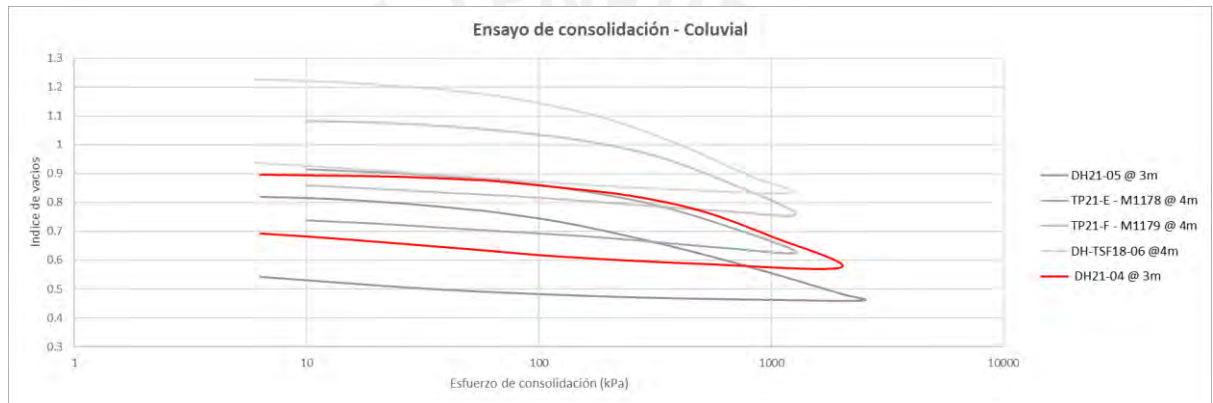


Figura 4-12 Resultados del ensayo de consolidación por odómetro para el coluvial (Fuente propia)

De ahora en adelante, a la muestra que corresponde al resultado del ensayo de consolidación representativo para el material de saprolito superior será denominado “M1”, para el material de saprolito intermedio “M2”, para el material de saprolito inferior “M3” y para el material coluvial “M4”; como se muestra en la Tabla 4-2. A continuación, la Tabla 4-3 y la Figura 4-13 se muestran los resultados de los ensayos de consolidación para las muestras mencionadas. Finalmente, en la Tabla 4-4 se muestran los resultados de los ensayos índices para dichas muestras.

Tabla 4-2 Ubicación de las muestras representativas (Fuente propia)

| Id | Perforación | Tipo de suelo | Profundidad de toma de muestra desde terreno natural (m) | Altura de relleno al momento de la perforación (m) |
|-----------|--------------------|----------------------|---|---|
| M1 | DH21-07 | Saprolito superior | 3.5 | 2.5 |
| M2 | DH21-02 | Saprolito intermedio | 6.3 | 5.7 |
| M3 | DH21-07 | Saprolito inferior | 12.5 | 2.5 |
| M4 | DH21-04 | Coluvial | 2.6 | 15 |

Tabla 4-3 Resultados de ensayos de consolidación para muestras representativas (Fuente propia)

| M1 | | | M2 | | | M3 | | | M4 | | |
|----------------|------|-------------------------|----------------|------|-------------------------|----------------|-------|-------------------------|----------------|------|-------------------------|
| σ (kPa) | e | Cv (cm ² /s) | σ (kPa) | e | Cv (cm ² /s) | σ (kPa) | e | Cv (cm ² /s) | σ (kPa) | e | Cv (cm ² /s) |
| 6.3 | 0.89 | 0.029 | 6.3 | 0.69 | 0.016 | 6.3 | 0.70 | 0.017 | 6.3 | 0.90 | 0.023 |
| 12.5 | 0.88 | 0.044 | 12.5 | 0.69 | 0.018 | 12.5 | 0.70 | 0.016 | 12.5 | 0.89 | 0.020 |
| 25 | 0.86 | 0.040 | 25 | 0.69 | 0.017 | 25 | 0.69 | 0.026 | 25 | 0.89 | 0.018 |
| 50 | 0.83 | 0.069 | 50 | 0.68 | 0.014 | 50 | 0.67 | 0.041 | 50 | 0.88 | 0.039 |
| 62.5 | 0.83 | 0.034 | 62.5 | 0.67 | 0.024 | 62.5 | 0.67 | 0.035 | 62.5 | 0.88 | 0.026 |
| 125 | 0.79 | 0.037 | 125 | 0.65 | 0.035 | 125 | 0.65 | 0.042 | 125 | 0.85 | 0.029 |
| 250 | 0.74 | 0.022 | 250 | 0.63 | 0.036 | 250 | 0.62 | 0.041 | 250 | 0.82 | 0.033 |
| 500 | 0.67 | 0.037 | 500 | 0.59 | 0.046 | 500 | 0.59 | 0.056 | 500 | 0.77 | 0.033 |
| 1000 | 0.59 | 0.049 | 1000 | 0.54 | | 1000 | 0.54 | 0.068 | 1000 | 0.68 | 0.044 |
| 2000 | 0.51 | | 250 | 0.55 | | 2000 | 0.50 | | 2000 | 0.58 | |
| 500 | 0.52 | | 62.5 | 0.56 | | 500 | 0.50 | | 500 | 0.59 | |
| 125 | 0.54 | | 25 | 0.57 | | 125 | 0.50 | | 125 | 0.61 | |
| 50 | 0.57 | | 12.5 | 0.58 | | 50 | 0.51 | | 50 | 0.64 | |
| 12.5 | 0.59 | | | | | 12.5 | 0.522 | | 12.5 | 0.68 | |
| 6.3 | 0.61 | | | | | 6.3 | 0.532 | | 6.3 | 0.69 | |

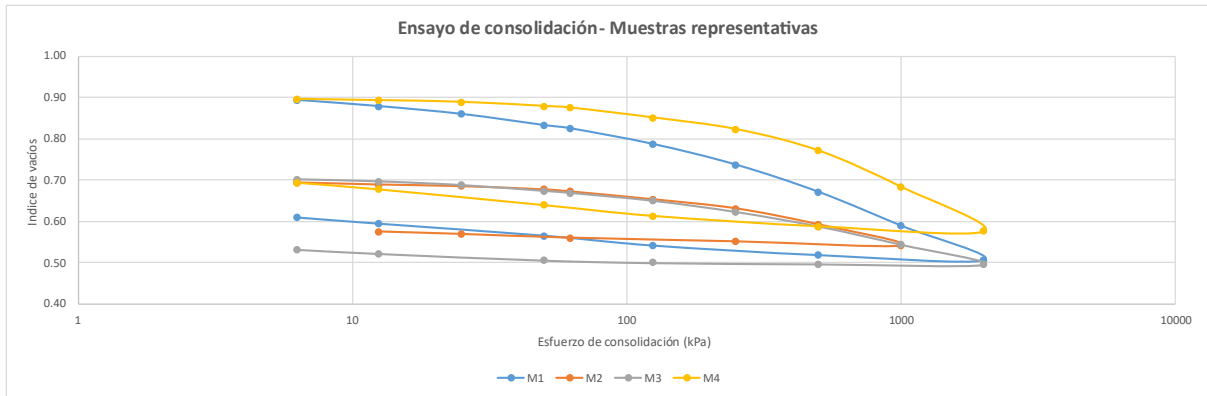


Figura 4-13 Resultados del ensayo de consolidación por odómetro para las muestras representativas (Fuente propia)

Tabla 4-4 Resultados de ensayos índices para muestras representativas (Fuente propia)

| Id | PU (kN/m³) | GS | eo | LL | LP | IP | Grava (%) | Arena (%) | Finos (%) |
|-----------|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| M1 | 17.8 | 2.66 | 0.905 | 34 | 25 | 9 | 0 | 63.7 | 36.3 |
| M2 | 18.2 | 2.65 | 0.697 | 35 | 27 | 9 | 0 | 57.8 | 42.2 |
| M3 | 18.4 | 2.63 | 0.704 | 30 | 22 | 8 | 0 | 71.8 | 28.2 |
| M4 | 18 | 2.60 | 0.901 | 45 | 28 | 16 | 0 | 53.7 | 46.3 |

Luego, seguiremos los pasos listados en el Capítulo 2.4 para determinar el esfuerzo de pre consolidación para cada una de las muestras representativas, tal como se muestra de la Figura 4-14 a la Figura 4-17. Posteriormente se calculan los coeficientes C_c y C_r siguiendo la metodología del mencionado capítulo. Estos resultados se resumen en la Tabla 4-5 y, de manera referencial, se incluyen los rangos de los valores obtenidos de los demás ensayos.

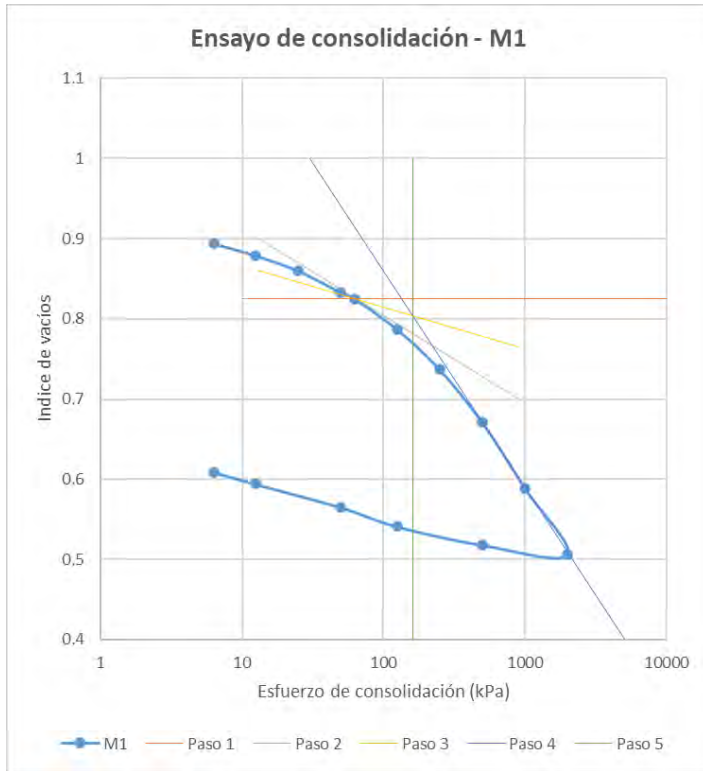


Figura 4-14 Estimación del esfuerzo de pre consolidación para la M1 por el método de Casagrande (Fuente propia)

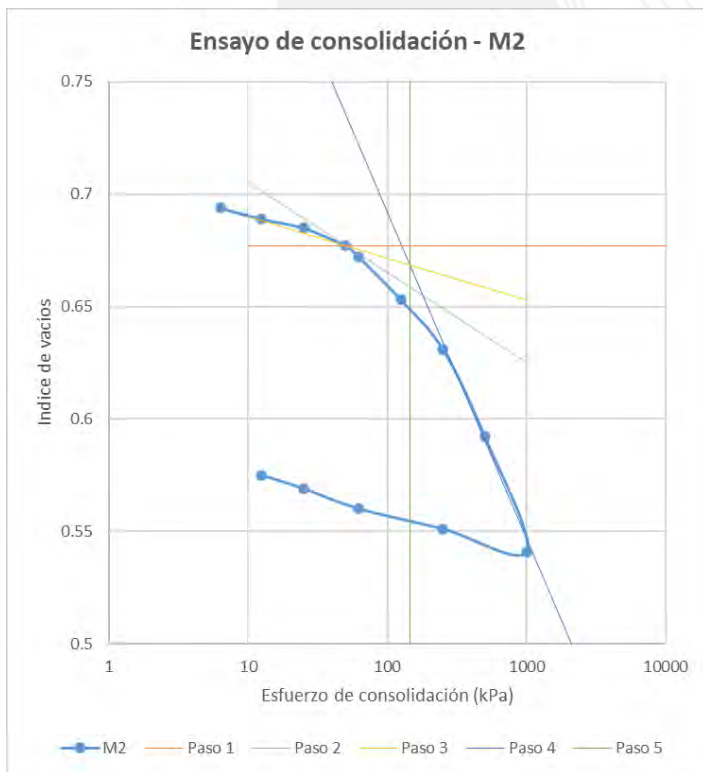


Figura 4-15 Estimación del esfuerzo de pre consolidación para la M2 por el método de Casagrande (Fuente propia)

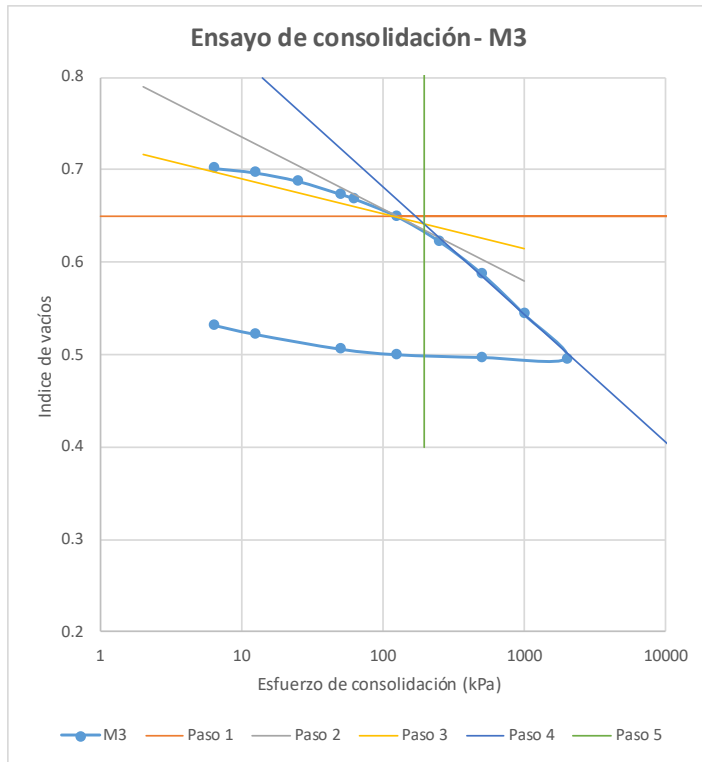


Figura 4-16 Estimación del esfuerzo de pre consolidación para la M3 por el método de Casagrande (Fuente propia)

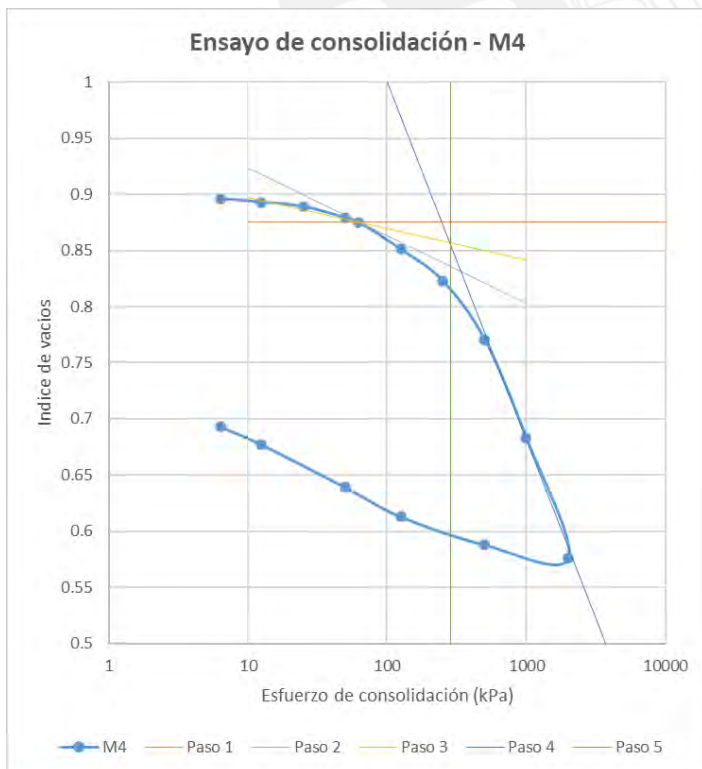


Figura 4-17 Estimación del esfuerzo de pre consolidación para la M4 por el método de Casagrande (Fuente propia)

Tabla 4-5 Resultados del esfuerzo de pre consolidación, coeficiente Cc y coeficiente Cr para las muestras representativas (Fuente propia)

| Id | σ'_p (kPa) | Cc | Cr | Cc rango de valores | Cr rango de valores |
|----|-------------------|--------|--------|---------------------|---------------------|
| M1 | 160 | 0.3285 | 0.0479 | 0.290 – 0.345 | 0.025 – 0.048 |
| M2 | 145 | 0.1598 | 0.0184 | 0.140 – 0.162 | 0.011 – 0.035 |
| M3 | 195 | 0.1741 | 0.0062 | 0.137 – 0.193 | 0.004 – 0.024 |
| M4 | 285 | 0.3499 | 0.0553 | 0.220 – 0.414 | 0.050 – 0.055 |

Luego, se calcula el esfuerzo de pre consolidación aplicado a cada capa de la siguiente manera, a modo de ejemplo, se realizará los cálculos con la M1:

Primero se calcula el esfuerzo de tapada o σ'_0 para la muestra M1, esta fue tomada debajo de 1 m de material coluvial y 2.5 m de material de saprolito superior, entonces,

$$\sigma'_0 = \text{Espesor coluvial} * PU + \text{Espesor Sap Sup} * PU$$

$$\sigma'_0 = 1 * (18.0 - 9.81) + 2.5 * (17.8 - 9.81) = 28.165 \text{ kPa}$$

Luego, al esfuerzo de pre consolidación, le restamos el esfuerzo σ'_0 y nos da el incremento del esfuerzo por pre consolidación para cada capa de suelo.

Además, se calculará el esfuerzo que produce el asentamiento por consolidación siguiendo la metodología propuesta por Das detallada en el Capítulo 2.3. Este esfuerzo es originado por el peso de la presa de relaves por encima del plato y se modelará como dos terraplenes como se muestra en la Figura 4-18.

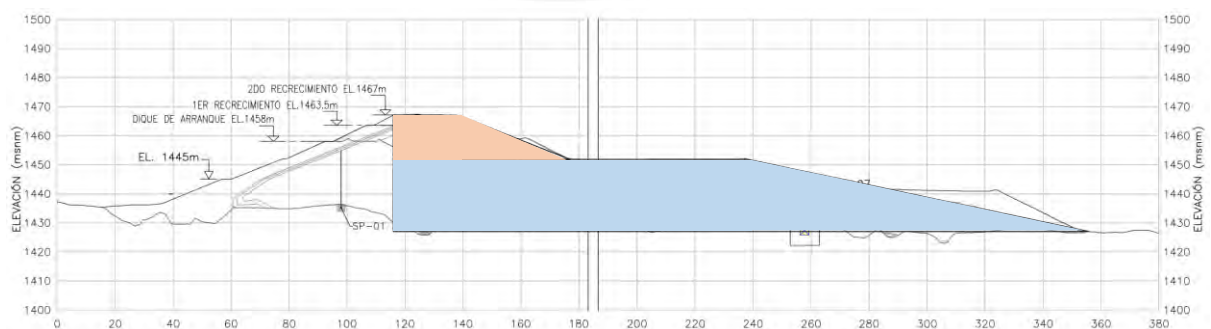


Figura 4-18 Estimación del esfuerzo ejercido por la presa como dos terraplenes (Fuente propia)

Finalmente, siguiendo las recomendaciones de Terzaghi, se dividirá el suelo bajo cada plato en capas más pequeñas para que el cálculo tenga menos fuente de error.

De esta forma, se procederá a realizar el cálculo del asentamiento por consolidación para los platos de asentamiento mostrados en la Tabla 4-6; se detallará el cálculo del SP-04 de manera explicativa.

Tabla 4-6 Estratigrafía debajo de los platos de asentamiento para los cuales se hará una estimación (Fuente propia)

| Id | Coluvial (m) | Saprolito superior (m) | Saprolito intermedio (m) | Saprolito inferior (m) |
|-----------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| SP-04 | No presenta | 0 – 7 | 7 – 17 | 17 – 27 |
| SP-05 | 0 – 7 | No presenta | 7 – 15 | 15 – 25 |
| SP-06 | 0 – 7 | No presenta | 7 – 16 | 16 – 29 |
| SP-07 | No presenta | 0 – 6 | 6 – 20 | 20 – 30 |
| SP-08 | 0 – 12 | No presenta | 12 – 17 | 17 – 28 |

Para el SP-04, se subdividirá cada estrato en pequeñas capas 1m para aumentar la precisión de los cálculos, estimando los esfuerzos actuantes sobre cada capa. Para detallar los cálculos se tomará de ejemplo la capa N°7, que va desde los 6 metros de profundidad hasta los 7 metros de profundidad y corresponde a un estrato de saprolito superior.

Primero, se calculará el esfuerzo efectivo que ejerce el suelo por su peso propio en esta capa y se determinará si es un suelo pre consolidado o normalmente consolidado de la siguiente forma

$$\sigma'_0 = \sigma_0 - u$$

$$\sigma'_0 = H_{Suelo}PU_{Suelo} - H_{agua}PU_{agua} = (6.5)(17.8) - (6.5)(9.81) = 51.94 \text{ kPa}$$

$$51.94 < 183.8 (\sigma'_p)$$

Como el esfuerzo efectivo actual es menor que el esfuerzo de pre consolidación, el suelo es considerado como pre consolidado.

Ahora, se estimará la variación del esfuerzo efectivo y su influencia empleando el método descrito en el Marco Teórico para el SP-04, tal como se muestra a continuación en la Figura 4-19.

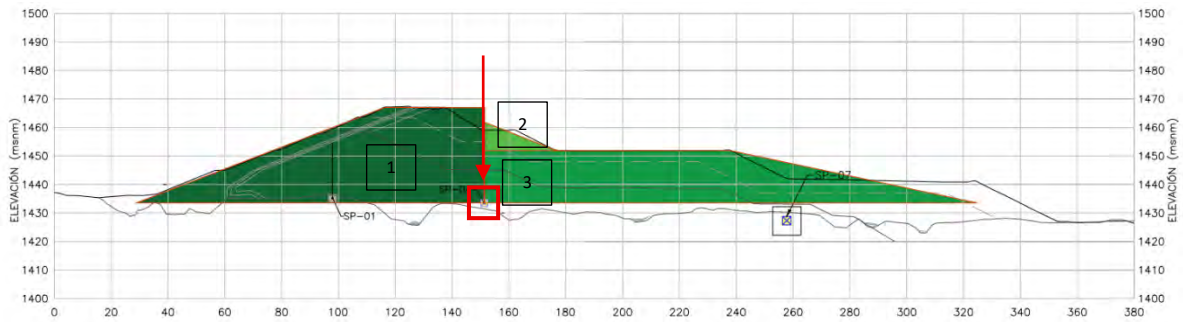


Figura 4-19 Estimación del esfuerzo ejercido por la presa sobre el SP-04 como tres terraplenes (Fuente propia)

Para el terraplén 1,

$$B_1 = 35 \text{ m}$$

$$B_2 = 88 \text{ m}$$

$$q_0 = \gamma H = (22.5) (33) = 742.5 \text{ kN/m}^2$$

$$Z = 6.5 \text{ m}$$

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{B_1 + B_2}{z}\right) - \arctan\left(\frac{B_1}{z}\right) = \arctan\left(\frac{35 + 88}{6.5}\right) - \arctan\left(\frac{35}{6.5}\right) = 0.1308$$

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{B_1}{z}\right) = \arctan\left(\frac{35}{6.5}\right) = 1.3872$$

$$\Delta\sigma = \frac{742.5}{\pi} \left[\left(\frac{35 + 88}{88} \right) (0.1308 + 1.3872) - \frac{35}{88} (1.3872) \right] = 371.07 \text{ kPa}$$

Se realizó el mismo procedimiento para cada capa y para cada terraplén, las dimensiones de muestran en la Tabla 4-7 y los resultados se muestran en la Tabla 4-8.

Tabla 4-7 Características de los terraplenes (Fuente propia)

| Parámetro | Terraplén 1 | Terraplén 2 | Terraplén 3 |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| B1 (m) ¹ | 35 | 0 | 87 |
| B2 (m) ² | 88 | 25.5 | 86 |
| H (m) | 33 | 10 | 18 |

Nota 1: Longitud de la parte rectangular

Nota 2: Longitud de la parte triangular

Tabla 4-8 Estimación del esfuerzo sobre el SP-04 debido a la presa de relaves (Fuente propia)

| Prof (m) | Terraplen 1 $\Delta\sigma$ (kPa) | Terraplen 2 $\Delta\sigma$ (kPa) | Terraplen 3 $\Delta\sigma$ (kPa) | Total $\Delta\sigma$ (kPa) |
|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| 0.5 | 371.25 | 67.55 | 202.50 | 641.30 |
| 1.5 | 371.25 | 65.74 | 202.50 | 639.49 |
| 2.5 | 371.24 | 64.00 | 202.50 | 637.74 |
| 3.5 | 371.22 | 62.33 | 202.50 | 636.05 |
| 4.5 | 371.19 | 60.72 | 202.50 | 634.41 |
| 5.5 | 371.14 | 59.17 | 202.49 | 632.80 |
| 6.5 | 371.07 | 57.68 | 202.49 | 631.24 |
| 7.5 | 370.97 | 56.25 | 202.48 | 629.70 |
| 8.5 | 370.85 | 54.87 | 202.47 | 628.20 |
| 9.5 | 370.70 | 53.55 | 202.46 | 626.71 |
| 10.5 | 370.52 | 52.28 | 202.44 | 625.23 |
| 11.5 | 370.29 | 51.05 | 202.43 | 623.77 |
| 12.5 | 370.04 | 49.87 | 202.41 | 622.32 |
| 13.5 | 369.74 | 48.74 | 202.38 | 620.86 |
| 14.5 | 369.41 | 47.65 | 202.35 | 619.41 |
| 15.5 | 369.03 | 46.60 | 202.32 | 617.95 |
| 16.5 | 368.61 | 45.59 | 202.28 | 616.48 |
| 17.5 | 368.15 | 44.61 | 202.24 | 615.00 |
| 18.5 | 367.64 | 43.67 | 202.20 | 613.51 |
| 19.5 | 367.09 | 42.77 | 202.15 | 612.01 |
| 20.5 | 366.50 | 41.90 | 202.09 | 610.49 |
| 21.5 | 365.87 | 41.06 | 202.03 | 608.95 |
| 22.5 | 365.19 | 40.24 | 201.97 | 607.40 |
| 23.5 | 364.47 | 39.46 | 201.89 | 605.82 |
| 24.5 | 363.71 | 38.70 | 201.82 | 604.23 |
| 25.5 | 362.91 | 37.97 | 201.73 | 602.61 |
| 26.5 | 362.07 | 37.27 | 201.64 | 600.98 |

Luego de calculados los esfuerzos aplicados sobre la capa de suelo en análisis, se verifica si la sumatoria de estos es superior o no al esfuerzo de pre consolidación. A modo de ejemplo, se detallan los cálculos de la capa N°7 (resaltada en amarillo).

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma = 51.94 + 631.24 = 683.17 \text{ kPa}$$

$$683.17 > \sigma'_p$$

Al ser un suelo pre consolidado pero que con la suma de la variación del esfuerzo efectivo supera al esfuerzo de pre consolidación, se usará la ecuación correspondiente propuesta por Das (2012) para el cálculo del asentamiento como se muestra a continuación

$$H = 1 \text{ m}$$

$$e_0 = 0.905$$

$$C_c = 0.329$$

$$C_r = 0.048$$

$$\sigma'_0 = 51.94 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_p = 183.8 \text{ kPa}$$

$$\Delta\sigma' = 631.24 \text{ kPa}$$

$$S = \frac{C_r H}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_0}\right) + \frac{C_c H}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_p}\right)$$

$$S = \frac{(0.048)(1)}{1 + 0.905} \log\left(\frac{183.8}{51.94}\right) + \frac{(0.329)(1)}{1 + 0.905} \log\left(\frac{51.94 + 631.24}{183.8}\right) = 0.1121 \text{ m}$$

De la misma forma, se realizará el cálculo para cada capa de suelo bajo el SP-04 hasta llegar a transición. Estos resultados, tanto del SP-04 como de los otros platos de análisis, se muestran desde la Tabla 4-9 hasta la Tabla 4-13.

Tabla 4-9 Análisis de asentamiento – SP-04 (Fuente propia)

| Alt. acum. (m) | Prof. Capa (m) | Mat. | σ'_0 (kPa) | σ'_p (kPa) | $\sigma'_0 < \sigma'_p?$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma'$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma' < \sigma'_p$ | S (m) |
|----------------|----------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------|---|-------|
| 0 | 0.5 | Sap. Sup. | 4.0 | 135.8 | Sí | 645.3 | No | 0.16 |
| 1 | 1.5 | Sap. Sup. | 12.0 | 143.8 | Sí | 651.5 | No | 0.14 |
| 2 | 2.5 | Sap. Sup. | 20.0 | 151.8 | Sí | 657.7 | No | 0.13 |
| 3 | 3.5 | Sap. Sup. | 28.0 | 159.8 | Sí | 664.0 | No | 0.13 |
| 4 | 4.5 | Sap. Sup. | 36.0 | 167.8 | Sí | 670.4 | No | 0.12 |
| 5 | 5.5 | Sap. Sup. | 43.9 | 175.8 | Sí | 676.7 | No | 0.12 |
| 6 | 6.5 | Sap. Sup. | 51.9 | 183.8 | Sí | 683.2 | No | 0.11 |
| 7 | 7.5 | Sap. Int. | 60.1 | 152.3 | Sí | 689.8 | No | 0.07 |
| 8 | 8.5 | Sap. Int. | 68.5 | 160.7 | Sí | 696.7 | No | 0.06 |

| Alt. acum. (m) | Prof. Capa (m) | Mat. | σ'_0 (kPa) | σ'_p (kPa) | $\sigma'_0 < \sigma'_p?$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma'$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma' < \sigma'_p$ | S (m) |
|----------------|----------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------|---|-------|
| 9 | 9.5 | Sap. Int. | 76.9 | 169.0 | Sí | 703.6 | No | 0.06 |
| 10 | 10.5 | Sap. Int. | 85.3 | 177.4 | Sí | 710.5 | No | 0.06 |
| 11 | 11.5 | Sap. Int. | 93.7 | 185.8 | Sí | 717.5 | No | 0.06 |
| 12 | 12.5 | Sap. Int. | 102.1 | 194.2 | Sí | 724.4 | No | 0.06 |
| 13 | 13.5 | Sap. Int. | 110.5 | 202.6 | Sí | 731.3 | No | 0.06 |
| 14 | 14.5 | Sap. Int. | 118.9 | 211.0 | Sí | 738.3 | No | 0.05 |
| 15 | 15.5 | Sap. Int. | 127.2 | 219.4 | Sí | 745.2 | No | 0.05 |
| 16 | 16.5 | Sap. Int. | 135.6 | 227.8 | Sí | 752.1 | No | 0.05 |
| 17 | 17.5 | Sap. Inf. | 144.1 | 236.1 | Sí | 759.1 | No | 0.05 |
| 18 | 18.5 | Sap. Inf. | 152.7 | 244.6 | Sí | 766.2 | No | 0.05 |
| 19 | 19.5 | Sap. Inf. | 161.3 | 253.2 | Sí | 773.3 | No | 0.05 |
| 20 | 20.5 | Sap. Inf. | 169.9 | 261.8 | Sí | 780.4 | No | 0.05 |
| 21 | 21.5 | Sap. Inf. | 178.5 | 270.4 | Sí | 787.4 | No | 0.05 |
| 22 | 22.5 | Sap. Inf. | 187.1 | 279.0 | Sí | 794.5 | No | 0.05 |
| 23 | 23.5 | Sap. Inf. | 195.7 | 287.6 | Sí | 801.5 | No | 0.05 |
| 24 | 24.5 | Sap. Inf. | 204.3 | 296.2 | Sí | 808.5 | No | 0.05 |
| 25 | 25.5 | Sap. Inf. | 212.8 | 304.8 | Sí | 815.5 | No | 0.04 |
| 26 | 26.5 | Sap. Inf. | 221.4 | 313.4 | Sí | 822.4 | No | 0.04 |

Tabla 4-10 Análisis de asentamiento – SP-05 (Fuente propia)

| Alt. acum. (m) | Prof. Capa (m) | Mat. | σ'_0 (kPa) | σ'_p (kPa) | $\sigma'_0 < \sigma'_p?$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma'$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma' < \sigma'_p$ | S (m) |
|----------------|----------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------|---|-------|
| 0 | 0.5 | Coluvial | 4.1 | 264.5 | Sí | 434.4 | No | 0.09 |
| 1 | 1.5 | Coluvial | 12.3 | 272.7 | Sí | 443.5 | No | 0.08 |
| 2 | 2.5 | Coluvial | 20.5 | 280.9 | Sí | 452.5 | No | 0.07 |
| 3 | 3.5 | Coluvial | 28.7 | 289.1 | Sí | 461.6 | No | 0.07 |
| 4 | 4.5 | Coluvial | 36.9 | 297.3 | Sí | 470.7 | No | 0.06 |
| 5 | 5.5 | Coluvial | 45.0 | 305.5 | Sí | 479.9 | No | 0.06 |
| 6 | 6.5 | Coluvial | 53.2 | 313.7 | Sí | 489.0 | No | 0.06 |
| 7 | 7.5 | Sap. Int. | 61.5 | 153.7 | Sí | 498.3 | No | 0.05 |

| Alt. acum. (m) | Prof. Capa (m) | Mat. | σ'_0 (kPa) | σ'_p (kPa) | $\sigma'_0 < \sigma'_p?$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma'$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma' < \sigma'_p$ | S (m) |
|----------------|----------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------|---|-------|
| 8 | 8.5 | Sap. Int. | 69.9 | 162.1 | Sí | 507.7 | No | 0.05 |
| 9 | 9.5 | Sap. Int. | 78.3 | 170.4 | Sí | 517.1 | No | 0.05 |
| 10 | 10.5 | Sap. Int. | 86.7 | 178.8 | Sí | 526.5 | No | 0.05 |
| 11 | 11.5 | Sap. Int. | 95.1 | 187.2 | Sí | 535.9 | No | 0.05 |
| 12 | 12.5 | Sap. Int. | 103.5 | 195.6 | Sí | 545.3 | No | 0.04 |
| 13 | 13.5 | Sap. Int. | 111.9 | 204.0 | Sí | 554.7 | No | 0.04 |
| 14 | 14.5 | Sap. Int. | 120.3 | 212.4 | Sí | 564.1 | No | 0.04 |
| 15 | 15.5 | Sap. Inf. | 128.7 | 220.7 | Sí | 573.6 | No | 0.04 |
| 16 | 16.5 | Sap. Inf. | 137.3 | 229.3 | Sí | 583.1 | No | 0.04 |
| 17 | 17.5 | Sap. Inf. | 145.9 | 237.9 | Sí | 592.7 | No | 0.04 |
| 18 | 18.5 | Sap. Inf. | 154.5 | 246.4 | Sí | 602.2 | No | 0.04 |
| 19 | 19.5 | Sap. Inf. | 163.1 | 255.0 | Sí | 611.7 | No | 0.04 |
| 20 | 20.5 | Sap. Inf. | 171.7 | 263.6 | Sí | 621.1 | No | 0.04 |
| 21 | 21.5 | Sap. Inf. | 180.3 | 272.2 | Sí | 630.5 | No | 0.04 |
| 22 | 22.5 | Sap. Inf. | 188.9 | 280.8 | Sí | 639.9 | No | 0.04 |
| 23 | 23.5 | Sap. Inf. | 197.5 | 289.4 | Sí | 649.3 | No | 0.04 |
| 24 | 24.5 | Sap. Inf. | 206.1 | 298.0 | Sí | 658.7 | No | 0.04 |

Tabla 4-11 Análisis de asentamiento – SP-06 (Fuente propia)

| Alt. acum. (m) | Prof. Capa (m) | Mat. | σ'_0 (kPa) | σ'_p (kPa) | $\sigma'_0 < \sigma'_p?$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma'$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma' < \sigma'_p$ | S (m) |
|----------------|----------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------|---|-------|
| 0 | 0.5 | Coluvial | 4.1 | 264.5 | Sí | 547.5 | No | 0.11 |
| 1 | 1.5 | Coluvial | 12.3 | 272.7 | Sí | 555.7 | No | 0.10 |
| 2 | 2.5 | Coluvial | 20.5 | 280.9 | Sí | 563.8 | No | 0.09 |
| 3 | 3.5 | Coluvial | 28.7 | 289.1 | Sí | 572.0 | No | 0.08 |
| 4 | 4.5 | Coluvial | 36.9 | 297.3 | Sí | 580.1 | No | 0.08 |
| 5 | 5.5 | Coluvial | 45.0 | 305.5 | Sí | 588.2 | No | 0.08 |
| 6 | 6.5 | Coluvial | 53.2 | 313.7 | Sí | 596.2 | No | 0.07 |
| 7 | 7.5 | Sap. Int. | 61.5 | 153.7 | Sí | 604.3 | No | 0.06 |
| 8 | 8.5 | Sap. Int. | 69.9 | 162.1 | Sí | 612.4 | No | 0.06 |

| Alt. acum. (m) | Prof. Capa (m) | Mat. | σ'_0 (kPa) | σ'_p (kPa) | $\sigma'_0 < \sigma'_p?$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma'$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma' < \sigma'_p$ | S (m) |
|----------------|----------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------|---|-------|
| 9 | 9.5 | Sap. Int. | 78.3 | 170.4 | Sí | 620.5 | No | 0.06 |
| 10 | 10.5 | Sap. Int. | 86.7 | 178.8 | Sí | 628.5 | No | 0.05 |
| 11 | 11.5 | Sap. Int. | 95.1 | 187.2 | Sí | 636.4 | No | 0.05 |
| 12 | 12.5 | Sap. Int. | 103.5 | 195.6 | Sí | 644.3 | No | 0.05 |
| 13 | 13.5 | Sap. Int. | 111.9 | 204.0 | Sí | 652.2 | No | 0.05 |
| 14 | 14.5 | Sap. Int. | 120.3 | 212.4 | Sí | 660.0 | No | 0.05 |
| 15 | 15.5 | Sap. Int. | 128.6 | 220.8 | Sí | 667.7 | No | 0.05 |
| 16 | 16.5 | Sap. Inf. | 137.1 | 229.1 | Sí | 675.5 | No | 0.05 |
| 17 | 17.5 | Sap. Inf. | 145.7 | 237.7 | Sí | 683.3 | No | 0.05 |
| 18 | 18.5 | Sap. Inf. | 154.3 | 246.2 | Sí | 691.1 | No | 0.05 |
| 19 | 19.5 | Sap. Inf. | 162.9 | 254.8 | Sí | 698.9 | No | 0.05 |
| 20 | 20.5 | Sap. Inf. | 171.5 | 263.4 | Sí | 706.6 | No | 0.04 |
| 21 | 21.5 | Sap. Inf. | 180.1 | 272.0 | Sí | 714.2 | No | 0.04 |
| 22 | 22.5 | Sap. Inf. | 188.7 | 280.6 | Sí | 721.9 | No | 0.04 |
| 23 | 23.5 | Sap. Inf. | 197.3 | 289.2 | Sí | 729.5 | No | 0.04 |
| 24 | 24.5 | Sap. Inf. | 205.9 | 297.8 | Sí | 737.0 | No | 0.04 |
| 25 | 25.5 | Sap. Inf. | 214.4 | 306.4 | Sí | 744.5 | No | 0.04 |
| 26 | 26.5 | Sap. Inf. | 223.0 | 315.0 | Sí | 752.0 | No | 0.04 |
| 27 | 27.5 | Sap. Inf. | 231.6 | 323.6 | Sí | 759.5 | No | 0.04 |
| 28 | 28.5 | Sap. Inf. | 240.2 | 332.1 | Sí | 766.9 | No | 0.04 |

Tabla 4-12 Análisis de asentamiento – SP-07 (Fuente propia)

| Alt. acum. (m) | Prof. Capa (m) | Mat. | σ'_0 (kPa) | σ'_p (kPa) | $\sigma'_0 < \sigma'_p?$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma'$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma' < \sigma'_p$ | S (m) |
|----------------|----------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------|---|-------|
| 0 | 0.5 | Sap. Sup. | 4.0 | 135.8 | Sí | 397.7 | No | 0.12 |
| 1 | 1.5 | Sap. Sup. | 12.0 | 143.8 | Sí | 405.7 | No | 0.10 |
| 2 | 2.5 | Sap. Sup. | 20.0 | 151.8 | Sí | 413.7 | No | 0.10 |
| 3 | 3.5 | Sap. Sup. | 28.0 | 159.8 | Sí | 421.7 | No | 0.09 |
| 4 | 4.5 | Sap. Sup. | 36.0 | 167.8 | Sí | 429.7 | No | 0.09 |
| 5 | 5.5 | Sap. Sup. | 43.9 | 175.8 | Sí | 437.7 | No | 0.08 |

| Alt. acum. (m) | Prof. Capa (m) | Mat. | σ'_0 (kPa) | σ'_p (kPa) | $\sigma'_0 < \sigma'_p?$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma'$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma' < \sigma'_p$ | S (m) |
|----------------|----------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------|---|-------|
| 6 | 6.5 | Sap. Inf. | 52.2 | 144.2 | Sí | 445.9 | No | 0.05 |
| 7 | 7.5 | Sap. Inf. | 60.8 | 152.8 | Sí | 454.5 | No | 0.05 |
| 8 | 8.5 | Sap. Inf. | 69.4 | 161.3 | Sí | 463.1 | No | 0.05 |
| 9 | 9.5 | Sap. Inf. | 78.0 | 169.9 | Sí | 471.6 | No | 0.05 |
| 10 | 10.5 | Sap. Inf. | 86.6 | 178.5 | Sí | 480.2 | No | 0.05 |
| 11 | 11.5 | Sap. Inf. | 95.2 | 187.1 | Sí | 488.7 | No | 0.04 |
| 12 | 12.5 | Sap. Inf. | 103.8 | 195.7 | Sí | 497.2 | No | 0.04 |
| 13 | 13.5 | Sap. Inf. | 112.4 | 204.3 | Sí | 505.8 | No | 0.04 |
| 14 | 14.5 | Sap. Inf. | 121.0 | 212.9 | Sí | 514.3 | No | 0.04 |
| 15 | 15.5 | Sap. Inf. | 129.5 | 221.5 | Sí | 522.8 | No | 0.04 |
| 16 | 16.5 | Sap. Inf. | 138.1 | 230.1 | Sí | 531.3 | No | 0.04 |
| 17 | 17.5 | Sap. Inf. | 146.7 | 238.7 | Sí | 539.7 | No | 0.04 |
| 18 | 18.5 | Sap. Inf. | 155.3 | 247.2 | Sí | 548.2 | No | 0.04 |
| 19 | 19.5 | Sap. Inf. | 163.9 | 255.8 | Sí | 556.6 | No | 0.04 |
| 20 | 20.5 | Sap. Inf. | 172.5 | 264.4 | Sí | 565.1 | No | 0.03 |
| 21 | 21.5 | Sap. Inf. | 181.1 | 273.0 | Sí | 573.5 | No | 0.03 |
| 22 | 22.5 | Sap. Inf. | 189.7 | 281.6 | Sí | 581.9 | No | 0.03 |
| 23 | 23.5 | Sap. Inf. | 198.3 | 290.2 | Sí | 590.3 | No | 0.03 |
| 24 | 24.5 | Sap. Inf. | 206.9 | 298.8 | Sí | 598.7 | No | 0.03 |
| 25 | 25.5 | Sap. Inf. | 215.4 | 307.4 | Sí | 607.0 | No | 0.03 |
| 26 | 26.5 | Sap. Inf. | 224.0 | 316.0 | Sí | 615.4 | No | 0.03 |
| 27 | 27.5 | Sap. Inf. | 232.6 | 324.6 | Sí | 623.7 | No | 0.03 |
| 28 | 28.5 | Sap. Inf. | 241.2 | 333.1 | Sí | 632.0 | No | 0.03 |
| 29 | 29.5 | Sap. Inf. | 249.8 | 341.7 | Sí | 640.3 | No | 0.03 |

Tabla 4-13 Análisis de asentamiento – SP-08 (Fuente propia)

| Alt. acum. (m) | Prof. Capa (m) | Mat. | σ'_0 (kPa) | σ'_p (kPa) | $\sigma'_0 < \sigma'_p?$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma'$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma' < \sigma'_p$ | S (m) |
|----------------|----------------|----------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------|---|-------|
| 0 | 0.5 | Coluvial | 4.1 | 264.5 | Sí | 384.1 | No | 0.08 |
| 1 | 1.5 | Coluvial | 12.3 | 272.7 | Sí | 393.0 | No | 0.07 |

| Alt. acum. (m) | Prof. Capa (m) | Mat. | σ'_0 (kPa) | σ'_p (kPa) | $\sigma'_0 < \sigma'_p?$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma'$ | $\sigma'_0 + \Delta\sigma' < \sigma'_p$ | S (m) |
|----------------|----------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------|---|-------|
| 2 | 2.5 | Coluvial | 20.5 | 280.9 | Sí | 401.9 | No | 0.06 |
| 3 | 3.5 | Coluvial | 28.7 | 289.1 | Sí | 410.8 | No | 0.06 |
| 4 | 4.5 | Coluvial | 36.9 | 297.3 | Sí | 419.7 | No | 0.05 |
| 5 | 5.5 | Coluvial | 45.0 | 305.5 | Sí | 428.7 | No | 0.05 |
| 6 | 6.5 | Coluvial | 53.2 | 313.7 | Sí | 437.7 | No | 0.05 |
| 7 | 7.5 | Coluvial | 61.4 | 321.9 | Sí | 446.8 | No | 0.05 |
| 8 | 8.5 | Coluvial | 69.6 | 330.0 | Sí | 455.8 | No | 0.05 |
| 9 | 9.5 | Coluvial | 77.8 | 338.2 | Sí | 464.8 | No | 0.04 |
| 10 | 10.5 | Coluvial | 86.0 | 346.4 | Sí | 473.9 | No | 0.04 |
| 11 | 11.5 | Coluvial | 94.2 | 354.6 | Sí | 482.9 | No | 0.04 |
| 12 | 12.5 | Sap. Int. | 102.5 | 194.6 | Sí | 492.0 | No | 0.04 |
| 13 | 13.5 | Sap. Int. | 110.9 | 203.0 | Sí | 501.3 | No | 0.04 |
| 14 | 14.5 | Sap. Int. | 119.3 | 211.4 | Sí | 510.5 | No | 0.04 |
| 15 | 15.5 | Sap. Int. | 127.6 | 219.8 | Sí | 519.7 | No | 0.04 |
| 16 | 16.5 | Sap. Int. | 136.0 | 228.2 | Sí | 528.9 | No | 0.04 |
| 17 | 17.5 | Sap. Inf. | 144.5 | 236.5 | Sí | 538.1 | No | 0.04 |
| 18 | 18.5 | Sap. Inf. | 153.1 | 245.0 | Sí | 547.5 | No | 0.04 |
| 19 | 19.5 | Sap. Inf. | 161.7 | 253.6 | Sí | 556.8 | No | 0.04 |
| 20 | 20.5 | Sap. Inf. | 170.3 | 262.2 | Sí | 566.0 | No | 0.03 |
| 21 | 21.5 | Sap. Inf. | 178.9 | 270.8 | Sí | 575.3 | No | 0.03 |
| 22 | 22.5 | Sap. Inf. | 187.5 | 279.4 | Sí | 584.5 | No | 0.03 |
| 23 | 23.5 | Sap. Inf. | 196.1 | 288.0 | Sí | 593.7 | No | 0.03 |
| 24 | 24.5 | Sap. Inf. | 204.7 | 296.6 | Sí | 602.9 | No | 0.03 |
| 25 | 25.5 | Sap. Inf. | 213.2 | 305.2 | Sí | 612.0 | No | 0.03 |
| 26 | 26.5 | Sap. Inf. | 221.8 | 313.8 | Sí | 621.1 | No | 0.03 |
| 27 | 27.5 | Sap. Inf. | 230.4 | 322.4 | Sí | 630.2 | No | 0.03 |

Finalmente, luego de hallar los asentamientos totales, se calcula el porcentaje de consolidación ocurrido para poder estimar cuanto del asentamiento total ocurrió hasta el momento en que se tomaron las mediciones en las placas de asentamiento.

Para este cálculo, se considera la potencia total de los estratos compresibles bajo el plato de asentamiento en análisis y un promedio, luego de eliminar los percentiles 15 y 85, con valor de C_v de $0.033 \text{ cm}^2/\text{s}$. A continuación, se presentan como ejemplo los cálculos para el porcentaje de consolidación para el SP-04

$$C_v = 0.033 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$t = 1150 \text{ días}$$

Hdr = 27 m (suelo compresible formado por los tres tipos de saprolito)

$$T = \frac{C_v t}{H_{dr}^2} = \frac{(0.033)(1150 \times 24 \times 60 \times 60)}{(2700)^2} = 0.4520$$

Como $T = 0.4520 > 0.2827$, se usará la siguiente ecuación

$$U (\%) = 100 \left(1 - \frac{8}{\pi^2} e^{\left(\frac{-\pi^2}{4} T\right)} \right) = 100 \left(1 - \frac{8}{\pi^2} e^{\left(\frac{-\pi^2}{4} 0.4520\right)} \right)$$

$$U (\%) = 73.43\%$$

Esto quiere decir que, en el tiempo ya transcurrido, el suelo se ha asentado el 73.43% del valor total estimado. A continuación, en la Tabla 4-14, se muestran los porcentajes de consolidación para cada caso de estudio.

Tabla 4-14 Porcentaje de consolidación de estratos compresibles para cada instrumento (Fuente propia)

| Id | Estrato compresible (m) | Porcentaje de consolidación (%) |
|-----------|--------------------------------|--|
| SP-04 | 27 | 73.4 |
| SP-05 | 25 | 76.9 |
| SP-06 | 29 | 65.5 |
| SP-07 | 30 | 46.3 |
| SP-08 | 28 | 49.4 |

4.3. Discusión de resultados

En la Tabla 4-15, se muestran los resultados teóricos de los análisis de asentamiento por consolidación y los resultados obtenidos de la medición de los instrumentos en campo. El detalle de los cálculos se encuentra en el Anexo C.

Tabla 4-15 Comparación de resultados (Fuente propia)

| Id | Asent. Teórico final (m) | Tiempo instalado (días) | Cons. (%) | Asent. Teórico cons. (m) | Asent. medido (m) | Error (%) |
|-----------|---------------------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------|
| SP-04 | 1.96 | 1150 | 73.4 | 1.44 | 1.296 | 11.1 |
| SP-05 | 1.26 | 1148 | 76.9 | 0.97 | 0.648 | 49.5 |
| SP-06 | 1.65 | 1037 | 65.5 | 1.08 | 0.482 | 123.9 |
| SP-07 | 1.49 | 541 | 46.3 | 0.69 | 0.675 | 2.2 |
| SP-08 | 1.21 | 522 | 49.4 | 0.60 | 0.334 | 78.8 |

A continuación, se presentan los principales hallazgos:

- Los valores de asentamiento teórico por consolidación total son mayores que los medidos en campo.
- Los valores de porcentaje de consolidación son menores a 100%, quiere decir que el suelo aún no ha culminado su proceso de consolidación, esperándose mayores asentamientos en un futuro.
- El error porcentual del SP-04 y SP-07 entre su asentamiento teórico corregido por consolidación y su asentamiento medido en campo es de 11% y 2% aproximadamente. Mientras que para el SP-05, SP-06 y SP-08 son 50%, 124% y 79%.
- La principal diferencia del SP-04 y SP-07 (Grupo 1) con los SP-05, SP-06 y SP-08 (Grupo 2), es que el Grupo 1 se encuentra sobre un suelo compuesto únicamente de saprolito como material compresible, mientras que el Grupo 2 se encuentra sobre un suelo que incluye un estrato coluvial como material compresible.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las principales conclusiones:

- Las ecuaciones para la estimación de asentamientos por consolidación, aplicadas en el caso de estudio, demuestran tener un margen de error de 10% como máximo cuando los estratos compresibles están conformados únicamente por saprolito (suelo residual de matriz fina). Además, las mismas ecuaciones demuestran tener márgenes de error mayores a 100% cuando existe un estrato coluvial (suelo sedimentario de matriz fino-arenosa con presencia de gravas y bolonería). Con base en lo anterior mencionado, se concluye que, para el caso de estudio, las ecuaciones empleadas sí son aplicables para la correcta estimación de los asentamientos por consolidación en suelos en los que no exista presencia de gravas o bolonería.
- La diferencia en la precisión de las ecuaciones empleadas para el caso de estudio se debe a la presencia de gravas y bolonería en el estrato de suelo coluvial. Esto ocurre debido a que las gravas y bolones tienen un módulo de elasticidad mucho mayor y se consideran indeformables. Además, los ensayos realizados en este estrato corresponden a muestras de la parte fina de este material, por lo que no deberían ser considerados representativos. Otra posible fuente de error es que, debido a la heterogeneidad del estrato coluvial, las placas de asentamientos instaladas en este material hayan sido colocadas sobre bolonería de gran tamaño imposibilitando que el instrumento registre el asentamiento de los otros estratos.
- Adicionalmente, como se pudo observar en las gráficas de los ensayos de consolidación, existe variabilidad entre los resultados de un mismo estrato, motivo por el cual se empleó un resultado representativo que englobe los demás resultados. Esta variabilidad representa que, si bien distintas muestras de diferentes perforaciones son tomadas de un mismo estrato, no siempre tendrán las mismas propiedades y esto puede inducir a errores al momento de realizar los cálculos.
- Se concluye que las ecuaciones empleadas para la estimación de asentamientos por consolidación permiten obtener resultados dentro de un rango de variabilidad aceptable cuando se aplican sobre suelos finos, siendo estos valores útiles para futuras etapas de diseño de ingeniería. Se recomienda evaluar su aplicabilidad en otros proyectos que tengan condiciones similares a las del presente caso de estudio.

- Finalmente, se recomiendan estudios complementarios para una mejor caracterización de los estratos bajo las placas de asentamiento como lo serían perforaciones adicionales o estudios geo eléctricos. Además, estos estudios permitirían recabar información adicional para disminuir la variabilidad de resultados en muestras de un mismo estrato. Con respecto a los suelos heterogéneos con presencia de gravas y bolonería, como lo es el suelo coluvial, se recomiendan ensayos de consolidación a gran escala para una mejor estimación de los asentamientos.



BIBLIOGRAFÍA

- ASTM International (2011) Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. West Conshohocken, Estados Unidos.
- Burton, Bill (1998) Earthworks with Wet, Fine Grained Tropical Residual Soils. Alberta: University of Alberta.
- Das, Braja (2012) Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones (7ma edición). Mexico DF: CENGAGE Learning.
- Day, Robert W. (2012). Geotechnical Engineer's Portable Handbook (2da edición). Washington DC, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- FCEIA. (2011) Consolidación unidimensional de suelos. Rosario, Argentina.
- Klohn Crippen Berger S.A. (2022). Stage 3 and Stage 4 Dam Raises Detailed Design Design Basis Memorandum [reporte]. Lima.
- Klohn Crippen Berger S.A. (2021). Technical Specifications Instrumentation [reporte]. Lima.
- Klohn Crippen Berger S.A. (2022). Tailings Storage Facility Stage 1 and Stage 2 Dam Raise Construction Summary Report. Lima.
- Klohn Crippen Berger S.A. (2022). Engineering Services TSF Monthly Report – May 2022. Lima.
- Klohn Crippen Berger S.A. (2020). Engineering Services 2021-2022 Geotechnical Investigations Data Report. Lima.
- Robles, Raul (2021). Estabilización mecánica del saprolito para uso como núcleo de baja permeabilidad de una presa de relaves bajo un entorno de selva tropical [informe]. Lima.

Servicio Geológico Mexicano (sf). ¿Qué es la Geotecnia? México Gobierno de la Republica.

Wesley, Laurence D. (2010) Geotechnical Engineering in Residual Soils. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

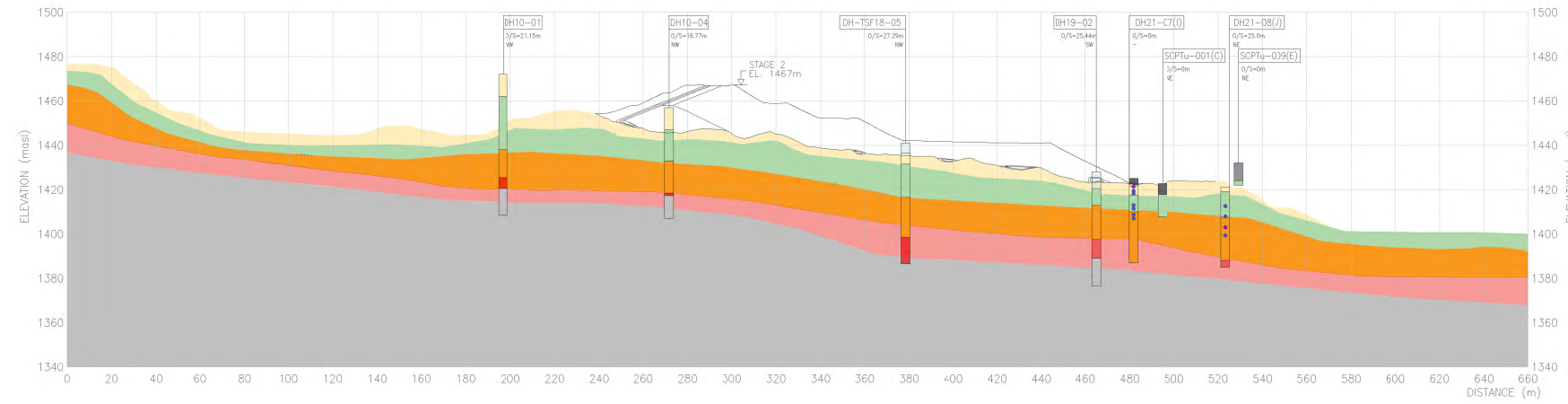
Zegarra, Jorge. (2016) Teoría de consolidación y cálculo de asentamientos. Mecánica de Suelos. (pp.1-38). Lima, Perú.

Zegarra, Jorge. (2020) Consolidación Unidimensional. Laboratorio de Mecánica de Suelos Guía de Ensayos. (pp.67-77). Lima, Perú.

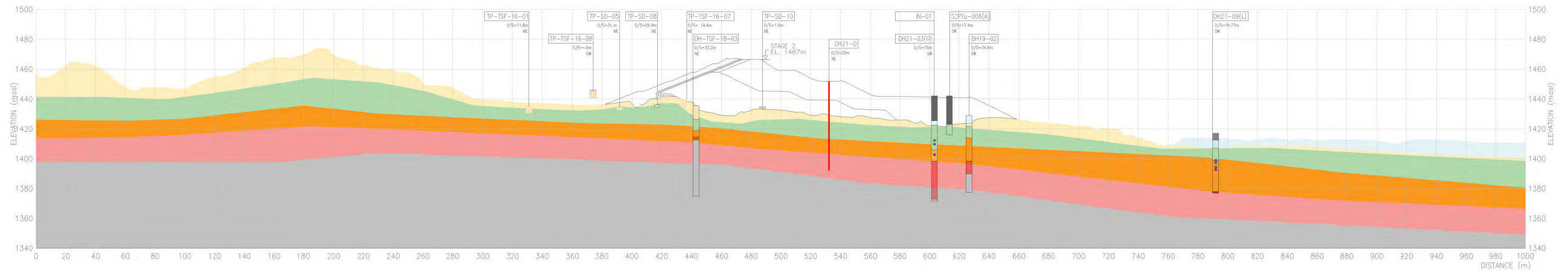




ANEXO A: PERFILES ESTRATIGRAFICOS DE EL PROYECTO



GEOLOGICAL SECTION
SCALE A



GEOLOGICAL SECTION
SCALE A



FOUNDATION UNIT

- UPPER SAPROLITE FOUNDATION
- MIDDLE SAPROLITE FOUNDATION
- LOWER SAPROLITE FOUNDATION
- COLLUVIAL FOUNDATION
- TRANSITION
- BEDROCK

LEGEND

- SHELBY SAMPLE COLLECTED
- SHELBY SAMPLE FAILED

NOTES:

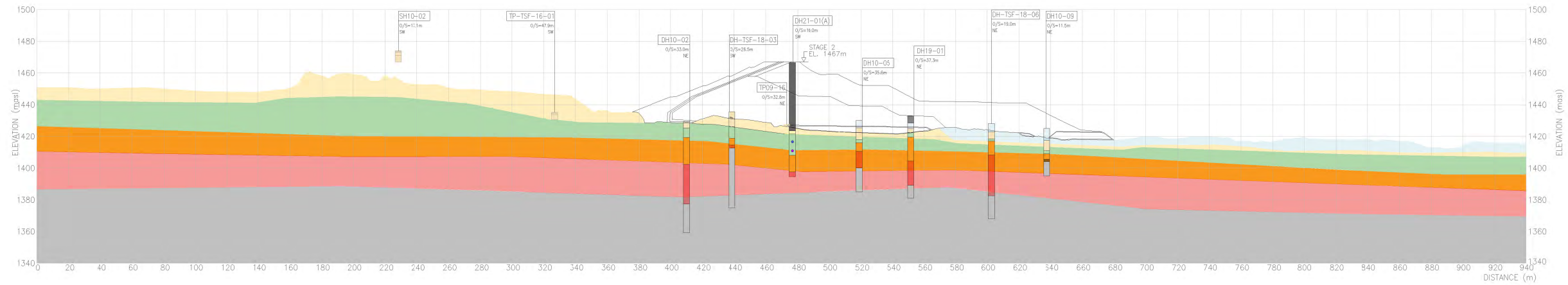
1. DATUM_WGS84 ZONE 17S.
2. VERTICAL DATUM: SEA LEVEL EGM96.
3. INSTRUMENTS AND CABLE LOCATIONS SURVEYED BY LUG SURVEY STAFF.



DRAFT

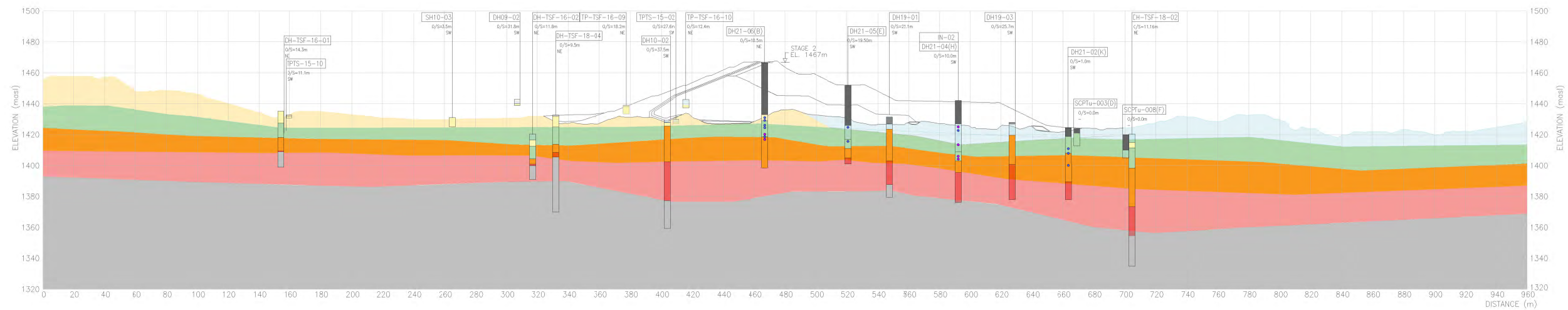
| | | |
|-------------------|---|----------------|
| | CLIENT | PROJECT |
| | | |
| | TITLE GEOLOGICAL PROFILE SECTION 1A AND SECTION 1 | |
| SCALE AS SHOWN | PROJECT No. | FIG. No. 02 |
| | | REV. |

KCB-FIG-A1-E



GEOLOGICAL SECTION
SCALE A

2
FIG. 1



GEOLOGICAL SECTION
SCALE A

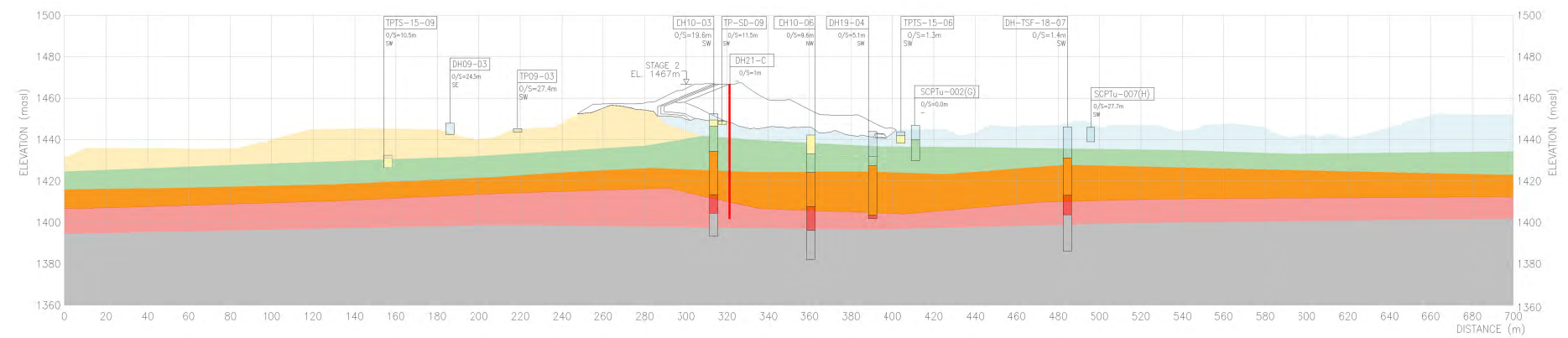
3
FIG. 1

FOUNDATION UNIT

- UPPER SAPROLITE FOUNDATION
- MIDDLE SAPROLITE FOUNDATION
- LOWER SAPROLITE FOUNDATION
- COLLUVIAL FOUNDATION
- TRANSITION
- BEDROCK

LEGEND

- SHELBY SAMPLE COLLECTED
- SHELBY SAMPLE FAILED



GEOLOGICAL SECTION
SCALE A

4
FIG. 1

NOTES:

1. DATUM_WGS84 ZONE 17S.
2. VERTICAL DATUM: SEA LEVEL EGM96.
3. INSTRUMENTS AND CABLE LOCATIONS SURVEYED BY LUG SURVEY STAFF.



DRAFT

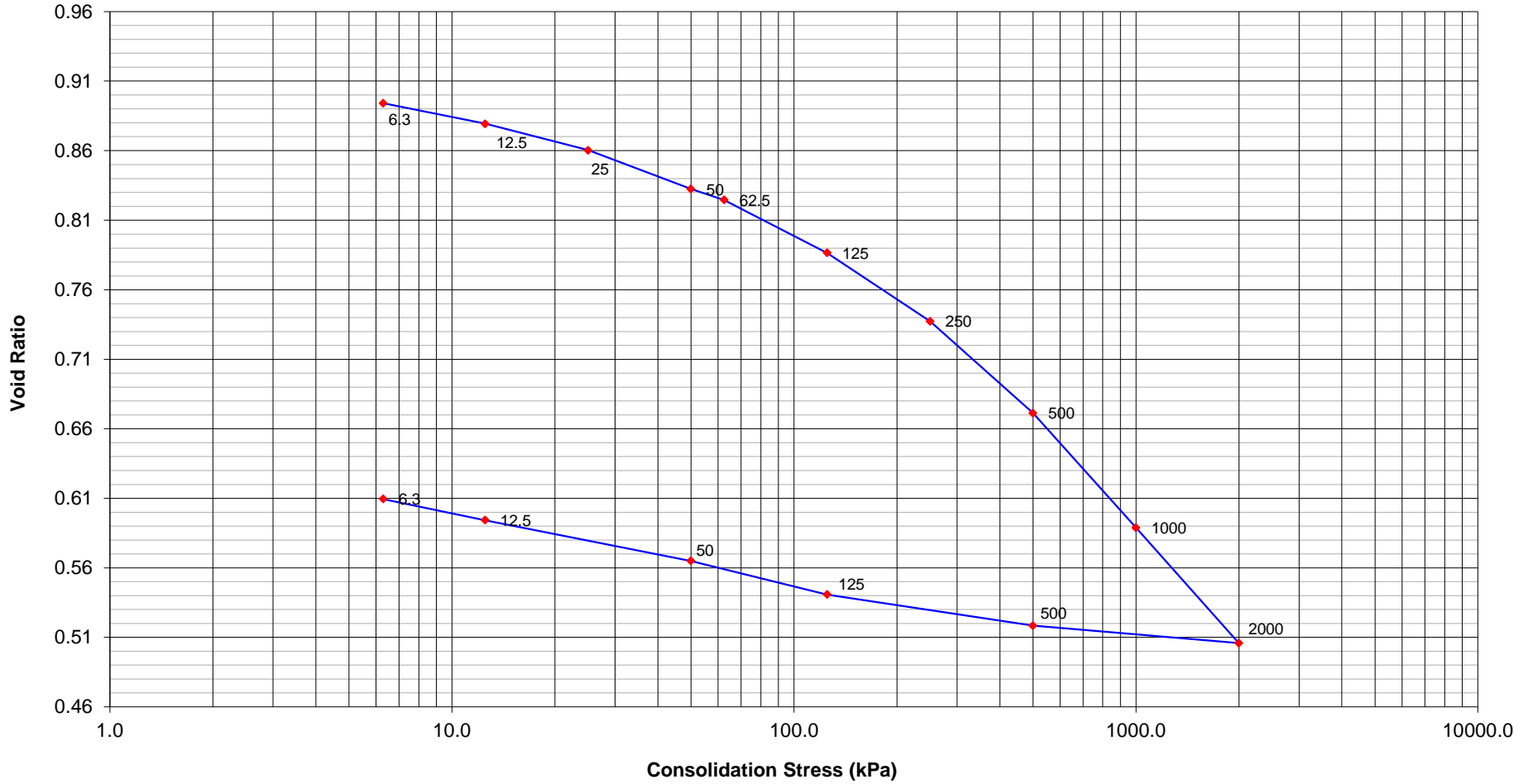
| | | | | | | |
|-------|---|-------------|---------|----------|----|------|
| | CLIENT | | PROJECT | | | |
| | | | | | | |
| | TITLE GEOLOGICAL PROFILE SECTION 2, SECTION 3 AND SECTION 4 | | | | | |
| SCALE | AS SHOWN | PROJECT No. | | FIG. No. | 03 | REV. |

KGB-FIG-A-1



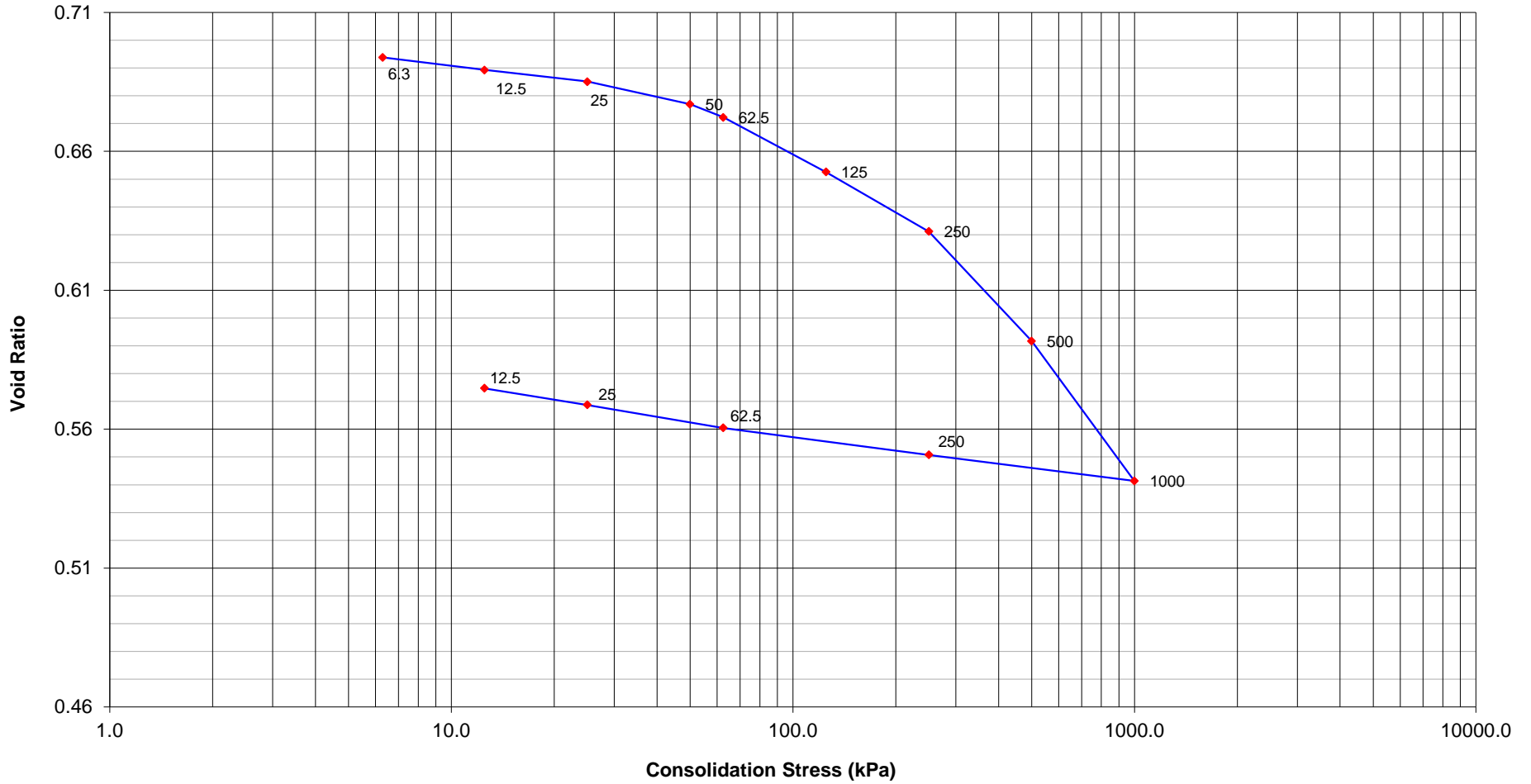
ANEXO B: CERTIFICADOS DE LOS ENSAYOS EMPLEADOS

Consolidation Test - DH21-07 / Shelby 3 / 6.0 m e - log(p)



| | | | | |
|--|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|
| | PROJECT NO.: | | | |
| | PROJECT: | | | |
| | LOCATION: | Ecuador | DATE TESTED: | 2022-02-28 |
| | SAMPLE NO.: | DH21-07 - Shelby 3 - 6.0m | DEPTH: | Extruded from Shelby tube |
| | TESTED BY: | JG | CHECKED BY: | BY |

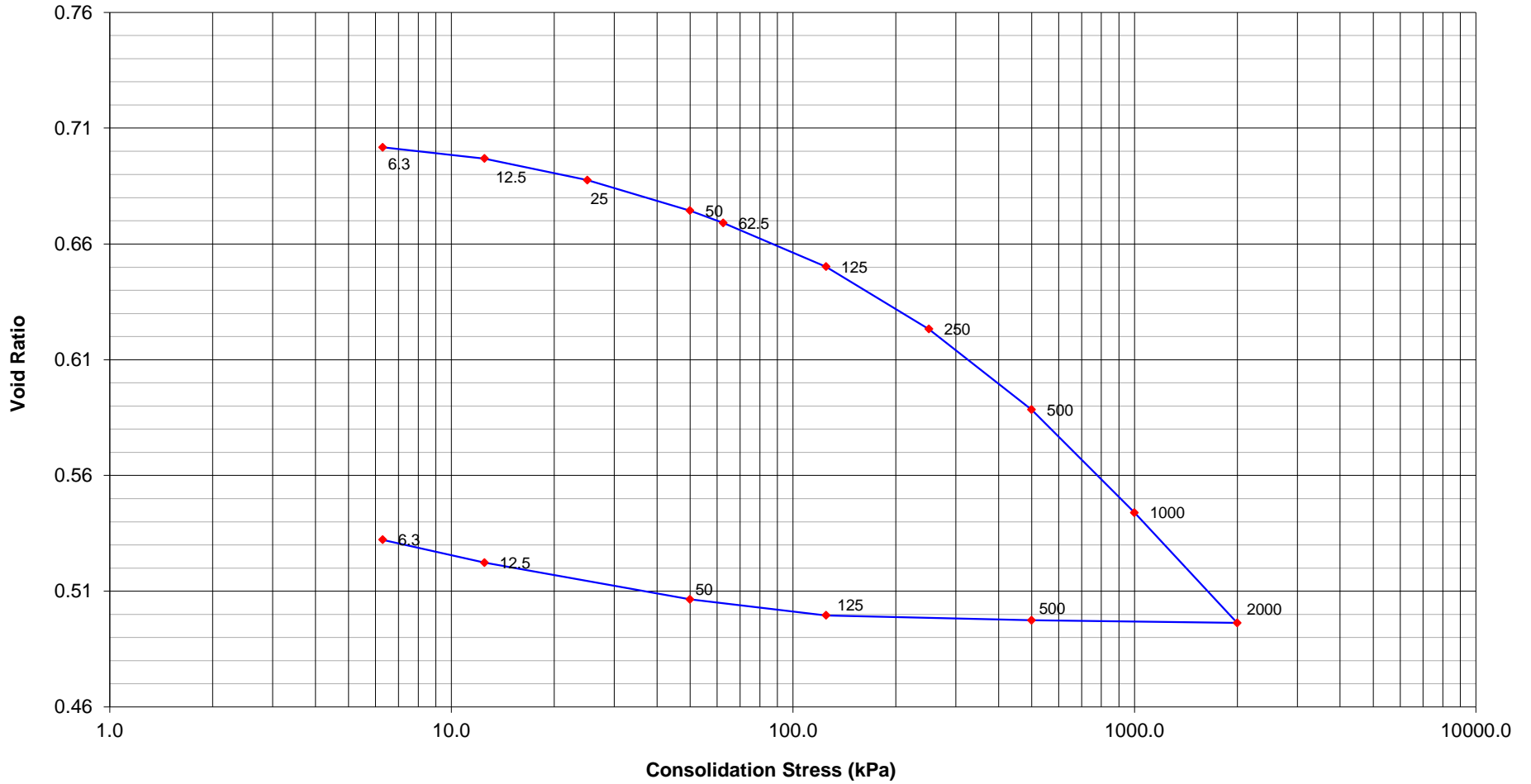
Consolidation Test - DH21-02 / Shelby 1 / 12.0 m e - log(p)



| | | | | |
|--|---------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------|
| | PROJECT NO.: | | | |
| | PROJECT: | | | |
| | LOCATION: | Ecuador | DATE TESTED: | 2022-02-21 |
| | SAMPLE NO.: | DH21-02 - Shelby 1 - 12.0m | DEPTH: | Extruded from Shelby tube |
| | TESTED BY: | JG | CHECKED BY: | BY |

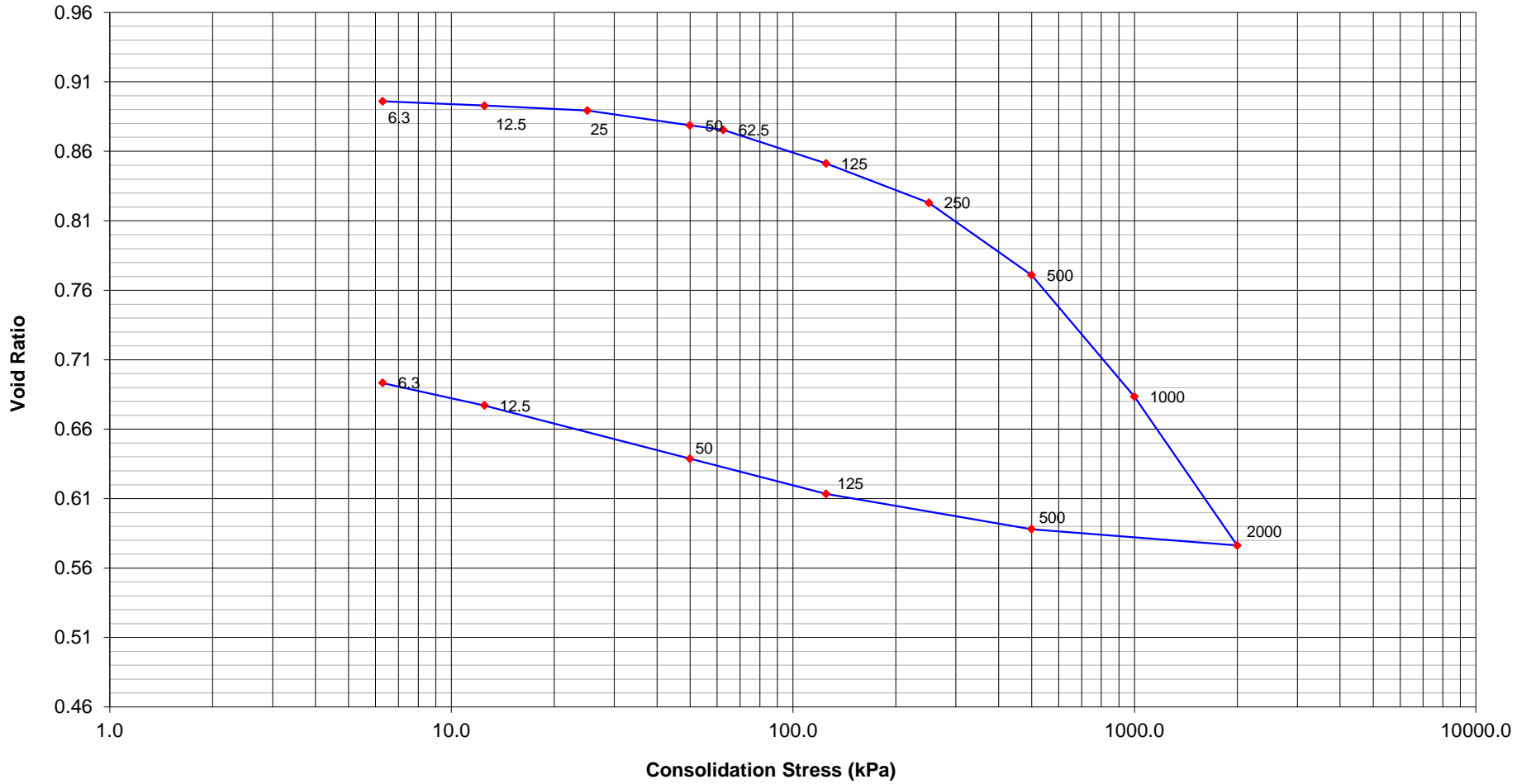
Consolidation Test - DH21-07 / Shelby 6 / 15.0 m

e - log(p)



| | | | | |
|--|--------------|----------------------------|--------------|---------------------------|
| | PROJECT NO.: | | | |
| | PROJECT: | | | |
| | LOCATION: | Ecuador | DATE TESTED: | 2022-02-28 |
| | SAMPLE NO.: | DH21-07 - Shelby 6 - 15.0m | DEPTH: | Extruded from Shelby tube |
| | TESTED BY: | JG | CHECKED BY: | BY |

Consolidation Test - DH21-04 / Shelby 2 / 18.0 m e - log(p)



| | | | | |
|--|--------------|----------------------------|--------------|---------------------------|
| | PROJECT NO.: | | | |
| | PROJECT: | | | |
| | LOCATION: | Ecuador | DATE TESTED: | 2022-02-11 |
| | SAMPLE NO.: | DH21-04 - Shelby 2 - 18.0m | DEPTH: | Extruded from Shelby tube |
| | TESTED BY: | JG | CHECKED BY: | BY |



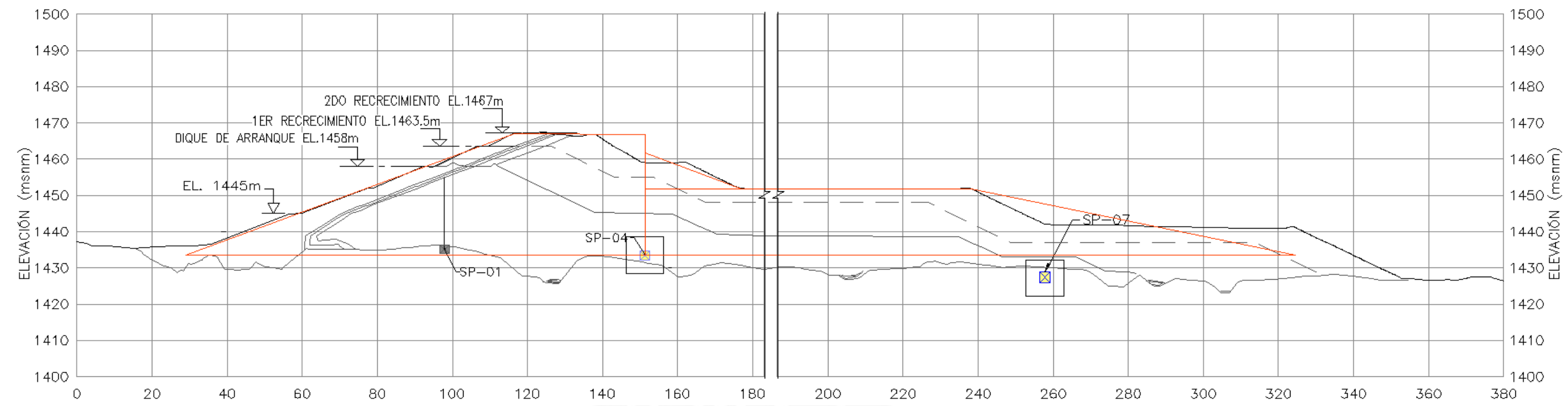
ANEXO C: CÁLCULOS PARA LA ESTIMACIÓN DE RANGOS

SP-04

| | | | | | |
|-------------------------|------|-------|-----|-----------|----------|
| PU (Kn/m ³) | eo | σ'p | Cc | Cr | IPC |
| Sap. Sup. | 17.8 | 0.905 | 160 | 0.3284514 | 0.047904 |
| Sap. Int. | 18.2 | 0.697 | 145 | 0.1598145 | 0.018447 |
| Sap. Inf. | 18.4 | 0.704 | 195 | 0.174116 | 0.006242 |
| Coluvial | 18 | 0.901 | 285 | 0.3498678 | 0.055274 |
| Zona 5 | 22.5 | | | | |

| Capa N° | Desde (m) | Hasta (m) | Material | Esp. capa (m) | Altura acum. (m) | Prof. Capa (m) | PU (Kn/m ³) | σ ₀ (kPa) | u (kPa) | σ' ₀ (kPa) | σ'p | Pre? | | | Constantes | | | | | | |
|---------|-----------|-----------|-----------|---------------|------------------|----------------|-------------------------|----------------------|---------|-----------------------|-------|------------------------|----------|-----------------------|----------------|-------|----------|----------|-------|------|--|
| | | | | | | | | | | | | σ' ₀ < σ'p? | Δσ (kPa) | σ' ₀ + Δσ' | e ₀ | Cc | Cr | σ'p | S | | |
| 1 | 0 | 1 | Sap. Sup. | 1 | 0 | 0.5 | 17.8 | 8.9 | 4.9 | 4.0 | 135.8 | Sí | 641.3 | 645.3 | No | 0.905 | 0.328451 | 0.047904 | 135.8 | 0.16 | |
| 2 | 1 | 2 | Sap. Sup. | 1 | 1.5 | 17.8 | 17.8 | 26.7 | 14.7 | 12.0 | 143.8 | Sí | 639.5 | 651.5 | No | 0.905 | 0.328451 | 0.047904 | 143.8 | 0.14 | |
| 3 | 2 | 3 | Sap. Sup. | 1 | 2.5 | 17.8 | 17.8 | 44.5 | 24.5 | 20.0 | 151.8 | Sí | 637.7 | 657.7 | No | 0.905 | 0.328451 | 0.047904 | 151.8 | 0.13 | |
| 4 | 3 | 4 | Sap. Sup. | 1 | 3.5 | 17.8 | 17.8 | 62.3 | 34.3 | 28.0 | 159.8 | Sí | 636.0 | 664.0 | No | 0.905 | 0.328451 | 0.047904 | 159.8 | 0.13 | |
| 5 | 4 | 5 | Sap. Sup. | 1 | 4.5 | 17.8 | 17.8 | 80.1 | 44.1 | 36.0 | 167.8 | Sí | 634.4 | 670.4 | No | 0.905 | 0.328451 | 0.047904 | 167.8 | 0.12 | |
| 6 | 5 | 6 | Sap. Sup. | 1 | 5.5 | 17.8 | 17.8 | 97.9 | 54.0 | 43.9 | 175.8 | Sí | 632.8 | 676.7 | No | 0.905 | 0.328451 | 0.047904 | 175.8 | 0.12 | |
| 7 | 6 | 7 | Sap. Sup. | 1 | 6.5 | 17.8 | 17.8 | 115.7 | 63.8 | 51.9 | 183.8 | Sí | 631.2 | 683.2 | No | 0.905 | 0.328451 | 0.047904 | 183.8 | 0.11 | |
| 8 | 7 | 8 | Sap. Int. | 1 | 7.5 | 18.2 | 133.7 | 73.6 | 60.1 | 152.3 | 152.3 | Sí | 629.7 | 689.8 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 152.3 | 0.07 | |
| 9 | 8 | 9 | Sap. Int. | 1 | 8.5 | 18.2 | 151.9 | 83.4 | 68.5 | 160.7 | 160.7 | Sí | 628.2 | 696.7 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 160.7 | 0.06 | |
| 10 | 9 | 10 | Sap. Int. | 1 | 9.5 | 18.2 | 170.1 | 93.2 | 76.9 | 169.0 | 169.0 | Sí | 626.7 | 703.6 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 169.0 | 0.06 | |
| 11 | 10 | 11 | Sap. Int. | 1 | 10.5 | 18.2 | 188.3 | 103.0 | 85.3 | 177.4 | 177.4 | Sí | 625.2 | 710.5 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 177.4 | 0.06 | |
| 12 | 11 | 12 | Sap. Int. | 1 | 11.5 | 18.2 | 206.5 | 112.8 | 93.7 | 185.8 | 185.8 | Sí | 623.8 | 717.5 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 185.8 | 0.06 | |
| 13 | 12 | 13 | Sap. Int. | 1 | 12.5 | 18.2 | 224.7 | 122.6 | 102.1 | 194.2 | 194.2 | Sí | 622.3 | 724.4 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 194.2 | 0.06 | |
| 14 | 13 | 14 | Sap. Int. | 1 | 13.5 | 18.2 | 242.9 | 132.4 | 110.5 | 202.6 | 202.6 | Sí | 620.9 | 731.3 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 202.6 | 0.06 | |
| 15 | 14 | 15 | Sap. Int. | 1 | 14.5 | 18.2 | 261.1 | 142.2 | 118.9 | 211.0 | 211.0 | Sí | 619.4 | 738.3 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 211.0 | 0.05 | |
| 16 | 15 | 16 | Sap. Int. | 1 | 15.5 | 18.2 | 279.3 | 152.1 | 127.2 | 219.4 | 219.4 | Sí | 617.9 | 745.2 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 219.4 | 0.05 | |
| 17 | 16 | 17 | Sap. Int. | 1 | 16.5 | 18.2 | 297.5 | 161.9 | 135.6 | 227.8 | 227.8 | Sí | 616.5 | 752.1 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 227.8 | 0.05 | |
| 18 | 17 | 18 | Sap. Inf. | 1 | 17.5 | 18.4 | 315.8 | 171.7 | 144.1 | 236.1 | 236.1 | Sí | 615.0 | 759.1 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 236.1 | 0.05 | |
| 19 | 18 | 19 | Sap. Inf. | 1 | 18.5 | 18.4 | 334.2 | 181.5 | 152.7 | 244.6 | 244.6 | Sí | 613.5 | 766.2 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 244.6 | 0.05 | |
| 20 | 19 | 20 | Sap. Inf. | 1 | 19.5 | 18.4 | 352.6 | 191.3 | 161.3 | 253.2 | 253.2 | Sí | 612.0 | 773.3 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 253.2 | 0.05 | |
| 21 | 20 | 21 | Sap. Inf. | 1 | 20.5 | 18.4 | 371.0 | 201.1 | 169.9 | 261.8 | 261.8 | Sí | 610.5 | 780.4 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 261.8 | 0.05 | |
| 22 | 21 | 22 | Sap. Inf. | 1 | 21.5 | 18.4 | 389.4 | 210.9 | 178.5 | 270.4 | 270.4 | Sí | 609.0 | 787.4 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 270.4 | 0.05 | |
| 23 | 22 | 23 | Sap. Inf. | 1 | 22.5 | 18.4 | 407.8 | 220.7 | 187.1 | 279.0 | 279.0 | Sí | 607.4 | 794.5 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 279.0 | 0.05 | |
| 24 | 23 | 24 | Sap. Inf. | 1 | 23.5 | 18.4 | 426.2 | 230.5 | 195.7 | 287.6 | 287.6 | Sí | 605.8 | 801.5 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 287.6 | 0.05 | |
| 25 | 24 | 25 | Sap. Inf. | 1 | 24.5 | 18.4 | 444.6 | 240.3 | 204.3 | 296.2 | 296.2 | Sí | 604.2 | 808.5 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 296.2 | 0.05 | |
| 26 | 25 | 26 | Sap. Inf. | 1 | 25.5 | 18.4 | 463.0 | 250.2 | 212.8 | 304.8 | 304.8 | Sí | 602.6 | 815.5 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 304.8 | 0.04 | |
| 27 | 26 | 27 | Sap. Inf. | 1 | 26.5 | 18.4 | 481.4 | 260.0 | 221.4 | 313.4 | 313.4 | Sí | 601.0 | 822.4 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 313.4 | 0.04 | |
| Total | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1.960 | | |

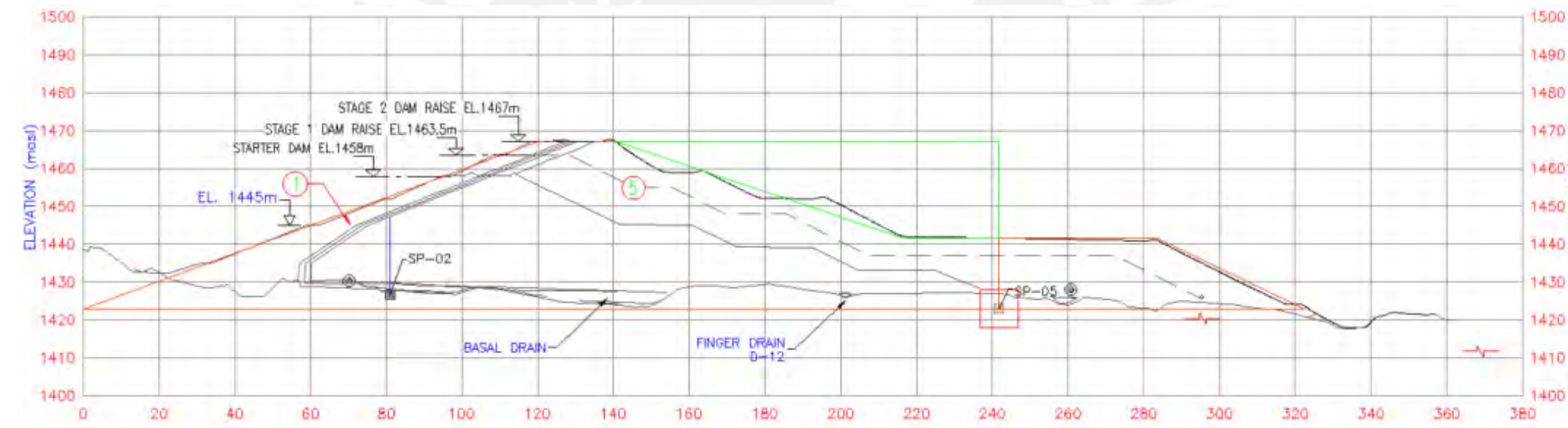
| Terraplen 1 | | | Terraplen 2 | | | Terraplen 3 | | | Terraplen 4 | | | TOTAL |
|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|---------|----------|
| α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | σ (kPa) |
| 0.01022 | 1.556512 | 371.2499 | 0.943167 | 0 | 67.54935 | 0.002857 | 1.565049 | 202.5 | 0.010688 | 1.556512 | 0 | 641.2993 |
| 0.030636 | 1.527965 | 371.2477 | 0.91795 | 0 | 65.7433 | 0.008569 | 1.553557 | 202.4998 | 0.03204 | 1.527965 | 0 | 639.4909 |
| 0.050985 | 1.499489 | 371.2395 | 0.893669 | 0 | 64.00431 | 0.014278 | 1.542069 | 202.4992 | 0.053324 | 1.499489 | 0 | 637.7431 |
| 0.071221 | 1.471128 | 371.2214 | 0.8703 | 0 | 62.33064 | 0.01998 | 1.530588 | 202.4979 | 0.074494 | 1.471128 | 0 | 636.0499 |
| 0.091301 | 1.442926 | 371.1894 | 0.847817 | 0 | 60.72042 | 0.025672 | 1.519118 | 202.4955 | 0.095507 | 1.442926 | 0 | 634.4054 |
| 0.111183 | 1.414928 | 371.14 | 0.826192 | 0 | 59.17163 | 0.031353 | 1.507662 | 202.4918 | 0.11632 | 1.414928 | 0 | 632.8035 |
| 0.130826 | 1.387174 | 371.0696 | 0.805395 | 0 | 57.6822 | 0.03702 | 1.496222 | 202.4865 | 0.136894 | 1.387174 | 0 | 631.2383 |
| 0.150193 | 1.359703 | 370.9748 | 0.785398 | 0 | 56.25 | 0.042669 | 1.484802 | 202.4793 | 0.157189 | 1.359703 | 0 | 629.7041 |
| 0.169249 | 1.332552 | 370.8527 | 0.76617 | 0 | 54.87287 | 0.048299 | 1.473404 | 202.4699 | 0.17717 | 1.332552 | 0 | 628.1955 |
| 0.18796 | 1.305753 | 370.7003 | 0.74768 | 0 | 53.54865 | 0.053906 | 1.462032 | 202.4581 | 0.196804 | 1.305753 | 0 | 626.707 |
| 0.206297 | 1.27934 | 370.5151 | 0.7299 | 0 | 52.27521 | 0.059489 | 1.450688 | 202.4435 | 0.21606 | 1.27934 | 0 | 625.2339 |
| 0.224234 | 1.253338 | 370.2949 | 0.712799 | 0 | 51.05045 | 0.065046 | 1.439374 | 202.426 | 0.234913 | 1.253338 | 0 | 623.7713 |
| 0.241746 | 1.227772 | 370.0377 | 0.696349 | 0 | 49.87229 | 0.070573 | 1.428095 | 202.4051 | 0.253337 | 1.227772 | 0 | 622.3151 |
| 0.258812 | 1.202666 | 369.7417 | 0.680521 | 0 | 48.73874 | 0.076068 | 1.416852 | 202.3808 | 0.271312 | 1.202666 | 0 | 620.8612 |
| 0.275416 | 1.178036 | 369.4055 | 0.665289 | 0 | 47.64785 | 0.081529 | 1.405648 | 202.3527 | 0.28882 | 1.178036 | 0 | 619.4061 |
| 0.291543 | 1.153898 | 369.0281 | 0.650627 | 0 | 46.59772 | 0.086954 | 1.394485 | 202.3206 | 0.305846 | 1.153898 | 0 | 617.9464 |
| 0.30718 | 1.130266 | 368.6085 | 0.636508 | 0 | 45.58654 | 0.092341 | 1.383367 | 202.2843 | 0.322378 | 1.130266 | 0 | 616.4793 |
| 0.32232 | 1.107149 | 368.1462 | 0.622909 | 0 | 44.61257 | 0.097687 | 1.372296 | 202.2435 | 0.338407 | 1.107149 | 0 | 615.0022 |
| 0.336955 | 1.084554 | 367.6407 | 0.609806 | 0 | 43.67414 | 0.102991 | 1.361273 | 202.198 | 0.353927 | 1.084554 | 0 | 613.5128 |
| 0.351083 | 1.062486 | 367.092 | 0.597177 | 0 | 42.76963 | 0.108251 | 1.350303 | 202.1476 | 0.368932 | 1.062486 | 0 | 612.0092 |
| 0.3647 | 1.040947 | 366.5001 | 0.585 | 0 | 41.89751 | 0.113464 | 1.339385 | 202.0921 | 0.383423 | 1.040947 | 0 | 610.4897 |
| 0.377809 | 1.019939 | 365.8652 | 0.573254 | 0 | 41.05632 | 0.118629 | 1.328524 | 202.0314 | 0.397397 | 1.019939 | 0 | 608.9529 |
| 0.390411 | 0.999459 | 365.1879 | 0.561922 | 0 | 40.24467 | 0.123744 | 1.317721 | 201.9651 | 0.410859 | 0.999459 | 0 | 607.3977 |
| 0.40251 | 0.979504 | 364.4687 | 0.550982 | 0 | 39.46121 | 0.128807 | 1.306977 | 201.8932 | 0.423811 | 0.979504 | 0 | 605.8231 |
| 0.414112 | 0.96007 | 363.7082 | 0.54042 | 0 | 38.7047 | 0.133817 | 1.296296 | 201.8155 | 0.436259 | 0.96007 | 0 | 604.2284 |
| 0.425224 | 0.941151 | 362.9075 | 0.530216 | 0 | 37.97391 | 0.138773 | 1.285679 | 201.7318 | 0.448209 | 0.941151 | 0 | 602.6132 |
| 0.435853 | 0.922739 | 362.0673 | 0.520355 | 0 | 37.2677 | 0.143672 | 1.275127 | 201.642 | 0.45967 | 0.922739 | 0 | 600.9771 |



| | | | | | | | |
|--------|------------|------|-------|-----|-----------|----------|---------|
| SP-05 | PU (Kn/m3) | eo | σ'p | Cc | Cr | IPC | |
| | Sap. Sup. | 17.8 | 0.905 | 160 | 0.3284514 | 0.047904 | 131.835 |
| | Sap. Int. | 18.2 | 0.697 | 145 | 0.1598145 | 0.018447 | 92.143 |
| | Sap. Inf. | 18.4 | 0.704 | 195 | 0.174116 | 0.006242 | 91.925 |
| | Coluvial | 18 | 0.901 | 285 | 0.3498678 | 0.055274 | 260.43 |
| Zona 5 | 22.5 | | | | | | |

| Capa N° | Desde (m) | Hasta (m) | Material | Esp. capa (m) | Altura acum. (m) | Prof. Capa (m) | PU (Kn/m3) | σ'0 (kPa) | u (kPa) | σ'0 (kPa) | σ'p | Pre? | | Constantes | | | | | | |
|---------|-----------|-----------|-----------|---------------|------------------|----------------|------------|-----------|---------|-----------|-------|------------|----------|------------|-----------------|-------|----------|----------|-------|------|
| | | | | | | | | | | | | σ'0 < σ'p? | Δσ (kPa) | σ'0 + Δσ' | σ'0 + Δσ' < σ'p | e0 | Cc | Cr | σ'p | S |
| 1 | 0 | 1 | Coluvial | 1 | 0 | 0.5 | 18 | 9.0 | 4.9 | 4.1 | 264.5 | Sí | 430.3 | 434.4 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 264.5 | 0.09 |
| 2 | 1 | 2 | Coluvial | 1 | 1 | 1.5 | 18 | 27.0 | 14.7 | 12.3 | 272.7 | Sí | 431.2 | 443.5 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 272.7 | 0.08 |
| 3 | 2 | 3 | Coluvial | 1 | 2 | 2.5 | 18 | 45.0 | 24.5 | 20.5 | 280.9 | Sí | 432.0 | 452.5 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 280.9 | 0.07 |
| 4 | 3 | 4 | Coluvial | 1 | 3 | 3.5 | 18 | 63.0 | 34.3 | 28.7 | 289.1 | Sí | 432.9 | 461.6 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 289.1 | 0.07 |
| 5 | 4 | 5 | Coluvial | 1 | 4 | 4.5 | 18 | 81.0 | 44.1 | 36.9 | 297.3 | Sí | 433.9 | 470.7 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 297.3 | 0.06 |
| 6 | 5 | 6 | Coluvial | 1 | 5 | 5.5 | 18 | 99.0 | 54.0 | 45.0 | 305.5 | Sí | 434.8 | 479.9 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 305.5 | 0.06 |
| 7 | 6 | 7 | Coluvial | 1 | 6 | 6.5 | 18 | 117.0 | 63.8 | 53.2 | 313.7 | Sí | 435.8 | 489.0 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 313.7 | 0.06 |
| 8 | 7 | 8 | Sap. Int. | 1 | 7 | 7.5 | 18.2 | 135.1 | 73.6 | 61.5 | 153.7 | Sí | 436.8 | 498.3 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 153.7 | 0.05 |
| 9 | 8 | 9 | Sap. Int. | 1 | 8 | 8.5 | 18.2 | 153.3 | 83.4 | 69.9 | 162.1 | Sí | 437.8 | 507.7 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 162.1 | 0.05 |
| 10 | 9 | 10 | Sap. Int. | 1 | 9 | 9.5 | 18.2 | 171.5 | 93.2 | 78.3 | 170.4 | Sí | 438.8 | 517.1 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 170.4 | 0.05 |
| 11 | 10 | 11 | Sap. Int. | 1 | 10 | 10.5 | 18.2 | 189.7 | 103.0 | 86.7 | 178.8 | Sí | 439.8 | 526.5 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 178.8 | 0.05 |
| 12 | 11 | 12 | Sap. Int. | 1 | 11 | 11.5 | 18.2 | 207.9 | 112.8 | 95.1 | 187.2 | Sí | 440.9 | 535.9 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 187.2 | 0.05 |
| 13 | 12 | 13 | Sap. Int. | 1 | 12 | 12.5 | 18.2 | 226.1 | 122.6 | 103.5 | 195.6 | Sí | 441.9 | 545.3 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 195.6 | 0.04 |
| 14 | 13 | 14 | Sap. Int. | 1 | 13 | 13.5 | 18.2 | 244.3 | 132.4 | 111.9 | 204.0 | Sí | 442.9 | 554.7 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 204.0 | 0.04 |
| 15 | 14 | 15 | Sap. Inf. | 1 | 14 | 14.5 | 18.2 | 262.5 | 142.2 | 120.3 | 212.4 | Sí | 443.9 | 564.1 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 212.4 | 0.04 |
| 16 | 15 | 16 | Sap. Inf. | 1 | 15 | 15.5 | 18.4 | 280.8 | 152.1 | 128.7 | 220.7 | Sí | 444.8 | 573.6 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 220.7 | 0.04 |
| 17 | 16 | 17 | Sap. Inf. | 1 | 16 | 16.5 | 18.4 | 299.2 | 161.9 | 137.3 | 229.3 | Sí | 445.8 | 583.1 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 229.3 | 0.04 |
| 18 | 17 | 18 | Sap. Inf. | 1 | 17 | 17.5 | 18.4 | 317.6 | 171.7 | 145.9 | 237.9 | Sí | 446.7 | 592.7 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 237.9 | 0.04 |
| 19 | 18 | 19 | Sap. Inf. | 1 | 18 | 18.5 | 18.4 | 336.0 | 181.5 | 154.5 | 246.4 | Sí | 447.7 | 602.2 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 246.4 | 0.04 |
| 20 | 19 | 20 | Sap. Inf. | 1 | 19 | 19.5 | 18.4 | 354.4 | 191.3 | 163.1 | 255.0 | Sí | 448.6 | 611.7 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 255.0 | 0.04 |
| 21 | 20 | 21 | Sap. Inf. | 1 | 20 | 20.5 | 18.4 | 372.8 | 201.1 | 171.7 | 263.6 | Sí | 449.4 | 621.1 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 263.6 | 0.04 |
| 22 | 21 | 22 | Sap. Inf. | 1 | 21 | 21.5 | 18.4 | 391.2 | 210.9 | 180.3 | 272.2 | Sí | 450.3 | 630.5 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 272.2 | 0.04 |
| 23 | 22 | 23 | Sap. Inf. | 1 | 22 | 22.5 | 18.4 | 409.6 | 220.7 | 188.9 | 280.8 | Sí | 451.1 | 639.9 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 280.8 | 0.04 |
| 24 | 23 | 24 | Sap. Inf. | 1 | 23 | 23.5 | 18.4 | 428.0 | 230.5 | 197.5 | 289.4 | Sí | 451.9 | 649.3 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 289.4 | 0.04 |
| 25 | 24 | 25 | Sap. Inf. | 1 | 24 | 24.5 | 18.4 | 446.4 | 240.3 | 206.1 | 298.0 | Sí | 452.6 | 658.7 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 298.0 | 0.04 |
| Total | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1.259 | |

| Terraplen 1 | | Terraplen 2 | | Terraplen 3 | | Terraplen 4 | | TOTAL | | | | |
|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|----------|----------|----------|---|----------|
| α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | | | | |
| 0.005873 | 1.55872 | 211.4999 | 0.00204 | 1.566688 | 497.25 | 0.462677 | 0.918534 | -278.403 | 0.010688 | 1.556512 | 0 | 430.3473 |
| 0.017608 | 1.53458 | 211.4983 | 0.006119 | 1.558472 | 497.2499 | 0.477552 | 0.894138 | -277.582 | 0.03204 | 1.527965 | 0 | 431.1667 |
| 0.029306 | 1.510483 | 211.4923 | 0.010196 | 1.550257 | 497.2493 | 0.491543 | 0.870661 | -276.713 | 0.053324 | 1.499489 | 0 | 432.0283 |
| 0.040943 | 1.486456 | 211.479 | 0.014272 | 1.542045 | 497.2481 | 0.504678 | 0.848077 | -275.8 | 0.074494 | 1.471128 | 0 | 432.927 |
| 0.052497 | 1.462526 | 211.4556 | 0.018343 | 1.533837 | 497.246 | 0.516989 | 0.826359 | -274.844 | 0.095507 | 1.442926 | 0 | 433.8578 |
| 0.063944 | 1.438719 | 211.4193 | 0.022411 | 1.525634 | 497.2426 | 0.528504 | 0.805476 | -273.846 | 0.11632 | 1.414928 | 0 | 434.8154 |
| 0.075262 | 1.415063 | 211.3674 | 0.026473 | 1.517437 | 497.2379 | 0.539256 | 0.785398 | -272.81 | 0.136894 | 1.387174 | 0 | 435.7949 |
| 0.086431 | 1.391581 | 211.2976 | 0.030529 | 1.509247 | 497.2314 | 0.549277 | 0.766096 | -271.738 | 0.157189 | 1.359703 | 0 | 436.7912 |
| 0.097429 | 1.368296 | 211.2074 | 0.034578 | 1.501066 | 497.2229 | 0.558598 | 0.747537 | -270.631 | 0.17717 | 1.332552 | 0 | 437.7995 |
| 0.108239 | 1.345233 | 211.0946 | 0.038618 | 1.492893 | 497.2122 | 0.56725 | 0.729694 | -269.491 | 0.196804 | 1.305753 | 0 | 438.8154 |
| 0.118842 | 1.322411 | 210.9572 | 0.04265 | 1.484732 | 497.199 | 0.575265 | 0.712535 | -268.322 | 0.21606 | 1.27934 | 0 | 439.8344 |
| 0.129223 | 1.299849 | 210.7934 | 0.046671 | 1.476581 | 497.183 | 0.582673 | 0.696031 | -267.124 | 0.234913 | 1.253338 | 0 | 440.8524 |
| 0.139368 | 1.277568 | 210.6017 | 0.050682 | 1.468444 | 497.1641 | 0.589504 | 0.680155 | -265.9 | 0.253337 | 1.227772 | 0 | 441.8656 |
| 0.149261 | 1.255582 | 210.3804 | 0.05468 | 1.460319 | 497.142 | 0.595785 | 0.664878 | -264.652 | 0.271312 | 1.202666 | 0 | 442.8703 |
| 0.158893 | 1.233906 | 210.1285 | 0.058667 | 1.45221 | 497.1163 | 0.601545 | 0.650174 | -263.382 | 0.28882 | 1.178036 | 0 | 443.8631 |
| 0.168253 | 1.212555 | 209.8449 | 0.062639 | 1.444116 | 497.087 | 0.60681 | 0.636018 | -262.091 | 0.305846 | 1.153898 | 0 | 444.8411 |
| 0.177332 | 1.19154 | 209.5287 | 0.066597 | 1.436039 | 497.0536 | 0.611605 | 0.622384 | -260.781 | 0.322378 | 1.130266 | 0 | 445.8015 |
| 0.186122 | 1.170871 | 209.1794 | 0.07054 | 1.427979 | 497.0161 | 0.615956 | 0.609249 | -259.454 | 0.338407 | 1.107149 | 0 | 446.7417 |
| 0.194619 | 1.150557 | 208.7965 | 0.074466 | 1.419938 | 496.9742 | 0.619886 | 0.596591 | -258.111 | 0.353927 | 1.084554 | 0 | 447.6595 |
| 0.202817 | 1.130605 | 208.3797 | 0.078375 | 1.411917 | 496.9276 | 0.623417 | 0.584388 | -256.754 | 0.368932 | 1.062486 | 0 | 448.5529 |
| 0.210714 | 1.111021 | 207.929 | 0.082267 | 1.403916 | 496.8762 | 0.62657 | 0.572619 | -255.385 | 0.383423 | 1.040947 | 0 | 449.4202 |
| 0.218307 | 1.09181 | 207.4444 | 0.08614 | 1.395937 | 496.8196 | 0.629366 | 0.561265 | -254.004 | 0.397397 | 1.019939 | 0 | 450.2599 |
| 0.225596 | 1.072974 | 206.9262 | 0.089993 | 1.38798 | 496.7578 | 0.631825 | 0.550306 | -252.614 | 0.410859 | 0.999459 | 0 | 451.0706 |
| 0.232581 | 1.054516 | 206.3748 | 0.093827 | 1.380046 | 496.6905 | 0.633964 | 0.539726 | -251.214 | 0.423811 | 0.979504 | 0 | 451.8513 |
| 0.239264 | 1.036437 | 205.7906 | 0.097639 | 1.372137 | 496.6175 | 0.635802 | 0.529506 | -249.807 | 0.436259 | 0.96007 | 0 | 452.6012 |



| | | | | | | | |
|--------|------------|------|-------|-----|-----------|----------|---------|
| SP-06 | PU (Kn/m3) | eo | σ'p | Cc | Cr | IPC | |
| | Sap. Sup. | 17.8 | 0.905 | 160 | 0.3284514 | 0.047904 | 131.835 |
| | Sap. Int. | 18.2 | 0.697 | 145 | 0.1598145 | 0.018447 | 92.143 |
| | Sap. Inf. | 18.4 | 0.704 | 195 | 0.174116 | 0.006242 | 91.925 |
| | Coluvial | 18 | 0.901 | 285 | 0.3498678 | 0.055274 | 260.43 |
| Zona 5 | 22.5 | | | | | | |

| Capa N° | Desde (m) | Hasta (m) | Material | Esp. capa (m) | Altura acum. (m) | Prof. Capa (m) | PU (Kn/m3) | σ'0 (kPa) | u (kPa) | σ'0 (kPa) | σ'p | Pre? | | | Constantes | | | | | |
|---------|-----------|-----------|-----------|---------------|------------------|----------------|------------|-----------|---------|-----------|-------|------------|----------|-----------|-----------------|-------|----------|----------|-------|------|
| | | | | | | | | | | | | σ'0 < σ'p? | Δσ (kPa) | σ'0 + Δσ' | σ'0 + Δσ' < σ'p | e0 | Cc | Cr | σ'p | S |
| 1 | 0 | 1 | Coluvial | 1 | 0 | 0.5 | 18 | 9.0 | 4.9 | 4.1 | 264.5 | Sí | 543.4 | 547.5 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 264.5 | 0.11 |
| 2 | 1 | 2 | Coluvial | 1 | 1 | 1.5 | 18 | 27.0 | 14.7 | 12.3 | 272.7 | Sí | 543.4 | 555.7 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 272.7 | 0.10 |
| 3 | 2 | 3 | Coluvial | 1 | 2 | 2.5 | 18 | 45.0 | 24.5 | 20.5 | 280.9 | Sí | 543.3 | 563.8 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 280.9 | 0.09 |
| 4 | 3 | 4 | Coluvial | 1 | 3 | 3.5 | 18 | 63.0 | 34.3 | 28.7 | 289.1 | Sí | 543.3 | 572.0 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 289.1 | 0.08 |
| 5 | 4 | 5 | Coluvial | 1 | 4 | 4.5 | 18 | 81.0 | 44.1 | 36.9 | 297.3 | Sí | 543.2 | 580.1 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 297.3 | 0.08 |
| 6 | 5 | 6 | Coluvial | 1 | 5 | 5.5 | 18 | 99.0 | 54.0 | 45.0 | 305.5 | Sí | 543.1 | 588.2 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 305.5 | 0.08 |
| 7 | 6 | 7 | Coluvial | 1 | 6 | 6.5 | 18 | 117.0 | 63.8 | 53.2 | 313.7 | Sí | 543.0 | 596.2 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 313.7 | 0.07 |
| 8 | 7 | 8 | Sap. Int. | 1 | 7 | 7.5 | 18.2 | 135.1 | 73.6 | 61.5 | 153.7 | Sí | 542.7 | 604.3 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 153.7 | 0.06 |
| 9 | 8 | 9 | Sap. Int. | 1 | 8 | 8.5 | 18.2 | 153.3 | 83.4 | 69.9 | 162.1 | Sí | 542.5 | 612.4 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 162.1 | 0.06 |
| 10 | 9 | 10 | Sap. Int. | 1 | 9 | 9.5 | 18.2 | 171.5 | 93.2 | 78.3 | 170.4 | Sí | 542.2 | 620.5 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 170.4 | 0.06 |
| 11 | 10 | 11 | Sap. Int. | 1 | 10 | 10.5 | 18.2 | 189.7 | 103.0 | 86.7 | 178.8 | Sí | 541.8 | 628.5 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 178.8 | 0.05 |
| 12 | 11 | 12 | Sap. Int. | 1 | 11 | 11.5 | 18.2 | 207.9 | 112.8 | 95.1 | 187.2 | Sí | 541.4 | 636.4 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 187.2 | 0.05 |
| 13 | 12 | 13 | Sap. Int. | 1 | 12 | 12.5 | 18.2 | 226.1 | 122.6 | 103.5 | 195.6 | Sí | 540.9 | 644.3 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 195.6 | 0.05 |
| 14 | 13 | 14 | Sap. Int. | 1 | 13 | 13.5 | 18.2 | 244.3 | 132.4 | 111.9 | 204.0 | Sí | 540.3 | 652.2 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 204.0 | 0.05 |
| 15 | 14 | 15 | Sap. Int. | 1 | 14 | 14.5 | 18.2 | 262.5 | 142.2 | 120.3 | 212.4 | Sí | 539.7 | 660.0 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 212.4 | 0.05 |
| 16 | 15 | 16 | Sap. Int. | 1 | 15 | 15.5 | 18.2 | 280.7 | 152.1 | 128.6 | 220.8 | Sí | 539.1 | 667.7 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 220.8 | 0.05 |
| 17 | 16 | 17 | Sap. Inf. | 1 | 16 | 16.5 | 18.4 | 299.0 | 161.9 | 137.1 | 229.1 | Sí | 538.4 | 675.5 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 229.1 | 0.05 |
| 18 | 17 | 18 | Sap. Inf. | 1 | 17 | 17.5 | 18.4 | 317.4 | 171.7 | 145.7 | 237.7 | Sí | 537.6 | 683.3 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 237.7 | 0.05 |
| 19 | 18 | 19 | Sap. Inf. | 1 | 18 | 18.5 | 18.4 | 335.8 | 181.5 | 154.3 | 246.2 | Sí | 536.8 | 691.1 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 246.2 | 0.05 |
| 20 | 19 | 20 | Sap. Inf. | 1 | 19 | 19.5 | 18.4 | 354.2 | 191.3 | 162.9 | 254.8 | Sí | 536.0 | 698.9 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 254.8 | 0.05 |
| 21 | 20 | 21 | Sap. Inf. | 1 | 20 | 20.5 | 18.4 | 372.6 | 201.1 | 171.5 | 263.4 | Sí | 535.1 | 706.6 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 263.4 | 0.04 |
| 22 | 21 | 22 | Sap. Inf. | 1 | 21 | 21.5 | 18.4 | 391.0 | 210.9 | 180.1 | 272.0 | Sí | 534.2 | 714.2 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 272.0 | 0.04 |
| 23 | 22 | 23 | Sap. Inf. | 1 | 22 | 22.5 | 18.4 | 409.4 | 220.7 | 188.7 | 280.6 | Sí | 533.2 | 721.9 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 280.6 | 0.04 |
| 24 | 23 | 24 | Sap. Inf. | 1 | 23 | 23.5 | 18.4 | 427.8 | 230.5 | 197.3 | 289.2 | Sí | 532.2 | 729.5 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 289.2 | 0.04 |
| 25 | 24 | 25 | Sap. Inf. | 1 | 24 | 24.5 | 18.4 | 446.2 | 240.3 | 205.9 | 297.8 | Sí | 531.1 | 737.0 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 297.8 | 0.04 |
| 26 | 25 | 26 | Sap. Inf. | 1 | 25 | 25.5 | 18.4 | 464.6 | 250.2 | 214.4 | 306.4 | Sí | 530.1 | 744.5 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 306.4 | 0.04 |
| 27 | 26 | 27 | Sap. Inf. | 1 | 26 | 26.5 | 18.4 | 483.0 | 260.0 | 223.0 | 315.0 | Sí | 529.0 | 752.0 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 315.0 | 0.04 |
| 28 | 27 | 28 | Sap. Inf. | 1 | 27 | 27.5 | 18.4 | 501.4 | 269.8 | 231.6 | 323.6 | Sí | 527.8 | 759.5 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 323.6 | 0.04 |
| 29 | 28 | 29 | Sap. Inf. | 1 | 28 | 28.5 | 18.4 | 519.8 | 279.6 | 240.2 | 332.1 | Sí | 526.7 | 766.9 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 332.1 | 0.04 |
| Total | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1.648 | |

| Terraplen 1 | | | Terraplen 2 | | | Terraplen 3 | | | Terraplen 4 | | | TOTAL |
|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|---------|-------------|----------|---------|----------|
| α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | |
| 0.024404 | 1.542233 | 233.9998 | 0.002898 | 1.564714 | 309.375 | 0.563867 | 0.736747 | 0 | 0.010688 | 1.556512 | 0 | 543.3748 |
| 0.073027 | 1.485291 | 233.9948 | 0.008692 | 1.55255 | 309.3747 | 0.572134 | 0.719318 | 0 | 0.03204 | 1.527965 | 0 | 543.3695 |
| 0.121101 | 1.428899 | 233.9762 | 0.014482 | 1.540392 | 309.3735 | 0.579781 | 0.702556 | 0 | 0.053324 | 1.499489 | 0 | 543.3497 |
| 0.168286 | 1.373401 | 233.9353 | 0.020264 | 1.528243 | 309.371 | 0.586839 | 0.686432 | 0 | 0.074494 | 1.471128 | 0 | 543.3063 |
| 0.21427 | 1.319106 | 233.8646 | 0.026035 | 1.516106 | 309.3664 | 0.593337 | 0.670918 | 0 | 0.095507 | 1.442926 | 0 | 543.2311 |
| 0.258786 | 1.266285 | 233.7574 | 0.031793 | 1.503986 | 309.3594 | 0.599302 | 0.655988 | 0 | 0.11632 | 1.414928 | 0 | 543.1168 |
| 0.301612 | 1.21516 | 233.6083 | 0.037534 | 1.491885 | 309.3492 | 0.604761 | 0.641616 | 0 | 0.136894 | 1.387174 | 0 | 542.9575 |
| 0.342577 | 1.165905 | 233.413 | 0.043255 | 1.479807 | 309.3355 | 0.609742 | 0.627776 | 0 | 0.157189 | 1.359703 | 0 | 542.7485 |
| 0.381556 | 1.118642 | 233.1686 | 0.048953 | 1.467756 | 309.3176 | 0.614268 | 0.614445 | 0 | 0.17717 | 1.332552 | 0 | 542.4861 |
| 0.418472 | 1.073454 | 232.8732 | 0.054625 | 1.455735 | 309.295 | 0.618363 | 0.601599 | 0 | 0.196804 | 1.305753 | 0 | 542.1682 |
| 0.453286 | 1.030377 | 232.5262 | 0.06027 | 1.443747 | 309.2672 | 0.622051 | 0.589216 | 0 | 0.21606 | 1.27934 | 0 | 541.7934 |
| 0.485997 | 0.989416 | 232.1274 | 0.065883 | 1.431796 | 309.2337 | 0.625353 | 0.577276 | 0 | 0.234913 | 1.253338 | 0 | 541.3612 |
| 0.516629 | 0.950547 | 231.6779 | 0.071462 | 1.419884 | 309.194 | 0.628289 | 0.565758 | 0 | 0.253337 | 1.227772 | 0 | 540.8719 |
| 0.545231 | 0.913721 | 231.1789 | 0.077004 | 1.408016 | 309.1477 | 0.630881 | 0.554643 | 0 | 0.271312 | 1.202666 | 0 | 540.3266 |
| 0.571869 | 0.878875 | 230.6324 | 0.082507 | 1.396194 | 309.0942 | 0.633146 | 0.543914 | 0 | 0.28882 | 1.178036 | 0 | 539.7266 |
| 0.596622 | 0.84593 | 230.0404 | 0.087969 | 1.38442 | 309.0332 | 0.635102 | 0.533551 | 0 | 0.305846 | 1.153898 | 0 | 539.0736 |
| 0.619576 | 0.814801 | 229.4053 | 0.093386 | 1.372699 | 308.9641 | 0.636767 | 0.523541 | 0 | 0.322378 | 1.130266 | 0 | 538.3694 |
| 0.640823 | 0.785398 | 228.7296 | 0.098757 | 1.361033 | 308.8866 | 0.638156 | 0.513865 | 0 | 0.338407 | 1.107149 | 0 | 537.6162 |
| 0.660457 | 0.757628 | 228.0158 | 0.104079 | 1.349424 | 308.8003 | 0.639286 | 0.504511 | 0 | 0.353927 | 1.084554 | 0 | 536.8161 |
| 0.678571 | 0.731397 | 227.2665 | 0.10935 | 1.337876 | 308.7047 | 0.64017 | 0.495463 | 0 | 0.368932 | 1.062486 | 0 | 535.9712 |
| 0.695258 | 0.706614 | 226.4842 | 0.114567 | 1.32639 | 308.5996 | 0.640822 | 0.486708 | 0 | 0.383423 | 1.040947 | 0 | 535.0837 |
| 0.710608 | 0.683191 | 225.6712 | 0.11973 | 1.31497 | 308.4845 | 0.641256 | 0.478233 | 0 | 0.397397 | 1.019939 | 0 | 534.1557 |
| 0.724707 | 0.661043 | 224.8299 | 0.124835 | 1.303618 | 308.3592 | 0.641483 | 0.470027 | 0 | 0.410859 | 0.999459 | 0 | 533.1891 |
| 0.737636 | 0.640088 | 223.9625 | 0.129882 | 1.292336 | 308.2233 | 0.641516 | 0.462078 | 0 | 0.423811 | 0.979504 | 0 | 532.1859 |
| 0.749474 | 0.620249 | 223.0712 | 0.134868 | 1.281126 | 308.0766 | 0.641367 | 0.454374 | 0 | 0.436259 | 0.960007 | 0 | 531.1478 |
| 0.760295 | 0.601455 | 222.1579 | 0.139791 | 1.269991 | 307.9188 | 0.641044 | 0.446906 | 0 | 0.448209 | 0.941151 | 0 | 530.0767 |
| 0.770166 | 0.583636 | 221.2246 | 0.144651 | 1.258932 | 307.7496 | 0.640559 | 0.439664 | 0 | 0.45967 | 0.922739 | 0 | 528.9742 |
| 0.779153 | 0.566729 | 220.2729 | 0.149445 | 1.247951 | 307.5688 | 0.639921 | 0.432638 | 0 | 0.47065 | 0.904827 | 0 | 527.8417 |
| 0.787315 | 0.550676 | 219.3045 | 0.154172 | 1.237051 | 307.3762 | 0.639138 | 0.425282 | 0 | 0.481158 | 0.887405 | 0 | 526.6807 |

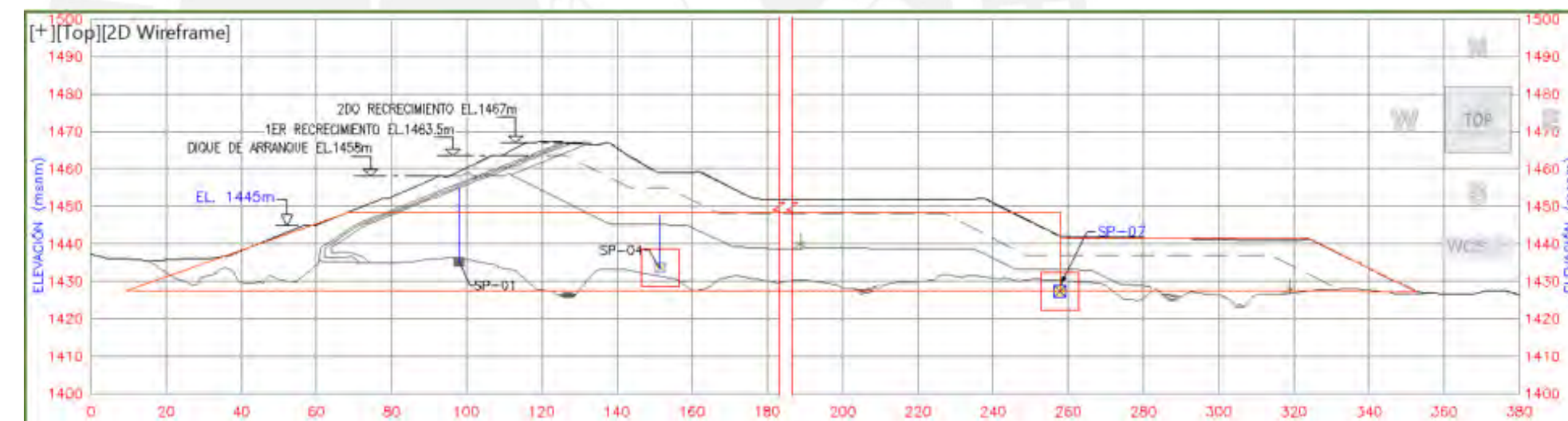


MCMXVII

| | | | | | | | |
|--------|------------|------|-------|-----|-----------|----------|---------|
| SP-07 | PU (Kn/m3) | eo | σ'p | Cc | Cr | IPC | |
| | Sap. Sup. | 17.8 | 0.905 | 160 | 0.3284514 | 0.047904 | 131.835 |
| | Sap. Int. | 18.2 | 0.697 | 145 | 0.1598145 | 0.018447 | 92.143 |
| | Sap. Inf. | 18.4 | 0.704 | 195 | 0.1741116 | 0.006242 | 91.925 |
| | Coluvial | 18 | 0.901 | 285 | 0.3498678 | 0.055274 | 260.43 |
| Zona 5 | 22.5 | | | | | | |

| Capa N° | Desde (m) | Hasta (m) | Material | Esp. capa (m) | Altura acum. (m) | Prof. Capa (m) | PU (Kn/m3) | σ'0 (kPa) | u (kPa) | σ'0 (kPa) | σ'p | Pre? | | | Constantes | | | | | |
|---------|-----------|-----------|-----------|---------------|------------------|----------------|------------|-----------|---------|-----------|-------|------------|----------|-----------|-----------------|-------|----------|----------|-------|------|
| | | | | | | | | | | | | σ'0 < σ'p? | Δσ (kPa) | σ'0 + Δσ' | σ'0 + Δσ' < σ'p | e0 | Cc | Cr | σ'p | S |
| 1 | 0 | 1 | Sap. Sup. | 1 | 0 | 0.5 | 17.8 | 8.9 | 4.9 | 4.0 | 135.8 | Sí | 393.7 | 397.7 | No | 0.905 | 0.328451 | 0.047904 | 135.8 | 0.12 |
| 2 | 1 | 2 | Sap. Sup. | 1 | 1 | 1.5 | 17.8 | 26.7 | 14.7 | 12.0 | 143.8 | Sí | 393.7 | 405.7 | No | 0.905 | 0.328451 | 0.047904 | 143.8 | 0.10 |
| 3 | 2 | 3 | Sap. Sup. | 1 | 2 | 2.5 | 17.8 | 44.5 | 24.5 | 20.0 | 151.8 | Sí | 393.7 | 413.7 | No | 0.905 | 0.328451 | 0.047904 | 151.8 | 0.10 |
| 4 | 3 | 4 | Sap. Sup. | 1 | 3 | 3.5 | 17.8 | 62.3 | 34.3 | 28.0 | 159.8 | Sí | 393.7 | 421.7 | No | 0.905 | 0.328451 | 0.047904 | 159.8 | 0.09 |
| 5 | 4 | 5 | Sap. Sup. | 1 | 4 | 4.5 | 17.8 | 80.1 | 44.1 | 36.0 | 167.8 | Sí | 393.7 | 429.7 | No | 0.905 | 0.328451 | 0.047904 | 167.8 | 0.09 |
| 6 | 5 | 6 | Sap. Sup. | 1 | 5 | 5.5 | 17.8 | 97.9 | 54.0 | 43.9 | 175.8 | Sí | 393.7 | 437.7 | No | 0.905 | 0.328451 | 0.047904 | 175.8 | 0.08 |
| 7 | 6 | 7 | Sap. Inf. | 1 | 6 | 6.5 | 18.4 | 116.0 | 63.8 | 52.2 | 144.2 | Sí | 393.7 | 445.9 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 144.2 | 0.05 |
| 8 | 7 | 8 | Sap. Inf. | 1 | 7 | 7.5 | 18.4 | 134.4 | 73.6 | 60.8 | 152.8 | Sí | 393.7 | 454.5 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 152.8 | 0.05 |
| 9 | 8 | 9 | Sap. Inf. | 1 | 8 | 8.5 | 18.4 | 152.8 | 83.4 | 69.4 | 161.3 | Sí | 393.7 | 463.1 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 161.3 | 0.05 |
| 10 | 9 | 10 | Sap. Inf. | 1 | 9 | 9.5 | 18.4 | 171.2 | 93.2 | 78.0 | 169.9 | Sí | 393.6 | 471.6 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 169.9 | 0.05 |
| 11 | 10 | 11 | Sap. Inf. | 1 | 10 | 10.5 | 18.4 | 189.6 | 103.0 | 86.6 | 178.5 | Sí | 393.6 | 480.2 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 178.5 | 0.05 |
| 12 | 11 | 12 | Sap. Inf. | 1 | 11 | 11.5 | 18.4 | 208.0 | 112.8 | 95.2 | 187.1 | Sí | 393.5 | 488.7 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 187.1 | 0.04 |
| 13 | 12 | 13 | Sap. Inf. | 1 | 12 | 12.5 | 18.4 | 226.4 | 122.6 | 103.8 | 195.7 | Sí | 393.5 | 497.2 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 195.7 | 0.04 |
| 14 | 13 | 14 | Sap. Inf. | 1 | 13 | 13.5 | 18.4 | 244.8 | 132.4 | 112.4 | 204.3 | Sí | 393.4 | 505.8 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 204.3 | 0.04 |
| 15 | 14 | 15 | Sap. Inf. | 1 | 14 | 14.5 | 18.4 | 263.2 | 142.2 | 121.0 | 212.9 | Sí | 393.3 | 514.3 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 212.9 | 0.04 |
| 16 | 15 | 16 | Sap. Inf. | 1 | 15 | 15.5 | 18.4 | 281.6 | 152.1 | 129.5 | 221.5 | Sí | 393.2 | 522.8 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 221.5 | 0.04 |
| 17 | 16 | 17 | Sap. Inf. | 1 | 16 | 16.5 | 18.4 | 300.0 | 161.9 | 138.1 | 230.1 | Sí | 393.1 | 531.3 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 230.1 | 0.04 |
| 18 | 17 | 18 | Sap. Inf. | 1 | 17 | 17.5 | 18.4 | 318.4 | 171.7 | 146.7 | 238.7 | Sí | 393.0 | 539.7 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 238.7 | 0.04 |
| 19 | 18 | 19 | Sap. Inf. | 1 | 18 | 18.5 | 18.4 | 336.8 | 181.5 | 155.3 | 247.2 | Sí | 392.9 | 548.2 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 247.2 | 0.04 |
| 20 | 19 | 20 | Sap. Inf. | 1 | 19 | 19.5 | 18.4 | 355.2 | 191.3 | 163.9 | 255.8 | Sí | 392.7 | 556.6 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 255.8 | 0.04 |
| 21 | 20 | 21 | Sap. Inf. | 1 | 20 | 20.5 | 18.4 | 373.6 | 201.1 | 172.5 | 264.4 | Sí | 392.6 | 565.1 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 264.4 | 0.03 |
| 22 | 21 | 22 | Sap. Inf. | 1 | 21 | 21.5 | 18.4 | 392.0 | 210.9 | 181.1 | 273.0 | Sí | 392.4 | 573.5 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 273.0 | 0.03 |
| 23 | 22 | 23 | Sap. Inf. | 1 | 22 | 22.5 | 18.4 | 410.4 | 220.7 | 189.7 | 281.6 | Sí | 392.2 | 581.9 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 281.6 | 0.03 |
| 24 | 23 | 24 | Sap. Inf. | 1 | 23 | 23.5 | 18.4 | 428.8 | 230.5 | 198.3 | 290.2 | Sí | 392.0 | 590.3 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 290.2 | 0.03 |
| 25 | 24 | 25 | Sap. Inf. | 1 | 24 | 24.5 | 18.4 | 447.2 | 240.3 | 206.9 | 298.8 | Sí | 391.8 | 598.7 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 298.8 | 0.03 |
| 26 | 25 | 26 | Sap. Inf. | 1 | 25 | 25.5 | 18.4 | 465.6 | 250.2 | 215.4 | 307.4 | Sí | 391.6 | 607.0 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 307.4 | 0.03 |
| 27 | 26 | 27 | Sap. Inf. | 1 | 26 | 26.5 | 18.4 | 484.0 | 260.0 | 224.0 | 316.0 | Sí | 391.3 | 615.4 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 316.0 | 0.03 |
| 28 | 27 | 28 | Sap. Inf. | 1 | 27 | 27.5 | 18.4 | 502.4 | 269.8 | 232.6 | 324.6 | Sí | 391.1 | 623.7 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 324.6 | 0.03 |
| 29 | 28 | 29 | Sap. Inf. | 1 | 28 | 28.5 | 18.4 | 520.8 | 279.6 | 241.2 | 333.1 | Sí | 390.8 | 632.0 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 333.1 | 0.03 |
| 30 | 29 | 30 | Sap. Inf. | 1 | 29 | 29.5 | 18.4 | 539.2 | 289.4 | 249.8 | 341.7 | Sí | 390.5 | 640.3 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 341.7 | 0.03 |
| Total | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1.489 | |

| Terraplen 1 | | | Terraplen 2 | | | Terraplen 3 | | | Terraplen 4 | | | TOTAL |
|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|---------|-------------|----------|---------|----------|
| B1 | B2 | H | B1 | B2 | H | B1 | B2 | H | B1 | B2 | H | σ (kPa) |
| 66.3 | 28.3 | 14 | 189.3 | 59 | 21 | 25.4 | 75.7 | 0 | 35 | 104 | 0 | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | σ (kPa) |
| 0.002256 | 1.563255 | 157.5 | 0.000628 | 1.568155 | 236.25 | 0.492894 | 0.868363 | 0 | 0.010688 | 1.556512 | 0 | 393.75 |
| 0.006766 | 1.548176 | 157.4995 | 0.001883 | 1.562873 | 236.25 | 0.505946 | 0.845867 | 0 | 0.03204 | 1.527965 | 0 | 393.7495 |
| 0.011269 | 1.533107 | 157.4979 | 0.003138 | 1.557591 | 236.2498 | 0.518175 | 0.824233 | 0 | 0.053324 | 1.499489 | 0 | 393.7477 |
| 0.01576 | 1.518055 | 157.4942 | 0.004392 | 1.552309 | 236.2496 | 0.529613 | 0.803432 | 0 | 0.074494 | 1.471128 | 0 | 393.7437 |
| 0.020236 | 1.503027 | 157.4876 | 0.005646 | 1.547029 | 236.2491 | 0.540291 | 0.783434 | 0 | 0.095507 | 1.442926 | 0 | 393.7367 |
| 0.024693 | 1.48803 | 157.4774 | 0.006899 | 1.54175 | 236.2483 | 0.55024 | 0.764207 | 0 | 0.11632 | 1.414928 | 0 | 393.7257 |
| 0.029124 | 1.473069 | 157.4628 | 0.008152 | 1.536473 | 236.2473 | 0.559493 | 0.745721 | 0 | 0.136894 | 1.387174 | 0 | 393.7101 |
| 0.033528 | 1.458153 | 157.4443 | 0.009403 | 1.531197 | 236.2458 | 0.56808 | 0.727948 | 0 | 0.157189 | 1.359703 | 0 | 393.6888 |
| 0.037898 | 1.443287 | 157.4173 | 0.010653 | 1.525924 | 236.2439 | 0.576033 | 0.710855 | 0 | 0.17717 | 1.332552 | 0 | 393.6612 |
| 0.042232 | 1.428477 | 157.3849 | 0.011901 | 1.520654 | 236.2415 | 0.583382 | 0.694416 | 0 | 0.196804 | 1.305753 | 0 | 393.6264 |
| 0.046525 | 1.41373 | 157.3452 | 0.013148 | 1.515386 | 236.2385 | 0.590156 | 0.6786 | 0 | 0.21606 | 1.27934 | 0 | 393.5838 |
| 0.050774 | 1.399051 | 157.2975 | 0.014394 | 1.510121 | 236.235 | 0.596384 | 0.663382 | 0 | 0.234913 | 1.253338 | 0 | 393.5325 |
| 0.054975 | 1.384447 | 157.2412 | 0.015637 | 1.504859 | 236.2307 | 0.602093 | 0.648734 | 0 | 0.253337 | 1.227772 | 0 | 393.4719 |
| 0.059125 | 1.369923 | 157.1757 | 0.016879 | 1.499601 | 236.2257 | 0.60731 | 0.634631 | 0 | 0.271312 | 1.202666 | 0 | 393.4014 |
| 0.063219 | 1.355484 | 157.1004 | 0.018118 | 1.494348 | 236.2199 | 0.61206 | 0.621048 | 0 | 0.28882 | 1.178036 | 0 | 393.3203 |
| 0.067256 | 1.341135 | 157.0147 | 0.019355 | 1.489098 | 236.2133 | 0.616368 | 0.607963 | 0 | 0.305846 | 1.153898 | 0 | 393.228 |
| 0.071232 | 1.326883 | 156.9183 | 0.020589 | 1.483853 | 236.2057 | 0.620257 | 0.595351 | 0 | 0.322378 | 1.130266 | 0 | 393.124 |
| 0.075144 | 1.31273 | 156.8105 | 0.021821 | 1.478612 | 236.1972 | 0.623749 | 0.583192 | 0 | 0.338407 | 1.107149 | 0 | 393.0077 |
| 0.07899 | 1.298683 | 156.6911 | 0.02305 | 1.473377 | 236.1877 | 0.626865 | 0.571465 | 0 | 0.353927 | 1.084554 | 0 | 392.8788 |
| 0.082768 | 1.284745 | 156.5595 | 0.024276 | 1.468147 | 236.1771 | 0.629627 | 0.560151 | 0 | 0.368932 | 1.062486 | 0 | 392.7366 |
| 0.086474 | 1.27092 | 156.4156 | 0.025499 | 1.462923 | 236.1654 | 0.632053 | 0.549231 | 0 | 0.383423 | 1.040947 | 0 | 392.581 |
| 0.090107 | 1.257213 | 156.2589 | 0.026718 | 1.457705 | 236.1525 | 0.634161 | 0.538688 | 0 | 0.397397 | 1.019939 | 0 | 392.4114 |
| 0.093666 | 1.243626 | 156.0893 | 0.027935 | 1.452492 | 236.1384 | 0.63597 | 0.528503 | 0 | 0.410859 | 0.999459 | 0 | 392.2277 |
| 0.097147 | 1.230163 | 155.9064 | 0.029147 | 1.447287 | 236.123 | 0.637495 | 0.518662 | 0 | 0.423811 | 0.979504 | 0 | 392.0294 |
| 0.100551 | 1.216828 | 155.7102 | 0.030356 | 1.442088 | 236.1063 | 0.638752 | 0.509149 | 0 | 0.436259 | 0.96007 | 0 | 391.8165 |
| 0.103876 | 1.203622 | 155.5004 | 0.031561 | 1.436896 | 236.0881 | 0.639757 | 0.499949 | 0 | 0.448209 | 0.941151 | 0 | 391.5886 |
| 0.10712 | 1.19055 | 155.277 | 0.032762 | 1.431711 | 236.0686 | 0.640524 | 0.491049 | 0 | 0.45967 | 0.922739 | 0 | 391.3456 |
| 0.110283 | 1.177613 | 155.0399 | 0.033959 | 1.426533 | 236.0475 | 0.641065 | 0.482436 | 0 | 0.47065 | 0.904827 | 0 | 391.0874 |
| 0.113363 | 1.164813 | 154.789 | 0.035152 | 1.421364 | 236.025 | 0.641394 | 0.474097 | 0 | 0.481158 | 0.887405 | 0 | 390.814 |
| 0.116361 | 1.152152 | 154.5244 | 0.03634 | 1.416202 | 236.0008 | 0.641523 | 0.466021 | 0 | 0.491205 | 0.870464 | 0 | 390.5252 |



| | | | | | | | |
|--------|------------|------|-------|-----|-----------|----------|---------|
| SP-08 | PU (Kn/m3) | eo | σ'p | Cc | Cr | IPC | |
| | Sap. Sup. | 17.8 | 0.905 | 160 | 0.3284514 | 0.047904 | 131.835 |
| | Sap. Int. | 18.2 | 0.697 | 145 | 0.1598145 | 0.018447 | 92.143 |
| | Sap. Inf. | 18.4 | 0.704 | 195 | 0.1741116 | 0.006242 | 91.925 |
| | Coluvial | 18 | 0.901 | 285 | 0.3498678 | 0.055274 | 260.43 |
| Zona 5 | 22.5 | | | | | | |

| Capa N° | Desde (m) | Hasta (m) | Material | Esp. capa (m) | Altura acum. (m) | Prof. Capa (m) | PU (Kn/m3) | σ'0 (kPa) | u (kPa) | σ'0 (kPa) | σ'p | Pre? | | Constantes | | | | | S | |
|---------|-----------|-----------|-----------|---------------|------------------|----------------|------------|-----------|---------|-----------|-------|------------|----------|------------|-----------------|-------|----------|----------|-------|------|
| | | | | | | | | | | | | σ'0 < σ'p? | Δσ (kPa) | σ'0 + Δσ' | σ'0 + Δσ' < σ'p | e0 | Cc | Cr | | σ'p |
| 1 | 0 | 1 | Coluvial | 1 | 0 | 0.5 | 18 | 9.0 | 4.9 | 4.1 | 264.5 | Sí | 380.0 | 384.1 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 264.5 | 0.08 |
| 2 | 1 | 2 | Coluvial | 1 | 1 | 1.5 | 18 | 27.0 | 14.7 | 12.3 | 272.7 | Sí | 380.7 | 393.0 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 272.7 | 0.07 |
| 3 | 2 | 3 | Coluvial | 1 | 2 | 2.5 | 18 | 45.0 | 24.5 | 20.5 | 280.9 | Sí | 381.4 | 401.9 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 280.9 | 0.06 |
| 4 | 3 | 4 | Coluvial | 1 | 3 | 3.5 | 18 | 63.0 | 34.3 | 28.7 | 289.1 | Sí | 382.1 | 410.8 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 289.1 | 0.06 |
| 5 | 4 | 5 | Coluvial | 1 | 4 | 4.5 | 18 | 81.0 | 44.1 | 36.9 | 297.3 | Sí | 382.9 | 419.7 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 297.3 | 0.05 |
| 6 | 5 | 6 | Coluvial | 1 | 5 | 5.5 | 18 | 99.0 | 54.0 | 45.0 | 305.5 | Sí | 383.7 | 428.7 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 305.5 | 0.05 |
| 7 | 6 | 7 | Coluvial | 1 | 6 | 6.5 | 18 | 117.0 | 63.8 | 53.2 | 313.7 | Sí | 384.5 | 437.7 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 313.7 | 0.05 |
| 8 | 7 | 8 | Coluvial | 1 | 7 | 7.5 | 18 | 135.0 | 73.6 | 61.4 | 321.9 | Sí | 385.3 | 446.8 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 321.9 | 0.05 |
| 9 | 8 | 9 | Coluvial | 1 | 8 | 8.5 | 18 | 153.0 | 83.4 | 69.6 | 330.0 | Sí | 386.2 | 455.8 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 330.0 | 0.05 |
| 10 | 9 | 10 | Coluvial | 1 | 9 | 9.5 | 18 | 171.0 | 93.2 | 77.8 | 338.2 | Sí | 387.0 | 464.8 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 338.2 | 0.04 |
| 11 | 10 | 11 | Coluvial | 1 | 10 | 10.5 | 18 | 189.0 | 103.0 | 86.0 | 346.4 | Sí | 387.9 | 473.9 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 346.4 | 0.04 |
| 12 | 11 | 12 | Coluvial | 1 | 11 | 11.5 | 18 | 207.0 | 112.8 | 94.2 | 354.6 | Sí | 388.7 | 482.9 | No | 0.901 | 0.349868 | 0.055274 | 354.6 | 0.04 |
| 13 | 12 | 13 | Sap. Int. | 1 | 12 | 12.5 | 18.2 | 225.1 | 122.6 | 102.5 | 194.6 | Sí | 389.6 | 492.0 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 194.6 | 0.04 |
| 14 | 13 | 14 | Sap. Int. | 1 | 13 | 13.5 | 18.2 | 243.3 | 132.4 | 110.9 | 203.0 | Sí | 390.4 | 501.3 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 203.0 | 0.04 |
| 15 | 14 | 15 | Sap. Int. | 1 | 14 | 14.5 | 18.2 | 261.5 | 142.2 | 119.3 | 211.4 | Sí | 391.2 | 510.5 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 211.4 | 0.04 |
| 16 | 15 | 16 | Sap. Int. | 1 | 15 | 15.5 | 18.2 | 279.7 | 152.1 | 127.6 | 219.8 | Sí | 392.0 | 519.7 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 219.8 | 0.04 |
| 17 | 16 | 17 | Sap. Int. | 1 | 16 | 16.5 | 18.2 | 297.9 | 161.9 | 136.0 | 228.2 | Sí | 392.8 | 528.9 | No | 0.697 | 0.159815 | 0.018447 | 228.2 | 0.04 |
| 18 | 17 | 18 | Sap. Inf. | 1 | 17 | 17.5 | 18.4 | 316.2 | 171.7 | 144.5 | 236.5 | Sí | 393.6 | 538.1 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 236.5 | 0.04 |
| 19 | 18 | 19 | Sap. Inf. | 1 | 18 | 18.5 | 18.4 | 334.6 | 181.5 | 153.1 | 245.0 | Sí | 394.3 | 547.5 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 245.0 | 0.04 |
| 20 | 19 | 20 | Sap. Inf. | 1 | 19 | 19.5 | 18.4 | 353.0 | 191.3 | 161.7 | 253.6 | Sí | 395.1 | 556.8 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 253.6 | 0.04 |
| 21 | 20 | 21 | Sap. Inf. | 1 | 20 | 20.5 | 18.4 | 371.4 | 201.1 | 170.3 | 262.2 | Sí | 395.7 | 566.0 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 262.2 | 0.03 |
| 22 | 21 | 22 | Sap. Inf. | 1 | 21 | 21.5 | 18.4 | 389.8 | 210.9 | 178.9 | 270.8 | Sí | 396.4 | 575.3 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 270.8 | 0.03 |
| 23 | 22 | 23 | Sap. Inf. | 1 | 22 | 22.5 | 18.4 | 408.2 | 220.7 | 187.5 | 279.4 | Sí | 397.0 | 584.5 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 279.4 | 0.03 |
| 24 | 23 | 24 | Sap. Inf. | 1 | 23 | 23.5 | 18.4 | 426.6 | 230.5 | 196.1 | 288.0 | Sí | 397.7 | 593.7 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 288.0 | 0.03 |
| 25 | 24 | 25 | Sap. Inf. | 1 | 24 | 24.5 | 18.4 | 445.0 | 240.3 | 204.7 | 296.6 | Sí | 398.2 | 602.9 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 296.6 | 0.03 |
| 26 | 25 | 26 | Sap. Inf. | 1 | 25 | 25.5 | 18.4 | 463.4 | 250.2 | 213.2 | 305.2 | Sí | 398.8 | 612.0 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 305.2 | 0.03 |
| 27 | 26 | 27 | Sap. Inf. | 1 | 26 | 26.5 | 18.4 | 481.8 | 260.0 | 221.8 | 313.8 | Sí | 399.3 | 621.1 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 313.8 | 0.03 |
| 28 | 27 | 28 | Sap. Inf. | 1 | 27 | 27.5 | 18.4 | 500.2 | 269.8 | 230.4 | 322.4 | Sí | 399.8 | 630.2 | No | 0.704 | 0.174116 | 0.006242 | 322.4 | 0.03 |
| Total | | | | | | | | | | | | | | | | 1.208 | | | | |

| Negativo | | | | | | | | | | | | TOTAL |
|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|---------|----------|
| Terraplen 1 | | | Terraplen 2 | | | Terraplen 3 | | | Terraplen 4 | | | |
| α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | α1 (rad) | α2 (rad) | σ (kPa) | σ (kPa) |
| 0.00585 | 1.558107 | 187.8749 | 0.001395 | 1.567297 | 396 | 0.37318 | 0.986352 | -203.852 | 0.010688 | 1.556512 | 0 | 380.0226 |
| 0.017536 | 1.532744 | 187.8732 | 0.004186 | 1.5603 | 395.9999 | 0.387573 | 0.960007 | -203.192 | 0.03204 | 1.527965 | 0 | 380.6813 |
| 0.02918 | 1.50743 | 187.8666 | 0.006976 | 1.553303 | 395.9996 | 0.401097 | 0.934721 | -202.484 | 0.053324 | 1.499489 | 0 | 381.3817 |
| 0.040757 | 1.482196 | 187.852 | 0.009764 | 1.546309 | 395.9988 | 0.413772 | 0.910286 | -201.732 | 0.074494 | 1.471128 | 0 | 382.1187 |
| 0.052239 | 1.457076 | 187.8262 | 0.012551 | 1.539316 | 395.9975 | 0.425624 | 0.886745 | -200.936 | 0.095507 | 1.442926 | 0 | 382.8872 |
| 0.0636 | 1.432099 | 187.7864 | 0.015335 | 1.532327 | 395.9954 | 0.436676 | 0.864074 | -200.1 | 0.11632 | 1.414928 | 0 | 383.6822 |
| 0.074816 | 1.407294 | 187.7296 | 0.018116 | 1.525341 | 395.9924 | 0.446959 | 0.842247 | -199.224 | 0.136894 | 1.387174 | 0 | 384.4984 |
| 0.085863 | 1.382691 | 187.6531 | 0.020894 | 1.51836 | 395.9883 | 0.456499 | 0.821239 | -198.311 | 0.157189 | 1.359703 | 0 | 385.3308 |
| 0.09672 | 1.358317 | 187.5545 | 0.023668 | 1.511384 | 395.983 | 0.465328 | 0.801022 | -197.363 | 0.17717 | 1.332552 | 0 | 386.1747 |
| 0.107366 | 1.334196 | 187.4314 | 0.026437 | 1.504414 | 395.9763 | 0.473476 | 0.781567 | -196.383 | 0.196804 | 1.305753 | 0 | 387.0252 |
| 0.117781 | 1.310352 | 187.2817 | 0.029202 | 1.49745 | 395.9681 | 0.480972 | 0.762846 | -195.372 | 0.21606 | 1.27934 | 0 | 387.878 |
| 0.127949 | 1.286807 | 187.1036 | 0.03196 | 1.490494 | 395.9581 | 0.487848 | 0.74483 | -194.333 | 0.234913 | 1.253338 | 0 | 388.7289 |
| 0.137854 | 1.263582 | 186.8954 | 0.034713 | 1.483545 | 395.9462 | 0.494133 | 0.727492 | -193.268 | 0.253337 | 1.227772 | 0 | 389.5739 |
| 0.147482 | 1.240694 | 186.6557 | 0.037459 | 1.476604 | 395.9323 | 0.499856 | 0.710804 | -192.179 | 0.271312 | 1.202666 | 0 | 390.4094 |
| 0.156821 | 1.218159 | 186.3834 | 0.040198 | 1.469673 | 395.9162 | 0.505046 | 0.694738 | -191.068 | 0.28882 | 1.178036 | 0 | 391.232 |
| 0.165861 | 1.195992 | 186.0775 | 0.042929 | 1.462751 | 395.8978 | 0.509732 | 0.679269 | -189.937 | 0.305846 | 1.153898 | 0 | 392.0387 |
| 0.174594 | 1.174204 | 185.7373 | 0.045652 | 1.45584 | 395.8768 | 0.513938 | 0.664371 | -188.787 | 0.322378 | 1.130266 | 0 | 392.8267 |
| 0.183013 | 1.152808 | 185.3623 | 0.048367 | 1.448894 | 395.8532 | 0.517693 | 0.650019 | -187.622 | 0.338407 | 1.107149 | 0 | 393.5937 |
| 0.191113 | 1.13181 | 184.9524 | 0.051072 | 1.442051 | 395.8269 | 0.52102 | 0.636189 | -186.442 | 0.353927 | 1.084554 | 0 | 394.3375 |
| 0.198891 | 1.111218 | 184.5074 | 0.053769 | 1.435175 | 395.7975 | 0.523945 | 0.622858 | -185.249 | 0.368932 | 1.062486 | 0 | 395.0561 |
| 0.206344 | 1.091037 | 184.0274 | 0.056455 | 1.428311 | 395.7651 | 0.526489 | 0.610004 | -184.044 | 0.383423 | 1.040947 | 0 | 395.7481 |
| 0.213473 | 1.071272 | 183.5128 | 0.05913 | 1.421462 | 395.7295 | 0.528674 | 0.597606 | -182.83 | 0.397397 | 1.019939 | 0 | 396.412 |
| 0.220278 | 1.051924 | 182.9641 | 0.061795 | 1.414626 | 395.6905 | 0.530522 | 0.585644 | -181.608 | 0.410859 | 0.999459 | 0 | 397.0468 |
| 0.22676 | 1.032994 | 182.3817 | 0.064448 | 1.407805 | 395.648 | 0.532053 | 0.574099 | -180.378 | 0.423811 | 0.979504 | 0 | 397.6517 |
| 0.232923 | 1.014482 | 181.7666 | 0.067089 | 1.400999 | 395.6019 | 0.533286 | 0.562951 | -179.143 | 0.436259 | 0.960007 | 0 | 398.2258 |
| 0.238772 | 0.996386 | 181.1196 | 0.069718 | 1.394209 | 395.552 | 0.534238 | 0.552184 | -177.903 | 0.448209 | 0.941151 | 0 | 398.7689 |
| 0.244309 | 0.978705 | 180.4415 | 0.072335 | 1.387435 | 395.4982 | 0.534926 | 0.541178 | -176.659 | 0.45967 | 0.922739 | 0 | 399.2805 |
| 0.249542 | 0.961434 | 179.7335 | 0.074938 | 1.380678 | 395.4405 | 0.535368 | 0.531724 | -175.413 | 0.47065 | 0.904827 | 0 | 399.7605 |

