



## Programa de Ingeniería Geotécnica

Informe: EIC-Lanamme-INF-0472-2022

# Evaluación preliminar de factores de seguridad y deformaciones en las obras de excavación de la Unidad Funcional 5



Preparado por:

Ing. Gustavo A. Badilla Vargas, DSc.  
Programa de Ingeniería Geotécnica

San José, Costa Rica  
Abril, 2022





<b>1. Informe</b> EIC-Lanamme-INF-0472-2022		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> Evaluación preliminar de factores de seguridad y deformaciones en las obras de excavación de la Unidad Funcional 5		<b>4. Fecha del Informe</b> 21/04/2022
<b>5. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>6. Notas complementarias</b> Ninguna		
<b>7. Resumen</b> <i>Debido a la solicitud de la Unidad de Auditoría Técnica del LanammeUCR y debido a los comentarios del informe EIC-Lanamme-0130-2022 se presentan a continuación los resultados de los análisis de estabilidad de los taludes y estimaciones preliminares de las deformaciones que podrían presentarse en la corona de los taludes resultantes de las obras de excavación en la Unidad Funcional 5 del Proyecto de Circunvalación Norte, obras que podrían generar alguna afectación en las viviendas próximas. A partir de los resultados obtenidos se destaca que los factores de seguridad (FS) cumplen con los requisitos de estabilidad definidos por el CGTLCR. Teniendo en consideración que el enfoque del Método de Equilibrio Límite (MEL) ignora el comportamiento de esfuerzo-deformación, se emplea el Método de Elementos Finitos (MEF). La revisión con respecto a estados límites de servicio, busca establecer valores que no causen daños intolerables a la propia cimentación, ni a las estructuras y acabados de las construcciones vecinas. En general, los resultados indican que no se esperan daños importantes en las estructuras cercanas a la corona del talud. Es importante indicar que estos análisis no representan los resultados definitivos del análisis de deformabilidad de estos taludes, ya que la información disponible y el estudio completo correspondiente, es responsabilidad del encargado del diseño del proyecto. Sin embargo, el presente informe constituye un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis de deformabilidad definitivos. La omisión de estos análisis podría significar problemas económicos por indemnizaciones que se deban realizar por afectaciones, que pudieron ser previstas y prevenidas mediante el análisis de deformaciones correspondiente. Adicionalmente, se resalta que, durante las visitas realizadas, se observaron que los taludes existentes carecen de sistemas para el control de la escorrentía superficial, por lo que se recomienda implementar medidas integrales de mitigación para el control de la escorrentía y evitar problemas de estabilidad.</i>		
<b>8. Palabras clave</b> Método de Equilibrio Límite, Método de Elementos Finitos, Análisis de deformabilidad	<b>9. Nivel de seguridad:</b> -	<b>10. Núm. de páginas</b> 33
<b>11. Preparado por:</b>  Ing. Gustavo A. Badilla Vargas, D.Sc. Ingeniero PIG Fecha: 21 / 04 / 2022		
<b>12. Revisado y aprobado por:</b>  Ing. Ana Lorena Monge Sandí, M.Sc Coordinadora del Programa de Ingeniería Geotécnica Fecha: 21 / 04 / 2022		



## Contenido

I.	Introducción .....	4
II.	Levantamientos y ensayos realizados por el LanammeUCR .....	4
II.1	Modelo de Elevación Digital (MED).....	4
II.2	Ensayos de laboratorio .....	6
II.3	Comprobación de estabilidad de los taludes.....	8
II.3.1	Resultados de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) en tres dimensiones (3D) .....	8
II.3.2	Resultados de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) en dos dimensiones 2D – Condición estática .....	13
II.3.3	Resultados de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) en dos dimensiones 2D – Condición pseudo-estática .....	18
II.3.4	Resultados de estabilidad utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF) .....	20
III.	Otras consideraciones.....	31
IV.	Comentarios finales .....	32
V.	Referencias .....	33



# Evaluación preliminar de factores de seguridad y deformaciones en las obras de excavación de la Unidad Funcional 5

## I. Introducción

Por solicitud de la Unidad de Auditoría Técnica, el presente informe muestra los resultados de los análisis de estabilidad de los taludes y estimaciones preliminares de las deformaciones que podrían presentarse en la corona de los taludes resultantes de las obras de excavación en la Unidad Funcional 5 del Proyecto de Circunvalación Norte. Los documentos revisados fueron los siguientes:

- EIC-Lanamme-0130-2022 Informe de visita al Proyecto Circunvalación Norte
- EIC-Lanamme-INF-0318-2022 Informe de Ensayo del Circunvalación Norte, realizado por el LanammeUCR, para el muestreo realizado el 11 de febrero.

A continuación, se muestran los comentarios de los resultados y análisis desarrollados.

## II. Levantamientos y ensayos realizados por el LanammeUCR

Entre los comentarios y las observaciones presentadas en el informe EIC-Lanamme-0130-2022 se destacaba la presencia de edificaciones próximas a la corona de los taludes y se solicitaba la presentación, por parte del contratista, de la memoria de cálculo de la revisión de la estabilidad y los análisis de deformaciones para verificar que no se generarían afectaciones a las edificaciones que se encuentran en la zona superior del talud. Sin embargo, al momento de la emisión del presente informe, todavía no se cuenta con una respuesta por parte del contratista, por lo que, el Programa de Ingeniería Geotécnica del LanammeUCR, procedió a realizar algunos ensayos y modelaciones preliminares para verificar la seguridad de las estructuras, cuyos resultados se presentan a continuación:

### II.1 Modelo de Elevación Digital (MED)

Inicialmente, con la colaboración de la Oficina de Geomática (OGEO) del LanammeUCR, se realizó un levantamiento con un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) de la zona de estudio el día 11 de febrero de 2022.

Este levantamiento, permitió la generación de un Modelo de Elevación Digital (MED) por medio de técnicas fotogramétricas. Mediante esta técnica es posible realizar la reconstrucción geométrica de un objeto por medio de fotografías aéreas captadas desde dos puntos de vista diferentes. Lo anterior permite recrear modelos tridimensionales que permiten analizar la forma y características de una superficie del terreno e identificar posibles zonas inestables que serían imposibles apreciarlas desde el terreno.

Es importante mencionar que la precisión de los modelos obtenidos depende de una selección adecuada de la altura y el área del vuelo. De tal forma que, a mayor altura, menor resolución y, por ende, menor precisión del modelo. Así, por ejemplo, modelos obtenidos a partir de una altura de vuelo de 80 metros presenta una resolución de pocos centímetros.

Teniendo esto en consideración, fueron realizados dos levantamientos por el VANT de la OGEO, un primer levantamiento localizado aproximadamente 500 metros al oeste de la Intersección de Calle Blancos (denominado como Sitio 1) y un segundo levantamiento en los alrededores de MACOPA (denominado como Sitio 2). En la Figura 1 se muestran los ortomosaicos obtenidos para ambos sitios. Con estos levantamientos fue posible obtener el modelo de elevación que se muestra en la Figura 2.

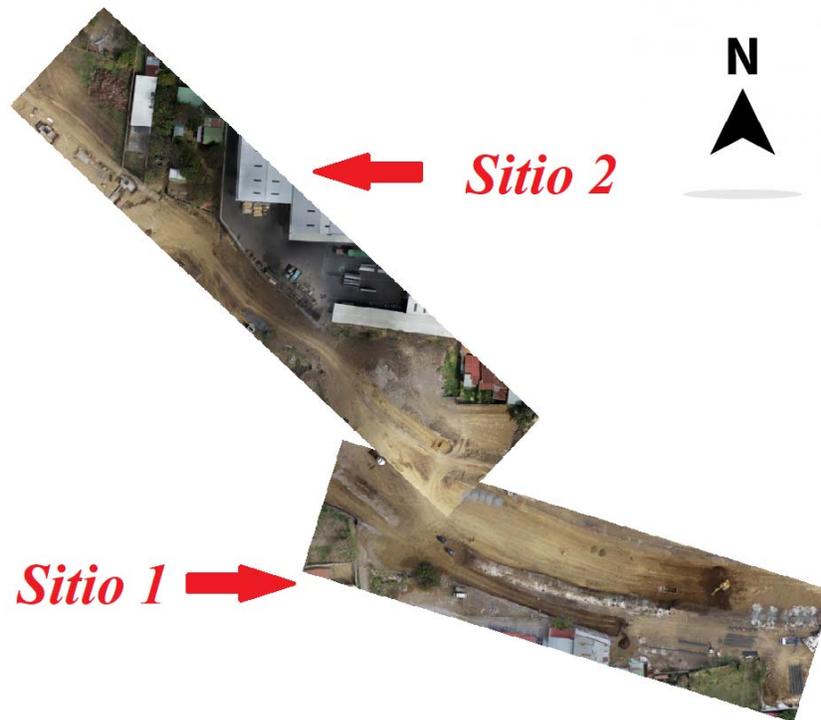


Figura 1. Ortomosaicos obtenidos con del levantamiento realizado con un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) de la zona de estudio



Figura 2. Modelo de elevación digital (MED) de la zona de estudio



A partir del modelo de elevación fue posible generar las curvas de nivel topográficas a cada 20 cm que se muestran en la Figura 3. Como se observa, los levantamientos realizados a ambos sitios permitieron recrear el terreno de forma rápida y precisa.



Figura 3. Curvas de nivel obtenidas del MED de la zona de estudio

## II.2 Ensayos de laboratorio

Por su parte, para verificar las propiedades geomecánicas del material presente en la zona de estudio, se realizaron ensayos para determinar:

- Contenido de humedad del suelo (ASTM D2216)
- Cantidad de material en suelos más fino  $75 \mu\text{m}$  (Nº 200) IT-SL-03 (ASTM D1140)
- Gravedad específica del suelo mediante un picnómetro con agua IT-SL-04 (ASTM D854)
- Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de un suelo IT-SL-05 (ASTM D4318)
- Método de prueba estándar para determinar las propiedades de consolidación unidimensional de suelos (ASTM D2435)
- Resistencia a la compresión inconfiada de suelos cohesivos (ASTM D2166)
- Corte directo simple para suelos finos consolidado no drenado (ASTM D6528)

El Gráfico 1 y la Tabla 1 muestran un resumen de los resultados más importantes para los muestreos realizados el 11 de febrero de 2022.

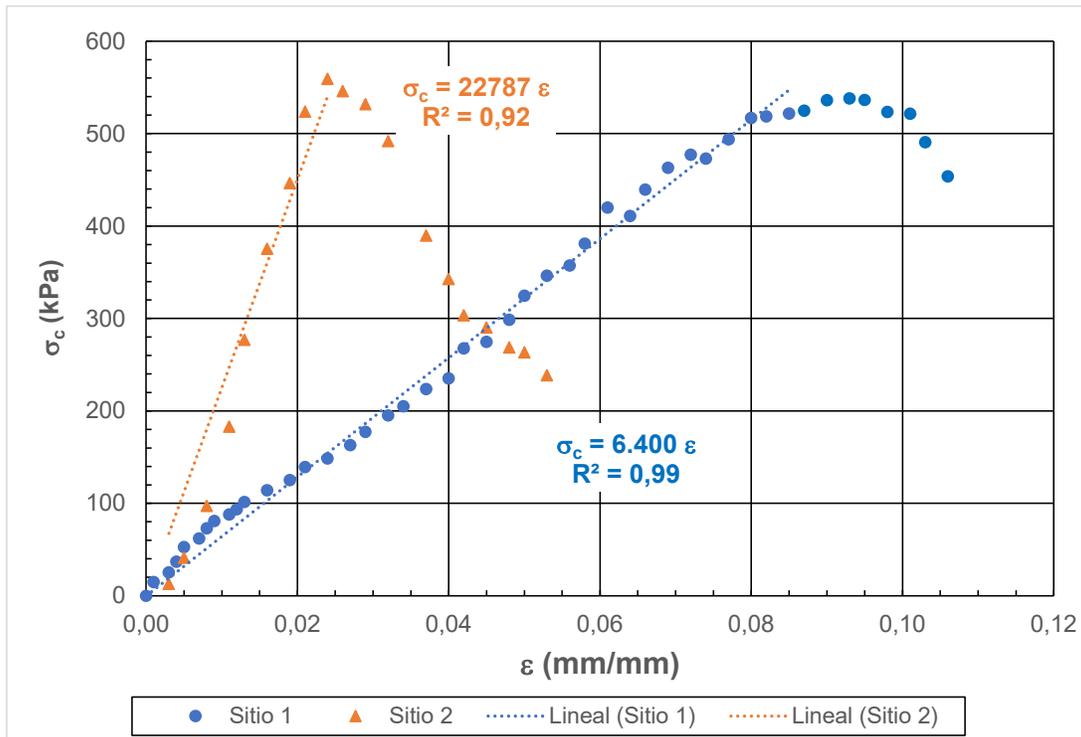


Gráfico 1. Resultados de la resistencia a la compresión confinada realizada por el LanammeUCR

De los resultados mostrados en el Gráfico 1, correspondiente a los ensayos de resistencia a la compresión confinada, es posible aproximar el valor del módulo de elasticidad del suelo, calculado como la pendiente o inclinación de la curva  $\sigma_c$  versus  $\epsilon$ . Este valor puede ser aproximado, utilizando la parte inicial de la curva del ensayo, antes de que la muestra alcance el pico de resistencia (ya que, este punto representa la falla del espécimen de ensayo). Según se observa en este mismo gráfico, fueron calculados dos valores diferentes de módulo de elasticidad, lo cual se debe a que las muestras tomadas corresponden a sitios de muestreo diferentes. Estas diferencias, resaltan la importancia que tiene la investigación geotécnica previa, la cual debe ser realizada tratando de abarcar la mayor extensión posible, de forma tal, que se pueda evaluar si existen diferencias significativas en el comportamiento de los materiales presentes en el sitio. En este caso en particular, las ubicaciones de los sitios de muestreo se encontraban espaciados aproximadamente por 250 metros.

Para efectos del presente informe, los análisis de deformabilidad fueron realizados utilizando el valor de módulo de elasticidad de 6400 kPa para el Sitio 1 y 22787 kPa para el Sitio 2.

Tabla 1. Resumen de resultados de ensayos de laboratorio realizados por el LanammeUCR

	Sitio 1	Sitio 2		
Límite líquido	51	56		
Límite plástico	32	32		
Índice de plasticidad	19	24		
SUCS	MH	MH		
$G_T$	-	2,614		
$G_S$	-	2,612		
%Pas N° 200	78,1	69,5		
Densidad (kN/m³)	13,94	16,50		
Corte directo, $\tau$ (kPa)	$\phi$ (°)	52,00	$\phi$ (°)	48,10
	c (kPa)	4,85	c (kPa)	30,31



Es importante recalcar que los valores obtenidos para los parámetros relacionados con la resistencia al corte obtenidos por el LanammeUCR muestran diferencias en magnitud para los sitios de ensayo evaluados, indicando la importancia de realizar una adecuada campaña de exploración geotécnica para la determinación de los parámetros geotécnicos y los correspondientes modelos de los sitios en estudio.

### II.3 Comprobación de estabilidad de los taludes

#### II.3.1 Resultados de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) en tres dimensiones (3D)

Actualmente la mayoría de los estudios de estabilidad de taludes se basan en los Métodos de Equilibrio Límite (MEL), donde se considera la relación entre las fuerzas deslizantes y resistivas a lo largo de una superficie de falla dada. Convencionalmente, los análisis de estabilidad se efectúan considerando perfiles bidimensionales, los cuales son una simplificación significativa de la situación real. En estas representaciones bidimensionales, el ingeniero diseñador define con su criterio, las secciones transversales críticas en las cuales se puede presentar una falla o deslizamiento del talud.

Sin embargo, debe tenerse en consideración que los MEL poseen limitaciones que deben ser conocidas por el geotecnista con la finalidad de escoger el método que mejor responda a las solicitaciones del problema que se quiere evaluar. Así pues, entre las limitaciones generales que tiene el MEL se pueden mencionar:

- No se incluye un análisis de deformaciones
- La base de cálculo, considera un equilibrio estático de fuerzas estáticas. Sin embargo, una vez que se genera la falla, el modelo deja de ser aplicable, puesto que la geometría de análisis cambia, y comienza a darse un movimiento de la masa de suelo, con el cual se deja de tener un equilibrio estático
- Se supone una distribución uniforme de esfuerzos en la base de los elementos o dovelas.

Por su parte, dependiendo de los diferentes métodos de equilibrio Límite que existen, se pueden encontrar otras limitaciones tales como:

- Se asume que el talud tiene un material isotrópico
- Se puede asumir la existencia, o no, de fuerzas cortantes entre las dovelas
- En algunas metodologías se asume un equilibrio de momentos
- Se asume una superficie de falla

Cuando se consideran las limitaciones anteriores, propias de los Métodos de Equilibrio Límite y las simplificaciones de los análisis dimensionales, es sorprendente el éxito logrado en los análisis de situaciones reales. Sin embargo, durante las últimas décadas, se han investigado e implementado numerosos métodos tridimensionales para el análisis de taludes. El interés en el análisis tridimensional de estabilidad de taludes parece estar impulsado por el hecho de que la mayoría de las fallas de estabilidad de taludes son de carácter inherentemente tridimensional, es decir, la superficie de falla con mucha frecuencia presenta variaciones con la superficie del terreno, que difícilmente pueden ser previstas por el ingeniero.

De esta manera, teniendo en consideración la cercanía de las casas a la corona de los taludes que están siendo conformados, es posible utilizar los Modelos de Elevación Digital (MED) obtenidos con la ayuda del VANT, y el uso del software SLIDE3 del paquete de programas de RocScience, para llevar a cabo análisis de estabilidad de los taludes.

La Figura 4, muestra el MED levantado por el VANT para el Sitio 1, localizado aproximadamente 500 metros al oeste de la Intersección de Calle Blancos (denominado como Sitio1). Por su parte, la Figura 5 muestra el MED del levantamiento del Sitio 2, localizado en los alrededores de MACOPA. En ambas

figuras, la escala de colores inicia en los colores azules, que representan los puntos más bajos y los colores rojizos, representan los puntos con elevaciones mayores.

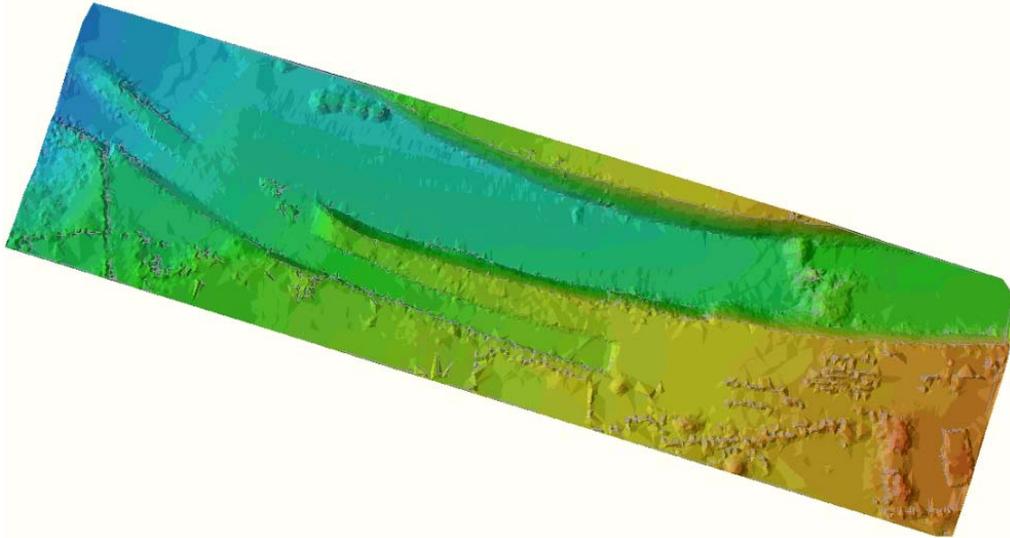


Figura 4. Modelo de elevación del Sitio 1 utilizado en el software SLIDE3 de la zona de estudio

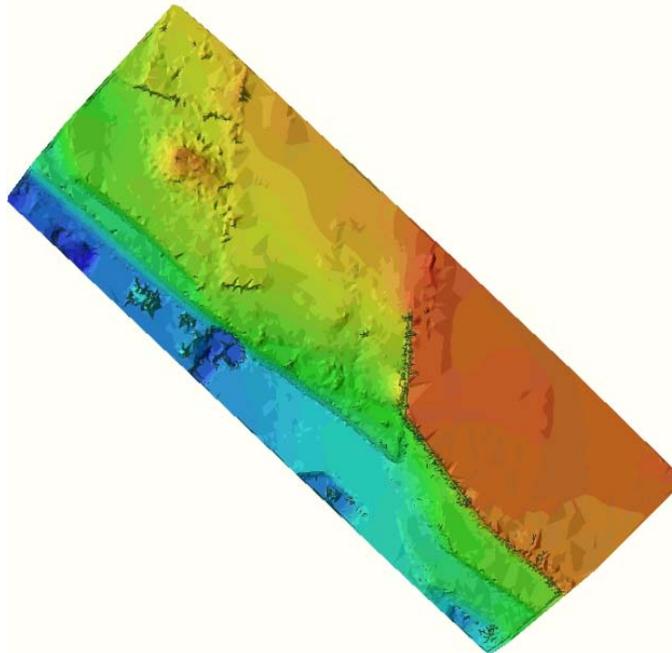


Figura 5. Modelo de elevación del Sitio 2 utilizado en el software SLIDE3 de la zona de estudio

De acuerdo con las recomendaciones establecidas en el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (CGTLCR), se considera que para el sitio de estudio el riesgo de pérdidas humanas se encuentra en un nivel alto y el riesgo de daños económicos y ambientales presenta un nivel medio alto, para lo cual es aceptable un valor de factor de seguridad de 1,50 en condición estática. Por su parte, si se considera la condición de sismo (pseudo-estática) se utilizó un coeficiente de aceleración horizontal del suelo de 0,15 g definido en el CGTLCR, ya que el sitio se encuentra ubicado en una Zona III con tipo de suelo S3-S4, para lo cual se debe considerar un valor de factor de seguridad mayor a 1,1 en condición pseudo-estática.



Es importante mencionar que para efectos de los resultados del análisis de estabilidad de taludes que se muestra a continuación, al tratarse de un análisis preliminar, se considera un modelo geotécnico que asume la presencia de un único material homogéneo. Por lo que, se sugiere que, para la obtención de los resultados definitivos, ampliar la información disponible y llevar a cabo un estudio de la estratigrafía del suelo, acompañada de una mayor cantidad de ensayos de laboratorio a cargo de un profesional en geotecnia especializado. Debido a que se trata de un análisis de estabilidad preliminar, únicamente se consideran simulaciones de las condiciones estáticas y pseudo-estáticas, sin considerar, en ambos casos, la presencia de un nivel freático, tampoco se han considerado en los análisis ninguna de las obras de contención proyectadas para este proyecto, puesto que aún no se dispone de esta información. Estas últimas condiciones de evaluación, así como cualquier otra condición que se pueda considerar crítica, deberá ser analizada por el ingeniero responsable. Sin embargo, los resultados obtenidos constituyen un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis más exhaustivos para evaluar las afectaciones en las estructuras vecinas a las obras de movimiento de tierra que se están ejecutando.

En las Figuras 6 y 7 se muestran un mapa de factores de seguridad considerando la condición de análisis estática para ambos sitios, se observa también la escala de factores de seguridad utilizada para la apropiada interpretación de este mapa. En ambas figuras se observan los parámetros geotécnicos obtenidos con los ensayos de laboratorio realizados por el LanammeUCR y que se presentan en el apartado II.2. Se puede observar que la escala de valores para el factor de seguridad del sitio va de valores inferiores a 1,5 a valores de factor seguridad mayores a 3,0. Como se observa en la esquina inferior derecha de ambas figuras, se pueden encontrar los Factores de Seguridad más bajos obtenidos para las diferentes metodologías de equilibrio límite, por su parte, también es posible observar las regiones que corresponden a estos factores de seguridad para cada una de las metodologías aplicadas. Cada región posee un color diferente, de acuerdo con la metodología de análisis utilizada, la cual se muestra en estas mismas figuras. Como se observa estas regiones más o menos coinciden entre sí, y cuyas diferencias se asocian con las diferencias inherentes a cada una de las metodologías aplicadas.

En general, los Factores Seguridad obtenidos son superiores al valor de 1,5, el cual corresponde a la recomendación del CGTLCR para la condición estática. Únicamente, como se observa en la Figura 6, correspondiente al Sitio 1, un  $FS=0,881$  por la metodología de Bishop y  $FS=1,453$  por la metodología de Janbu, que se encuentra por debajo de las recomendaciones del CGTLCR. Este valor inferior a 1 indicaría una falla en el talud, sin embargo, como el valor obtenido es bastante diferente a los valores de FS obtenidos con la aplicación de las otras metodologías de análisis, resalta la importancia de comparar los resultados para obtener conclusiones definitivas. Adicionalmente, debe tenerse en consideración que los métodos de Spencer y GLE/Morgenstern-Price son métodos más rigurosos por lo que los valores obtenidos de estos análisis preliminares sugieren un desempeño adecuado bajo condiciones estáticas.

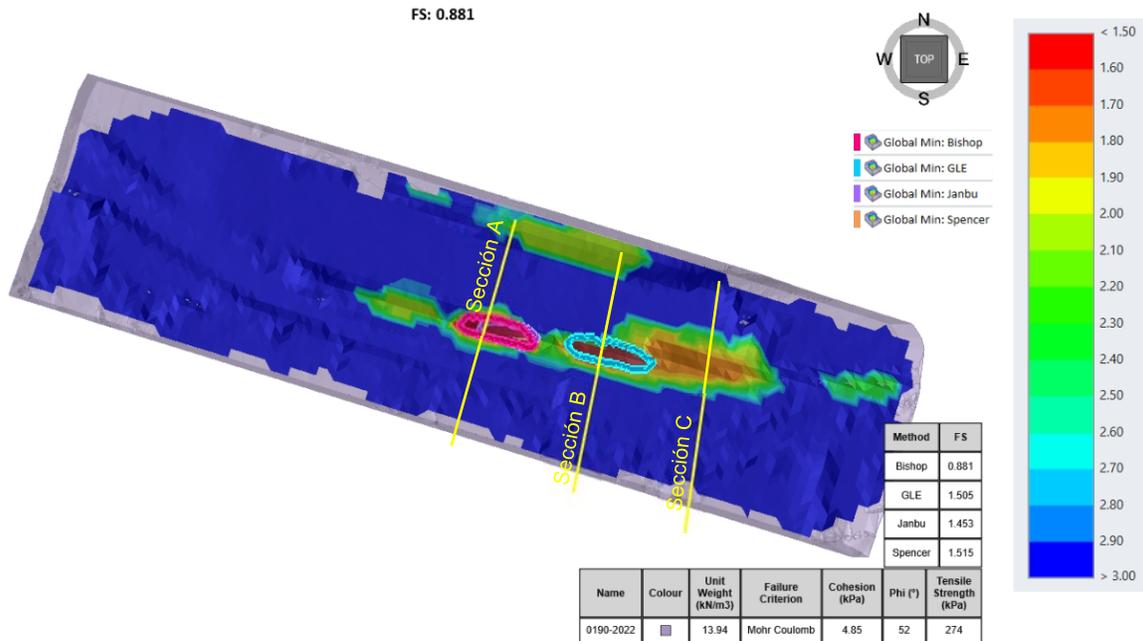


Figura 6. Factores de seguridad obtenidos con el software SLIDE3 de la zona de estudio del Sitio 1 para una condición estática.

En el caso del sitio 2, todos los valores de los Factores Seguridad fueron superiores al valor de 1,5 recomendado por el CGTLCR, por lo que los valores obtenidos de estos análisis preliminares sugieren un desempeño adecuado bajo condiciones estáticas.

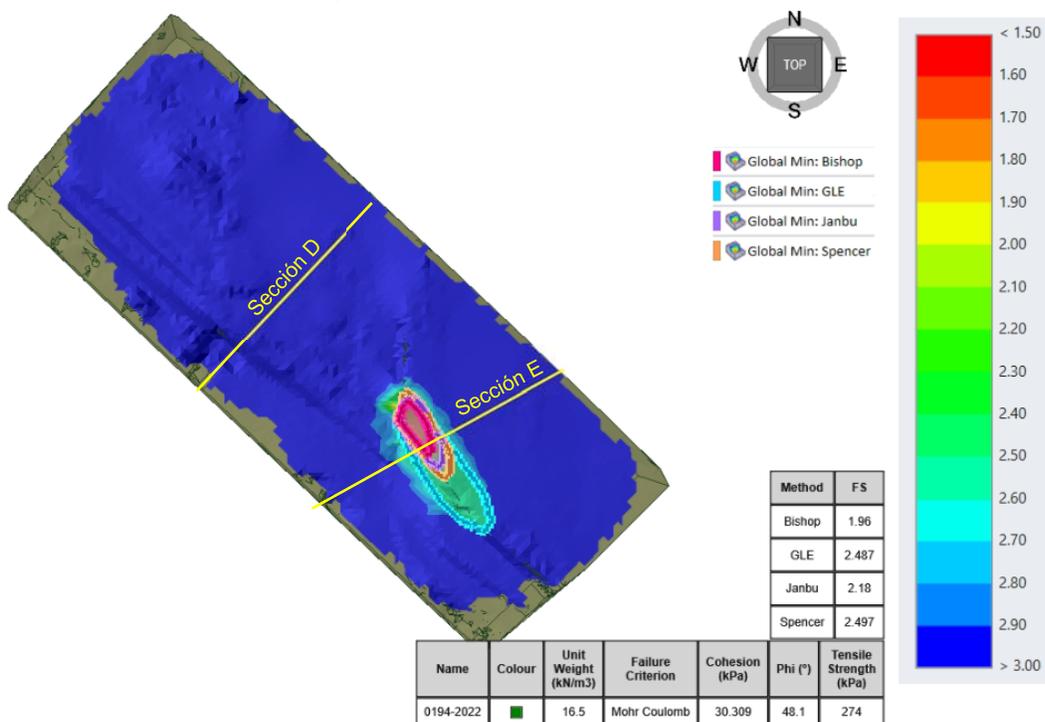


Figura 7. Factores de seguridad obtenidos con el software SLIDE3 de la zona de estudio del Sitio 2 para una condición estática.

Las Figuras 8 y 9 muestran un mapa de factores de seguridad considerando la condición de análisis pseudo-estática, se observa también la escala de factores de seguridad utilizada para la apropiada interpretación de este mapa. Se puede observar que la escala de valores para el factor de seguridad del sitio va de valores inferiores a 1,1 a valores de factor seguridad mayores a 3,0. La variación en la escala de colores corresponde con la modificación de los valores recomendados por el CGTLCR. Como se observa en la esquina inferior derecha de ambas figuras, se pueden encontrar los Factores de Seguridad más bajos obtenidos para las diferentes metodologías de equilibrio límite, por su parte, también es posible observar las regiones que corresponden a estos factores de seguridad. Cada región posee un color diferente, de acuerdo a la escala que se muestra en estas mismas figuras, y como se observa estas regiones más o menos coinciden entre sí, y cuyas diferencias se asocian con las diferencias inherentes a cada una de las metodologías aplicadas. En general, todos los Factores Seguridad obtenidos para el análisis pseudo-estático son superiores al valor de 1,1 recomendado por el CGTLCR, por lo que los valores obtenidos de estos análisis preliminares sugieren un desempeño adecuado bajo condiciones pseudo-estáticas.

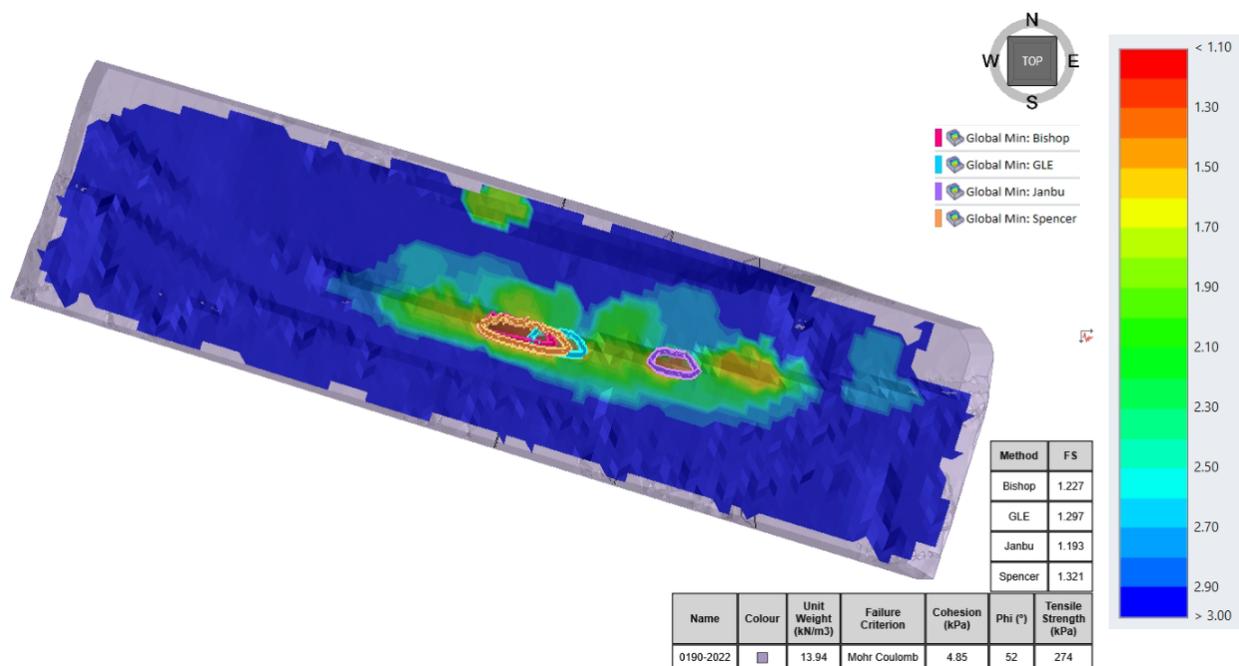


Figura 8. Factores de seguridad obtenidos con el software SLIDE3 de la zona de estudio del Sitio 1 para una condición pseudo-estática.

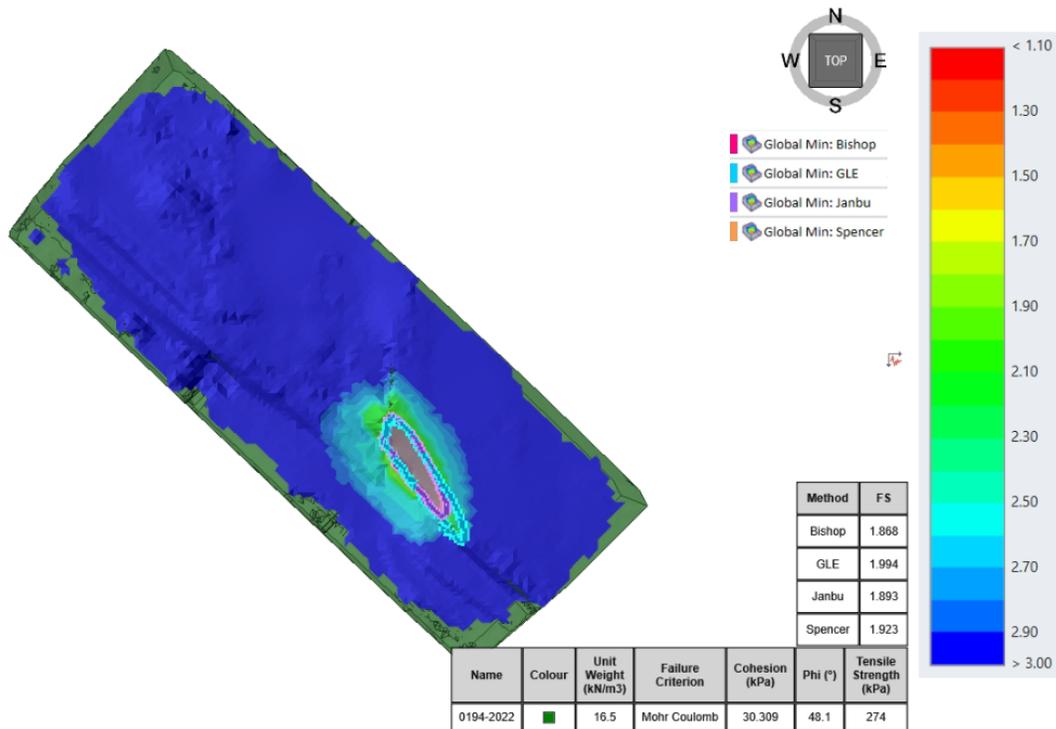


Figura 9. Factores de seguridad obtenidos con el software SLIDE3 de la zona de estudio del Sitio 2 para una condición pseudo-estática.

### II.3.2 Resultados de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) en dos dimensiones 2D – Condición estática

En las regiones mostradas en las Figuras 6, 7, 8 y 9, correspondientes a las zonas con factores de seguridad más bajos para las diferentes metodologías aplicadas, también fueron realizados análisis complementarios de estabilidad de taludes en dos dimensiones (2D) para secciones transversales. El objetivo de estos análisis fue considerar de una forma detallada la presencia de las sobrecargas impuestas por la presencia de viviendas cercanas a los taludes, y en el caso de las inmediaciones de MACOPA considerar la presencia del muro de gaviones existente. Se hace la suposición de que las sobrecargas, debido a las edificaciones o zonas residenciales ubicadas en las cercanías de la corona del talud, son verticales y uniformes con un valor equivalente de 10 kPa y aplicadas en la parte alta del talud. Este valor de sobrecarga debería ser verificado al momento de realizar el análisis y diseño correspondiente, por parte del ingeniero diseñador.

La Figura 10, corresponde a los resultados obtenidos en la sección transversal de la región con los factores de seguridad más bajos en el Sitio 1. Por su parte, la Figura 11, corresponde a la sección transversal de la región con el factor de seguridad estático más bajo utilizando la metodología de GLE/Morgenstern-Price en el Sitio 1, según lo observado en la Figura 6 anterior. Adicionalmente, en el Sitio 1, según lo observado en campo, con el alineamiento y avance de la excavación, se observó que la corona del talud izquierdo (sentido oeste-este) cada vez se encuentra más próximo a algunas viviendas existentes, por tal motivo, en la Figura 12, se presenta un análisis de estabilidad de taludes para intentar suponer esta condición.

Tal y como se observa en las Figura 10 y 11, los factores de seguridad obtenidos en el análisis en dos dimensiones, para todas las metodologías utilizadas, presentan valores de FS entre 1,323 – 1,453, valores que se encuentran por debajo del valor mínimo recomendado por el CGTLCR de FS=1,5. Lo

cual podría considerarse contradictorio a los resultados obtenidos en el análisis en 3D que se presentó anteriormente, donde los valores de los FS fueron superiores al valor de 1,5. No obstante, es importante resaltar que, en ocasiones, este comportamiento puede ser esperado, puesto que la geometría tridimensional del terreno puede favorecer la obtención de factores de seguridad más altos, o en algunos casos, hasta podrían obtenerse FS menores, de ahí la importancia de realizar ambos análisis y aplicar el adecuado criterio técnico del ingeniero geotecnista para establecer el valor más adecuado. Adicionalmente, es necesario indicar una vez más, que los resultados presentados corresponden a de un análisis de estabilidad preliminar que no considera la presencia de un nivel freático y ninguna de las obras de contención proyectadas para este proyecto, puesto que aún no se dispone de esta información. Estas últimas condiciones de evaluación, así como cualquier otra condición crítica deberá ser considerada en el diseño definitivo.

Por su parte, en el caso de la Figura 12, los valores de los FS en general cumplen con los valores mínimos recomendados por el CGTLCR de 1,5 lo cual sugiere que, desde el punto de vista de los análisis realizados con el Método Equilibrio Limite (MEL), los taludes tendrán un desempeño adecuado. Adicionalmente, debe tenerse en consideración que estas simulaciones no están tomando en cuenta el aporte que tendrá el muro de pantalla de pilotes que está proyectado construirse en esta sección, lo cual puede permitir un aumento en los factores de seguridad. Debido a esto, se sugiere acompañar y garantizar el proceso constructivo del muro de pilotes proyectado en este sitio para asegurar el buen desempeño de la obra.

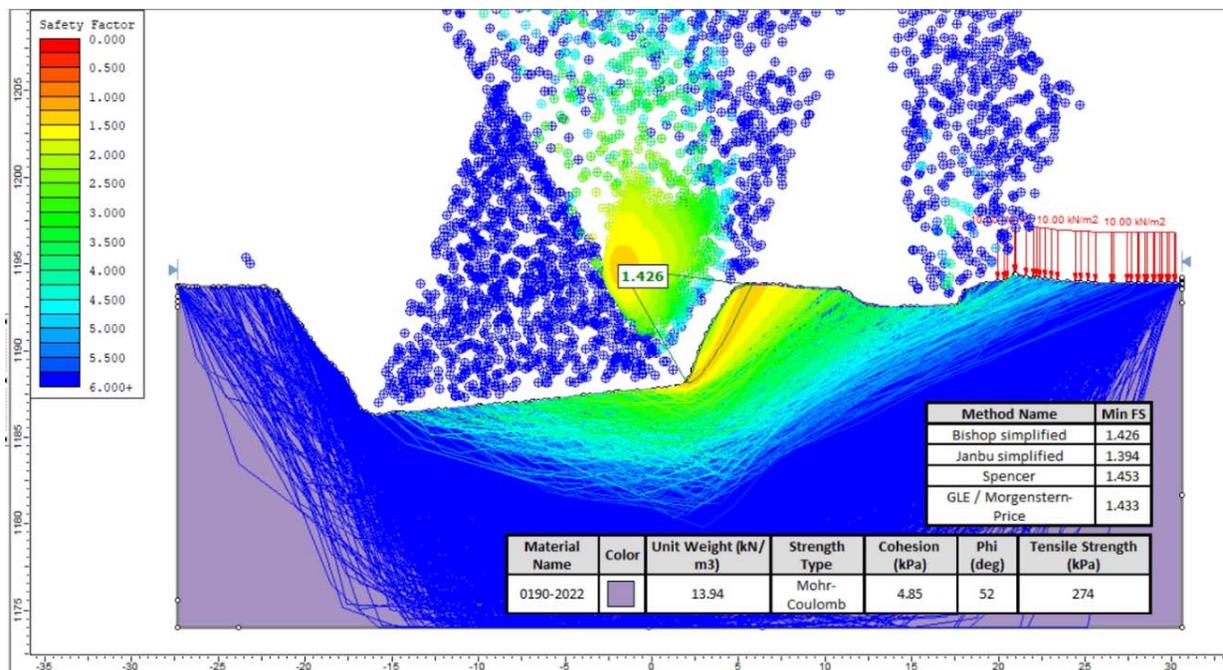


Figura 10. Sección A: Sección transversal del talud y factor de seguridad para la región con los factores de seguridad más bajos en el Sitio 1.

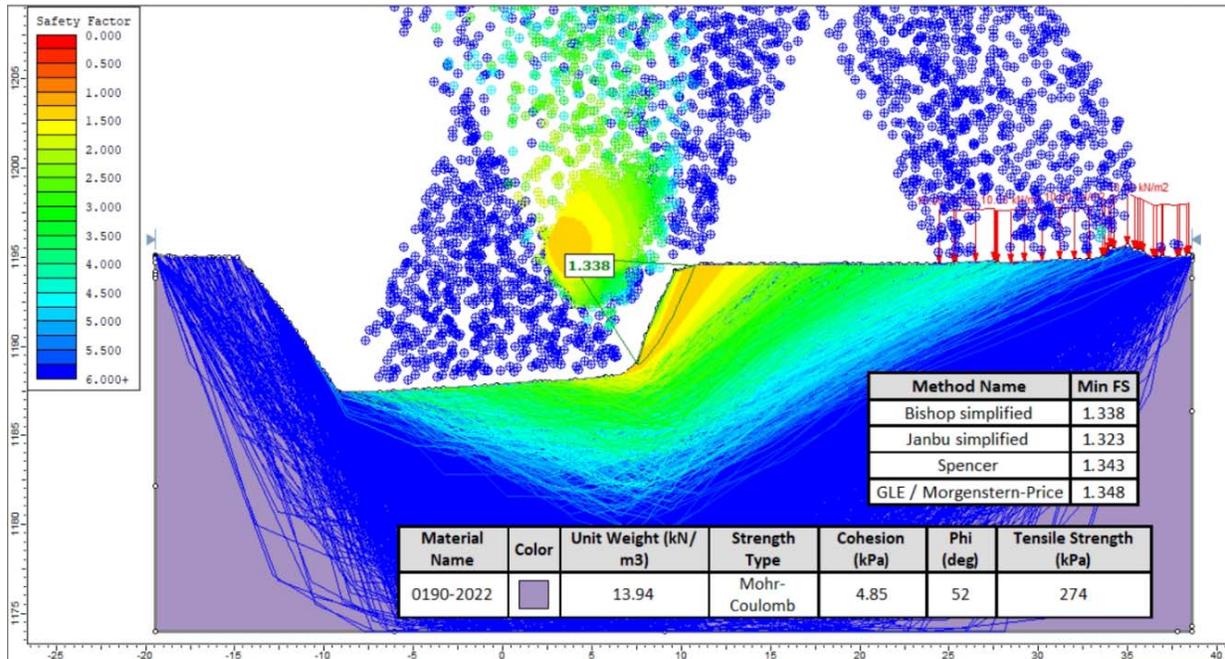


Figura 11. Sección B: Sección transversal del talud para la región con factor de seguridad más bajo utilizando la metodología de GLE/Morgenstern-Price en el Sitio 1.

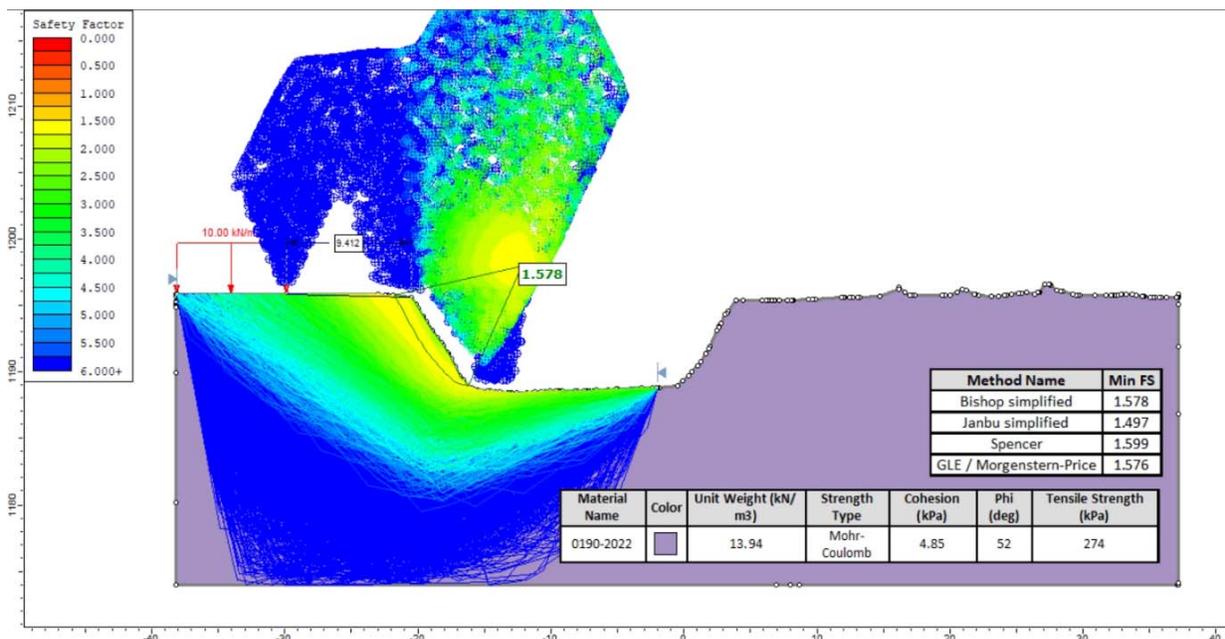


Figura 12. Sección C: Sección transversal supuesta con el avance y alineamiento de la excavación (sentido oeste-este) para evaluar sobrecargas de viviendas próximas a la corona del talud en el Sitio 1.

Por su parte, tal y como se había mencionado en el informe EIC-Lanamme-INF-0130-2022, fue posible observar el corte de un talud de una de las pilas del futuro viaducto que se encuentra al ras de la tapia de una edificación (ver Figura 13), por lo que en la Figura 14, se muestran los resultados obtenidos de una transversal en este sitio para evaluar de forma preliminar la estabilidad del talud, nuevamente los valores de los FS en general cumplen con los valores mínimos recomendados por el CGTLCR de 1,5 lo

cual sugiere que, desde el punto de vista de los análisis realizados con el Método Equilibrio Limite (MEL) un desempeño adecuado. Como se detallará más adelante, también fueron realizados análisis adicionales de deformabilidad en esta misma sección para verificar que no se generarían afectaciones a las edificaciones que se encuentran en la zona superior del talud.



Figura 13. Talud de corte cercano a la tapia de una edificación en el Sitio 2.

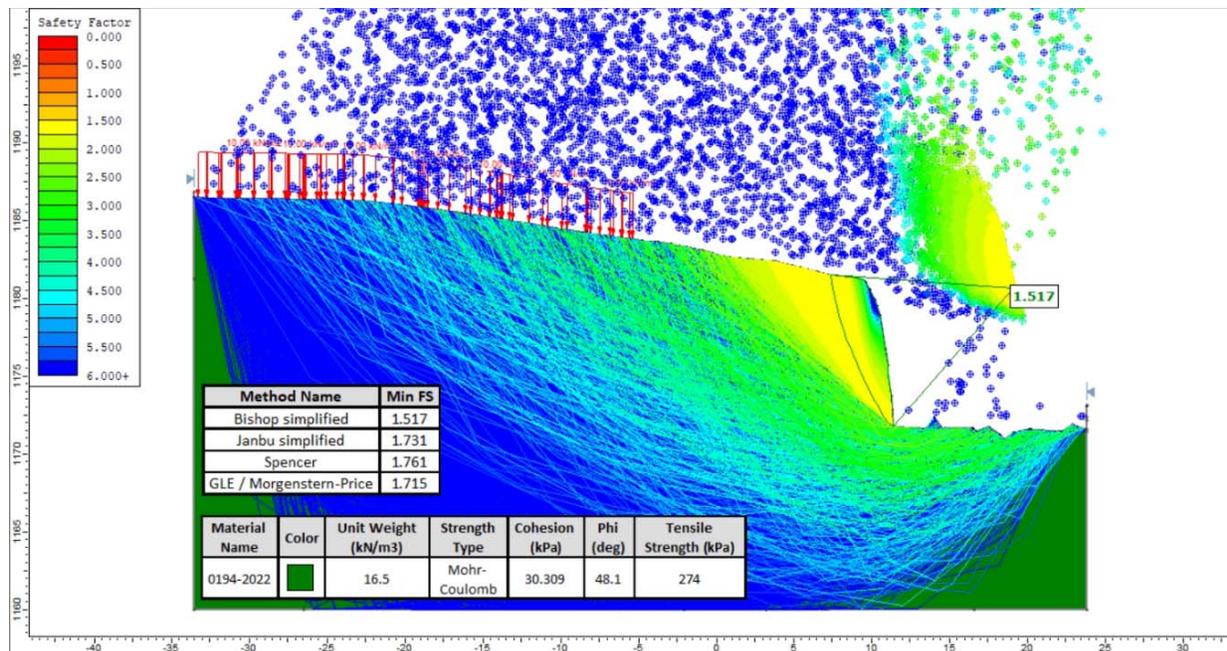


Figura 14. Sección D: Sección transversal del talud próximo a la tapia de una edificación en el Sitio 2.

Finalmente, con la finalidad de evaluar la estabilidad en dos dimensiones (2D) de la región con los factores de seguridad más bajos en el Sitio 2, mostrado en la Figura 7, es necesario incluir en la simulación la presencia del muro de gaviones observado en sitio. Para ello se va suponer la existencia de un muro de gaviones de aproximadamente de 7,4 metros de altura compuesto por celdas de 0,914 x

0,914 metros. Si bien el Slide2 no realiza cálculos de estabilidad interna de los muros de gaviones, el programa puede realizar cálculos de la estabilidad general del talud con la presencia del muro. Para este análisis, se utilizó el método de “cohesión equivalente” el cual simula la existencia de la malla de acero a través de un valor de cohesión,  $c_r$ , distinto de cero. Cuando se utiliza el método de cohesión equivalente, la cohesión del muro de gaviones puede ser estimada utilizando las siguientes ecuaciones (Grodecki, 2017):

$$c_r = \frac{\Delta\sigma_3}{2} \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$\Delta\sigma_3 = \frac{2f_t \varepsilon_c}{d\varepsilon_a(1-\varepsilon_a)} \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$\varepsilon_c = \frac{1-\sqrt{1-\varepsilon_a}}{1-\varepsilon_a} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Para efectos de los análisis realizados, la Tabla 2 muestra los valores asumidos en las ecuaciones anteriores:

Ángulo de fricción interna, $\varphi$ [°]	30,0
Densidad del muro de gaviones, $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	18,0
Módulo de elasticidad, E [kPa]	25000
Módulo de Poisson, $\nu$	0,25
Resistencia a tensión de la malla, $f_t$ [kN/m]	71,0
Ancho del gavión, d [m]	0,914
Relación entre el área de acero y el área total de la junta del subsuelo del gavión, $\varepsilon_a$	0,07
Cohesión equivalente calculada, $c_r$ [kPa]	79,0

La Figura 15 muestra los resultados obtenidos, los cuales también indica valores de FS superiores a 2,392, valor superior valor de 1,5 recomendado por el CGTLCR de 1,5 lo cual sugiere un desempeño adecuado.

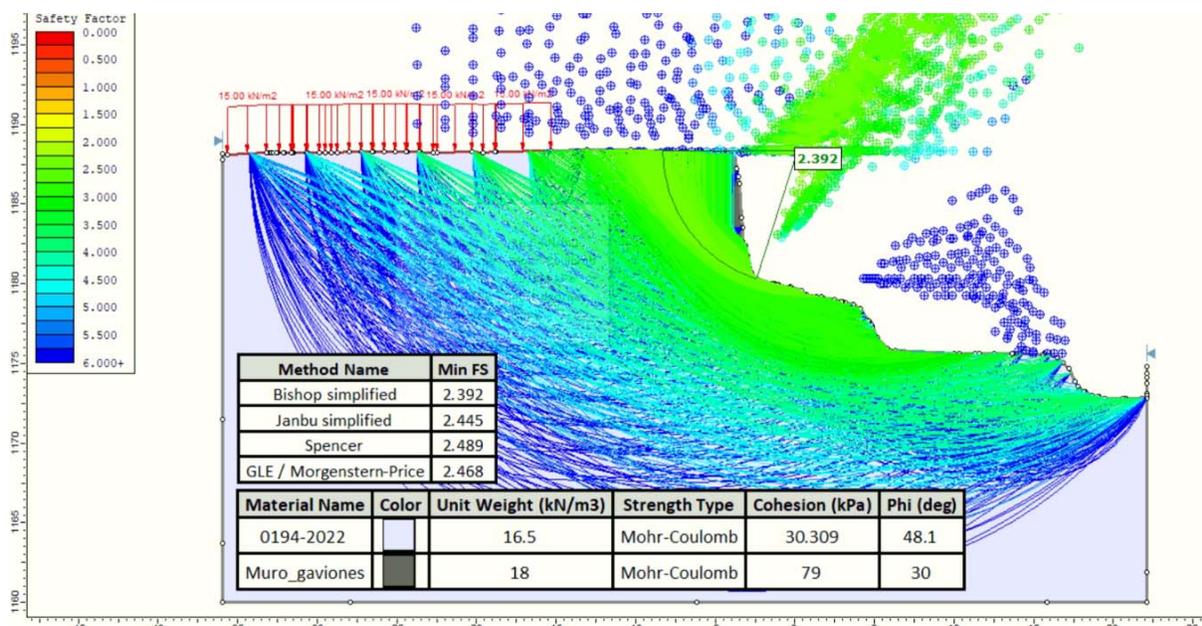


Figura 15. Sección E: Sección transversal del talud próximo a MACOPA, utilizando el método de la cohesión equivalente en el muro de gaviones en el Sitio 2.

### II.3.3 Resultados de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) en dos dimensiones 2D – Condición pseudo-estática

También fueron realizados análisis complementarios, para considerar las condiciones sísmicas en la revisión de la estabilidad de taludes en dos dimensiones (2D) para las mismas secciones transversales consideradas en el apartado anterior. Para estos análisis se consideró una condición pseudo-estática con un coeficiente de aceleración horizontal del suelo de 0,15 g definido en el CGTLCR para el sitio localizado en Zona III con tipo de suelo S3-S4, cuya recomendación sugiere  $FS > 1,1$ . Por las mismas razones expuestas anteriormente, en estos análisis no se considera la presencia del nivel freático, ni las obras de contención proyectadas.

Las Figura 16, 17 y 18, corresponden a los resultados obtenidos en las mismas secciones transversales del Sitio 1. Como se puede observar, la mayoría de los factores de seguridad son muy próximos o ligeramente mayores al  $FS > 1,1$  recomendado por el CGTLCR, lo cual sugiere desde el punto de vista del MEL desempeños adecuados de los taludes. Adicionalmente, si se tiene en consideración que estas simulaciones no están tomando en consideración el aporte que tendrá la pantalla de pilotes que está proyectada construir en esta sección, es de esperar que los factores de seguridad con la inclusión de la pantalla de pilotes tengan valores mucho más altos que la recomendación del CGTLCR, mostrando nuevamente la importancia de garantizar y asegurar la construcción del muro de pilotes proyectado en este sitio. Por su parte, los análisis definitivos, que incluyan la presencia de niveles freáticos o cualquier otra condición crítica, eventualmente también pueden reducir los factores de seguridad obtenidos, de ahí la importancia de incluir también estos análisis para estimar el comportamiento final esperado del proyecto.

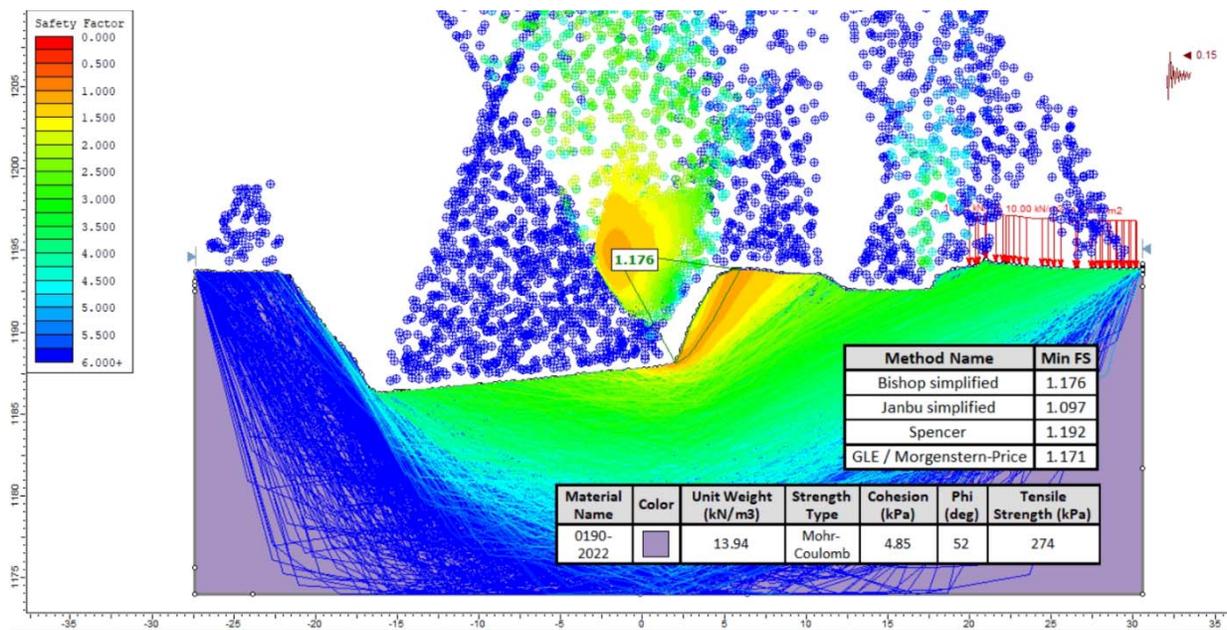


Figura 16. Sección A: Sección transversal del talud y factor de seguridad para la región con los factores de seguridad más bajos en el Sitio 1 – Análisis pseudo-estático.

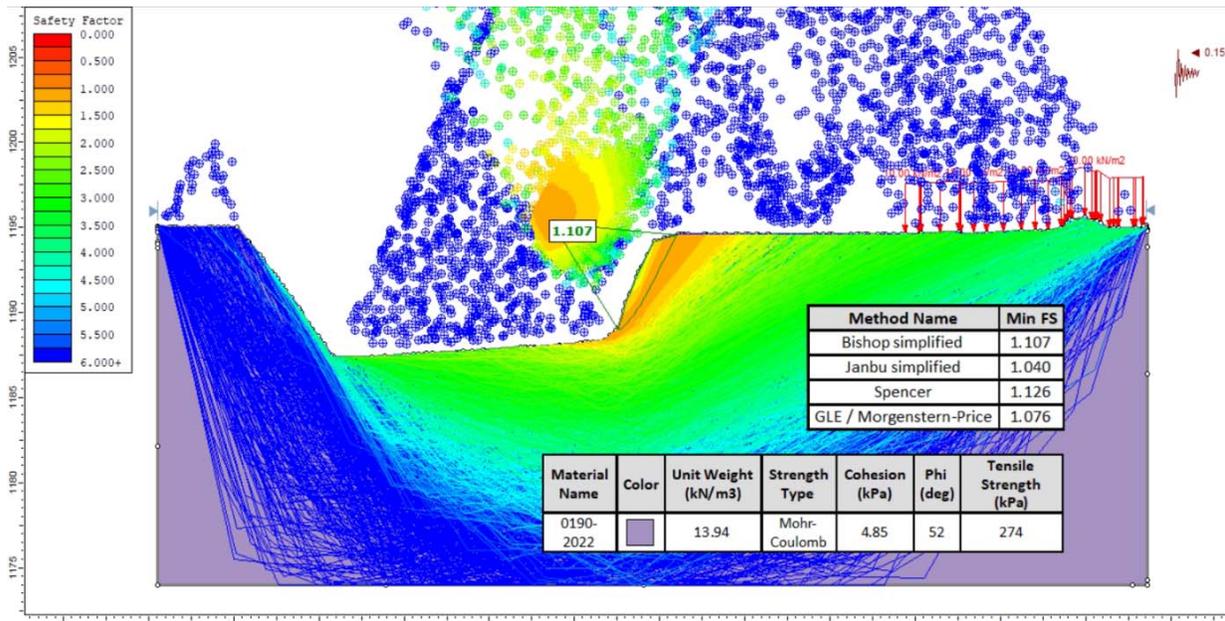


Figura 17. Sección B: Sección transversal del talud para la región con factor de seguridad más bajo utilizando la metodología de GLE/Morgenstern-Price en el Sitio 1 – Análisis pseudo-estático.

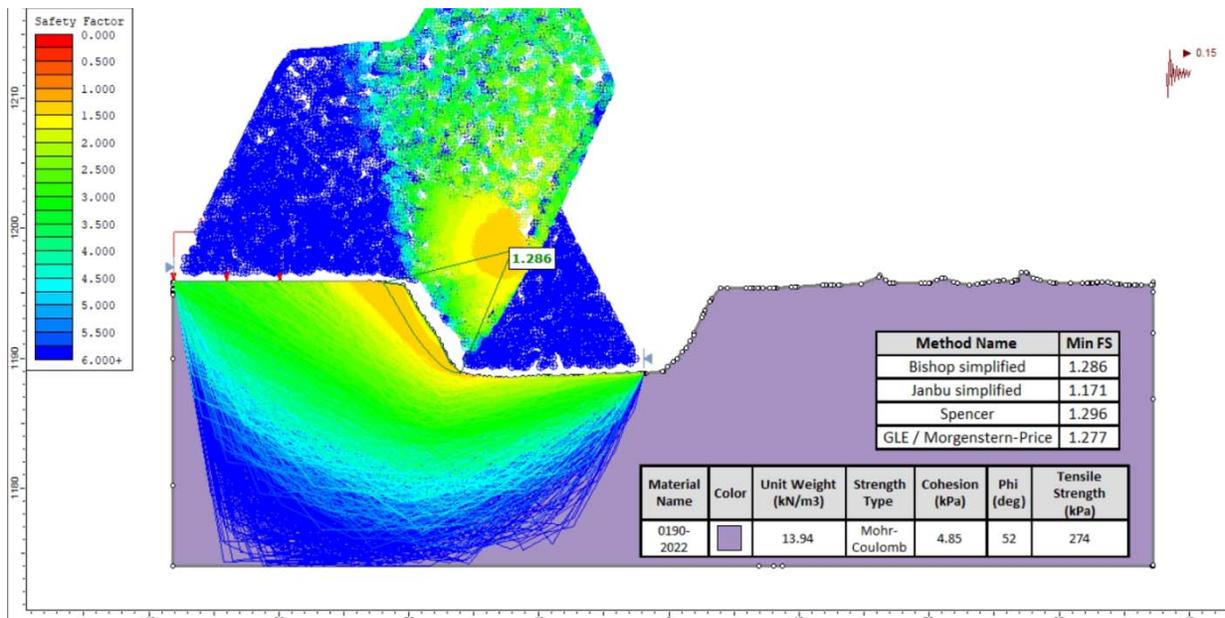


Figura 18. Sección C: Sección transversal supuesta con el avance y alineamiento de la excavación (sentido oeste-este) para evaluar la sobrecarga de viviendas próximas a la corona del talud en el Sitio 1 – Análisis pseudo-estático.

Por su parte, las Figuras 19 y 20 corresponden a los resultados obtenidos en las mismas secciones transversales del Sitio 2. En estos casos, los factores de seguridad obtenidos presentan valores superiores a 1,360, valor que supera la recomendación del CGTLCR de  $FS > 1,1$  lo cual sugiere desde el punto de vista del MEL desempeños adecuados de los taludes o secciones transversales analizadas.

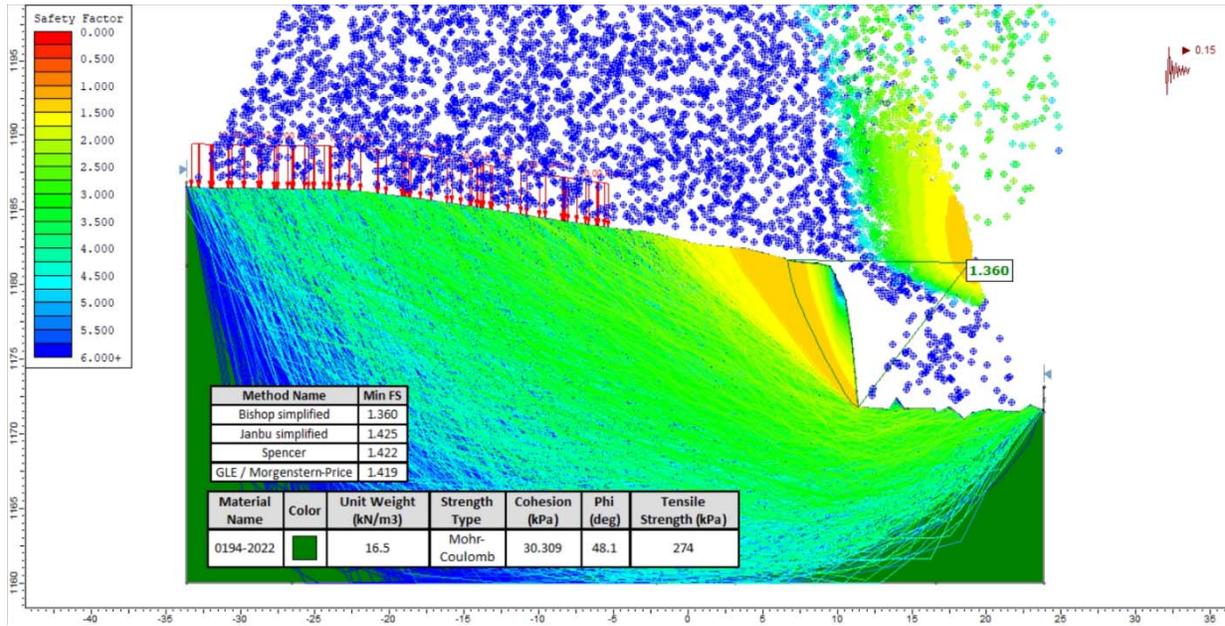


Figura 19. Sección D: Sección transversal del talud próximo a la tapia de una edificación en el Sitio 2 – Análisis pseudo-estático.

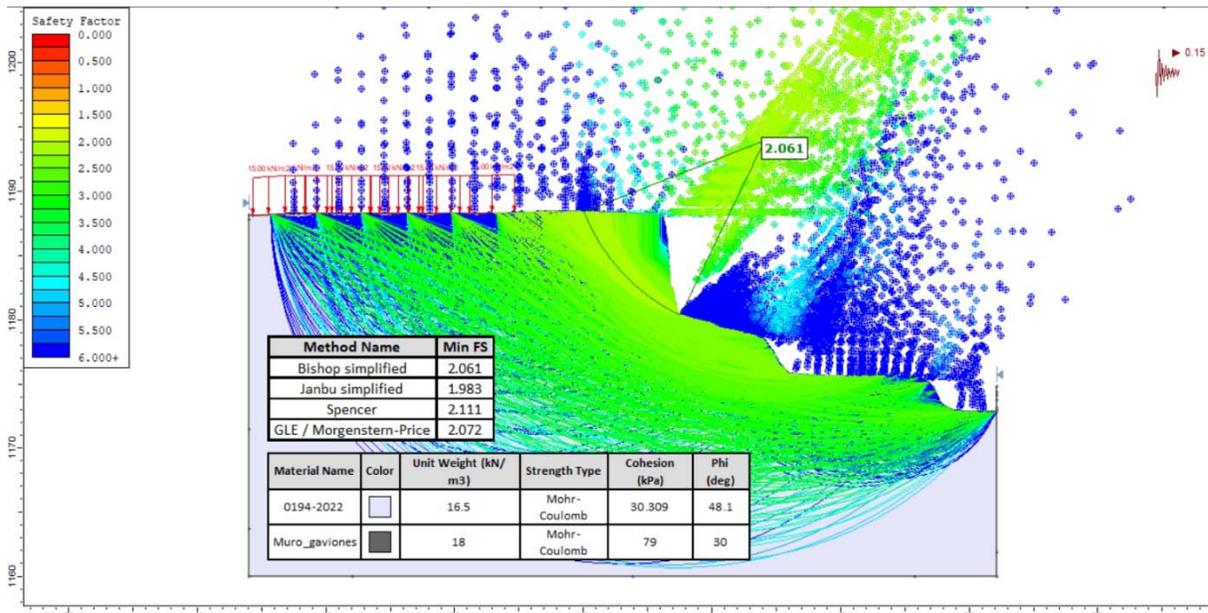


Figura 20. Sección E: Sección transversal del talud próximo a MACOPA, utilizando el método de la cohesión equivalente en el muro de gaviones en el Sitio 2 – Análisis pseudo-estático.

### II.3.4 Resultados de estabilidad utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF)

Como se mencionó anteriormente, los Métodos de Equilibrio Límite (MEL) son los métodos más utilizados para analizar la estabilidad de taludes. El supuesto fundamental de estos métodos es que la falla ocurre por deslizamiento de un bloque o masa de suelo a lo largo de una superficie de deslizamiento.



La popularidad de estos métodos se debe principalmente a:

- relativa simplicidad
- capacidad para evaluar la sensibilidad de la estabilidad a varios parámetros de entrada
- la experiencia adquirida por los ingenieros geotécnicos a lo largo de los años
- que requieren datos de entrada mínimos

A pesar de todos los beneficios, el enfoque de equilibrio límite tiene algunas deficiencias importantes:

- La metodología ignora el comportamiento de esfuerzo-deformación de suelos y rocas.
- Hace suposiciones arbitrarias (principalmente con respecto a las fuerzas entre cortes) para garantizar la determinación estática.
- Es difícil de usar para analizar problemas de estabilidad, como la falla en voladizos y muros de contención, en los que la falla involucra cuñas deformadas

Para resolver algunas de las limitaciones encontradas en los Métodos de Equilibrio Límite (MEL), en los últimos años, se ha incrementado significativamente el uso del Método de Elementos Finitos (MEF), el cual divide un cuerpo en formas geométricas simples o elementos, interconectados entre sí, para resolver de forma aproximada el conjunto. La principal ventaja de este método está en que es posible considerar las relaciones esfuerzo-deformación, por lo que una ruptura no se presenta de forma instantánea, sino que es considerado como un proceso continuo y gradual.

La aplicación de estas técnicas en el pasado estaba limitada por el elevado costo computacional y tiempos de cálculo requerido. No obstante, con los avances en las velocidades de cálculo, estas limitaciones han sido superadas con el uso de las computadoras personales.

Con ello es posible estimar el estado de esfuerzos, las deformaciones y el flujo de agua en el terreno. Sin embargo, el Factor de Seguridad del talud no se puede estimar directamente utilizando los métodos de análisis numérico.

El análisis de la estabilidad de taludes mediante modelos numéricos se basa en el cálculo del factor de seguridad mediante la **reducción de la resistencia al corte del suelo** (SRF, por sus siglas en inglés). El método consiste en reducir progresivamente la resistencia al corte del suelo (SSR, por sus siglas en inglés) hasta que se produce la ruptura del mismo, estando el factor de seguridad definido por la razón entre la resistencia al corte original del suelo y la resistencia al corte para la que se ha producido la ruptura.

El factor de reducción de la resistencia al corte del suelo (SRF) está definido como:

$$SRF = \left( \frac{\tan \phi'}{\tan \phi_f} \right) = \frac{c'}{c_f} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde,  $\phi'$  y  $c'$  son los parámetros de resistencia efectivos a la "falla" (o factores de resistencia reducida)

Esta metodología tiene una serie de ventajas sobre los métodos de cálculo de equilibrio límite habituales. Entre éstas, la más importante es que la superficie crítica de deslizamiento se genera automáticamente durante el proceso de reducción de resistencia, y su forma (recta, poligonal, circular, espiral logarítmica, etc.) se produce espontáneamente sin que sea necesario predeterminarla al iniciar el proceso de cálculo.

En la ingeniería geotécnica, el análisis de taludes abarca mucho más que determinar su estabilidad, sino que también se deben estimar los riesgos de movimientos de la ladera, como estimar los parámetros de desplazamiento, velocidad y aceleración. Con esta información es posible diseñar y analizar diferentes métodos de excavación, así como permitir observar la distribución de esfuerzos y las deformaciones que puede sufrir el talud.



Teniendo esto en consideración las recomendaciones del informe EIC-Lanamme-INF-0130-2022, relacionado con la necesidad de realizar un análisis de deformaciones en los taludes, especialmente en los taludes con la presencia de estructuras de viviendas o edificaciones cerca de la corona del talud de corte, se procedió a realizar un análisis de deformabilidad utilizando el software de elemento finito RS2 del paquete de programas RocScience, con la finalidad de evaluar las posibles afectaciones que pueden sufrir las edificaciones cuando los cortes de los taludes sufra deformaciones por la redistribución de los esfuerzos in situ.

Es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos para el análisis de deformabilidad de la superficie del talud, ya que la información que se genere de la investigación geotécnica puntualizada en la zona de análisis y el estudio completo correspondiente, considerando las variables no contempladas en el presente análisis preliminar, es responsabilidad enteramente del encargado del diseño del proyecto final. La omisión de estos análisis adicionales podría significar problemas económicos por indemnizaciones que se deban realizar por afectaciones, que pudieron ser previstas y prevenidas mediante el análisis de deformaciones previo.

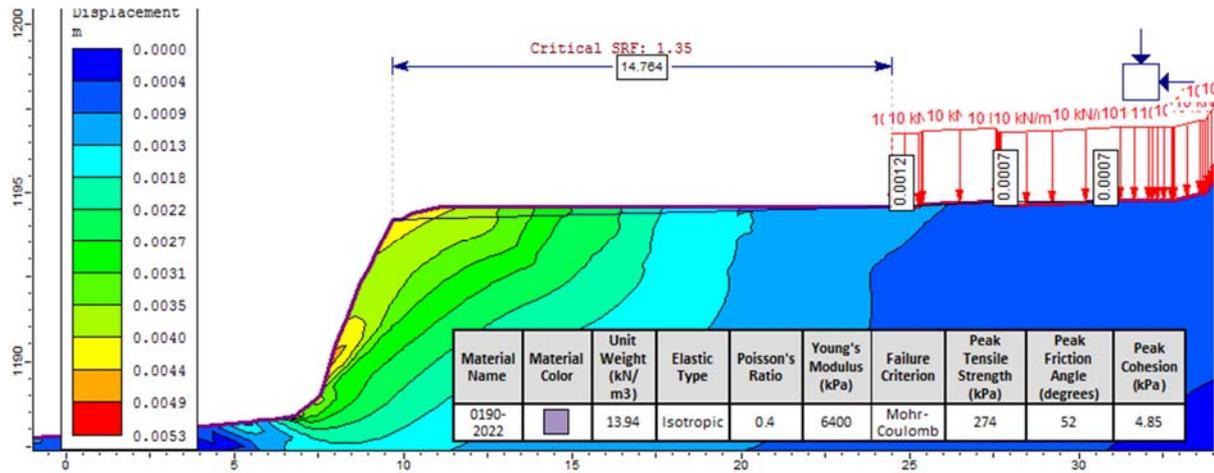
Para el análisis de deformaciones, se procedió a estudiar las mismas secciones que fueron analizadas con el MEL, en este caso las secciones transversales fueron divididas en elementos finitos triangulares de 6 nodos. Con la finalidad de evaluar la presencia de las casas en las cercanías de la corona del talud, se consideró una sobrecarga vertical uniforme de 10 kPa aplicadas en la parte alta del talud. Debido a que se trata de un análisis de deformabilidad preliminar, únicamente se consideran simulaciones de las condiciones estáticas y pseudo-estáticas, sin considerar, en ambos casos, la presencia de un nivel freático, tampoco se han considerado en los análisis ninguna de las obras de contención proyectadas para este proyecto, puesto que aún no se dispone de esta información. Estas últimas condiciones de evaluación, así como cualquier otra condición que se pueda considerar crítica, deberá ser analizada por el ingeniero responsable por la evaluación y diseño definitivo a la luz de cumplir con los requerimientos del proyecto y seguridad de la infraestructura vecina.

Las Figuras 21, 22, 23, 24 y 25, muestran salidas de las deformaciones totales obtenidas en las simulaciones realizadas en el RS2, tanto en las condiciones estáticas y las pseudo-estáticas. En las figuras se pueden observar las propiedades de los materiales que se usaron en las simulaciones, las cuales se basan en los resultados obtenidos con los ensayos de laboratorio mostrados en la sección II.2. Adicionalmente, se pueden observar los valores de los factores de reducción de la resistencia al corte del suelo (SRF), los cuales tienen el mismo significado que el Factor de Seguridad que se obtiene al utilizar el Método de Equilibrio Límite (MEL). En primer lugar, se puede notar, que los valores del SRF disminuyeron entre el análisis de la condición estática y la condición pseudo-estática, lo cual es el comportamiento esperado. Por otro lado, estos valores también pueden ser comparados con las recomendaciones del CGTLCR, el cual establece un valor aceptable superior a 1,50 en condición estática y, en el caso pseudo-estático, un valor superior a 1,1.

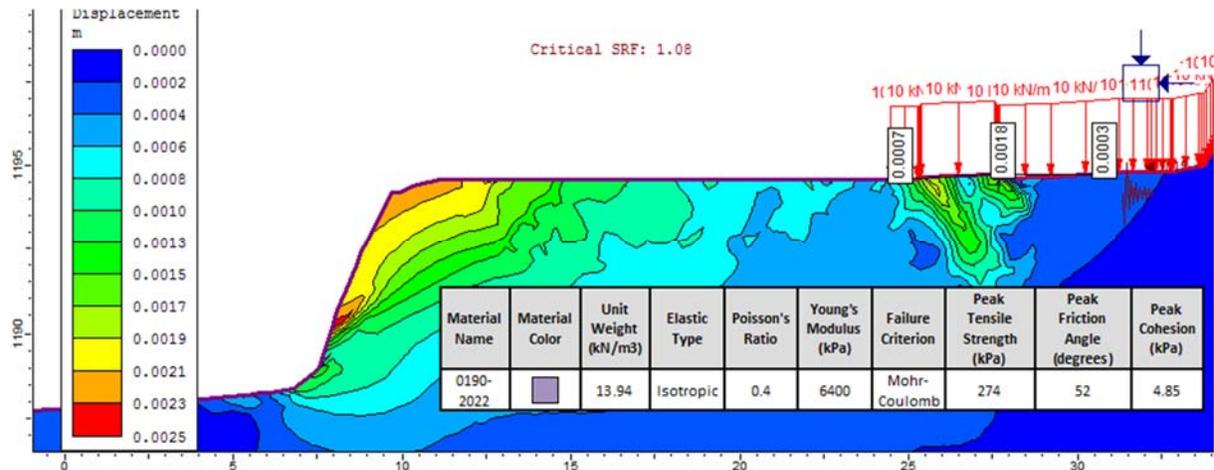
Para cada una de las secciones analizadas, mediante las simulaciones realizadas en el RS2 se determinaron las deformaciones horizontales, verticales y totales que podría presentarse en la estructuras o viviendas cercanas a la corona del talud. Estos valores deben ser revisados con estados límites de servicio, de tal forma que los valores resultantes no causen daños intolerables a la propia cimentación, a la superestructura y sus instalaciones, a los elementos no estructurales y acabados, a las construcciones vecinas, y a los servicios públicos.

La Tabla 3, muestra los valores de los factores de seguridad (FS) más bajos obtenidos aplicando el MEL y los valores obtenido aplicando el MEF. Adicionalmente, en esta misma tabla se resumen los valores de las deformaciones horizontales, verticales y totales obtenidos de las simulaciones realizadas. Los valores de los asentamientos diferenciales fueron determinados con una separación de 3,0 m, correspondiente a la distancia observada en sitio para las columnas de apoyo del muro mostrado en la Figura 13, que se mostró anteriormente. Inicialmente, como se puede observar, que los FS obtenidos

entre ambos métodos son bastante similares y presentan las mismas tendencias de cumplimiento de las recomendaciones del CGTLCR.

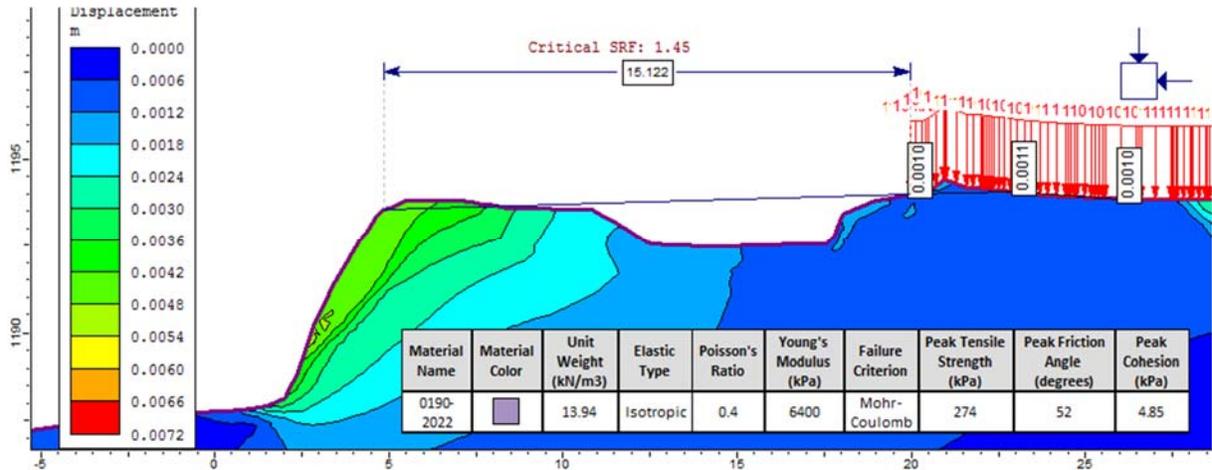


(a) Condición estática

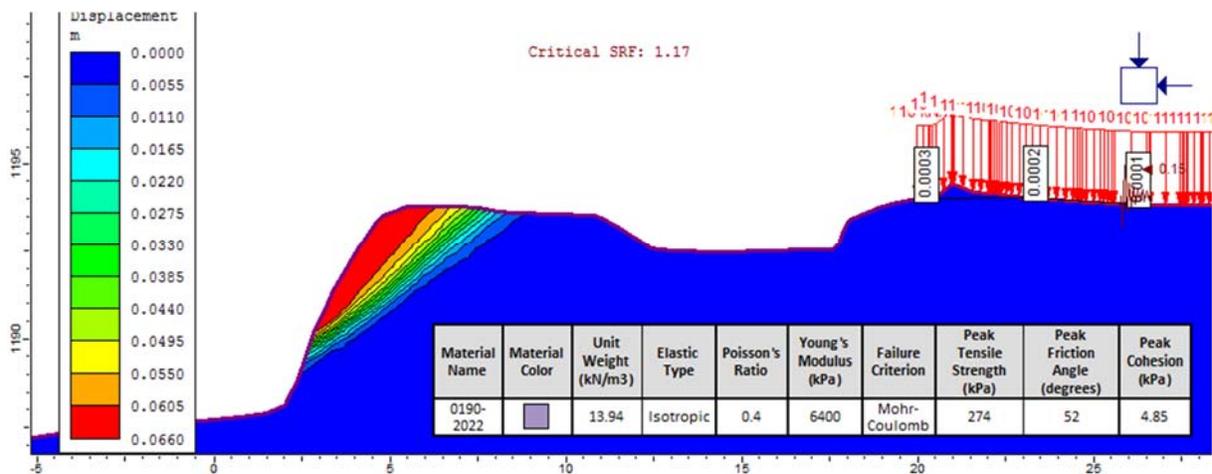


(b) Condición pseudo-estática

Figura 21. Sección A: Sección transversal del talud y factor de seguridad para la región con los factores de seguridad más bajos en el Sitio 1.

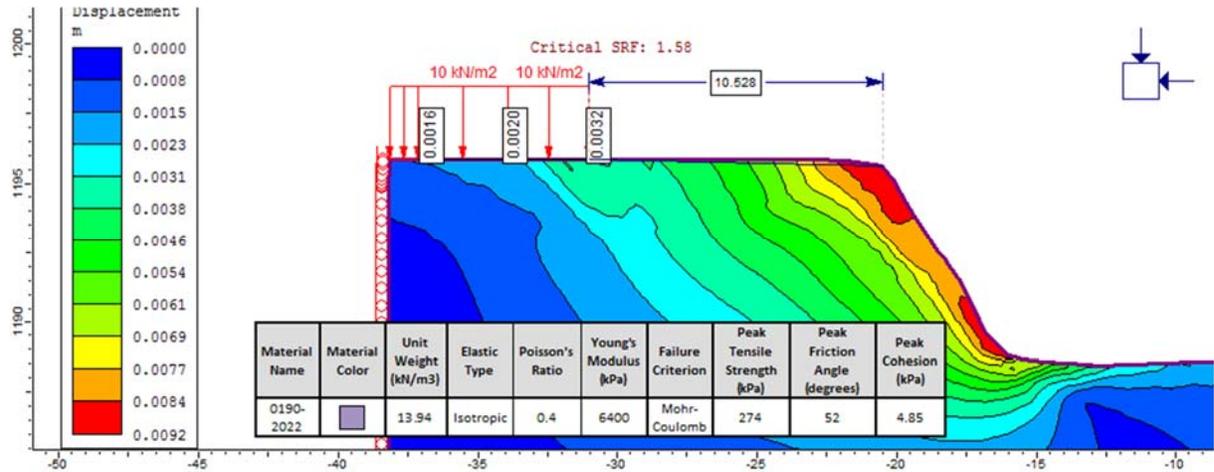


(a) Condición estática

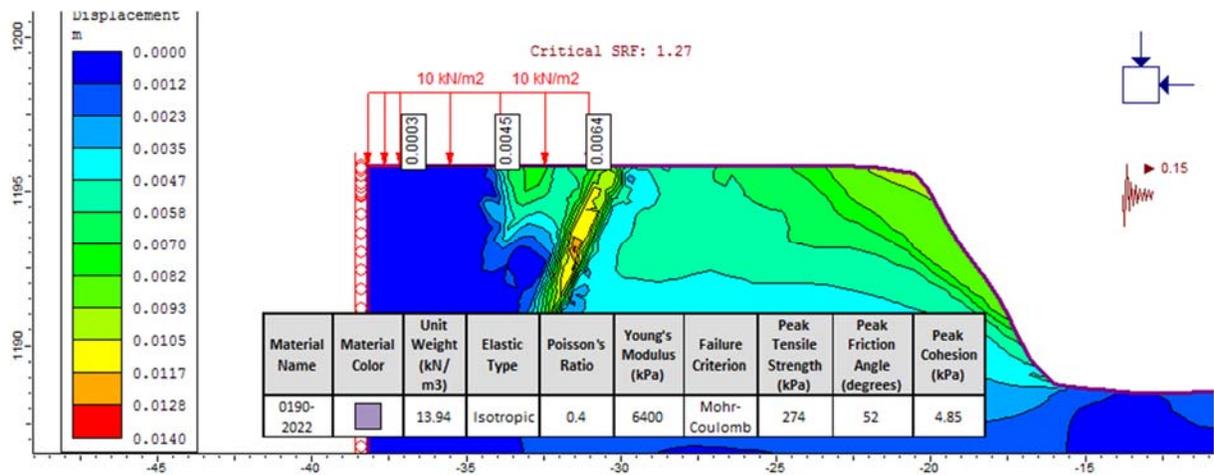


(b) Condición pseudo-estática

Figura 22. Sección B: Sección transversal del talud para la región con factor de seguridad más bajo utilizando la metodología de GLE/Morgenstern-Price en el Sitio 1.

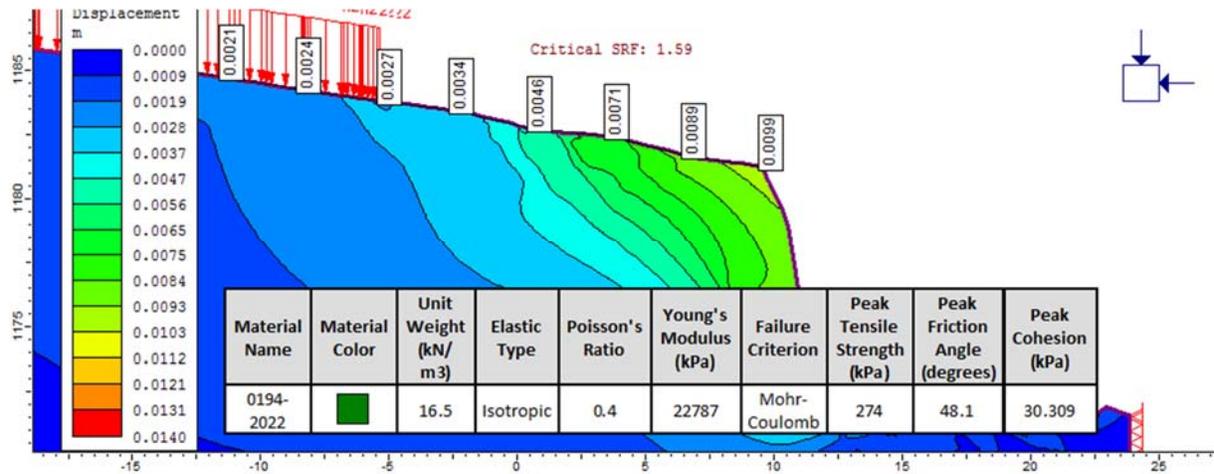


(a) Condición estática

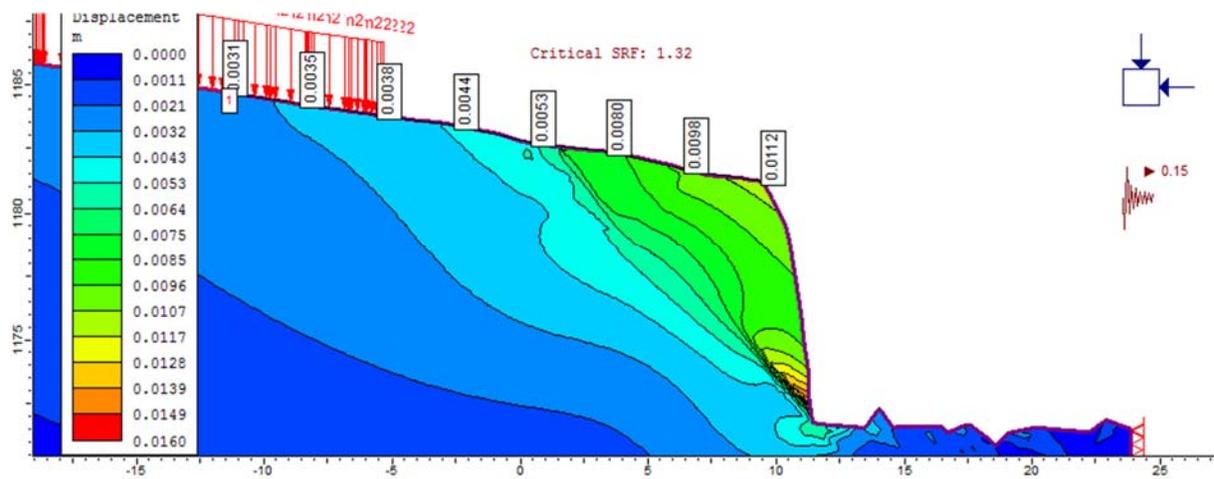


(b) Condición pseudo-estática

Figura 23. Sección C: Sección transversal supuesta con el avance y alineamiento de la excavación (sentido oeste-este) para evaluar la sobrecarga de viviendas próximas a la corona del talud en el Sitio 1.

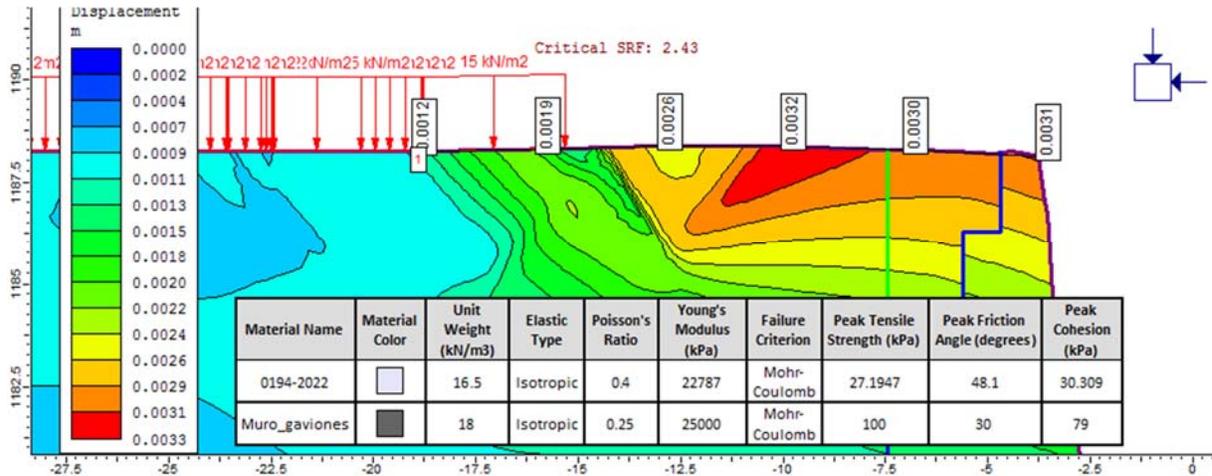


(a) Condición estática

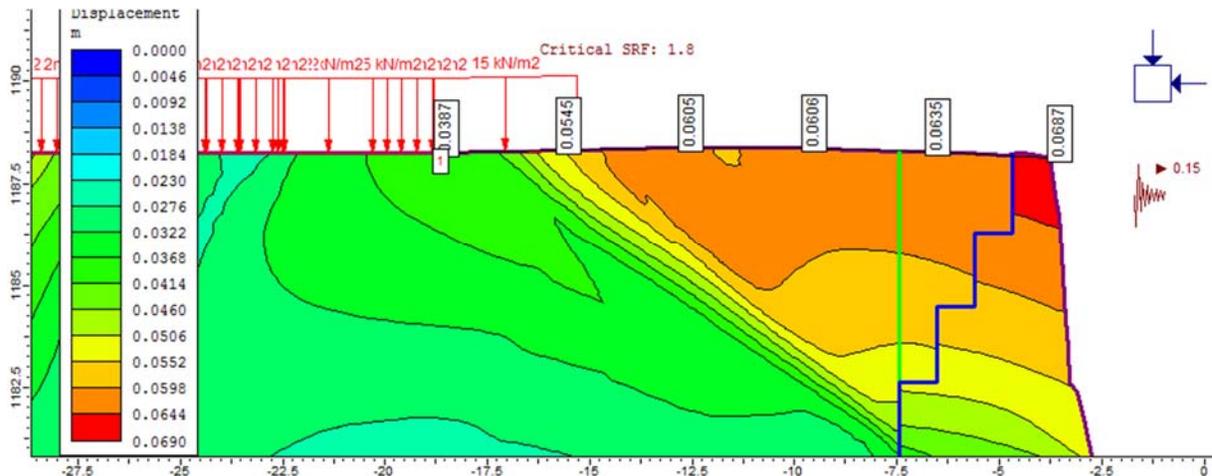


(b) Condición pseudo-estática

Figura 24. Sección D: Sección transversal del talud próximo a la tapia de una edificación en el Sitio 2.



(a) Condición estática



(b) Condición pseudo-estática

Figura 25. Sección E: Sección transversal del talud próximo a MACOPA, utilizando el método de la cohesión equivalente en el muro de gaviones en el Sitio 2.



Tabla 3. Factores de seguridad y deformaciones obtenidas en las simulaciones para diferentes escenarios e inclinaciones del talud

Sección	Condición	Factor de seguridad (MEL)	SRF - Factor de seguridad (MEF)	Asent. total (m)	Asent. diferencial vertical (m)	Asent. diferencial horizontal (m)
Sección A	Estática	<b>1,39</b>	<b>1,45</b>	0,00101	0,00003	0,00003
	Pseudo-estática	1,10	1,17	0,00031	0,00022	0,00004
Sección B	Estática	<b>1,32</b>	<b>1,35</b>	0,00120	0,00015	0,00049
	Pseudo-estática	<b>1,04</b>	<b>1,08</b>	0,00070	0,00094	0,00062
Sección C	Estática	1,50	1,58	0,00323	0,00041	0,00136
	Pseudo-estática	1,29	1,27	0,00638	0,00152	0,00110
Sección D	Estática	1,52	1,59	0,00987	0,00159	0,00009
	Pseudo-estática	1,36	1,32	0,01119	0,00192	0,00037
Sección E	Estática	2,39	2,43	0,00195	0,00118	0,00052
	Pseudo-estática	1,98	1,80	<b>0,05448</b>	<b>0,01230</b>	<b>0,01351</b>

De esta forma, el Código de Cimentación de Costa Rica (CCCR) establece algunas directrices generales, que se muestran en la Tabla 4. Según esta misma tabla, el valor de “*l*” corresponde a la distancia entre columnas adyacentes con asentamientos diferentes o entre dos puntos cualesquiera con asentamiento diferencial. Para efectos de los análisis realizados, se asume un valor de  $l = 3,0$  m, correspondiente a la distancia observada en sitio para las columnas de apoyo del muro mostrado en la fotografía de la Figura 13.

Tabla 4. Asentamiento total admisible (CCCR 2008)

Tipo de movimiento	Factor limitativo	Asentamiento máximo
Asentamiento total	Drenaje	15 – 30 cm
	Acceso	30 – 60 cm
	Estructuras con muros de mampostería	2,5 – 5,0 cm
	Estructuras reticulares	5,0 – 10,0 cm
	Silos y placas	7,0 – 30,0 cm
Inclinación o giro	Estabilidad frente al vuelco	Depende de altura y ancho
	Inclinación de chimeneas y torres	0,004 <i>l</i>
	Rodadura de caminos, etc.	0,01 <i>l</i>
	Almacenamiento de mercancías	0,01 <i>l</i>
	Funcionamiento de máquinas telares de algodón	0,003 <i>l</i>
	Funcionamiento de máquinas turbo generadoras	0,0002 <i>l</i>
	Carriles de grúas	0,003 <i>l</i>
	Drenaje de soleras	0,01 – 0,02 <i>l</i>
Asentamientos diferenciales	Muros de ladrillo continuos y elevados	0,0005 – 0,001 <i>l</i>
	Fábrica de una planta, fisuración de muros de ladrillo	0,001 – 0,002 <i>l</i>
	Fisuración de repellos	0,001 <i>l</i>
	Marcos de concreto reforzado	0,0025 – 0,004 <i>l</i>
	Muros de concreto reforzado	0,003 <i>l</i>
	Marcos metálicos continuos	0,002 <i>l</i>
	Marcos metálicos sencillos	0,005 <i>l</i>

Nota: “*l*” es la distancia entre columnas adyacentes con asentamientos diferentes o entre dos puntos cualesquiera con asentamiento diferencial. Los valores más elevados son para los asentamientos homogéneos y estructuras más tolerantes. Los valores inferiores corresponden con asentamientos irregulares y estructuras delicadas.



A partir de la Tabla 4, se tiene que la tolerancia máxima para asentamientos totales para estructuras con muros de mampostería es de 0,025 – 0,050 m. De esta manera, según los resultados mostrados en la Tabla 3, se tiene que, en el caso de los asentamientos totales oscilan entre 0,00031 hasta 0,05448 m. Esto quiere decir que, en el caso de estructuras con asentamientos homogéneos y estructuras tolerantes, los valores de los asentamientos totales esperados se encuentran por debajo del valor máximo permitido y, por lo tanto, no causaría daños importantes en la estructura. En el único caso, que se obtuvo un valor que supera ligeramente esta recomendación es en el caso pseudo-estático de la sección transversal del talud próximo a MACOPA, sin embargo, debido a que el Factor de Seguridad obtenido se encuentra muy por encima de las recomendaciones del CGTLCR, no se esperaría problemas mayores en las estructuras próximas.

A partir de los resultados obtenidos de las simulaciones, se determinaron los asentamientos diferenciales entre puntos con una separación de 3,0 m (ver resultados en la Tabla 3). Estos valores, pueden ser comparados con las tolerancias admisibles para asentamientos diferenciales del terreno para puntos serados por  $l = 3,0$  m, conforme a lo que se indica en la Tabla 4. De esta manera, algunas de las tolerancias admisibles deberían ser las siguientes:

- Fisuración de repellos = 0,003 m
- Marcos de concreto reforzado = 0,0075 – 0,012 m
- Muros de concreto reforzado = 0,009 m

Nuevamente, cuando se comparan estos valores con los mostrados en la Tabla 3, en general no se esperan daños importantes en las estructuras cercanas a la corona del talud. En la única situación donde se obtuvieron valores que superan estas recomendaciones es en el caso pseudo-estático de la sección transversal del talud próximo a MACOPA, sin embargo, nuevamente debido a que el Factor de Seguridad obtenido en las simulaciones son valores alto, esto sugiere que no se presentarán problemas mayores en las estructuras próximas.

Análisis similares pueden ser realizados considerando distintas separaciones entre elementos, teniendo en cuenta que dentro de las diferentes edificaciones se tienen distintas configuraciones de los elementos estructurales de las viviendas. Por esta razón, se sugiere realizar análisis de deformaciones más exhaustivos para considerar otras separaciones entre elementos estructurales con la finalidad de evaluar otros escenarios que sean representativos de las condiciones de las viviendas aledañas al proyecto.

Un aspecto que se considera importante destacar en los análisis realizados, está relacionado con la magnitud del módulo de elasticidad utilizado en las simulaciones. Como se indicó anteriormente, el módulo de elasticidad que fue empleado en el Sitio 2 fue de 22787 kPa, el cual, de acuerdo con los resultados de laboratorio, es un valor que puede ser considerado alto. Sin embargo, ¿qué hubiera sucedido si el valor obtenido para este sitio hubiera sido el valor de 6400 kPa?

La respuesta de esta pregunta, va depender desde el punto de vista que sea analizado. Desde la perspectiva de los análisis de MEL y MEF, la variación del valor de módulo de elasticidad no cambia los valores de los factores de seguridad obtenidos en las simulaciones. Sin embargo, desde el punto de vista de la deformabilidad existen variaciones significativas en la magnitud de los asentamientos esperados. Esto puede observado cuando se compara la Figura 26 y la Figura 24(a) para la condición estática para los módulos de elasticidad de 6400 y 22787 kPa, respectivamente, donde se puede notar que con valores más bajos de módulo de elasticidad se obtienen deformaciones totales mayores. Así pues, la Tabla 5, muestra los valores de los factores de seguridad (FS) aplicando el MEL y el MEF para estas condiciones, adicionalmente se resumen los valores de las deformaciones horizontales, verticales y totales obtenidos de las simulaciones realizadas. Los valores de los asentamientos diferenciales fueron determinados con una separación de 3,0 m.

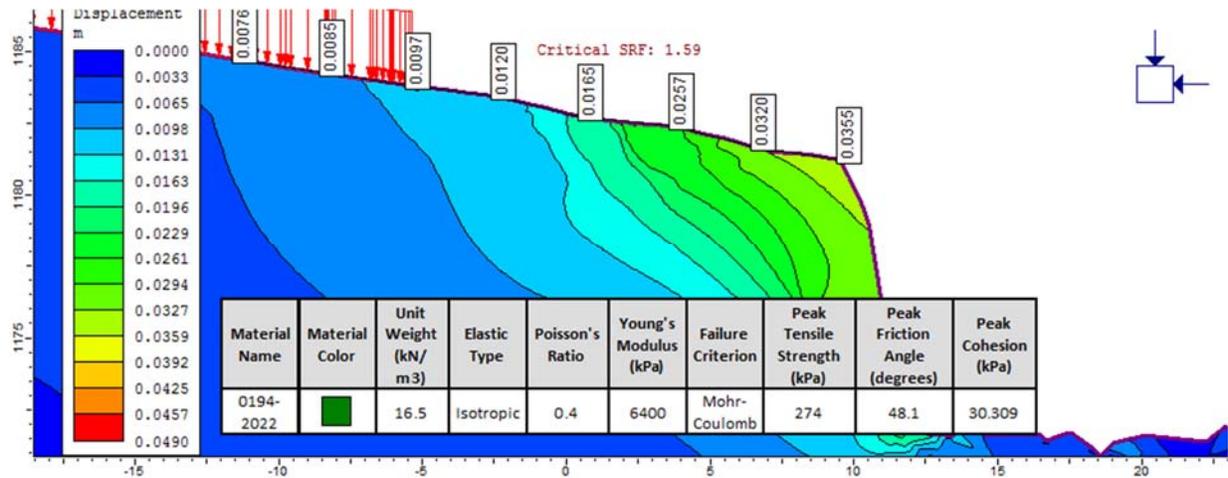


Figura 26. Sección D: Sección transversal del talud próximo a la tapia de una edificación en el Sitio 2, para la condición estática y un módulo de elasticidad de 6400 kPa.

Tabla 5. Factores de seguridad y deformaciones obtenidas en las simulaciones para diferentes valores de módulos de elasticidad

Sección	Condición estática	Factor de seguridad (MEL)	SRF - Factor de seguridad (MEF)	Asent. total (m)	Asent. diferencial vertical (m)	Asent. diferencial horizontal (m)
Sección D	Mod Elasticidad 22787 kPa	1,52	1,59	0,00987	0,00159	0,00009
	Mod Elasticidad 6400 kPa	1,52	1,59	<b>0,03554</b>	<b>0,00754</b>	0,00094

De esta manera, según los resultados mostrados en la Tabla 5, se observa que no hubo modificación en los valores de los factores de seguridad. No obstante, se tiene que, en el caso de los asentamientos totales, para un módulo de elasticidad de 6400 kPa, se obtienen deformaciones totales de 0,03554 m, lo cual indicaría que los asentamientos totales esperados se encuentran por encima del valor mínimo recomendado de 0,025 m para estructuras de muros de mampostería con asentamiento irregulares y estructuras delicadas, por lo que podrían esperarse algunos daños en la estructura. De igual manera, si se comparan los valores con las tolerancias admisibles para asentamientos diferenciales del terreno para puntos separados por  $l = 3,0$  m, se tiene que los valores del asentamiento diferencial vertical también supera, ligeramente, el valor mínimo recomendado de 0,0075 m para estructuras de marcos de concreto reforzado con asentamiento irregulares y estructuras delicadas, por lo que podría esperarse algunos daños en la estructura.

Estos resultados, muestran nuevamente la importancia de realizar una adecuada campaña de exploración geotécnica para la determinación de los parámetros geotécnicos, en especial, en la determinación de los módulos de elasticidad, ya que como se mencionó anteriormente los sitios de muestreo se encontraban espaciados aproximadamente a 250 metros, y las diferencias encontradas en estos parámetros y en los resultados obtenidos de las simulaciones puede dar pie a interpretaciones y conclusiones diferentes sobre admisibilidad de las deformaciones esperadas.

### III. Otras consideraciones

Otros aspectos que son importantes resaltar, los cuales fueron observados en una visita de campo realizada el día 6 de abril de 2022, se muestran en la Figura 27 y 28. En el primer caso, en la Figura 27, se observa la presencia de un estrato o “lente” de suelo con una coloración más oscura que el resto del terreno, lo cual sugiere propiedades de caracterización y de resistencia diferentes a las observadas en la superficie del Sitio 2 y del material que fue muestreado en febrero de este mismo año. Este aspecto resalta la importancia que tiene la campaña geotécnica que debe realizarse para obtener un modelo geotécnico representativo de la estratigrafía y las propiedades de los materiales presentes en el sitio. Adicionalmente a la presencia de este material, se observa la presencia de tuberías y un desfogue de aguas, que se puede suponer son aguas residuales de alguna de las edificaciones cercanas. Ante esta situación, debe tenerse en consideración que la presencia de agua puede modificar (reduciendo) de manera importante la resistencia del material y aumentando su deformabilidad, ambos aspectos son críticos y, por lo tanto, deben ser considerados por el ingeniero responsable por la evaluación y diseño definitivo a la luz de cumplir con los requerimientos del proyecto y seguridad de la infraestructura aledaña al proyecto, e incluso se resalta la importancia del acompañamiento de un ingeniero geotecnista durante la construcción del proyecto para atender oportunamente cualquier situación similar o bien, inesperada.



Figura 27. Presencia de estrato de suelo y desfogue de aguas próximo a la base del muro de gaviones de MACOPA en el Sitio 2.

Por su parte, en la Figura 28, se observa un deterioro importante en la parte inferior del muro de gaviones existente, el cual por su tamaño y localización puede comprometer la estabilidad general del muro. Se desconoce si este deterioro existía antes de los trabajos de corte en el terreno, o si bien, fue resultado de algunas de las actividades de excavación. Vale mencionar, una vez más, que tanto el informe EIC-Lanamme-0130-2022, como el “Informe de visita: 28 de setiembre del 2021” del Ing. David Ulloa recomiendan y solicitan los resultados de análisis de dicho muro gaviones, así como también del muro de llantas, para determinar la estabilidad de ambos muros antes y durante el trabajo de movimiento de

tierras. Lo anterior, toma una mayor relevancia cuando se considera el deterioro mostrado en la Figura 28. Así mismo, también es recomendable determinar de quien es la responsabilidad de asumir el atendimento oportuno este deterioro, ya sea por parte del propietario, el contratista o la Administración, a fin de que de evitar problemas económicos por indemnizaciones que pudieron ser previstas y prevenidas durante la construcción de la obra



Figura 28. Deterioro observado en la parte inferior del muro de gaviones de MACOPA en el Sitio 2.

#### IV. Comentarios finales

Es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos del análisis de deformabilidad que podrían presentarse en la corona de los taludes resultantes de las obras de excavación en la Unidad Funcional 5 del Proyecto de Circunvalación Norte, ya que la información disponible y el estudio completo correspondiente, es responsabilidad del encargado del diseño del proyecto final. Sin embargo, constituye un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis de deformabilidad más exhaustivos para evaluar las afectaciones que pueden sufrir las viviendas u otras obras de infraestructura próximas a la corona de los taludes.

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones se destaca que, para las propiedades de los materiales utilizados, los resultados de los factores de seguridad son favorables y cumplen con los requisitos de estabilidad definidos por el CGTLCR. Sin embargo, es necesario destacar que el enfoque del Método de Equilibrio Límite (MEL) tiene algunas deficiencias importantes, entre las cuales se destaca que esta metodología ignora el comportamiento de esfuerzo-deformación de suelos y rocas. El uso del Método de Elementos Finitos (MEF) permite resolver esta limitación.

En lo que respecta a los valores de las deformaciones, éstos deben ser revisados con respecto a estados límites de servicio, de tal forma que los valores resultantes no causen daños intolerables a la propia cimentación, a la superestructura y sus instalaciones, a los elementos no estructurales y acabados, a las



construcciones vecinas, y a los servicios públicos. En este sentido, la revisión del estado límite de servicio es una tarea complicada y sus tolerancias dependerán de la importancia que se le dé a la estructura. Así pues, los resultados obtenidos, en general, indican que no se esperan daños importantes en las estructuras cercanas a la corona del talud. A excepción de la condición pseudo-estática, de la sección transversal del talud próximo a MACOPA, donde se podrían presentar fisuras en los repellos ya que los valores superan los 0,003 m recomendados por el CCCR. Sin embargo, debido a que el Factor de Seguridad obtenido ( $FS=1,8$ ) se encuentra muy por encima de las recomendaciones del CGTLCR, no se esperaría problemas mayores en las estructuras próximas.

No obstante, se sugiere llevar a cabo estudios adicionales incluyendo más ensayos de laboratorio y en sitio, aunado a evaluar otros escenarios como la inclusión de deformaciones, más la incorporación del nivel freático, para establecer la criticidad de los resultados que se puedan obtener. La omisión de estos análisis podría significar problemas económicos por indemnizaciones que se deban realizar por afectaciones, que pudieron ser previstas y prevenidas mediante el análisis de deformaciones correspondiente.

Adicionalmente, se resalta que, durante las visitas realizadas, se observaron que los taludes existentes carecen de sistemas adecuados para el control de la escorrentía superficial, por lo que se recomienda implementar medidas integrales de mitigación, ya que, al momento de realizar el presente informe, las condiciones climáticas coinciden con la transición de la estación seca a la estación lluviosa, por lo que se puede esperar lluvias importantes en la zona de proyecto. Debido a esto, estas medidas deben buscar evitar la erosión de la cara del talud, así como, colocar sistemas para el control de la escorrentía superficial y evitar problemas de estabilidad.

## V. Referencias

1. Asociación Costarricense de Geotecnia (2015). **Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica**. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
2. Asociación Costarricense de Geotecnia (2009). **Código de Cimentaciones de Costa Rica**. Comisión Código de Cimentaciones de Costa Rica. Segunda edición. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
3. Grodecki, M. (2017). **Numerical modelling of gabion joints**. Technical Transactions 2/2017, 84-88.
4. LanammeUCR (2022). **EIC-Lanamme-INF-0318-2022 Informe de Ensayo del Circunvalación Norte**. LanammeUCR. San José, Costa Rica.
5. Programa de Ingeniería Geotécnica (2022). **EIC-Lanamme-0130-2022 Informe de visita al Proyecto Circunvalación Norte**. LanammeUCR. San José, Costa Rica.