



## Programa de Ingeniería Geotécnica

Informe: LM-EIC-PIG-I-0013-2021

# Informe de revisión preliminar de deformaciones en la corona del talud del Proyecto Ampliación Ruta 32: desde el Puente Ricardo Saprissa al Barrio Socorro



Preparado por:  
Ing. Gustavo Adolfo Badilla Vargas, D.Sc.  
Programa de Ingeniería Geotécnica

San José, Costa Rica  
Mayo, 2021





<b>1. Informe</b> LM-EIC-PIG-I-0013-2021		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> Informe de revisión preliminar de deformaciones en la corona del talud del Proyecto Ampliación Ruta 32: desde el Puente Ricardo Saprissa al Barrio Socorro		<b>4. Fecha del Informe</b> 04/05/2021
<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 LM-PIG-10-2021 se presenta a continuación el resultado de los análisis de deformabilidad de la superficie del talud derecho (sentido San José- Limón) con la finalidad de verificar si el diseño de los muros que se colocarán en los taludes de corte de la ampliación de la Ruta Nacional 32 podrían generar alguna afectación en las viviendas próximas del talud. 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, que buscan establecer valores que no causen daños intolerables a la propia cimentación, ni a las estructuras y acabados de las construcciones vecinas, en general, indican que no se esperan daños importantes en las estructuras cercanas a la corona del talud. Es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos del análisis de deformabilidad de este talud, ya que la información disponible y el estudio completo correspondiente, es responsabilidad enteramente 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 definitivo. 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.</i>		
<b>8. Palabras clave</b> Método de Equilibrio Límite, Método de Elementos Finitos, Análisis de deformabilidad.	<b>9. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>10. Núm. de páginas</b> 25
<b>13. Preparado por:</b>  Ing. Gustavo A. Badilla Vargas, D.Sc. Ingeniero PIG <b>Fecha: 04/mayo/2021</b>		
<b>14. Revisado y aprobado por:</b>  Ing. Ana Lorena Monge Sandí, M.Sc Coordinadora del Programa de Ingeniería Geotécnica <b>Fecha: 04/mayo/2021</b>		



## 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 .....	5
II.3	Comentarios generales de observaciones realizadas en campo.....	7
II.4	Comprobación de estabilidad de los taludes.....	7
II.4.1	Resultados de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) .....	7
II.4.2	Resultados de estabilidad utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF) .....	14
III.	Comentarios finales.....	23
IV.	Referencias .....	25



## Informe de estimaciones preliminares de deformaciones en la corona del talud del Proyecto Ampliación Ruta 32: desde el Puente Ricardo Saprissa al Barrio Socorro

### I. Introducción

Por solicitud de la Unidad de Auditoría Técnica y como complemento del informe LM-PIG-10-2021, 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 del Proyecto de Ampliación Ruta 32: desde el Puente Ricardo Saprissa al Barrio Socorro. Los documentos revisados fueron los siguientes:

- LAB-GEO-001, Estudio de suelos, Barrio El Socorro, Ampliación de Ruta 32.
- Diseño muro cosido e-16-2020 - ruta nacional 32 Saprissa - Doña Lela.
- PLANOS MURO RN 32 SAPRISSA - DOÑA LELA.
- LM-PIG-10-2021 Informe de la revisión del diseño del muro de retención del Proyecto Ampliación Ruta 32: desde el Puente Ricardo Saprissa al Barrio Socorro.
- I-0348-2021 Informe de Ensayo del Proyecto Ampliación Ruta 32 (Talud), realizado por el LanammeUCR. Para el muestreo realizado el 19 de febrero, en el estacionamiento 0+900.
- I-0508-2021 Informe de Ensayo del Proyecto Ampliación Ruta 32 (Talud-Proximidad Estadio Saprissa), realizado por el LanammeUCR. Para el muestreo realizado el 7 de abril, en el estacionamiento 1+465.

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

### II. Levantamientos y ensayos realizados por el LanammeUCR

Teniendo en consideración los comentarios y las observaciones presentadas en el informe LM-PIG-10-2021, entre las cuales se destacan la falta de claridad para el establecimiento de los parámetros geotécnicos en el diseño de los muros y la falta de análisis de estabilidad y de deformabilidad de las secciones transversales considerando una sobrecarga en el talud derecho (sentido San José – Limón) dada la cercanía de casas en este tramo, se procedió por parte del LanammeUCR a realizar los ensayos adicionales que se presentan a continuación:

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

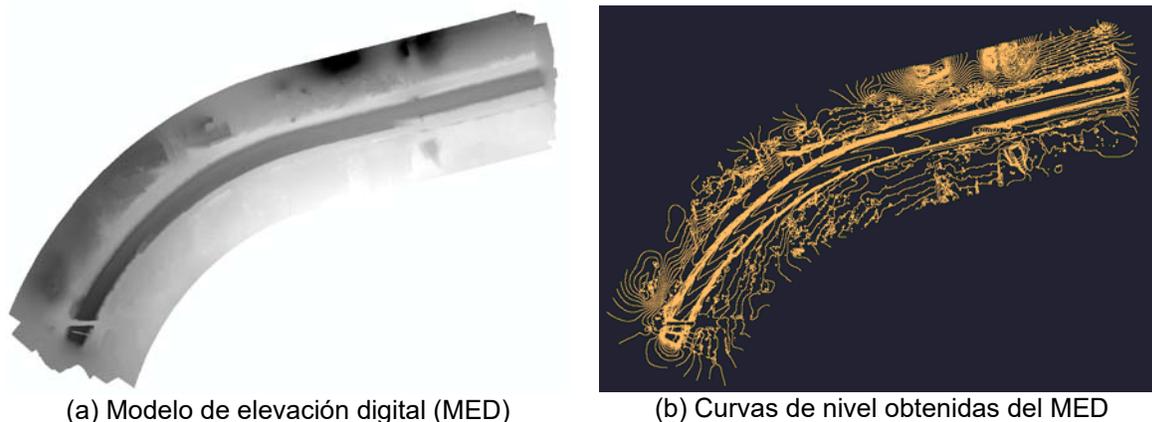
Inicialmente, con la colaboración de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN) del LanammeUCR, se realizó un levantamiento con un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) de la zona de estudio el día 19 de febrero de 2021.

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 posibles 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.

Informe LM-EIC-PIG-I-0013-2021	Mayo, 2021	Página 4 de 25
--------------------------------	------------	----------------

Teniendo esto en consideración, con base en el levantamiento realizado por el VANT de la UGERVN fue posible obtener el modelo de elevación que se muestra en la [Figura 1a](#); y a partir de este modelo de elevación fue posible generar las curvas de nivel topográficas a cada 50 cm que se muestran en la [Figura 1b](#). Como se observa en ambas figuras, el levantamiento realizado permitió recrear el terreno de forma rápida y precisa.



(a) Modelo de elevación digital (MED) (b) Curvas de nivel obtenidas del MED  
Figura 1. Resultados obtenidos del levantamiento realizado con un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) 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:

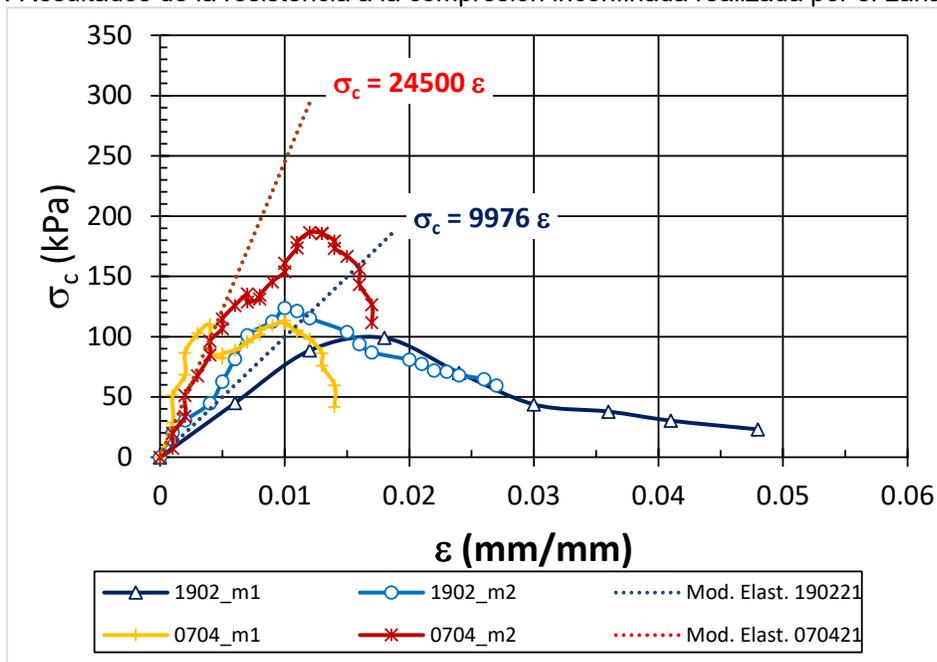
- Contenido de humedad del suelo (ASTM D2216)
- Cantidad de material en suelos más fino 75  $\mu\text{m}$  (N° 200) (ASTM D1140)
- Gravedad específica del suelo mediante un picnómetro con agua (ASTM D854)
- Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de un suelo (ASTM D4318)
- Resistencia a la compresión inconfiada de suelos cohesivos (ASTM D2166)
- Compresión triaxial para suelos consolidado drenado (Permeabilidad Triaxial) (ASTM D7181)
- 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 en la primera visita el día 19 de febrero de 2021 y, en la segunda visita, el día 07 de abril de 2021.

De los resultados mostrados en el [Gráfico 1](#), correspondiente a los ensayos de resistencia a la compresión inconfiada, 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 en el estacionamiento 0+900, en el primer muestreo el día 19 de febrero de 2021, presentaron una menor rigidez que las muestras colectadas en el segundo muestreo del día 7 de abril de 2021, en el estacionamiento 1+465. 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 en el comportamiento de los materiales presentes en el sitio.



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



Para efectos del presente informe, los análisis de deformabilidad fueron realizados utilizando el valor de módulo de elasticidad de 24500 kPa, puesto que este valor podría ser más representativo del tipo de suelo presente en la sección transversal que fue analizada.

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

	19 de febrero		07 de abril	
Límite líquido	45	47,5	44	43,5
Límite plástico	34	35	40	39,5
Índice de plasticidad	11	12,5	4	4
$G_T$	2,663		2,684	
$G_S$	2,661		2,682	
%Pas N° 200	55,1		40,7	
	Fecha muestreo	Presión (kPa)		
		50	100	200
Permeabilidad, k (cm/s)	19/2/2021	1,23E-05	1,03E-05	1,01E-05
	7/4/2021	1,372E-05	1,301E-05	4,55E-05
Corte directo, $\tau$ (kPa)	$\phi$ (°)	39,47	$\phi$ (°)	34,60
	c (kPa)	17,85	c (kPa)	69,98

Es importante recalcar que los valores obtenidos para los parámetros relacionados con la resistencia al corte obtenidos por el LanammeUCR muestran diferencias en magnitud a los respectivos valores usados en el informe "e-26-2020: Diseño de muro reforzado con anclajes pasivos. Ampliación de la vía R.32 desde el final del puente sobre el río Virilla a rest. Doña Lela", presentado por la empresa HSOLIS.

### II.3 Comentarios generales de observaciones realizadas en campo

Es importante mencionar que, durante las visitas realizadas, se observó que los taludes existentes carecen de sistemas para el control de la escorrentía superficial adecuados. Por ejemplo, en el sector que corresponde al Condominio Oasis Tournón, se observó la presencia de un tipo de canal no revestido que sugiere la presencia de algún tipo de contracuneta. De la visita en campo, se observó que algunas de las viviendas del condominio presentan su desfogue de aguas pluviales en este canal. Sin embargo, este canal se encontraba totalmente obstruido por el crecimiento de vegetación, lo cual, no permitiría la adecuada evacuación de las aguas provenientes de la lluvia, que eventualmente se pueden acumular durante la temporada lluviosa y agravar la erosión en la superficie de los taludes, así como también, afectar la estabilidad superficial del talud por el fenómeno de infiltración.

De esta manera, se sugiere que los propietarios del condominio verifiquen la forma en que se está realizando el desfogue de las aguas pluviales del condominio. Es recomendable, que estas medidas sean compatibles y complementarias a las medidas que realice la Administración para el control de la erosión superficial que forman parte del proyecto de ampliación de la ruta 32, con la finalidad de mantener la estabilidad de los taludes con una pendiente estable.

Adicionalmente, fue observado que, en las cercanías de la parte alta de los taludes, especialmente en las cercanías del estacionamiento 0+900, diversas construcciones de viviendas y calles urbanas, presentaban sistemas inadecuados y posiblemente ilegales de alcantarillado, con salidas de agua directamente sobre la cara del talud. En este caso, se recomienda hacer una valoración del grado de responsabilidad de los propietarios de las viviendas en cuanto al manejo adecuado de las aguas residuales para su respectiva solución. Adicionalmente, se sugiere a la Administración, implementar medidas de mitigación para detener y evitar la erosión de la cara del talud y, nuevamente, tomar medidas para el control de la escorrentía superficial y evitar así, problemas de estabilidad y erosión de los taludes de esta zona, ya que esto se puede convertir en un problema recurrente a lo largo de los años.

### II.4 Comprobación de estabilidad de los taludes

#### II.4.1 Resultados de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL)

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 solicitudes 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 del talud derecho (sentido San José – Limón), se utilizó el Modelo de Elevación Digital (MED) obtenido con la ayuda del VANT, y el uso del software SLIDE3 del paquete de programas de RocScience, para llevar a cabo un análisis de estabilidad de los taludes. La [Figura 2](#), muestra el MED levantado por el VANT para la sección comprendida entre los estacionamientos 0+700 hasta 1+200 (sentido San José – Limón)

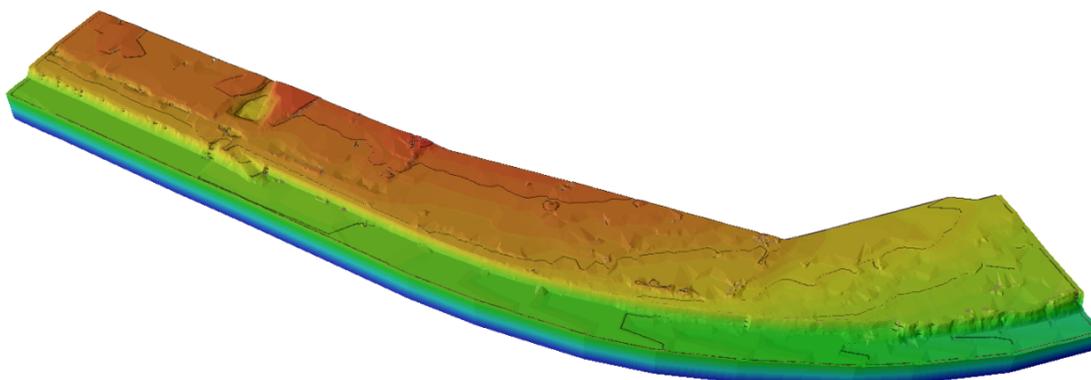


Figura 2. Modelo de elevación del talud derecho (sentido San José – Limón) utilizado en el software SLIDE3 de la zona de estudio

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, a una distancia de aproximadamente 5 metros del borde el talud. La [Figura 3](#), muestra la ubicación y el factor de seguridad más bajo para la condición estática y los parámetros geotécnicos obtenidos con los ensayos de laboratorio realizados por el LanammeUCR y que se presentan en el apartado II.2. Como se observa en la esquina inferior derecha de la [Figura 3](#), tanto para las metodologías de equilibrio límite de Bishop y Janbu, los factores de seguridad son mayores que  $FS=1,8$ , siendo que de acuerdo a la práctica los factores de diseño aceptables generalmente oscilan entre 1,3 y 1,5.



FS: 1.858

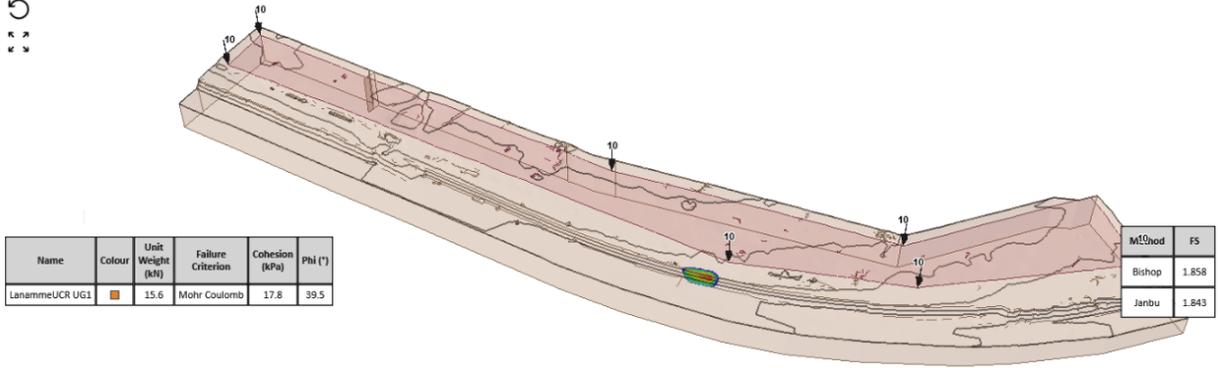


Figura 3. Factores de seguridad obtenidos con el software SLIDE3 de la zona de estudio para una condición estática.

Cuando se compara este valor de FS=1,8 con las recomendaciones establecidas en el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (CGTLCR), donde se considera el riesgo de pérdidas humanas y el riesgo de daños económicos y ambientales, para lo cual en una condición media de riesgos es aceptable un valor de 1,4 (en condición estática) se puede decir que los resultados son favorables y que se cumple con los requisitos de estabilidad definidos por el CGTLCR.

Por su parte, en la Figura 4, se presentan los resultados cuando se considera la condición de sismo, utilizando el coeficiente pseudoestático de 0,20g definido en el CGTLCR, se obtuvieron factores de seguridad mayores 1,4 valores que son superiores al valor aceptable FS=1,05 del CGTLCR para las condiciones pseudoestáticas con una condición media de riesgos de pérdidas humanas y riesgo de daños económicos y ambientales.



FS: 1.504

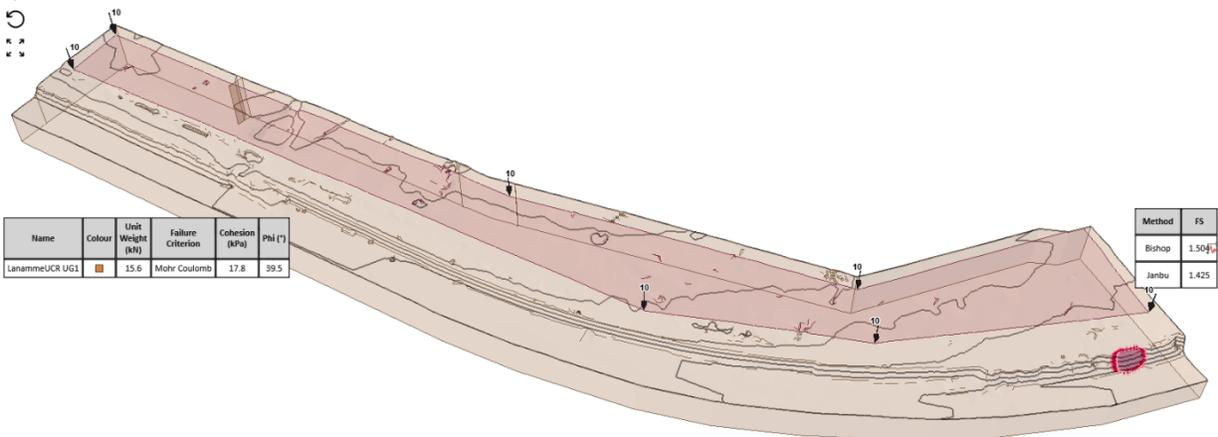


Figura 4. Factores de seguridad obtenidos con el software SLIDE3 de la zona de estudio para una condición pseudoestática.



Es importante mencionar que, en ambos casos, los factores de seguridad cumplen con los requisitos de estabilidad definidos en el CGTLCR, teniendo en consideración que estos análisis no están considerando la colocación de ninguna actividad de estabilización de los taludes, como la recomendada en el informe “e-16-2020: Diseño geotécnico de muro reforzado con anclajes pasivos, ampliación de la vía R.32 desde el final del puente sobre el río Virilla a restaurante Doña Lela”.

Así pues, la diferencia en los valores de los Factores de Seguridad obtenidos en este informe con respecto a los reportado en el informe e-16-2020, se deben principalmente a las diferencias en el orden de magnitud de los valores establecidos para los parámetros geomecánicos (cohesión y ángulo de fricción).

Por otro lado, es importante notar, que cuando se comparan las Figuras 3 y 4, la ubicación del talud con factores de seguridad más bajo es diferente, lo cual permite evidenciar una de las principales ventajas del análisis tridimensional, donde la topografía, las propiedades de los materiales y las condiciones de carga, hacen difícil que el ingeniero geotécnico prediga la ubicación de la superficie de falla más crítica, y con esta metodología es posible establecer las zonas de debilidad sin recurrir a la simplificación del análisis de secciones críticas.

Fueron analizadas secciones transversales a cada 100 metros entre los estacionamientos 0+700 – 1+200. Como se observa en la Figura 5, nuevamente los factores de seguridad obtenidos cumplen con los requisitos de estabilidad definidos en el CGTLCR aunque no se hayan considerado actividades de estabilización de los taludes.

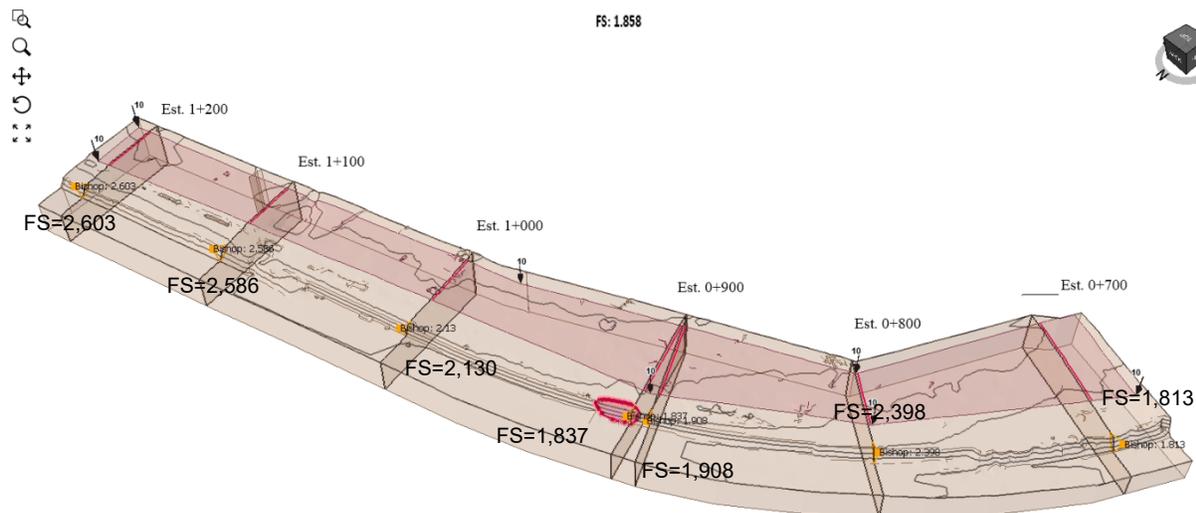


Figura 5. Secciones transversales analizadas con el software SLIDE3 de la zona de estudio para una condición estática.

Es importante destacar, tal y como se mencionó en el informe LM-PIG-10-2021, que las secciones transversales observadas en sitio, entre los estacionamientos 0+700 hasta 1+200, tienen configuraciones topográficas diferentes a las secciones consideradas en los diseños presentados en el informe e-16-2020. Esto es, el talud derecho no presenta el cambio de pendiente supuesto para los diseños, tal y como se observa en las Figuras 6 a 11, como se había supuesto en las secciones analizadas en el informe e-16-2020.

Adicionalmente, tal y como se muestra en estas mismas figuras, se hace la suposición de las sobrecargas debido a las edificaciones o zonas residenciales ubicadas en las cercanías de la corona del talud considerando una sobrecarga vertical uniforme de 10 kPa aplicadas en la parte alta del talud. En

todos los casos, los resultados de los factores de seguridad son favorables y cumplen con los requisitos de estabilidad definidos por el CGTLCR sin la necesidad de la implementación de medidas adicionales para mejorar la estabilidad de los taludes.

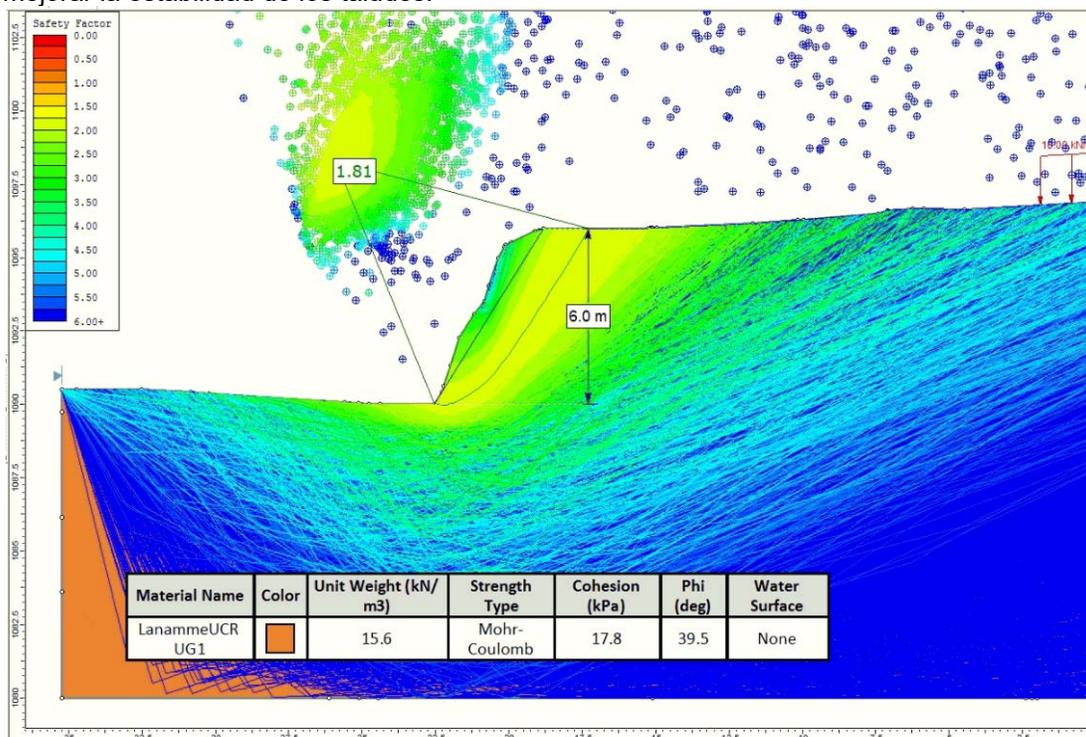


Figura 6. Sección transversal del talud derecho y factor de seguridad para el caso estático en la estación 0+700.

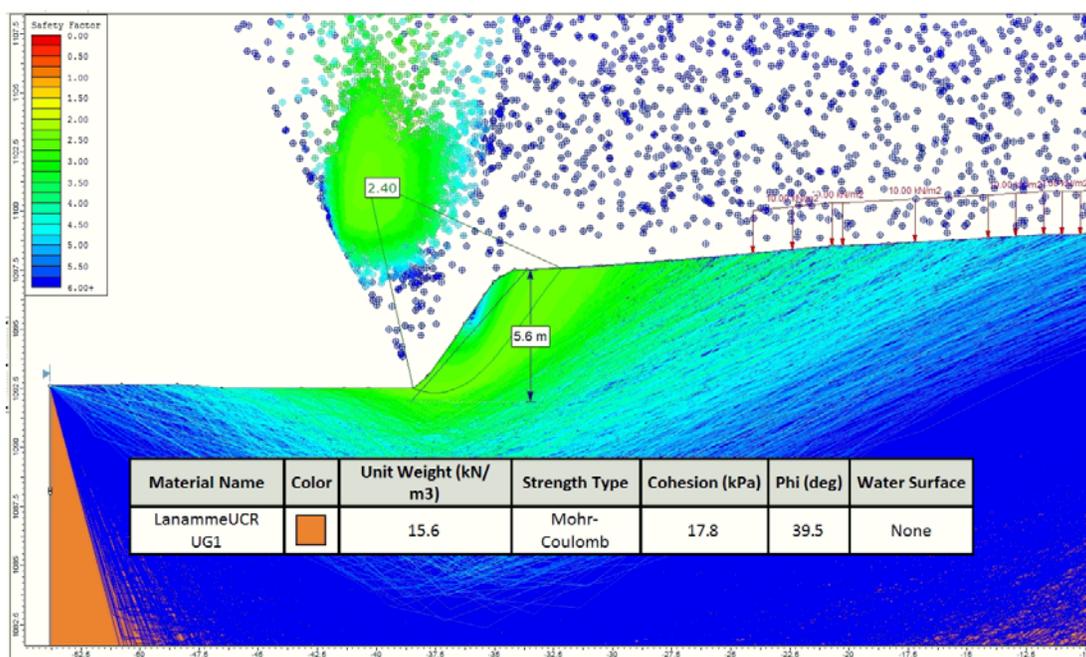


Figura 7. Sección transversal del talud derecho y factor de seguridad para el caso estático en la estación 0+800.

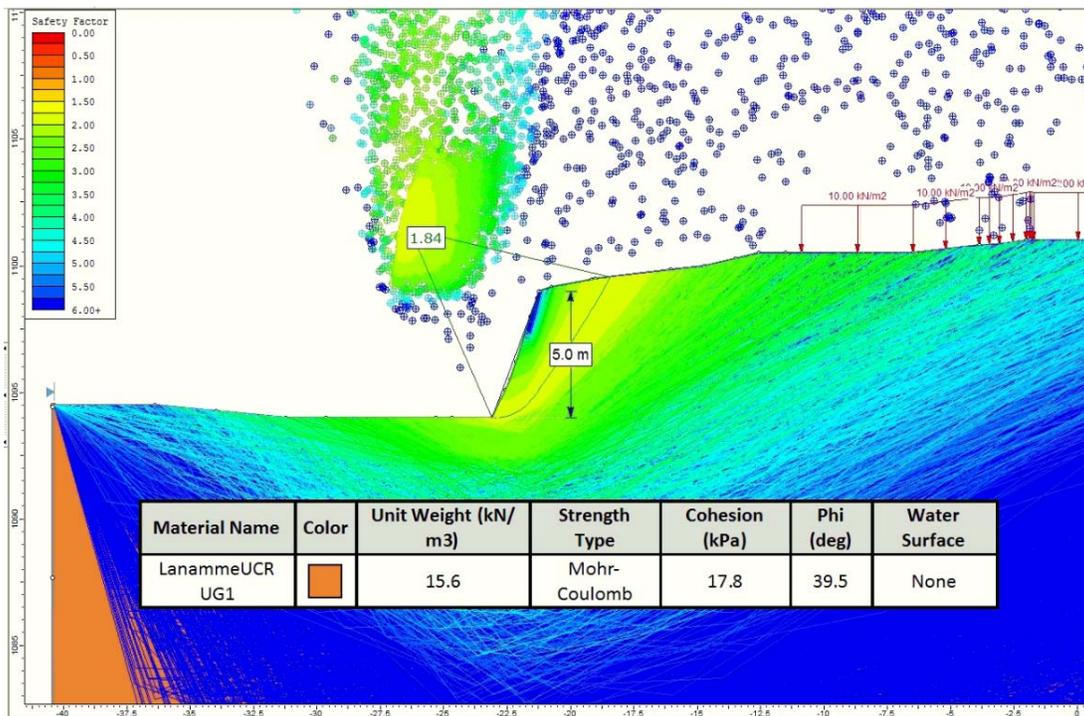


Figura 8. Sección transversal del talud derecho y factor de seguridad para el caso estático en la estación 0+900.

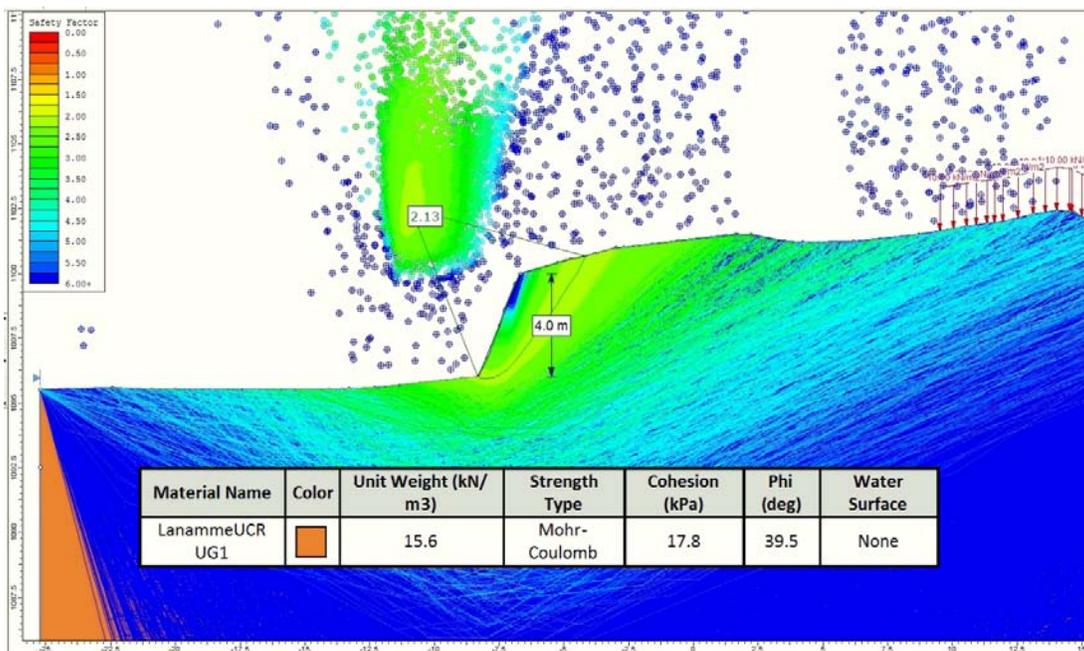


Figura 9. Sección transversal del talud derecho y factor de seguridad para el caso estático en la estación 1+000.

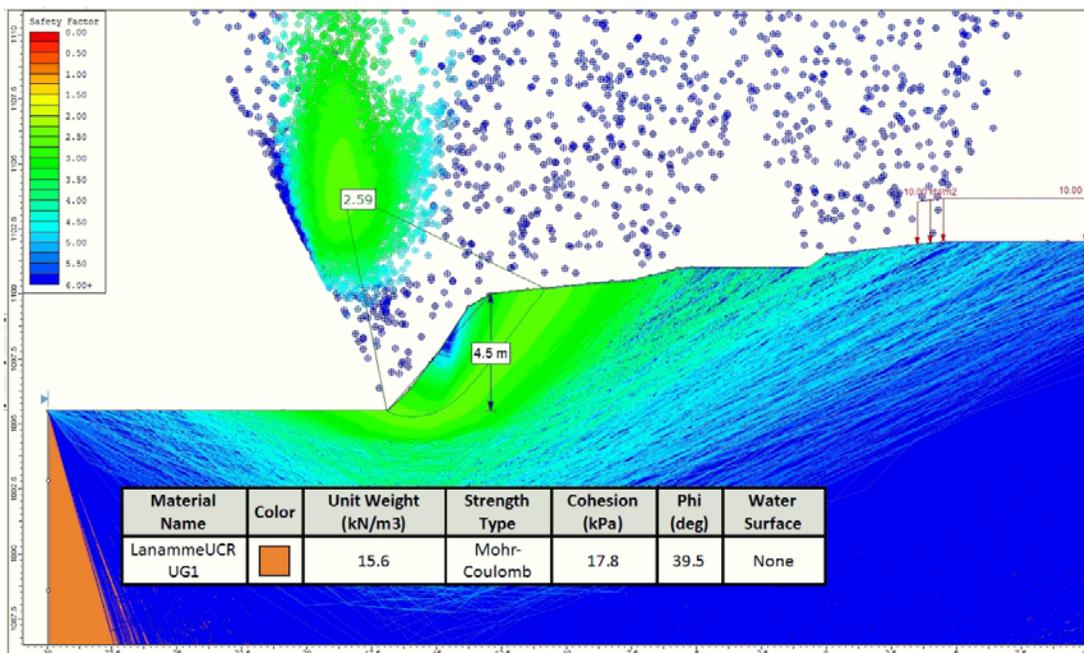


Figura 10. Sección transversal del talud derecho y factor de seguridad para el caso estático en la estación 1+100.

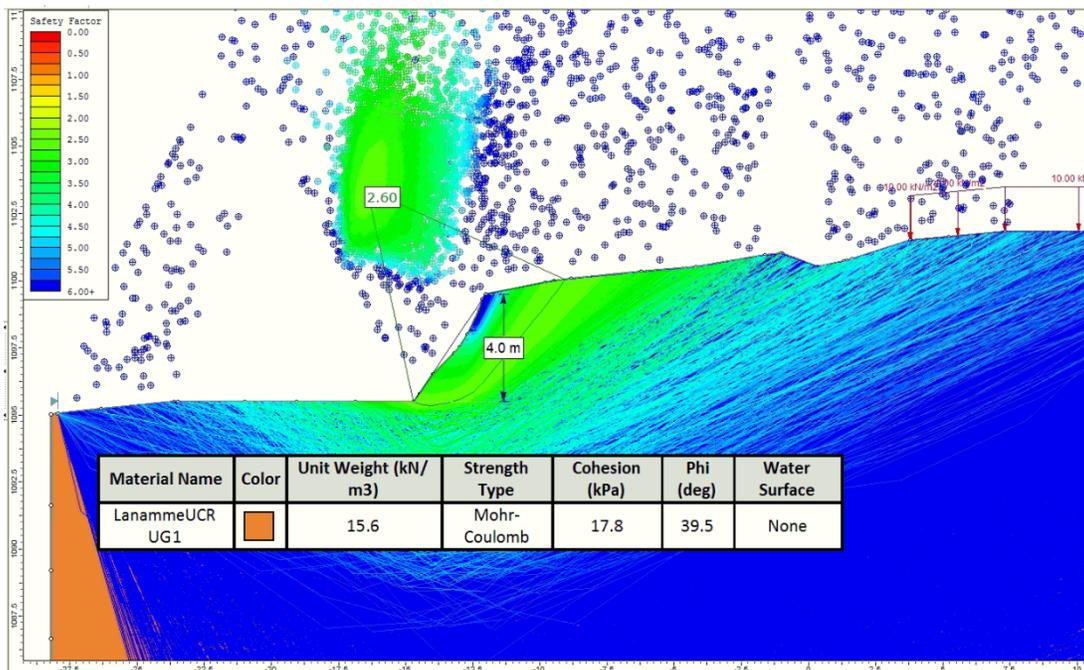


Figura 11. Sección transversal del talud derecho y factor de seguridad para el caso estático en la estación 1+200.

#### 11.4.2 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:

$$SRF = \left( \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_f} \right) = \frac{c'}{c'_f} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde,  $\phi'_f$  y  $c'_f$  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 LM-PIG-10-2021, relacionado con la necesidad de realizar un análisis de deformaciones en el talud derecho, en secciones próximas a los condominios observados cerca de la corona del talud de corte, los cuales estarán localizados a pocos metros del nuevo talud de la Ruta 32, 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 el muro pasivo sufra deformaciones por la redistribución de los esfuerzos in situ.

No está demás 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 puntualizada en la zona de análisis y el estudio completo correspondiente, 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 el talud derecho de la sección transversal en el estacionamiento 1+200, el cual corresponde al inicio del Condominio Oasis Tournón. La Figura 12, muestra la sección transversal original, o sea, sin considerar la ampliación de la Ruta 32, y que fue obtenida a partir del modelo de elevación digital del levantamiento realizado con el VANT. Como se mencionó anteriormente, se utilizó el programa RS2, entonces para efectos del análisis del talud, este fue dividido 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. Adicionalmente, en la Figura 12, se muestran los parámetros geotécnicos obtenidos con los ensayos de laboratorio realizados por el LanammeUCR, que se presentan en el apartado II.2, y que se utilizan para estos análisis.

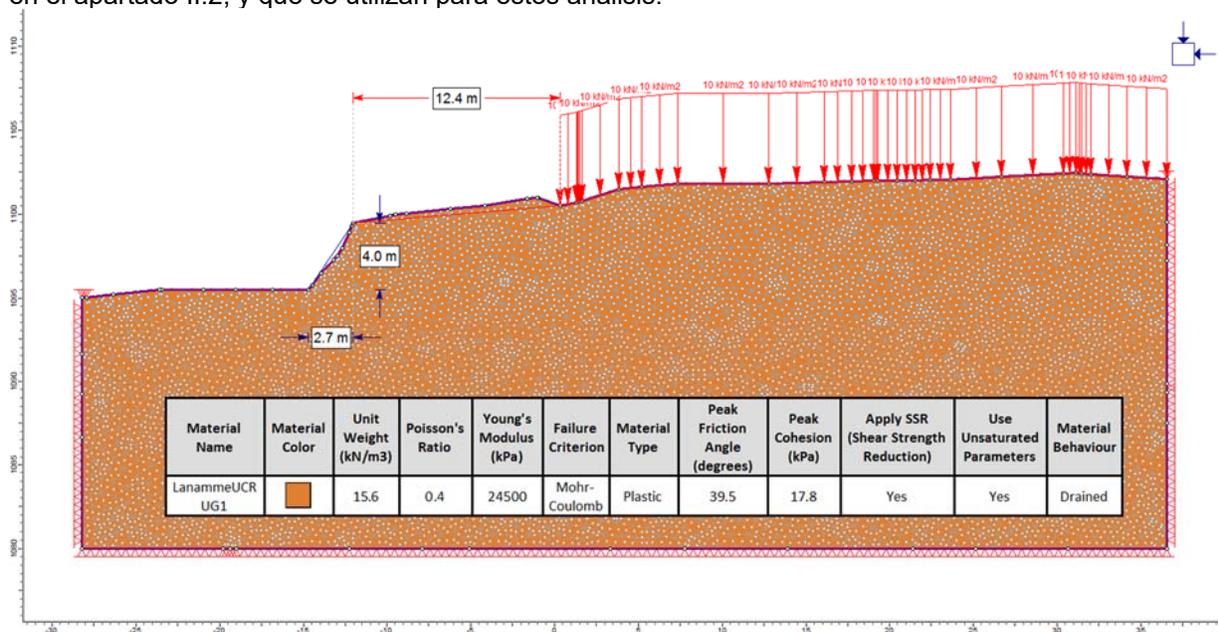


Figura 12. Sección transversal original del talud derecho y propiedades geotécnicas de la estación 1+200.

Para efectos de los análisis fueron considerados dos inclinaciones del talud: 70° y 45° con respecto a la línea horizontal. La inclinación de 70° corresponde a la misma inclinación observada en la primera visita del día 19 de febrero de 2021, para los taludes derecho entre las secciones 0+800 y 1+000. Por su parte, la inclinación de 45° corresponde a la inclinación del talud observada en sitio en la segunda visita realizada el 7 de abril de 2021. Para cada una de las inclinaciones del talud, se evaluaron seis escenarios:

1. Escenario 1: Corte a la inclinación propuesta,
2. Escenario 2: Corte a la inclinación propuesta + colocación de pernos pasivos,
3. Escenario 3: Corte a la inclinación propuesta + colocación de pernos pasivos + sismo,
4. Escenario 4: Corte a la inclinación propuesta + colocación de pernos pasivos + sismo + precipitación,
5. Escenario 5: Corte a la inclinación propuesta + sismo + precipitación,
6. Escenario 6: Corte a la inclinación propuesta + precipitación,

En el caso de los pernos, se consideró la solución propuesta por el diseño de HSOLIS que consiste en pernos pasivos de 12 m e inclinación de 20° con respecto a la horizontal, con varillas #8 grado 60, con una resistencia a la fluencia de 214 kN, y un módulo de elasticidad de  $2 \times 10^8$  kPa. En el caso del sismo, se asume un coeficiente pseudoestático de 0,20 g definido en el CGTLCR. Finalmente, en el caso de la precipitación se considera un flujo transitorio de lluvia correspondiente a un evento extremo de precipitación con una intensidad de 14,58 mm/hr, por un periodo de duración de 24 horas.

La [Figura 13](#) muestra la sección transversal con la inclinación de 70° y los pernos pasivos del diseño propuesto por HSOLIS. Por su parte, la [Figura 14](#) muestra la sección transversal con la inclinación de 45° y los pernos pasivos. Como se puede notar, con la inclinación de 45°, la presencia de las casas se encuentra más próximo de la corona del talud.

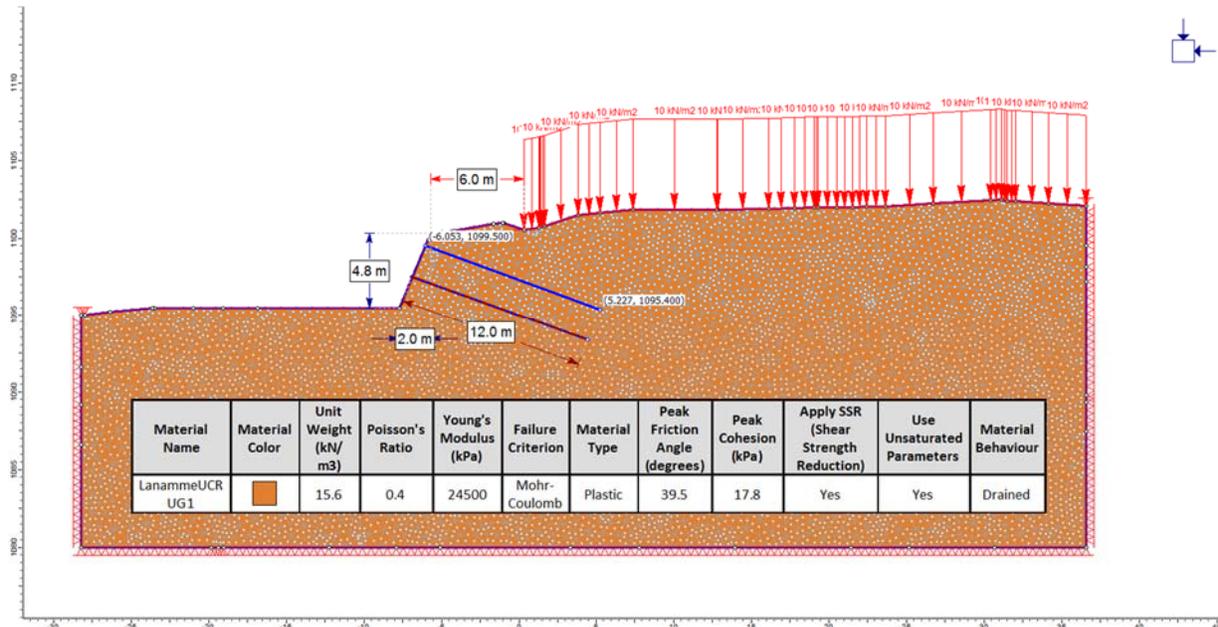


Figura 13. Sección transversal con inclinación de 70° y propiedades geotécnicas de la estación 1+200.

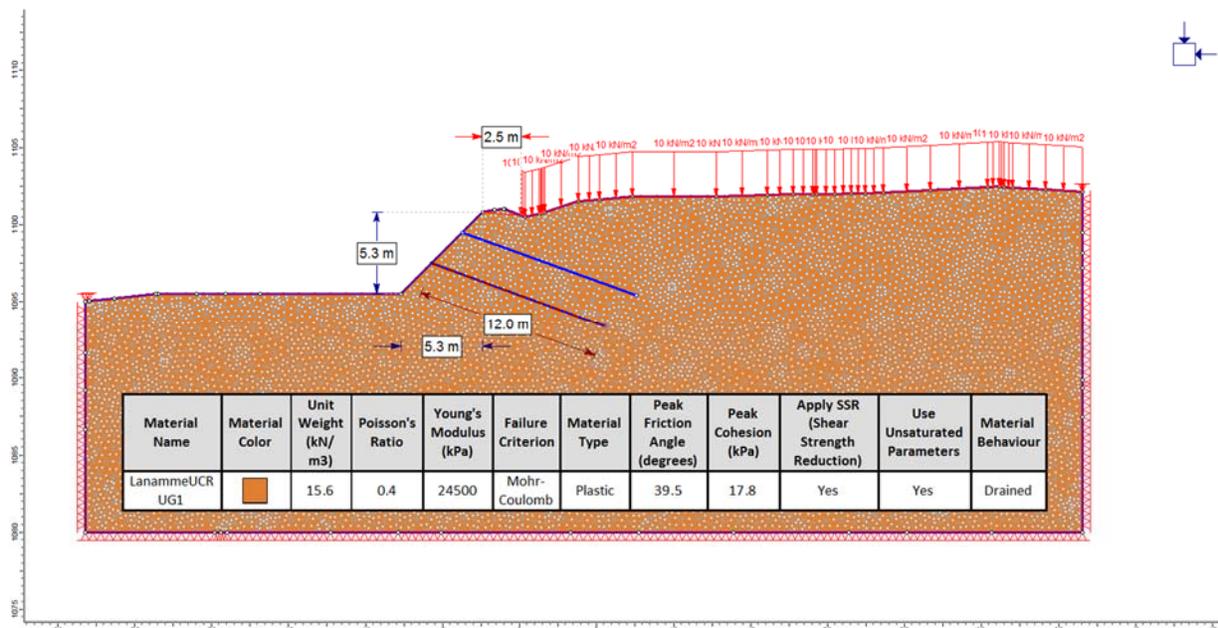


Figura 14. Sección transversal con inclinación de 45° y propiedades geotécnicas de la estación 1+200.

Para cada uno de los escenarios anteriores, 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 (ver Figuras 15, 16 y 17). 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.

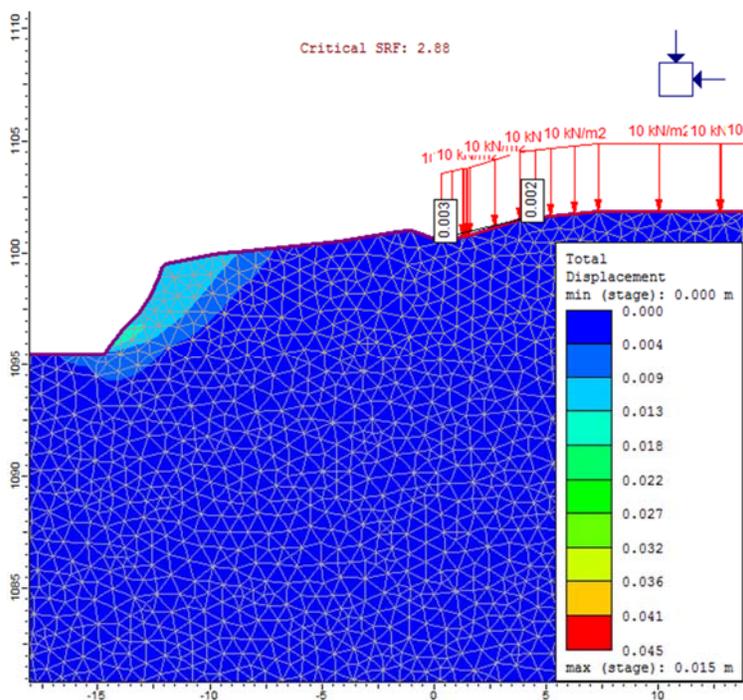


Figura 15. Ejemplo de deformaciones totales para el estacionamiento 1+200.

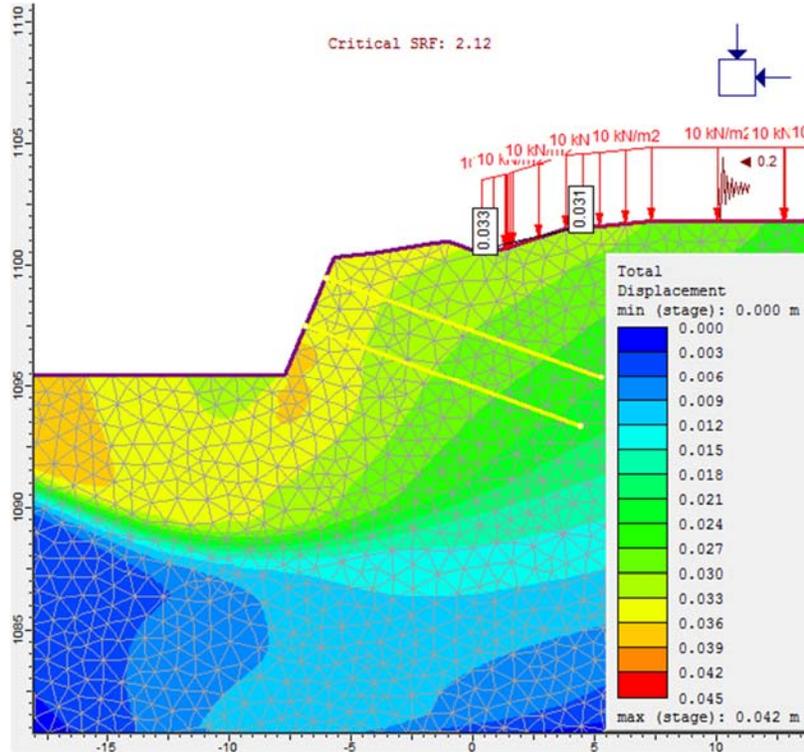


Figura 16. Ejemplo de deformaciones totales para la sección transversal con inclinación de 70° (Escenario 4).

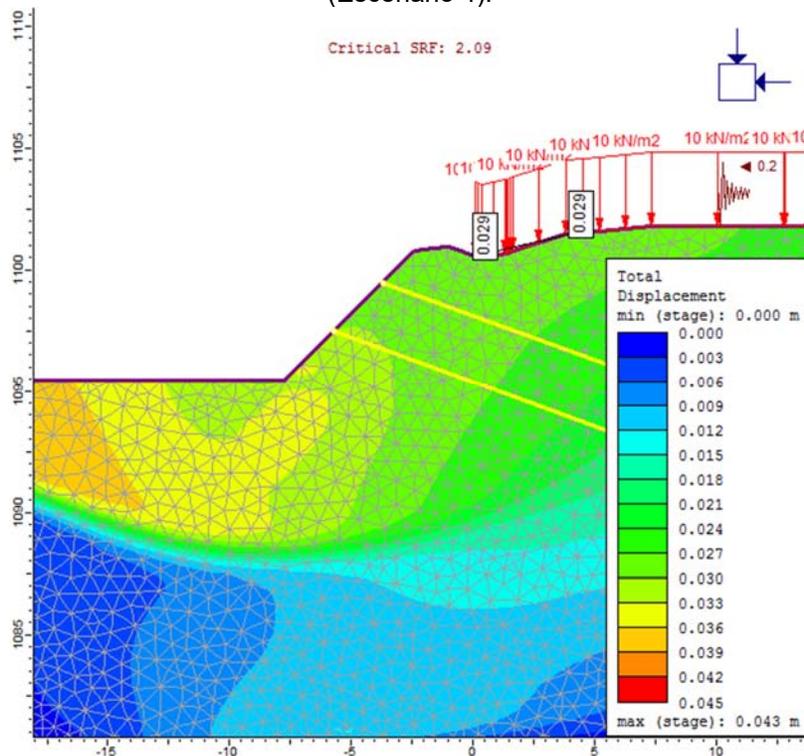


Figura 17. Ejemplo de deformaciones totales para la sección transversal con inclinación de 45° (Escenario 4).



La **Tabla 2**, muestra los valores de las deformaciones horizontales, verticales y totales obtenidos de las simulaciones realizadas. Estos valores fueron determinados con una separación de 3,9 m. Inicialmente, como se puede observar, en todos los casos, los resultados de los factores de seguridad son favorables y cumplen con los requisitos de estabilidad definidos por el CGTLCR. Además, se puede notar que los valores de los factores de seguridad aumentan con el cambio de inclinación de 70° para 45°, lo cual desde el punto de vista de los análisis de equilibrio límite y del método de elementos finitos, es un resultado esperado ya que una inclinación más próxima de la línea horizontal, representa desde el punto de estabilidad al deslizamiento una condición más estable y segura. Sin embargo, es importante resaltar que, desde el punto de vista de deformabilidad, tanto las deformaciones horizontales, verticales y totales fueron mayores para la inclinación de 45°, lo cual se puede deber al hecho de que la presencia de las casas se encuentra más próximas de la corona del talud.

De esta forma, el Código de Cimentación de Costa Rica (CCCR) establece algunas directrices generales, que se muestran en la **Tabla 3**. 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* = 3,9 m, correspondiente a la distancia observada en sitio para las columnas de apoyo de las paredes perimetrales del Condominio Oasis Tournón.

Tabla 2. Factores de seguridad y deformaciones obtenidas en las simulaciones para diferentes escenarios e inclinaciones del talud

Escenario	<i>l</i> (m)	Factor de Seguridad	Def. vert. (m)	Def. horiz. (m)	Def. total (m)	Factor de Seguridad	Def. vert. (m)	Def. horiz. (m)	Def. total (m)
Talud Original	0,0	2,88	-0,0005	-0,0026	0,0026	2,88	-0,0005	-0,0026	0,0026
	0,8		-0,0005	-0,0025	0,0025		-0,0005	-0,0025	0,0025
	3,9		-0,0005	-0,0024	0,0025		-0,0005	-0,0024	0,0025
Inclinación del talud 70°					Inclinación del talud 45°				
Escenario	<i>l</i> (m)	Factor de Seguridad	Def. vert. (m)	Def. horiz. (m)	Def. total (m)	Factor de Seguridad	Def. vert. (m)	Def. horiz. (m)	Def. total (m)
1	0,0	2,27	-0,0006	-0,0025	0,0026	2,81	-0,0012	-0,0038	0,0040
	0,8		-0,0007	-0,0023	0,0024		-0,0009	-0,0036	0,0037
	3,9		-0,0004	-0,0020	0,0020		-0,0008	-0,0034	0,0035
2	0,0	2,87	-0,0010	-0,0049	0,0050	3,80	-0,0076	-0,0187	0,0202
	0,8		-0,0010	-0,0047	0,0048		-0,0065	-0,0186	0,0197
	3,9		-0,0012	-0,0039	0,0041		-0,0064	-0,0111	0,0128
3	0,0	2,50	-0,0051	-0,0240	0,0245	2,80	-0,0086	-0,0409	<b>0,0418</b>
	0,8		-0,0041	-0,0221	0,0225		-0,0070	-0,0408	<b>0,0414</b>
	3,9		-0,0039	-0,0195	0,0199		-0,0067	-0,0381	<b>0,0387</b>
4	0,0	2,12	-0,0100	-0,0308	<b>0,0324</b>	2,09	-0,0099	-0,0270	<b>0,0288</b>
	0,8		-0,0096	-0,0305	<b>0,0320</b>		-0,0097	-0,0270	<b>0,0287</b>
	3,9		-0,0087	-0,0298	<b>0,0310</b>		-0,0085	-0,0273	<b>0,0286</b>
5	0,0	1,77	-0,0033	-0,0123	0,0127	2,09	-0,0123	-0,0314	<b>0,0337</b>
	0,8		-0,0031	-0,0117	0,0121		-0,0118	-0,0313	<b>0,0335</b>
	3,9		-0,0023	-0,0112	0,0114		-0,0099	-0,0316	<b>0,0331</b>
6	0,0	2,26	-0,0009	-0,0032	0,0033	2,81	-0,0044	-0,0085	0,0096
	0,8		-0,0009	-0,0030	0,0031		-0,0028	-0,0067	0,0073
	3,9		-0,0006	-0,0026	0,0027		-0,0016	-0,0050	0,0052



Tabla 3. 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 3](#), 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 2](#), se tiene que, en el caso de los asentamientos totales, durante los escenarios 3, 4 y 5 (escenarios durante los cuales actúan las fuerzas de sismo) se tienen asentamientos totales con valores que oscilan entre 0,0286 hasta 0,0418 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. Sin embargo, en el caso de estructura delicadas, los asentamientos totales obtenidos en las simulaciones en las que actúan fuerzas de sismos, superan el valor de 0,025 m, por lo podrían esperarse algunos inconvenientes en estas estructuras, razón por la cual se deben realizar análisis con mayor detalle (realizando mayor investigación geotécnica para establecer parámetros del medio más precisos) para los casos específicos correspondientes.

A partir de los resultados obtenidos de las simulaciones, se determinaron los asentamientos diferenciales entre puntos con una separación de 3,9 m (ver resultados en la [Tabla 4](#)). Estos valores, pueden ser comparados con las tolerancias admisibles para asentamientos diferenciales del terreno para puntos serados por  $l = 3,9$  m, conforme a lo que se indica en la [Tabla 3](#). De esta manera, algunas de las tolerancias admisibles deberían ser las siguientes:

- Fisuración de repellos = 0,0039 m
- Marcos de concreto reforzado = 0,010 – 0,016 m
- Muros de concreto reforzado = 0,012 m



Cuando se comparan estos valores con los mostrados en la [Tabla 4](#), en general no se esperan daños importantes en las estructuras cercanas a la corona del talud. A excepción del escenario 3, del talud con la inclinación de 70° el cual involucra la acción del sismo y, los escenarios 2 y 6 del talud con la inclinación de 45°, donde se podrían presentar fisuras en los repellos, ya que los valores superan los 0,0039 m recomendados por el CCCR.

Tabla 4. Asentamientos diferenciales obtenidos en las simulaciones para diferentes escenarios e inclinaciones del talud para  $l = 3,9m$

Escenario	Deformación vertical (m)	Deformación horizontal (m)	Deformación total (m)	Deformación vertical (m)	Deformación horizontal (m)	Deformación total (m)
Original	0,0000	0,0003	0,0003	0,0000	0,0003	0,0003
Escenario	Inclinación del talud 70°			Inclinación del talud 45°		
	Deformación vertical (m)	Deformación horizontal (m)	Deformación total (m)	Deformación vertical (m)	Deformación horizontal (m)	Deformación total (m)
1	0,0002	0,0005	0,0006	0,0004	0,0004	0,0005
2	0,0002	0,0010	0,0009	0,0012	<b>0,0076</b>	<b>0,0074</b>
3	0,0012	<b>0,0045</b>	<b>0,0046</b>	0,0019	0,0028	0,0031
4	0,0013	0,0010	0,0014	0,0014	0,0003	0,0002
5	0,0010	0,0011	0,0013	0,0024	0,0002	0,0006
6	0,0003	0,0006	0,0006	0,0028	0,0035	<b>0,0044</b>

El mismo análisis puede hacerse para determinar asentamientos diferenciales entre puntos con una separación de 0,8 m (ver resultados en la [Tabla 5](#)). En este caso, las tolerancias admisibles son calculados para  $l = 0,8 m$ , obteniéndose las siguientes tolerancias admisibles:

- Fisuración de repellos = 0,0008 m
- Marcos de concreto reforzado = 0,0020 – 0,0032 m
- Muros de concreto reforzado = 0,0024 m

Tabla 4. Asentamientos diferenciales obtenidos en las simulaciones para diferentes escenarios e inclinaciones del talud para  $l = 0,8m$

Escenario	Deformación vertical (m)	Deformación horizontal (m)	Deformación total (m)	Deformación vertical (m)	Deformación horizontal (m)	Deformación total (m)
Original	0,0001	0,0002	0,0002	0,0000	0,0001	0,0001
Escenario	Inclinación del talud 70°			Inclinación del talud 45°		
	Deformación vertical (m)	Deformación horizontal (m)	Deformación total (m)	Deformación vertical (m)	Deformación horizontal (m)	Deformación total (m)
1	0,0001	0,0002	0,0002	0,0003	0,0002	0,0003
2	0,0000	0,0002	0,0002	<b>0,0011</b>	0,0001	0,0005
3	<b>0,0010</b>	<b>0,0019</b>	<b>0,0020*</b>	<b>0,0016</b>	0,0001	0,0004
4	0,0004	0,0003	0,0004	0,0002	0,0000	0,0001
5	0,0002	0,0006	0,0006	0,0005	0,0001	0,0002
6	0,0000	0,0002	0,0002	<b>0,0016</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0023*</b>



Cuando se comparan estos valores con los mostrados en la [Tabla 5](#), en general no se esperan daños importantes en las estructuras cercanas a la corona del talud. A excepción del escenario 3, del talud con la inclinación de 70° el cual involucra la acción del sismo y, los escenarios 2, 3 y 6 del talud con la inclinación de 45°, donde se podrían presentar fisuras en los repellos, ya que los valores superan los 0,0008 m recomendados por el CCCR. Por su parte, tanto en el talud con la inclinación de 70° y el escenario 3, como en el talud con la inclinación de 45° y el escenario 6, los asentamientos diferenciales totales superan ligeramente la deformación admisible recomendada por el CCCR de 0,0020 m para los marcos de concreto reforzado.

Adicionalmente, el mismo CCCR indica que los daños en edificios se producen usualmente a causa de los asentamientos diferenciales y las distorsiones angulares ( $\Delta$ ) entre cimientos vecinos. En la [Tabla 6](#) se presentan los valores de distorsión obtenidos de las simulaciones para puntos con una separación de 0,8 y 3,9 m.

Tabla 6. Distorsiones obtenidas en las simulaciones para diferentes escenarios e inclinaciones del talud

Escenario	$l$ (m)	Distorsión vertical (m)	Distorsión horiz. (m)	Distorsión total (m)	Distorsión vertical (m)	Distorsión horiz. (m)	Distorsión total (m)
Talud Original	0,8	0,0001	0,0003	0,0003	0,0000	0,0001	0,0001
	3,9	0,0001	0,0001	0,0002	0,0000	0,0001	0,0000
Escenario	$l$ (m)	Inclinación del talud 70°			Inclinación del talud 45°		
		Distorsión vertical (m)	Distorsión horiz. (m)	Distorsión total (m)	Distorsión vertical (m)	Distorsión horiz. (m)	Distorsión total (m)
1	0,8	0,0001	0,0003	0,0003	0,0004	0,0003	0,0004
	3,9	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001
2	0,8	0,0000	0,0003	0,0003	0,0014	0,0001	0,0006
	3,9	0,0001	0,0003	0,0002	0,0003	0,0019	0,0019
3	0,8	0,0013	<b>0,0024</b>	<b>0,0025</b>	<b>0,0020</b>	0,0001	0,0005
	3,9	0,0003	0,0012	0,0012	0,0005	0,0007	0,0008
4	0,8	0,0005	0,0004	0,0005	0,0003	0,0000	0,0001
	3,9	0,0003	0,0003	0,0004	0,0004	0,0001	0,0001
5	0,8	0,0003	0,0008	0,0008	0,0006	0,0001	0,0002
	3,9	0,0003	0,0003	0,0003	0,0006	0,0001	0,0002
6	0,8	0,0000	0,0003	0,0003	<b>0,0020</b>	<b>0,0023</b>	<b>0,0029</b>
	3,9	0,0001	0,0002	0,0002	0,0007	0,0009	0,0011

La [Tabla 7](#) presenta un criterio usualmente utilizado para la definición de valores admisibles de la distorsión angular. Un asentamiento total o diferencial puede afectar una estructura al punto de producir su falla, por lo tanto, la capacidad de soporte admisible debe restringirse a un valor que no produzca problemas de asentamientos.



Tabla 7. Distorsión angular límite para distintas condiciones

Distorsión angular $\Delta$	Descripción
1/150	Límite en el que se debe esperar daño estructural en edificios
1/150	Considerable agrietamiento en paneles y muros de mampostería
1/250	Límite en el que la pérdida de verticalidad de edificios altos y rígidos puede ser visible
1/300	Límite en que se debe esperar dificultades con puentes grúas
1/300	Límite en que se deben esperar las primeras grietas en muros
1/500	Límite seguro para edificios en los que no se permiten grietas
1/500	Límite para cimentaciones rígidas circulares o para anillos de cimentación de estructuras rígidas, altas y esbeltas
1/650	Límite para edificios de concreto cimentados sobre un solado de espesor aproximado de 1,20 m
1/750	Límite donde se esperan dificultades en maquinaria sensible a asentamientos

Los valores mostrados en la [Tabla 7](#) son comparados con los valores mostrados en la [Tabla 6](#), donde se observa que únicamente para el caso en que se consideran la separación entre puntos de  $l = 0,8m$  y para el escenario 3, del talud con la inclinación de  $70^\circ$ , y para el escenario 6 del talud con la inclinación de  $45^\circ$ , se obtienen resultados que sobrepasan ligeramente la tolerancia de  $1/500$  del límite de seguridad para edificios en los que no se permiten grietas. Por lo que, los resultados obtenidos de las simulaciones sugieren que no se esperan daños estructurales en los edificios, ni tampoco agrietamientos en paneles y muros de mampostería.

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.

### III. Comentarios finales

Teniendo en consideración los comentarios y las observaciones presentadas en el informe LM-PIG-10-2021, se enfatiza nuevamente la importancia que tiene la investigación geotécnica previa, tratando de abarcar la mayor extensión posible del proyecto para el establecimiento de modelos geotécnicos representativos del sitio, lo cual permite tener una mayor claridad en el establecimiento de los parámetros geotécnicos para el diseño de las obras de contención y para el análisis de estabilidad y de deformabilidad de las diferentes secciones transversales



Es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos del análisis de deformabilidad de la superficie del talud derecho (sentido San José – Limón), 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 por sus distintas configuraciones y condominios próximos a la corona del talud ante las actividades de estabilización previstas para esta zona.

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones se destaca que, para las propiedades de los materiales utilizados en todos los casos, 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. De esta manera, al utilizar ambas metodologías se observó que los valores de los factores de seguridad aumentaron con el cambio de inclinación de 70° para 45°, lo cual desde el punto de vista de los análisis de equilibrio límite y del método de elementos finitos, es un resultado esperado ya que una inclinación más próxima a la línea horizontal, representa desde el punto de estabilidad al deslizamiento una condición más estable y segura. Sin embargo, es importante resaltar que, desde el punto de vista de deformabilidad, tanto las deformaciones horizontales, verticales y totales fueron mayores para la inclinación de 45°, lo cual se puede deberse al hecho de que la presencia de las casas se encuentra más próximas de la corona del talud.

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 del escenario 3, del talud con la inclinación de 70° el cual involucra la acción del sismo y, los escenarios 2 y 6 del talud con la inclinación de 45°, donde se podrían presentar fisuras en los repellos ya que los valores superan los 0,0039 m recomendados por el CCCR. Por su parte, los asentamientos diferenciales y las distorsiones angulares obtenidos de las simulaciones para puntos con una separación de 3,9 m, sugieren que no se esperan daños estructurales en los edificios, ni tampoco agrietamientos en paneles y muros de mampostería.

No obstante, se sugiere llevar a cabo estudios adicionales incluyendo más ensayos de laboratorio y en sitio, aunado a evaluar otros otros escenarios de deformaciones 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 nuevamente que, durante las visitas realizadas, se observaron que los taludes existentes carecen de sistemas adecuados para el control de la escorrentía superficial. Por ejemplo, en el sector que corresponde al Condominio Oasis Tournón, las contracunetas existentes se encuentran totalmente obstruido por el crecimiento de vegetación y, en las cercanías del estacionamiento 0+900, diversas construcciones de viviendas y calles urbanas, tenían sistemas inadecuados de alcantarillado, con salidas de agua directamente sobre la cara del talud. En ambos casos, se recomienda implementar medidas integrales de mitigación, ya sea por parte de los propietarios o de la Administración del proyecto (quien sea el responsable), para detener y evitar la erosión de la cara del talud, así como, colocar sistemas para el control de la escorrentía superficial y evitar problemas de estabilidad.



#### IV. Referencias

- Asociación Costarricense de Geotecnia (2015). **Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica**. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- 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.
- Bel Ingenieros Consultores. (2020) **LAB-GEO-001. Estudio de suelos: proyecto muros barrio El Socorro ampliación R.N 32 del puente Virilla a intersección R.N 117**. Alajuela.
- LanammeUCR. **I-0348-2021 Informe de Ensayo del Proyecto Ampliación Ruta 32 (Talud)**. LanammeUCR. San José, Costa Rica.
- LanammeUCR. **I-XXXX-2021 Informe de Ensayo del Proyecto Ampliación Ruta 32 (Talud)**. LanammeUCR. San José, Costa Rica.
- H Solís (2020). **e-26-2020: Diseño de muro reforzado con anclajes pasivos. Ampliación de la vía R.32 desde el final del puente sobre el río Virilla a rest. Doña Lela**. San José.
- Programa de Ingeniería Geotécnica (2021). **LM-PIG-10-2021 Informe de la revisión del diseño del muro de retención del Proyecto Ampliación Ruta 32: desde el Puente Ricardo Saprissa al Barrio Socorro**. LanammeUCR. San José, Costa Rica.
- Rojas, N. (2011). **Curvas de Intensidad Duración Frecuencia de algunas estaciones meteorológicas mecánicas**. Departamento de Climatología e Investigaciones Aplicadas. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET). Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica.