

## Efectos de la consolidación del suelo en el largo plazo sobre el muro anclado del acceso sur al Viaducto del Malleco, Ruta 5 Sur tramo Collipulli – Temuco, Chile. Effects of long-term soil consolidation on the anchored wall of the southern access to the Malleco Viaduct, Ruta 5 Sur, Collipulli - Temuco, Chile.

Sebastián Boldrini L.<sup>1</sup> & Danae Ramirez I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> SUBT, Chile, [sb@subt.cl](mailto:sb@subt.cl)

<sup>2</sup> Universidad Austral, Chile, [danae.ramirez@gmail.com](mailto:danae.ramirez@gmail.com)

**RESUMEN:** Se investiga la influencia que ha tenido la consolidación del suelo en el largo plazo tanto en la pérdida de carga en anclajes postensados como en la estabilidad de un muro anclado cerca del acceso sur al Viaducto del Malleco, Collipulli, Chile. El objetivo es poder entender el fenómeno de pérdidas de carga que se han registrado en los anclajes del muro en el tiempo, así como también las pérdidas abruptas de carga ocurridas por efecto del terremoto del Maule del 2010. El muro fue construido en el año 2000 debido a la inestabilidad del suelo durante la construcción del viaducto. Esta estructura de contención fue instrumentada con 12 celdas de cargas, que registran lecturas cada hora, incluyendo un registro continuo durante los eventos sísmicos como fue el terremoto del Maule en el 2010. Adicionalmente, cuatro inclinómetros monitorean la estabilidad del talud aguas abajo. El análisis revela una descarga progresiva de los anclajes desde el comienzo de los monitoreos, con una aceleración de la descarga durante el sismo de 2010. El análisis de elementos finitos, utilizando el software Plaxis 3D, comparó la pérdida de carga real con consolidación a largo plazo simulada utilizando el modelo Soft Soil Creep. Los resultados muestran que el fenómeno de consolidación refleja las pérdidas de carga medidas. Pese a la disminución de las cargas de los anclajes, los factores de seguridad y los esfuerzos internos del muro se han mantenido constantes, asegurando la estabilidad estructural.

**PALABRAS CLAVES:** Consolidación, Anclajes Postensados, Muro de Contención, Plaxis 3D, Modelo Soft Soil Creep, Monitoreo en Largo Plazo.

### 1 INTRODUCCION.

El Viaducto del Malleco se encuentra emplazado en la Ruta 5 Sur, en el tramo Collipulli – Temuco, Región de La Araucanía. En su acceso sur, la carretera corre a media ladera sobre un talud de gran altura que, durante su construcción, presentó graves problemas de inestabilidad global. En el año 1997, en el marco del proyecto de ampliación de la calzada, se decidió realizar un corte aguas arriba del talud y construir un muro anclado para soportar el nivel de solicitaciones implicado en el proyecto (Fernández, 2017). El muro, que se terminó de construir en agosto de 2002, cuenta con una longitud de más de 180 m y 241 anclajes activos.

Con el fin de medir parámetros antes, durante y después del proceso constructivo de este muro se consideró instrumentación que, mediante lecturas periódicas permite verificar su comportamiento y condiciones de estabilidad y serviciabilidad a lo largo del tiempo (Oliva, 2015). Se instalaron 12 celdas de cargas de cuerda vibrante en las zonas características del muro, las que permiten controlar las cargas a las que se encuentran sometidos los anclajes. Además, en el talud inferior se dispusieron cuatro tuberías inclinométricas con el fin de controlar eventuales desplazamientos (Pilotes Terratest, 2020).



Figura 1. Construcción de muro anclado en acceso Sur del Viaducto Malleco (Pilotes Terratest, 2020).

Durante la primera campaña de lectura, en marzo de 2003, se evidenció una pérdida de carga importante en la totalidad de los anclajes que cuentan con instrumentación, tendencia que se ha mantenido en menor medida, pero con una pérdida de carga constante en el tiempo hasta la actualidad.

Según lo señalado por Fernández et al. (2017), la variación en las cargas de los anclajes puede verse afectada por varios factores: errores en las mediciones y su corrección por temperatura, la secuencia de construcción y el momento en el que se realiza el tensado, la relación entre las diferentes rigideces suelo-muro a lo largo de este, y las deformaciones tanto del muro como aquellas debido al creep en el sistema suelo-lechada-acero. En el presente estudio se considera este último factor, analizando los efectos que ha tenido la consolidación del suelo en esta pérdida de carga en los 20 años posteriores al término de su construcción. Para esto se realizan modelos numéricos en el software Plaxis 3D, que utiliza el método de elementos finitos y específicamente el modelo constitutivo Soft Soil Creep model que permite estudiar los efectos de la consolidación. Estos modelos corresponden a las tres secciones transversales características que cuentan con instrumentación, en donde se simula el efecto a largo plazo de la consolidación en el muro. Para el incluir el evento sísmico ocurrido el 27 de febrero de 2010 y al que fue sometida la estructura de contención, se incluyó a modo simplificado un análisis pseudoestático en el tiempo correspondiente a su historia.

El modelo constitutivo Soft Soil Creep (SSC), disponible en Plaxis, es capaz de representar el comportamiento de suelos blandos con alta compresibilidad y un creep significativo. Corresponde a una extensión del modelo Soft Soil (SS), integrando los efectos del tiempo y la velocidad a la que se producen las deformaciones. En este se reconocen dos tipos de deformaciones: las elásticas que se asumen instantáneas, y las inelásticas (viscoplástica o creep), que ocurren no sólo bajo esfuerzos

efectivos constantes, sino que también se incorporan en la fase de consolidación. Estas últimas se desarrollan en el tiempo a un ritmo decreciente, sin embargo, nunca se detienen (Vermeer, 1999; Neher, 2001; De Jesus, 2013). De esta manera, se incorporaron los plazos reales de construcción en los modelos, tanto en la secuencia constructiva, como en las 63 campañas de lectura de las celdas de carga, realizadas entre marzo de 2003 y enero de 2022.

## 2 MURO ANCLADO Y SU INSTRUMENTACIÓN

### 2.1 Características del Muro

El muro tiene una longitud de 181.23 m, con alturas que varían de 2 a 10 m y espesores de 28 o 30 cm, dependiendo de la altura. Su materialidad es hormigón G25 (NCh170) doblemente armado con acero grado A63-42ES. En total, cuenta con 241 anclajes activos con cables de acero grado 270, de acuerdo con la norma ASTM A416-85, y con un diámetro 15 mm (0.6"). Estos anclajes tienen longitudes totales entre 10 m y 35 m, con longitudes de bulbos que van desde los 5 m a 7 m.

Para el presente estudio se analizan tres cortes del muro. En la Figura 2 se muestra la sección transversal del muro correspondiente al corte 1, detallando la posición de los anclajes, además de sus longitudes libre ( $L_f$ ) y de bulbo ( $L_b$ ). El corte 2 se detalla en la Figura 3 y el corte 3 en la Figura 4. Las ubicaciones de estos cortes se indican en la Figura 5

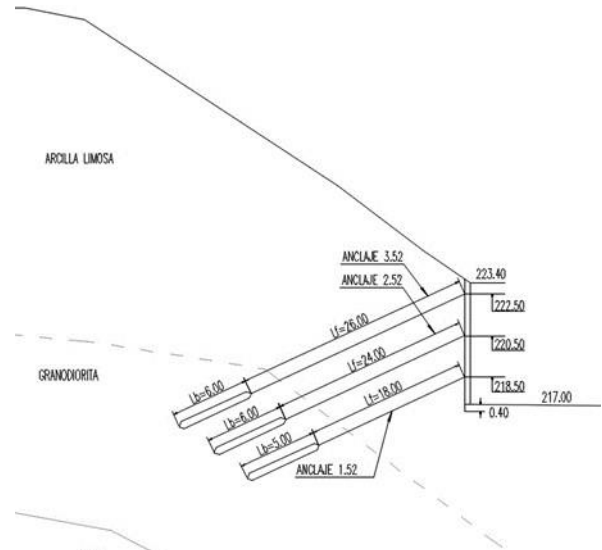


Figura 3. Sección transversal corte 2.

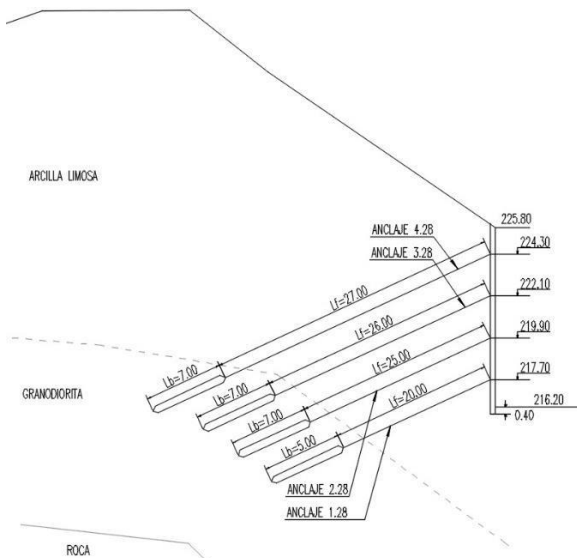


Figura 2. Sección transversal corte 1.

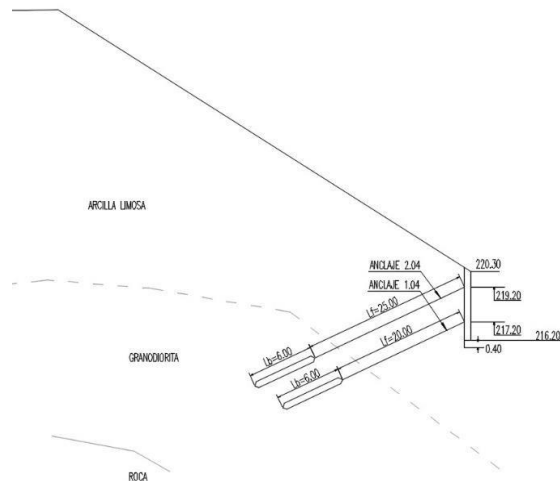


Figura 4. Sección transversal corte 3

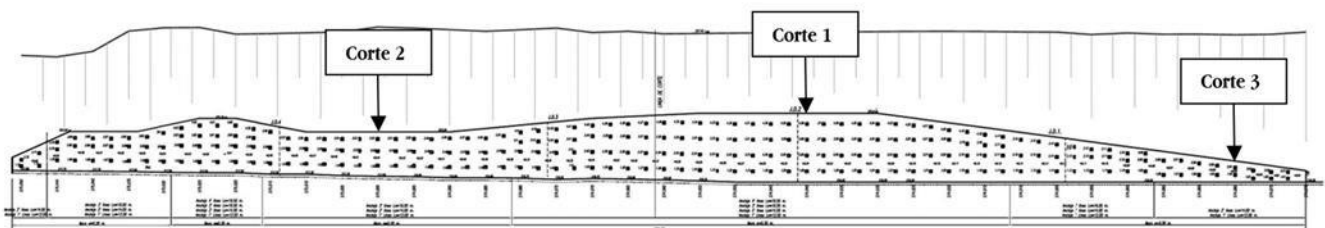


Figura 5. Vista Frontal en elevación del muro y ubicación de cortes

## 2.2 Diseño y Construcción del Muro

Para el diseño del muro se utilizó el software Talren, aplicando el método de Bishop (1955), donde se asumió una posición estimada de la roca de acuerdo con los resultados obtenidos de sondajes y exploraciones sísmicas, lo que resultó en un total de 239 anclajes con longitudes entre los 10 y 23.5 m. Sin embargo, al iniciar las excavaciones, se evidencia que la posición de la roca difiere considerablemente de la esperada. Por lo tanto, se modifican las longitudes de los anclajes para alcanzar suelo competente, que corresponde a un limo de alta compacidad, con cementación media a alta y finos no plásticos. Geotécnicamente se clasifica como granodiorita V erosionada, conocida como maicillo (Pilotes Terratest, 2020). Debido a esto, se rediseñan los anclajes, quedando finalmente con las longitudes expuestas en la sección anterior.

La construcción se lleva a cabo por paños y por niveles (bataches), asegurando la estabilidad de los niveles superiores mediante el apoyo en el terreno no excavado o en paneles ya hormigonados, antes de continuar con la excavación. La secuencia constructiva se realiza perforando los anclajes, posterior instalación de armaduras, shotcrete y, finalmente, pruebas de carga y tensado de los anclajes con la terminación (inyección) de la cabeza (Pilotes Terratest, 2020).

## 2.3 Instrumentación

### 2.3.1 Inclínómetros

Se instalaron cuatro tuberías inclinométricas para verificar la estabilidad del talud en el acceso sur, lado oriente del Viaducto Malleco. Los tres inclinómetros instalados en la autopista resultan cercanos a los cortes considerados en el análisis. El cuarto punto de inclinometría se encuentra en una zona más alejada, aguas abajo de la carretera.

Las ubicaciones y profundidades de los inclinómetros involucrados se aprecian en la Figura 6 y Tabla 1 respectivamente. Según corresponde por su ubicación, el inclinómetro 01C1 se incorpora en el modelo del corte 1, el 01C2 en el modelo del corte 2 y el 01A1 en el modelo del corte 3.

Tabla 1. Profundidad habilitada en los inclinómetros.

Inclinómetro	Profundidad habilitada de medición
01C2	30 m
01C1	25 m
01A1	25 m
01A2	25m

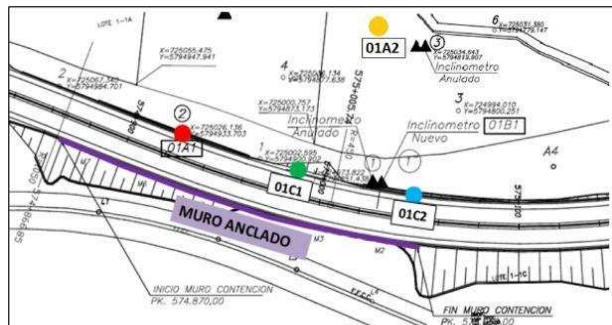


Figura 6. Vista en planta con ubicación de inclinómetros.

### 2.3.2 Celdas de Carga

El muro cuenta con doce celdas de cargas de cuerda vibrante RST conectadas a un datalogger Campbell CR10X, estas se encuentran distribuidas en cuatro secciones transversales. En el presente estudio se analiza el comportamiento histórico de nueve de ellas, esto debido a que no se cuenta con información suficiente para realizar el modelo de la sección donde se encuentran las tres restantes.

Las celdas de carga a analizar del corte 1 corresponden a la columna de anclaje número 28, el cual incluye los anclajes número 4.28, 3.28, 2.28 y 1.28, según se muestra en la Figura 2.

En el corte 2 se encuentra la columna de anclajes número 52, que contiene los anclajes número 3.52, 2.52 y 1.52, tal como se aprecia en la Figura 3. Finalmente, en el corte 3 se considera la columna de anclajes número 04, donde están ubicados los anclajes número 2.04 y 1.04, indicados en la Figura 4.

En la Tabla 2 se encuentran las celdas de cargas con la cantidad de sensores operativos a la fecha.

Tabla 2. Sensores operativos por anclaje.

Anclaje	Nº Sensores operativos	Estado de celda
4.28	2	Operativa
3.28	2	Operativa
2.28	1	Operativa
1.28	0	No operativa
3.52	2	Operativa
2.52	1	Operativa
1.52	0	No operativa
2.04	1	Operativa
1.04	3	Operativa

Tabla 3. Cargas de tensado y Cargas en primera lectura de celdas.

Anclaje	Carga de tensado [KN]	Carga primera lectura [KN]
4.28	825	602.0
3.28	825	588.0
2.28	825	599.7
1.28	825	712.5
3.52	725	443.9
2.52	720	472.7
1.52	725	693.0
2.04	720	695.1
1.04	720	641.4

## 3 SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL MURO (PLAXIS 3D)

### 3.1 Descripción General de los modelos

Para analizar la estructura, se realizan seis modelos en el software Plaxis, considerando los casos estáticos y sísmicos de los cortes 1, 2 y 3. Corresponden a las zonas más desfavorables del muro y coinciden con los anclajes que cuentan con celdas de carga,

lo que permite comparar los resultados de estos con los datos de las mediciones obtenidas por medio de la instrumentación.

Los modelos tienen un ancho de 7.5 m y sus largos varían entre los 180 m y los 360 m. Cada uno de ellos cuenta con tres columnas de anclajes separadas a 2.5m, de las cuales sólo se analiza la sección ubicada al centro de cada modelo (Figura 7). Las cotas del terreno que se utilizan para la modelación se obtienen de la topografía del sector.

Para la aplicación de la ley constitutiva, antes de la construcción se contempla inicialmente una fase de consolidación de 100 años con el fin de considerar las deformaciones históricas del suelo. Posteriormente, las deformaciones se reinician a cero, estableciéndose desde ese punto el inicio de este análisis.

Al modelar la estructura en Plaxis, se incluyen fases para cada etapa de la secuencia constructiva, que se lleva a cabo por bataches, según fue la construcción real. Se identifican cuatro etapas: excavación, ejecución del anclaje, construcción del muro y el tensado del anclaje.

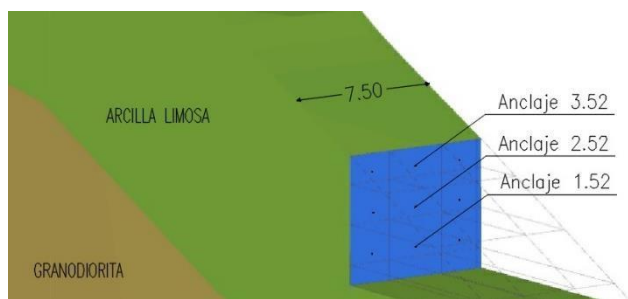


Figura 7. Detalle del modelo en Plaxis 3D – Corte 2.

Debido a que el creep es dependiente del tiempo, este factor adquiere relevancia al aplicar el modelo SSC. Por lo tanto, es esencial considerar el tiempo destinado para llevar a cabo cada una de las etapas de la secuencia constructiva. Sin embargo, no se cuenta con registros de los plazos reales de la construcción, por lo que se asumen intervalos de tiempo aproximados de acuerdo con la información existente de las pruebas de carga en los anclajes. Para representar estos intervalos de tiempo de manera adecuada, se utilizan fases de construcción o de consolidación según corresponda.

Con el fin de lograr una mayor precisión en la simulación del proceso constructivo, en la simulación se incluyen las pruebas de carga realizadas a cada uno de los anclajes, considerando los tiempos y cargas reales aplicadas en cada una de ellas. Posteriormente, se incorporan las cargas a las que se tensaron los anclajes.

Las cargas de tensado varían entre los 720 kN y los 825 kN. Sin embargo, posterior al proceso de tensado, se presenta una pérdida de carga importante que se evidencia en la primera lectura, realizada en marzo de 2003, como se muestra en la Tabla 3. Para representar esta pérdida en el modelo, se realiza una calibración de las cargas en los anclajes posterior a su bloqueo para asegurar que los resultados de estas coincidan con los datos obtenidos mediante la instrumentación en la fase correspondiente a la primera lectura. En el caso del anclaje 2.04, se considera como referencia la tercera lectura, realizada en septiembre de 2003, debido a que en la segunda lectura se presenta una nueva pérdida de carga.

Esta calibración es importante para llevar a cabo un correcto análisis posterior, que represente el comportamiento real de la estructura después del proceso de construcción.

Para obtener las cargas en las fechas de las lecturas entre el 01 de marzo de 2003 y el 01 de enero de 2022, se crean fases de consolidación con una duración igual a la cantidad de días entre lecturas. De esta manera, se crean 63 fases y se incluyen, además, las fases necesarias para analizar los efectos del sismo del 27 de febrero de 2010.

Para verificar los efectos del evento sísmico mencionado previamente, se realiza, de manera simplificada, un análisis pseudoestático, utilizando una aceleración de 0.2g que se incluye en una fase con duración de 2.5 minutos, tiempo que coincide con la duración real del sismo. A continuación, se incluye una fase de consolidación de un minuto antes de eliminar las aceleraciones.

Además, se incorporan 20 fases destinadas a medir los factores de seguridad. En aquellos años en que se cuenta con más de una lectura, se incluyen hasta dos fases por año.

En total, se consideran entre 180 y 265 fases por modelo, incluyendo toda la información disponible sobre el proceso constructivo del muro para obtener resultados más precisos.

Para los modelos se consideran dos tipos de suelos: una arcilla limosa, para la cual se utiliza la ley constitutiva SSC, y una granodiorita V (maicillo), para la que se considera un modelo lineal elástico perfectamente plástico (modelo Mohr-Coulomb). En la Tabla 4 se encuentran detallados los parámetros utilizados para cada tipo de suelo.

Tabla 4. Propiedades Geotécnicas utilizadas en la simulación en PLAXIS.

Parámetro	Nombre	Suelo		Unidad
		Arcilla	Granodiorita	
$\gamma$	Densidad	18	22	kN/m <sup>3</sup>
c	Cohesión	23	350	kN/m <sup>2</sup>
$\phi$	Ángulo de fricción interna	30	40	°
$\psi$	Ángulo de dilatación	0	0	°
$\lambda^*$	Índice de compresión modificado	0.014	-	-
$\kappa^*$	Índice de hinchamiento modificado	0.002	-	-
$\mu^*$	Índice de creep modificado	0.0061	-	-
$\nu_{ur}$	Coefficiente de Poisson para carga - recarga	0.15	-	-
$K_{0nc}$	Relación tensiones de estado de consolidación normal	0.5627	-	-
$e_{init}$	Índice inicial de vacíos	0.9	0.5	-
$n_{init}$	Índice inicial de porosidad	0.4737	0.333	-
OCR	Coefficiente de sobre consolidación	1.7	-	-
$E'_{ref}$	Módulo de Young	-	1.575x10 <sup>6</sup>	kN/m <sup>2</sup>
$\nu$	Coefficiente de Poisson	-	0.33	-
$G_{ref}$	Módulo de corte	-	592105	kN/m <sup>2</sup>
$E_{oed}$	Módulo edómetro	-	2.33x10 <sup>6</sup>	kN/m <sup>2</sup>
$E'_{inc}$	Aumento de rigidez	-	0	kN/m <sup>2</sup> /m
$v_s$	Velocidad de onda de corte	-	513.834	-
$v_p$	Velocidad de onda de compresión	-	1020.08	-

Es importante aclarar que no se cuenta con estudios de mecánica de suelos que puedan validar las propiedades geotécnicas

de los suelos utilizadas en estos análisis. Las propiedades utilizadas se basaron en los parámetros utilizados en el diseño del muro y se complementaron, para los parámetros de consolidación, según calibraciones para lograr pérdidas de carga similares a las obtenidas en las lecturas de la instrumentación.

Si bien es de interés poder contar con estudios específicos de la consolidación en el suelo existente, este factor no se considera un impedimento para el objetivo principal de este estudio, donde se busca concluir de manera general respecto a los efectos de la consolidación tanto en la pérdida de carga en los anclajes como en la estabilidad de la estructura en el largo plazo.

Se considera, además, la existencia y posición de napas subterráneas conforme a la información existente.

### 3.2 Modelo Constitutivo Soft Soil Creep

Todos los suelos presentan creep, lo que implica que después de la consolidación primaria siempre se produce algún grado de consolidación secundaria. Asumiendo que esta última sea un porcentaje de la consolidación primaria, es evidente que el creep juega un rol importante en los problemas que involucran una gran consolidación primaria, como es el caso de los suelos blandos (Neher, 2001).

El SSC es un modelo constitutivo que representa el comportamiento de suelos blandos con altas compresibilidades y un creep significativo. De acuerdo con lo expuesto en el manual de materiales de Plaxis (Bentley, 2024), las características básicas que lo describen son:

- Rigidez dependiente del esfuerzo (comportamiento de compresión logarítmica).
- Distinción entre carga primaria (virgen) y procesos de descarga/recarga.
- Compresión secundaria dependiente del tiempo.
- Envejecimiento del esfuerzo de pre-consolidación.
- Comportamiento de falla de acuerdo con el criterio de MohrCoulomb.
- Superficie de fluencia adaptada del modelo Cam Clay modificado (CCM).
- Regla de flujo para deformaciones plásticas.

Se reconocen tanto deformaciones elásticas, que se consideran instantáneas, como las inelásticas (visco-plásticas o creep) que ocurren bajo esfuerzos efectivos constantes y son incorporadas en la fase de consolidación. Estas últimas se desarrollan en el tiempo a un ritmo decreciente, este ritmo puede variar en presencia de nuevos esfuerzos, sin embargo, nunca se detienen.

De manera unidimensional se puede describir la deformación al final de la consolidación, incluyendo el creep, de la siguiente manera:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{vc}^e + \varepsilon_{vc}^{cr} + \varepsilon_{vac}^{cr} \quad (1)$$

$$\varepsilon_v = \kappa^* \cdot \ln\left(\frac{p'}{p'_0}\right) + (\lambda^* - \kappa^*) \cdot \ln\left(\frac{p'_{pc}}{p'_{p0}}\right) + \mu^* \cdot \ln\left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c}\right) \quad (2)$$

Donde  $\varepsilon_v$  corresponde a la deformación logarítmica total debido a un incremento en el esfuerzo medio de  $p'_0$  a  $p'$  en un periodo de tiempo  $t_c+t'$ . En la Ecuación 1, los superíndices e y cr

diferencian las deformaciones elásticas de las viscoplásticas (o creep), en tanto los subíndices c y ac denotan la deformación que ocurre durante y después de la consolidación. El subíndice c se considera en las deformaciones elásticas para indicar que también está relacionada con la consolidación. En la Figura 8 se muestran estas relaciones, donde la línea IC corresponde a la consolidación isotrópica (Neher, 2001)

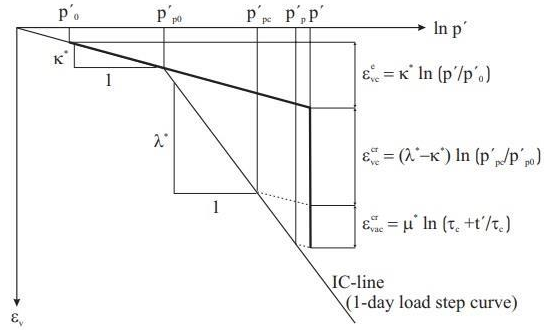


Figura 8. Relación Logarítmica entre deformaciones volumétricas y esfuerzos medios incluyendo el creep (Neher, 2001).

En la Ecuación 2,  $\lambda^*$  corresponde al índice de compresión modificada y  $\kappa^*$  el índice de hinchamiento modificado. Estos parámetros determinan la compresibilidad de un material bajo la acción de la carga virgen y durante los procesos de descarga/recarga respectivamente. Para obtener un cálculo aproximado, se pueden asumir las siguientes relaciones:

$$\lambda^* = \frac{I_p(\%)}{500} \quad (3)$$

$$3 \leq \frac{\lambda^*}{\kappa^*} \leq 7 \quad (4)$$

El parámetro  $\mu^*$  (Ecuación 2) corresponde al índice de creep modificado, que describe la compresión secundaria por el logaritmo del incremento de tiempo. Se relaciona de manera aproximada con  $\lambda^*$  según la siguiente expresión:

$$15 \leq \frac{\lambda^*}{\mu^*} \leq 25 \quad (5)$$

En caso de presencia de cargas transitorias o continuas, el modelo se debe plantear de forma diferencial. Para esto todas las deformaciones inelásticas se asumen dependientes del tiempo y, además, que  $t_c + t' = \tau$  es igual a un día. La ecuación diferencial para el creep se puede escribir:

$$\dot{\varepsilon}_v^{cr} = \dot{\varepsilon}_v^e - \dot{\varepsilon}_v^{cr} = -\kappa^* \frac{\dot{p}'}{p'} - \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p'_{pc}}{p_p} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \quad (6)$$

Dentro de las limitaciones de este modelo, se destaca que el comportamiento en el rango elástico se sobreestima, especialmente cuando se presentan problemas de excavación, como en la construcción de túneles. Es un modelo de endurecimiento isotrópico que no considera cargas cíclicas o comportamiento anisotrópico, así como tampoco el ablandamiento debido al fenómeno de dilatancia.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Cargas en los anclajes

Se contrastan los valores de las cargas históricas de los anclajes obtenidos mediante los modelos con las lecturas de las celdas de carga. Esta comparación permite evaluar la precisión de los modelos y determinar si se ajustan adecuadamente a los datos reales. En los gráficos de Figura 9, Figura 10 y Figura 11 se grafican los valores de las lecturas con línea continua, mientras que los valores obtenidos mediante los modelos en Plaxis en línea segmentada.

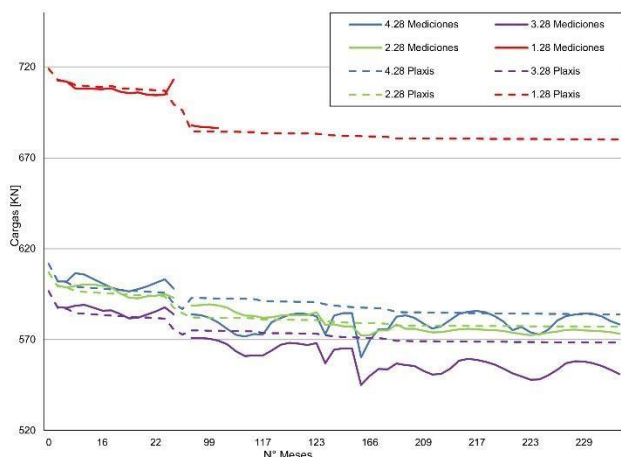


Figura 9. Cargas en el tiempo en los anclajes del Corte 1.

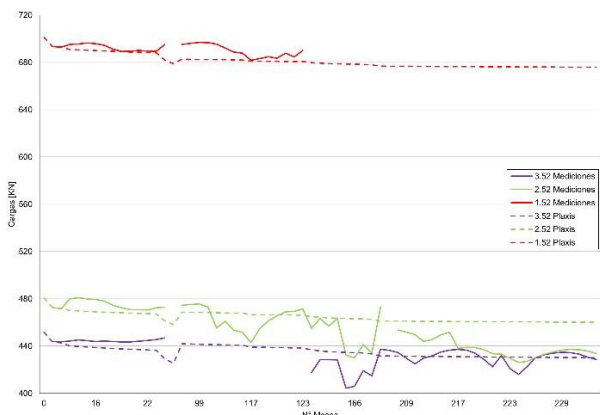


Figura 10. Cargas en el tiempo en los anclajes del Corte 2.

Según se muestra en la Tabla 2, los anclajes 1.28 y 1.52 no se encuentran actualmente operativos, por lo que no se registran lecturas después de enero de 2011 y noviembre de 2012, respectivamente. El anclaje 3.52 no estuvo operativo entre agosto de 2007 y marzo de 2014, lo cual se evidencia en el gráfico con una interrupción en la línea. En noviembre de 2019 no se registró lectura en el anclaje 2.52.

El mes 0 corresponde a agosto de 2002, cuando se termina la construcción del muro. Aunque no se disponga de lecturas en esta fecha, se considera como punto de referencia para realizar los análisis comparativos y determinar si existen cambios en la estabilidad de la estructura.

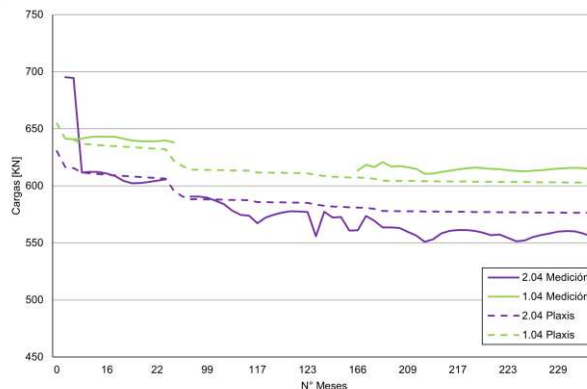


Figura 11. Cargas en el tiempo en los anclajes del Corte 3.

Se verifica que los valores obtenidos mediante la modelación, con las cargas calibradas, en Plaxis difieren en no más de un 0.1% de la primera lectura de las celdas de carga. En el caso del anclaje 2.04, se considera la tercera lectura, como se explicó anteriormente.

En el periodo previo al sismo, los valores obtenidos difieren como máximo en un 1.4% en caso del corte 1 y un 4% en el corte 2. En el corte 3, se omiten las dos primeras lecturas del anclaje 2.04, por lo que la diferencia máxima entre los datos es de un 2.5%

Entre agosto de 2007 y septiembre de 2010 no se realizan lecturas. Sin embargo, en los modelos se incluye una fase el 27 de febrero de 2010, inmediatamente antes del sismo, para verificar la variación de la carga. Se observa una disminución, siendo la mayor en el corte 3, que no supera el 1%. Estos valores se ajustan adecuadamente a los datos del mes de septiembre de 2010.

Después del sismo, se observa una mayor diferencia entre los datos reales y los valores obtenidos en Plaxis, siendo más evidente en los anclajes 3.52 y 2.52. Esta diferencia alcanza valores cercanos al 8%. Esta variación puede deberse a la elección de realizar un análisis pseudoestático, el cual no considera los efectos dinámicos del sismo ni su efecto en el proceso de consolidación. A pesar de esto, se logra una buena precisión en la modelación.

En los datos de las lecturas se observan fluctuaciones que coinciden con los cambios climáticos entre los meses de invierno, donde los valores aumentan, y verano, donde disminuyen. Estas fluctuaciones son propias de los instrumentos y como es de esperarse, no se reflejan en los resultados de los modelos.

Como resultado principal, mediante la simulación numérica se confirma la tendencia general de disminución de la carga en los anclajes en el tiempo, tal como se observa en los datos reales.

Las variaciones de carga en los anclajes entre la primera y la última lectura muestran una buena precisión en las curvas. Las mayores diferencias se observan en los anclajes 3.28 y 2.52. En ambos casos, se registra una disminución más significativa de la carga alrededor del mes 166, que corresponde a meses de verano a finales de 2015 e inicios del 2016. En los demás anclajes se observa una recuperación de la carga, a diferencia de los anclajes mencionados anteriormente donde la carga no se recupera, sino que disminuye para luego estabilizarse dentro de nuevos rangos.

### 4.2 Factores de Seguridad

Para evaluar la estabilidad histórica del muro se obtienen los factores de seguridad (FS) para cada corte analizado, tanto en los casos estáticos como en los sísmicos.

Se contrastan los valores obtenidos mediante la modelación en Plaxis y el uso del método de reducción de  $c$  y  $\phi$ , con los datos de los análisis de estabilidad históricos utilizando el software GGUStability, que emplea métodos de equilibrio límite. Para estos últimos la reducción de las cargas de los anclajes genera una reducción en el FS de manera directamente proporcional, mientras que para el análisis en PLAXIS se obtiene incluso una leve mejora del FS en la medida de que el suelo se consolida.

Si bien ambos métodos no son equivalentes, por lo que no tendría sentido esperar un resultado numérico similar, cualitativamente los resultados nos indican que el corte 3 tiene una seguridad mayor a los otros dos cortes y que el incluir efecto de la consolidación permite afirmar que la reducción en la carga de los anclajes no necesariamente implica una reducción de la seguridad en el muro.

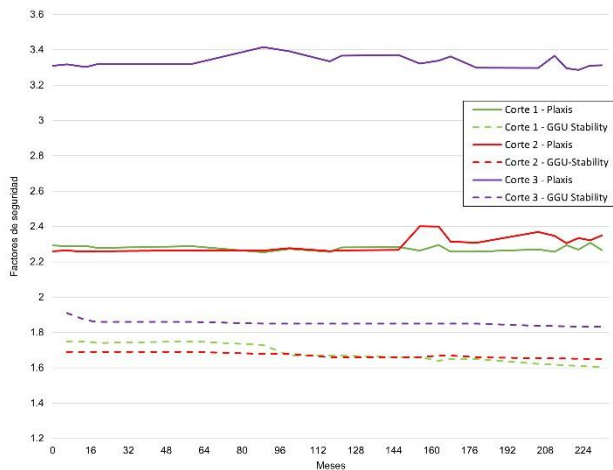


Figura 12. Factores de Seguridad en el tiempo para caso estático.

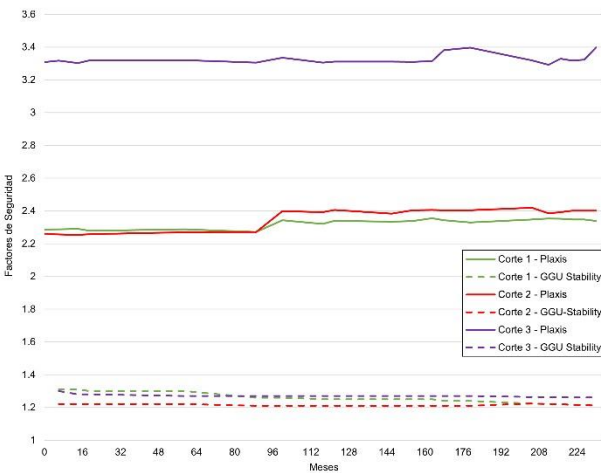


Figura 13. Factores de Seguridad en el tiempo para caso sísmico.

### 4.3 Deformaciones en el muro

A continuación, se analizan las deformaciones en cinco fases específicas con el objetivo de observar cambios significativos que

representen el comportamiento de la estructura durante el periodo del análisis.

Como punto de referencia, se considera el fin de la construcción del muro, que tuvo lugar en agosto de 2002. También se incluyen las fases correspondientes al 27 de febrero de 2010 para verificar el comportamiento previo al sismo, y la de septiembre de 2010 para analizar el impacto del evento sísmico en la estructura. Finalmente, se consideran las fases correspondientes a agosto de 2015 y, por último, enero de 2022.

En la Figura 14 se observan las deformaciones en el muro correspondientes al corte 1. Durante el periodo anterior al sismo, se puede observar que la deformación ocurre en dirección al cerro, presentando una tasa promedio de deformación de 0.4 mm al año en su punto más desfavorable. Sin embargo, debido al sismo, el sentido de la deformación cambia, experimentando una deformación cercana a los 18 cm en dirección a la autopista, la cual tiene relación con el desplazamiento de toda la ladera.

Posteriormente, entre septiembre de 2010 y septiembre de 2012 se presenta un aumento en la tasa de deformación, llegando a alcanzar hasta 1 mm por año. No obstante, en las fases posteriores, se evidencia una disminución de esta, rondando 0.1 mm por año al finalizar el periodo de análisis.

El corte 2, como se aprecia en la Figura 15, se presenta un comportamiento similar al corte 1 durante el periodo anterior al sismo, con tasas de deformación de hasta 0.7 mm al año. Producto del sismo, sufre una deformación hacia la autopista de 8.5 cm en su punto más desfavorable.

En el periodo posterior al sismo se muestra una tendencia de disminución en la tasa de deformación, llegando finalmente a 0.09 mm al año.

La Figura 16 muestra las deformaciones del muro en el corte 3, donde se aprecia una tendencia similar a la observada en los otros dos cortes, aunque con magnitudes de desplazamiento menores.

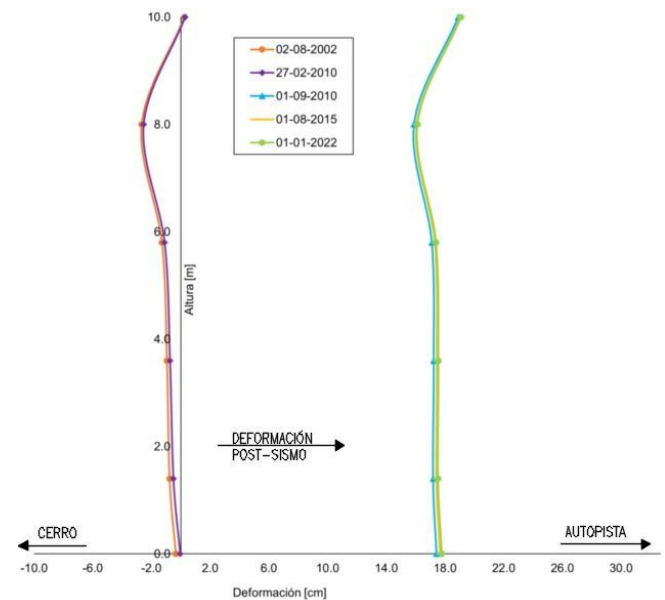


Figura 14. Deformaciones en el muro Corte 1 (PLAXIS 3D).

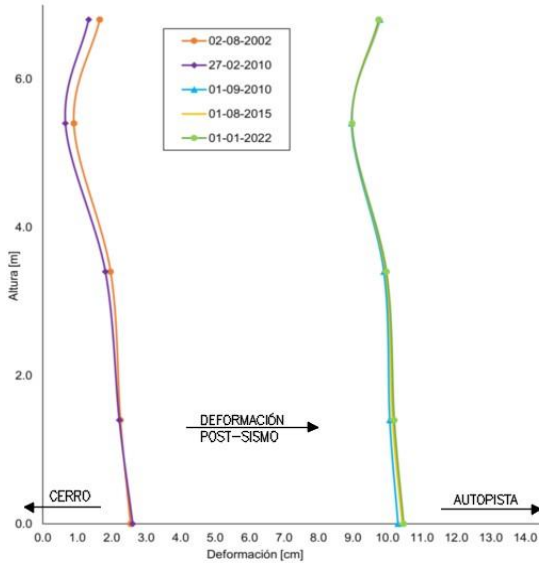


Figura 15. Deformaciones en el muro Corte 2 (PLAXIS 3D).

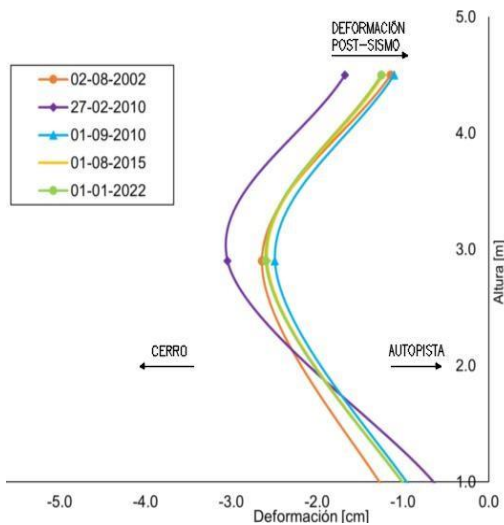


Figura 16. Deformaciones en el muro Corte 3. (PLAXIS 3D)

En este último caso, para el periodo anterior al sismo, el muro experimenta deformaciones hacia el cerro a una tasa de 0.1 mm al año. Posteriormente, debido al sismo, se desplaza 0.5 cm en dirección a la autopista. Finalmente, en el periodo posterior al evento sísmico, las deformaciones disminuyen progresivamente hasta alcanzar una tasa de 0.02 mm al año al final del periodo.

Las menores magnitudes de desplazamiento y las deformaciones finales negativas en este último caso pueden estar asociado al mayor FS que presenta el corte 3 generadas por cargas excesivas en los anclajes (Ver Figura 12 y Figura 13).

Respecto al comportamiento observado, la pérdida de carga de los anclajes se relaciona directamente con una deformación del muro en dirección hacia el cerro. Sin embargo, es importante notar que, debido al sismo, aunque efectivamente se midió una pérdida de carga en los anclajes, los análisis demuestran una deformación global del muro en sentido hacia la autopista, que es lo que intuitivamente se esperaría al aplicar una aceleración horizontal.

#### 4.4 Esfuerzos internos en el muro

Para analizar la seguridad de la estructura, se verifican los esfuerzos internos históricos generados en el muro.

##### 4.4.1 Momentos Flectores

En la Figura 17 se muestran los valores absolutos de los momentos internos máximos y mínimos de la estructura a lo largo del periodo de análisis. Se observa que, en los tres cortes, los valores máximos se presentan al término de la construcción, en agosto de 2002, bajando progresivamente en la medida en que actúa la consolidación.

En los cortes 1 y 2, se aprecia una recuperación e incremento del momento en la fase posterior al sismo. Sin embargo, estos valores no alcanzan a los valores iniciales máximos, mostrando una diferencia de 1.6% y 3.1% respectivamente.

En ningún caso, al final del periodo de análisis, se supera el máximo inicial, posterior a la construcción, que coincide con las cargas más altas en los anclajes.

En general, después del incremento generado después del sismo, la tendencia es decreciente hacia el final del periodo de análisis.

En todos los casos, los esfuerzos internos por los momentos flectores en el muro están en un rango seguro por lo que no se evidencia un riesgo en la integridad estructural por un sobreesfuerzo, incluso bajo los efectos sísmicos.

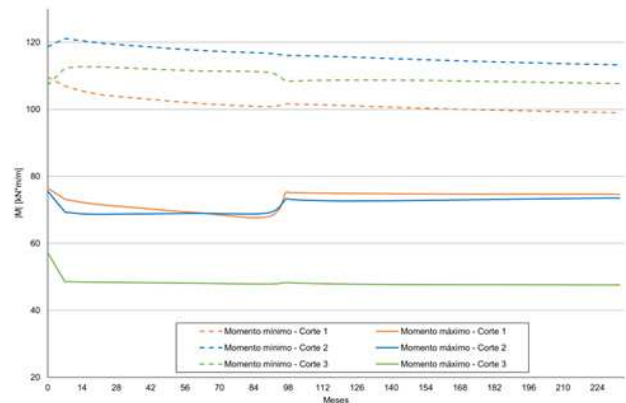


Figura 17. Magnitud de Momentos Flectores máximos y mínimos en el muro (PLAXIS 3D)

##### 4.4.1 Esfuerzos Cortantes

La Figura 17 muestra los valores absolutos de los esfuerzos cortantes máximos y mínimos de la estructura.

En los tres cortes se observa que los esfuerzos cortantes adquieren sus valores máximos en la etapa correspondiente al término de la construcción. Posteriormente en todos los casos se observa una disminución que, solo para los cortes 1 y 2 se interrumpe puntualmente debido a un incremento del corte de manera posterior al evento sísmico.

En todos los casos, los esfuerzos internos por los cortes de cizalle en el muro están en un rango seguro por lo que no se evidencia un riesgo en la integridad estructural por un sobreesfuerzo, incluso bajo los efectos sísmicos.

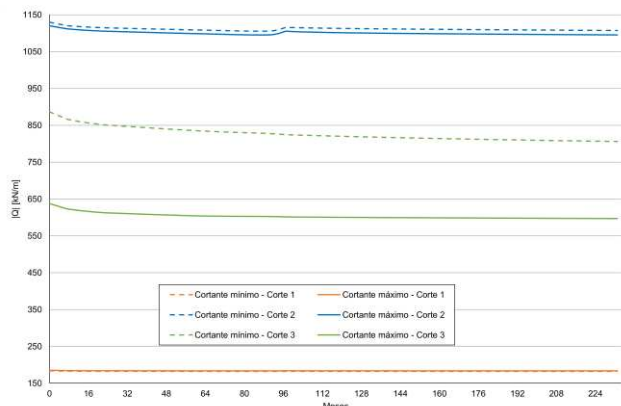


Figura 18. Magnitud del Corte de cizalle máximos y mínimos en el muro (PLAXIS 3D)

## 5 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos de los modelos de tres cortes en Plaxis, considerando caso estático y sísmico para cada uno, se extraen las siguientes conclusiones respecto a la incorporación de la consolidación en el análisis del muro anclado:

- Los resultados de la modelación numérica confirman que los efectos de la consolidación son suficientes para explicar la pérdida de carga medida en los anclajes del muro a lo largo del tiempo y la pérdida de carga abrupta registrada durante el sismo del 27 de febrero del 2010.
- A pesar de la pérdida de carga sufrida por los anclajes, los factores de seguridad se mantienen estables o aumentan dentro del periodo de análisis, lo que confirma que la consolidación ha contribuido a mejorar la resistencia y la capacidad de soporte del suelo.
- Como durante el sismo los anclajes perdieron carga, se podría pensar, en el caso de que los bulbos de anclaje estuvieran en un suelo estable, que el muro se deformó en dirección hacia el cerro. Sin embargo, los análisis demuestran que el muro se deformó con dirección hacia la autopista, según un desplazamiento global de la ladera.
- La tasa de deformación de la estructura ha disminuido en todos los cortes a lo largo del periodo de análisis, lo que demuestra una tendencia hacia su estabilización.
- Los esfuerzos internos máximos en el muro ocurrieron justo después de la construcción, en coincidencia con las cargas máximas en los anclajes.
- En general, se observa una disminución de los esfuerzos internos del muro en el tiempo, en la medida en que los anclajes han perdido carga. Esto permite concluir que la estabilidad estructural del muro es segura y que su condición de mayor sollicitación ocurrió en el momento de su construcción, de tal manera que con el paso del tiempo sus sollicitaciones han disminuido.
- A pesar de la pérdida de carga en los anclajes, los resultados del análisis sugieren que el muro podría no requerir de la instalación de refuerzos en el corto plazo. Se recomienda ampliar la investigación, mediante una investigación geotécnica complementaria que incluya la obtención de muestras y el análisis de la consolidación en laboratorio.

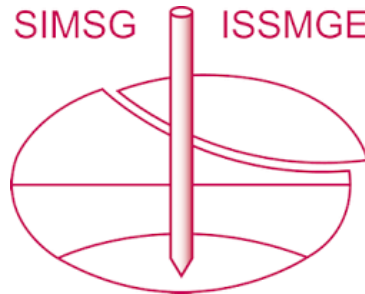
## 6 AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a Ruta de la Araucanía por facilitar los datos e información para la realización de este estudio.

## 7 REFERENCIAS

- Bentley. PLAXIS 3D: "Material models manual 3D". 2024.1.
- Bishop, A. W. (1955). The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Geotechnique*, 5(1), 7–17.
- De Jesus, E., "Consolidation of soft soils in the presence of band-shaped drains", Tesis Ph.D, Universidad de Sevilla, 2013.
- Fernandez, J. M., Ayarza, M., Diaz, S. "Ground anchor loads measured in a seismic event in south access Malleco Viaduct anchored wall", 16th World Conference on Earthquake, Santiago, Chile, 2017.
- Neher, H.P., Wehnert, M., Bonnier, P.G., "An evaluation of soft soil models based on trial embankments", *Computer methods and advances in geomechanics*, n°7, pp. 373-378, 2001.
- Oliva, A., "Instrumentación y control de taludes y laderas". Grupo ITEICO Euroamericano. Tijuana, México. 2015.
- Pilotes Terratest. "Obras Mixtas. Proyecto: Viaducto Malleco". Ficha técnica de Construcción: <https://www.terratest.cl/wp-content/uploads/2020/02/Pilotes-terratest-Viaducto-Malleco.pdf>
- Valiente, R., Sobrecases, S., Díaz, A. "Estabilidad de taludes: Conceptos básicos, parámetros de diseño y métodos de cálculo", *Civilizate*, n°7, pp. 50-54, 2015.
- Vermeer, P.A., Neher, H. P. "A soft soil model that accounts for creep", *Beyond 2000 in computational geotechnics*, vol. 1, pp. 281-296, 1999. doi: 10.1201/9781315138206.

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12<sup>th</sup> to November 16<sup>th</sup> 2024 in Chile.*