



Programa de Ingeniería Geotécnica

Informe: EIC-Lanamme-INF-0645-2022

Informe de verificación de deformaciones verticales en el muro de relleno reforzado tipo Keystone en el paso a desnivel Firestone



Preparado por:

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

San José, Costa Rica
Mayo, 2022





1. Informe EIC-Lanamme-INF-0645-2022		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Informe de visita de campo al Proyecto de Circunvalación Norte		4. Fecha del Informe 23/05/2022
5. Organización y dirección 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		
6. Notas complementarias Ninguna		
7. Resumen <i>Por solicitud de la Unidad de Auditoría Técnica y teniendo en consideración las observaciones realizadas en el informe EIC-Lanamme-0201-2022, el presente informe muestra un resumen de los resultados obtenidos en la evaluación de la verticalidad en el muro de suelo reforzado tipo Keystone en el paso a desnivel Firestone. Los resultados obtenidos demuestran desplomes hacia afuera del muro analizado, especialmente entre los estacionamientos 0+040 hasta 0+070 metros. Estos desplomes, aunque cumplen con las especificaciones de verticalidad solicitadas en la sección 255 del CR-2010, se considera conveniente solicitar al contratista informaciones adicionales relacionadas con el criterio técnico, las especificaciones y las recomendaciones técnicas del fabricante de los materiales utilizados en el muro, a fin de evaluar si el desplome vertical hacia afuera del relleno podría afectar las consideraciones o premisas utilizadas por el diseñador y que esto, eventualmente, pueda afectar el desempeño o comportamiento del muro una vez que entre en operación. Lo anterior debido al hecho de que se sabe que un desplome hacia adentro del relleno del muro reduce la presión de empuje del relleno; situación contraria a lo observado en sitio. Así pues, también se recomienda dar un seguimiento continuo de esta cara del muro a lo largo del tiempo, hasta que el muro alcance su equilibrio para verificar si el muro presenta un comportamiento y desempeño adecuado.</i>		
8. Palabras clave Muros de relleno reforzado, verticalidad, desplome, Keystone.	9. Nivel de seguridad: -	10. Núm. de páginas 9
11. Preparado por: <p style="text-align: center;">Ing. Gustavo A. Badilla Vargas, D.Sc. Ingeniero PIG</p> <hr/> <p style="text-align: center;">Fecha: 23 / 05 / 2022</p>		
12. Revisado y aprobado por: <p style="text-align: center;">Ing. Ana Lorena Monge Sandí, M.Sc Coordinadora del Programa de Ingeniería Geotécnica</p> <hr/> <p style="text-align: center;">Fecha: 24 / 05 / 2022</p>		



Contenido

I. Introducción	4
II. Uso de sistemas LIDAR estacionarios para el levantamiento de modelos tridimensionales de los muros de relleno reforzado	4
III. Hallazgos en la cara del muro de relleno reforzado en el paso a desnivel Firestone	6
IV. Algunos puntos destacados del manual de diseño Keystone.....	8
V. Comentarios finales.....	9
VI. Referencias	9



Informe de verificación de deformaciones verticales en el muro de relleno reforzado tipo Keystone en el paso a desnivel Firestone

I. Introducción

Por solicitud de la Unidad de Auditoría Técnica y teniendo en consideración una de las observaciones realizadas en el informe **EIC-Lanamme-0201-2022**, en la cual se indica que, en general, el muro muestra una buena condición en su construcción, sin embargo, existe una zona donde se aprecia una pequeña deformación que puede afectar su verticalidad. Sin embargo, debido a que en esta zona no es posible establecer en sitio si la deformación se debe a un efecto visual o si realmente existe falta de verticalidad, se consideró recomendable realizar una medición de verticalidad con un equipo LIDAR.

Así pues, el presente informe muestra un resumen de los resultados obtenidos en la evaluación de la verticalidad en los muros de relleno reforzado tipo Keystone en el paso a desnivel de la Firestone, de las mediciones realizadas con el equipo LIDAR el día 5 de abril del presente año.

A continuación, se presentan algunos comentarios relacionados con los resultados, análisis desarrollados y el cumplimiento de las tolerancias admisibles de deformaciones para este tipo de estructuras.

II. Uso de sistemas LIDAR estacionarios para el levantamiento de modelos tridimensionales de los muros de relleno reforzado

Según Ruiz *et al.* (2014), la palabra LIDAR proviene del acrónimo en inglés Laser Imaging Detection and Ranging, cuya traducción al español sería “detección de imágenes por láser y distancia”. El fundamento de la tecnología LIDAR está en medir distancias iluminando un objetivo con un rayo láser y posteriormente analizando la luz reflejada e información generada en ese objetivo. Cada dato o punto generado con LIDAR por sí solo no tiene mucha utilidad; sin embargo, al unir los millones de puntos generados a partir de un barrido con un escáner láser en un área específica, se pueden recrear superficies en tres dimensiones. Para ello, todos los pulsos de retorno del láser son registrados y almacenados en la memoria del escáner y se calcula la distancia entre el instrumento y el objeto donde se reflejó el rayo láser.

Usando principios de física y óptica, el escáner puede obtener la posición de cada punto a partir del haz refractado, la cual es almacenada como una coordenada x-y-z. Con esto es posible registrar reptación, cárcavas, grietas, vegetación, elementos de fachadas de edificios, carros, personas, etc., con un error máximo de ubicación de puntos de 3 mm, el cual puede reducirse a menos de 1 mm si se aplican procedimientos de topografía de precisión y rutinas que se encuentran incluidas el software de la unidad. Con el modelo tridimensional creado, es posible obtener distancias, alturas, pendientes y volúmenes con un alto grado de precisión. Con estos modelos se pueden crear superficies, figuras sólidas y modelos de elevación que pueden ser utilizados en programas de diseño asistido por ordenador (conocidos como CAD) o en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Específicamente, para el levantamiento realizado en el paso a desnivel Firestone con la colaboración de la Oficina de Geomática (OGEO) del LanammeUCR, fue utilizado un escáner LEICA modelo C10 de segunda generación (ver Figura 1). Este equipo tiene la capacidad de realizar un levantamiento de prácticamente cualquier ambiente, con un rango efectivo de operación de hasta 200 m. La portabilidad de este equipo y su alta velocidad en la toma de datos permite realizar fácilmente trabajos de levantamiento digital de diferentes obras de infraestructura como edificios, puentes, muros de retención,

etc. De esta forma, es posible contar un registro digital fidedigno de la condición particular del objeto levantado y determinar cambios estructurales, asentamientos diferenciales, deterioros y deformaciones.



Figura 1 Escáner LIDAR terrestre utilizado en el levantamiento de los muros de relleno reforzado del paso a desnivel Firestone

De esta manera, fue realizado el levantamiento de aproximadamente 140 metros de la cara del muro del lado derecho (sentido Alajuela – San José). Con base en la nube de puntos levantada con el escáner LIDAR se procedió a generar un Modelo de Elevación Digital (MED). Lo anterior permite recrear modelos tridimensionales que permiten analizar la forma y características de la superficie de la cara del muro para identificar y cuantificar posibles deformaciones que serían imposibles apreciarlas visualmente desde el terreno. La Figura 2 muestra el MED obtenido para el muro evaluado. Como puede observarse en el modelo se obtiene una buena representación de la cara del muro de relleno reforzado, donde se puede apreciar cada uno de los elementos que conforman la cara del muro.

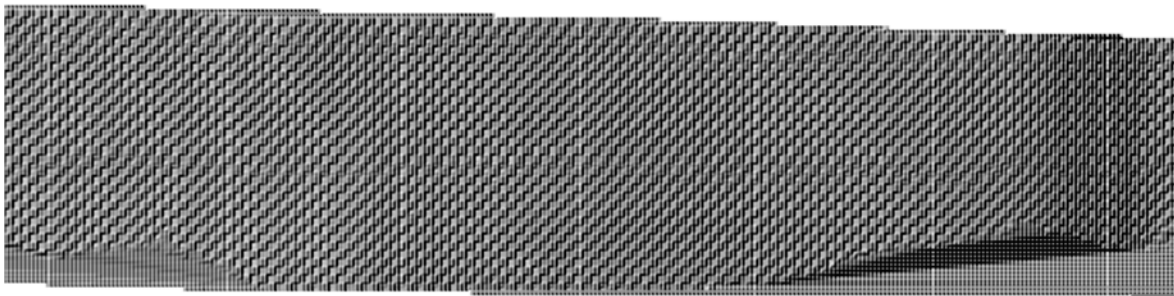


Figura 2 Modelo de elevación digital del muro de relleno reforzado evaluado en el paso a desnivel Firestone, lado derecho (sentido Alajuela – San José)

A partir de los modelos mostrados en la Figura 2, fue posible generar las curvas de nivel a intervalos cada 2 cm. Con estas curvas de nivel se definieron secciones transversales al eje longitudinal del muro separadas cada 5 m, con la finalidad de evaluar la verticalidad de la cara del muro de relleno reforzado. Para efectos de los resultados que se presentan a continuación, el estacionamiento 0+000 se definió en el túnel que pasa por debajo de la ruta nacional 1 y la dirección de crecimiento del estacionamiento en el sentido Alajuela – San José.



III. Hallazgos en la cara del muro de relleno reforzado en el paso a desnivel Firestone

Con base en el levantamiento realizado se obtuvieron los resultados de la verticalidad para estacionamientos separados cada 5 metros y que se muestran en las Figuras 3 y 4. En estas figuras, el eje vertical corresponde a la altura o elevación de la cara del muro (en metros) y en el eje horizontal el desplazamiento vertical de la cara del muro (en milímetros).

La sección 255 “Muros con suelo reforzado” del Manual de Carreteras, Caminos y Puentes de Costa Rica (CR-2010) establece que, para este tipo de muro, la tolerancia vertical (de la superficie a la base) no debe exceder la relación de 13 mm por cada 3 m de altura. De esta manera, en el eje horizontal, las líneas de división corresponden a la tolerancia que permite el CR-2010. En estas figuras, el lado izquierdo del gráfico representa el relleno del muro y las discontinuidades observadas representan las juntas de los bloques prefabricados de concreto. Como se puede observar en las figuras anteriores el muro presenta desplomes hacia afuera del muro, con valores que se encuentran dentro de la tolerancia establecida por el CR-2010, de una relación de 13 mm por cada 3 m de altura.

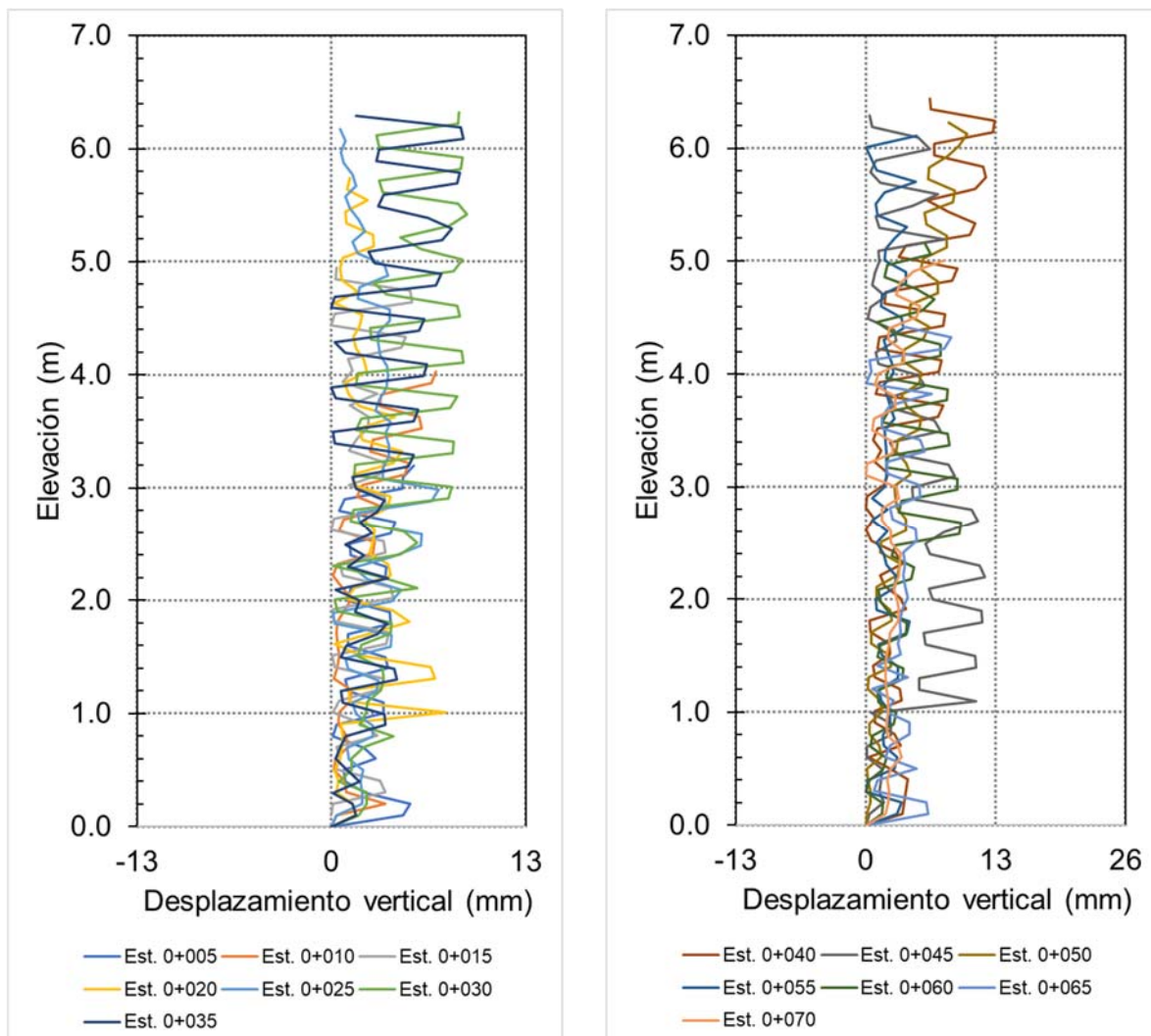


Figura 3 Resultados de verticalidad del muro de relleno reforzado para los estacionamientos entre 0+005 hasta 0+070, lado derecho (sentido Alajuela – San José)

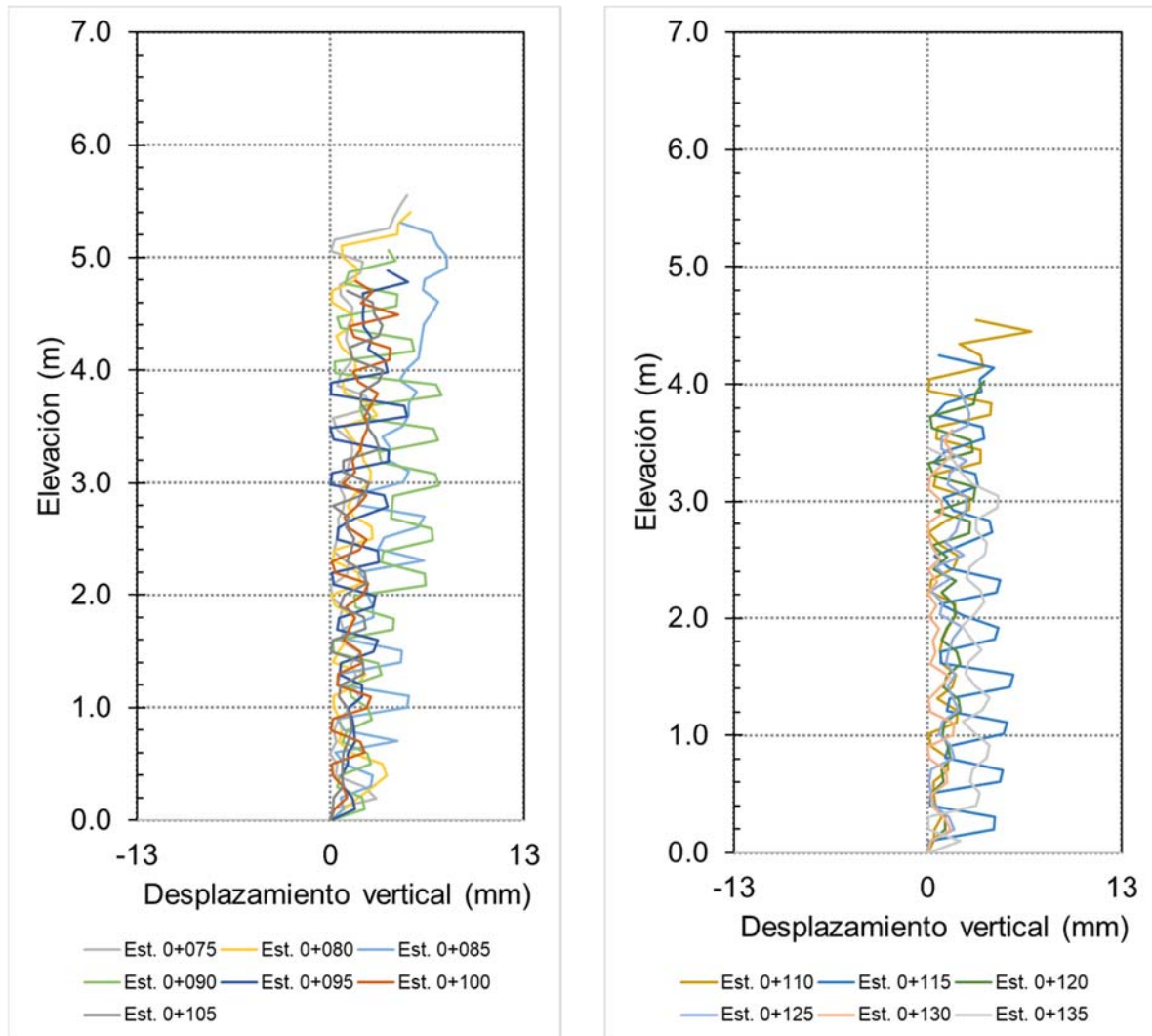


Figura 4 Resultados de verticalidad del muro de relleno reforzado para los estacionamientos entre 0+075 hasta 0+135, lado derecho (sentido Alajuela – San José)

Con la finalidad de cuantificar y evidenciar estos incumplimientos, la Tabla 1 muestra los valores de la diferencia de verticalidad observada por cada 3 m de altura. Los valores entre paréntesis, mostrados en la Tabla 1, corresponden a los desplomes hacia afuera del muro (signo negativo), donde se nota que ninguno de los valores excede la tolerancia permitida por el CR-2010. En lo que respecta a los valores de los desplomes hacia adentro el muro (signo positivo), tampoco fueron observados incumplimientos de las tolerancias establecidas en el CR-2010. Es importante mencionar también, que la especificación del CR-2010 no hace diferencia de comportamiento entre un desplome hacia afuera o hacia adentro del muro, donde esta última condición se considera más favorable debido al hecho de que el desplome hacia adentro del muro reduce la presión de empuje del relleno del muro.

Además, se puede decir que esta inclinación o pendiente hacia afuera es responsable de que sean observados en el sitio deformaciones en el muro. Lo cual fue más evidente entre los estacionamientos 0+040 hasta 0+070 metros. Debido a lo anterior se recomienda dar un seguimiento continuo de esta sección de la cara del muro a lo largo del tiempo hasta que el muro alcance su equilibrio durante su etapa de operación, para verificar si el muro presenta un comportamiento y desempeño adecuado.



Tabla 1 Valores obtenidos para la diferencia de verticalidad observada por cada 3 m de altura para la cara del muro de relleno reforzado en el paso a desnivel Firestone

Estación	Diferencia de elevación (m)				Total
	0-3	1-4	2-5	3-6	
Est. 0+005	(4.74)	-	-	-	2.11
Est. 0+010	(1.58)	(5.87)	-	-	(0.16)
Est. 0+015	0.42	0.04	(0.79)	-	(0.33)
Est. 0+020	(1.20)	(0.77)	1.42	-	(1.23)
Est. 0+025	(5.11)	(1.07)	0.59	6.22	(0.62)
Est. 0+030	(5.72)	(5.18)	(2.95)	(0.89)	(8.55)
Est. 0+035	(2.73)	(2.65)	(2.36)	(4.49)	(1.64)
Est. 0+040	1.44	(3.45)	(6.05)	(10.69)	(9.22)
Est. 0+045	(7.75)	5.79	5.14	3.16	(0.40)
Est. 0+050	(4.37)	(3.88)	(4.76)	(5.26)	(8.33)
Est. 0+055	0.85	(0.39)	0.77	(2.84)	(5.11)
Est. 0+060	(7.68)	(5.26)	(2.45)	-	(5.89)
Est. 0+065	1.02	(2.27)	-	-	(3.77)
Est. 0+070	(1.33)	0.50	(4.36)	-	(7.81)
Est. 0+075	3.74	0.60	(1.53)	-	(5.14)
Est. 0+080	2.23	0.61	0.14	-	(5.37)
Est. 0+085	(2.55)	(0.70)	(1.57)	-	(4.72)
Est. 0+090	(4.74)	(4.18)	2.11	-	(3.92)
Est. 0+095	(2.23)	(1.63)	(2.17)	-	(3.83)
Est. 0+100	(1.34)	(1.43)	(2.40)	-	(1.70)
Est. 0+105	(2.60)	(2.25)	(1.76)	-	(1.09)
Est. 0+110	(2.82)	(2.00)	(5.00)	-	(3.26)
Est. 0+115	0.66	2.01	-	-	(0.77)
Est. 0+120	(2.02)	(1.19)	-	-	(3.77)
Est. 0+125	(0.82)	(1.41)	-	-	(2.09)
Est. 0+130	0.66	0.09	-	-	(1.65)
Est. 0+135	0.67	-	-	-	(0.05)

Nota:

(Signo negativo) = Desplome hacia afuera del muro

Signo positivo = Desplome hacia adentro del muro

Condición desfavorable

Condición favorable

IV. Algunos puntos destacados del manual de diseño Keystone

Aunque los resultados obtenidos en el levantamiento realizado indican que no hay incumplimientos en las tolerancias establecidas en el CR-2010, es importante destacar que en el mismo CR-2010, se establece que los muros se deberán construir de acuerdo con los planos constructivos y las recomendaciones técnicas del fabricante previamente aprobadas por el Contratante. Cuando el Contratante lo disponga en el contrato, se requerirá la supervisión permanente de un profesional con una amplia experiencia en la construcción de muros de sistemas patentados.

Dicho esto, según se indica en el *Keystone® Design Manual & Keywall® Pro Operating Guide*, el desplome del muro es una elección del diseñador o del contratista. No obstante, es de gran importancia que el desplome considerado en el diseño del muro deba ser especificado y construido conforme a las indicaciones del diseñador, esto debido al hecho de que el desplome hacia adentro del muro reduce la presión de empuje del relleno del muro.



Así pues, este manual sugiere que con las unidades Keystone se pueden construir con taludes con 3 opciones de desplomes hacia el relleno del muro (también llamado retroceso):

- a) "casi verticales",
- b) con 13 mm de retroceso por hilada y,
- c) con de 25 mm de retroceso por hilada.

Siendo recomendable que se construyan los tramos del muro razonablemente rectos con un retroceso (o con un desplome hacia el relleno) de 25 mm y, en el caso de los muros con curvas cerradas y esquinas, se construyan muros con una alineación casi vertical para facilitar la construcción.

De esta manera, se observa que, de acuerdo con este manual, el desplome adecuado para este tipo de muros debe ser hacia el relleno del muro, ya que esto representa la condición más favorable, puesto que disminuye la presión de empuje del relleno. Dicho esto, se considera de vital importancia solicitar al contratista las aclaraciones sobre el cumplimiento de las tolerancias de verticalidad, teniendo en consideración el criterio técnico, las especificaciones y las recomendaciones técnicas del fabricante, a fin de evaluar si el desplome vertical hacia afuera del relleno podría afectar las consideraciones o premisas utilizadas por el diseñador y saber si esto, eventualmente, pueda afectar el desempeño o comportamiento del muro.

V. Comentarios finales

Después de realizar la gira al muro de relleno reforzado tipo Keystone en el paso a desnivel Firestone se puede decir que, en general, el muro muestra una buena condición en su construcción, sin embargo, existe una zona donde se aprecia una pequeña deformación, especialmente entre los estacionamientos 0+040 hasta 0+070 metros.

Después de realizar el levantamiento en campo y evaluar las tolerancias de los valores de verticalidad, se determinó que, en general, el muro presenta desplomes hacia afuera del muro, sin embargo, ninguno de esos valores excede la tolerancia permitida por el CR-2010. No obstante, es importante destacar que en el mismo CR-2010, se establece que los muros deberán construirse de acuerdo con los planos constructivos y las recomendaciones técnicas del fabricante previamente aprobadas por el Contratante.

Así pues, se considera conveniente solicitar al contratista informaciones adicionales relacionadas con el criterio técnico, las especificaciones y las recomendaciones técnicas del fabricante de los materiales utilizados en el muro, a fin de evaluar si el desplome vertical hacia afuera del relleno determinado en el levantamiento es aceptable o si podría afectar las consideraciones o premisas utilizadas por el diseñador y que esto, eventualmente, pueda afectar el desempeño o comportamiento del muro. Esto debido al hecho de que se sabe que, un desplome hacia adentro en este tipo de muros reduce la presión de empuje del relleno del muro; situación contraria a lo observado en sitio, donde se determinó la presencia de desplomes hacia afuera del relleno.

Debido a lo anterior se recomienda dar un seguimiento continuo de esta cara del muro a lo largo del tiempo, hasta que el muro alcance su equilibrio, para verificar si el muro presenta un comportamiento y desempeño adecuado.

VI. Referencias

1. Programa de Ingeniería Geotécnica (2022). **EIC-Lanamme-0201-2022 Informe de visita al proyecto OBIS lote 1 y revisión del oficio UAP-FSJSR-2022-02-180**. LanammeUCR. San José, Costa Rica.
2. Keystone Retaining Wall Systems LLC. (2020). **Keystone® Design Manual & Keywall®Pro Operating Guide**. Estados Unidos.