

Diseño, construcción y monitoreo de muro de gran altura en suelo estabilizado mecánicamente con geomallas de PVA

Design, construction and monitoring of a high mechanically stabilized earth wall with PVA geogrids

Paulo José Brugger

Ing. Civil, Brugger Engenharia Ltda, Brasil

Boris Schpun

Ing. Civil, Cepollina Engenheiros Consultores, Brasil

Lizeth Ardila* & Cristina Schmidt

Ing. Civil, Huesker Ltda, Brasil

**E-mail: lizeth.ardila@huesker.com.br*

RESUMEN: El artículo aborda el diseño, construcción y monitoreo de un muro de contención gran altura construido con suelo estabilizado mecánicamente utilizando geomallas de PVA y fachada con módulos de malla metálica. La ejecución del muro fue adoptada como solución para la ampliación de área en un centro logístico. Para crear el terraplén respetando las áreas de preservación permanente en los alrededores, fue necesario implementar un muro de contención con una cara casi vertical y con alturas que van de 6 a 34 metros. El trabajo presenta la concepción del proyecto, investigaciones geotécnicas, detalles del diseño, proceso de construcción y el monitoreo mediante mediciones de desplazamiento de la fachada. El trabajo evidencia la viabilidad y óptimo desempeño de este tipo de sistema de contención para obras de infraestructura civil.

PALABRAS CLAVE: Muro de Contención, Geomallas, PVA, Suelo Mecánicamente Estabilizado, Monitoreo.

ABSTRACT: The paper presents the design, construction and monitoring of a high-rise retaining wall built with mechanically stabilized earth (MSE) using PVA geogrids and a face with wire mesh modules. The execution of the wall was adopted as a solution for the expansion of an area in a logistics center. To create the embankment while respecting the adjacent permanent preservation areas, it was necessary to implement a retaining wall with an almost vertical face and heights ranging from 6 to 34 meters. In this way, the paper describes the conception of the project, the geotechnical investigations of the site, design details, construction process and monitoring through displacement measurements of the facade. The case study demonstrates the feasibility and optimum performance of this type of retaining system for civil infrastructure projects.

KEYWORDS: Retaining wall, Geogrids, PVA, MSE Wall, Monitoring.

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, la tecnología de suelos reforzados con geosintéticos se ha generalizado en proyectos de infraestructuras de ingeniería civil, como terraplenes, estructuras de contención, carreteras y estructuras ferroviarias, etc. Esta técnica ventajas económicas por su fácil ejecución, requiere menos tiempo de construcción y reduce el impacto medioambiental (Wu, 2019). Así, la técnica del suelo reforzado con geosintéticos se convierte a menudo en una alternativa conveniente para el desarrollo de infraestructuras civiles en comparación con otras técnicas tradicionales de contención.

En la literatura se han reportado diferentes experiencias con el uso de geosintéticos para la estabilización de taludes y contención de suelos, entre ellos Alexiew et al (2016) demostrando la eficiencia a largo plazo de este tipo de soluciones, Guler et al (2011), Poggi y Russo (2019) evidenciando el buen desempeño incluso durante esfuerzos sísmicos, Curiel & Forteza, (2007), evidenciando aplicaciones en infraestructura urbana, Silva (2006) describiendo el uso y aplicación para estribos de puentes, entre otros.

Los principales componentes de este tipo de estructuras son el suelo de relleno, el refuerzo, la Fachada y los sistemas de drenaje. El suelo de relleno proporciona resistencia y soporta las cargas de sollicitación de la estructura. Los elementos de refuerzo geosintéticos aumentan la resistencia del suelo de relleno y controlan la deformación en la estructura, estos refuerzos son constituidos por polímeros como el PET (poliester), el PVA (polivinil alcohol), la aramida, entre otros. La Fachada (o fachada) que puede ser constituida por bloques, paneles, mallas metálicas con agregado, gaviones, entre otros materiales que funcionan como elemento constructivo de protección y en algunos casos como elemento estructural. Por último, los elementos de drenaje que ayudan a controlar el agua detrás del muro, evitando la acumulación de presión hidrostática y posibles saturaciones del relleno reforzado, que pueden llevar la estructura al colapso (Ardila, 2023).

El objetivo de este estudio es presentar las características de diseño, construcción y monitoreo de un muro de suelo reforzado con geomallas de PVA y Fachada de malla metálica rellena con grava gruesa, siendo uno de los muros de suelo reforzado con geosintéticos para infraestructura civil más altos de Brasil.

2 ASPECTOS DE DISEÑO

La obra consistió en la ampliación de un gran centro logístico en la región metropolitana de São Paulo Brasil. Para ello, se requirieron importantes movimientos de tierra y la implantación de muro de suelo reforzado para contención con una longitud de 190 metros y una altura variable desde 6 metros hasta 34 metros. Totalizando 3450 m² de área de fachada. Fue necesaria la concepción de un muro prácticamente vertical a modo de preservar áreas de protección ambiental adyacentes. A continuación, son descritos los aspectos considerados en el diseño de esta obra.

2.1 Caracterización Geotécnica

Como parte de la investigación geotécnica fueron realizados sondeos SPT, pozos para extracción de muestras inalteradas de suelo y colecta de muestras alteradas de suelo. Los sondeos y pozos de colecta indicaron la presencia de suelos residuales maduros en la cimentación con un espesor de 1 a 3 metros, sobre suelos residuales jóvenes y roca alterada compatible. En la figura 1, se presentan los litotipos encontrados en el suelo de cimentación.

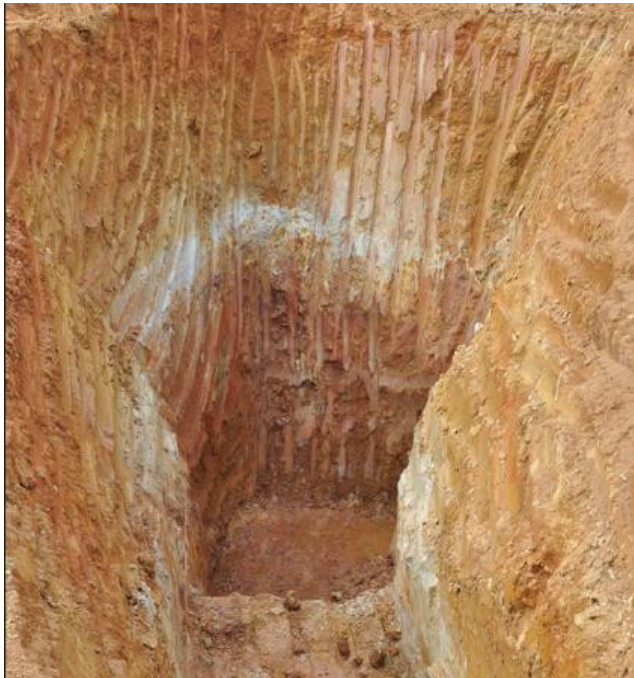


Figura 1. Litotipos *in situ*. Excavaciones en suelo de fundación.

A lo largo de un tramo de la cimentación, se evidenció un estrato de suelo arcilloso compuesto principalmente por caolinita con compactación media y poca permeabilidad. Debido a la gran responsabilidad que supone cimentar un muro de esta altura, se decidió excavar todo el estrato hasta la roca alterada existente, representando una excavación de 3 a 5 metros.

Posteriormente, ensayos de resistencia a corte directo y ensayos de compresión triaxial drenada realizados en las muestras inalteradas dieron como resultado parámetros de resistencia muy

variables, ya que el suelo residual está formado por vetas arenosas y arcillosas alternadas. Sin embargo, en general, el suelo de cimentación presenta en general una cohesión superior a 50 kPa y un ángulo de fricción superior a 32°.

Para el relleno compactado que compone el muro, se utilizaron suelos procedentes de excavaciones *in situ*, similares a los encontrados en el suelo de cimentación, los cuales fueron excavados y recompactados durante la construcción. Su caracterización es de suelos finos limosos y arcillosos poco plásticos, con porcentajes en peso que pasan el tamiz n° 200 que oscilan entre el 50% y el 80%, pero con un Índice de Plasticidad inferior al 10% en todos los ensayos. Cuando se compactan con una humedad óptima, presentan una resistencia y una rigidez elevadas, con una cohesión que oscila entre 30 y 50 kPa asociada a un ángulo de fricción que oscila entre 30° y 35°, respectivamente.

Basándose en los resultados de las investigaciones de campo y de laboratorio, se elaboró el modelo geotécnico con la estratigrafía de los tipos de suelo y se determinaron los parámetros de resistencia que se muestran en la tabla 1

Tabla 1. Parámetros Geotécnicos

Litotipo	Peso especif. (KN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ang. Fricción (°)
Muro y Taludes			
Relleno	18	20	30
Suelo Talud	17	10	28
Suelo Natural	17	15	28
Cimentación			
Suelo Residual	18	40	30
Roca Alterada	18	60	32
Grava Gruesa	18	0	42

2.2 Propiedades Geomalla

Para el refuerzo fueron empleadas geomallas uniaxiales tejidas de PVA de alta tenacidad, baja fluencia y de alta resistencia química, con revestimiento protector polimérico, como se ilustra en la figura 2.



Figura 2. Geomalla de PVA

Para el refuerzo fueron empleadas geomallas uniaxiales tejidas de PVA de alta tenacidad, baja fluencia y de alta resistencia química, con revestimiento protector polimérico, como se ilustra en la figura 2. Dichas geomallas fueron seleccionadas por su alta rigidez y bajos factores de reducción con relación a la resistencia de diseño.

Las geomallas de PVA con elongación máxima del 5% se utilizaron para limitar los desplazamientos horizontales de la estructura, debido a la altura del muro y las condiciones de servicio de las estructuras industriales apoyadas. Las geomallas fueron instaladas con una separación vertical de 60 cm y con longitudes de hasta 13m.

Las características técnicas de las geomallas usadas en el proyecto son presentadas en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades Geomallas

Característica	Valores
Abertura de malla (mm)	25 x 25
Resistencia química (120 años)	pH entre 2,0 y 12,5
Coefficiente de Interacción	0,9
Factor de Reducción total	1,4 a 1,7
Rigidez al 5% de deformación (kN/m)	700, 1100, 1600, 2200 3000, 4000, 6000, 8000

2.3 Propiedades de la Fachada

Con el objetivo de construir una fachada de rápida ejecución, fácil manipulación y alta resistencia, fueron empleadas módulos compuestos por mallas metálicas posteriormente rellenos de grava gruesa, sistema denominado Quadratum, como se ilustra en la figura 3.

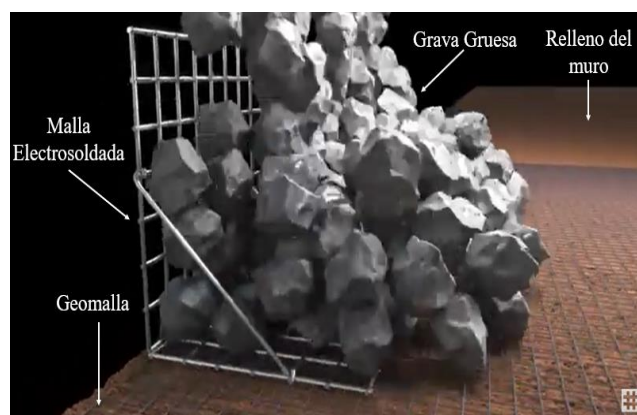


Figura 3. Módulos Sistema Quadratum

Los módulos metálicos son compuestos por mallas electrosoldadas y galvanizadas a 120 años, conformando paneles con barras de 6mm de diámetro para el panel horizontal (0,6mx2,5m) y barras 8mm de diámetro para el panel frontal

(0,6mx2,5m). Dichas barras se disponen con separación de 10cm en ambas direcciones. Para el material de relleno de los módulos metálicos fue empleada grava gruesa, con granulometría entre 15 y 25 cm.

2.4 Análisis de estabilidad Externa y Global

El diseño global se llevó a cabo mediante análisis de equilibrio límite para todas las secciones y rangos de altura, teniendo en cuenta las etapas de construcción y las cargas externas. El diseño para cada sección consiste en optimizar la resistencia y la longitud de las geomallas con el fin de obtener una distribución uniforme de la resistencia entre las diferentes secciones y longitudes compatibles con los rangos de altura.

Dado que la obra es de cota elevada, que el nivel del agua está aproximadamente al nivel de la base del muro o más bajo, y que se ha proyectado un robusto sistema de drenaje superficial e interno, los análisis se realizan sin presencia de presiones hidrostáticas, pero con valores de cohesión reducidos para tener en cuenta una posible pérdida de succión en caso de infiltración.

La figura 4 muestra el resultado de una sección transversal con una altura de 34 metros. Para estas comprobaciones, los análisis se realizaron con el método de Bishop simplificado y el método de Spencer. La pendiente de la cara del muro es de 1H:5V.

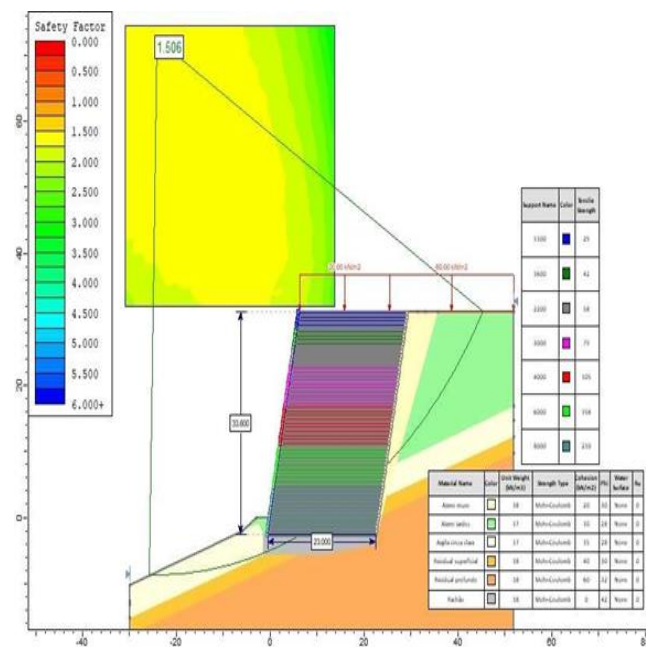


Figura 4. Análisis de estabilidad Sección 34m de altura

Se realizaron simulaciones con bermas intermedias en el muro, sin embargo, el beneficio en términos de estabilidad es pequeña y podrían presentarse complicaciones con el drenaje en las terrazas, por lo que se optó por una pendiente ligeramente más suave de lo habitual y sin terrazo intermedios.

En definitiva, todas las secciones cumplieron satisfactoriamente el factor de seguridad considerado por norma.

2.5 Análisis de estabilidad Interna

Una vez finalizado el diseño externo y mixto por equilibrio límite, se realizaron comprobaciones interna para todas las capas de geomalla utilizando el método de Ehrlich (1994), también presentado en Vertematti (2004), el cual tiene en cuenta los efectos de la compactación y la rigidez relativa suelo-refuerzo.

En esta situación, ninguna geomalla debería tener un factor de seguridad inferior a 1,2. Además, el factor de seguridad interno medio de todas las geomallas debe ser superior a 1,5 según el método de Ehrlich (1994), y todas las secciones deben tener un factor de seguridad mínimo de 1,50 en los análisis generales de equilibrio límite.

Dicho factor de seguridad FS es calculado mediante la ecuación 1 descrita a continuación:

$$FS = T_{dis} / T_{m\acute{a}x} \quad (1)$$

donde T_{dis} es la resistencia a tracción disponible de la geomalla, que se obtiene a partir de la resistencia nominal, es decir la resistencia de fábrica de la geomalla, dividida por el factor de reducción total (ver tabla 2), resultante de los factores de reducción por daños mecánicos, resistencia química, fluencia e interpolación.

Por otro lado $T_{m\acute{a}x}$ es la máxima tensión de tracción que experimenta el refuerzo al final de la construcción, dicha tracción se calcula para cada capa de refuerzo, en cada sección específica de análisis, de acuerdo con la metodología de cálculo descrita por Erlich & Becker (2009) y resumida en la ecuación 2.

$$T_{m\acute{a}x} = S_v \cdot K_r \cdot \sigma'_z \quad (2)$$

donde K_r es el coeficiente de empuje residual al final de la construcción; y σ'_z es la tensión vertical en el punto de interés al final de la construcción.

Al final del análisis todas las geomallas cumplieron satisfactoriamente los factores de seguridad requeridos para el proyecto

2.6 Proyecto geométrico

Una vez finalizados los análisis de diseño, fue propuesto muro con las características descritas en la tabla 3 y representado en la geometría presentada en la figura 5.

Tabla 3. Características geométricas del muro

Característica	Valores
Extensión (m)	190
Área de fachada (m ²)	3450
Desnivel total (m)	40
Altura máxima	34,2
Inclinación de la fachada	5V:1H
Separación vertical geomallas (cm)	60

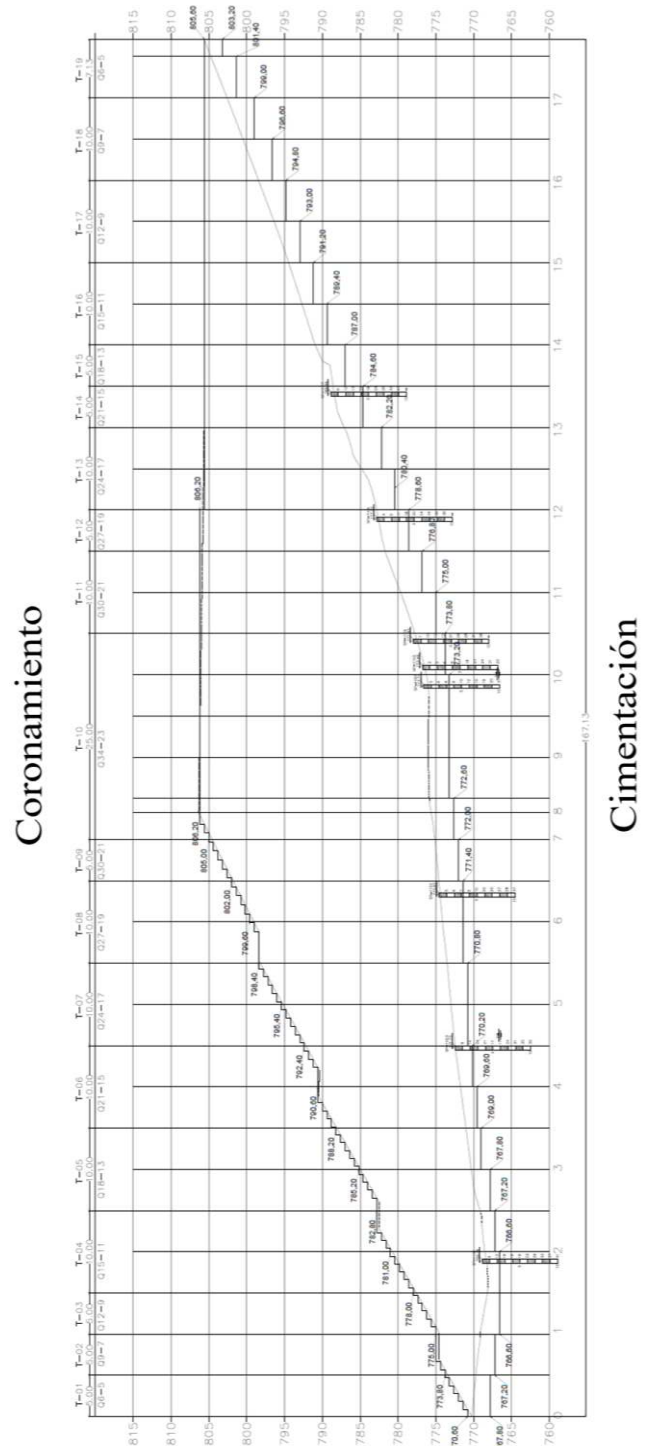


Figura 5. Proyecto geométrico muro

3 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

El terraplén y el muro se construyeron entre agosto de 2021 y mayo de 2022, incluyendo periodos de fuertes lluvias durante el verano. El mayor reto fue la organización del trabajo en la fase inicial, en la que las excavaciones eran bastante profundas y se encontraban en un espacio restringido de difícil acceso. El montaje del muro propiamente dicho, que incluye el montaje del paramento con el relleno de grava y la instalación de las geomallas, se realizó siempre con rapidez, permitiendo la ejecución de tres capas de relleno de 20 cm por día de trabajo, en dos o tres plataformas de trabajo alternadas. Las figuras 6 a 12 muestran detalles de los trabajos en diferentes etapas.



Figura 6. a) Estado inicial b) Preparación del terreno y c) compactación



Figura 7. Construcción primeras capas del muro



Figura 8. Posicionamiento de geomallas a) vista lateral b) vista superior



Figura 9. Compactación del relleno



Figura 10. Construcción de fachada con módulos metálicos



Figura 11. Sección 29 m de altura



Figura 12. Vista dron – Construcción finalizada

4 MONITOREO GEOTECNICO

El proyecto planteaba un reto importante debido a su tamaño y a la presencia de una gran estructura en la parte superior del terraplén, cuyos pilares se apoyaban en pilotes excavados con una barrena mecánica y el suelo estructural con una carga de 60 kN/m² apoyado directamente en el terraplén.

El proyecto se centró en gran medida en los análisis de los estados límite de servicio. Para restringir los asentamientos y los desplazamientos horizontales en la estructura, se realizó un riguroso control de la compactación, además se usaron geomallas más rígidas y menos susceptibles a los fenómenos de fluencia que las geomallas convencionales, así como un robusto sistema de drenaje interno y superficial.

Los desplazamientos de la fachada se controlaron durante y después de la construcción del muro mediante la instalación de puntos de medición topográfica. Estos puntos se instalaron en tres verticales a distancias de 5 metros en vertical. Los puntos se instalaron a medida que se construía el muro, lo que implica tiempos de inicio de medición diferentes para cada punto, dificultando la interpretación de los resultados.

La figura 13 muestra la evolución de las capas del muro a lo largo del tiempo. Hubo un total de 66 capas de 0,60 cm entre la cota más baja +766,00 y la más alta +805,60, representando un desnivel total de 39,6 metros. Como los puntos más bajo y alto no coinciden en la misma vertical, la altura máxima del muro en una vertical es de 34 metros. La figura 13 muestra que los trabajos se realizaron durante 8 meses, con una media de 8,5 capas de terraplén (de 5 metros de altura) al mes. También puede observarse que en los meses lluviosos (conforme hidrología en Brasil) de enero y febrero de 2022 el avance de las obras se ralentizó un poco, recuperándose a finales de febrero.

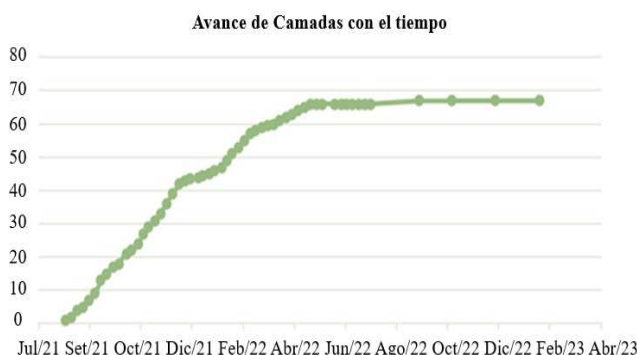


Figura 13. Avance de camadas con el tiempo

Las figuras 14 y 15 muestran, a modo de ejemplo, los desplazamientos medidos en dos puntos. El punto 6A está en la vertical 6 en la cota más baja (+775) y el punto 6C está a +788, con una diferencia de 13 metros entre ellos.

Los gráficos muestran los desplazamientos en las direcciones horizontales norte y este y el asentamiento en la dirección vertical. A grandes rasgos, puede deducirse que el punto 6A mide el asentamiento de la parte inferior y la cimentación del muro, mientras que el punto 6C mide el asentamiento de la cimentación más el asentamiento del propio muro de c

ontención a medida que se construye.

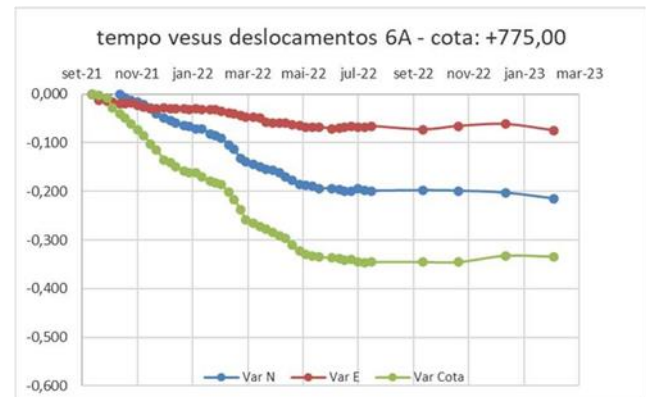


Figura 14. Evolución de desplazamientos horizontales (norte y este) y asentamientos en la línea de control S6 puntos 6A

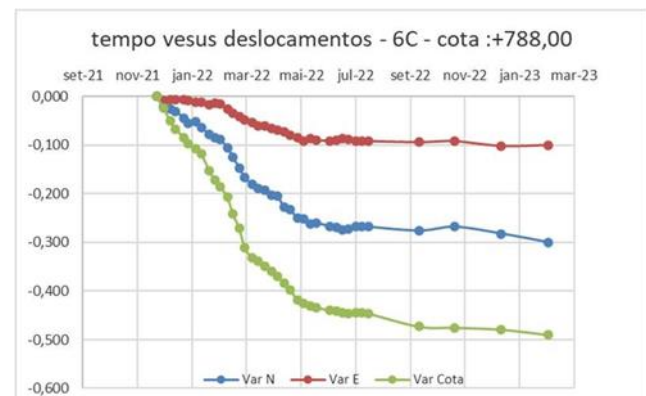


Figura 15. Evolución de desplazamientos horizontales (norte y este) y asentamientos en la línea de control S6 puntos 6C

En términos simplificados, puede verse que:

1. Los desplazamientos horizontales del orden de 30 cm y asentamientos de hasta 50 cm en el punto 6C, teniendo en cuenta la altura del muro, están dentro del rango habitual de valores para desplazamientos horizontales del 1% de la altura y asentamientos del 2% de la altura. Hay que tener en cuenta que estos desplazamientos se producen durante la construcción y, como la fachada del muro se localiza por topografía en todas las capas, la posición y la elevación se corrigen a medida que se construye el muro, de modo que, al final, la posición de la cresta del muro es exactamente la posición de diseño, quedando sólo los desplazamientos posteriores a la construcción por controlar fuera del trazado de diseño.
2. Las obras finalizaron a mediados de mayo de 2022 y los desplazamientos se estabilizaron poco después, siendo los desplazamientos y asentamientos residuales a partir de junio de 2022 muy pequeños, incluso durante la época de lluvias de enero y febrero de 2023.
3. La finalización de la estructura industrial y su puesta en funcionamiento en octubre de 2022 no provocó nuevos desplazamientos y no aparecieron anomalías en la estructura, en el

suelo interior ni en el suelo exterior, lo que demuestra el buen comportamiento de la estructura. Está previsto que las mediciones continúen durante varios años más para permitir una evaluación a largo plazo.

5 CONCLUSIONES

El estudio de caso ilustró la obra de un muro de contención de gran altura en suelo reforzado con geomallas de PVA y fachada con módulos malla metálica electrosoldada. Fueron los resultados de las investigaciones geotécnicas, el diseño, los detalles constructivos y los resultados de las mediciones de desplazamiento. El uso de suelos finos poco plásticos con una compactación muy bien controlada y el uso de geomallas de alta rigidez presenta como resultado una estructura con bajas deformaciones durante el periodo de construcción y con deformaciones post-constructivas prácticamente nulas. Se concluye que la técnica es adecuada y que los resultados en términos de estabilidad y desplazamientos están dentro de las predicciones y los límites de seguridad y servicio requeridos.

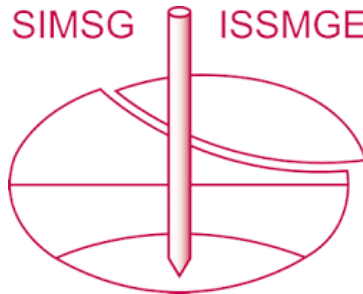
6 AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los equipos de trabajo de las empresas Grupo Monto, Brugger Engenharia, Cepollina Engenharia Consultores y Huesker Ltda, las cuales estuvieron involucradas en el desarrollo intelectual del proyecto y realizaron innumerables contribuciones técnicas.

7 REFERENCIAS

- Alexiew, D., Assinder, P., & Plankel, A. (2016, March). Long-term experience with a geogrid-reinforced landslide stabilization. In *Proceedings of the First Southern African Geotechnical Conference* (p. 387). CRC Press
- Ardila 2023 - Muros de Suelo Mecánicamente Estabilizado con Geosintéticos: Modelado Numérico y Casos de Obra en Argentina
- Curiel, A., & Forteza, A. (2007). Muro de contención en suelo reforzado. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, (5), 97-111.
- Ehrlich, M. and Mitchel, J. K. (1994) Working Stress Design Method For Reinforced Soil Walls. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE, Vol 120, No. 4, pp. 625-647.
- Ehrlich, M., & Becker, L. (2009). Muros e taludes de solo reforçado: projeto e execução. *Oficina de Textos*.
- Guler, E., Hamderi, M., & Demirkan, M. M. (2007). Numerical analysis of reinforced soil-retaining wall structures with cohesive and granular backfills. *Geosynthetics International*, 14(6), 330-345.
- Guler, E., Alexiew, D., & Basbug, E. (2011). Dynamic behavior of geogrid reinforced segmental block walls under earthquake loads. *Santiago*, 10, 13.
- Poggi, F., & Russo, L. E. (2019). Huge reinforced slope subjected to a strong earthquake during construction phase. In *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions* (pp. 4523-4531). CRC Press.
- Vertematti, J.C. 2004 *Manual Brasileiro de Geossintéticos*, Editora Edgar Blücher, São Paulo
- Wu, J. T. H. (2019). Characteristics of Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) Walls: an Overview of Field-Scale Experiments and Analytical Studies. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 6(2), 138-163

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 12th to November 16th 2024 in Chile.