



CASO DE OBRA: MUROS DE SUELOS FINOS REFORZADOS CON GEOMALLAS POLIMÉRICAS COMBINADOS CON TALUDES ANCLADOS

Autor¹: Marcus Vinicius Weber de Campos

Ingeniero de Proyectos de TDM Brasil

mcampos@tdmbrasil.com.br

Autor²: Fernando Akira Kuwabara

Ingeniero Geotécnico THEMAG - Brasil

fernando.akira@themag.com.br

Autor³: Carlos Antonio Centurión

Gerente Técnico de TDM Brasil

ccenturion@tdmbrasil.com.br

RESUMEN

São Paulo es la 7ª ciudad con más población del planeta, con 20 millones de habitantes y una amplia producción de basura que es descartada en un área de más de 1,170,000m². Ecurbis Ambiental es la concesionaria responsable por la recolección, transporte y disposición adecuada de residuos domiciliarios, del área de salud y de materiales reciclables en la parte sudeste de la ciudad de São Paulo, atendiendo a 19 de las 32 sub-prefecturas existentes en la capital y a más del 50% de la población de São Paulo. Las ampliaciones de su relleno sanitario localizado en Mauá generaron la reubicación de una importante avenida que conecta el relleno sanitario con la ciudad de São Paulo, lo que generó la necesidad de muros de suelo reforzado, taludes anclados y viaductos. La escasez de materiales granulares en el área de la obra obligó a la utilización de suelos finos para construcción de estructuras de contención y en este caso se destacan dos muros con 1.400,00m² de fachada y alturas de hasta 12m reforzados con geomallas. Situados abajo de la carretera de 9,00m de ancho y apoyados sobre un talud con más de 30m de altura, para garantizar la estabilidad global del sistema, se generó la necesidad de incorporar anclajes de 12m de longitud. El presente trabajo muestra básicamente el proceso constructivo de los muros usando suelos tropicales finos, la cual fue realizada de forma rápida y eficiente, permitiendo el pase de vehículos de forma estable y la ampliación vertical del relleno sanitario.

1. INTRODUCCIÓN

Con el aumento de la preocupación en relación a cuestiones ambientales a nivel mundial, el descarte de residuos sólidos urbanos es un serio problema a ser tratado y resuelto en todo lugar, especialmente en grandes centros urbanos, como es el caso de São Paulo (Brasil) que presenta una de las mayores poblaciones del planeta con cerca de 20 millones de habitantes en su región metropolitana. Una región con esa magnitud genera cantidades de residuos en la misma magnitud, que deben ser recolectados, transportados y almacenados de manera eficiente y controlada para no generar otros problemas ambientales, como contaminación, debido a fallas en la disposición final de este residuo.

Parte de este residuo sólido es recolectado por la empresa Ecurbis, que atiende cerca de 6 millones de habitantes, y descarta los residuos en un área de 1,170,000m² situada en un municipio vecino de Mauá. La conexión de este relleno sanitario al centro de la ciudad de São Paulo ocurre por medio de una importante avenida, la Av. Sapopemba, que es la más grande avenida de Brasil y la tercera más grande del mundo, con

cerca de 45 kilómetros de extensión ella cruza el relleno sanitario dividiéndolo en dos. En esta región el espacio se tornó muy disputado y debe ser aprovechado al máximo, y con este pensamiento el relleno sanitario está siendo ampliado verticalmente y lateralmente, creando la necesidad de recolocar la avenida en la parte lateral del relleno sanitario, liberando así, espacio para el encuentro de sus dos grandes pilas de desechos sólidos y aumentando la capacidad de almacenamiento en cerca de 10 años.



Figura 1 – Trayecto antiguo de la avenida en amarillo (línea inferior) y trayecto nuevo de la avenida en rojo (línea superior).

La superficie natural del terreno que contorna el relleno sanitario es altamente irregular, y la recolocación de esta avenida generó la necesidad de muros de suelo reforzado para poder mantener las cotas de la nueva vía, venciendo desniveles y dejando la vía con una pendiente longitudinal de acuerdo con las normas vigentes.

2. TIPO DE SUELO USADO EN LOS CÁLCULOS

En los Estados Unidos y en algunos países de Europa no es común el uso de suelos con contenido de finos sobre 5%, debido a la falta de calidad de los suelos “finos” en estos lugares, que debido al clima temperado presentan un comportamiento maléfico para las estructuras de suelo reforzado. En Estados Unidos, por ejemplo, los órganos de departamentos de transporte y carreteras (FHWA y AASHTO) recomiendan el uso de suelos con contenidos de finos inferiores a 5% además de limitar su límite de plasticidad a 4 como máximo.

En el Brasil se pueden encontrar diversos tipos de suelos arcillosos o limosos, y apenas algunos tipos de suelos no son adecuados para construcción de estructuras, pues ellos no pueden contener principalmente arcillas que presenten comportamientos extremos de alto índice de expansión o de retracción, modificación de parámetros como cohesión y ángulo de fricción debido a la reacción con agua o hasta elevados índices de fluencia y/o plastificación exagerada. Conocidas también las ventajas que pueden ofrecer los suelos arcillosos o limosos en la construcción de estructuras de ingeniería, como son su elevada cohesión y alta resistencia a compresión, y debido a la abundancia de este tipo de suelos en Brasil, es común su utilización en la construcción de muros de suelos reforzados, sin embargo, es importante aclarar que existen limitantes para su utilización como por ejemplo: índice de plasticidad menor a 20%, índice de soporte (CBR) superior a 15% y la expansión por saturación en la humedad óptima inferior a 2% (Ehrlich; Azambuja, 2003). A continuación, se presenta una de las diferentes referencias bibliográficas disponibles para seleccionar suelos con gran contenido de finos y comportamiento arcilloso (Christopher et al,1990) y usarlos en la construcción de obras de contención, la cual fue utilizada en este proyecto específico:

Tabla 1 – Recomendación de granulometría para suelos usados en construcción de estructuras de suelo reforzado (Christopher et al. 1990)

Abertura del tamiz	Porcentaje que Pasa
100 mm	100 – 75
4,75 mm	100 – 20
0,425 mm	0 – 60
0,075 mm	0 – 50

Resistencia à desintegración: perdida de resistencia cuando sumergido en sulfato de magnesio < 30% después de 4 ciclos. TxDOT-TEX 411 A,2004

Para la obra estudiada no fue diferente, para la construcción de muros de suelo reforzado se contaba únicamente con el material obtenido de las excavaciones para generar el trazo de la carretera, materiales que estaban constituidos básicamente por de arena, limos y arcillas, siendo el contenido de arcilla próximo de 10% y de limo superior a 30%. En la Figura 2 se puede apreciar el material de relleno utilizado para la construcción de los muros de suelos reforzado:



Figura 2 – Apariencia del material utilizado para la construcción de muros

El suelo utilizado en la obra presentaba las siguientes características promedio, evaluadas en tres diferentes puntos de análisis:

Tabla 2 – Características del suelo limo-arenoso usado como relleno estructural em muros

PARÁMETRO	UNIDAD	VALORES PROMEDIO
Ángulo de fricción	°	23,3
Cohesión	kN/M ³	15,3
Peso específico seco	g/cm ³	1,58
W ótima	%	19,1

Arcilla	%	9
Limo	%	32
Arena	%	59

3. CÁLCULO DE LOS MUROS

Los muros de suelo reforzado proyectados fueron reforzados con geomallas de poliéster (PET) del tipo unidireccional con resistencias que variaban entre 60 kN/m y 200 kN/m, siendo las más resistentes colocadas en la parte inferior del muro y las de menor resistencia en la parte superior, con espaciamientos de 0,5 a 1,0 metros entre las capas de refuerzos principales. Para evitar deformación en la fachada del muro, fueron colocados refuerzos secundarios de 60 kN/m a cada 0,50m entre los refuerzos principales, conforme se presenta en la Figura 3. La fachada del muro fue compuesta por estructuras metálicas con forma de "L" y fabricadas usando una malla de acero de 10 x 10 cm de abertura y barras de 6,3mm de espesor, que servía como un encofrado perdido para ayudar a contener la fachada durante el proceso de construcción

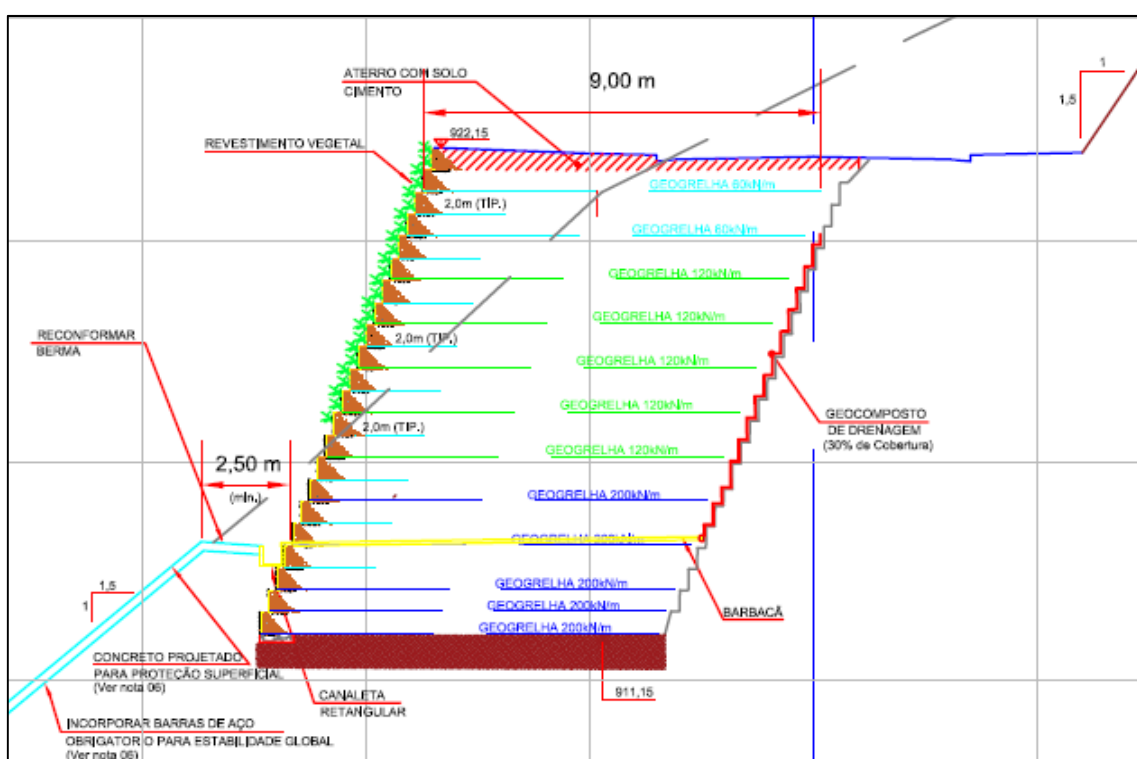


Figura 3 – Sección típica de los muros de suelo reforzado

Este sistema de fachada presenta protección contra corrosión y es fabricado para durar 50 años expuesto al medio ambiente, a pesar de eso, existía la demanda por parte del cliente final de un sistema de fachada que permitiese la integración de los muros al medio ambiente, por tal motivo, las estructuras metálicas fueron rellenas con el mismo material de relleno y semillas contenidos por una biomanta de fibras de coco, con la finalidad de generar el establecimiento de la vegetación por entre las aberturas de los encofrados metálicos y sobre cada hilada de muro construida, que era espaciada en cerca de 10cm para generar una inclinación en la fachada.

Fueron considerados en proyecto algunos sistemas de seguridad, como geocompuestos de drenaje entre el talud natural cortado y el muro, en aproximadamente el 55% del área de contacto. Estos geocompuestos eran instalados hasta una altura máxima de 1,5 metros por debajo de la altura máxima del muro, buscando no captar aguas superficiales y si las aguas provenientes de posibles infiltraciones del macizo.

Los geocompuestos desaguaban en un sistema de captación en su base compuesto por geotubos de HDPE y

grava envueltos en un geotextil no tejido. Este sistema de drenaje era conectado a tubos perpendiculares no perforados para su eliminación fuera de la estructura de muros cada 20m.

Los parámetros de suelo local con su respectiva estratigrafía y los parámetros topográficos de relieve, considerando el muro, las sobrecargas y los refuerzos fueron ingresados en el software MSEW 3.0® para realizar los análisis de estabilidad interna, como análisis de la resistencia de la geomalla, arrancamiento y deslizamiento entre capas de geomallas, así como los análisis de estabilidad externa como deslizamiento, vuelco, capacidad de soporte de la fundación. En la tabla 3 se presenta un resumen de los factores de seguridad obtenidos para las diferentes alturas que conformaban los muros:

Tabla 3 – Factores de seguridad externos obtenidos en cada sección de muro

Altura do muro projetado	FS deslizamento	FS tombamento	FS Suporte da fundação	Tensão transmitida à fundação (Meyerhof stress)
H=3,50m	3,038	12,48	13,56	76,71kPa
H=6,50m	2,468	8,02	10,64	116,80kPa
H=8,50m	2,683	9,06	9,95	150,11kPa
H=10,00m	2,615	8,59	9,48	171,38kPa
H=11,00m	2,354	7,17	9,15	179,38kPa

Tabla 4 – Factores de seguridad internos y externos obtenidos en cada sección del muro con el software 3.0 MSEW®

ANALYSIS: CALCULATED FACTORS (Static conditions)											
Foundation Interface: Direct sliding, Fs = 2.354, Eccentricity, e/L = -0.0168, Fs-overturning = 7.17											
Bearing capacity, Fs = 9.15, Meyerhof stress = 179.38 kPa.											
GEOGRID				CONNECTION			Geogrid strength Fs	Pullout resistance Fs	Direct sliding Fs	Eccentricity e/L	Product name
#	Elevation [m]	Length [m]	Type #	Fs-overall [pullout resistance]	Fs-overall [connection break]	Fs-overall [geogrid strength]					
1	0.00	9.00	4	N/A	N/A	N/A	3.598	24.761	1.613	-0.0168	TDM 200x30
2	1.00	9.00	4	N/A	N/A	N/A	1.921	12.251	1.792	-0.0236	TDM 200x30
3	2.00	9.00	4	N/A	N/A	N/A	2.111	12.170	2.003	-0.0283	TDM 200x30
4	3.00	9.00	4	N/A	N/A	N/A	2.344	11.808	2.255	-0.0311	TDM 200x30
5	4.00	9.00	3	N/A	N/A	N/A	1.580	11.072	2.563	-0.0322	TDM 120x30
6	5.00	9.00	3	N/A	N/A	N/A	1.803	9.940	2.947	-0.0317	TDM 120x30
7	6.00	9.00	3	N/A	N/A	N/A	2.099	8.757	3.439	-0.0297	TDM 120x30
8	7.00	9.00	3	N/A	N/A	N/A	2.512	7.539	4.093	-0.0262	TDM 120x30
9	8.00	9.00	1	N/A	N/A	N/A	1.563	6.245	5.002	-0.0215	TDM 60x30
10	9.00	9.00	1	N/A	N/A	N/A	2.070	4.812	6.355	-0.0154	TDM 60x30
11	10.00	9.00	1	N/A	N/A	N/A	2.319	2.304	8.578	-0.0083	TDM 60x30

Los análisis de estabilidad global del conjunto fueron realizados con la ayuda del software SLIDE 6.0®, donde fueron ingresados los parámetros de suelo, estratigrafía, geometría del muro y de cada sección representativa además de factores como sobrecargas. Los resultados mostraron que los muros eran inestables globalmente, con factores menores a 1,3. Por tanto se tenían dos caminos, o empotrar más la estructura de suelo reforzado, aumentando el corte y eliminación de material excedente y al mismo tiempo aumentar la longitud de los refuerzos o incluir anclajes en la parte inferior. Debido a la presencia de un tubo de concreto para drenaje en la parte posterior de la estructura, el espacio para la colocación de los refuerzos era limitada, por lo que la opción 2 fue la seleccionada. Fueron incluidas entre 7 a 8 líneas de anclajes 20mm de diámetro y 12m de longitud, instalados con 15 grados de inclinación con la horizontal en una malla de 1,5m x 1,5m. Para el cálculo de tales anclajes fue usado un valor de adhesión de acuerdo con Terzaghi & Peck (1948 – 1967) de 5 toneladas por m2. Con la inclusión de los anclajes el factor de seguridad obtenido subió para 1,553 como es presentado en la Figura 4 a continuación:

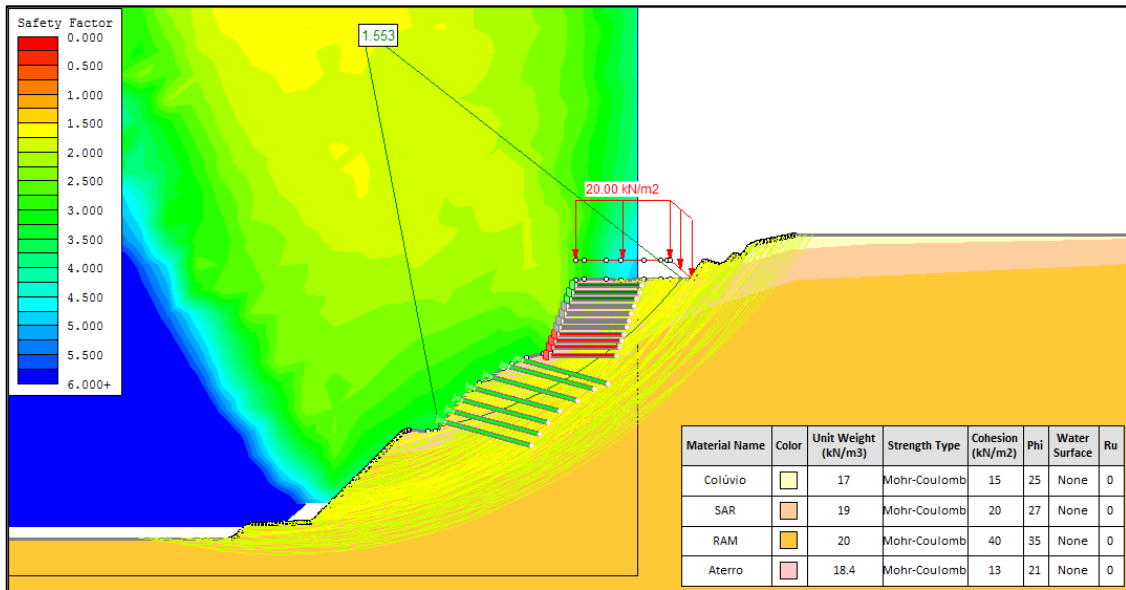


Figura 4 – Resultado de los análisis de estabilidad global usando el software SLIDE 6.0®

Los materiales de refuerzo seleccionados para reforzar los muros fueron geomallas de poliéster (PET) con resistencia que variaba de 60kN/m hasta 200 kN/m en la dirección longitudinal y 30 kN/m en la transversal. Este material de refuerzo presenta una deformación del orden de 11% para alcanzar su resistencia a la ruptura, con maleabilidad, acabado de protección superficial y dimensiones de aberturas suficientes para trabajar con una amplia faja de granulometrías o suelos diferentes.

Otro factor que debe ser tomado en consideración para uso de las geomallas PET son algunos factores intrínsecos al polímero usado, como el peso molecular (MW) y el número de terminaciones en grupos carboxilo (CEG), que son factores directamente relacionados con la capacidad de degradación de las geomallas a lo largo del tiempo, de acuerdo con Campos e Neto (2016). El primer factor (MW) representa la calidad de las moléculas presentes en un determinado volumen (densidad) y cuando ese número es alto (> 25.000 g/mol) significa que existe una gran cantidad de moléculas suficientes para mantener la estabilidad del polímero a lo largo del tiempo. El segundo factor (CEG) representa el tamaño y la cantidad de ramificaciones de terminaciones en grupo carboxilo de la molécula de PET, que representa la reactividad de los compuestos de la molécula con otros compuestos como agua y, cuando el valor es bajo (< 30 mmol/kg) significa que hay una cantidad aceptable de ramificaciones potencialmente reactivas y que la integridad de la molécula irá a durar el tiempo de degradación esperado.

4. PROCESO CONSTRUCTIVO

La construcción del muro se inicia con la regularización y compactación de la fundación a lo largo de toda el área de implantación de la estructura. Para la implantación de la fachada es construida una superficie de nivelación con grava graduada simple para en la secuencia instalar los módulos fabricados con las telas metálicas a ser usados como encofrado perdido recubiertos en su parte vertical con la biomanta de fibras de coco.

Con la fachada montada se inicia la instalación de los refuerzos geosintéticos, que deben ser tensionados luego de ser colocados en su posición final, con la finalidad de eliminar cualquier arruga que pueda quedar cubierta al momento de lanzar el relleno y pueda ocasionar problemas con el desempeño de los refuerzos. Luego de tensionar la geomalla fue colocado el relleno cuidando de no levantar o dañar la geogrelha en este proceso. El grado de compactación mínimo exigido para el relleno reforzado fue de 98% do ensayo de PROCTOR normal y manteniendo la humedad óptima en +-2%.



Figura 5 – Posicionamiento de los refuerzos



Figura 6 – Detalle del tubo pasando por atrás del muro

La compactación del relleno reforzado fue realizada en capas de 15cm. Interesante que para esta obra fue utilizado un rodillo compactador liso, debido al contenido de área incluida dentro del relleno y a que las pruebas usando este equipo permitieron demostrar que permitía alcanzar el grado de compactación especificado en proyecto (mínimo de 98%). En las capas superiores el mismo proceso es repetido hasta alcanzar la altura final de la contención deseada.



Figura 7 - Módulos y refuerzos posicionados y compactación del relleno sobre las geomallas.

Los muros de contención presentaron una longitud de 77,15m y 108,90m, con altura máxima de 12 metros y totalizaron un área de fachada aproximada de 1.400 m², siendo proyectados y reforzados con geomallas unidireccionales de poliéster (PET) con longitudes de refuerzo que variaban hasta alcanzar los 11 metros.

La avenida Sapopemba en este trecho posee 9,0 metros de ancho y pasará directamente sobre los muros de suelo reforzado, que en algunos locales estaban situados sobre taludes con inclinación de 45° y con un desnivel total de más de 30 metros. Como indicado anteriormente, en estos locales hubo la necesidad de refuerzos adicionales tipo anclajes para la estabilización global del sistema de contención. El área ocupada

por los anclajes de acero del tipo CA-50 era de aproximadamente 1.000 metros cuadrados distribuidos en una malla de 1,5m x 1,5m, conforme presentado en la Figura 8:



Figura 8 – Malla de anclajes en la parte inferior del muro para aumento del FS en análisis de estabilidad global.

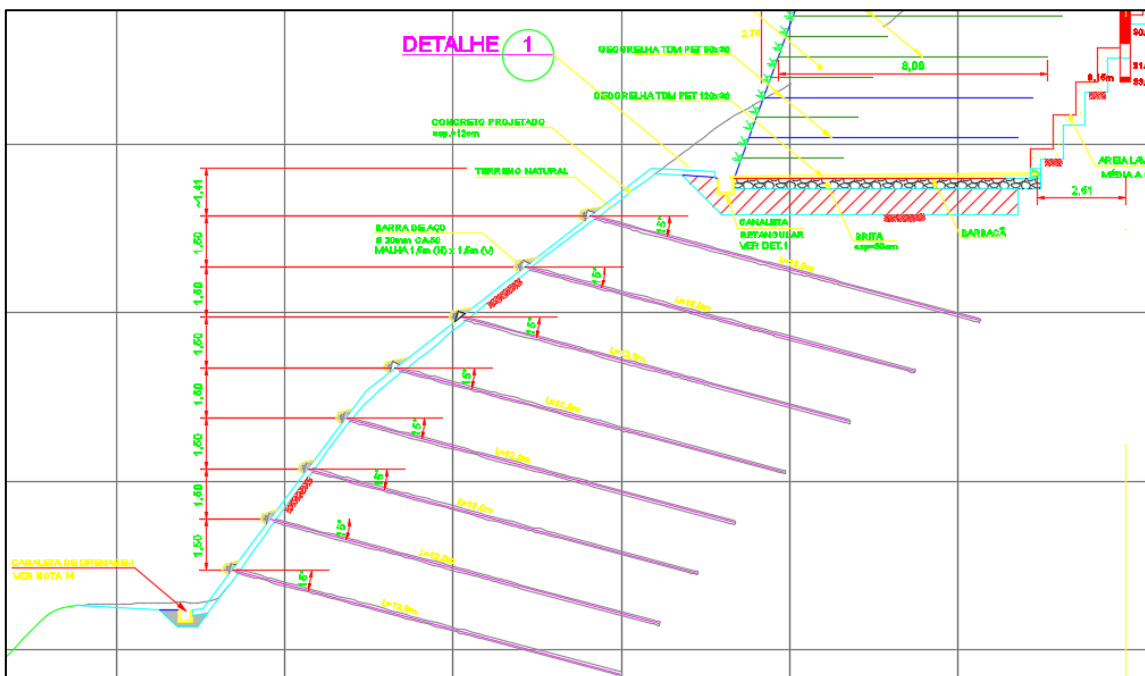


Figura 9 – Imagen de la malla de anclajes de acero CA-50 propuesta debajo de los muros



Figura 10 – Muros de suelo reforzado con geosintéticos y fachada en módulos metálicos después de la construcción (sin vegetación)



Figura 11 - Muro de suelo reforzado en proceso de vegetación y ya en funcionamiento.

5. CONCLUSIONES

Las estructuras de suelo reforzado fueron construidas al mismo tiempo, la obra cumplió las necesidades del

cliente y el sistema de suelo reforzado adoptado presentó ejecución extremadamente rápida y eficiente, permitiendo la construcción de los muros en tiempo record y economizando recursos. Debido al paso de tubos de concreto en la parte posterior del muro fueron necesarios tratamientos adicionales de drenaje imprescindibles para el buen funcionamiento del muro a largo plazo.

El presente trabajo mostró que el uso de geosintéticos permite viabilizar obras complejas, incluso cuando se trata de usar suelos con gran contenido de arcillas o limos, normalmente no recomendados para este tipo de estructuras de acuerdo con las recomendaciones americanas y europeas. Sin embargo, esto es posible después de una caracterización adecuada del material para uso como relleno reforzado y principalmente de la interacción entre los refuerzos y ese tipo específico de suelo.

La flexibilidad de los geosintéticos permitió, adicionalmente, su combinación con soluciones tradicionales como anclajes en suelo, con la finalidad de optimizar costos de proyecto y reducir los plazos de construcción. Tales estructuras se encuentran funcionando normalmente, sin señales de anomalías a pesar de las constantes y fuertes lluvias que caen en São Paulo en esta época del año.

6. BIBLIOGRAFÍA

Barata, Fernando Emmanuel (1983): "Propriedades Mecânica dos Solos – Uma Introdução ao projeto de Fundações". Editora Livros Técnicos Científicos.

Campos, M. V. W., NETO, J. O. (2016) – Controle de qualidade de geogrelhas compreende fatores como desempenho e durabilidade, Revista Fundações & Obras Geotécnicas, Ed. Rudder, Ano 6, Nº 66, p34-37.

Christopher, B. R., Gill, S. A., Giroud, J. P., Juran, I., Scholsser, F., Mitchell, J. K. and Dunncliff, J. (1990): "Reinforced Soil Structures, Volume I. Design and Construction Guidelines". Federal Highway Administration, Washington D.C. Report No. FHWA-RD-89-043, November, 287 p.

Vertematti, J. C. (2015) - Manual Brasileiro de Geossintéticos, Editora Edgard Blücher ed 2.