

## MURO DE GRAN ALTURA EN SUELO REFORZADO CON GEOMALLAS Y CARA VISTA VEGETALIZADA

P. J. BRUGGER, BRUGGER ENGENHARIA LTDA., SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, SP, BRASIL  
C. F. Schmidt, Huesker Ltda., São José dos Campos, SP, Brasil  
P. S. Hemi, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil

### RESUMEN

Este artículo presenta un caso de obra donde fue ejecutado un muro de contención en suelo reforzado con geomallas y paramento vegetalizado con una altura máxima de 27,60 metros. El diseño del muro consideró tanto análisis de seguridad al colapso (estado límite último) como la previsión de deformaciones admisibles (serviciabilidad) de acuerdo con normas internacionales aplicables. Con el objetivo de garantizar pequeñas deformaciones posconstructivas en la estructura, fueron utilizadas geomallas de PVA (Alcohol Polivinílico) con alto módulo de rigidez y baja fluencia. Adicionalmente, la compactación de las capas de suelo fue realizada con alta energía para inducir la movilización de parte de los esfuerzos en las geomallas durante el período de construcción. Fueron utilizados refuerzos geosintéticos principales con espaciamiento vertical de 1,80 metros y longitudes variando entre 12 a 17 metros, intercalados por refuerzos secundarios con separación vertical de 0,60 metros y longitud de 5 metros.

### RESUMO

O trabalho apresenta um caso de obra onde foi executado um muro de contenção em solo reforçado com geogrelhas e face verde envelopada com altura máxima de 27,60 m. O dimensionamento do muro foi baseado em segurança ao colapso (estado limite último) e na previsão de deformações admissíveis (serviciabilidade) de acordo com normas internacionais aplicáveis. Com o objetivo de se obter pequenas deformações pós-constructivas foram utilizadas geogrelhas de PVA (poliálcool vinílico) com alto módulo de rigidez e baixa fluência. Adicionalmente a compactação foi executada com alta energia para induzir a mobilização de parte das tensões nos reforços quando da sua instalação. Foram utilizados reforços principais com espaçamento vertical de 1,80 m e comprimentos variando de 12 a 17 m, intercalados por reforços secundários com espaçamento vertical de 0,60 m e comprimento de 5 m.

### 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de la técnica de muros de contención en suelo reforzado con geotextiles y geomallas ya es una práctica común en Brasil hace aproximadamente dos décadas. Más recientemente, la utilización de geomallas de mayor rigidez y alta resistencia a la tracción, ha posibilitado la ejecución de muros de contención de gran altura y baja deformabilidad, ampliándose así el campo de aplicación de este tipo de estructuras.

Históricamente, el uso de refuerzos geotextiles no tejidos de poliéster o polipropileno resultaba en obras sujetas a deformaciones muchas veces incompatibles con el comportamiento de estructuras rígidas o con muros de gran altura. Actualmente, existen en el mercado geomallas más resistentes y mucho más rígidas que los materiales utilizados en el pasado. La selección de refuerzos geosintéticos adecuados así como un correcto diseño y una compactación apropiada permiten la construcción de muros en suelo reforzado para diversas aplicaciones sin restricciones relacionadas a las deformaciones durante su vida útil.

Este trabajo presenta un caso de obra donde fue construido un muro en suelo compactado reforzado con geomallas y cara vista vegetalizada con una altura máxima de 27,40 m e inclinación de 1:3 (H:V). Son presentados los criterios de diseño contra la falla y las previsiones de deformaciones para la condición de servicio de acuerdo a las recomendaciones de la norma inglesa BS 8006.

### 2. MÉTODOS DE ANÁLISIS

#### 2.1 Dimensionamiento Externo

El diseño externo consiste básicamente en determinar la longitud de los refuerzos para que la estructura de suelo reforzado como un todo resista al empuje de la masa de suelo posterior sin volcarse, deslizarse y con esfuerzos verticales aplicados en la base inferiores a las tensiones admisibles para el suelo de fundación. Independiente de la situación, se recomiendan longitudes mínimas para los refuerzos de 70% de la altura total del muro y no inferiores a 3,0 m (BS 8006). Para muros de gran altura, desde que sea satisfecha la condición de equilibrio al volcamiento y al

deslizamiento, los refuerzos en la mitad inferior del muro pueden ser reducidos hasta un mínimo de 40% de la altura total, con longitudes escalonadas hasta 50% de la altura. En la mitad superior de la altura los refuerzos deben tener como mínimo 60% de la altura en cualquier situación.

Las figuras 2 y 3 muestran la vista frontal del muro y la sección transversal en el punto de altura máxima. En ese trecho la altura total alcanza 27,6 m. En la base del muro, las longitudes de los refuerzos son 12,0 m (43% de la altura) y en la mitad superior las longitudes son de 17,4 m (63,0% de la altura). Estas longitudes no incluyen la cobertura del frente.

Debido a la considerable altura del muro, existía una preocupación sobre el comportamiento del suelo de fundación de la estructura, que recibiría tensiones verticales del orden de 600kN/m<sup>2</sup> en el borde externo del muro. Los sondeos realizados en el lugar indicaban la ocurrencia de una capa de pequeño espesor de suelo residual asentado sobre roca medianamente alterada. De esta forma, esta capa superficial debió ser excavada permitiendo apoyar el muro directamente sobre el material rocoso alterado, que presentaba capacidad portante adecuada para soportar la carga vertical impuesta por la contención. La fotografía 5 presenta un detalle del material de fundación del muro.

## 2.2 Dimensionamiento Interno

El dimensionamiento interno consiste en el cálculo de la cantidad, tipo y espaciamiento vertical de los refuerzos con el objetivo de garantizar el confinamiento de la masa de suelo reforzado, limitar las deformaciones de la contención otorgar niveles de seguridad adecuados a la estructura. El método de cálculo utilizado fue el de Ehrlich y Mitchel (1994), que además de considerar los esfuerzos y los parámetros de resistencia del suelo y del refuerzo, tiene en cuenta la rigidez relativa entre los materiales y los esfuerzos inducidos por la compactación. De manera general, lo que se procura en muros de gran altura es inducir durante la compactación de las capas, esfuerzos verticales que provoquen una “precarga” en el suelo y en el refuerzo geosintético. De este modo, las deformaciones decurrentes de la construcción de las demás capas de relleno serán menores.

Para esta obra fueron utilizadas geomallas de PVA Fortrac® MP. Para los suelos en cuestión y para la vida útil de 60 años adoptada para el proyecto, los factores de reducción certificados por el fabricante son:

- Fluencia o Creep:  $FR_{fl} = 1,52$
- Daños de Instalación:  $FR_{di} = 1,05$
- Degradación ambiental:  $FR_{am} = 1,00$
- Extrapolación:  $FR_{ex} = 1,20$
- $FR_{global} = 1,92$

En la tabla 1 son presentados los resultados del dimensionamiento interno para la obra calculados a través del programa ForTerra (Brugger et al., 2005) basado en la formulación propuesta por Ehrlich y Mitchel (1994). El espaciamiento vertical entre refuerzos principales fue mantenido constante e igual a 1,80 m. Los refuerzos principales son constituidos por geomallas de PVA con resistencias nominales a la tracción entre 55 y 400 kN/m (módulo de rigidez entre 1100 y 8000 kN/m/m) con longitudes de 12,00 a 17,40 m. Entre las diferentes filas de refuerzos principales fueron considerados refuerzos secundarios para garantizar la estabilidad local del frente de la estructura, compuestos por geomallas de poliéster con resistencia nominal a la tracción de 35 kN/m y longitud de 5,00 m.

En la tabla 1 la columna “altura” indica la altura del refuerzo en relación a la base del muro, siendo el primer refuerzo de la tabla la capa inferior en el muro. Para cada fila de refuerzo es presentado en la segunda columna el tipo de geomalla adoptada. En la tercera columna es mostrada la fuerza de tracción máxima en la geomalla al final de la construcción y en la cuarta columna el factor de seguridad a la falla individual de cada refuerzo. Este factor de seguridad es calculado con base en la resistencia útil de la geomalla, ya minorada por los respectivos factores de reducción mostrados encima.

Las columnas 5 y 6 presentan las tensiones verticales inducidas por la compactación y al final de la construcción respectivamente. La columna 10 muestra el coeficiente de empuje para el cálculo de la sollicitación en el refuerzo calculado por el método de Ehrlich y Mitchel (1994).

Se observa que todos los refuerzos poseen factor de seguridad contra la falla superior a 1,0, y que el factor de seguridad promedio es de aproximadamente 1,50. Cabe observar que los esfuerzos verticales inducidos por la compactación son mayores que las tensiones finales para los refuerzos posicionados desde la altura de 4,60 m hasta el coronamiento, siendo la energía de compactación el factor crítico en el dimensionamiento de estos refuerzos. De esta forma, la mayor sollicitación de estas geomallas ocurre durante el período constructivo, en especial durante la compactación de la capa de suelo inmediatamente superior a cada fila de refuerzo.

### 2.3 Análisis de Deformaciones

Cualquier obra de ingeniería debe atender a criterios de estado límite de servicio, además de garantizar un adecuado margen de seguridad al colapso. En muchas áreas de la ingeniería estructural este concepto ya ha sido bastante utilizado, como en el dimensionamiento de estructuras metálicas y de piezas de concreto armado por ejemplo, donde son verificadas las deformaciones y aberturas de fisuras potenciales (condición de servicio) combinado al dimensionamiento tradicional que analiza el estado límite último (falla). En geotecnia, y particularmente en estructuras de contención, el concepto definido como “serviciabilidad” (del inglés serviceability) ha sido poco adoptado, llevando muchas veces a la ejecución de obras que atienden apenas de manera parcial los requisitos de desempeño del proyecto.

El uso de geomallas de alta resistencia, alto módulo de rigidez y baja fluencia permite garantizar tanto la seguridad al colapso como la funcionalidad en estructuras tales como muros de gran altura. En general, los análisis de deformación de la contención son realizados en términos de deformaciones específicas o elongaciones específicas máximas en las fases de compactación, final de construcción y largo plazo para cada fila de geomalla de refuerzo.

De este modo, es fundamental disponer de las curvas esfuerzo-deformación de las geomallas para corto y largo plazo. La Figura 1 presenta las curvas esfuerzo-deformación normalizadas por la resistencia última para las geomallas utilizadas estudiadas en diferentes tiempos de sollicitación constante (isócronas). Conocida la fuerza actuante en un refuerzo a partir del espaciamiento y de las tensiones horizontales en la masa de suelo (en este trabajo fueron calculadas a través del método de Ehrlich y Mitchel, 1994), se divide esta fuerza por la resistencia a corto plazo de una geomalla preseleccionada para calcular el porcentaje de resistencia movilizada. De modo general, ese porcentaje debe situarse en el rango de 30 a 40% para las geomallas consideradas.

A partir del porcentaje de resistencia movilizado se puede entrar directamente en la curva esfuerzo-deformación y obtener la deformación específica para las curvas de corto y largo plazo.

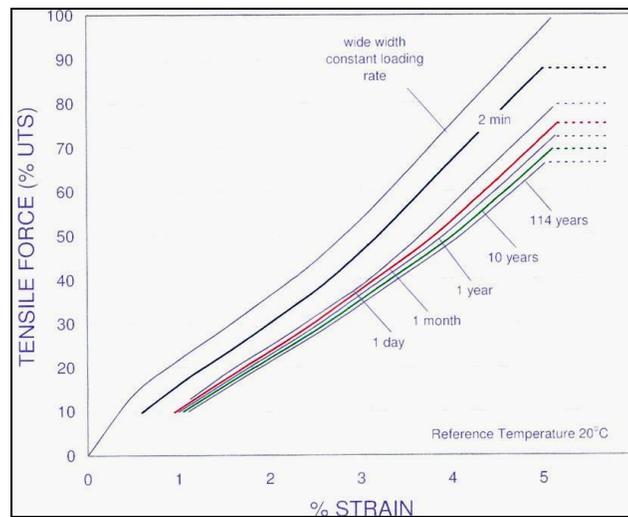


Figura 1. Curvas esfuerzo-deformación isócronas para las geomallas utilizadas.

En la tabla 1 las columnas 7, 8 y 9 presentan las deformaciones específicas para todas las filas de refuerzo del muro obtenidas a partir de las curvas esfuerzo-deformación de las geomallas. Según la norma británica BS 8006, son recomendados los siguientes criterios para muros de contención en suelo reforzado:

- La energía de compactación debe ser elevada, de modo a movilizar la mayor parte de las tensiones (y de las deformaciones) durante la compactación del suelo.
- El incremento en la deformación específica máxima entre el final de la compactación y el final de la construcción debe ser menor que 3,0%.
- El incremento en la deformación específica máxima entre el final de la construcción y la de largo plazo debe ser menor que 1,0%.

En la tabla 1 se observa que la mayor deformación entre el término de la compactación y el final de la construcción ocurre en fila inferior de geomalla y corresponde a 3,34 %. Este resultado ligeramente superior al límite recomendado para criterios de serviciabilidad, es aceptable debido a altura significativa del muro, donde la eficiencia de la

compactación es pequeña en las capas inferiores comparada con las tensiones verticales finales generadas por la masa de suelo. Por otro lado, las deformaciones entre el final de la construcción y las de largo plazo son del orden de 0,20 a 0,30%.

Admitiéndose una distribución de esfuerzos triangular a lo largo de los refuerzos geosintéticos, el desplazamiento horizontal medio del frente del muro previsto entre el final de la compactación y el final de la construcción es de aproximadamente 20 cm. Para el periodo comprendido entre el final de la construcción y el final de la vida útil del proyecto (60 años) el desplazamiento del frente es de un poco más 3,0 cm. Estos desplazamientos representan 0,72 % y 0,10 % respectivamente en relación a la altura del muro. Se observa de esta forma que la estructura reforzada con geomallas es bastante rígida, atendiendo las especificaciones de normas internacionales en los que se refiere a “serviciabilidad”.

Tabla 1 – Resultados del diseño interno

Altura (m)	Geomalla (módulo)	T (kN/m)	FS	$\sigma_c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_f$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\epsilon_c$ (%)	$\epsilon_f$ (%)	$\epsilon_{\infty}$ (%)	$K_r$
0,6	J8000	191,27	1,09	100,00	506,0	0,29	3,63	3,92	0,21
2,4	J8000	174,76	1,19	100,00	473,6	0,29	3,32	3,58	0,21
4,2	J8000	158,86	1,31	100,00	441,2	0,28	3,02	3,26	0,20
6,0	J8000	143,49	1,45	100,00	408,8	0,27	2,73	2,94	0,20
7,8	J8000	128,73	1,62	100,00	376,4	0,27	2,45	2,64	0,19
9,6	J8000	114,55	1,82	100,00	344,0	0,26	2,18	2,35	0,19
11,4	J8000	100,96	2,06	100,00	311,6	0,25	1,92	2,07	0,18
13,2	J4000	87,95	1,18	100,00	279,2	0,49	3,34	3,61	0,18
15,0	J4000	75,52	1,38	100,00	246,8	0,48	2,87	3,10	0,17
16,8	J4000	63,68	1,64	100,00	214,4	0,46	2,42	2,61	0,17
18,6	J2200	52,42	1,09	100,00	182,0	0,81	3,62	3,91	0,16
20,4	J2200	41,74	1,37	100,00	149,6	0,79	2,88	3,11	0,16
22,2	J2200	31,64	1,81	100,00	117,2	0,76	2,19	2,36	0,15
24,0	J1100	22,90	1,25	100,00	84,8	1,53	3,16	3,41	0,15
25,8	J1100	16,03	1,79	100,00	52,4	1,73	2,22	2,39	0,17
27,6	J1100	12,96	2,21	100,00	20,0	1,73	1,79	1,93	0,36

Altura: Cota en relación a la base del muro - Geomalla: Especificación de la geomalla

T: Solicitación final (Fuerza por metro de ancho) del refuerzo

FS: Factor de Seguridad a la falla del refuerzo

$\sigma_c$ : Esfuerzo vertical equivalente inducido por la compactación

$\sigma_f$ : Esfuerzo vertical final después de la construcción

$\epsilon_c$ : Deformación específica máxima después de la compactación

$\epsilon_f$ : Deformación específica máxima al final de la construcción

$\epsilon_{\infty}$ : Deformación específica máxima a largo plazo

$K_r$ : Coeficiente de empuje para cálculo del esfuerzo en el refuerzo al final de la construcción y a largo plazo

### 3. DETALLAMIENTO

A partir de los resultados del dimensionamiento presentados en la Tabla 1, es detallada en la figura 2 la vista frontal del muro y en las figuras 3 y 4 la sección transversal de altura máxima del muro con la distribución de los refuerzos y de las capas drenantes.

En función de la altura del muro son utilizadas geomallas principales, de alta resistencia y longitud importante. Esta configuración permite que sea optimizada la distribución de los refuerzos en función de las resistencias disponibles indicadas por el fabricante, y que se utilice menor cantidad de geomallas de mayor resistencia. Entre las filas de refuerzos principales son utilizadas geomallas secundarias, con longitud de 5,0 m y espaciamiento de 0,60 m. Estas geomallas tienen la función de garantizar la estabilidad local entre los refuerzos principales y restringir las

deformaciones durante la compactación.

Para el material de relleno del muro fue utilizado suelo local proveniente de excavaciones anteriores realizadas como parte del proyecto general, con peso específico compactado de 18 kN/m<sup>3</sup>, ángulo de fricción interna de 30° y cohesión de 20 kPa. Fueron realizados ensayos de compactación y de corte directo en muestras compactadas con humedad próxima a la óptima y en probetas saturadas. La humedad óptima de este suelo es de 17% con peso específico seco igual a 16,4 kN/m<sup>3</sup>.

La construcción del muro fue realizada por una empresa especializada en obras de suelo reforzado. El movimiento de tierras, incluyendo las excavaciones, extendido y compactación del suelo, quedó a cargo de la empresa contratante. El muro fue ejecutado en un período de pocas lluvias y el paramento fue revegetado después del término de la obra a través del plantío de Vetivert, una especie de grama que posee enraizamiento rápido y bastante profundo.

Para evitar la pérdida de material en el frente del muro durante la construcción, fue colocado un geotextil no tejido de 150 g/m<sup>2</sup> de cobertura entre la geomalla y la cara vista en bolsas de suelo orgánico. Para permitir el plantío en la cara vista, el geotextil fue perforado en cada una de las secciones. La figura 6 presenta una fotografía tomada durante la construcción del muro donde puede ser observada la longitud de los refuerzos principales de 17 m. Las figuras 7 y 8 presentan un detalle del paramento y del muro luego de su conclusión con la vegetación recién plantada.

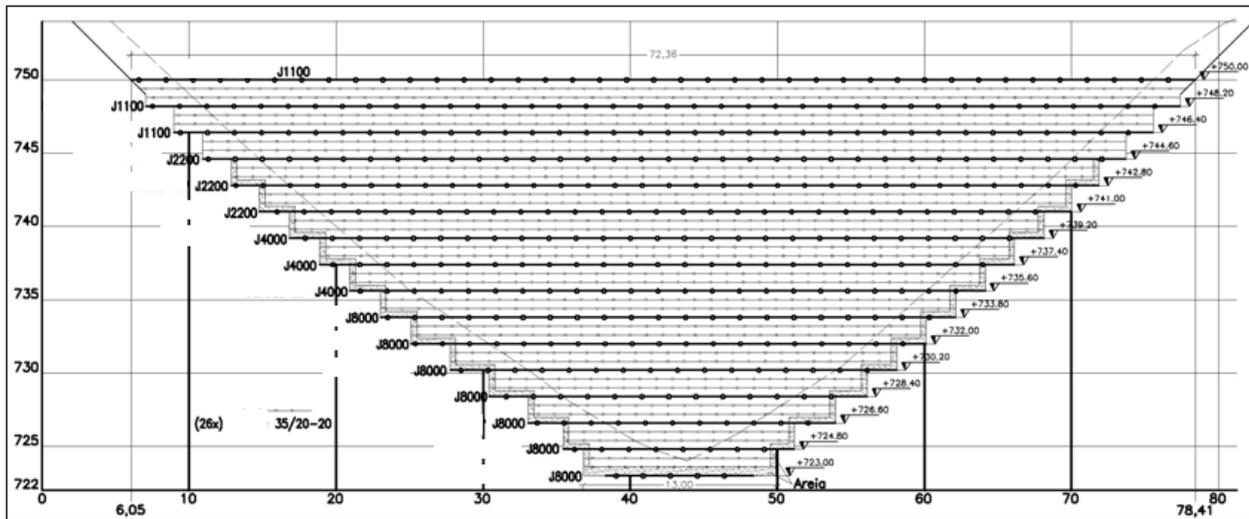
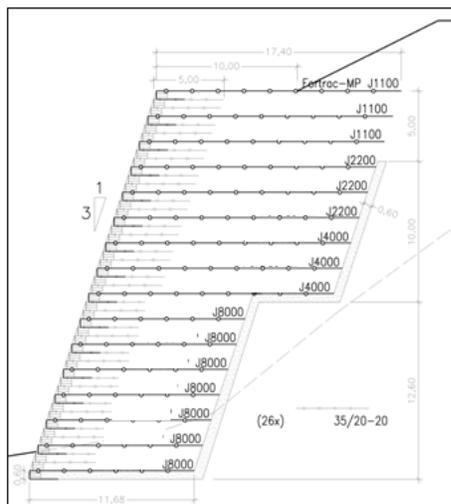
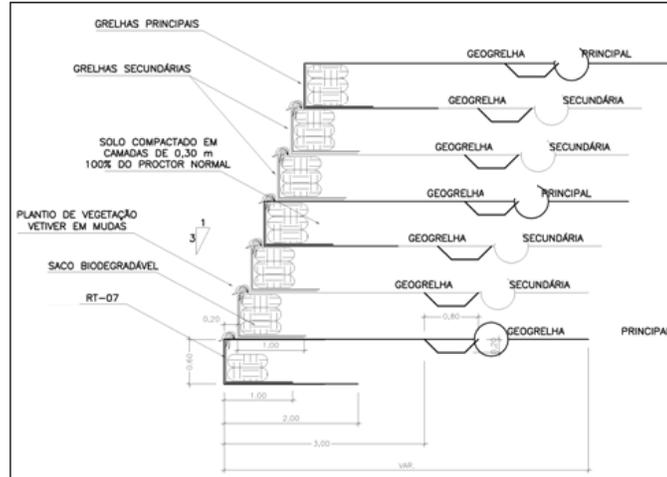


Figura 2. Vista frontal del muro.



Figuras 3. Sección transversal en el punto máximo con 27,60 metros de altura



Figuras 4. Detalle de los refuerzos principales, secundarios y paramento en sacos cubiertos con geotextil y geomalla.



Figuras 5. Detalle de la roca alterada en la fundación.



Figuras 6. Muro durante la fase constructiva.



Figura 7. Detalle de la cara vista durante la construcción.

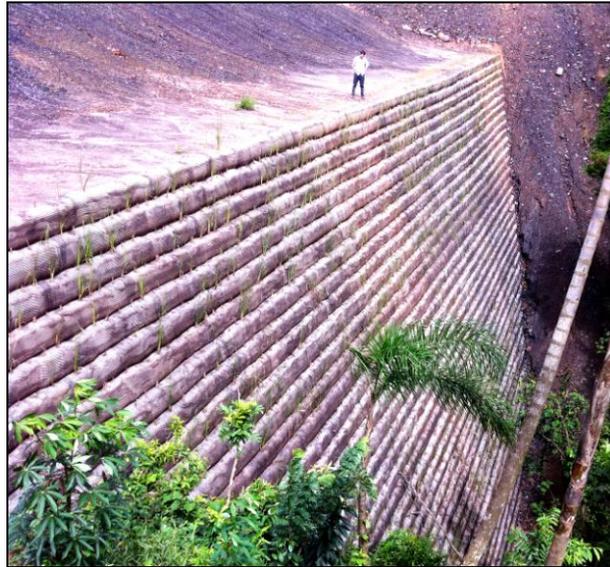


Figura 8. Muro terminado con el inicio del crecimiento de la vegetación.

#### 4. CONCLUSIONES

El trabajo presenta la aplicación de la técnica de suelo reforzado con geomallas y cara vista verde en un muro de 27,60 m de altura máxima, donde además de la garantía de la seguridad en relación a la falla, las características relacionadas a la estética y a las deformaciones máximas admisibles fueron consideradas en el diseño. De igual forma, fueron adoptados los conceptos de "serviciabilidad" de la estructura en relación a las deformaciones previstas en las fases de compactación, final de construcción y vida útil proyectada de 60 años.

Son presentados los procedimientos utilizados para el dimensionamiento externo, el dimensionamiento interno y la previsión de deformaciones durante las fases de ejecución y largo plazo del muro. Estos análisis fueron posibles gracias al conocimiento previo de los materiales geosintéticos utilizados como refuerzo, y de las propiedades geotécnicas de los suelos de relleno y de fundación, así como la energía de compactación considerada. Para la previsión de las deformaciones movilizadas fue imprescindible el conocimiento de las curvas esfuerzo-deformación de las geomallas, así como su comportamiento a lo largo del tiempo (fenómeno de Creep). En esta obra fue utilizado suelo residual arenolimoso proveniente de excavaciones realizadas en el área de la obra compactado en la humedad óptima con rodillo tipo "pata de cabra" y energía mínima de 98% del Proctor Normal.

Los resultados de los análisis y de la obra en sí demuestran que la utilización de geomallas de alta resistencia a la tracción, alto módulo de rigidez y baja fluencia, aliadas a una compactación con energía próxima al Proctor Normal, resultan en muros con baja deformabilidad, cumpliendo los requisitos de estética y funcionalidad, además de la seguridad al colapso. Los refuerzos fueron calculados por el método de Ehrlich y Mitchel (1994) y las deformaciones máximas en los mismos fueron verificadas con base en los límites especificados en la norma británica BS 8006 para estribos de viaductos y puentes.

Es presentada también la sección transversal final del muro con detalles de drenaje en la base, en la parte posterior y en el frente del muro.

#### AGRADECIMIENTO

Ing. Edwin Fernando Ruiz por la ayuda prestada.

#### REFERENCIAS

- BBA - British Board of Agreement Technical Approvals for Construction, Roads and Bridges Agreement Certificate No. 01/R125, UK, October 2001.
- BS 8006. Code of Practice for Strengthened and Reinforced Soils and Other Fills. British Standard, London, Inglaterra.
- Brugger, P.J., e Montez, F.T. (2003) Muros de Contenção em Solo Reforçado com Geogrelhas e Blocos Segmentais. Geossintéticos 2003, Porto Alegre, Brasil.
- Brugger, P.J., Silva, A.E.F. Furtado, D.C. e Saramago, R.P. (2005) ForTerraie – Programa para o Dimensionamento e o Detalhamento de Muros de Contenção e Blocos Segmentais. Infogeo 2005, Belo Horizonte, Brasil.
- Ehrlich, M. e Mitchel, J. K. (1994) Working Stress Design Method For Reinforced Soil Walls. Journal of Geotechnical Engineering. Vol 120, No. 4, pp. 625-647.