

MECHANICALLY STABILIZED EARTH WALLS USING GEOSYNTHETICS FOR BRIDGE ABUTMENTS - COSTA RICAN EXPERIENCE

C. Muñoz, Maccaferri de Centroamérica, Costa Rica

ABSTRACT

Implementation of MSE structures as direct bridge abutments have become a significant simplification in the design and construction of bridge abutment systems. This system brings benefits like faster construction, cost savings due to elimination of deep foundations, better compatibility of deformation between the components of bridge abutment systems.

Initially in the 60's and 70's, the mechanically stabilized walls were built using steel reinforcement or steel mesh as reinforcement elements. Subsequently, with the development of polymers, geosynthetics were introduced as a substitution to steel elements (in the early 80's). Over the years these materials have been displacing the steel elements as the main reinforcement system. In this way the concept of Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) was born.

This study presents the use of the first GRS bridge abutments as direct support of bridges on a major highway project in Costa Rica. This project includes 4.1 kilometers of a urban highway which has a 1.5 kilometer viaduct with several ascent and descent ramps.

The overpass will be reinforced with 18 kilometers of marginal roads with level sections, which will allow fluid interconnection so that vehicles can pass through the lower part of the viaduct. All these works imply the need to build more than 25 walls of reinforced soil with variable heights of 3 m to 13 m in height, of which 4 have already been completed.

This project has the particularity that several of the structures correspond to walls to directly place the superstructure loads on the reinforced fill ("True Abutments"). The walls have variable heights between 3.4 and 6 m, with maximum reinforcement lengths of 9 m. The length of the span to be covered is 30 m maximum.

RESUMEN

La implementación de estructuras de muros mecánicamente estabilizados (M.M.E.) como apoyos directos para cargas de puentes se ha convertido en una simplificación significativa en el diseño y construcción de estos sistemas. Esta configuración brinda beneficios como una construcción más rápida, ahorro de costos debido a la eliminación de cimientos profundos y una mejor compatibilidad de deformación entre los componentes de los sistemas de pilares de puentes.

Inicialmente en los años 60's y 70's, los muros estabilizados mecánicamente se construyeron usando tiras o mallas de acero como elementos de refuerzo. Posteriormente, con el desarrollo de los polímeros, se introdujeron los geosintéticos como sustitución de los elementos de acero (a principios de los años 80's). Gradualmente estos materiales han estado desplazando a los elementos de acero como el principal sistema de refuerzo. De esta manera nació el concepto de suelo reforzado geosintético.

Este estudio presenta el uso de los primeros estribos de puentes con muros M.M.E. como soporte directo para las cargas de la superestructura en un importante proyecto de carretera en Costa Rica.

Este proyecto incluye 4,1 kilómetros de una carretera urbana que tiene un viaducto de 1,5 kilómetros con varias rampas de ascenso y descenso. El paso elevado se reforzará con 18 kilómetros de caminos marginales con secciones niveladas, lo que permitirá la interconexión de fluidos para que los vehículos puedan pasar por la parte inferior del viaducto.

Todos estos trabajos implican la necesidad de construir más de 25 muros de suelo reforzado con alturas variables de 3 m a 13 m de altura, de las cuales 4 ya se han completado. Este proyecto tiene la particularidad de que varias de las estructuras corresponden a muros M.M.E que soportan directamente las cargas de la superestructura en el relleno reforzado ("True Abutments"). Los muros tienen alturas variables entre 3.4 y 6 m, con longitudes máximas de refuerzo de 9 m. La longitud del tramo a cubrir es de 30 m como máximo.

1. INTRODUCTION

1.1 Características del Sistema Macforce®

Los Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.) consisten en la estabilización mecánica de un terraplén por medio de un sistema de refuerzo y paramento, gracias a la interacción que se presenta entre estos elementos. El suelo al querer deslizarse es retenido por el elemento de refuerzo, el cual entra en tensión formando un bloque o macizo de tierra mecánicamente estabilizada. Un Muro Mecánicamente Estabilizado se conforma básicamente por tres elementos (véase Figura 1): Paramento, Refuerzos y Material de Relleno.

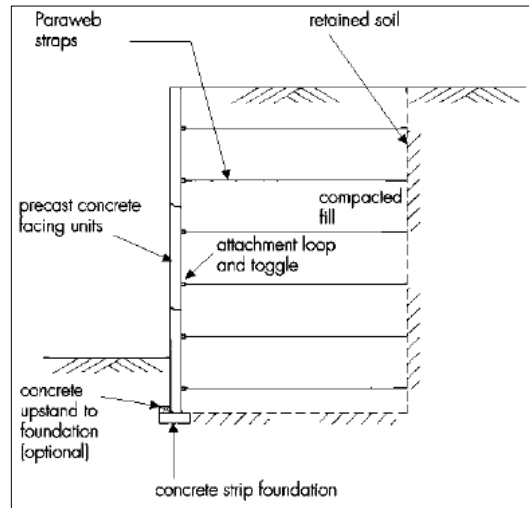


Figura 1: Componentes de un muro de suelo reforzado

Inicialmente en los años 60's y 70's, los muros mecánicamente estabilizados se construyeron utilizando como elementos de refuerzo a la tracción pletinas o mallas de acero. Posteriormente con el desarrollo de los polímeros se empezaron a introducir geosintéticos como sustitución a los elementos de acero (a inicios de los 80's). Con el pasar de los años estos materiales han ido desplazando a los elementos de acero como principal sistema de refuerzo.

Las estructuras de contención del sistema MACFORCE® combinan el uso de un relleno con material granular seleccionado, cintas de refuerzo a la tracción poliméricas y un paramento modular, con paneles prefabricados de concreto.

El principio de funcionamiento del sistema de MacForce se define a partir de la interacción entre un suelo con propiedades de fricción y cintas de material de refuerzo con una elevada resistencia a la tracción. Las fuerzas de tracción se transfieren por medio de la fricción hacia el refuerzo. De esta manera, la fuerza total de tracción obtenida es directamente proporcional a la cantidad de refuerzo instalado. Por tanto, es posible "diseñar" la resistencia del material, prácticamente sin límites.

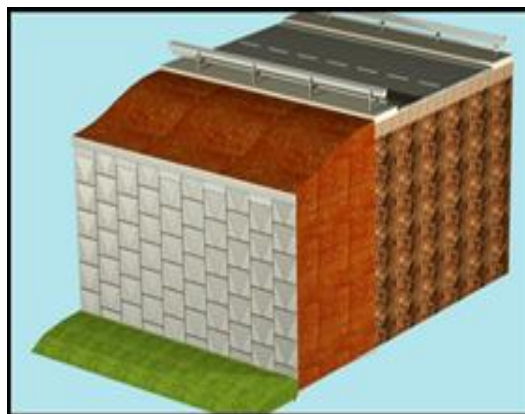


Figura 2: Sistema Macforce®

La aceptación y el uso en todo el mundo de los muros de tierra mecánicamente estabilizados convierten esta solución en uno de los avances más importantes en el campo de la ingeniería civil del último medio siglo. Este resultado se debe a las ventajas únicas que ofrecen las características intrínsecas del sistema:

- Resistencia
- Durabilidad
- Resiliencia
- Flexibilidad
- Bajo impacto ambiental
- Relación costo/beneficio

Los muros mecánicamente estabilizados son técnica y económicamente una alternativa más atractiva que las soluciones convencionales en concreto reforzado. El uso M.M.E. en proyectos viales ha tenido un auge importante en Costa Rica en los últimos años, siendo una solución implementada en forma exitosa en proyectos como la Ampliación de la Ruta No. 1 (Tramo Cañas-Liberia), Construcción de la Ruta No. 35 (Tramo Abundancia-Flores), Paso a Desnivel City Mall y recientemente en el proyecto de Construcción del Corredor Vial Circunvalación Norte Ruta No.39. En este último proyecto se han conceptualizado una serie de muros utilizando refuerzos con geosintéticos cuyo relleno servirá como apoyo directo a las cargas de la superestructura del puente (conocidos como "True Abutments"). En el presente trabajo se presentará un caso específico de este proyecto el cual constituye el primer muro de este tipo construido en Costa Rica.

2. OBJETIVOS

- Presentar las propiedades mecánicas de los refuerzos geosintéticos tipo PARAWEB®
- Caracterizar los muros utilizados como soporte de estructuras de puentes.
- Dar a conocer los aspectos técnicos más relevantes en cuanto a la conceptualización y diseño de los muros M.M.E. cuando son utilizados como apoyo de cargas de puentes.
- Presentar el primer caso de éxito en Costa Rica

3. REFUERZO POLIMÉRICO PARAWEB®

Las cintas Paraweb para muros de contención de suelo reforzado y pilares de puentes comprenden tendones de fibras de poliéster de alta tenacidad encerradas en una vaina de polietileno.



Figura 3: Refuerzo Paraweb

3.1 Resistencia a la tracción a corto plazo

La resistencia a la tracción característica a corto plazo de las cintas utilizadas fue de 27 kN y 45 kN. En la Figura 4 se muestra una curva de extensión de carga típica. El alargamiento a la carga máxima para todos los grados de la cinta Paraweb es $10.5\% \pm 1\%$ (*).

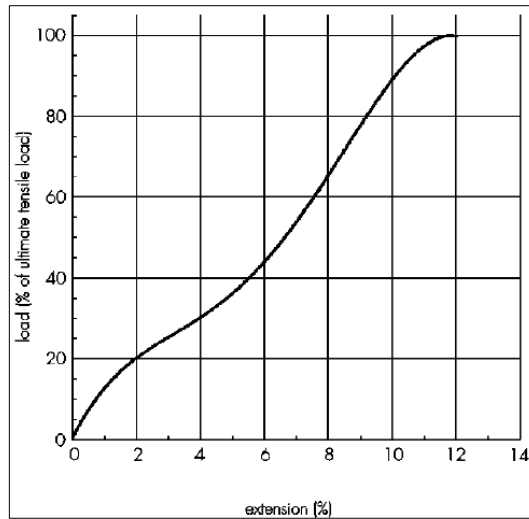


Figura 4: Curva de Esfuerzo-Deformación de Paraweb

3.2 Resistencia a la tracción a largo plazo

La resistencia a la rotura al largo plazo por creep de las cintas Paraweb se ha determinado mediante una línea de ruptura por tensión (ver Figura 7) utilizando datos convencionales de prueba de ruptura por deformación a largo plazo (hasta 41,945 horas) y datos de prueba del método isotérmico escalonado (SIM) de tiempo variable (hasta $7,8 \times 10^6$ horas) para una temperatura de diseño de 20 ° C. A partir de este gráfico, el valor de la resistencia a la rotura por deformación por tracción (TD) se puede determinar para la vida de diseño adecuada a 20 ° C y aplicando los factores de cambio de temperatura determinados para las correas de Paraweb, para otras temperaturas de diseño.

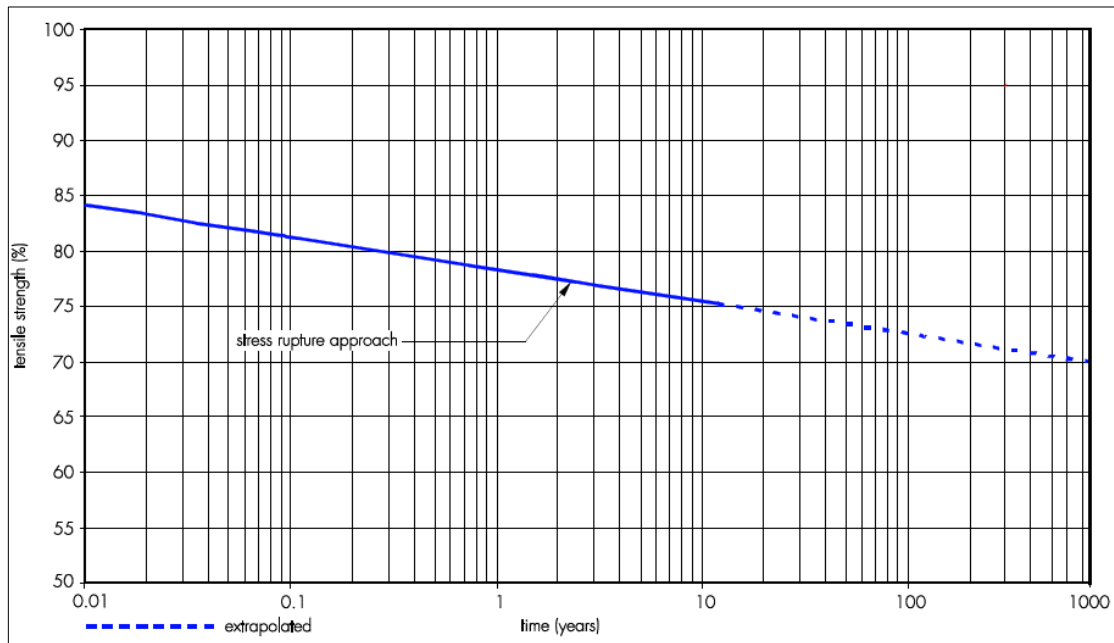


Figura 5: Degradación de la resistencia en el tiempo

Design temperature (°C)	Creep reduction factor (RF_{cr})	Percentage of T_{char} (%)
0	1.30	77
20	1.38	72
25	1.40	71
30	1.43	69
40	1.48	68

Tabla 1: Factor de reducción por “creep”

3.3 Factor de reducción de daños en la instalación

Para el refuerzo PARAWEB los factores de reducción se han establecido a partir de pruebas de daños de instalación a gran escala. Para los suelos no cubiertos por la Tabla 7, los valores apropiados de RFID pueden determinarse a partir de ensayos específicos del sitio o el ingeniero responsable del diseño del proyecto puede ejercer un juicio de ingeniería para interpolar entre los valores dados. Los factores de reducción mostrados suponen que se usa material bien graduado (coeficiente de uniformidad > 5) con una profundidad mínima compactada de 150 mm.

Paraweb grade	Sheath type	RFID particle size d50 (mm)			
		<0.1	<1.0	<15	>15
27	ME/MD/MS	1.10	1.10	1.10	1.10
30	2E/2D/2S	1.05	1.05	1.10	1.07
36	ME/MD/MS	1.05	1.05	1.10	1.10
37.5	ME/MD/MS	1.05	1.05	1.10	1.10
40	2E/2D/2S	1.05	1.05	1.10	1.07
45	ME/MD/MS	1.05	1.05	1.10	1.08
50	2E/2D/2S	1.05	1.05	1.05	1.05
54	ME/MD/MS	1.05	1.05	1.05	1.08
63	ME/MD/MS	1.05	1.05	1.05	1.06
70	2E/2D/2S	1.05	1.05	1.05	1.05
75	2E/2D/2S	1.05	1.05	1.05	1.08
100	2E/2D/2S	1.05	1.05	1.05	1.06

Tabla 2: Factor de reducción por daños de instalación

3.4 Degradación química y biológica

Las cintas PARAWEB® tienen una resistencia adecuada a la intemperie y a la exposición a los rayos UV, cuando están protegidas de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Se puede usar un factor de reducción (RFW) de 1.0 para propósitos de diseño para ULS y SLS.

4. MUROS M.M.E. COMO APOYO DE CARGA DE PUENTES (“TRUE ABUTMENTS”)

Este tipo de estructuras generalmente se conceptualizan como un sistema en el cual las vigas del puente descansan en un pequeño estribo de asiento colocado directamente sobre el relleno reforzado (Ilustración 4).

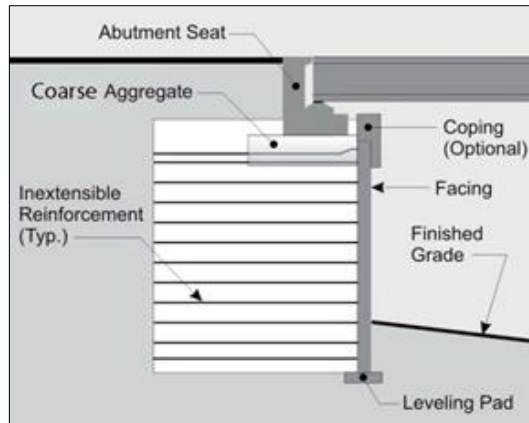


Figura 6: Concepto de un muro M.M.E. como apoyo de cargas de puente

El uso de este tipo de sistemas ha aumentado rápidamente desde finales de la década de 1990. Las principales razones de este aumento son:

- Tiempos de construcción se reducen sensiblemente
- Existe un beneficio económico sustantivo en comparación con el uso de bastiones de concreto convencionales.

Los métodos de diseño para este tipo de muros siguen los mismos principios que para estructuras convencionales. La diferencia entre ambos es la presencia de cargas concentradas pesadas debido a la superestructura del puente. Esto implica que estos muros no funcionan como estructuras de retención, sino como estructuras portadoras y transmisoras al suelo de cargas. El análisis de estas dos funciones se basa en el principio de superposición: las fuerzas o desplazamientos producidos en cualquier punto del muro por el efecto combinado y simultáneo de la función dual se puede evaluar agregando (superponiendo) las fuerzas o desplazamientos producidos por cada función individualmente

5. CONCEPTOS DE DISEÑO

5.1 Generales

El diseño de los Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.) se realiza considerando tanto la estabilidad externa como la estabilidad interna de la masa del suelo retenido detrás de los paneles; siendo también necesario que se hagan revisiones de estabilidad global. Se puede considerar el uso de los M.M.E. en los mismos casos en los cuales se considera el uso de muros de contención convencionales, en especial cuando se esperan asentamientos totales y diferenciales significativos.

El principio básico de funcionamiento de los M.M.E. es lograr que una masa de suelo granular a través de refuerzos colocados estratégicamente pueda soportar fuerzas de tensión, por lo tanto, para garantizar su labor, al momento de diseñar el Muro Mecánicamente Estabilizado se deberá considerar:

- a) La estabilidad externa, que depende de la geometría del muro las propiedades de los materiales de relleno detrás del muro y las sobrecargas.
- b) La estabilidad interna del muro reforzado detrás del paramento, donde intervienen las propiedades a corto y largo plazo de los materiales utilizados para reforzar el suelo.
- c) Fallas por estabilidad global y compuesta, que dependen del entorno y la zona específica donde se localiza el muro.
- d) Diseño estructural del paramento que contempla los tipos de paneles que formarán este paramento, garantizando la retención correcta del material.

Para el presente trabajo se realizó una revisión de los métodos de diseño recomendados por AASHTO y la FHWA. En este capítulo se hará una explicación de los conceptos principales que sustentan estos métodos. Antes de profundizar en estos aspectos es importante indicar que se detectó que los métodos de diseño son basados en el análisis de equilibrio límite; además se enfocan en estimar los límites últimos de la resistencia referentes a la estabilidad externa e interna siguiendo un enfoque semiempírico.

En el caso de este sistema se trabaja con refuerzos extensibles, los cuales son aquellos que alcanzan su resistencia pico bajo deformaciones específicas mayores que las necesarias para que el suelo alcance su resistencia pico.

El desarrollo de refuerzos extensibles (geosintéticos), a fines de la década de 1970, requirió el desarrollo de un nuevo método que tuviera en cuenta las diferencias en la distribución interna de esfuerzos y las características de deformación

de los materiales poliméricos. De esta forma se define el Método Simplificado como la forma apropiada de estimar la estabilidad interna. Bajo este método los refuerzos extensibles (geosintéticos) no están sometidos a tensión en toda su longitud, por lo que una estructura de este tipo no se comporta como una masa gravitacional coherente. El método Tieback Wedge es un método aceptado para el diseño de estructuras reforzadas con refuerzos extensibles y el Método Simplificado es una versión específica del Método Tieback Wedge para muros.

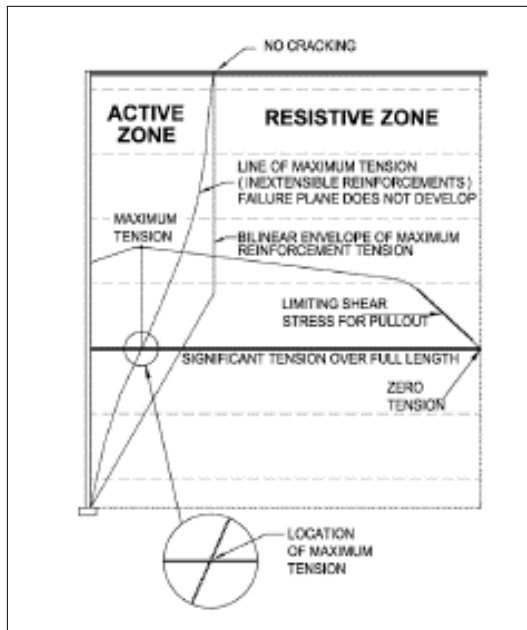


Figura 7: Diagrama de presión simplificado

Anteriormente estos métodos se trabajaron utilizando la metodología tradicional de Esfuerzos de Trabajo. Las últimas versiones de los códigos de diseño han modificado esta condición y se está en un proceso de transición para implementar la metodología de Diseño con Factores de Carga y Resistencia (LFRD).

5.2 Cargas

Con respecto a la carga de tránsito y su influencia en los esfuerzos que actúan sobre el geosintético, se requieren dos cálculos separados de tensión de refuerzo (T_{max}):

- Cuando se requiere estimar T_{max} para verificar la ruptura del refuerzo y la conexión con el panel se debe utilizar la carga de tránsito
- Cuando se requiere estimar T_{max} para verificar la capacidad de extracción (pullout) del refuerzo no se considera la carga de tránsito.

Esta diferencia es lógica y parte del principio en el cual la condición más crítica para el refuerzo se verifica su capacidad a tensión es con la carga aplicada, mientras que si se verifica la capacidad por extracción la condición más crítica sería con la carga Normal más baja, es decir, sin la influencia del tránsito.

5.3 Material de relleno

El relleno para utilizar en la zona reforzada de una estructura de muro mecánicamente estabilizado es fundamental para obtener un desempeño satisfactorio. AASHTO especifica el relleno de la estructura como un material granular con un tamaño máximo de 100 mm y con contenido de finos de menos del 15%. La granulometría general recomendada se indica en la siguiente tabla:

U.S. Sieve Size	Percent Passing
100 mm	100
420 μ m	0-60
75 μ m	0-15

Tabla 3: Especificación recomendada de granulometría

Inicialmente la especificación FHWA para muros M.M.E. permitía hasta un 25% de contenido de finos. No obstante, esta cantidad de finos generaba problemas en la verticalidad de la fachada de los sistemas. Como resultado, para reducir la incidencia de deformaciones en el muro inducidas por relleno, los límites de gradación se hicieron más restrictivos, criterio que sigue vigente hasta este momento.

Adicionalmente se deben cumplir requisitos de plasticidad, resistencia al corte (ángulo de fricción interna) y durabilidad, para los cuales existen recomendaciones generales dados por AASHTO. Usualmente se limita el índice de plasticidad a un máximo del 6% y el límite líquido se define menor o igual a 30%.

En el proceso de diseño siempre es necesario asumir algunos parámetros que se desconocen al momento de realizar esta etapa. Esto es común con el caso de las propiedades del material de relleno.

Usualmente se asume un ángulo de fricción entre 30° - 34° (ϕ) para el relleno de la zona reforzada. El límite superior de 34° se define considerando que este es el valor máximo permitido por las especificaciones AASHTO a menos que se proporcionen datos de prueba específicos del proyecto que validen el uso de un valor mayor.

5.4 Vida Útil de la Estructura

La vida útil de un muro mecánicamente estabilizado se define como el período durante el cual:

- Considerando el Método de Esfuerzos de Trabajo, es el tiempo en el cual el esfuerzo de tracción en los refuerzos del suelo es menor o igual al esfuerzo permisible
- Considerando el Método de Factores de Carga y Resistencia es el tiempo en el cual la resistencia a la tracción factorizada de los refuerzos del suelo es mayor o igual que la carga de tracción factorizada

Este tipo de estructuras se diseñan normalmente para una vida útil de 75 años. El factor principal que afecta la vida útil de una estructura MSE es la durabilidad a largo plazo de los refuerzos. En el caso de refuerzo con geosintéticos la pérdida de resistencia a largo plazo por el fenómeno de creep es la condición crítica que define la vida útil.

6. CASO DE ESTUDIO – RUTA N°39 – CIRCUNVALACION NORTE, SAN JOSE, COSTA RICA

6.1 Descripción del Proyecto

Este proyecto comprende 4.1 kilómetros de tramo principal el cual cuenta con un viaducto de 1,5 kilómetros con varias rampas de ascenso y descenso.

El paso a desnivel será reforzado con 18 kilómetros de marginales con tramos a nivel, que permitirán la interconexión fluida para que los vehículos puedan pasar por la parte inferior del viaducto.

Todas estas obras implican la necesidad de construir más de 25 muros de suelo reforzado con alturas variables de 3 m hasta 13 m de altura, de los cuales ya se han completado 3 de ellos y 2 más se encuentran en ejecución en este momento. Este proyecto cuenta con la particularidad que varias de las estructuras corresponden a muros para colocar directamente las cargas de la superestructura sobre el relleno reforzado (“True Abutments”).

Los muros tienen alturas variables entre 3.4 y 6 m, con longitudes de refuerzo máximas de 9 m. La longitud del vano a cubrir es de 30 m.

Dada la importancia del material de relleno en el desempeño satisfactorio de la estructura, vale la pena resaltar las características del material de utilizado, las cuales se muestran en la siguiente tabla:

Propiedad	Resultado
Límite Líquido	NP
Límite Plástico	NP
Peso Unitario	18 kN/m ³
Angulo de Fricción Interna	32°

Tabla 4: Propiedades del material de relleno

En las siguientes fotografías se muestra el proceso constructivo para los muros del paso elevado sobre Radial Heredia, primero en Costa Rica en ser concebido como un “True Abutment” reforzado con geosintéticos.



Figura 8



Figura 10



Figura 9



Figura 11

En cada uno de los proyectos mostrados se siguió un riguroso proceso de evaluación, diseño, instalación y control de calidad de las estructuras.

Las actividades ejecutadas fueron:

- Diseño Geométrico Muro
- Caracterización geotécnica de sitios de emplazamiento
- Caracterización físico-mecánica de materiales de relleno
- Diseño de Muros analizando los destinitos escenarios de falla: Estabilidad externa, deslizamiento, volcamiento, pull-out, Resistencia de cintas, Resistencia de Conexiones.
- Proceso de fabricación de paneles de concreto
- Movimientos de tierra (excavaciones y conformación de terrazas)
- Instalación de paneles
- Instalación de cintas de refuerzo y drenaje frontal
- Extendido y conformación de relleno
- Control de calidad de relleno
- Verificación de verticalidad de estructuras
- Criterios de aceptación de obra y monitoreo de estructuras

A partir de la experiencia en el uso de este sistema de muros de retención se pueden establecer con claridad una serie de ventajas técnicas que se mencionan a continuación:

- El uso de geosintéticos como refuerzo representa una alternativa técnica viable para ser utilizado como refuerzo en casos de muros que funcionen como apoyo de carga de puentes.
- Los estribos de puentes son estructuras críticas. Las excepcionales prestaciones en cuanto a distribución de carga y resistencia de este sistema ofrecen una solución económica y estructuralmente eficiente para este tipo de estructuras.
- Este tipo de estribos flotantes son la solución perfecta en el caso de los suelos de cimentación compresible. Si el terreno de cimentación es muy compresible, resulta mucho más rentable y eficaz recurrir a la combinación de técnicas de mejora del suelo y muros MSE que al uso de estribos pilotados.
- Estas soluciones contribuyen a una mejor compatibilidad de deformaciones entre los componentes del puente, por lo tanto, minimizan los efectos de asentamientos diferenciales y el "golpe" indeseable en las transiciones puente / relleno de aproximación.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 4th Edition, 2007, with 2008 and 2009 Interim Revisions.
- Earth Retaining Structures, by B.F. Tanyu, P.J. Sabatini, and R.R. Berg, FHWA-NHI-07-071 (2008).
- AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications, 2nd Edition, 2004, with 2006 Interim Revisions.
- Geosynthetic Design and Construction Guidelines, by R.D. Holtz, B.R. Christopher, and R.R. Berg, FHWA HI-07-092 (2008).
- Guidelines for Design, Specification, and Contracting of Geosynthetic Mechanically Stabilized Earth Slopes on Firm Foundations, by R.R. Berg, FHWA-SA-93-025, January 1993.
- Reinforced Soil Structures - Volume I, Design and Construction Guidelines - Volume II