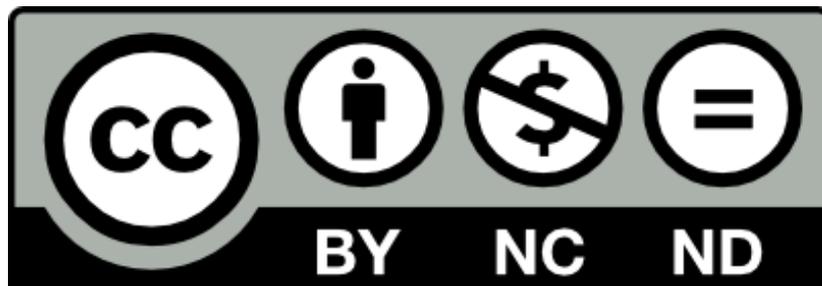


**INFORME FINAL
EVALUACION Y CONSTRUCCION DE MUROS DE TIERRA ARMADA**

**PRESENTADO POR:
SERGIO ALEJANDRO FIGUEROA TAPASCO**

**ASESOR INTERNO:
JUAN CARLOS GUZMAN MARTINEZ**

**ASESOR EXTERNO:
JUAN MANUEL MARTINEZ TEJADA**



**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE INGENIERIA-ESCUELA AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL
MEDELLIN-ANTIOQUIA
ENERO DE 2019**

EVALUACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE MUROS DE TIERRA ARMADA

Resumen

El departamento de Antioquia, se caracteriza por su geomorfología montañosa predominante, por lo que se hace necesario evaluar y ejecutar todo tipo de obras y de estructuras disponibles en el medio de la construcción civil, con el fin de dar solución a las necesidades viales requeridas.

Actualmente se desarrolla uno de los proyectos más importantes para la población antioqueña; una vía que comunique varios municipios del departamento con el puerto de Urabá. En el tramo comprendido entre los municipios de san jerónimo y Santafé de Antioquia, se realiza la construcción de la doble calzada, que comunicará al municipio de Medellín con el Urabá. En este tramo vial es común encontrar precipicios al lado de la calzada existente, provocados por la topografía irregular del terreno. Todo esto representa retos y dificultades en el diseño y construcción de lo propuesto en el proyecto autopistas al mar 1.

Con el fin de dar solución a dichos inconvenientes para la construcción de la nueva calzada, se propone en el proyecto Autopistas al Mar 1, la construcción de mas de 30 muros en concreto reforzado y mas de 10 muros de tierra armada, con el fin de dar paso a la nueva calzada en este tramo.

A pesar de que en este proyecto se tomaron en consideración ambos tipos de muros, se debe hacer claridad en que los muros de tierra armada no son muy utilizados en el país, por lo cual se plantea realizar un análisis acerca de los requerimientos para la construcción de ambos tipos de muros y con esta información, establecer el por qué este tipo de muros esta rezagado en cantidad construida respecto a los muros de concreto reforzado.

En el proceso de investigación de este proyecto, se determinó que ambos tipos de muros tienen excelentes prestaciones y que el costo de construcción de un muro respecto al otro, tiene mucha influencia a la hora de elegir el tipo de muro a construir, además que la altura del muro a construir, marca un inicio de análisis de elección importante, dado que un muro de concreto reforzado es económico y estable solo hasta cierta altura, mientras que un muro de tierra armada, presta otros beneficios después de la altura en que pierde eficiencia un muro de concreto reforzado, como lo son el comportamiento no rígido de los MSE, que permiten soportar grandes deformaciones en contraste al muro de concreto reforzado, y su comportamiento frágil.

Una de las conclusiones que se estableció, es que el tipo de muro que se utilice, depende exclusivamente de las necesidades del proyecto y que, con base a esto, ambos muros cumplen con los requerimientos para trabajar bajo las condiciones de diseño que se establezcan para ellos. Sin embargo, con base a las experiencias vividas en el desarrollo del proyecto, puede decirse que los muros de tierra armada, presentan una excelente opción constructiva, dado que los tiempos de armado y construcción suelen ser mas bajos con respecto a otro tipo de muros.



Introducción

En los últimos años en Colombia y especialmente en Antioquia, las obras viales han sido construidas con la ayuda de una gran cantidad de muros de contención, debido a las necesidades y requerimientos presentados por la topografía de los terrenos del departamento. Según el blog 360 grados en concreto del grupo argos, el “concreto, es por lo general el material más utilizado por excelencia en la mayoría de muros de contención (Muros de concreto reforzado), gracias a sus diversas propiedades como lo son la disponibilidad y resistencia”; sin embargo, los muros construidos en **tierra armada** o **suelo reforzado**, representan una opción viable y segura, en casos donde la altura de un muro es tal que se requiere de cimentaciones profundas y de gran tamaño, lo cual puede representar incrementos en los costos de la obra, porque este tipo de muros, representan beneficios económicos y ambientales dado el aprovechamiento que se puede realizar de todos los recursos y materiales en campo. Factores como las regulaciones ambientales y tiempos de construcción, son determinantes en un proyecto y en este punto, es donde los muros de tierra armada, cobran gran importancia.

La ingeniería y especialmente los proyectos de construcción de vías, diariamente presentan nuevos y complejos retos de construcción, por lo cual las respuestas ante dichos retos, deben evolucionar, proporcionando diversas opciones de solución y desarrollo a estos retos, como los son el mayor control por parte de los entes gubernamentales a las obras según la importancia de la obra, la velocidad de avance de las tecnologías en maquinaria y productos para la construcción de obras civiles. La diversificación de opciones cuando se propone llevar a cabo un proyecto, proveerá seguridad y ganancias en tiempo y en dinero a la obra y por esto se hace necesario elegir la opción que más se adapte a las necesidades del proyecto.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, en este trabajo, se propone realizar un seguimiento continuo y detallado en la estructuración y construcción según diseños de un muro de tierra armada (muro 054 de tierra armada ubicado en el kilómetro 23+180 calzada derecha de la vía San Jerónimo - Santafé de Antioquia a cargo de la empresa Consorcio Mar 1), con el fin de obtener más información acerca de este tipo de muros y su respectivo método constructivo con el fin, de analizar la efectividad y validez de los MSE y así determinar, por qué en Suramérica, incluyendo a Colombia, este tipo de muros no es tan comúnmente utilizado tal y como lo expresa Luis Andrés Vera en su tesis de grado, con ayuda del profesor Adolfo Montiel M de la universidad Austral de Chile en su documento “MUROS DE RETENCION DE SUELOS CON SISTEMA DE TIERRA ARMADA” y el por qué, en otros países como por ejemplo España (segundo país en el mundo donde se implementó la construcción de muros de tierra armada en 1971) si lo son.

Además, en el proceso de estudio de este tipo de muros MSE, se realizará un análisis comparativo entre los muros MSE y los muros de concreto reforzado, enfocando la atención, principalmente en su funcionamiento y las posibles causas de fallas en los mismos.

Al final de la investigación, se espera poder nutrir de experiencias y conocimiento a través de la información recopilada en este trabajo, a todas las personas interesadas en este tema, mostrando las ventajas de los muros de contención de tierra armada, en relación con los tradicionales muros de contención de hormigón armado, con el fin de estudiar y visibilizar este tipo de muro y de este modo introducir en los métodos constructivos e investigativos este tipo de muros, buscando obtener el mayor beneficio posible y el mejor aprovechamiento de las propiedades y beneficios que este pueda brindar.



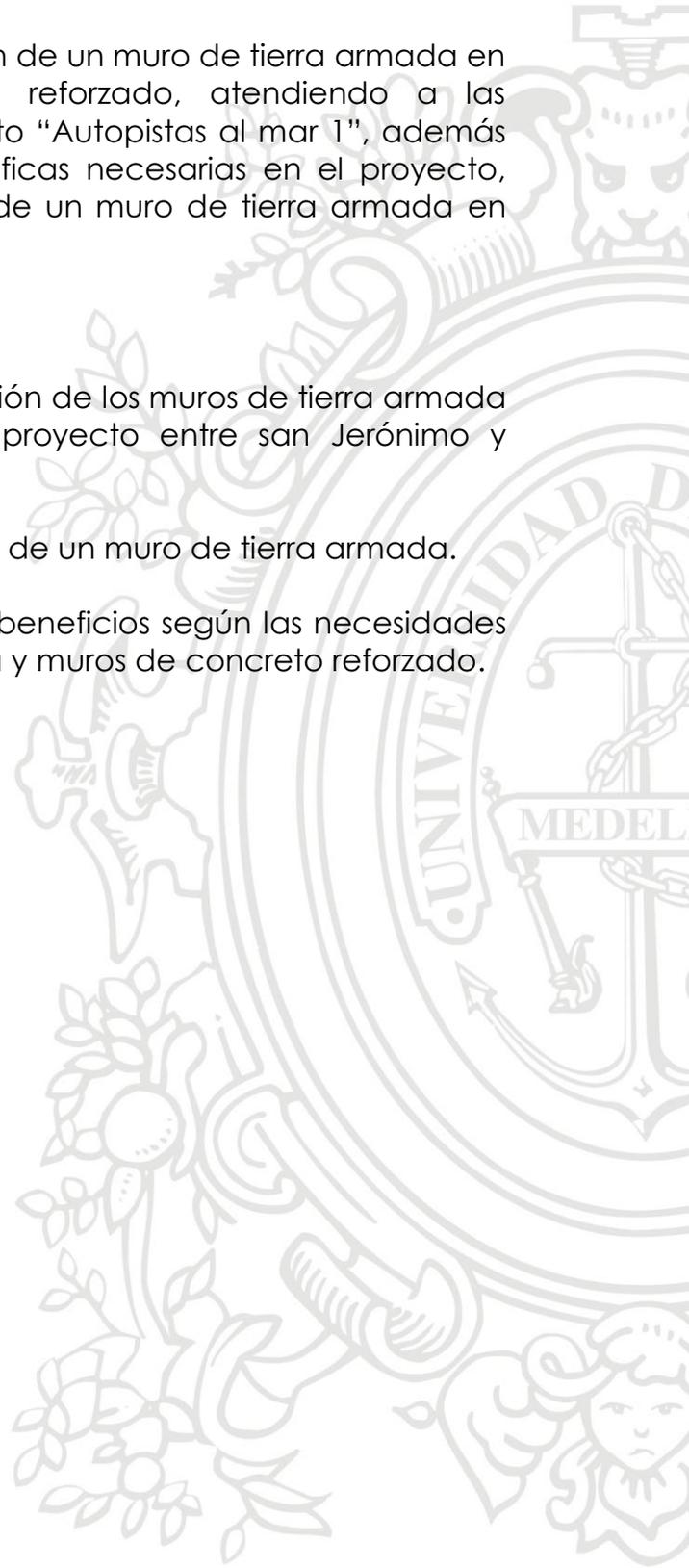
Objetivos

Objetivo general

Evaluar la factibilidad, diseño y construcción de un muro de tierra armada en comparación a un muro de concreto reforzado, atendiendo a las necesidades y particularidades del proyecto "Autopistas al mar 1", además de las condiciones geográficas y topográficas necesarias en el proyecto, para realizar la elección de construcción de un muro de tierra armada en lugar de un muro de concreto reforzado.

Objetivos específicos

- Determinar la viabilidad de construcción de los muros de tierra armada según la geografía del tramo del proyecto entre san Jerónimo y Santafé de Antioquia.
- Determinar los costos de construcción de un muro de tierra armada.
- Realizar un comparativo de costos y beneficios según las necesidades de obra entre muros de tierra armada y muros de concreto reforzado.



Marco Teórico

Teniendo en cuenta que el proyecto de construcción vial "Autopistas al mar 1", representa grandes retos a lo largo de su trazado y su paso por las diferentes unidades funcionales del proyecto, puede establecerse que uno de los retos más representativos de este proyecto, es el trazado propuesto por los diseñadores, el cual busca que el trazado vial, tenga una velocidad de diseño de 80 km/h, por lo cual se requiere tramos largos y sin muchas pronunciaciones en las curvas, buscando que estos tramos se conviertan en ejes viales rápidos, que ayuden a generar gran desarrollo al país.

Con el fin de cumplir con el trazado y velocidad de diseño propuesto, se hace necesario que el trazado vial a construir, se construya al costado derecho de la vía existente en el sentido Medellín -Santafé de Antioquia, donde actualmente se encuentran muchos voladizos que circundan la rivera del río Aurra, gracias a la geografía montañosa de la zona y por circundar una cuenca hidrográfica, por lo cual se hace necesario la construcción ya sea de puentes o de muros, para poder construir la nueva calzada de este proyecto.

Con el fin de dar solución a estos retos, se plantea como opción válida, la construcción de muros mecánicamente estabilizados, que según se indica en el documento "MUROS DE RETENCION DE SUELOS CON SISTEMA DE TIERRA ARMADA" de Luis Andrés Vera en su tesis de grado, esta "Tecnología de Suelos Mecánicamente Estabilizados (conocida también por sus siglas en inglés MSE, de "Mechanically Stabilized Earth", o como TEM, por "Tierra Estabilizada Mecánicamente", según el Manual de Carreteras del MOP (chile) fue desarrollada en Francia, hace más de 40 años, como una alternativa técnica y económica a la solución tradicional de muros de contención de hormigón armado".

Para la época, "el Ingeniero francés M. Henri Vidal estuvo investigando teóricamente y con ensayos a escala la confección de terraplenes reforzados con bandas. Como este material se comportaba como un material con fricción y cohesión (lo que permitía no sólo que el terraplén aceptara grandes cargas, sino que aceptara cortes verticales de gran altura sin obras de contención), el gobierno francés se interesó en él y lo apoyó decididamente con consultores geotécnicos de relevancia internacional y mediciones de laboratorio a escala natural".

En los muros de tierra armada, la fricción desarrollada entre el suelo y las armaduras permite tomar la componente horizontal del empuje, permitiendo dejar las paredes verticales sin elementos de contención. La pared vertical es cubierta generalmente con placas prefabricadas de hormigón, de 1,5 m x 1,5 m x 0,15 m, que están apernadas a las armaduras y cuelgan de ellas. Su labor es de protección a la erosión por aguas lluvias y a eventuales desprendimientos locales".

“La invención de este sistema de reforzamiento de suelos cambió drásticamente el diseño y la construcción de los muros de contención y de los estribos de puentes en los proyectos de Ingeniería Civil, y permitió la expansión internacional de la tecnología a través de la creación de empresas especialistas locales. De Francia, se extendió a España, Canadá (Reinforced Earth) EEUU, Japón y hoy está presente en más de 35 países incluyendo a Chile”.

Según la revista Bit, en su edición especial de mayo del 2003, habla de la importancia y tendencia de este tipo de muros, expresando que “Es una tecnología tan presente en los países desarrollados (Estados Unidos, Canadá, Francia, España, Gran Bretaña, Japón, etc.) que la mayoría de los pasos a desnivel y grandes estructuras viales son efectuados con ella. Incluso, en casi todos los textos modernos de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones se expone con más o menos detalles esta tecnología, y sus obras son tema de muchas publicaciones técnicas de nivel mundial”.

En Colombia, este tipo de muros no son muy comúnmente utilizados, pero sin embargo existe la reglamentación pertinente para este tipo de muros, que establecen las consideraciones de diseño y construcción de estos muros. La normativa que los rige, es la norma colombiana de diseño de puentes CCP-14 del Invias en la sección 11.

Clasificación de muros de suelo mecánicamente estabilizado

El comportamiento de los suelos mecánicamente estabilizados, como un material híbrido de suelo y armadura, depende en forma directa de las propiedades de sus componentes. Debido a que el suelo se limita a una determinada calidad, es el tipo y naturaleza de la armadura lo que define el comportamiento del sistema, al depender de su rigidez la magnitud de los esfuerzos y deformaciones en el muro. Esta situación hace que la norma AASHTO clasifique los sistemas TEM en inextensibles (acero) y extensibles (geosintéticos, geogrietas, geomallas, etc.).

Muros con armadura extensible (materiales plásticos)

Los muros TEM con armadura extensible son aquellos en que la deformación en ruptura de su armadura es mayor que la deformación de falla del suelo, para condiciones de operación similares.

Ejemplos: Armaduras compuestas por geotextiles de polipropileno, polietileno o poliéster, armaduras de geogrietas de alta densidad de polipropileno, polietileno, armaduras de PVC u otros plásticos.

Tipos y clasificación de muros con armadura extensible **Geoceldas**

Las geoceldas como sistema de retención de taludes, éstas funcionan restringiendo y reforzando el material de relleno produciendo una masa estructural uniforme y flexible. Ésta resiste las presiones laterales y mantiene su integridad natural debido a las fuerzas de fricción producidas entre las capas sucesivas de éste.

Pueden ocurrir deformaciones significativas del subsuelo sin pérdida de la integridad estructural. El mecanismo piel es completamente innecesario debido a que las celdas exteriores del macizo es posible rellenarlas con tierra para ayudar al crecimiento de vegetación natural sobre ella. Si se utilizan las geoceldas como refuerzo de un terraplén, éstas aumentan su resistencia al corte y su rigidez, debido a la oposición de las paredes de las celdas adyacentes y a la interacción de la fricción entre el material de relleno y las paredes. Bajo cargas el sistema genera importantes fuerzas de confinamiento lateral y de fricción entre las paredes de las celdas y el suelo. Entre los usos más comunes que se le han dado a este método es sin duda la utilización como estabilizante de base de pavimento, muros de contención, protección de canales y control de erosión.

A continuación, se hace una pequeña descripción de otro tipo de muros con armaduras extensibles.

Geotextil

El geotextil se puede utilizar de dos maneras diferentes, con o sin piel (paramento de recubrimiento).

En este caso el geotextil se coloca alternadamente entre caras de suelos aumentando la resistencia a la tracción y disminuyendo la compresibilidad del material compuesto. La piel se utiliza solamente como protección contra el medio ambiente o contra el vandalismo, pero no constituye un elemento estructural de la masa reforzada.

Las estructuras más comunes que se realizan con geotextil son los muros de contención y la estabilización de taludes.

La característica más importante de éstos son su alta permeabilidad, permitiendo la entrada o salida a través de él de agua, sin arrastrar el material fino del relleno del macizo.

Tiene una alta resistencia mecánica a la tracción, al punzonamiento y a la rasgadura; es estable ante una carga constante, flexible, y tiene un elevado punto de fusión.

La nueva tecnología en geotextiles utiliza el tipo textil no tejido debido a su comportamiento isotrópico con respecto a la resistencia a la tracción.

Muros con armadura inextensible (acero)

Los muros TEM con armadura inextensible son aquellos en que la deformación en ruptura de su armadura es menor que la deformación de falla del suelo, para condiciones de operación similares.

Ejemplos: Armaduras de acero galvanizado o sin galvanizar tipo barra, armaduras de acero galvanizado o sin galvanizar tipo malla.

Descripción de un muro de tierra armada

Un muro de tierra armada, se compone estructuralmente principalmente de placas de hormigón prefabricadas, refuerzos poliméricos y suelos de relleno, según indicaciones del diseñador, como se muestra en la *figura 1*.

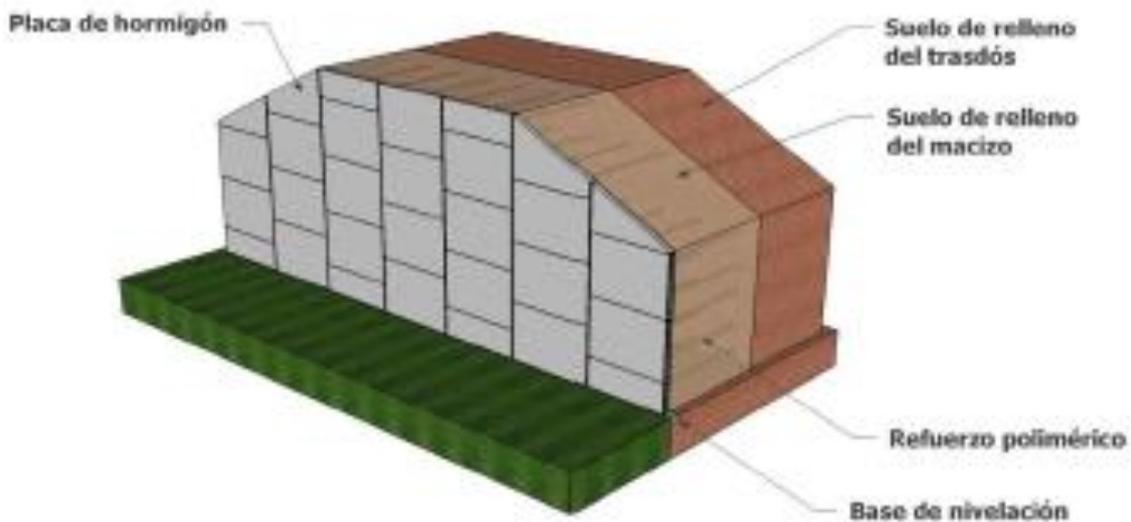


Figura 1. Esquema de muro estabilizado mecánicamente.

Técnicamente, se definen estructuras de suelo reforzado, como aquellas realizadas a base de refuerzos instalados horizontalmente dispuestos entre capas de suelo colocadas y compactadas bajo condiciones y controles estrictos, que se completan con un paramento semiflexible, que está compuesto por placas prefabricadas de hormigón de alta resistencia, con el objeto de retener el suelo entre las capas de refuerzo y proteger al relleno frente a la erosión.

Además, los muros de suelo reforzado, se caracterizan, por ser estructuras de contención fiables, económicas, de fácil montaje y de presentación estética agradable, tal y como se muestra a continuación.

El principio de funcionamiento, es la interacción suelo-refuerzo, que aumenta la propia capacidad del suelo de relleno para resistir cargas. Las presiones verticales en el macizo reforzado generan empujes horizontales, que son resistidos por los refuerzos (que se anclan en el propio macizo), creando un bloque de suelo reforzado estable.

En función de esto, el suelo y sus refuerzos funcionan como un material compuesto para resistir las cargas actuantes sobre el mismo, transformándose en un muro de gravedad o bloque rígido que contiene los empujes del terreno retenido y, además, resiste las cargas externas actuantes.

En la etapa de diseño de este tipo de muros, es necesario verificar, tanto la estabilidad externa como la interna.

Para comprobar la estabilidad externa se considera el bloque de suelo reforzado como un muro de gravedad y en él se estudia su estabilidad frente al vuelco y al deslizamiento. Para el caso de la verificación de la estabilidad interna, se debe comprobar la resistencia a la tracción del refuerzo colocado en el suelo.

Metodología

Con el fin de realizar el análisis comparativo entre los muros de tierra armada y los muros de concreto reforzado, se establecerán las metodologías de diseño de cada uno de los muros y se discutirá sobre las similitudes y diferencias de ambos diseños, con el fin de obtener según las condiciones y necesidades del proyecto, cual es la opción que mejor se acomoda a estas necesidades.

Metodología de diseño

Para la construcción del muro de tierra armada del km 23+180, se estableció según diseño utilizar los siguientes materiales:

Material de relleno

Desde el punto de vista del diseño, los suelos de relleno vienen definidos por sus características mecánicas: densidad máxima y mínima, ángulo de rozamiento interno y cohesión así:

Macizo reforzado

- Densidad máxima $\gamma_{1Máx} \leq 23 \text{ kN/m}^3$
- Ángulo de rozamiento interno $\Phi_1 \geq 34$

Relleno del trasdós

- Densidad máxima $\gamma_{2Máx} \leq 23 \text{ kN/m}^3$
- Ángulo de rozamiento interno $\Phi_2 \geq 34^\circ$

Además, el suelo del macizo reforzado debe cumplir las siguientes características físico-químicas, según las normativas AASTHO.

Características	VALORES LÍMITE
Contenido de materia orgánica	$\leq 100 \text{ mg/ kg } (\leq 1 \%)$
Sulfatos solubles (SO ₄)	$\leq 2000 \text{ mg/ kg } (\leq 0.2 \%)$
pH	de 4.5 a 9

Refuerzos

Los refuerzos utilizados para el presente proyecto son bandas poliméricas que consisten en tiras de poliéster hilado de alta tenacidad cubiertas por una camisa de polietileno para dar protección y garantizar la interacción suelo-relleno.

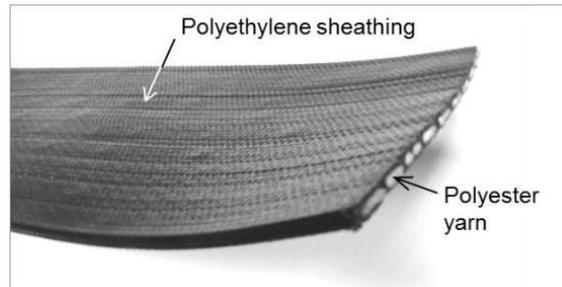


Figura 2. Banda polimérica de refuerzo

Las bandas poliméricas a utilizar en el presente proyecto serán V-30, V-50 y V-70, con una fuerza de rotura máxima a corto plazo de 30, 50 y 70 kN, respectivamente.

Placas

Son escamas de hormigón armado prefabricadas, de dimensiones vistas $1,50 \times 1,50 \times 0,14$ m. El ancho teórico de cálculo es de 1,50 m. La separación vertical típica entre dos capas de refuerzo es de 0,75 m, salvo en coronaciones, donde se puede disminuir a 0,375 m entre las dos últimas capas. El hormigón utilizado es tipo H-35 y las armaduras de refuerzo de acero corrugado de 420 MPa. El recubrimiento en la cara oculta será de 50 mm.



Imagen 1. Placa prefabricada de concreto.

Además de utilizar los materiales de construcción determinados anteriormente, y con el fin de que los muros mecánicamente estabilizados respondan adecuadamente a las necesidades que se requieran, es necesario que este sea estable, tanto internamente, como externamente. Por esto, desde la etapa de diseño de muros de suelo reforzado, es necesario realizar las siguientes verificaciones pertinentes, así:

Diseño.

El diseño se hace según la norma colombiana CCP-14 y la norma sismorresistente NSR-10.

El cálculo se realizará mediante MS Excel, mediante el método Load and Resistance Factor Design (AASHTO LRFD 2012), en el cual para cada estado límite solicitado, debe satisfacer la siguiente expresión:

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n$$

Donde:

η_i = Modificador de carga, definido como igual a 1

γ_i = Factor de Carga

Q_i = Carga Aplicadas

ϕ = Factor de Resistencia

R_n = Resistencia nominal

Las comprobaciones que se tienen que realizar para validar el cálculo del muro de suelo reforzado son:

Verificación de la geometría

Empotramiento mínimo o entrega

Para la presente estructura y de acuerdo a la normativa, se adopta una profundidad mínima de empotramiento de un 20% de la altura del paramento (es decir, $H/20$). Sin embargo, la profundidad final será función de la capacidad portante del suelo de cimentación.

Longitud mínima del bloque

De acuerdo a la normativa de referencia, la longitud mínima de refuerzos debe ser igual a $0,70H_m$, donde H_m la altura mecánica del macizo, según el siguiente esquema:

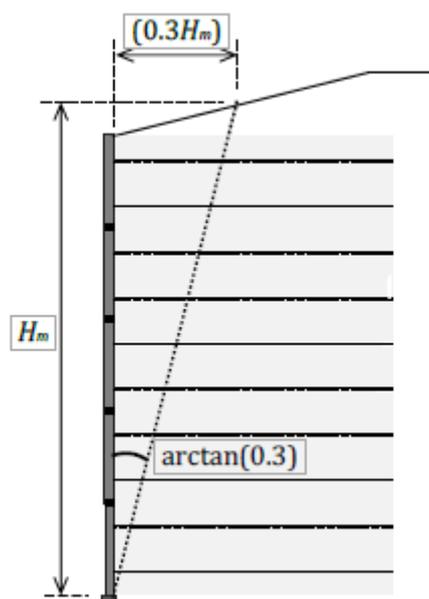


Figura 3. Longitud mínima del bloque.

Cálculo de estabilidad externa.

El análisis de estabilidad externa consiste en verificar el comportamiento del muro ante potenciales mecanismos de falla externa. Para este análisis y bajo el enfoque del método de análisis simplificado, el muro se considera como un bloque rígido al igual que un muro tradicional.

Los mecanismos básicos que deben considerarse y verificarse son:

- Deslizamiento en la base.
- Excentricidad o Vuelco.
- Capacidad portante o Hundimiento de la cimentación.

La configuración de cargas típica para el análisis de Estabilidad Externa es la siguiente:

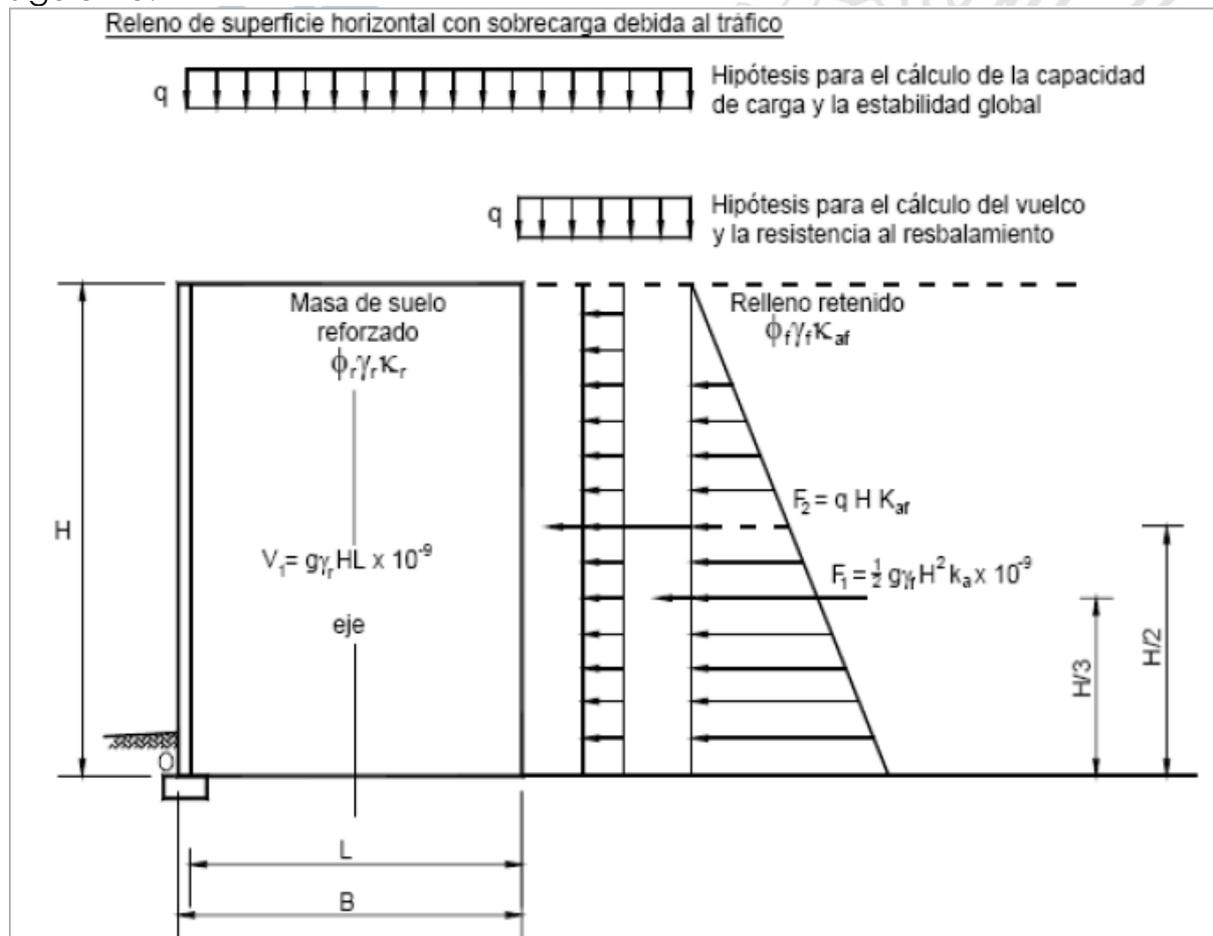


Figura 4. Estabilidad externa para un muro con relleno de superficie horizontal y sobrecarga debida al tráfico.

Deslizamiento en la base

Se realizará la comprobación bajo la hipótesis de zapata soportando carga horizontal.

Se tiene que comprobar que la resultante de los empujes horizontales, no supere la resistencia desarrollada en la interfaz macizo-cimentación, tanto dentro del macizo, como en el suelo de cimentación.

Es necesaria la verificación de la siguiente ecuación para todas las combinaciones de cargas:

$$R_H \leq \gamma_t R_V \tan(\phi)$$

R_H : valor de diseño de la componente horizontal de las acciones aplicadas al macizo de suelo reforzado;

R_V : valor de diseño de la componente vertical;

ϕ : es el ángulo de rozamiento interno;

γ_t : es el factor de seguridad al deslizamiento cimentación, para este caso es 0,9.

Excentricidad o vuelco

Se debe verificar que la resultante vertical de las fuerzas de reacción esté ubicada dentro de una distancia central inferior a un valor, definido por la norma según la combinación de acciones en que estemos, de la siguiente manera:

- Excentricidad estática de la base del muro ($\leq L/3$)
- Excentricidad sísmica de la base del muro: Considerando un factor de sobrecarga de uso de 0,5, la excentricidad sísmica debe ser $\leq 8L/10$

Cálculo de estabilidad interna.

Consiste en la evaluación de la superficie de falla en el interior de la masa de suelo reforzada, donde se verifican las tensiones entre la masa de suelo y el refuerzo a las distintas alturas en que éste se encuentra, es decir en cada nivel de refuerzo.

Los principales modos de falla considerados en el análisis interno, y que deben ser controlados en el diseño, son los siguientes:

- Falla por elongación o ruptura de las bandas de refuerzo, donde las fuerzas de tensión en los elementos de refuerzo son tan grandes que se estiran de forma excesiva o se rompen, generando grandes deformaciones y el posible colapso de la estructura.
- Falla por arrancamiento, donde las fuerzas de tensión en los elementos de refuerzo son mayores que la adherencia banda-suelo de relleno, es decir, mayores que la fuerza necesaria para arrancar el refuerzo de la masa de suelo reforzada.

El diseño debe garantizar que bajo cualquier estado límite de falla, no se produzca la ruptura ni el arrancamiento de los refuerzos.

Para este análisis se divide al macizo en dos zonas: la zona activa y la zona resistente.

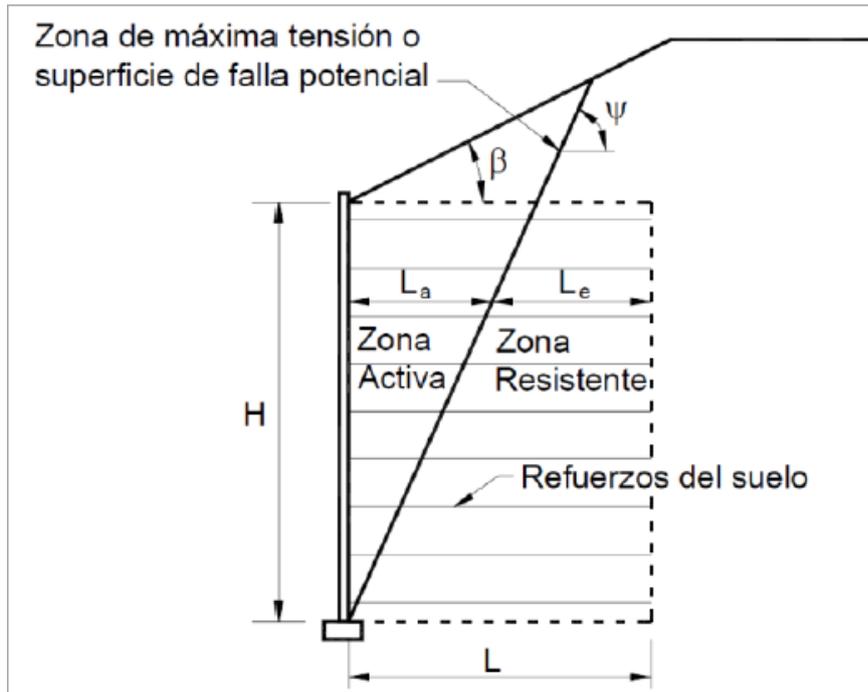


Figura 5. Ubicación de la superficie de falla potencial para el diseño por estabilidad interna de los muros de suelo estabilizados mecánicamente.

- Zona Activa: Es la zona situada detrás del paramento que corresponde a la cuña de suelo que necesita ser estabilizada.
- Zona Resistente: Es la zona situada entre la zona activa y la parte trasera del macizo en la que se anclan las armaduras de refuerzo. Esta zona transfiere al suelo progresivamente el esfuerzo de tracción desarrollado en la zona activa, por interacción entre la armadura de refuerzo y el suelo de relleno.

El esfuerzo de tracción desarrollado en las armaduras de refuerzo alcanza un máximo en la línea que separa la zona activa de la zona resistente: línea de máximas tracciones.

Para una profundidad dada, la presión horizontal σ_h se obtiene a partir de la presión vertical σ_v por la relación:

$$\sigma_h = k\sigma_v$$

El coeficiente K (coeficiente de empuje del suelo de relleno), es variable en función de la profundidad de la capa de refuerzo.

La presión vertical σ_v se calcula para cada capa de acuerdo a la teoría de Meyerhof, en función de las cargas verticales sobre dicha capa y de las fuerzas horizontales actuantes hasta ese nivel.

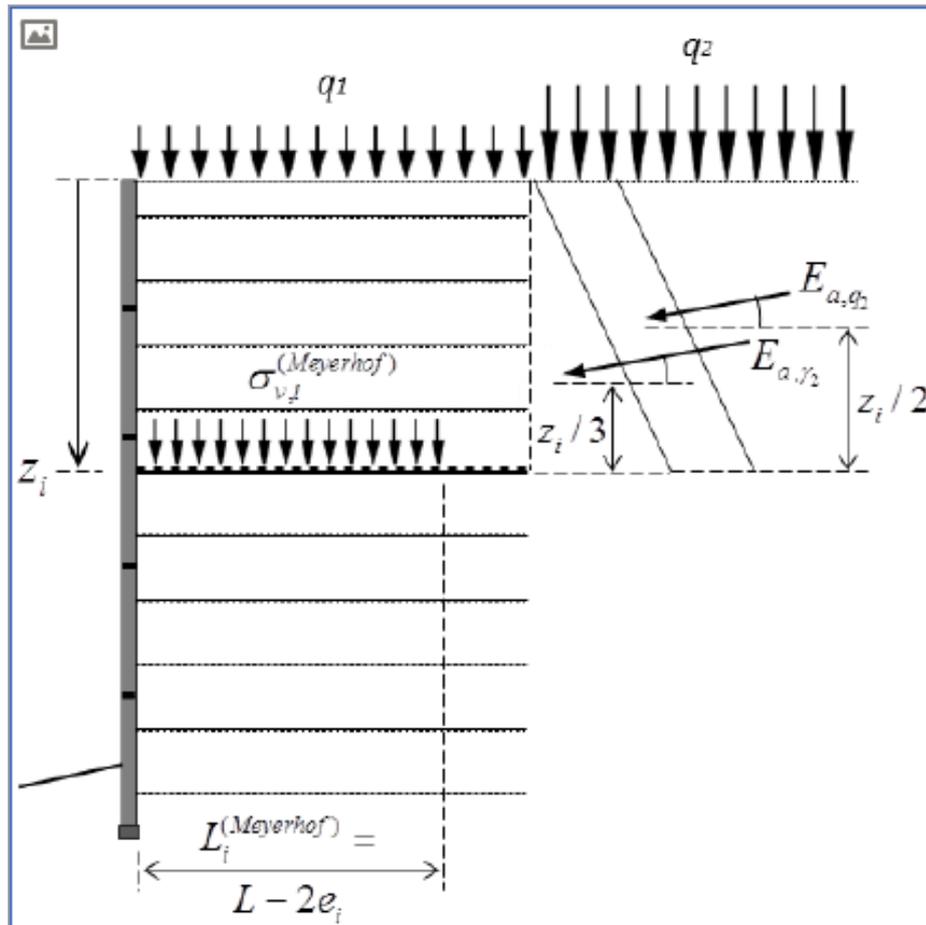


Figura 5. Presión vertical en una capa según la teoría de Meyerhof.

La ecuación básica que entrega la fuerza estática actuante es:

$$T = \sigma_h * S_v * b_p + \Delta\sigma_h * S_h * b_p$$

Donde:

S_v : es la separación vertical de los refuerzos;

b_p : es el ancho de la placa;

S_h : es la tensión horizontal en el nivel analizado;

$\Delta\sigma_h$: es el aumento de tensión debido a sobrecarga, sólo para el cálculo a tracción.

Resistencia a la tracción

El coeficiente de Tracción se define, en las zonas de máximo esfuerzo, de la siguiente manera:

$$T_{max} \leq \phi T_{al} * R_c$$

Donde:

T_{max} : es la carga mayorada aplicada al refuerzo y a la conexión

ϕ : es el factor de resistencia para la tensión del refuerzo

T_{al} : es la resistencia nominal de diseño a largo plazo del refuerzo

R_c : es la relación entre el ancho y la separación de los refuerzos

Además de los análisis, anteriormente mencionados, es necesario realizar un análisis sísmico, según la NSR 10, para tener mayor control sobre la estructura a construir.

Finalmente cabe recordar que el diseño de este tipo de muros, debe ceñirse, tanto a las especificaciones de la NSR 10, como a la norma colombiana de diseño de puentes CCP-14 del invias.

Por otra parte, el método constructivo de un muro de concreto reforzado tipo ménsula, tiene otras variables a considerar, tanto en la etapa de diseño, como en la etapa de construcción del mismo. Algunas de estas variables, son por ejemplo, el tipo de concreto a utilizar según diseño (Resistencia del mismo), el tiempo de fraguado del concreto para poder continuar con los demás módulos de un muro si es necesario y la cantidad de personas que se necesitan para el armado del acero y su disposición de diseño.

Comparativo entre muro de tierra armada y un muro de concreto reforzado

Con el fin de realizar un análisis comparativo entre los dos tipos de muros que se mencionaron anteriormente, se analizaran las necesidades que requiere un muro de concreto reforzado de tipo ménsula. Tomando como ejemplo el muro del PK 23+720 del proyecto "Autopistas al mar 1" el cual, en tamaño longitudinal, tiene medidas aproximadamente iguales.

Según diseño, la cimentación del muro del PK 23+720, se debe realizar sobre terrenos Depósitos Coluviales (QT o QCD).

Al igual que en un muro de suelo mecánicamente estabilizado, para un muro de concreto reforzado, es necesario realizar algunas validaciones, como lo son:

- Comprobaciones a vuelco, deslizamiento y hundimiento
- Estabilidad interna del muro

Comprobaciones a vuelco, deslizamiento y hundimiento

Se realizan las comprobaciones a vuelco deslizamiento y hundimiento con comportamiento rígido. Se utilizan los factores de seguridad recogidos en la NSR-10 para validar el diseño.

Dimensionamiento interno del muro

Se dimensiona y valida la resistencia estructural del muro de hormigón armado con las comprobaciones y factores de la ACI. Estableciendo las dimensiones y armado finales del muro.

Descripción de la estructura

El muro tiene alturas medidas sobre la cara superior de solera de nivelación variables comprendidas entre 4.55 y 7.70 m.

Para la construcción de la cimentación y teniendo en cuenta que la misma se realiza sobre terrenos Depósitos Coluviales (QT o QCD), por parte del diseñador se recomienda realizar un saneo de pedraplén para homogeneizar y minimizar los asientos.

Dimensionado y modelado de la estructura

Se dimensiona una estructura de contención de tipo muro ménsula. El muro se dimensiona con alturas variables para optimizar la longitud de los refuerzos.

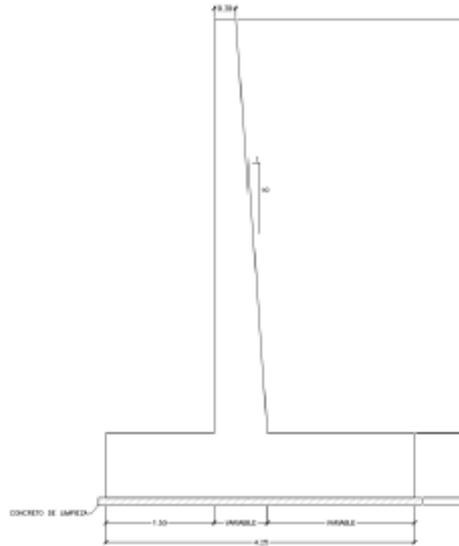


Figura 6. Esquema de muro tipo ménsula.

Características de los materiales del cálculo

Hormigón reforzado

- Resistencia del hormigón: $f_c = 21 \text{ MPa}$
- Resistencia del acero: $f_y = 420 \text{ MPa}$
- Densidad del hormigón: $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$

Relleno de trasdós de estructuras

- Rozamiento interno del relleno: $\phi = 33^\circ$
- Cohesión del terreno: $C = 10 \text{ kN/m}^2$
- Densidad del relleno: $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

Consideración de cargas

Se consideran las siguientes acciones aplicadas sobre la estructura de contención:

- Peso propio
- Empuje de tierras
- Cargas sísmicas
- Sobrecarga de tráfico

A continuación, se describe cada una de las cargas consideradas:

Peso propio

El peso propio de la estructura se basa en las densidades establecidas.

Empuje de tierras

El empuje de tierras se determina con el coeficiente de empuje activo en base a los parámetros de relleno de trasdós.

Cargas sísmicas

Para el estudio de la estabilidad externa la estimación de las fuerzas sísmicas de diseño debe tener en cuenta las fuerzas inerciales del muro y adicionalmente a las fuerzas estáticas equivalentes. Las fuerzas inerciales de la masa del muro (PIR) se calculan con base en una masa efectiva asociada al revestimiento más una porción del relleno reforzado en caso de muros mecánicamente estabilizados.

Para el estudio de la estabilidad interna las fuerzas sísmicas son las generadas por la fuerza inercial interna (Pi) y las fuerzas estáticas. La fuerza inercial (Pi) se determina a partir de la masa de la zona activa multiplicada por el coeficiente de aceleración del muro Kh.

Las fuerzas estáticas equivalente se calcula con el método de Mononobe-Okabe (M-O) de acuerdo al literal 11.6.5.3 de la CCP-14 y en base a el coeficiente sísmico (kh).

El cálculo del coeficiente sísmico de aceleración horizontal para el cálculo de las presiones y fuerzas sísmicas laterales del suelo se determina con base en el PGA en la superficie del terreno.

$$h_h = F_{pga} * PGA = A_s$$

El valor de PGA se obtiene de acuerdo al emplazamiento del municipio y el mapa de valores PGA correspondiente a la figura 3.10.2.1-1 de la CCP-14.
PGA= 0,25

Tabla. Valores de F PGA.

Tabla 3.10.3.2-3 — Valores del factor de Sitio, F_v , en el intervalo de períodos de vibración largos del Espectro de Aceleraciones

Tipo de Perfil	Coeficiente de aceleración espectral para período de vibración de 1.0s (Véase la Nota 1)				
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 \geq 0.50$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	véase nota 2	véase nota 2	véase nota 2	véase nota 2	véase nota 2

Notas:

1. Se debe usar una interpolación lineal para valores intermedios de S_1
2. Para el perfil tipo F debe realizarse un estudio de sitio particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda.

Se toma una aceleración de cálculo 0.288 g.

Para el cálculo del muro siguiendo las recomendaciones de la CCP 14 se toma un $k_h = a_c$ y $k_v = 0$.

Sobrecarga de tráfico

La sobrecarga vehicular viene dada por la siguiente expresión:

$$q = \gamma * h_{eq}$$

Siendo h_{eq} una altura equivalente que se extrae de la tabla 3.11.6.4-1 de la CCP14, que se adjunta a continuación.

Tabla. Alturas equivalentes para muros de contención.

Tabla 3.11.6.4-2 — Alturas equivalentes de suelo para carga vehicular sobre muros de contención paralelos al tráfico

Altura del Muro de Contención (mm)	h_{eq} (m)	
	Distancia desde el respaldo del muro al borde del tráfico	
	0.0 mm	300 mm o más
1500	1500	600
3000	1000	600
≥ 6000	600	600

Fuente: CCP 14

Se considera en este caso una $q=12$ kN/m.

Resultados y análisis

Según las necesidades del proyecto en cuanto a la construcción de muros a lo largo del proyecto, se puede decir que, respecto a la información depositada anteriormente, se puede evidenciar que los requisitos de análisis de diseño, sobre todo de características de los dos tipos de muros en cuestión, son relativamente similares, por lo cual se debe analizar que otros factores influyen en la decisión de qué tipo de muro utilizar en una construcción que lo requiera.

Por una parte, según literatura sobre construcciones civiles, los muros en concreto reforzado son estables y económicos según su altura. Es por esto, que uno de los factores influyentes en tal determinación y elección de un muro u otro en un mismo lugar, depende sobre todo de la altura de los mismos, dado que un muro en concreto reforzado, puede presentar fallas de estabilidad para grandes alturas (Mayores a 8 m). Para el caso de los muros de tierra armada, tal como se indicó en el marco teórico, este tipo de muros llegan a ser estables y seguros hasta alturas de 50 metros desde la cota de cimentación definida en planos, además, otro de los aspectos que se debe tener en cuenta, es el comportamiento no rígido de los MSE, dado que esto les permiten soportar grandes deformaciones en contraste al muro de concreto reforzado, y su comportamiento frágil.

En cuanto al proceso constructivo, según algunos constructores consultados sobre el tema, resulta más fácil y ágil, la construcción de un muro de tierra armada en cuanto a que se puede avanzar a un mayor ritmo, teniendo en cuenta que no se requiere esperar tiempo de fraguado de concretos en obra ya que las escamas son prefabricadas y su encaje unas con otras son muy sencillo, lo cual representa un mayor beneficio económico para el constructor.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que los muros en concreto reforzado, además requieren de buen piso de cimentación y requieren de formaletas especiales, lo cual implica unos trabajos preparatorios que aumentan el tiempo de construcción y mayores costos, mientras que, en el caso de un muro de tierra armada, para la cimentación basta con encontrar material que no sea suelto y tenga buen comportamiento de estabilidad.

En relación a los temas de costos de materiales, los muros de tierra armada también representan una excelente opción, dado que los costos en acero y concreto son muy inferiores a los que requiere un muro de concreto reforzado por metro lineal. Debe tenerse en cuenta en que los muros de concreto reforzado, se caracterizan por ser robustos, con el fin de cumplir con su función, mientras que los muros de tierra armada se caracterizan por ser esbeltos y estéticamente muy agradables.

Toda la información anteriormente mencionada anteriormente, son de alta importancia a la hora de tomar una decisión de qué tipo de muro utilizar, dado que, aunque ambos tipos de muros tienen buenas prestaciones, se deben verificar rigurosamente las necesidades del proyecto, para tomar la mejor decisión y según lo expuesto antes, para el caso de muros de gran tamaño, los muros de tierra armada representan una excelente opción, que resulta viable en todos los sentidos.



Conclusiones

Según recopilación de información literaria y experiencias constructivas de personas del medio de la construcción civil, los muros de tierra armada, no han tomado mucha fuerza en el país, dado que culturalmente, los muros de concreto reforzado han funcionado bien, por lo cual los demás tipos de muros quedan relegados frente a este. Por otra parte, es de amplio conocimiento que, en Antioquia, la topografía de la mayoría de sus municipios es irregular, lo cual representa en el caso de la construcción de vías, grandes retos al intentar cruzar de un lado a otro y mantener las velocidades de diseño que establezcan los diseñadores, por lo cual se podría pensar que estas condiciones serían una gran oportunidad para los muros de tierra armada de ingresar totalmente y establecerse en el país. Sin embargo, culturalmente y por costumbre estas condiciones topográficas adversas se han solventado mediante la construcción de puentes y les han cerrado la puerta a nuevos métodos constructivos.

Aunque falta mucho, para que este tipo de muros se establezcan y más personas puedan conocer acerca de ellos, debe reconocerse que aunque lento, estos se han estado ganando un lugar en las grandes construcciones del país, gracias a sobre todo compañías extranjeras que realizan labores en el territorio colombiano y que por experiencia en esos países conocen bien este tipo de muros y por ello los han introducido al país, hasta el momento con éxito y así día a día, más profesionales toman esta opción de muros en consideración.

Referencias Bibliográficas

- Anónimo. (2015). Norma Colombiana de diseño de puentes: *INVIAS instituto nacional de vías*. Antioquia, Colombia. Recuperado de <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/3709-norma-colombiana-de-diseno-de-puentes-ccp14>
- Luis Andrés Vera (2004). Tesis sobre muros de retención de suelos con sistema de tierra armada. Recuperado de: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2004/bmfciv473m/doc/bmfciv473m.pdf>
- Grupo ARGOS. (2016). 360 en concreto. Blog 360° en concreto. Recuperado de: <http://blog.360gradosenconcreto.com/generalidades-de-los-muros-de-contencion/>
- Corporación de Desarrollo Tecnológico. (2003). Revista bit. Recuperado de: <http://biblioteca.cchc.cl/datafiles/13748.pdf>
- Consorcio mar 1. (2018). Memoria técnica mar 1. Muro MTA 23+180. (MC-1). Recuperado de: Información interna de la compañía
- Consorcio mar 1. (2018). Memoria de cálculo muro 23.72 (UF2.1-CD-41). (versión 4B). Recuperado de: Información interna de la compañía