

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

**“METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS
PRÁCTICOS DE LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

LUIS DANIEL LEÓN SEGURA

TUTOR: M. I. JUAN LUIS UMAÑA ROMERO



MÉXICO, D. F. 2015

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, que con su incandescente luz e infinito amor ha iluminado mi camino y me ha permitido llegar hasta donde hoy me encuentro.

A mis **padres**, por moldearme con tanto esfuerzo, dedicación y sacrificio, mi gratitud por su apoyo y enseñanzas de vida.

A mi esposa, **Diana**, por su enorme cariño e interminables atenciones. Tú eres aquella razón por la cual tengo fuerzas para trabajar día a día; eres la chispa que enciende mi vida y mi mayor motivación para salir adelante.

A mi hermano **Isaac**, por su fraternal apoyo en los momentos más amargos de mi vida. Mi respeto y admiración para su hermosa familia, Gaby y Luisito, ya que en ella veo un modelo palpable a seguir.

Al **M. I. Ieve Adoná Martínez Landa**, por tener en él, más que un jefe o un compañero de trabajo, a un filantrópico amigo. Muchas gracias por compartir tu conocimiento y formarme profesionalmente; agradezco tu invaluable apoyo para hacer posible la realización de este trabajo. Procuraré siempre poner en práctica el buen criterio y juicio ingenieril del que me has dotado, sin dejar de refinarlo y pulirlo.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** por haberme abierto sus puertas y darme la valiosa oportunidad de crecer en muchos aspectos, como el social, el cultural, el físico – deportivo y por supuesto, el académico.

Al **M. I. Juan Luis Umaña Romero**, por sus enseñanzas durante mi vida universitaria y por apoyarme en la realización de este proyecto. No olvidaré sus anécdotas y consejos ya que fueron útiles para no claudicar en uno de los peores momentos de mi vida.

A todos mis amigos en general, con quienes he compartido grandes experiencias. De alguna manera, todos han puesto un granito de arena a través de su grata convivencia para ser la persona que soy ahora.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	1
<i>I.1 Antecedentes.....</i>	<i>2</i>
<i>I.2 Objetivos.....</i>	<i>5</i>
<i>I.3 Alcances.....</i>	<i>5</i>
<i>I.4 Justificación</i>	<i>6</i>
II. MARCO TEÓRICO	7
<i>II.1 Descripción de los geosintéticos</i>	<i>7</i>
<i>II.2 Teoría del empuje</i>	<i>19</i>
<i>II.3 Criterios de diseño</i>	<i>37</i>
III. METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA MUROS A BASE DE GEOSINTÉTICOS EN CARRETERAS	39
<i>III.1 Geometría y topografía</i>	<i>39</i>
<i>III.2 Propiedades físicas y mecánicas de los materiales térreos</i>	<i>43</i>
<i>III.3 Cálculo de estabilidad interna y externa</i>	<i>48</i>
<i>III.4 Asentamientos.....</i>	<i>77</i>
IV. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN	83
<i>IV.1 Procedimiento constructivo.....</i>	<i>105</i>
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
BIBLIOGRAFÍA	118
ANEXO A, PLANOS DE MUROS MECANICAMENTE ESTABILIZADOS CON GEOSINTÉTICOS SELECCIONADOS	120

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

I. INTRODUCCIÓN

Para llevar a cabo la construcción de una carretera es necesario contar, inicialmente, con un proyecto ejecutivo elaborado conforme a la normativa aplicable, sin embargo, en muchas ocasiones algunos aspectos técnicos tienen que modificarse en función del avance de la obra, dado que las condiciones reales generalmente llegan a ser distintas respecto a lo que se planteó en una etapa inicial del proyecto; esto suele suceder a consecuencia de diversos factores ya sea de tipo, técnico, económico, social, ambiental e incluso legal.

Las modificaciones que se realizan al proyecto en el aspecto técnico están encaminadas a dar soluciones que, además de satisfacer las nuevas condiciones, generen ahorros en tiempo o en costo, sin olvidar claro, que proporcionen seguridad para el usuario y la carretera. Estos conceptos son muy importantes en el avance de la obra. Para ello, el ingeniero civil debe valerse de sus conocimientos y capacidades, así como de todos los recursos y alternativas que la tecnología le brinda hoy en día.

Una opción económica y práctica que recientemente se está implementando para las soluciones técnicas en las carreteras es la del uso de geosintéticos, materiales hechos a base de polímeros que en conjunto con las propiedades de los materiales naturales son capaces de mejorar el comportamiento de cortes, terraplenes o pedraplenes, muros, entre otros elementos.

A continuación se explicará el método que debe seguirse para el diseño de muros de contención a base de geosintéticos, acotando el tema con ejemplos de aplicación que se han llevado a cabo en la construcción de la autopista de altas especificaciones Mitla – Entronque Tehuantepec II, localizada en el estado de Oaxaca.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**



Imagen I.2. Segmento de la carretera en su etapa de constructiva a través de la Sierra Madre del Sur

Por otro lado, el uso de elementos que dieran mayor capacidad de soporte como estructuras de contención -tal es el caso de los muros mecánicamente estabilizados- han tenido un gran incremento comprobando su eficacia a través de las experiencias pasadas, las cuales han dado la pauta para una metodología de diseño innovadora.

Estos elementos fueron en un principio de origen orgánico, como en el caso de la *Vía Appia* de la Roma del año 312 a. C., en la cual se llegó a colocar materia orgánica como base o cimentación, para luego colocar baldosas que conformaron el camino, (Tingay & Badcock, 1989). También se sabe que, los primeros caminos construidos por el hombre a base de troncos fueron hechos hace aproximadamente 6000 años en la finalización de la época neolítica de las tierras europeas, (Lay, 1992). Cabe destacar la influencia de la cultura mexicana, pues en las riberas de los lagos que pertenecían a esta civilización se recurría a la creación de chinampas, las cuales eran sistemas de cultivo que se construían sobre las aguas del lago en áreas poco profundas con la finalidad de ganarle terreno a la zona lacustre y así poder cultivar mayor cantidad de alimentos. Se empleaban los ahuejotes, sauces nativos de la región, como base y sostén de la chinampa,

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

posteriormente se elaboraba un marco a manera de tejido empleando cañas o carrizo, luego se rodeaba el tejido con un bordo con el que evitaban que las capas de suelo orgánico se desparramaran; se formaban varias capas del orden de entre 20 y 50 centímetros cada una, (Meza A., 2008).

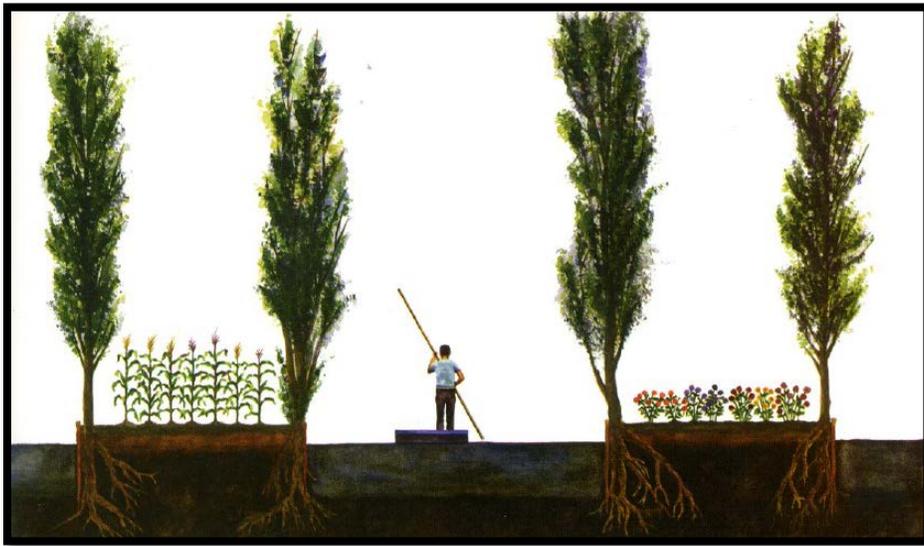


Imagen I.3. Corte esquemático del sistema de chinampas. (Meza A., 2008)

Estos testimonios son prueba del empleo de materiales, mismos que han permitido el aumento de la eficiencia y durabilidad de los caminos construidos en diferentes partes del mundo en diferentes épocas.

Pero no fue sino hasta mediados del siglo XX cuando Japón y Estados Unidos comenzaron el desarrollo de materiales hechos a base de polímeros, los cuales dieron paso a la fabricación de mallas y tejidos, (Cruz Vargas, 2013).

***METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II***

I.2 Objetivos

Como primer punto, se presenta claramente la metodología de diseño aplicada en diferentes casos reales dentro del proyecto “Autopista Mitla – Tehuantepec II” para la construcción de muros mecánicamente estabilizados a base de geomallas.

En segundo término, se verificará la hipótesis del impacto favorable, tanto en costo como en tiempo, al construir los muros mecánicamente estabilizados a base de geomallas, dado que las condiciones del terreno por donde pasa el proyecto son topográficamente muy complicadas.

Como punto final, se desarrollará una fuente bibliográfica útil como guía para el lector proporcionándole una herramienta más, que le permita desarrollar el diseño de muros con características que más adelante se detallarán, de tal manera que pueda conjugar sus conocimientos ingenieriles con este trabajo a fin de obtener una solución óptima para los diseños que realice en el futuro.

I.3 Alcances

El presente trabajo de investigación está enfocado al estudio de muros de contención, los cuales se puedan construir usando la combinación de suelos propios de la ubicación de la estructura con material de origen sintético abarcando el tema del diseño mediante el análisis de estados límite de falla y de servicio, así como del proceso constructivo y tomando en cuenta los aspectos del drenaje en la estructura.

En el capítulo II, el marco teórico del diseño de muros de contención es desarrollado, además, se describen las características generales de los geosintéticos empleados en la construcción de muros de contención.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

El capítulo III presenta la metodología para el diseño de muros a base de geosintéticos en carreteras explicando la relevancia de su geometría y las características topográficas que debe tener el terreno, sobre el cual deberá desplantarse el sistema constructivo. También, enfatiza la importancia de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos a emplear durante el proceso constructivo de los muros. Finalmente, revisa los estados límite de falla y de servicio de estas estructuras de contención.

El capítulo IV es una ilustración a través de ejemplos prácticos de aplicación, ya que, mencionará casos reales implementados en el proyecto “Autopista Mitla – Tehuantepec II”. Explicará el procedimiento constructivo de los muros mecánicamente estabilizados hechos en el proyecto.

El capítulo V muestra las conclusiones de esta tesis, de igual manera, quedan plasmados algunos comentarios respecto a las consideraciones técnicas de diseño en las experiencias constructivas.

I.4 Justificación

El desarrollo de este tema es innovador, ya que, conocemos muy poco de los geosintéticos en México, esto se debe a que este producto no ha tenido mucha difusión en nuestro país como coadyuvante o complemento para reforzar y mejorar el comportamiento mecánico de diversas estructuras como terraplenes y muros de contención.

Este trabajo ha sido realizado para dar una aportación al lector interesado en el uso de esta “relativamente nueva” tecnología y así le permita consultar fuentes más adaptadas a sus necesidades.

II. MARCO TEÓRICO

II.1 Descripción de los geosintéticos

Los geosintéticos son materiales fabricados con base en algunos derivados de la transformación química de sustancias conocidas como **polímeros**, los cuales, son productos obtenidos a partir de la refinación del petróleo. Ejemplo de ello, podemos mencionar el polipropileno, el poliéster, la poliamida y el polietileno, (Geosistemas PAVCO de Mexichem, 2009).

Como se observa en la Imagen II.1, la forma primaria de los polímeros es granular, aunque a veces se puede tener en forma de un polvo fino. Mediante uno o más procesos, estos adquieren forma de láminas, fibras, perfiles, películas, tejidos o estructuras tridimensionales, (Cruz Vargas, 2013).



Imagen II.1. polímeros en su forma primaria,

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Existen materiales, similares a los geosintéticos, fabricados a partir de fibras naturales, tales como el yute, el cáñamo, el algodón, la fibra de coco, entre otros. Estos materiales podrían ser considerados como **geotextiles biodegradables** y algunos son utilizados para la revegetación de taludes, (Amigó, Salvador, Sahuquillo, Llorens, & Martí, 2008). De la misma manera, podemos encontrar fibras poliméricas naturales en el mercado, como la seda y la celulosa, (Cruz Vargas, 2013).

Por otro lado, se han desarrollado diversos tipos de fibras y estilos de tejidos de geosintéticos; su variedad está en función de las diferentes aplicaciones donde puedan ser empleados, tal como se ilustra de la Imagen II.2 a la Imagen II.5.

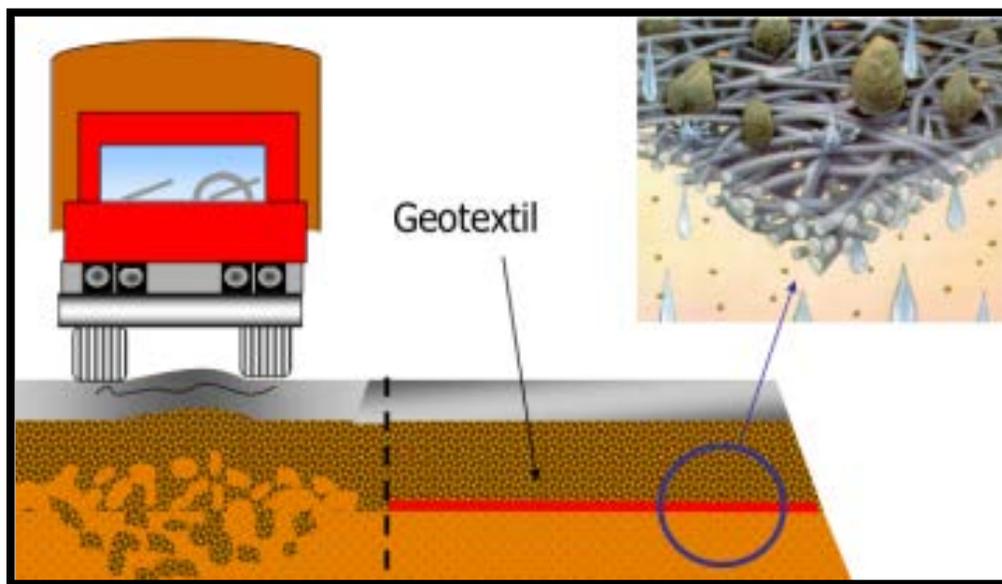


Imagen II.2. Aplicación de los geosintéticos en las vías terrestres

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**



Imagen II.3. Aplicación de geosintéticos en subdrenaje longitudinal



Imagen II.4. Aplicación de geosintéticos en muros mecánicamente estabilizados

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**



Imagen II.5. Aplicación de geosintéticos para prevenir la erosión en ríos

Sin embargo, podemos distinguir tres factores importantes y característicos de cada uno de estos materiales, (Geosistemas PAVCO de Mexichem, 2009):

- **Clase de polímero.** Esto define el material empleado para la fabricación, que puede ser de polipropileno, poliéster, polietileno o poliamida (nylon).
- **Tipo de filamentos.** Significa que, el polímero seleccionado es transformado mediante calor y presión, posteriormente pasa a un molde, de donde, pueden salir fibras o una cinta plana en estado semilíquido, que al enfriarse por aire o agua, el producto del molde es transformado en un elemento sólido pero muy flexible y elongable. Simultáneamente, el material sufre un estiramiento disminuyendo su ancho y espesor además de un ordenamiento interno a nivel molecular aumentando la resistencia de los filamentos en sentido longitudinal.
- **Tipo de proceso productivo,** de los cuales existen dos principales: **los tejidos y los no tejidos.**

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

- a) Para los **tejidos** se trabajan cintas o hilos en un telar, como el que se ilustra en la Imagen II.6, la clase particular del tejido es determinada por la secuencia en que los filamentos son entrecruzados en esta máquina. Un tejido está compuesto por dos cintas, la urdimbre, que va en sentido longitudinal, y la trama, que va en sentido transversal. La urdimbre ingresa al telar a través de separadores y organizadores que ayudan a entretejerla con la trama, la cual es aportada desde un lado del telar; la urdimbre es separada en dos grupos dejando un espacio para dejar pasar a la trama, misma que es transportada por un elemento llamado proyectil. Luego, la urdimbre aprisiona a la trama repitiendo el ciclo para formar el tejido.



Imagen II.6. Proceso de fabricación de geosintéticos tejidos en un telar

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

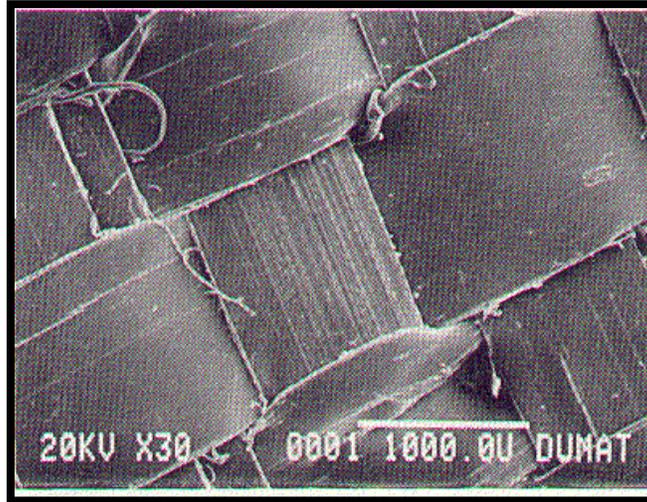


Imagen II.7. Cinta plana

Existen dos diferentes tipos de tejido: el tejido plano, en el cual, las cintas se tejen “una arriba y otra abajo”, como se ve en la Imagen II.7; y por otro lado el tejido canasta, que tiene la característica de usar dos o más urdimbres y tramas de relleno como si fuera una sola cinta. Ver Imagen II.8.

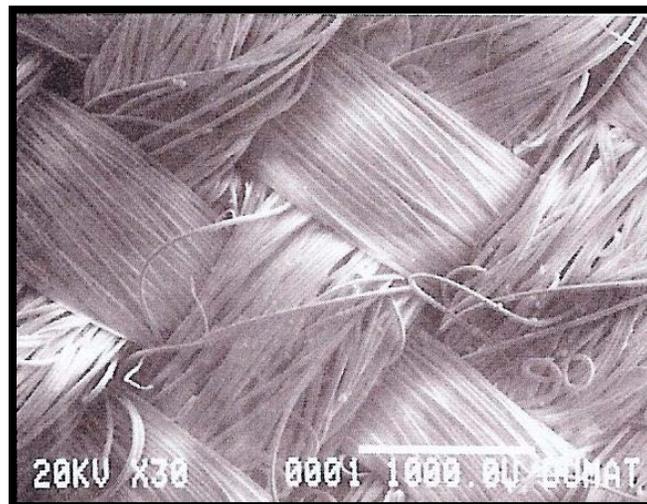


Imagen II.8. Geosintético tejido con más de una urdimbre y más de una trama

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

- b) Para los **no tejidos** existen cuatro pasos básicos en su elaboración: preparación de la fibra, formación del velo, consolidación del velo y tratamiento posterior. Existen tres procesos diferentes de fabricación de geosintéticos no tejidos:



Imagen II.9. Velo formado con fibras

✓ Punzonados por agujas

Son formados a partir de un entrelazado de fibras o filamentos mezclados aleatoriamente dándole forma al velo, el cual pasa a través de un tablero de agujas conocido como máquina punzonadora, ilustrada en la Imagen II.10. La máquina mueve las agujas penetrando en el velo y entrelazando las fibras. La frecuencia de penetraciones de las agujas es la que determina la consolidación del material.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**



Imagen II.10. Máquina punzonadora para entrelazar las fibras del geosintético

✓ **Termosoldados**

La unión o consolidación del geosintético es lograda a través de la fusión de las fibras con la soldadura en los puntos de intersección mediante un calentamiento a temperatura elevada.

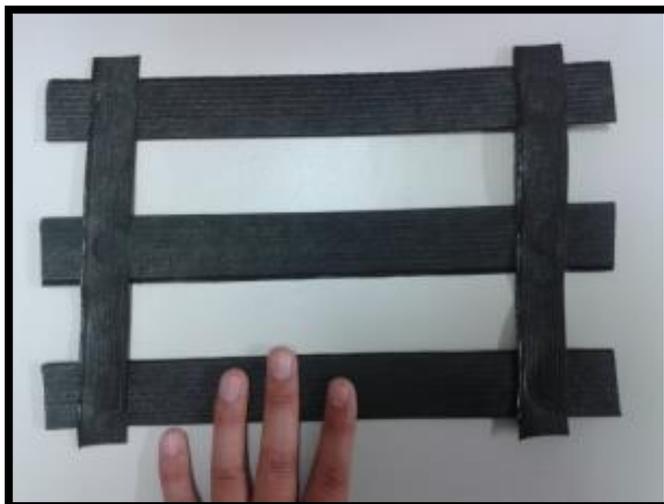


Imagen II.11. Muestra de geosintético termosoldado

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

✓ Químicamente ligados

La incorporación de un aglutinante químico o resinas consigue la unión entre los filamentos del material. En la Imagen II.12, se observan, en forma ampliada, los filamentos de geosintético aglutinados por una resina.

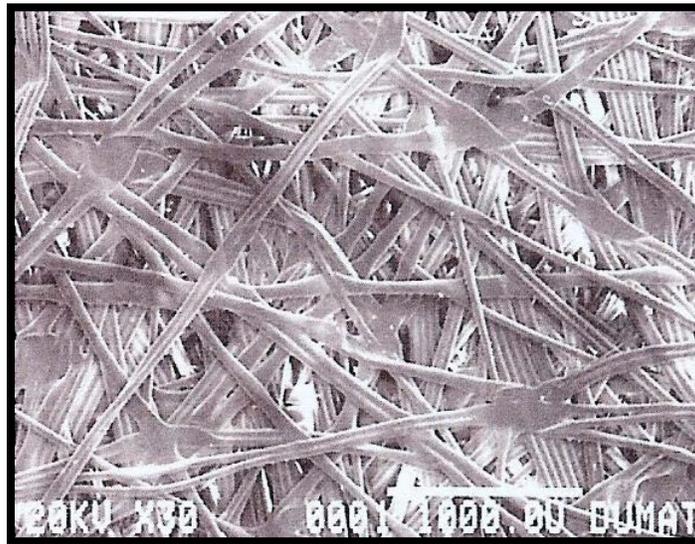


Imagen II.12. Geosintético ligado con resina aglutinante

No es extraño pensar que, después de notar la amplia gama de geosintéticos que existe en el mercado, seguramente hay casos en donde estos pueden sustituir por completo a algunos materiales tradicionales, ya que poseen propiedades ventajosas si los comparamos, (Geosistemas PAVCO de Mexichem, 2009). Algunas propiedades que brindan ventajas frente a otros materiales convencionales son:

- Ligereza
- Ductilidad
- Maleabilidad
- Gran elasticidad

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

- Resistencia mecánica
- Resistencia a agentes químicos, dependiendo del material
- Posibilidad de mejorar sus propiedades mediante aditivos o procesos mecánico – térmicos
- Resistencia al intemperismo, dependiendo del material
- Baja absorción de agua
- Resistencia a la biodegradación, dependiendo del material

Los geosintéticos más comunes utilizados en el campo de la ingeniería civil son los geotextiles, las geomallas, las geomembranas y las georredes.

La geomalla, que es una estructura plana formada por una red que puede ser fijada por extrusión, termofusión o entretejido, tiene como mecanismo fundamental de funcionamiento la fricción, contando con el efecto confinante de las partículas del suelo que se alojan en sus aberturas. Particularmente, este material polimérico está resultando de gran utilidad en el proyecto carretero Mitla – Tehuantepec II, ya que tiene la función de reforzar muros mecánicamente estabilizados.

Comúnmente, las geomallas están elaboradas con polietileno de alta densidad, (HDPE, High Density Polyethylene), son totalmente inertes a condiciones químico – biológicas y cuentan con resistencias a la tensión del orden de los 160 kN/m.

Existen geomallas fabricadas con hilos o tiras multifilamento de poliéster recubierto de un polímero protector al medio ambiente. Sus nodos están soldados a través de la termofusión.

Las geomallas pueden ser de tres tipos, según la forma en que trabajan:

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

- Las geomallas triaxiales, como la que se ilustra en la Imagen II.13, poseen resistencia a la tensión en el sentido de su fabricación, en el sentido transversal a este y además en sentidos inclinados.

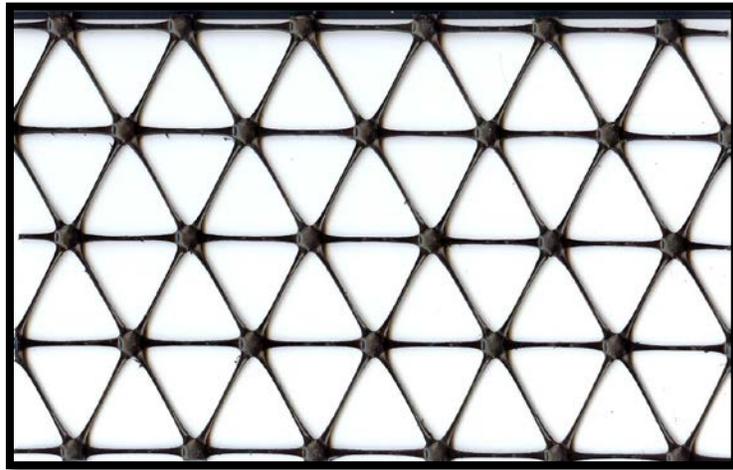


Imagen II.13. Geomalla triaxial extruida

- Las geomallas biaxiales tienen resistencia a la tensión en sentido longitudinal de su fabricación y también en sentido transversal. Ver Imagen II.14.

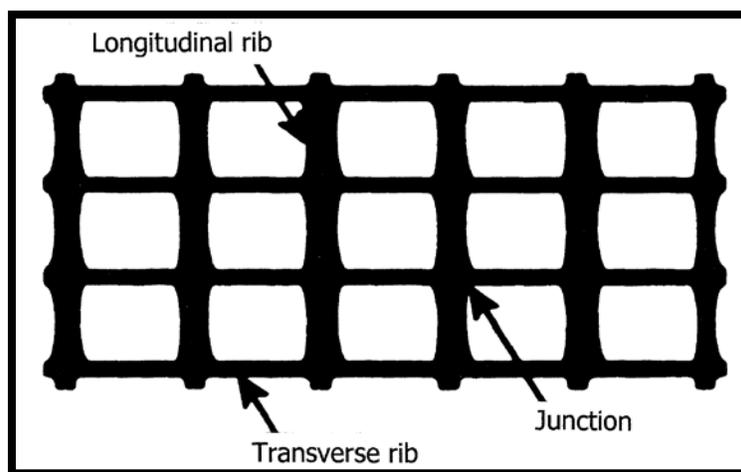


Imagen II.14. Geomalla biaxial extruida

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

- Las geomallas uniaxiales resisten a la tensión únicamente en sentido longitudinal, es decir, en el sentido de su fabricación. En la Imagen II.15 se aprecia este tipo de material.

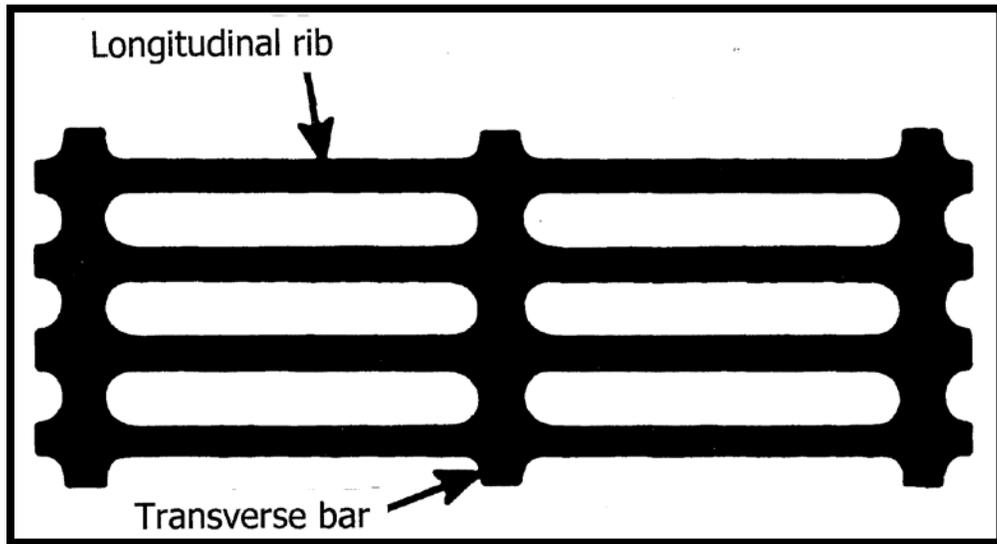


Imagen II.15. Geomalla uniaxial extruida

Existen dos tipos de geomallas en función de su flexibilidad:

- Las geomallas rígidas que son fabricadas mediante procesos de pre-esfuerzo del polímero, primordialmente polipropileno y HDPE.
- Las geomallas flexibles están fabricadas con poliéster mediante procesos de tejido de filamentos de alta tenacidad previamente sometidos a un alto grado de orientación molecular.

II.2 Teoría del empuje

Las estructuras de contención, como aquellas que son de interés en este trabajo, son elementos constructivos utilizados para soportar la presión que ejerce la masa del material retenido en su respaldo. Algunas estructuras son diseñadas para un breve periodo de vida con la finalidad de permitir la ejecución de una obra de más importancia, como la excavación de una cimentación. En cambio, otras estructuras están pensadas para que tengan un largo periodo de vida útil. Pero sin importar el tiempo de utilidad de cada muro, podemos clasificarlos en función de la capacidad de deformación que tengan; la primera clase son estructuras rígidas, ilustradas en la Imagen II.16. La segunda clase son estructuras flexibles, las cuales tienen mayor capacidad de deformación, ver Imagen II.17.

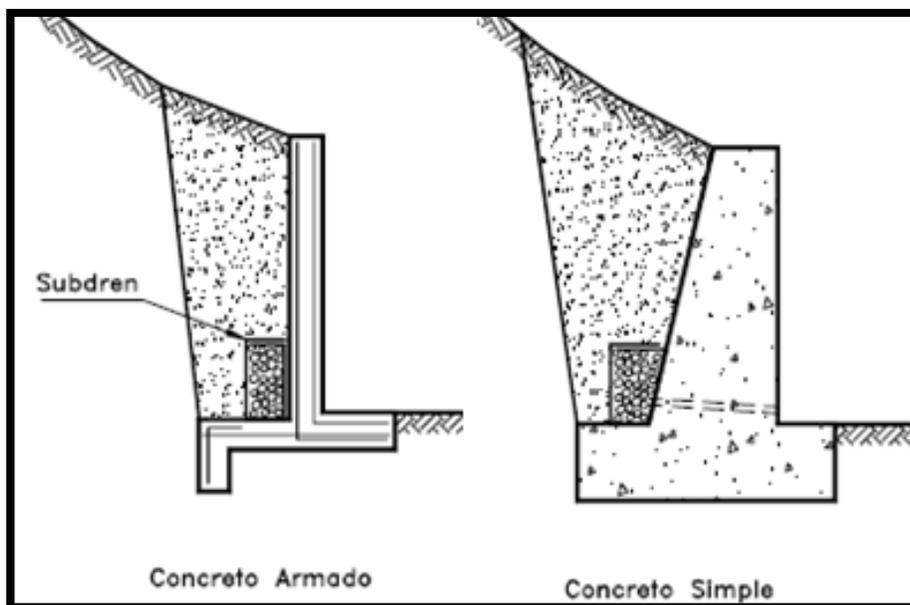


Imagen II.16. Muros rígidos

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**



Imagen II.17. A la izquierda, una tablestaca. A la derecha, un ademe que permite una excavación

Los muros mecánicamente estabilizados con geosintéticos caen en la clasificación de estructuras flexibles, ya que tienen gran capacidad de deformación ante las diferentes acciones a las que son sometidos.

Los materiales de los muros tradicionales suelen ser el concreto o mampostería, mientras que en el caso de los ademes, el material suele ser el acero e incluso la madera.

En la actualidad, se emplean los geosintéticos teniendo la función de reforzar el suelo con el que se construyen estos muros. Ver Imagen II.18.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**



Imagen II.18. Construcción de muro geosintético

El diseño y construcción de un muro requiere del conocimiento de las fuerzas que actúan en su estructura ocasionadas por la presión lateral de la masa retenida, (Braja, 2001).

El primer intento para calcular la presión de tierras sobre elementos de soporte con metodología científica fue realizado por Ch. A. Coulomb, (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2013).

Se entenderá por empuje a la resultante de las presiones laterales ejercidas por el peso propio del suelo retenido sobre una estructura de contención, pudiendo haber sobrecargas complementarias que aumenten la magnitud del empuje, tales como fuerzas debidas al agua, subpresiones, vibraciones, impactos, sismos, entre otras, (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2013).

A continuación se revisará la teoría, sobre la cual está basado el método de cálculo de empujes de tierra sobre cualquier muro de contención, incluyendo aquellos de los que se trata esta tesis.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

- Teoría de Rankine

Esta teoría es útil para determinar los empujes horizontales que ejerce el suelo en el respaldo de estructuras de contención, bajo las siguientes hipótesis:

- a) El suelo es homogéneo
- b) El suelo es isótropo
- c) En el suelo se desarrollan los estados plásticos activo y pasivo, para lo cual se requiere que la estructura de contención experimente un gran desplazamiento para que el suelo llegue a su estado plástico, es decir, la condición en que cada punto en una masa de suelo está a punto de fallar
- d) El relleno en el respaldo del muro es horizontal y la superficie del muro es vertical y lisa y por lo tanto no se desarrollan fuerza de fricción entre el suelo y el muro

- Estado en reposo

Considere una masa de suelo seco limitada por un muro AB sin fricción, como el de la Imagen II.19. Un elemento de suelo situado a una profundidad z , medida a partir de una frontera horizontal, está sometido a presión vertical efectiva, σ'_o , y presión horizontal efectiva, σ'_h , (Braja, 2001).

Para el caso que se plantea tenemos que las presiones efectivas son iguales a las presiones totales:

$$\sigma'_o = \sigma_o \quad \sigma'_h = \sigma_h$$

Si el muro AB no se desplaza lateralmente respecto a su posición inicial, la masa de suelo está en un estado de *equilibrio estático*, por lo que la relación que hay entre el esfuerzo horizontal y el vertical es conocida como *coeficiente de presión de tierra en reposo*, K_o .

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

$$K_o = \frac{\sigma_h}{\sigma_o}$$

(II-1)

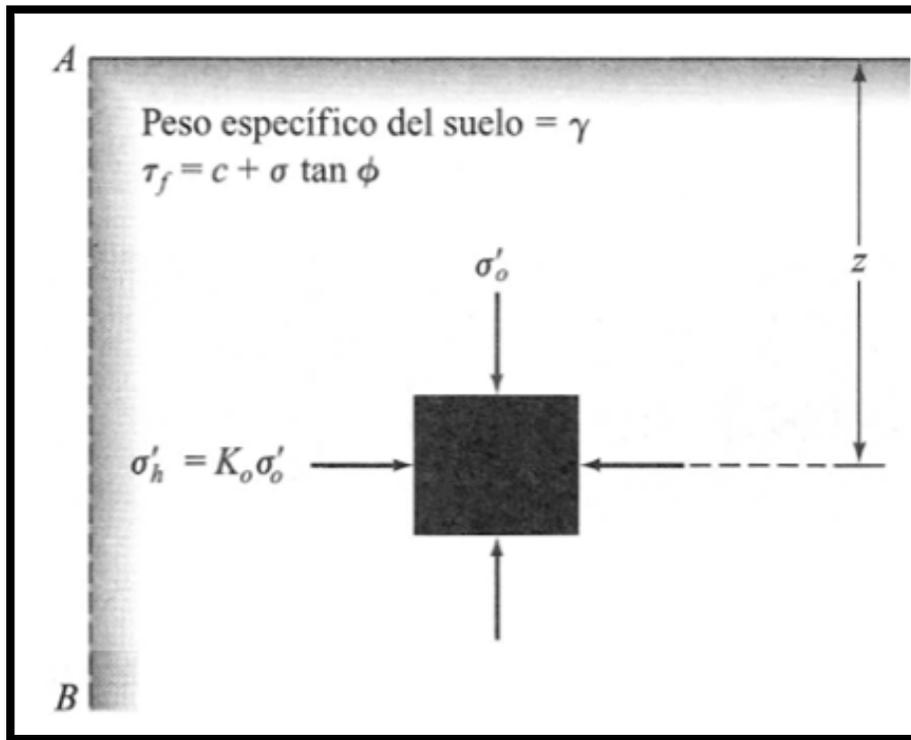


Imagen II.19. Presión de tierra en reposo, (Braja, 2001)

Como $\sigma_o = \gamma z$, tenemos que:

$$\sigma_h = K_o(\gamma z)$$

(II-2)

Donde:

γ es el peso volumétrico del suelo.

z Es la profundidad de la partícula de suelo en estudio.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Para suelos de grano grueso, el coeficiente de presión de tierra en reposo se puede estimar como sigue, según (Jaky, 1944).

$$K_o = 1 - \text{sen}\phi \quad (II-3)$$

Donde:

ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo.

Para suelos de grano fino, normalmente consolidados, K_o se obtiene de la siguiente manera, (Massarsch, 1979):

$$K_o = 0.44 + 0.42 \left[\frac{IP(\%)}{100} \right] \quad (II-4)$$

Donde:

$IP(\%)$ es el índice de plasticidad del suelo.

Para arcillas preconsolidadas:

$$K_{o(\text{preconsolidada})} = K_{o(\text{normalmente consolidada})} \sqrt{OCR} \quad (II-5)$$

Donde:

OCR es la tasa de preconsolidación del suelo.

La distribución del empuje de tierra en reposo sobre un muro de altura H se ilustra en la Imagen II.20 y es igual a:

$$P_o = \frac{1}{2} K_o \gamma H^2 \quad (II-6)$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Este empuje se aplica a la cara del muro a un tercio de su altura.

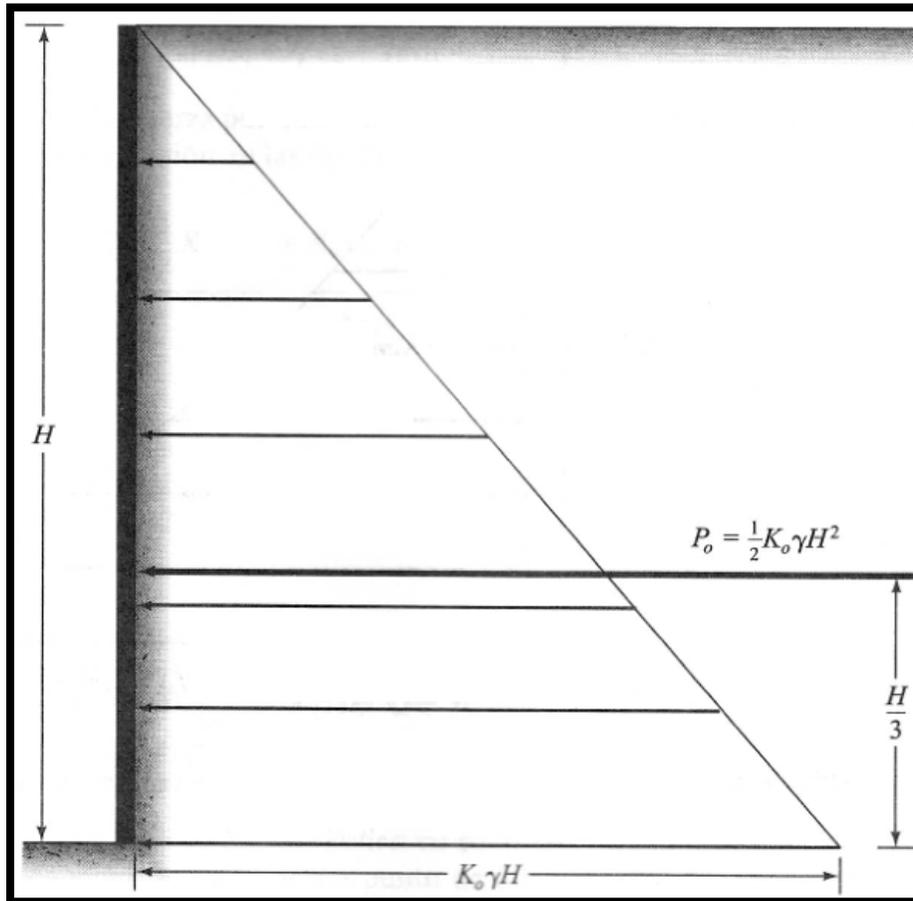


Imagen II.20. Distribución de la presión de tierra sobre un muro, (Braja, 2001)

A partir de la condición de estado en “reposo”, se puede llegar a la falla del elemento de la Imagen II.19 de dos maneras. La primera es disminuyendo el esfuerzo horizontal, manteniendo el vertical constante. A este estado se le denomina “estado activo”. La segunda manera es, por el contrario, aumentando el esfuerzo horizontal, teniendo el denominado “estado pasivo”. Estas dos alternativas son las únicas de interés práctico y pueden representarse a través del diagrama de Mohr, (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2013).

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

- Estado activo

Para el estado activo, ilustrado en la Imagen II.21, considere que el muro que se encuentra en estado en reposo sufre un desplazamiento lateral con sentido contrario a la masa retenida de suelo, el esfuerzo horizontal decrece, luego se tiene que el esfuerzo principal σ'_a , en términos de la cohesión y el ángulo de fricción interna es obtenido como sigue:

$$\begin{aligned} \operatorname{sen}\phi &= \frac{CD}{AC} = \frac{CD}{AO + OC} \\ \operatorname{sen}\phi &= \frac{\frac{\sigma'_o - \sigma'_a}{2}}{c \cot\phi + \frac{\sigma'_o + \sigma'_a}{2}} \\ \sigma'_a &= \sigma'_o \frac{1 - \operatorname{sen}\phi}{1 + \operatorname{sen}\phi} - 2c \frac{\cos\phi}{1 + \operatorname{sen}\phi} \end{aligned}$$

(II-7)

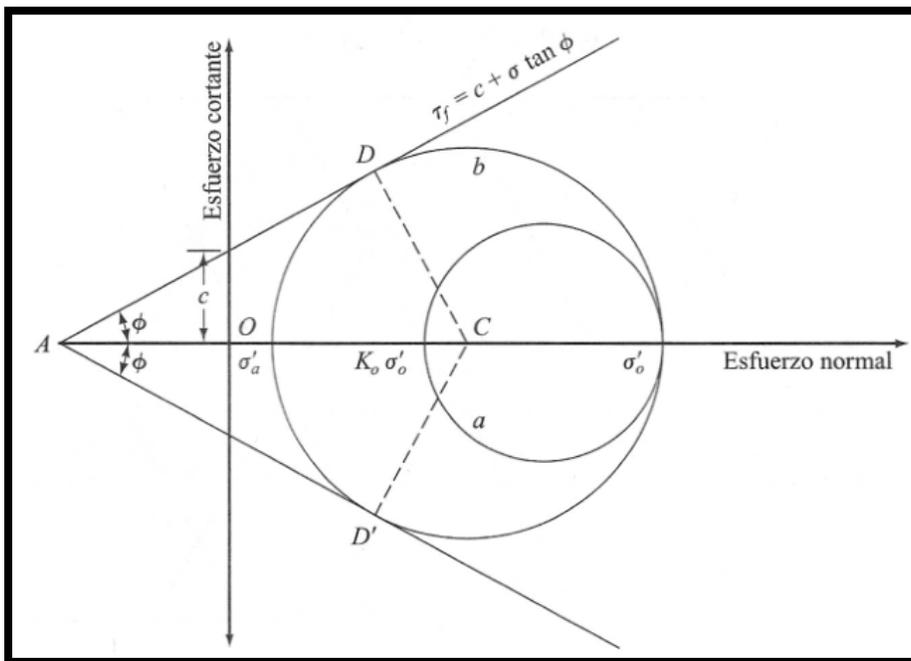


Imagen II.21. Estado plástico activo en el diagrama de Mohr

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

$$\frac{1 - \operatorname{sen}\phi}{1 + \operatorname{sen}\phi} = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$
$$\frac{\operatorname{cos}\phi}{1 + \operatorname{sen}\phi} = \tan\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

Por lo que sustituyendo en la ecuación (II-7) tenemos:

$$\sigma'_a = \sigma'_o \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) - 2c \tan\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

(II-8)

Si la cohesión es nula, tenemos que:

$$\sigma'_a = \sigma'_o \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

(II-9)

$$\frac{\sigma'_a}{\sigma'_o} = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

(II-10)

La relación que hay entre los esfuerzos principales σ'_a y σ'_o es conocida como *coeficiente de presión de tierra activa, K_a* .

$$K_a = \frac{\sigma'_a}{\sigma'_o} = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

(II-11)

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

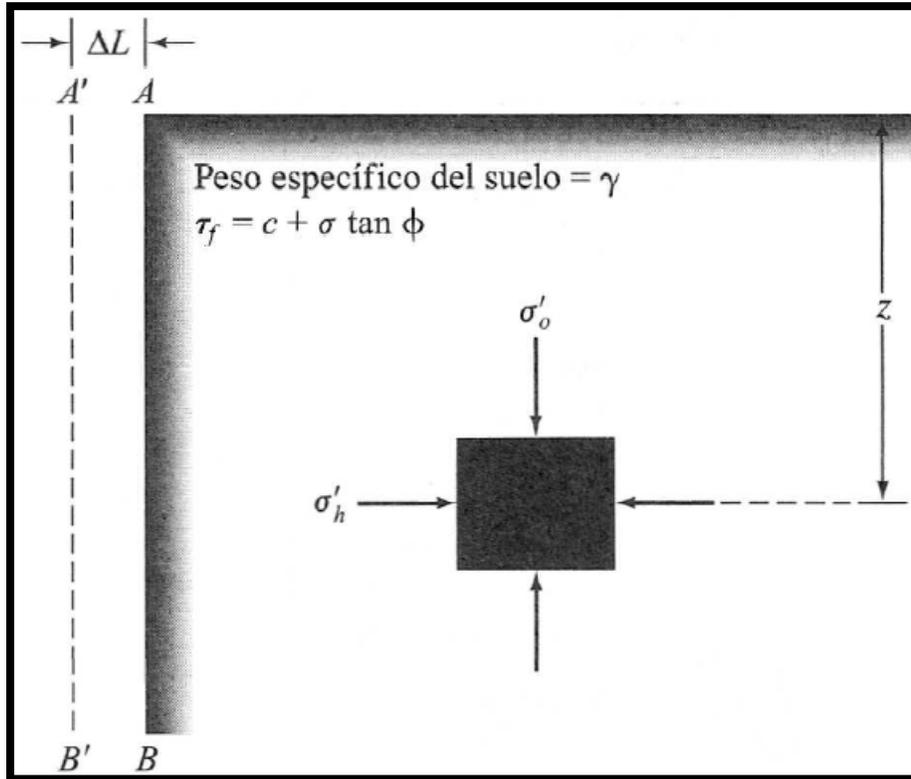


Imagen II.22. Presión de tierra en estado activo

La distribución del empuje activo sobre un muro de altura H es obtenida por la siguiente expresión, la cual es análoga a la ecuación (II-6):

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (II-12)$$

- Estado pasivo

Para el estado pasivo, que es cuando el muro AB ahora se desplaza lateralmente en dirección a la masa retenida, como lo vemos en la Imagen II.24, el esfuerzo horizontal se incrementa teniendo en el diagrama de Mohr lo siguiente:

$$\sigma'_p > \sigma'_o.$$

~ 28 ~

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

La falla del suelo ocurre cuando se alcanza el esfuerzo principal σ'_p , el cual es obtenido en función de la cohesión y el ángulo de fricción interna de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \operatorname{sen}\phi &= \frac{CD}{AC} = \frac{CD}{AO + OC} \\ \operatorname{sen}\phi &= \frac{\frac{\sigma'_p - \sigma'_o}{2}}{c \cot\phi + \frac{\sigma'_o + \sigma'_p}{2}} \\ \sigma'_p &= \sigma'_o \frac{1 + \operatorname{sen}\phi}{1 - \operatorname{sen}\phi} + 2c \frac{\cos\phi}{1 - \operatorname{sen}\phi} \end{aligned}$$

(II-13)

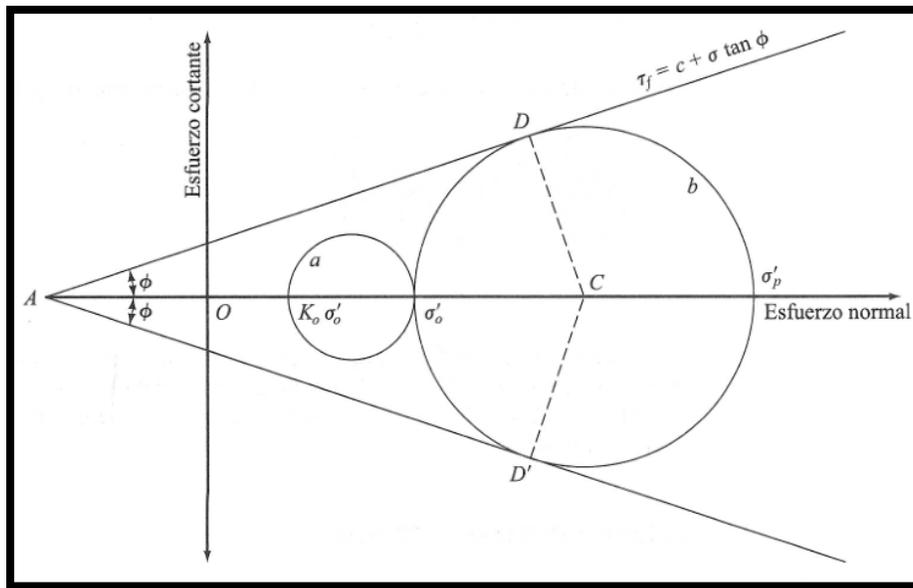


Imagen II.23. Estado plástico pasivo en el diagrama de Mohr

$$\frac{1 + \operatorname{sen}\phi}{1 - \operatorname{sen}\phi} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$\frac{\cos\phi}{1 - \operatorname{sen}\phi} = \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Por lo que sustituyendo en la ecuación (II-13) tenemos:

$$\sigma'_p = \sigma'_o \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (\text{II-14})$$

Si la cohesión es nula, tenemos que:

$$\sigma'_p = \sigma'_o \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (\text{II-15})$$

$$\frac{\sigma'_p}{\sigma'_o} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (\text{II-16})$$

La relación que hay entre los esfuerzos principales σ'_p y σ'_o es conocida como *coeficiente de presión de tierra pasiva*, K_p .

$$K_p = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_o} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (\text{II-17})$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

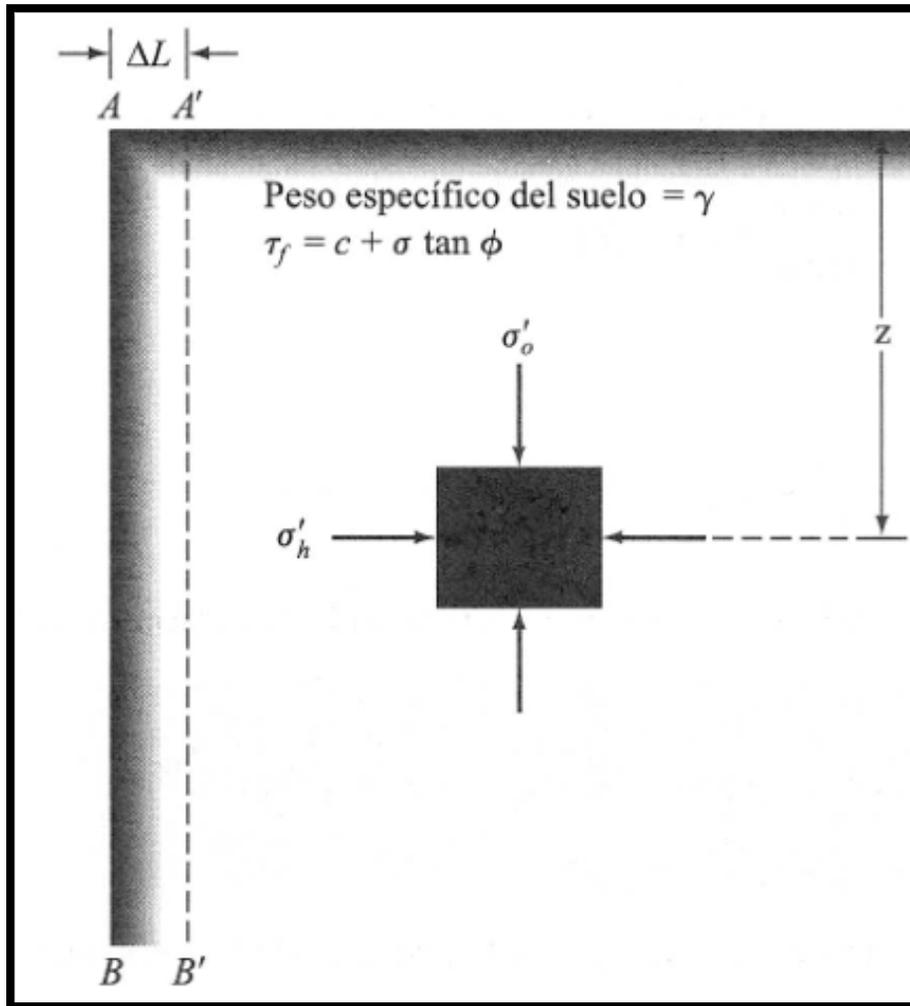


Imagen II.24. Presión de tierra en estado pasivo

De forma similar al estado activo, el empuje pasivo resulta ser calculado con la expresión (II-18):

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2$$

(II-18)

La teoría de Rankine considera que el punto de aplicación de los empujes activo y pasivo está a un tercio de la distribución de presión respectiva, ya que esta es lineal.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

- Teoría de Coulomb

La teoría de Coulomb para determinar los empujes horizontales que ejerce el suelo en el respaldo de estructuras de contención está basada en las siguientes hipótesis:

- a) El suelo es homogéneo
- b) El suelo es isótropo
- c) En el respaldo del muro, una superficie de falla es desarrollada, la cual limita una cuña de suelo que genera fricción en el respaldo del muro
- d) A lo largo de la superficie de falla se desarrollan fuerzas de fricción que se distribuyen de manera uniforme

El problema es bidimensional y los empujes en el respaldo del muro se determinan a partir del equilibrio de fuerzas

Esta teoría considera que los empujes sobre un muro se deben a una cuña de suelo limitada por el paramento del muro, la superficie del relleno y una superficie de falla desarrollada dentro del relleno, la cual se supone plana. La cuña tiende a deslizarse bajo el efecto de su peso produciendo efectos de fricción tanto en el respaldo del muro así como en la superficie de falla, (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2013).

- Estado activo

Considere el muro AB mostrado en la Imagen II.25; el muro retiene una masa de suelo granular, sin cohesión, la cual conserva una pendiente respecto a la horizontal denominada α . Por otro lado, el plano BC constituye una superficie de falla que, por el momento, no es crítica. El respaldo del muro AB junto con la superficie de falla BC y la frontera superior de la masa de suelo forman la cuña ABC .

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

La cuña tiene un peso W ; esta fuerza obviamente actúa en dirección vertical hacia abajo. Por otro lado, la resultante de las fuerzas cortante y normal F sobre la superficie de falla BC actúa con un ángulo de inclinación ϕ respecto a la normal de este plano. Así mismo, la fuerza que estabiliza la cuña ABC es la fuerza activa P_a , misma que actúa con un ángulo de inclinación δ respecto a la normal de la cara interna del muro que soporta la masa de suelo. El triángulo de fuerzas formado con estas tres fuerzas se ilustra en la Imagen II.26.

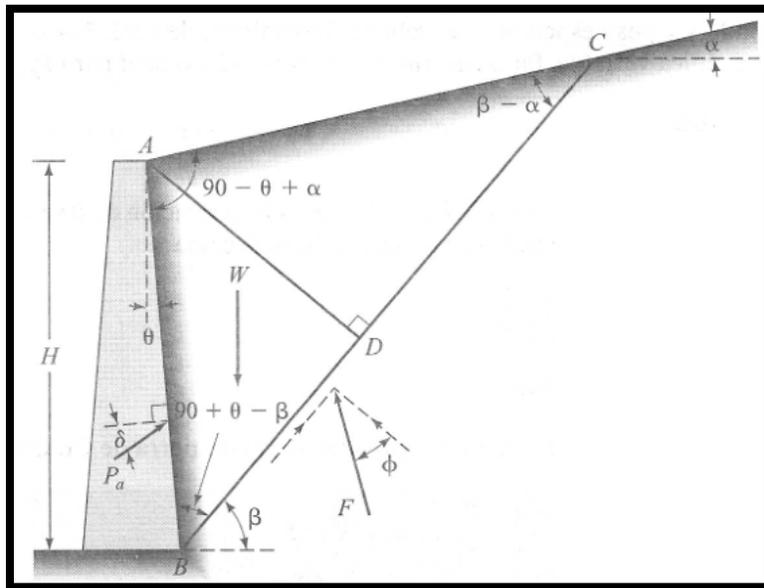


Imagen II.25. Cuña limitada por el muro AB , la superficie del suelo y la superficie de falla BC

Aplicando la ley de senos en el triángulo de fuerzas tenemos:

$$\frac{W}{\text{sen}(90 + \theta + \delta - \beta + \phi)} = \frac{P_a}{\text{sen}(\beta - \phi)} \quad (\text{II-19})$$

$$P_a = \frac{\text{sen}(\beta - \phi)}{\text{sen}(90 + \theta + \delta - \beta + \phi)} W \quad (\text{II-20})$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

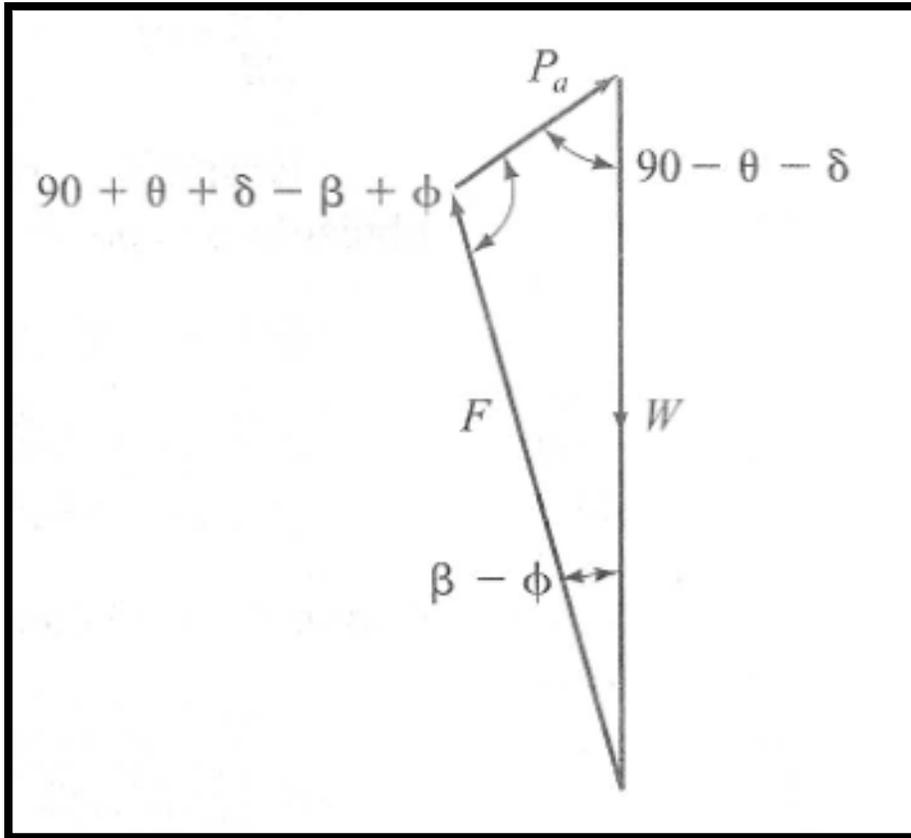


Imagen II.26. Triángulo de fuerzas estabilizadoras de la cuña ABC

La ecuación (II-20) se puede escribir de la siguiente manera:

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{\cos(\theta - \beta) \cos(\theta - \alpha) \operatorname{sen}(\beta - \phi)}{\cos^2(\theta) \operatorname{sen}(\beta - \phi) \operatorname{sen}(90 + \theta + \delta - \beta + \phi)} \right] \quad (\text{II-21})$$

Con esta última ecuación, el único valor variable es β y si encontramos el valor crítico de la inclinación de la superficie de falla, podemos obtener un valor máximo de P_a de la siguiente forma:

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

$$\frac{dP_a}{d\beta} = 0$$

(II-22)

Resolviendo la derivada tenemos la siguiente expresión:

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

(II-23)

Donde K_a es el coeficiente de la presión activa de tierra y es igual a:

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos^2(\theta) \cos(\delta + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi - \alpha)}{\cos(\delta + \theta) \cos(\theta - \alpha)}} \right]^2}$$

(II-24)

El valor del ángulo δ suele tomarse en la práctica como sigue, (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2013):

$$\phi \frac{1}{2} \leq \delta \leq \frac{2}{3} \phi$$

- Estado pasivo

En este caso, la cuña de peso W , la resultante de las fuerzas cortante y normal F sobre la superficie de falla BC y la fuerza pasiva P_p forman el triángulo de fuerzas que estabiliza la cuña ABC que se ve en la Imagen II.27.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

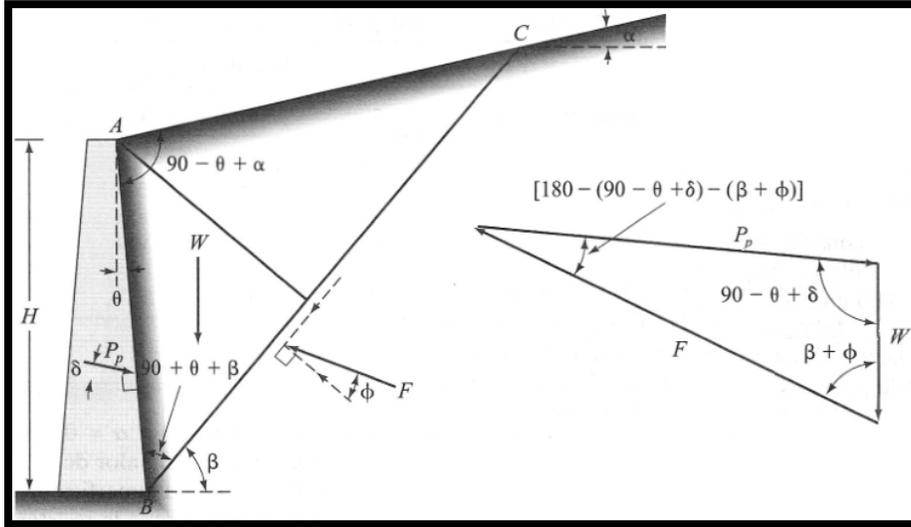


Imagen II.27. A la izq. La cuña ABC, A la der. El triángulo de fuerzas estabilizadoras

Haciendo un tratamiento similar para llegar a la ecuación (II-23) del caso activo, obtenemos la siguiente expresión:

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 \quad (II-25)$$

Donde K_p es el coeficiente de la presión pasiva de tierra y es igual a:

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi + \theta)}{\cos^2(\theta) \cos(\theta - \delta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi + \alpha)}{\cos(\theta - \delta) \cos(\theta - \alpha)}} \right]^2} \quad (II-26)$$

II.3 Criterios de diseño

Una estructura de contención puede considerarse como un sistema, es decir, un conjunto de partes o componentes que se combinan en forma ordenada para llegar al objetivo de contener un empuje provocado por el material retenido; en el caso particular de los muros construidos a base de geosintéticos, sus componentes principales son los materiales con los que se elaboran, los cuales, deben cumplir con estándares de seguridad y calidad para comportarse adecuadamente en condiciones normales de operación o servicio.

Las características que están involucradas en la solución de cada planteamiento son:

- La topografía del terreno
- La geometría o dimensionamiento de la estructura
- El tipo de material térreo
- El tipo de material de refuerzo
- El costo de construcción
- El tipo de fachada
- Drenaje

Estas características varían en cada caso haciendo posible obtener más de una solución y algunas, como la estética, pueden definirse previamente en conjunto por los grupos involucrados en la toma de esta decisión, a fin de no cambiarlas en lo sucesivo, a menos que sea necesario hacer modificaciones posteriores de fuerza mayor. Cabe destacar que, el costo está en función de otras características como del tipo de material y su calidad.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Haciendo énfasis en el dimensionamiento, esta característica depende de las condiciones naturales del terreno en el que se piensa desplantar el muro, así como de las solicitaciones que el usuario demanda, ya que la topografía y las especificaciones geométricas requeridas son las principales restricciones para el planteamiento de una solución satisfactoria.

Las bases para una adecuada solución son los criterios de diseño, ya que de estos se generan rangos que marcan la factibilidad de su realización. Preguntas como: ¿cuáles serán las dimensiones óptimas?, ¿cuáles serán los geosintéticos adecuados?, ¿cuál es la calidad del suelo aceptable para su construcción?, entre otras, se resuelven con base en estos criterios, mismos que son formados a través de las normas que rigen, pero a la vez, fundamentan esta etapa.

La metodología a seguir durante el desarrollo del diseño de un muro de geosintético está publicada por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), organismo ligado a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), aunque cabe subrayar que, esta publicación está basada en las normas de diseño emitidas por la Federal Highway Administration (FHWA) y estas a su vez por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), ambas de los Estados Unidos de América. A pesar de esto y de que la metodología no está considerada oficialmente dentro de la normativa de la SCT a la fecha, probablemente por lo novedoso que es el diseño de este tipo de muros en México, es la mejor guía para llevar a cabo de forma exitosa el diseño de un muro mecánicamente estabilizado con geosintéticos.

III. METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA MUROS A BASE DE GEOSINTÉTICOS EN CARRETERAS

Este capítulo explica la manera de cómo diseñar un muro reforzado con geosintéticos con base en el marco teórico visto anteriormente, desde su gestación, haciendo planteamientos preliminares, considerando las propiedades que deben tener los materiales que formarán parte de la estructura, hasta su conclusión reflejada por los planos que guiarán al contratista durante la etapa de construcción.

Será muy importante tener a la mano toda la información relevante, ya que a medida que esté más al alcance, el diseño será más apegado con la realidad y estará libre de ambigüedades.

III.1 Geometría y topografía

Partiendo de la necesidad de proyectar un muro de contención, y habiendo factibilidad de construirlo con materiales geosintéticos, el primer paso es aterrizar la o las ideas que van surgiendo y sin duda, la mejor manera de plasmarlas es a través de planos que contengan las proyecciones en planta, secciones y perfiles de la zona donde se ubicará el muro.

Para esta etapa, es preciso ocupar la información topográfica que indica la ubicación del terreno natural, la cual es obtenida por medio de cualquiera de los siguientes recursos:

- Restitución fotogramétrica
- Levantamiento topográfico en campo

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

fotogramétrica; pero además, el lector puede observar que a lo largo del trazo hay puntos característicos marcados con sus cadenamientos que representan cambios en la dirección del trazo.

- Alineamiento vertical, que es la proyección del desarrollo del eje sobre un plano vertical, contiene la información relacionada con la pendiente del trazo, así como la elevación del proyecto a nivel de la capa subrasante, que es precisamente la última capa de las terracerías de una estructura carretera.

Teniendo la topografía y el proyecto geométrico, es posible dimensionar el muro definiendo su altura, acotando su longitud, atendiendo a la inclinación de su fachada, la cual forma parte de las restricciones del diseño y requerimientos de la estructura podría imponer, y respetando la distancia horizontal entre el eje del proyecto y su fachada. En esta etapa ya es posible visualizar la forma del posible muro a través de la planta, las secciones transversales y el perfil frontal longitudinal, tal como se ilustra en seguida.

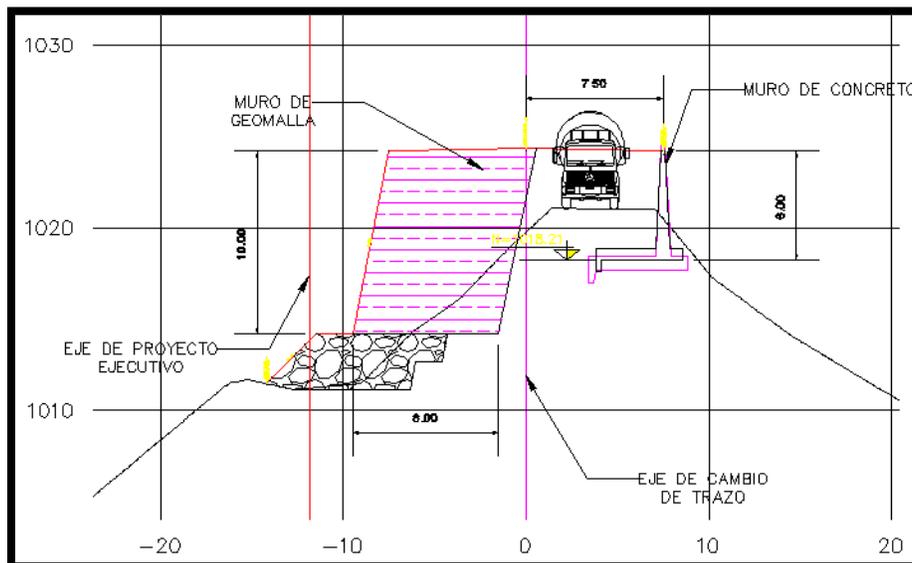


Imagen III.2. Sección transversal donde se aprecia la forma de un muro de geosintético, sin escala

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

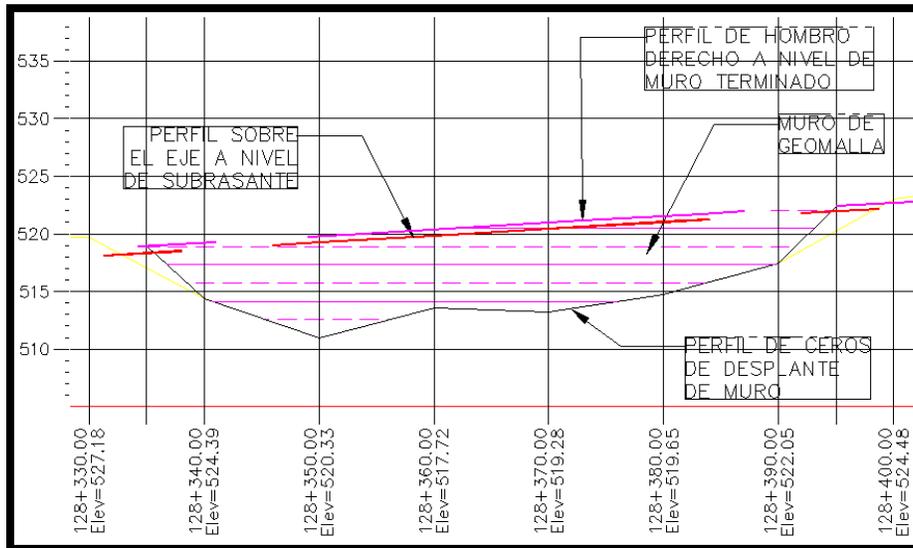


Imagen III.3. Perfil frontal longitudinal de un muro de geomalla, sin escala

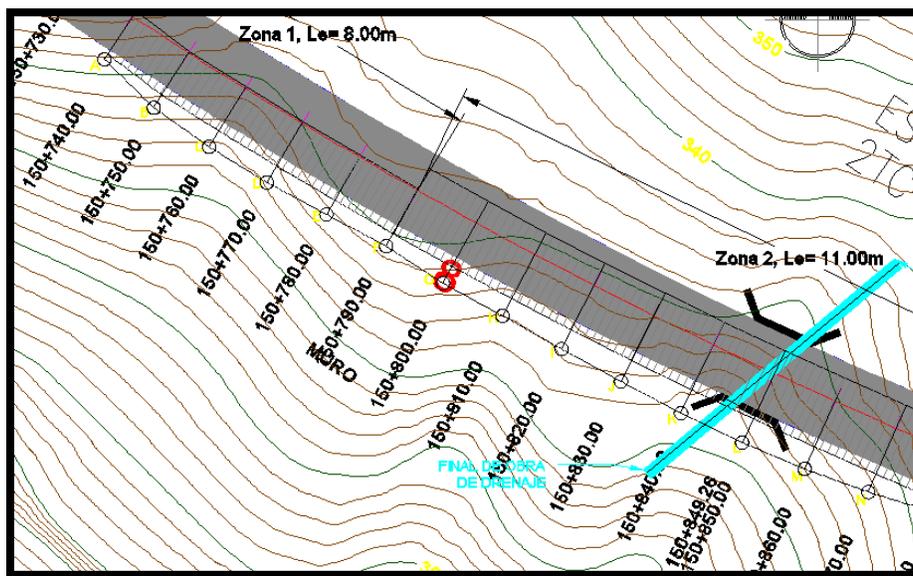


Imagen III.4. Planta de ubicación de muro de geomalla, sin escala

III.2 Propiedades físicas y mecánicas de los materiales térreos

Normalmente, la calidad de los materiales que proceden de los bancos de préstamo o de los cortes incluidos en el trazo de un proyecto carretero es clasificada en función del uso que pueda dársele dentro de una estructura de terraplén, y para distinguirla, existen parámetros establecidos que asignan valores a las características del material. Con esta clasificación, el constructor sabe en qué capa es mejor acomodar cualquier material térreo dado.

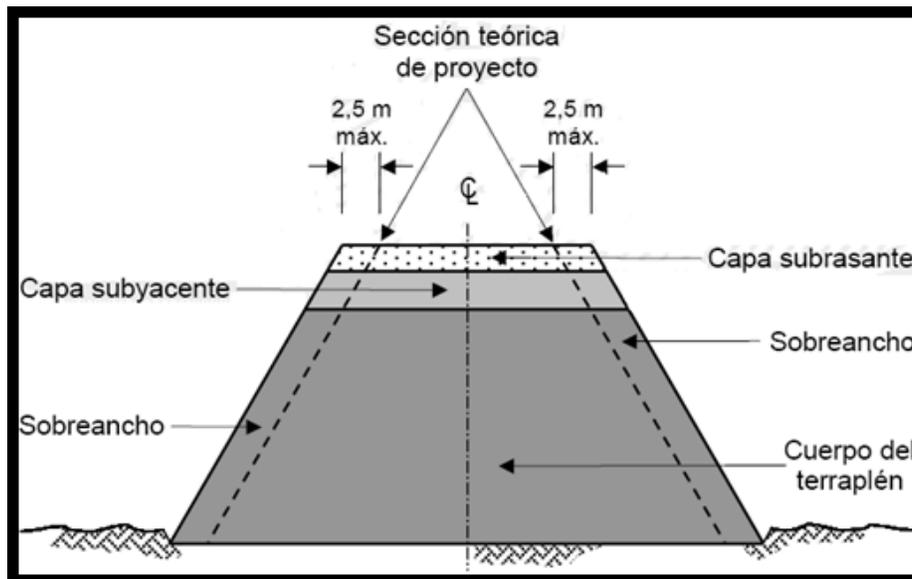


Imagen III.5. Sección transversal tipo de un terraplén, SCT 2002

A nivel terracerías, según la Imagen III.5, un terraplén se compone de tres capas:

- ✓ Cuerpo del terraplén
- ✓ Capa subyacente
- ✓ Capa subrasante

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

A nivel pavimentos, de acuerdo con la Imagen III.6, la estructura también se compone de tres capas, cuando éstos son asfálticos:

- ✓ Sub base
- ✓ Base
- ✓ Carpeta

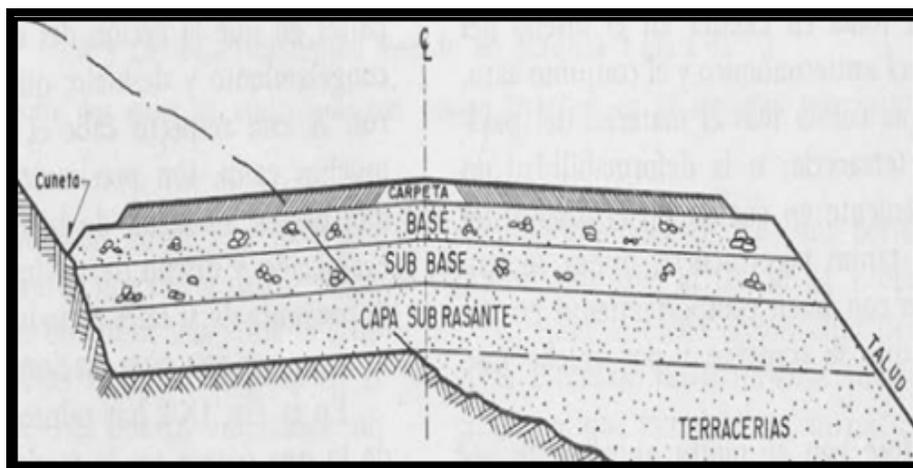


Imagen III.6. Sección típica de un pavimento asfáltico

Cabe mencionar que las estructuras térreas, como es el caso de un muro de geosintético, están comprendidas dentro de las terracerías, sin embargo no basta con conocer la calidad del material; las propiedades mecánicas pueden obtenerse a través de diversas pruebas hechas en el laboratorio, pero en ocasiones no es posible conocerlas con exactitud, ya que los laboratorios a pie de obra no suelen tener los medios necesarios para obtener dichas propiedades. Para fines de diseño, las propiedades más importantes que deben conocerse son:

- El ángulo de fricción interna, que puede correlacionarse con diferentes características, por ejemplo:

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

- ✓ Tipo de material y su granulometría. Así, se sabe que este ángulo es directamente proporcional al tamaño de las partículas que constituye el material, (Suárez, 2008).
 - ✓ Forma de los granos. Con una forma angulosa, el ángulo tiende a ser mayor.
 - ✓ Distribución de granulometría. Un material bien graduado tiene un ángulo de fricción mayor que uno mal graduado.
- La cohesión, la cual es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo; es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación entre las partículas, En los suelos granulares donde no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a cero y a estos suelos se les denomina suelos friccionantes o “no cohesivos”, (Suárez, 2008).
 - El peso volumétrico, que es una propiedad física que alude a la relación entre el peso del material y el volumen que ocupa.

La problemática de conocer el ángulo de fricción interna obliga a recurrir a métodos para asumir valores razonablemente cercanos con la realidad infiriéndolo a través de métodos que permiten correlacionarlo con parámetros que sí sean conocidas.

A continuación, el lector podrá conocer algunos métodos de correlación para inferir el ángulo de fricción interna de los materiales que constituyen un muro de geosintéticos. No se ahondará en la justificación técnica de cada método, ya que sería muy extenso y se pretende perder el enfoque de este documento.

- Método de Skempton, (Braja, 2001). Este consiste en correlacionar la fracción de finos (CF) que logra pasar la malla de 0.075 mm, de tal manera que:

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

- ✓ Si CF es menor que aproximadamente el 15 %, entonces el ángulo de fricción interna del material, es mayor que aproximadamente 25°.
- ✓ Si CF es aproximadamente mayor a 50%, el ángulo de fricción interna estará gobernado por material fino, como arcillas y limos, y puede estar en el intervalo de 10° a 15°.

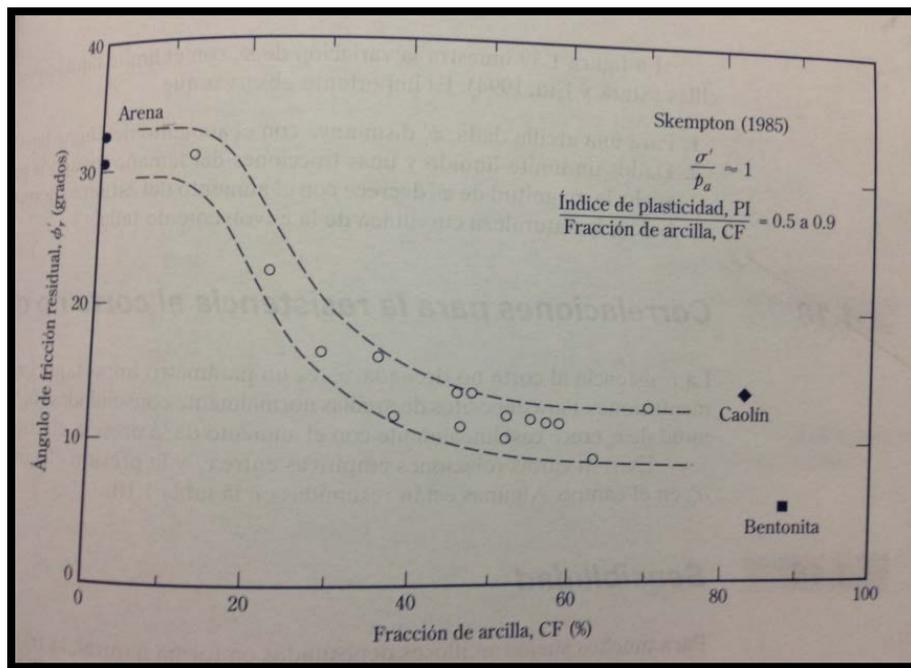


Imagen III.7. Gráfica para obtener el ángulo de fricción con base en la fracción de finos del material

- Método de Stark y Eid, (Braja, 2001). Está basado en la correlación del límite líquido del material, obtenido de la prueba de laboratorio “límites de consistencia o de Atterberg”. Es necesario utilizar la siguiente gráfica para conocer el ángulo de fricción interna:

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

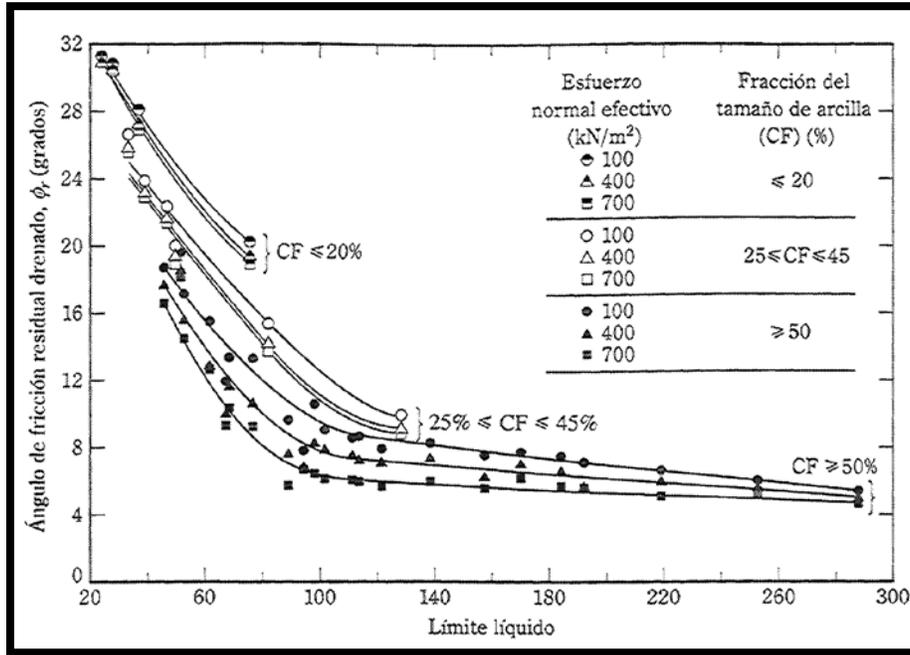


Imagen III.8. Gráfica para obtener el ángulo de fricción, método de Stark & Eid

- Por último, se tiene la obtención del ángulo de fricción por medio de correlaciones entre los resultados de la prueba de compresión simple y la clasificación del suelo; mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Table 2-5 Representative values for angle of internal friction ϕ

Soil	Type of test*		
	Unconsolidated-undrained U	Consolidated-undrained CU	Consolidated-drained CD
Gravel			
Medium size	40–55°		40–55°
Sandy	35–50°		35–50°
Sand			
Loose dry	28–34°		
Loose saturated	28–34°		
Dense dry	35–46°		43–50°
Dense saturated	1–2° less than dense dry		43–50°
Silt or silty sand			
Loose	20–22°		27–30°
Dense	25–30°		30–35°
Clay	0° if saturated	3–20°	20–42°

* See a laboratory manual on soil testing for a complete description of these tests, e.g., Bowles (1978).

Imagen III.9. Ángulos de fricción en función del tipo de material

III.3 Cálculo de estabilidad interna y externa

Teniendo el dimensionamiento del muro y conociendo las propiedades y parámetros mecánicos del material térreo que lo integrará, será necesario realizar el análisis de estabilidad interna y externa de la estructura. Por un lado, el análisis interno permitirá definir el espesor que tendrá cada capa de suelo reforzado, y tomando en cuenta las propiedades estructurales del geosintético, será posible conocer la longitud de desarrollo que deberá tener el refuerzo definiendo al más adecuado para alcanzar la resistencia interna.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

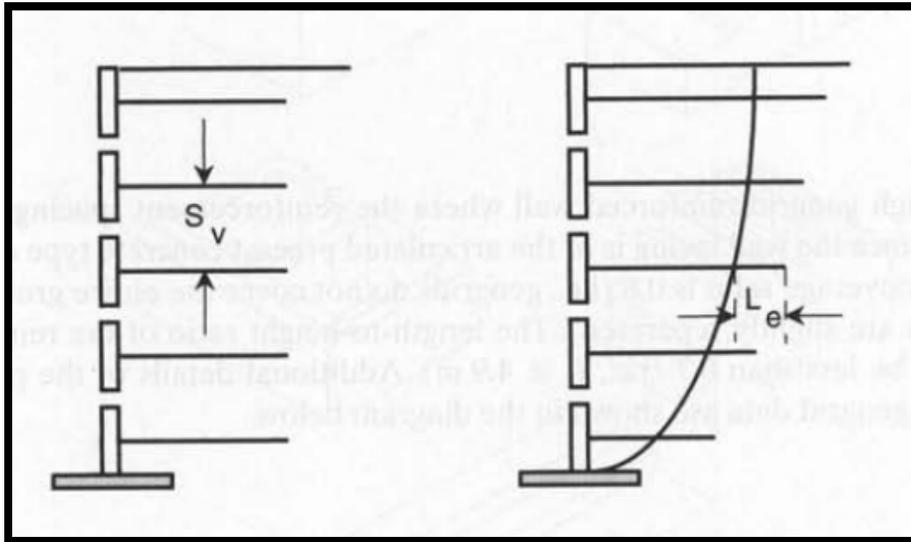


Imagen III.10. Estabilidad interna del muro, espesor de capas y longitud de desarrollo del refuerzo

El análisis de estabilidad externa considera como criterio los siguientes mecanismos de falla:

- Deslizamiento en la base del muro.
- Volteo en la base del muro, aunque por la flexibilidad que puede tener un muro mecánicamente estabilizado con geosintéticos, es poco probable que se presente este mecanismo de falla.
- Capacidad de carga (asentamiento vertical).
- Capacidad de carga del terreno (estabilidad global).

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

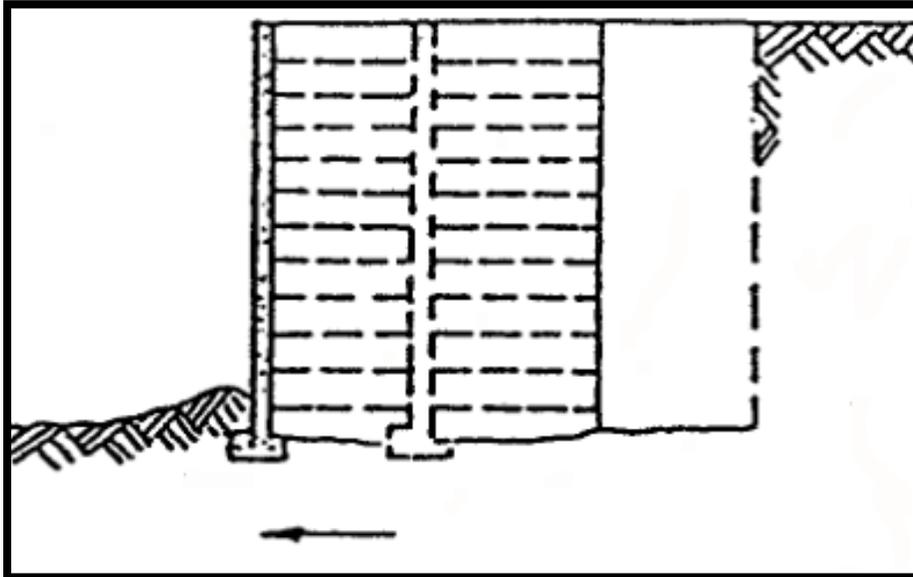


Imagen III.11. Falla por deslizamiento

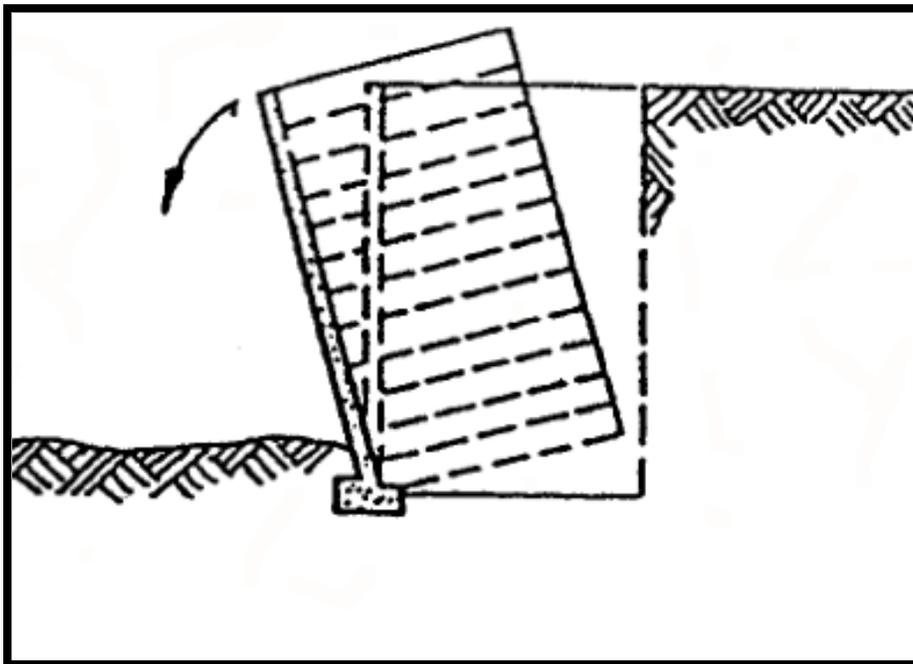


Imagen III.12. Fallas por volteo

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

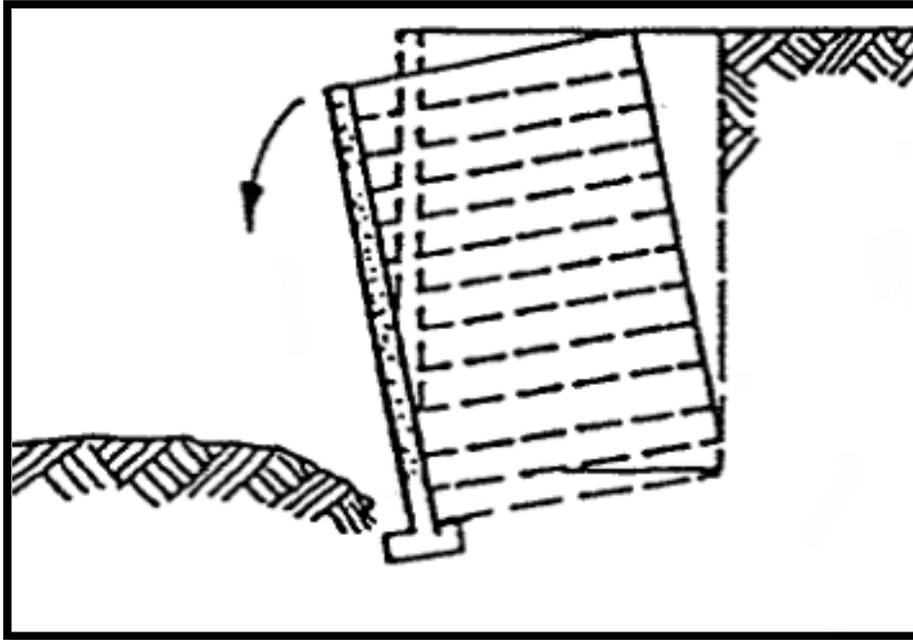


Imagen III.13. Falla por asentamiento vertical

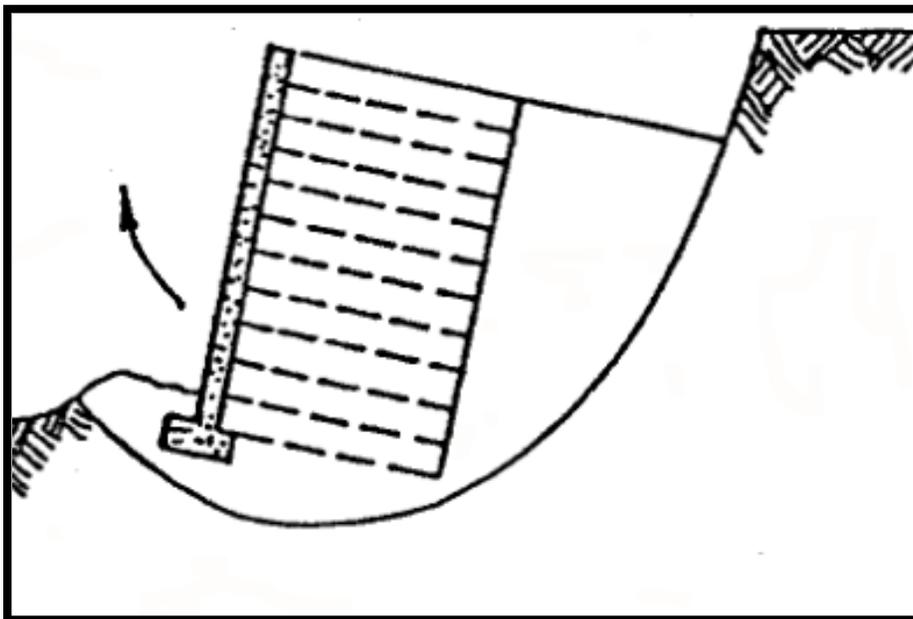


Imagen III.14. Fallas por estabilidad global

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

III.3.1 Propiedades estructurales del geosintético

Las propiedades de los materiales de refuerzo están en función de las siguientes características:

- Geométricas

Una capa de geosintético es caracterizada por su ancho y la distancia horizontal centro a centro entre ellos. El área de la sección transversal no es necesaria, puesto que la resistencia del geosintético es expresada por una fuerza a tensión por unidad de longitud. La relación de cobertura " R_c " es usada para relacionar la fuerza por unidad de longitud del refuerzo con la fuerza por unidad de longitud requerida a través de la estructura entera.

$$R_c = b/S_h \quad (III-1)$$

b : Ancho bruto de la capa

S_h : Espaciamiento centro a centro de manera horizontal entre capas

$R_c = 1$, cuando el refuerzo es continuo; es decir, cada capa de refuerzo cubre la superficie horizontal de la masa de suelo reforzado.

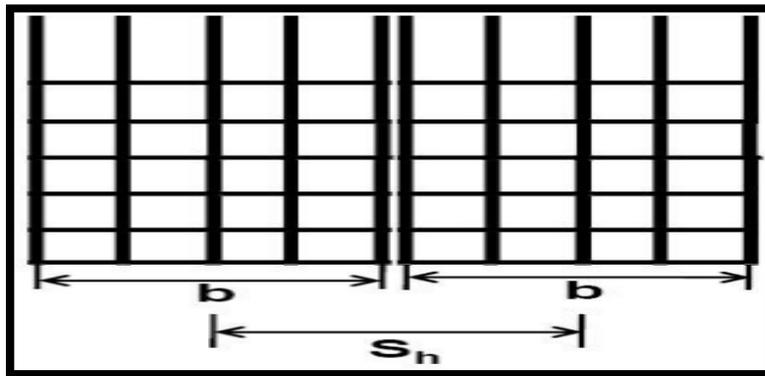


Imagen III.15. Relación de cobertura

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

La relación de cobertura afecta a la tensión del refuerzo porque ésta representa la forma de la distribución longitudinal del geosintético.

- Resistencia a la tensión

El geosintético es afectado por factores en su entorno como el deslizamiento superficial que a largo plazo produce la fluencia del material, daño en la instalación, envejecimiento y temperatura. Idealmente, la resistencia a la tensión " T_a " podría ser determinada por completas consideraciones de elongación admisible, posible fluencia del geosintético y todos los posibles mecanismos de degradación de resistencia.

Los refuerzos poliméricos pueden degradarse debido a la actividad físico – química en los suelos como son la hidrólisis, oxidación y grietas por esfuerzos ambientales, dependiendo del tipo de polímero. La mala instalación y los efectos de altas temperaturas pueden afectar su resistencia a la tensión.

La vida útil de diseño del geosintético es alcanzada por el desarrollo de una carga de diseño admisible, la cual, es considerada dependiendo de la pérdida de resistencia al final del periodo de vida útil.

$$T_a = \frac{T_{ult}}{RF \cdot FS} = \frac{T_{al}}{FS} \quad (III-2)$$

T_a : Tensión admisible del geosintético

T_{ult} : Resistencia última a tensión del geosintético

RF : Es el producto de la aplicación de todos los factores de reducción

FS : Factor de seguridad total. El valor mínimo es igual a 1.5, el cual podrá ser considerado para situaciones en las que exista incertidumbre en la geometría de la estructura, en las

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

propiedades del relleno, en las propiedades del refuerzo, o bien, en cargas externas aplicadas al muro; por lo tanto, la ecuación (III-2) puede escribirse como:

$$T_a = \frac{T_{al}}{1.5} \quad (III-3)$$

T_{al} : Es la resistencia a largo plazo del material sobre una carga por unidad de longitud del refuerzo, misma que es calculada como:

$$T_{al} = \frac{T_{ult}}{RF_{CR} \cdot RF_D \cdot RF_{ID}} \quad (III-4)$$

RF_{CR} : Factor de reducción a la fluencia del geosintético

RF_D : Factor de reducción de durabilidad. El valor mínimo de este factor es igual a 1.1.

RF_{ID} : Factor de reducción por daños de instalación, el cual tiene un rango de entre 1.05 a 3.0, dependiendo de la graduación del material térreo y la masa del geosintético por unidad de longitud.

La Tabla III-1 presenta los factores de reducción a la fluencia de los geosintéticos más frecuentes, en función del tipo de polímero del geosintético:

TIPO DE POLIMERO	FACTOR DE REDUCCION RF_{CR}
Poliéster	2.5 a 1.6
Polipropileno	5.0 a 4.0
Polietileno de alta densidad	5.0 a 2.6

Tabla III-1. Factores de reducción a la fluencia

La Tabla III-2 ilustra algunos factores de reducción a la fluencia de diferentes geosintéticos:

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

GEOSINTETICO	Relleno con un tamaño de partícula máxima de 102 mm y un D₅₀ alrededor de 30 mm	Relleno con un tamaño de partícula máxima de 20 mm y un D₅₀ alrededor de 0.70 mm
Polietileno de alta densidad	1.20-1.45	1.10-1.20
Polioléfina, geomalla biaxial	1.20-1.45	1.10-1.20
PVC cubierto con geomalla de poliéster	1.30-1.85	1.10-1.30
Acrílico cubierto con geomalla de poliéster	1.30-2.05	1.20-1.40
Geotextil tejido con poliolefina y poliéster¹	1.40-2.20	1.10-1.40
Geotextil no tejido con poliolefina y poliéster¹	1.40-2.50	1.10-1.40
Cinta abierta tejida con geotextil de poliolefina¹	1.60-3.00	1.10-2.00
(1) Peso mínimo de 270 g/cm²		

Tabla III-2. Factores de reducción a la durabilidad

III.3.2 Dimensionamiento preliminar del geosintético

La longitud efectiva del geosintético puede considerarse como el 70% de la altura del muro, pero no deberá ser menor a 2.5 metros.

$$2.5 \text{ m} < l_e < 0.7H \text{ (estructuras sin sobrecarga)} \quad (\text{III-5})$$

$$0.80H < l_e < 1.1H \text{ (para estructuras con sobrecarga)} \quad (\text{III-6})$$

III.3.3 Análisis de estabilidad externa

De manera general, el coeficiente activo de presiones de tierra será obtenido mediante la ecuación (II-24) vista en el capítulo II; esta ecuación está en función de la inclinación del

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

talud de relleno, el ángulo de fricción interna del material de relleno y la inclinación del muro. Si estas variables son conocidas, el coeficiente K_a se puede conocer. Dependiendo de las características geométricas del muro, el cálculo de K_a puede ser más simple, ya que la inclinación del talud del relleno puede valer cero siendo horizontal. Asimismo, el valor del ángulo de inclinación de la cara del muro puede ser igual a cero si ésta es vertical.

Para el caso en el que la cara del muro tenga una inclinación “ θ ” respecto a la vertical mayor a 10° , es posible usar la siguiente ecuación:

$$K_a = \frac{\text{sen}^2(\theta + \varphi)}{\text{sen}^3(\theta) \left[1 + \frac{\text{sen}(\varphi)}{\text{sen}(\theta)} \right]^2} \quad (\text{III-7})$$

Se debe calcular la excentricidad “ e ” de la resultante de las fuerzas como sigue:

$$e = \frac{F_H \cdot \frac{h}{3} - F_V \cdot \frac{L}{2} - V_2 \cdot \frac{L}{6}}{V_1 + V_2 + F_V} \quad (\text{III-8})$$

$$V_1 = \gamma_f * H * L \quad (\text{III-9})$$

$$V_2 = q * L \quad (\text{III-10})$$

$$F_H = F_T \cos(\alpha)$$

$$F_V = F_T \sin(\alpha)$$

L : Longitud de desarrollo del refuerzo geosintético

V_1 : Fuerza vertical provocada por el suelo reforzado ubicada en $l_{v1} = 0.5L$

V_2 : Fuerza vertical provocada por una sobrecarga ubicada en $l_{v2} = 0.5L$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

La excentricidad debe cumplir con las siguientes condiciones, de otra forma la longitud del refuerzo deberá ser mayor:

$$e < L/6 \quad \text{En suelos}$$

$$e < L/4 \quad \text{En rocas}$$

Posteriormente es necesario calcular el esfuerzo vertical equivalente uniforme en la base, σ_v :

$$\sigma_v = \frac{V_1 + V_2 + F_V}{L - 2e} \quad (\text{III-11})$$

Si existen cargas externas adicionales a σ_v , deberán agregarse en esta etapa.

Para el análisis por deslizamiento, es necesario conocer el factor de seguridad con respecto a las fuerzas aplicadas al sistema. Este tipo de falla puede presentarse principalmente en la capa base del muro, ya que, es la profundidad más crítica donde actúa el peso del relleno retenido:

$$FS_{\text{deslizamiento}} = \frac{\sum P_r}{\sum P_a} \geq 1.5$$

$$FS_{\text{deslizamiento}} = \frac{\sum P_r}{\sum P_a} \geq 1.125 \text{ (sismo)} \quad (\text{III-12})$$

$\sum P_r$: Sumatoria de fuerzas horizontales resistentes por unidad de longitud de muro

$$\sum P_r = (V_1 + V_2 + F_V)\mu \quad (\text{III-13})$$

μ : Coeficiente de fricción crítico en la base del muro. Este coeficiente debe ser el menor de las siguientes posibilidades:

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

- El deslizamiento a lo largo del suelo de desplante. Si el esfuerzo cortante (cohesión y ángulo de fricción) es menor que el del material de relleno.
- El deslizamiento a lo largo del relleno reforzado (coeficiente de fricción del relleno reforzado).
- Para geosintéticos de tipo laminado, el deslizamiento que se da a lo largo de la capa más débil en todas las interfaces suelo-refuerzo. El ángulo de fricción que se da en la interacción suelo-refuerzo “ ρ ” preferentemente se debe medir por medio de pruebas de corte directo.

$$\sum P_a = F_1 + F_2 \tag{III-14}$$

$$F_1 = \frac{1}{2} K_a \gamma_r H^2 \tag{III-15}$$

$$F_2 = q K_a H \tag{III-16}$$

$\sum P_a$: Fuerzas horizontales actuantes

F_1 : Fuerza provocada por el suelo retenido

F_2 : Fuerza provocada por la sobrecarga “ q ”

Para el análisis por volteo, debe cumplirse la siguiente desigualdad:

$$FS_{volteo} = \frac{\sum M_r}{\sum M_a} \geq 2.5$$

$$FS_{volteo} = \frac{\sum M_r}{\sum M_a} \geq 1.875 \text{ (sismo)} \tag{III-17}$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

ΣM_r : Sumatoria de momentos resistentes

$$\Sigma M_r = V_1 \frac{L}{2} + V_2 \frac{L}{2}$$

(III-18)

ΣM_a : Sumatoria de momentos actuantes

$$\Sigma M_a = F_1 \frac{1}{3} H + F_2 \frac{1}{2} H$$

$$\Sigma M_a = F_1 \frac{1}{3} H + F_2 \frac{1}{2} H + P_{IR} \frac{1}{2} H + P_{AE} \frac{3}{5} H \quad (\text{sismo})$$

(III-19)

III.3.4 Cargas sísmicas

El relleno retenido genera un empuje horizontal dinámico, P_{AE} , además del empuje estático de la estructura cuando ocurre sismo.

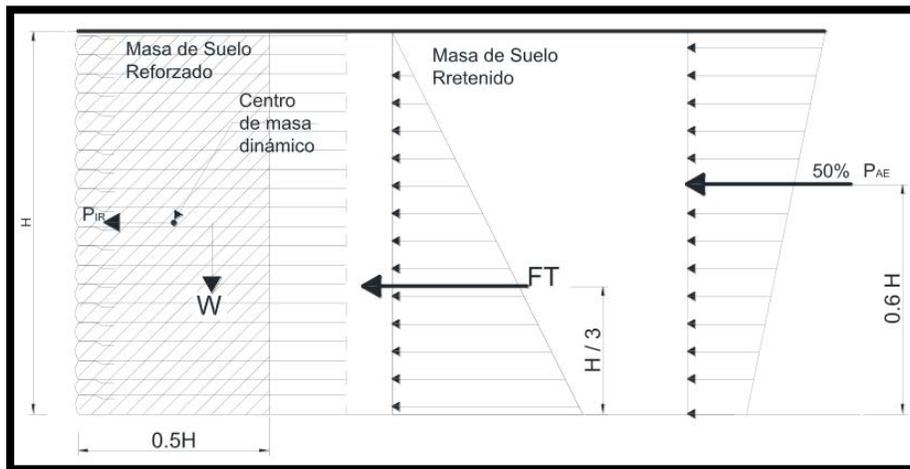


Imagen III.16. Estabilidad externa de un muro mecánicamente estabilizado en caso de sismo, (relleno horizontal).

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

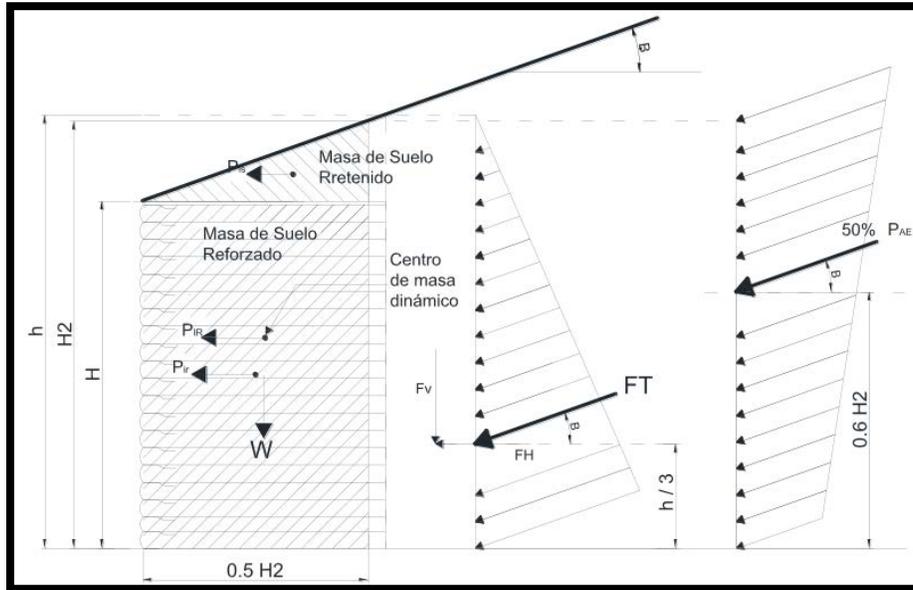


Imagen III.17. Estabilidad externa de un muro mecánicamente estabilizado en caso de sismo, (relleno con talud)

El suelo reforzado está sujeto a una fuerza de inercia horizontal.

$$P_{IR} = M A_M \quad (III-20)$$

M : Masa de la porción activa de la sección reforzada del muro suponiendo en la base un ancho equivalente al 50 por ciento de su altura.

A_M : Aceleración horizontal máxima en el suelo reforzado del muro.

El empuje horizontal dinámico puede ser evaluado por un análisis pseudoestático añadiéndose a las fuerzas estáticas actuantes sobre el muro. El factor de seguridad dinámico mínimo admisible está dado por un 75 por ciento de los factores de seguridad en estado estático. La ecuación (III-20) para P_{AE} fue desarrollada suponiendo un relleno horizontal con un ángulo de fricción de 30 grados y puede ser ajustada para otros ángulos

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

de fricción con una aceleración horizontal igual a A_m y una aceleración vertical igual a cero.

La evaluación de estabilidad externa, en caso de presentarse un sismo, es de la siguiente manera:

- Se selecciona la aceleración pico del terreno basado en el diseño por sismo en estructuras.
- Se calcula la aceleración máxima A_m desarrollada en el muro:

$$A_m = (1.45 - A)A \quad \text{(III-21)}$$

A : Coeficiente de aceleración máxima del terreno, según la norma emitida por la SCT, a través del Instituto Mexicano del Transporte, N-PRY-CAR-6-01-005/01.

A_m : Coeficiente de aceleración máxima en el centroide de la masa del muro.

- Se calcula la fuerza inercial horizontal P_{IR} ; de acuerdo con la expresión (III-20), dada con términos de las propiedades del muro tenemos que:

$$P_{IR} = 0.5A_m\gamma_r H^2 \text{ (para rellenos horizontales)} \quad \text{(III-22)}$$

Por lo tanto, el empuje sísmico P_{AE} dado con términos de las propiedades del muro es:

$$P_{AE} = 0.375A_m\gamma_f H^2 \text{ (para rellenos horizontales)} \quad \text{(III-23)}$$

- Se agregan las fuerzas sísmicas obtenidas en los pasos anteriores a las fuerzas actuantes en la estructura, con una relación de 50 por ciento del empuje sísmico P_{AE} y la totalidad de la fuerza de inercia P_{IR} . La reducción de P_{AE} es implementada

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

puesto que es poco probable que se presenten las dos fuerzas máximas de manera simultánea.

- Para estructuras que retienen rellenos en talud, la fuerza de inercia y el empuje dinámico horizontal se debe basar en la altura H_2 cerca de la parte posterior de la masa del muro, determinada de la siguiente manera:

$$H_2 = H + \frac{\tan(\alpha) \cdot 0.5H}{1 - 0.5\tan(\alpha)} \quad (\text{III-24})$$

El empuje dinámico horizontal P_{AE} puede ser ajustado de la siguiente manera:

$$K_h = A_m \quad (\text{III-25})$$

$$K_v = 0 \quad (\text{III-26})$$

K_h : Componente horizontal de la aceleración.

K_v : Componente vertical de la aceleración.

Por lo que el empuje dinámico horizontal para rellenos en talud es:

$$P_{AE} = 0.5\gamma_f(H_2)^2 K_{AE} \quad (\text{III-27})$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi - \xi - 90 - \theta)}{\cos(\xi)\cos^2(90 - \theta)\cos(1 + 90 - \theta + \xi) \left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\varphi + 1)\text{sen}(\varphi - \xi - 1)}{\cos(+\xi)\cos(1 - 90 + \theta)}} \right]^2} \quad (\text{III-28})$$

K_{AE} : Coeficiente de presión de tierra sísmico.

I: Ángulo del talud del relleno = α .

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

$$\xi = \arctan(K_h/1 - K_v).$$

φ : Ángulo de fricción del suelo retenido.

θ : Ángulo de inclinación de la cara del muro.

La fuerza inercial horizontal P_{IR} para rellenos en talud, será calculada de la siguiente manera:

$$P_{IR} = P_{ir} + P_{is} \quad (III-29)$$

$$P_{ir} = 0.5A_m\gamma_f H_2 H \quad (III-30)$$

$$P_{is} = 0.125A_m\gamma_f (H_2)^2 \tan(\alpha) \quad (III-31)$$

P_{ir} : Fuerza de inercia causada por la aceleración del relleno reforzado.

P_{is} : Fuerza de inercia causada por la aceleración de la sobrecarga del relleno en talud por encima del relleno reforzado, a un ancho igual a $0.5H_2$ que es donde ejerce la fuerza P_{IR} .

Estas fuerzas actúan en los centroides mostrados en la Imagen III.17.

Las fuerzas sísmicas establecidas anteriormente deben ser evaluadas junto con las fuerzas estáticas en la evaluación de la estabilidad por deslizamiento y capacidad de carga; así como revisar que el cálculo de los factores de seguridad sean igual o mayor que el 75 por ciento de los factores mínimos establecidos, además de que la excentricidad este dentro de $L/3$ para los casos de suelo y roca.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

III.3.5

III.3.6 Análisis de estabilidad interna

Existen dos diferentes formas de falla interna que pueden presentarse en un muro mecánicamente estabilizado con geosintético:

- Falla por elongación o de ruptura del refuerzo

Las fuerzas de tensión en el refuerzo permiten que exista una elongación excesiva hasta llegar a un punto de ruptura, por lo tanto los movimientos en la estructura son más amplios y cabe la posibilidad de que la estructura colapse.

- Falla por extracción

Es provocada cuando las fuerzas de tensión son más grandes que la resistencia a la extracción; es decir, la fuerza requerida para que empuje al refuerzo hacia la parte exterior de la masa de suelo. Esta fuerza incrementa el esfuerzo cortante alrededor del suelo, por lo que, provoca movimientos más prolongados en la estructura teniendo un posible colapso.

Para entender el efecto de la falla por extracción, es preciso conocer los mecanismos de esfuerzos, los cuales son transferidos entre el suelo reforzado y el refuerzo de dos formas posibles, dependiendo de la geometría del refuerzo:

- ✓ Por fricción, que es desarrollada en ubicaciones donde hay un desplazamiento cortante relativo y corresponde al esfuerzo cortante entre el suelo y la superficie reforzada. Los elementos de refuerzo donde la fricción es importante son alineados con la dirección del movimiento relativo del suelo reforzado. Ver Imagen III.18.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

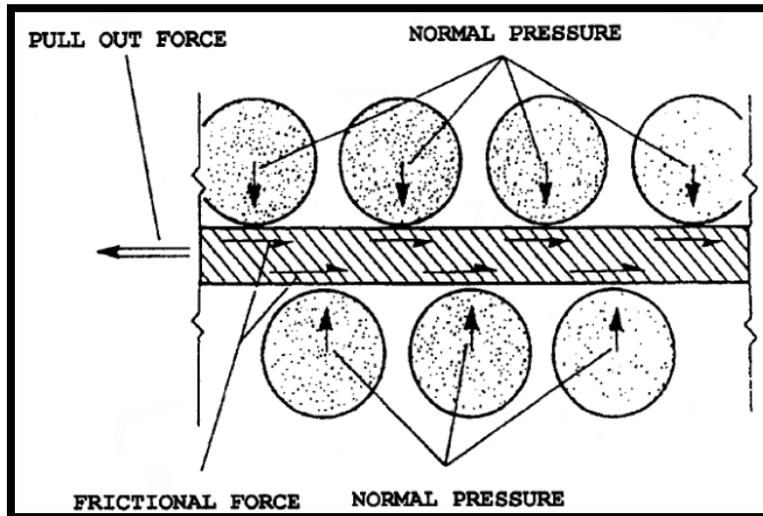


Imagen III.18. Transferencia del esfuerzo friccional entre el suelo y la superficie del refuerzo

- ✓ Por resistencia pasiva, que ocurre a través del desarrollo del tipo de esfuerzo en la superficie transversal del refuerzo, perpendicular a la dirección de los movimientos relativos del suelo. Ver Imagen III.19.

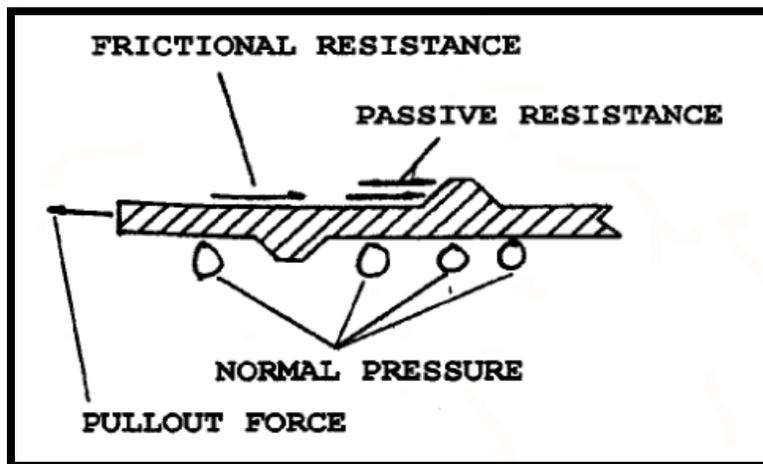


Imagen III.19. Resistencia pasiva de los suelos sobre la superficie del refuerzo

La contribución de cada mecanismo de transferencia para un refuerzo en particular dependerá de la aspereza de la superficie, los esfuerzos efectivos normales, la abertura de

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

la red, el espesor de los miembros transversales y las características de elongación del refuerzo. Para que el desarrollo de la interacción suelo-refuerzo sea desarrollada, las características del suelo tienen gran importancia, incluso el tamaño del suelo granular, su graduación, así como la forma de sus partículas, densidad, contenido de agua, cohesión y rigidez.

El diseño en los muros construidos con geosintéticos requiere la evaluación de la extracción del refuerzo a largo plazo con respecto a tres criterios básicos:

- Capacidad de extracción del refuerzo; es decir, la resistencia a la extracción de cada refuerzo podría ser adecuado para resistir las fuerzas que trabajan a tensión en el refuerzo con un factor de seguridad específico.
- Desplazamientos admisibles; es decir, el desplazamiento relativo del suelo con respecto al refuerzo; en ocasiones requerimos movilizar el diseño de la fuerza de tensión en el refuerzo para que pueda ser más pequeño que el desplazamiento admisible.
- Desplazamientos a largo plazo; es decir, la carga de empuje que provoca la extracción del geosintético podría ser más pequeña que la carga crítica de arrastre.

La resistencia a la extracción " P_r " de los refuerzos se moviliza a través de un mecanismo básico de interacción suelo-refuerzo; es decir, la interface de fricción y la resistencia pasiva de los suelos contra los elementos transversales del refuerzo geosintético.

Es posible observar en la Tabla III-3 los aspectos básicos de la extracción en términos de los mecanismos de transferencia de carga, desplazamientos relativos de suelo-refuerzo y deformación a largo plazo.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Tipo de refuerzo	Mecanismo de transferencia de carga	Rango de desplazamiento	Deformación a largo plazo
Geotextiles	Friccional	Depende de la extensibilidad del refuerzo (25 a 100 mm)	Depende de la estructura del refuerzo y de las características de aspereza del polímero
Geomallas	Friccional y Pasivo	Depende de la extensibilidad del refuerzo (25 a 50 mm)	Depende de la estructura del refuerzo y de las características de aspereza del polímero

Tabla III-3. Aspectos básicos del funcionamiento ante la falla por extracción

La resistencia a la extracción P_r del refuerzo está definida por la carga última de tensión necesaria para generar un deslizamiento hacia el exterior del refuerzo a través de la masa de suelo reforzado.

$$P_r = F^* \cdot \alpha \cdot \sigma'_v \cdot L_e \cdot C \quad (\text{III-32})$$

$L_e \cdot C$: El área total de superficie por unidad de longitud de refuerzo en la zona de resistencia por debajo de la superficie de falla.

L_e : Longitud de adherencia o empotramiento en la zona de resistencia por debajo de la superficie de falla.

C : Perímetro unitario efectivo del refuerzo.

F^* : Factor de resistencia a la extracción.

α : Factor de corrección que se tiene en cuenta para una reducción del esfuerzo no lineal a lo largo de los refuerzos incorporados altamente extensibles, generalmente se encuentra entre 0.6 y 1.0 para refuerzos con geosintéticos.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

σ'_v : Esfuerzo efectivo vertical en cada una de las capas donde se encuentra la interacción de suelo-refuerzo.

Continuando con lo anterior, el factor de corrección α depende del reblandecimiento del suelo de relleno de material granular compactado, la extensibilidad y la longitud efectiva del refuerzo.

El factor de resistencia a la extracción, F^* , puede ser estimado usando la siguiente ecuación general:

$$F^* = \text{Resistencia pasiva} + \text{Resistencia friccionante}$$

$$F^* = F_q \cdot \alpha_\beta + \tan \rho$$

(III-33)

F_q : Factor de capacidad de carga del terreno (o sobrecarga)

α_β : Factor de soporte para la resistencia pasiva, el cual es fundado sobre el espesor por unidad de longitud del miembro de soporte.

ρ : Ángulo de fricción de la interacción suelo-refuerzo.

Para refuerzos con geosintéticos, geomallas o geotextiles, la resistencia a la extracción está basada en la reducción en la disponibilidad del suelo friccionante con un factor de reducción frecuentemente referido a un factor de interacción " C_i ".

El valor F^* para refuerzos de geosintéticos podría ser conservador tomando:

$$F^* = 2/3 \tan \varphi$$

(III-34)

Cuando el factor de interacción C_i es usado por encima de la relación anterior, φ es tomado como el ángulo de fricción mayor del suelo.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

El proceso de análisis para el diseño de la estructura en su funcionamiento interno está basado en evitar la falla por ruptura del refuerzo y la falla por extracción. Consiste en determinar el desarrollo máximo de las fuerzas a tensión, su ubicación a lo largo de la superficie de deslizamiento crítico y la distancia proporcionada al refuerzo para soportar el esfuerzo a tensión y su capacidad a la extracción.

La superficie de deslizamiento crítica en un muro está dada por las fuerzas de tensión máximas T_{max} ; es decir, la ubicación geométrica de estas fuerzas en cada capa de refuerzo. Estas fuerzas han sido asumidas aproximadamente lineales para geosintéticos pasando por el pie del muro, ver Imagen III.20. Cuando se desarrolla la falla, el refuerzo puede tener deformaciones en esta intersección con la superficie de falla.

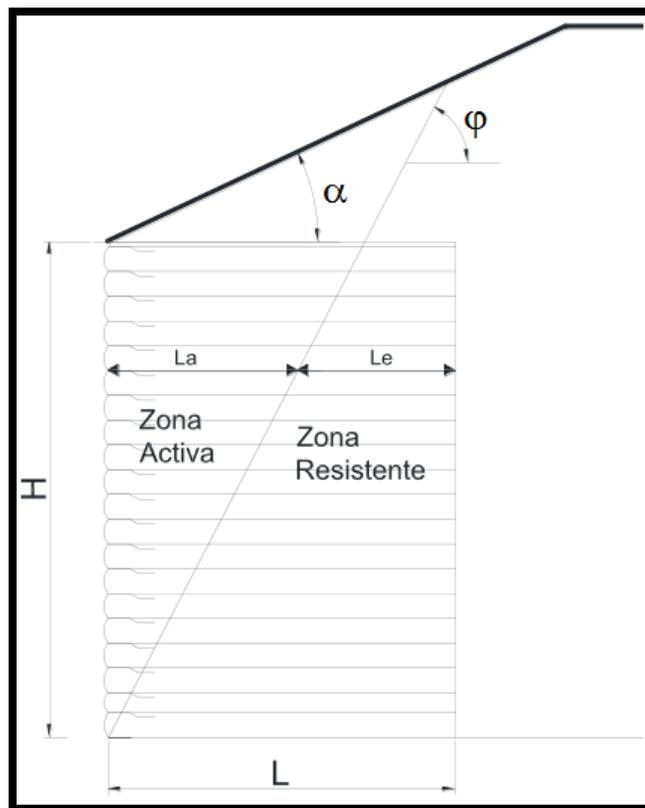


Imagen III.20. Ubicación de la superficie de falla para la estabilidad interna del muro

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Primero hay que obtener el coeficiente de presión de tierras K_a con la ayuda de la ecuación (III-7).

El esfuerzo vertical γH es el resultado de las fuerzas gravitacionales provenientes del peso propio del suelo dentro e inmediatamente por encima del relleno reforzado del muro, y cualquier carga externa que se presente cuando el muro retenga un relleno en talud, por lo que el esfuerzo vertical para el cálculo de la carga máxima admisible en el refuerzo para este tipo de rellenos está mostrado en la Imagen III.22, donde se obtiene:

$$S = \frac{1}{2}L \cdot \tan(\alpha) \tag{ III-35 }$$

$$\sigma_v = \gamma_r Z + \frac{1}{2}L \cdot \tan(\alpha)\gamma_r \tag{ III-36 }$$

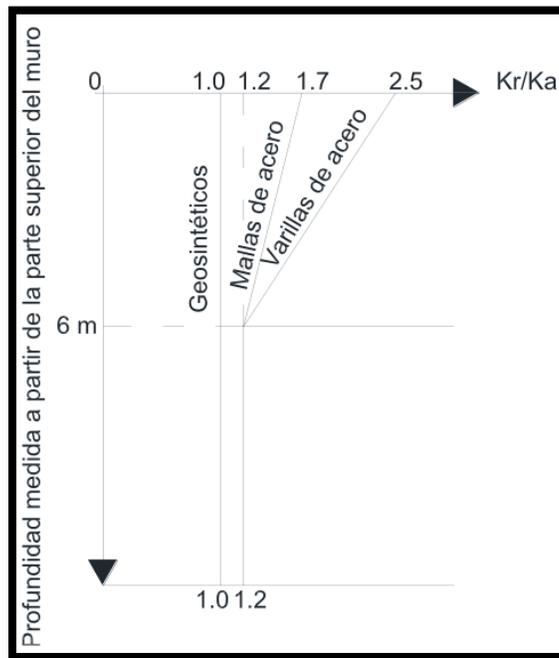


Imagen III.21. Relación de esfuerzo-profundidad en muros mecánicamente estabilizados

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

El coeficiente de presión de tierras K_a es determinado usando un ángulo del talud “ α ”, y K_r a partir de la gráfica que se ilustra en la Imagen III.21. Para la falla por extracción se revisa la siguiente condición:

$$\sigma_v = \gamma_r Z_p \quad \gamma \quad Z \geq Z_p + S$$

(III-37)

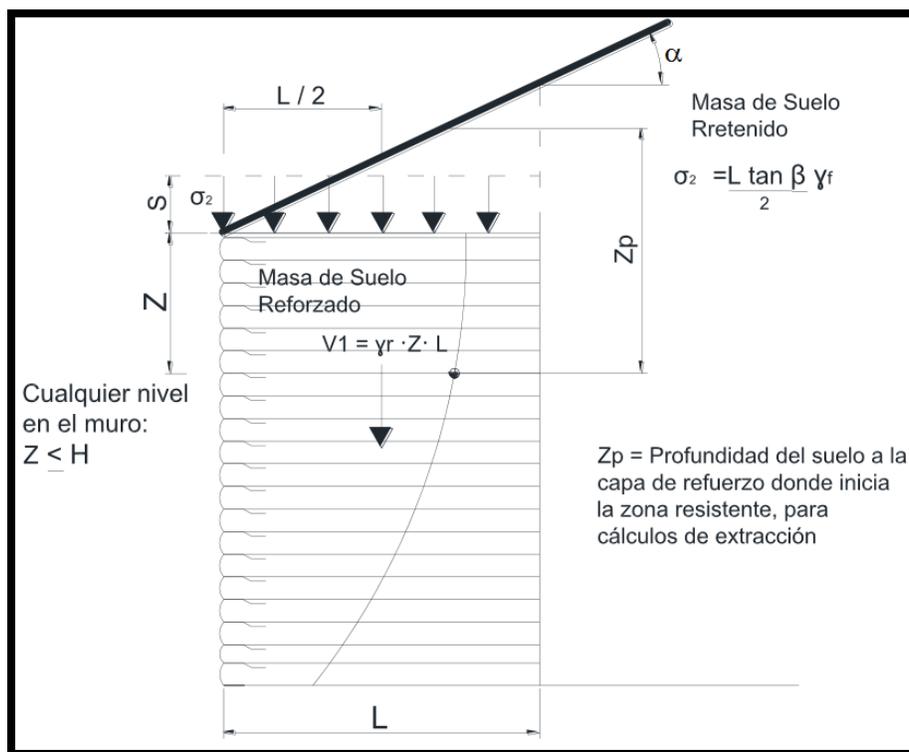


Imagen III.22. Cálculo de esfuerzo vertical

Para obtener la tensión máxima en cada uno de los refuerzos podemos seguir los siguientes pasos:

- a) Calcular en cada nivel de refuerzo el esfuerzo horizontal σ_h a lo largo de la línea de falla del peso del relleno retenido γ_r agregando, si se presenta, las cargas uniformemente distribuidas “ q ” o cargas concentradas $\Delta\sigma_v$ y $\Delta\sigma_h$.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

$$\sigma_{H_i} = K_r \sigma_{v_i} + \Delta\sigma_{h_i} \quad (\text{III-38})$$

$$\sigma_{v_i} = \gamma_r Z_i + \sigma_2 + q + \Delta\sigma_{v_i} \quad (\text{III-39})$$

$K_r = K_a$, según la Imagen III.21

Z_i : Profundidad referenciada a la capa por debajo de la parte superior del muro.

$\Delta\sigma_{v_i}$: Incremento del esfuerzo vertical debido a cargas concentradas usando una distribución 2V:1H, ver Imagen III.23.

$\Delta\sigma_{h_i}$: Incremento del esfuerzo horizontal debido a cargas concentradas en forma horizontal.

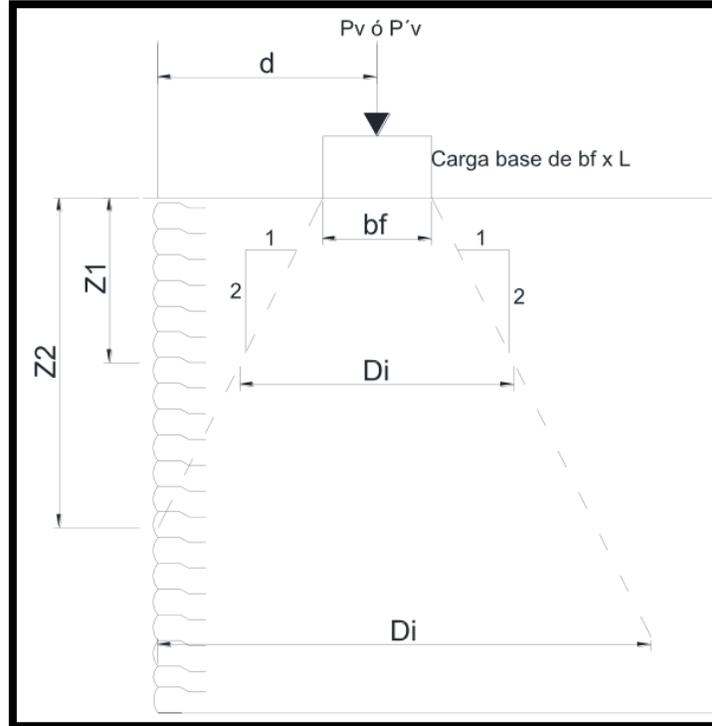


Imagen III.23. Distribución del esfuerzo $\Delta\sigma_{v_i}$ cuando se presentan cargas concentradas

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

- b) Calcular la tensión máxima T_{max} en cada capa de refuerzo, basado en el espaciamiento entre las capas S_v .

$$T_{max} = \sigma_{H_i} S_{v_i} \quad (III-40)$$

T_{max} puede ser calculado en cada nivel de refuerzo en caso de que el geosintético no cubra en su totalidad la superficie reforzada, esto se puede presentar cuando se proponga en el diseño bandas de geosintético.

$$T_{max} = \frac{\sigma_{H_i} \cdot S_{v_i}}{R_c} \quad (III-41)$$

- c) Calcular la estabilidad interna manteniendo la siguiente condición:

$$T_a \geq \frac{T_{max}}{R_c} \quad (III-42)$$

T_a : Fuerza de tensión admisible en el refuerzo.

R_c : Relación de ruptura, calculada con la ecuación (III-1).

Por otro lado, La estabilidad con respecto a la extracción del geosintético requiere establecer el siguiente criterio:

$$T_{max} = \frac{1}{FS_{PO}} F^* \cdot \gamma \cdot Z_p \cdot L_e \cdot C \cdot R_c \cdot \alpha \quad (III-43)$$

FS_{PO} : Factor de seguridad en contra de la extracción ≥ 1.5 .

F^* : Factor de resistencia a la extracción.

$C = 2$ para refuerzos de mallas.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

α : Factor de corrección a escala.

R_c : Relación de cobertura.

γZ_p : Presión vertical a una profundidad dada, incluyendo las cargas muertas e ignorando las cargas vivas.

L_e : Longitud de empotramiento en la zona resistente. Cabe notar que el límite entre la zona resistente y la zona activa puede ser modificado por cargas concentradas.

Por lo tanto, la longitud de empotramiento requerido en la zona resistente; es decir, fuera de la superficie de falla, puede determinarse de la siguiente manera:

$$L_e \geq \frac{1.5 \cdot T_{max}}{C \cdot \tan\varphi \cdot C_i \cdot \gamma_r \cdot Z_p \cdot R_c \cdot \alpha} \geq 1m \quad (III-44)$$

Si este criterio no es satisfactorio para todas las capas de refuerzo, la longitud de refuerzo se deberá incrementar o se deberá proponer un refuerzo con una mayor resistencia a la extracción, o bien, el espaciamiento vertical de las capas de geosintético puede ser reducido provocando una reducción a la tensión máxima del refuerzo.

La longitud de refuerzo necesaria para evitar la falla por ruptura está dada por la longitud de la parte posterior de la cara del muro al plano de falla, también llamada longitud en la zona activa, de acuerdo con la Imagen III.20.

En el caso de muros verticales con rellenos horizontales:

$$L_a = (H - Z) \cdot \tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (III-45)$$

Z : Profundidad del refuerzo a partir de la parte superior del muro.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

La longitud máxima efectiva del refuerzo “ L ” requerida para la estabilidad interna está determinada por la suma de la longitud en la zona activa y la longitud de empotramiento:

$$L = L_e + L_a \quad (III-46)$$

En cuanto a la estabilidad interna por sismo, durante el evento se produce una fuerza inercial “ P_I ” actuando horizontalmente, además de las fuerzas estáticas. Esta fuerza puede seguir un incremento dinámico, que eleva las fuerzas de tensión en los refuerzos. Asumimos que la ubicación y la pendiente de la línea máxima de fuerzas de tensión no cambian durante los eventos sísmicos; por lo tanto, el análisis es obtenido de la siguiente manera:

- a) Calcular la aceleración máxima en el muro y la fuerza P_I actuando por encima de la base del muro:

$$P_I = A_m W_A \quad (III-47)$$

W_A : Peso de la zona activa

A_m : Se calcula con la ecuación (III-21)

- b) Calcular la carga estática máxima aplicada al refuerzo horizontal T_{max} , calculando el esfuerzo horizontal σ_H usando el coeficiente K .

$$\sigma_H = K\sigma_v + \Delta\sigma_h = K\gamma Z + \Delta\sigma_h K + \Delta\sigma_h \quad (III-48)$$

Por lo que:

$$T_{max} = \sigma_H S_v \quad (III-49)$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

- c) Calcular el incremento dinámico " T_{md} " directamente inducido por la fuerza de inercia en los refuerzos, distribuido en los diferentes refuerzos proporcionalmente a su "área resistente", por lo que tenemos que el incremento dinámico es:

$$T_{md} = P_I \frac{L_{e_i}}{\sum_{i=1}^n L_{e_i}} \quad (\text{III-50})$$

- d) Calcular la fuerza de tensión máxima total.

$$T_{total} = T_{max} + T_{md} \quad (\text{III-51})$$

Es necesario revisar la estabilidad de la estructura con respecto a la ruptura y la extracción del geosintético con la fuerza de tensión obtenida usando un factor de seguridad sísmico del 75 por ciento del factor de seguridad mínimo admisible.

El refuerzo debe ser diseñado para resistir las cargas estáticas y dinámicas para la falla por ruptura cumpliendo las siguientes condiciones:

- Para cargas estáticas:

$$T_{max} \leq \frac{S_{rs} \cdot R_c}{0.75RF \cdot FS} \quad (\text{III-52})$$

- Para cargas dinámicas, mismas que son aplicadas por un tiempo corto. No se requiere una reducción por fluencia:

$$T_{md} \leq \frac{S_{rt} \cdot R_c}{0.75FS \cdot RF_D \cdot RF_{ID}} \quad (\text{III-53})$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Entonces, el esfuerzo último requerido para los refuerzos con geosintéticos es:

$$T_{ult} = S_{rs} + S_{rt} \quad (III-54)$$

S_{rs} : Es el esfuerzo necesario del refuerzo para resistir las cargas estáticas.

S_{rt} : Es el esfuerzo necesario del refuerzo para resistir las cargas dinámicas o transitorias.

El coeficiente de fricción para F^* puede reducirse al 80 por ciento del valor estático para evitar la extracción aún bajo cargas sísmicas.

$$T_{total} \leq \frac{P_r R_c}{0.75 F S_{p0}} = \frac{C \cdot (0.8 F^*)}{0.75 \cdot 1.5} \cdot \gamma Z' \cdot L_e R_c \alpha \quad (III-55)$$

III.4 Asentamientos

La factibilidad de usar un sistema de contención construido con refuerzos de geosintético también depende de las condiciones y propiedades del suelo de desplante, por lo que es necesario hacer exploraciones para conocer y evaluar su estabilidad así como de los asentamientos potenciales a través de su capacidad de carga.

La exploración consiste en realizar sondeos, ya sea a través de perforaciones, o bien, por medio de pozos a cielo abierto, de tal manera que sea suficiente para conocer las características y parámetros que el diseñador requerirá para elaborar el proyecto del muro.

El ángulo de fricción interna, la cohesión y el peso volumétrico son los parámetros requeridos para la determinación de capacidad de carga.

Para la determinación de los asentamientos, podríamos usar los resultados de un análisis convencional, usando datos de laboratorio asentamiento-tiempo, coeficientes de

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

consolidación C_c , en conjunto con los valores aproximados para índices de compresión C_v , obtenidos de correlaciones de pruebas índices en los suelos, como el contenido de agua o los límites de consistencia.

Una compresibilidad importante en la cimentación puede requerir la consideración de técnicas de mejoramiento del terreno para alcanzar una adecuada capacidad de carga, o limitando de manera total o diferencial los asentamientos.

A continuación se ilustrará la manera de evaluar la falla por capacidad de carga del desplante del muro, misma que se presenta en dos modos probables:

- Falla por corte general

En este modo se requiere que el esfuerzo vertical en la base no exceda la capacidad de carga admisible determinada para el suelo de desplante, consideramos un factor de seguridad de 2.5, lo que da así:

$$\sigma_v \leq q_a = \frac{q_{ult}}{F.S.} \quad (III-56)$$

q_a : Capacidad de carga admisible

q_{ult} : Capacidad de carga última

Para determinar la capacidad de carga última " q_{ult} ", sin la influencia de aguas subterráneas tenemos que:

$$q_{ult} = C_c N_c + 0.5(L)\gamma_c N_\gamma \quad (III-57)$$

C_c : Cohesión del suelo

γ_c : Peso volumétrico del suelo de desplante

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

N_c y N_γ : Coeficientes de capacidad de carga adimensionales dados en la Tabla III-4.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

ϕ	N_c	N_q	N_γ	ϕ	N_c	N_q	N_γ
0.00	5.14	1.00	0.00	26.00	22.25	11.85	12.54
1.00	5.38	1.09	0.07	27.00	23.94	13.20	14.47
2.00	5.63	1.20	0.15	28.00	25.80	14.72	16.72
3.00	5.90	1.31	0.24	29.00	27.86	16.44	19.34
4.00	6.19	1.43	0.34	30.00	30.14	18.40	22.40
5.00	6.49	1.57	0.45	31.00	32.67	20.63	25.90
6.00	6.81	1.72	0.57	32.00	35.49	23.18	30.22
7.00	7.16	1.88	0.71	33.00	38.64	26.09	35.19
8.00	7.53	2.06	0.86	34.00	42.16	29.44	41.06
9.00	7.92	2.25	1.03	35.00	46.12	33.30	48.03
10.00	8.35	2.47	1.22	36.00	50.59	37.75	56.31
11.00	8.80	2.71	1.44	37.00	55.63	42.92	66.19
12.00	9.28	2.97	1.69	38.00	61.35	48.93	78.03
13.00	9.81	3.26	1.97	39.00	37.87	55.96	92.25
14.00	10.37	3.59	2.29	40.00	75.31	64.20	109.41
15.00	10.98	3.94	2.65	41.00	83.86	73.90	130.22
16.00	11.63	4.34	3.06	42.00	93.71	85.38	155.55
17.00	12.34	4.77	3.53	43.00	105.11	99.02	186.54
18.00	13.10	5.26	4.07	44.00	118.37	115.31	224.64
19.00	13.93	5.80	4.68	45.00	133.88	134.88	271.76
20.00	14.83	6.40	5.39	46.00	152.10	158.51	330.35
21.00	15.82	7.07	6.20	47.00	173.64	187.21	403.67
22.00	16.88	7.82	7.13	48.00	199.26	222.31	496.01
23.00	18.05	8.66	8.20	49.00	229.93	265.51	613.16
24.00	19.32	9.60	9.44	50.00	266.89	319.07	762.89
25.00	20.72	10.66	10.88				

Tabla III-4. Factores de capacidad de carga

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

En seguida se debe comprobar si el esfuerzo vertical es menor o igual a la capacidad de carga admisible con la ecuación (III-56). El esfuerzo vertical puede ser disminuido y la capacidad de carga última en los refuerzos incrementa a lo largo de ellos. Si en condiciones de carga adecuada no ha sido lograda la condición de la ecuación (III-56) o el agregarle más longitud efectiva a los refuerzos incrementa el costo de la estructura, entonces el suelo de desplante debería ser mejorado sustituyéndolo o a través de la compactación dinámica.

- Falla por corte local

Este modo de falla se caracteriza por un acomodamiento de los suelos de desplante cuando suelos sueltos o blandos existen debajo del muro.

Para prevenir los movimientos horizontales de la estructura en suelos cohesivos débiles se debe comprobar que:

$$\gamma H \leq 3C_f \quad (III-58)$$

Si las condiciones de carga no son las adecuadas, la mejora del suelo de desplante es la opción indicada para evitar este tipo de falla.

La estabilidad general de la estructura está determinada por análisis rotacionales, el cual puede ser realizado usando métodos de análisis de estabilidad de taludes. El muro de geosintético es considerado un cuerpo rígido y solo son consideradas las fallas de superficie completamente fuera de la masa reforzada. Para estructuras simples con geometría rectangular, espaciamiento de los refuerzos relativamente uniforme, y una cara del muro vertical, las fallas compuestas, pasando tanto en las zonas reforzadas como en las zonas no reforzadas, generalmente no son críticas. Sin embargo, si existen condiciones complejas en las que existan cambios de tipo de refuerzo o su longitud efectiva, cargas

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

externas de alta magnitud, estructuras con la cara del muro inclinada, taludes pronunciados o estructuras apiladas, las fallas compuestas deben ser consideradas.

Si el factor de seguridad mínimo es menor que el usualmente recomendado (F.S. de 1.3), entonces se incrementa la longitud efectiva del refuerzo o se mejora el suelo de desplante.

IV. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN

En seguida, el lector podrá observar algunos ejemplos de diseño de muros mecánicamente estabilizados con geosintéticos basados en la metodología explicada en el capítulo anterior. Los muros ilustrados aquí forman parte de las estructuras de contención que existen a lo largo de los 94 kilómetros de construcción nueva o se están materializando con este sistema en la obra siendo parte importante de la construcción de la carretera Mitla – Tehuantepec II.

De acuerdo con el subcapítulo III.1, cada ejemplo parte de una descripción breve de la propuesta geométrica, la cual es elaborada con base en los datos topográficos que estén al alcance.

En seguida, se enlistan las propiedades físicas y mecánicas de los materiales térreos, destacando el peso volumétrico, el ángulo de fricción interna y la cohesión. Estos datos deben ser obtenidos a través de pruebas de laboratorio, o bien, para el caso del ángulo de fricción, es posible inferirlo a través de los métodos de correlación mencionados en el subcapítulo III.2.

No hay que olvidar incluir las sobrecargas aplicables en cada caso, estas pueden ser las siguientes:

- Sobrecargas de tráfico (carga viva)
- La capa de pavimentos (carga muerta)
- Fuerzas sísmicas (cargas accidentales)

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Es necesario calcular el coeficiente activo de presiones de tierra con la ecuación adecuada, dependiendo de la inclinación de la fachada.

La etapa de la revisión de estabilidad externa consiste en verificar que el dimensionamiento del muro satisfaga los factores mínimos de seguridad al deslizamiento, al volteo, de capacidad de carga y estabilidad global. Hay que considerar las fuerzas sísmicas en conjunto con las fuerzas estáticas.

Posteriormente, se pasa a la etapa de la revisión de la estabilidad interna, en la cual, las propiedades de los materiales geosintéticos son muy importantes, ya que se involucran directamente en el diseño del muro esta etapa, por lo que es importante mencionarlos. El análisis de estabilidad interna permite completar el diseño del muro geosintético definiendo el espesor de las capas de suelo así como la longitud de desarrollo del refuerzo que habrá entre cada capa.

- Muro A-B-C, St. 08, km 106+800 – km 107+000

El muro A-B-C está ubicado en el sub-tramo 08 de construcción, entre los km 106+800 y km 107+000, esto significa que la longitud total requerida del muro es de 200 metros. La Imagen IV.1 representa un croquis general de la ubicación de esta estructura. De acuerdo con la topografía de la zona y las necesidades del proyecto, la altura máxima que debe tener el muro es de nueve metros. En este caso, la inclinación propuesta de la fachada tiene una relación 0.1H:1.0V. La base del muro tiene una longitud de 8.10 metros, misma que corresponde al 90% de la altura máxima del muro; hay que mencionar que la longitud de la base hasta este momento tiene la función de tener una referencia para fines de cálculo de la revisión de la estabilidad externa.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

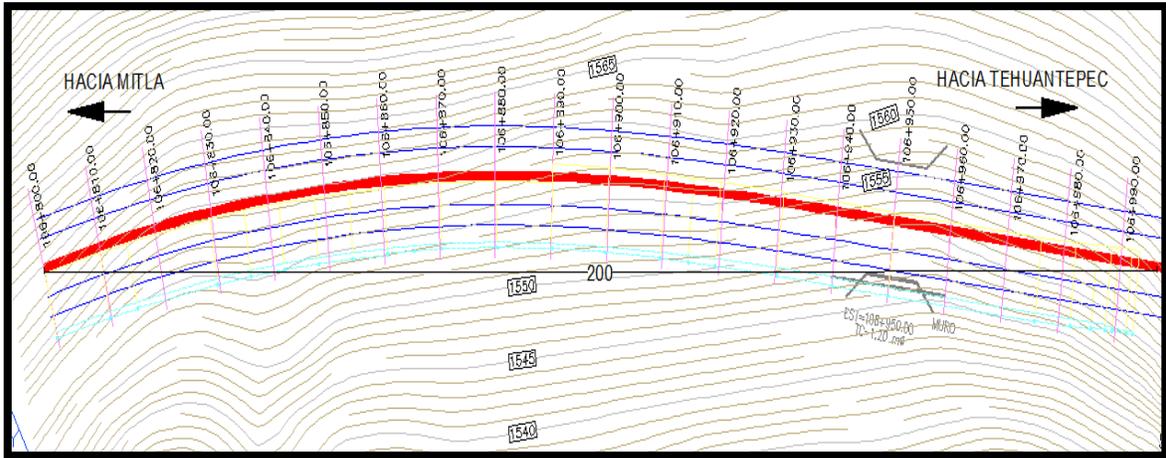


Imagen IV.1. Planta general de ubicación del muro A-B-C

Descripción geométrica

Altura, H	9	m
Inclinación de la cara del muro	0.10H:1.00V	
$\theta = 90 + \text{ang tan} \left(\frac{0.10}{1.00} \right)$	95.71	°
Base del muro, L	8.1	m

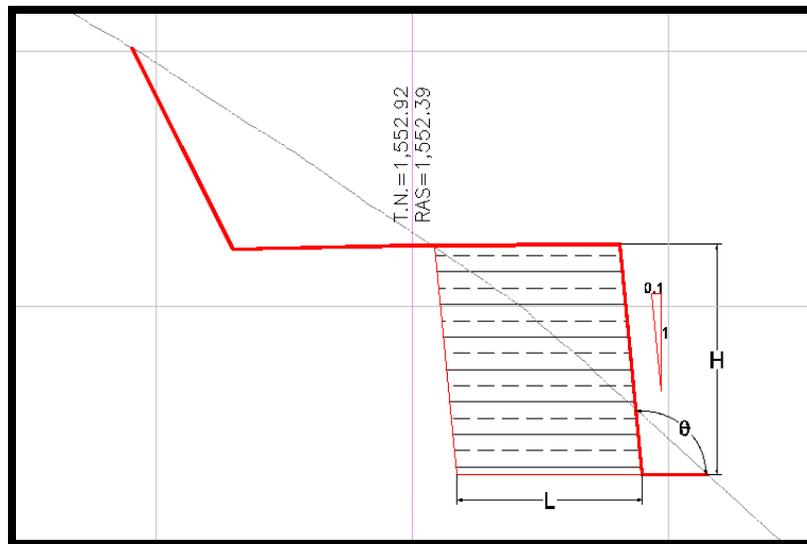


Imagen IV.2. Sección transversal propuesta

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Parámetros mecánicos del suelo

Suelo	γ (kN/m ³)	C (kPa)	ϕ (°)
Cimentación (desplante)	18	50	30
Suelo retenido	18	25	32
Suelo reforzado	18	25	32

Como se puede observar en la tabla anterior, los parámetros mecánicos del suelo empleados para el diseño del muro están agrupados de acuerdo a la zona que ocupan en la estructura, de acuerdo con la Imagen IV.3, cabe mencionar que los valores mostrados en la tabla han sido obtenidos por el laboratorio del proyecto basándose en los métodos de correlación mencionados en el subcapítulo III.2 de este trabajo.

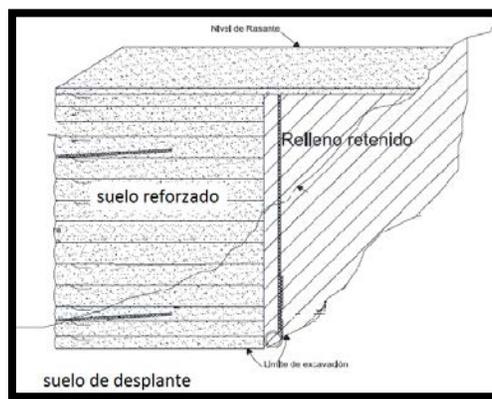


Imagen IV.3. Tipos de suelo, según la zona en la que se sitúan

Cargas

VIVA	despreciable	
MUERTA		
pavimento	15	kN/m ²
ACCIDENTALES		
SISMO A	0.17	g

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Las cargas ocasionadas por el tránsito vehicular pueden considerarse como cargas vivas, sin embargo los efectos en la estructura de contención se asumen despreciables debido a que estos se disipan con gran facilidad en el suelo. La sobrecarga generada por el pavimento es considerada como una carga muerta. Las cargas accidentales son provocadas por el sismo.

Factores de seguridad para el análisis de estabilidad interna

Caso	FS
Daños por instalación	$FR_{di} = 1.10$
Fluencia del material	$FR_{fl} = 2.20$
Degradación química	$FR_{dq} = 1.00$
Degradación biológica	$FR_{db} = 1.00$
Ruptura del geosintético	$FS = 2.42$
$FS = FS_{ID} * FS_{FL} * FS_{DQ} * FS_{DB}$	
Sismo	75% de los factores mencionados

Los factores de seguridad incluidos en la tabla anterior son, más bien, factores de reducción de la resistencia del material de refuerzo, los cuales son determinados por el fabricante de este material.

Coefficiente activo de presiones de tierra K_a

$$K_a = \frac{\text{sen}^2(95.71 + 32)}{\text{sen}^3(95.71) \left[1 + \frac{\text{sen}(32)}{\text{sen}(95.71)} \right]^2} = 0.27$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

El coeficiente activo de presiones de tierra, K_a , se ha calculado con la ayuda de la expresión (III-7).

Análisis de estabilidad externa (deslizamiento)

Para revisar la estabilidad externa del muro por deslizamiento es necesario obtener la fuerza vertical provocada por el suelo reforzado, V_1 , así como la fuerza vertical provocada por la sobrecarga, V_2 . Estas fuerzas son consideradas como las acciones resistentes.

$$V_1 = \gamma_f * H * L = 18 * 9 * 8.10 = 1312.20 \text{ kN/m}$$

$$V_2 = q * L = 15 * 8.10 = 121.50 \text{ kN/m}$$

$$\mu = \tan(30) = 0.58$$

El coeficiente de fricción crítico en la base del muro, μ , actúa como un reductor de resistencia, es por ello que se toma el menor valor de las opciones siguientes disponibles:

- El deslizamiento a lo largo del suelo de desplante. Si el esfuerzo cortante (cohesión y ángulo de fricción) es menor que el del material de relleno.
- El deslizamiento a lo largo del relleno reforzado (coeficiente de fricción del relleno reforzado).
- Para geosintéticos de tipo laminado, el deslizamiento que se da a lo largo de la capa más débil en todas las interfaces suelo-refuerzo. El ángulo de fricción que se da en la interacción suelo-refuerzo “ ρ ” preferentemente se debe medir por medio de pruebas de corte directo.

Se obtiene la suma de las fuerzas resistentes.

$$\sum P_r = (V_1 + V_2)\mu = (1312.20 + 121.50) * 0.58 = 831.55 \text{ kN/m}$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Posteriormente, se calculan las fuerzas actuantes provocadas por el suelo retenido, F_1 , y la sobrecarga, F_2 .

$$F_1 = \frac{1}{2} K_a \gamma_r H^2 = \frac{1}{2} * 0.27 * 18 * 9^2 = 196.83 \text{ kN/m}$$

$$F_2 = q K_a H = 15 * 0.27 * 9 = 36.45 \text{ kN/m}$$

Es conveniente conocer el coeficiente de aceleración máxima, A_m , a través de la expresión (III-21), así como la fuerza inercial horizontal P_{IR} y el empuje sísmico P_{AE} , dadas por las expresiones (III-22) y (III-23), respectivamente.

$$A_m = (1.45 - A)A = (1.45 - 0.17) * 0.17 = 0.22g$$

$$P_{IR} = 0.5 A_m \gamma_r H^2 = 0.5 * 0.22 * 18 * 9^2 = 160.38 \text{ kN/m}$$

$$P_{AE} = 0.375 A_m \gamma_f H^2 = 0.375 * 0.22 * 18 * 9^2 = 120.29 \text{ kN/m}$$

Se obtienen las sumatorias de fuerzas actuantes, una estática y una dinámica como sigue:

$$\sum P_{a\text{estática}} = F_1 + F_2 = 196.83 + 36.45 = 233.28 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned} \sum P_{a\text{dinámica}} &= \sum P_{a\text{estática}} + P_{IR} + 50\% P_{AE} = 233.28 + 160.38 + 0.50 * 120.29 \\ &= 453.81 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Con base en las sumatorias obtenidas, es posible calcular el factor de seguridad por deslizamiento de la siguiente manera, cabe hacer notar que los valores mínimos de este factor cambian de acuerdo a las condiciones de análisis, estático o dinámico.

$$FS_{\text{deslizamiento}} = \frac{\sum P_r}{\sum P_{a\text{estática}}} = \frac{831.55}{233.28} = 3.56 \geq 1.5$$

$$FS_{\text{deslizamiento}} = \frac{\sum P_r}{\sum P_{a\text{dinámica}}} = \frac{831.55}{453.81} = 1.83 \geq 1.125$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Análisis de estabilidad externa (volteo)

Lo importante en la revisión de estabilidad externa por volteo es conocer los brazos de palanca de las fuerzas que intervienen en el muro, así tenemos lo siguiente:

$$\sum M_r = V_1 \frac{L}{2} + V_2 \frac{L}{2} = 1312.20 * \frac{8.1}{2} + 121.50 * \frac{8.1}{2} = 5806.49 \text{ kN/m} \cdot \text{m}$$

$$\sum M_{a_{estático}} = F_1 \frac{1}{3} H + F_2 \frac{1}{2} H = 196.83 * \frac{1}{3} * 9 + 36.45 * \frac{1}{2} * 9 = 754.52 \text{ kN/m} \cdot \text{m}$$

$$\begin{aligned} \sum M_{a_{dinámico}} &= \sum M_{a_{estático}} + P_{IR} \frac{1}{2} H + P_{AE} \frac{3}{5} H \\ &= 754.52 + 160.38 * \frac{1}{2} * 9 + 120.29 * \frac{3}{5} * 9 = 2125.80 \text{ kN/m} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$FS_{volteo} = \frac{\sum M_r}{\sum M_{a_{estático}}} = \frac{5806.49}{754.52} = 7.70 \geq 2.5$$

$$FS_{volteo} = \frac{\sum M_r}{\sum M_{a_{dinámico}}} = \frac{5806.49}{2125.80} = 2.73 \geq 1.875$$

Revisión de excentricidad

Es necesario revisar que todas las fuerzas que intervienen en el muro actúen dentro de su centro de gravedad, ya que de otra forma, la estructura no será estable.

$$e_{estática} = \frac{L}{2} - \frac{\sum M_r}{V_1 + V_2} = \frac{8.10}{2} - \frac{5806.49}{1312.20 + 121.50} = 0.00 \text{ m}$$

$$\frac{L}{6} = \frac{8.1}{6} = 1.35 \text{ m estática}$$

$$e_{estática} < \frac{L}{6}$$

$$0.00 < 1.35$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

$$e_{dinámica} = \frac{L}{2} - \frac{\sum M_r - \sum M_{a_{dinámico}}}{V_1 + V_2} = \frac{8.10}{2} - \frac{5806.49 - 2125.80}{1312.20 + 121.50} = 1.48 \text{ m}$$

$$\frac{L}{3} = \frac{8.1}{3} = 2.70 \text{ m dinámica}$$

$$e_{dinámica} < \frac{L}{3}$$

$$1.48 < 2.70$$

Análisis de estabilidad externa (capacidad de carga)

Para el análisis de estabilidad externa por capacidad de carga, es necesario calcular el esfuerzo vertical equivalente con la expresión (III-11).

$$\sigma_v = \frac{V_1 + V_2}{L - 2e} = \frac{1312.20 + 121.50}{8.1 - 2 * 0} = 177.00 \text{ kN/m}^2$$

A continuación, se obtiene la capacidad de carga última del terreno, con base en su ángulo de fricción interna y entrando con ese dato en la Tabla III-4.

$$\text{Para } \phi_{desplante} = 30^\circ$$

$$N_c = 30.14 \quad N_\gamma = 22.40$$

$$q_{ult} = C_c N_c + 0.5(L)\gamma_c N_\gamma = 50 * 30.14 + 0.5 * 8.10 * 18 * 22.40 = 3139.96 \text{ kN/m}^2$$

Por último se calcula la capacidad de carga admisible y se compara con el esfuerzo vertical equivalente.

$$q_a = \frac{q_{ult}}{F.S.} = \frac{3139.96}{2.5} = 1255.98 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_v \leq q_a = \frac{q_{ult}}{F.S.}$$

$$177.00 \leq 1255.98$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Propiedades mecánicas de los geosintéticos disponibles

Geosintético	T_{ult} (kN/m)	$T_a = \frac{T_{ult}}{FS}$ (kN/m)	$T_a = \frac{T_{ult}}{0.75 \cdot FS}$ (kN/m)
P-UX15	114.00	47.11	62.81
P-UX14	70.00	28.93	38.57
T2400	40.00	16.53	22.04

En seguida se revisa la estabilidad interna del muro, para ello, es necesario calcular la tensión admisible de los materiales geosintéticos, con base en la información proporcionada por el fabricante.

Análisis de estabilidad interna (espesor de las capas de suelo)

De acuerdo con la Imagen III.21, tenemos que:

$$\frac{K_r}{K_a} = 1 \therefore K_r = K_a$$

$$\text{Para } Z_1 = S_{v_1} = 0.50 \text{ m}$$

$Z_1 = S_{v_1}$ es el espesor de material térreo propuesto depositado en cada capa de geosintético, es decir que, entre cada capa de refuerzo deberá haber 50 cm de suelo reforzado. Luego, se calcula el esfuerzo horizontal aplicado en esta capa con base en las expresiones (III-39) y (III-38).

$$\sigma_{v_1} = \gamma_r Z_1 + q = 18 * 0.50 + 15 = 24 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{H_1} = K_r \sigma_{v_1} = 0.27 * 24 = 6.48 \text{ kN/m}^2$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Se considera la relación de cobertura, que en este caso es igual a uno, ya que el ancho bruto de la capa de geosintético es igual al espaciamiento centro a centro que hay entre las capas del refuerzo.

$$R_c = 1 \text{ para geomallas}$$

Con base en los valores obtenidos, se debe calcular la tensión máxima en cada capa que conformará el muro.

$$T_{max} = \frac{\sigma_{H_1} * S_{v_1}}{R_c} = \frac{6.48 * 0.50}{1} = 3.24 \text{ kN/m}$$

La tensión máxima en cualquiera de todas las capas debe ser menor o igual a la tensión admisible que resiste el geosintético; en este caso:

$$3.24 \leq 22.04 \rightarrow T2400$$

$$3.24 \leq 38.57 \rightarrow P - UX14$$

$$3.24 \leq 62.81 \rightarrow P - UX15$$

Por economía, se elige el geosintético con menor resistencia a la tensión admisible, siempre y cuando sea mayor o igual a la tensión máxima de la capa analizada.

En este ejemplo, el lector puede observar que la tensión máxima de la capa uno es muy pequeña en comparación con la resistencia que ofrece el geosintético menos “fuerte”, así que las opciones para hacer más eficiente al refuerzo son, por un lado, aumentar el espesor de la capa de suelo, también se puede usar un geosintético que ofrezca menos resistencia, dado que la resistencia, entre otras cosas, está en función del costo del material.

El análisis mostrado anteriormente paso a paso debe repetirse para todas las capas que constituyan la totalidad de la altura del muro.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Análisis de estabilidad interna (Longitud de desarrollo del refuerzo)

El análisis de estabilidad interna respecto a la longitud de desarrollo del refuerzo, parte de la siguiente consideración:

$$FS_{PO} = 1.5$$

$$F^* = \frac{2}{3} \tan\varphi = \frac{2}{3} \tan(32) = 0.42$$

$$C = 2$$

$$R_c = 1$$

$$\alpha = 0.80$$

$$T_{max} = \frac{1}{FS_{PO}} F^* \cdot \gamma \cdot Z_p \cdot L_e \cdot C \cdot R_c \cdot \alpha$$

Despejando la longitud de empotramiento, L_e , se establece que:

$$L_{e1} \geq \frac{FS_{PO} \cdot T_{max}}{C \cdot F^* \cdot \gamma_r \cdot Z_p \cdot R_c \cdot \alpha} \geq 1m$$

$$L_{e1} \geq \frac{1.5 \cdot 3.24}{2 \cdot 0.42 \cdot 18 \cdot 0.50 \cdot 1 \cdot 0.80} \geq 1m$$

$$L_{e1} = 0.80 m \therefore L_e = 1 m$$

Lo anterior significa que la longitud de empotramiento debe tener un mínimo de 1 metro, esto se debe a que debe existir garantía de que el refuerzo esté alojado detrás de la superficie de falla de Rankine. Luego se calcula la longitud del refuerzo en la zona activa con base en la expresión (III-45). Finalmente se suman ambas longitudes para conocer la longitud total del refuerzo.

$$L_{a1} = (H - Z) \cdot \tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) = (9 - 0.5) \cdot \tan\left(45 - \frac{32}{2}\right) = 4.71 m$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

$$L = L_e + L_a = 1 + 4.71 = 5.71 \text{ m}$$

Teóricamente, las expresiones anteriores indican las longitudes de empotramiento y activas, respectivamente, teniendo como resultado la longitud de desarrollo del refuerzo necesaria para evitar la falla por extracción o arrancamiento. Sin embargo, la longitud total obtenida es menor que la propuesta inicialmente (8.10 m), por lo que el problema podría orillarse en este momento al extremo de volver a realizar el análisis con esta nueva longitud hasta alcanzar aquella que resulte la más eficiente.

En la práctica se ha evitado esta situación manteniendo la longitud total de desarrollo del refuerzo propuesta inicialmente. El motivo más fuerte de tomar esta decisión es debido a que es muy probable que el contratista construya con mayor agilidad el muro, en vez de cambiar la longitud en cada capa logrando así un aumento en sus rendimientos y en consecuencia un ahorro en tiempo y costo de mano de obra.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

El siguiente ejemplo enfatizará la ilustración de la estabilidad interna bajo efectos sísmicos.

- Muro D, St. 07, km 101+000 – km 101+180

El muro D está ubicado en el sub-tramo 07 de construcción, entre los km 101+000 y km 101+180, esto significa que la longitud total requerida del muro es de 180 metros. La Imagen IV.4 representa un croquis general de la ubicación de esta estructura. De acuerdo con la topografía de la zona y las necesidades del proyecto, la altura máxima que debe tener el muro es de quince metros y cincuenta centímetros. La inclinación propuesta de la fachada tiene una relación 0.1H:1.0V. La base del muro tiene una longitud de 13.10 metros, misma que corresponde al 85% de la altura máxima del muro.

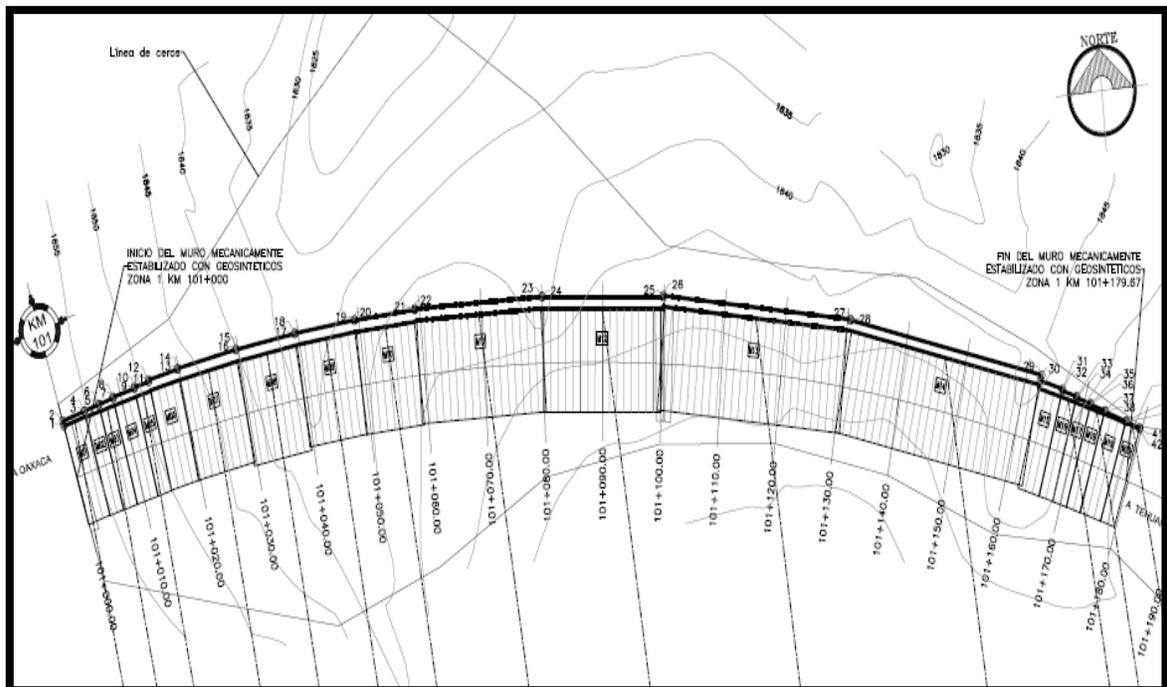


Imagen IV.4. Planta general de ubicación del muro D

Descripción geométrica

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Altura, H	15.50	m
Inclinación de la cara del muro	0.10H:1.00V	
$\theta = 90 + \text{ang tan} \left(\frac{0.10}{1.00} \right)$	95.71	°
Base del muro, L	13.10	m



Imagen IV.5. Sección transversal propuesta

Parámetros mecánicos del suelo

Suelo	γ (kN/m ³)	C (kPa)	ϕ (°)
Cimentación (desplante)	18	50	30
Suelo retenido	18	25	30
Suelo reforzado	18	25	32

Cargas

VIVA	despreciable	
MUERTA		
pavimento	15	kN/m
ACCIDENTALES		
SISMO A	0.17	g

Factores de seguridad para el análisis de estabilidad interna

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Caso	FS
Daños por instalación	$FR_{di} = 1.10$
Fluencia del material	$FR_{fl} = 2.20$
Degradación química	$FR_{dq} = 1.00$
Degradación biológica	$FR_{db} = 1.00$
Ruptura del geosintético	$FS = 2.42$
$FS = FS_{ID} * FS_{FL} * FS_{DQ} * FS_{DB}$	
Sismo	75% de los factores mencionados

Coefficiente activo de presiones de tierra K_a

$$K_a = \frac{\text{sen}^2(95.71 + 32)}{\text{sen}^3(95.71) \left[1 + \frac{\text{sen}(32)}{\text{sen}(95.71)} \right]^2} = 0.27$$

Análisis de estabilidad externa (deslizamiento)

$$V_1 = \gamma_f * H * L = 3654.90 \text{ kN/m}$$

$$V_2 = q * L = 196.50 \text{ kN/m}$$

$$\mu = \tan(30) = 0.58$$

$$\sum P_r = (V_1 + V_2)\mu = 2233.81 \text{ kN/m}$$

$$F_1 = \frac{1}{2} K_a \gamma_r H^2 = 637.09 \text{ kN/m}$$

$$F_2 = q K_a H = 68.50 \text{ kN/m}$$

$$A_m = (1.45 - A)A = 0.22g$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

$$P_{IR} = 0.5A_m\gamma_r H^2 = 470.51 \text{ kN/m}$$

$$P_{AE} = 0.375A_m\gamma_f H^2 = 352.88 \text{ kN/m}$$

$$\sum P_{a\text{estática}} = F_1 + F_2 = 705.59 \text{ kN/m}$$

$$\sum P_{a\text{dinámica}} = \sum P_{a\text{estática}} + P_{IR} + 50\%P_{AE} = 1352.54 \text{ kN/m}$$

$$FS_{\text{deslizamiento}} = \frac{\sum P_r}{\sum P_{a\text{estática}}} = 3.151 \geq 1.5$$

$$FS_{\text{deslizamiento}} = \frac{\sum P_r}{\sum P_{a\text{dinámica}}} = 1.644 \geq 1.125$$

Análisis de estabilidad externa (volteo)

$$\sum M_r = V_1 \frac{L}{2} + V_2 \frac{L}{2} = 25226.67 \text{ kN/m} \cdot \text{m}$$

$$\sum M_{a\text{estático}} = F_1 \frac{1}{3}H + F_2 \frac{1}{2}H = 3822.55 \text{ kN/m} \cdot \text{m}$$

$$\sum M_{a\text{dinámico}} = \sum M_{a\text{estático}} + P_{IR} \frac{1}{2}H + P_{AE} \frac{3}{5}H = 9109.86 \text{ kN/m} \cdot \text{m}$$

$$FS_{\text{volteo}} = \frac{\sum M_r}{\sum M_{a\text{estático}}} = 6.263 \geq 2.5$$

$$FS_{\text{volteo}} = \frac{\sum M_r}{\sum M_{a\text{dinámico}}} = 2.628 \geq 1.875$$

Revisión de excentricidad

$$e_{\text{estática}} = \frac{L}{2} - \frac{\sum M_r}{V_1 + V_2} = 0.99 \text{ m}$$

$$\frac{L}{6} = 2.18 \text{ m estática} \quad e_{\text{estática}} < \frac{L}{6}$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

$$0.99 < 2.18$$

$$e_{dinámica} = \frac{L}{2} - \frac{\sum M_r - \sum M_{a\text{ dinámico}}}{V_1 + V_2} = 2.37 \text{ m}$$

$$\frac{L}{3} = 4.36 \text{ m dinámica} \quad e_{dinámica} < \frac{L}{3}$$

$$2.37 < 4.36$$

Análisis de estabilidad externa (capacidad de carga)

$$\sigma_v = \frac{V_1 + V_2}{L - 2e} = 469.18 \text{ kN/m}^2 \quad \text{Para } \phi_{desplante} = 30^\circ$$

$$N_c = 30.14 \quad N_\gamma = 22.40$$

$$q_{ult} = C_c N_c + 0.5(L)\gamma_c N_\gamma = 3194.24 \text{ kN/m}^2$$

$$q_a = \frac{q_{ult}}{F.S.} = 1277.69 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_v \leq q_a = \frac{q_{ult}}{F.S.}$$

$$469.18 \leq 1277.69$$

Propiedades mecánicas de los geosintéticos disponibles

Geosintético	T_{ult} (kN/m)	$T_a = \frac{T_{ult}}{FS}$ (kN/m)	$T_a = \frac{T_{ult}}{0.75 \cdot FS}$ (kN/m)
P-UX15	114.00	47.11	62.81
P-UX14	70.00	28.93	38.57
T2400	40.00	16.53	22.04

Análisis de estabilidad interna

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Capa	Prof. Capa (m)	Espaciam. Capa [SV] (m)	Refuerzo	Long. Refuerzo [L = La +Le] (m)	Long. Ref. zona activa [La] (m)	Long. efectiva [Le] (m)	Tensión resistente última por ruptura (kN)	Tensión resistente última por extracción (kN)
1	0.50	0.50	T 2400	13.10	8.31	4.79	40	91.9
2	1.00	0.50	T 2400	13.10	8.04	5.06	40	133.6
3	1.50	0.50	T 2400	13.10	7.76	5.34	40	179.4
4	2.00	0.50	T 2400	13.10	7.48	5.62	40	229.1
5	2.50	0.50	P-UX 14	13.10	7.21	5.89	70	282.9
6	3.00	0.50	P-UX 14	13.10	6.93	6.17	70	340.6
7	3.50	0.50	P-UX 14	13.10	6.65	6.45	70	402.3
8	4.00	0.50	P-UX 14	13.10	6.37	6.73	70	468.0
9	4.50	0.50	P-UX 14	13.10	6.10	7.00	70	537.7
10	5.00	0.50	P-UX 14	13.10	5.82	7.28	70	611.4
11	5.50	0.50	P-UX 14	13.10	5.54	7.56	70	689.0
12	6.00	0.50	P-UX 14	13.10	5.27	7.83	70	770.7
13	6.50	0.50	P-UX 14	13.10	4.99	8.11	70	856.4
14	7.00	0.50	P-UX 14	13.10	4.71	8.39	70	946.0
15	7.50	0.50	P-UX 14	13.10	4.43	8.67	70	1039.6
16	8.00	0.50	P-UX 14	13.10	4.16	8.94	70	1137.3
17	8.50	0.50	P-UX 14	13.10	3.88	9.22	70	1238.9
18	9.00	0.50	P-UX 14	13.10	3.60	9.50	70	1344.5
19	9.50	0.50	P-UX 14	13.10	3.33	9.77	70	1454.1
20	10.00	0.50	P-UX 14	13.10	3.05	10.05	70	1567.7
21	10.50	0.50	P-UX 15	13.10	2.77	10.33	114	1685.3
22	11.00	0.50	P-UX 15	13.10	2.49	10.61	114	1806.8
23	11.50	0.50	P-UX 15	13.10	2.22	10.88	114	1932.4
24	12.00	0.50	P-UX 15	13.10	1.94	11.16	114	2061.9
25	12.50	0.50	P-UX 15	13.10	1.66	11.44	114	2195.5
26	13.00	0.50	P-UX 15	13.10	1.39	11.71	114	2333.0
27	13.50	0.50	P-UX 15	13.10	1.11	11.99	114	2474.5
28	14.00	0.50	P-UX 15	13.10	0.83	12.27	114	2620.0
29	14.50	0.50	P-UX 15	13.10	0.55	12.55	114	2769.5
30	15.00	0.50	P-UX 15	13.10	0.28	12.82	114	2923.0

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Análisis de estabilidad interna (efectos sísmicos)

El análisis de estabilidad interna del muro debido a los efectos sísmicos es obtenido a través del cálculo de la fuerza inercial, P_I , de acuerdo con la expresión (III-47).

$$A_{zona\ activa} = \frac{1}{2} H^2 \tan \left[90 - \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \right] = \frac{1}{2} 15.50^2 \tan \left[90 - \left(45 + \frac{32}{2} \right) \right] = 66.59\ m^2$$

$$W_A = A_{zona\ activa} \gamma_r = 66.59 * 18 = 1198.62\ kN/m$$

$$P_I = A_m W_A = 0.22 * 1198.62 = 263.70\ kN/m$$

Luego se debe calcular el incremento dinámico, T_{md} , directamente inducido por la fuerza de inercia en los refuerzos, distribuido en los diferentes refuerzos proporcionalmente a su “área resistente”, de acuerdo con la expresión (III-50).

$$T_{md} = P_I \frac{L_{e_i}}{\sum_{i=1}^n L_{e_i}}$$

$$\sum_{i=1}^n L_{e_i} = 264.13\ m$$

$$T_{md_1} = P_I \frac{L_{e_1}}{\sum_{i=1}^n L_{e_i}} = 263.70 * \frac{4.79}{264.13} = 4.78\ kN/m \approx 4.50\ kN/m$$

$$T_{md_2} = 263.70 * \frac{5.06}{264.13} = 5.05\ kN/m \approx 4.80\ kN/m$$

$$T_{md_3} = 5.00\ kN/m$$

⋮

$$T_{md_{30}} = 12.10\ kN/m$$

Una vez calculada la tensión máxima dinámica en cada capa, T_{md} , se suma con la tensión máxima, T_{max} .

$$T_{total} = T_{max} + T_{md}$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Para las cargas dinámicas, donde la carga es aplicada por un tiempo corto, no es necesaria una reducción por fluencia; por lo tanto:

$$T_{md} \leq \frac{S_{rt} \cdot R_c}{0.75FS \cdot RF_D \cdot RF_{ID}}$$

Para evitar la extracción aún bajo cargas sísmicas, para todos los refuerzos, el coeficiente de fricción para F^* se podría reducir al 80 por ciento del valor estático, lo que nos da:

$$T_{total} \leq \frac{P_r R_c}{0.75FS_{p0}} = \frac{C \cdot (0.8 F^*)}{0.75 \cdot 1.5} \cdot \gamma Z' \cdot L_e R_c \alpha$$

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Capa	Análisis estático			Análisis dinámico		
	Tensión máxima actuante [Tmax] (kN)	Falla por ruptura de esfuerzo [FS]	Falla por extracción [FS]	Incremento Tensión sismo [Tmdi] (kN)	Tensión total (Tmax + Tmdi) [Ttotal] (kN)	[FS] Falla por ruptura de esfuerzo
1	3.3	12.3	28.2	4.5	7.8	5.2
2	4.5	8.9	29.8	4.8	9.2	4.3
3	5.7	7.0	31.4	5.0	10.7	3.7
4	6.9	5.8	33.1	5.3	12.2	3.3
5	8.2	8.6	34.7	5.5	13.7	5.1
6	9.4	7.5	36.3	5.8	15.2	4.6
7	10.6	6.6	38.0	6.1	16.7	4.2
8	11.8	5.9	39.6	6.3	18.1	3.9
9	13.0	5.4	41.2	6.6	19.6	3.6
10	14.3	4.9	42.8	6.8	21.1	3.3
11	15.5	4.5	44.5	7.1	22.6	3.1
12	16.7	4.2	46.1	7.4	24.1	2.9
13	17.9	3.9	47.7	7.6	25.6	2.7
14	19.2	3.7	49.4	7.9	27.1	2.6
15	20.4	3.4	51.0	8.2	28.5	2.5
16	21.6	3.2	52.6	8.4	30.0	2.3
17	22.8	3.1	54.3	8.7	31.5	2.2
18	24.1	2.9	55.9	8.9	33.0	2.1
19	25.3	2.8	57.5	9.2	34.5	2.0
20	26.5	2.6	59.2	9.5	36.0	1.9
21	27.7	4.1	60.8	9.7	37.4	3.0
22	28.9	3.9	62.4	10.0	38.9	2.9
23	30.2	3.8	64.1	10.2	40.4	2.8
24	31.4	3.6	65.7	10.5	41.9	2.7
25	32.6	3.5	67.3	10.8	43.4	2.6
26	33.8	3.4	68.9	11.0	44.9	2.5
27	35.1	3.3	70.6	11.3	46.3	2.5
28	36.3	3.1	72.2	11.5	47.8	2.4
29	37.5	3.0	73.8	11.8	49.3	2.3
30	38.7	2.9	75.5	12.1	50.8	2.2

IV.1 Procedimiento constructivo

En seguida, el lector podrá conocer, de manera general, cuál es el procedimiento constructivo para la construcción de un muro mecánicamente estabilizado con geosintéticos.

- **PREPARACIÓN DEL TERRENO**

Dependiendo de las condiciones topográficas del terreno, es necesario excavar o hacer el corte en la zona donde está definido el muro hasta llegar al nivel de desplante de la estructura procurando dejar nivelado el terreno.

Si la excavación debe hacerse en una ladera, esta debe efectuarse procurando garantizar la estabilidad del talud del corte.

Si el terreno, en el nivel de desplante del muro, tiene condiciones desfavorables para soportar la estructura, es recomendable excavar de 30 a 60 centímetros por debajo del nivel de desplante; posteriormente, la sobre-excavación deberá rellenarse con material granular de mejor calidad, compactarse y nivelar correctamente.

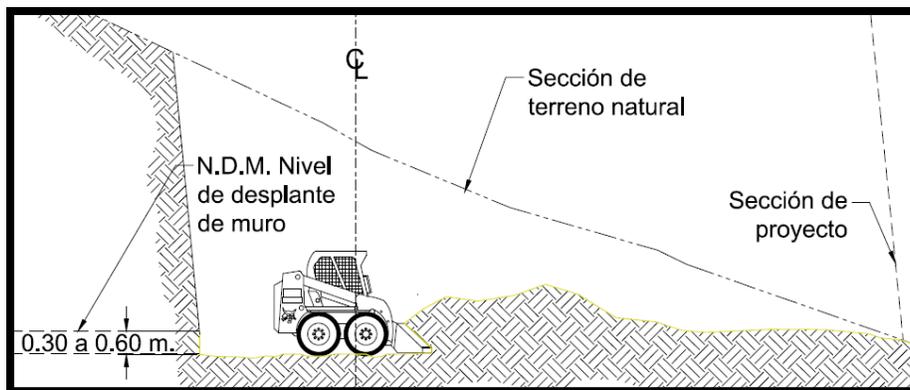


Imagen IV.6. Excavación del terreno natural

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**



Imagen IV.7. Mejoramiento del nivel de desplante

- SISTEMA DE SUBDRENAJE

Deberá considerarse la excavación de una zanja que permita tender el sub-drenaje, ya que, debe impedirse la presencia de agua o presiones hidrostáticas en el suelo de relleno e incluso en el suelo retenido por el muro.

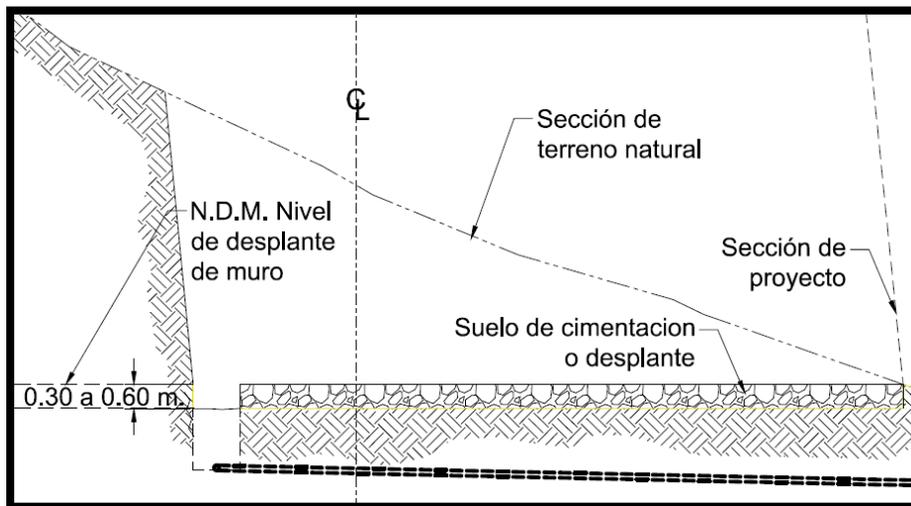


Imagen IV.8. Preparación de zanja para sub-drenaje

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Es necesario considerar geodrenes planares, los cuales deben extenderse y distribuirse uniformemente en el espaldón del muro o el talud del corte producto de la excavación.



Imagen IV.9. Instalación del sistema de drenaje

Deberá revisarse la configuración de los drenes planares, los cuales deberán colocarse entre las capas de suelo de relleno que correspondan.

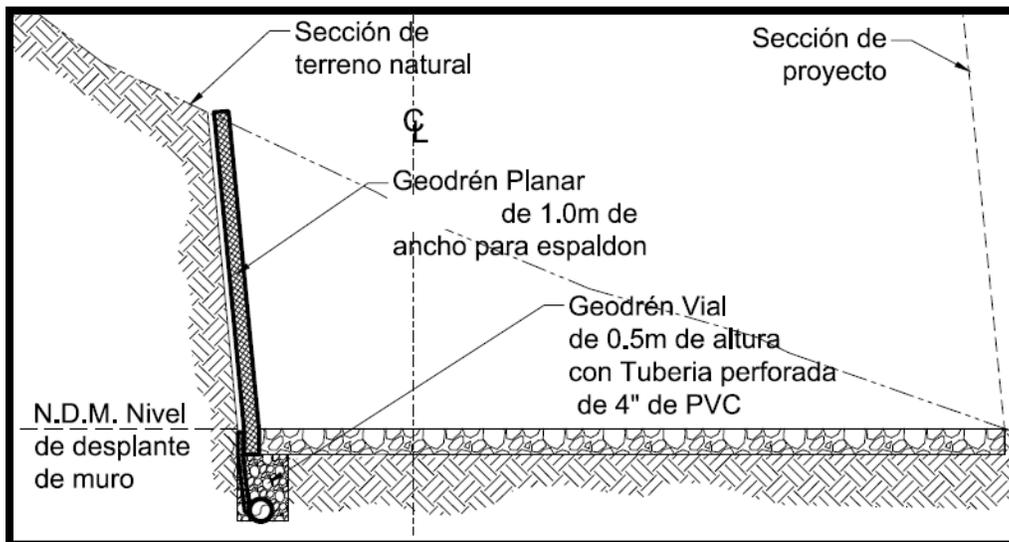


Imagen IV.10. Instalación del sistema de sub-drenaje

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

- COLOCACIÓN DEL REFUERZO

El rollo de geosintético deberá colocarse con el sentido a partir del cual se realizó el diseño del muro orientado de manera perpendicular al alineamiento longitudinal del muro.

Para la conformación de la cara, es necesario utilizar una cimbra en forma de “L” armada con el apoyo de ménsulas preferentemente de malla electro-soldada y contrafuertes de varilla de tamaño mínimo de 3/8 de pulgada.

La cimbra deberá asegurarse previniendo cualquier movimiento durante la colocación del material de relleno, esto garantizará la seguridad de la estructura misma y del personal.

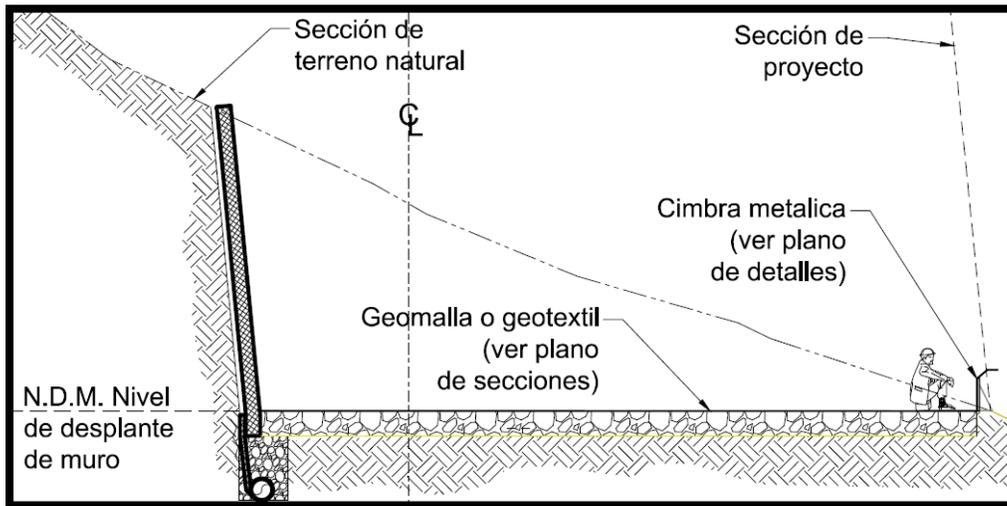


Imagen IV.11. Colocación del refuerzo y sistema de cimbra en la cara del muro

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**



Imagen IV.12. Colocación de geosintético y cimbra

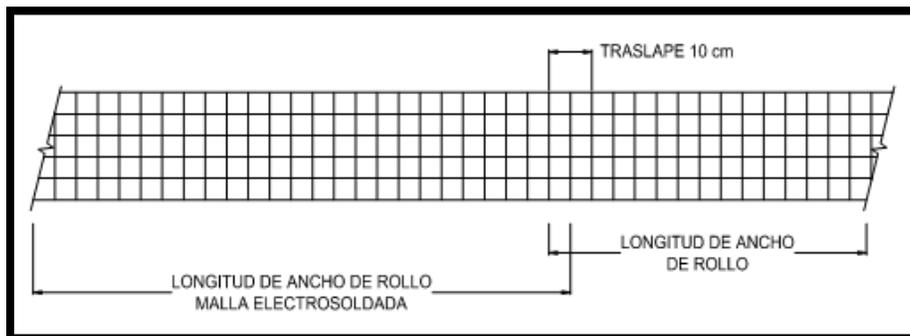


Imagen IV.13. Vista frontal de la cimbra

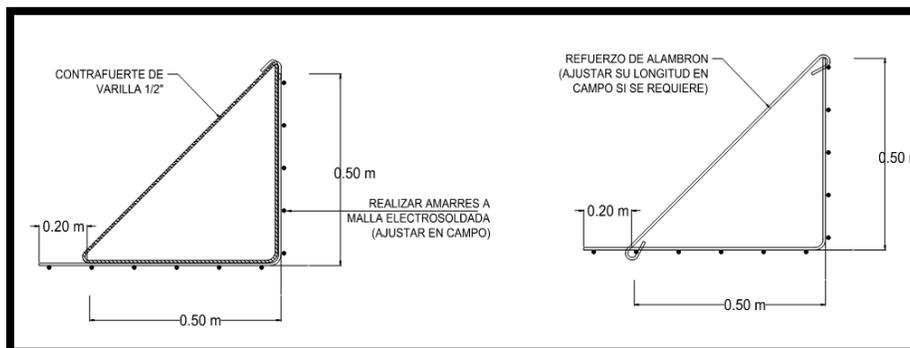


Imagen IV.14. Detalle constructivo de refuerzos y contrafuertes

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

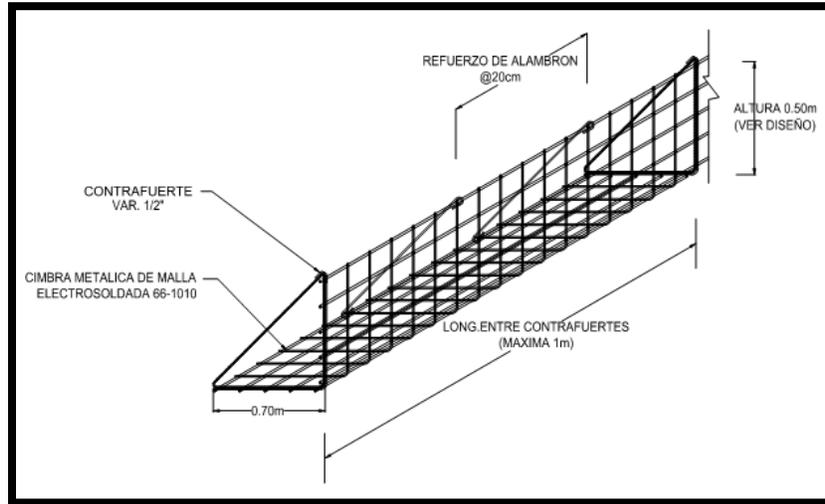


Imagen IV.15. Vista isométrica de cimbra

- **COLOCACIÓN DE MATERIAL DE RELLENO**

El material de relleno se colocará sobre el refuerzo directamente procurando evitar mover, generar pliegues, torceduras o dobleces en el refuerzo.



Imagen IV.16. Colocación y tendido de material térreo en capas

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Los primeros 15 centímetros de espesor de suelo de relleno deberán ser compactados con equipo de compactación ligero, como un compactador manual “bailarina”. Después de esta primera capa, el proceso de compactación podrá ejecutarse por medio de equipos convencionales. Debe usarse equipo ligero para compactar al menos los 60 centímetros más cercanos a la cara del muro. El grado de compactación deberá cumplir con las especificaciones o normas a los que se sujete la construcción del muro.

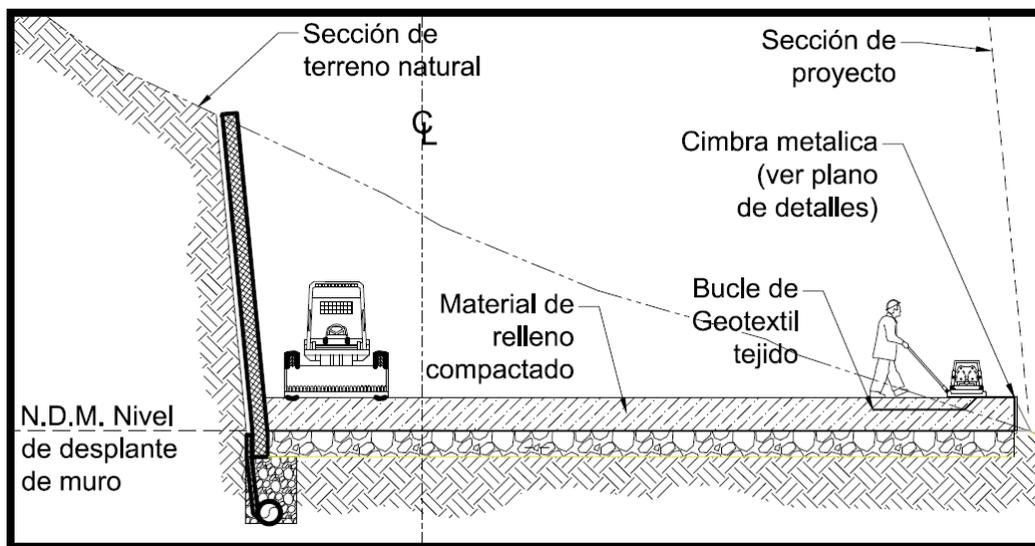


Imagen IV.17. Compactación del suelo de relleno

- **COLOCACIÓN DE LAS CAPAS SUBSECUENTES**

Alcanzado el nivel de la primera capa de suelo de relleno, deberá colocarse el siguiente rollo de geosintético. Hay que considerar la colocación de su respectivo módulo de cimbra.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**



Imagen IV.18. Colocación de capas subsecuentes

En el caso de que se empleé geomalla como refuerzo, deberá usarse un bucle de geotextil tejido para envolver la capa de suelo de tal manera que quede confinado. El geotextil tejido se instalará, a por lo menos, 70 centímetros de la cara del muro integrándolo por la parte de la cimbra.

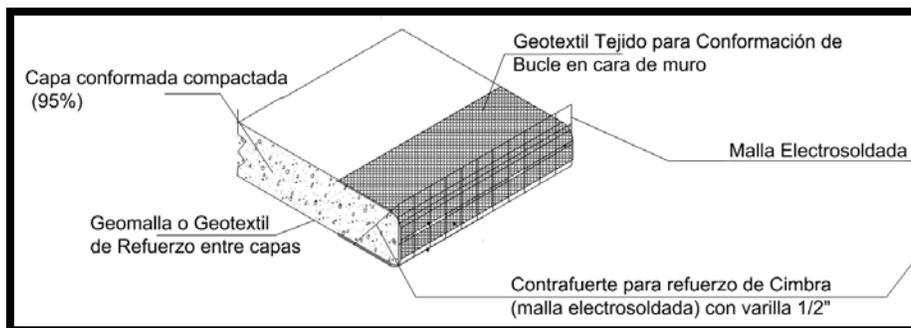


Imagen IV.19. Bucle de geotextil tejido

Cuando se llegue a la altura de diseño, la capa se envolverá antes de integrar el siguiente refuerzo. Se coloca más material de relleno compactándolo para alcanzar la altura de diseño de la capa.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

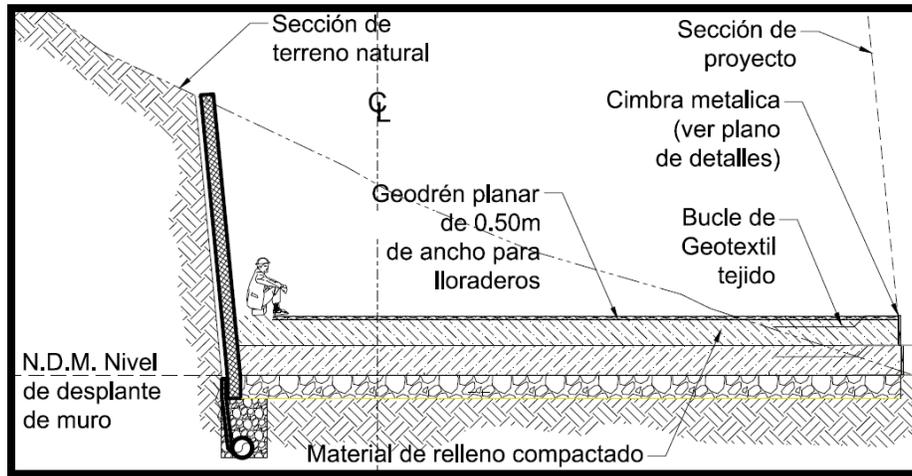


Imagen IV.20. Intercalación de geodrenes planares entre capas de suelo

- ACABADO DE LA FACHADA

Es necesario colocar un manto, preferentemente geosintético, en toda la extensión de la cara del muro, con el fin de que controle y proteja de la erosión a la estructura.

El manto deberá quedar anclado en la cara del muro por medio de ganchos de sujeción y en su parte superior, deberá rematarse con una zanja de anclaje.



Imagen IV.21. Fachada del muro

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

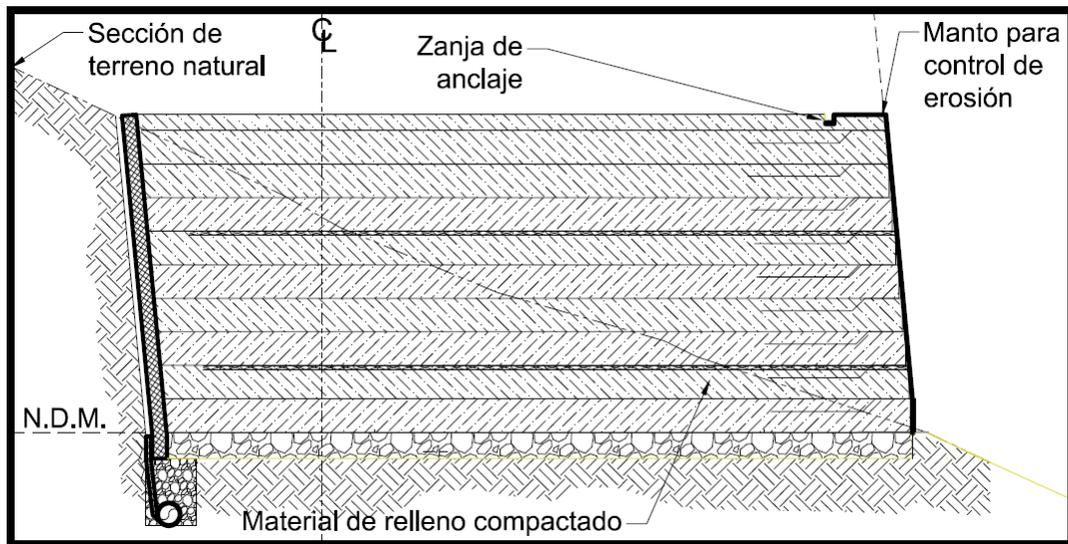


Imagen IV.22. Geomanto para proteger de la erosión

A manera de recomendación, el material que se use como relleno reforzado en la construcción del muro deberá quedar libre de materia orgánica; asimismo, su índice de plasticidad deberá ser como máximo 12% para que la estructura no presente problemas de deformaciones excesivas.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los muros mecánicamente estabilizados con geosintéticos, además de cumplir con la función de contener una masa y guardar un desnivel, ayudan a resolver el problema de la falta de espacio para construir un terraplén trayendo como beneficio menores costos en la obtención de derecho de vía, menor impacto ambiental al minimizar el área de afectación de la flora en el terreno natural. Los beneficios que trae un muro geosintético también pueden ser de índole social cuando con ellos es factible preservar caminos vecinales o de acceso a zonas de importancia para las comunidades vecinas.

La topografía es información fundamental para el diseñador porque en la medida de que sea más precisa o refinada, la propuesta geométrica que da origen al diseño será mucho más coincidente con la realidad; esto no significa que no se pueda lograr un anteproyecto con base en una restitución fotogramétrica ni muchos menos, pero si es importante que cuando no existan datos topográficos detallados, el anteproyecto sea verificado en campo para resolver cualquier discrepancia.

En cuanto a los geosintéticos, existe una gama muy amplia de productos elaborados con base en diferentes tipos de procedimientos y los hay para diferentes funciones, asimismo, existen cada vez más fabricantes proveedores de estos materiales en el mercado; a pesar de esto e independientemente del nombre del fabricante, los geosintéticos capaces de cumplir con los requerimientos funcionales de un muro geosintético son las geomallas y los geotextiles, los cuales deben cumplir con rangos permisibles de resistencia a la tensión, agentes químicos, biológicos, de radiación ultra violeta y degradación durante la construcción al ser manipulados.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Se ha visto en la etapa de diseño que, la altura es una variable que no tiene límite pudiendo proyectar estructuras muy altas, sin embargo, la realidad es que un muro de tales características deja de ser factible, sobre todo si se piensa desplantarlo en una ladera o una sección en balcón, debido a que el problema de la retención de un relleno pasa a segundo plano haciendo énfasis al problema de la estabilidad del talud generado en la etapa constructiva. La altura límite para estos muros podría ser hasta de 30 metros.

Los muros geosintéticos son estructuras muy flexibles, esto significa que las deformaciones podrían sobrepasar el estado límite de servicio; a pesar de esto, la estructura seguiría en buenas condiciones de operación. El beneficio que trae esta característica es que, en zonas altamente sísmicas, los muros tienen gran capacidad de disipar los efectos de un sismo.

Las propiedades mecánicas, particularmente el ángulo de fricción interno, de los materiales de relleno pueden ser obtenidas a través de pruebas de laboratorio, por ejemplo, una prueba triaxial o una de corte directo. Sin embargo, este ángulo puede ser obtenido con la ayuda de métodos de correlación mediante las características físicas del material de relleno, es decir, sus propiedades índice y su clasificación.

Después de haber realizado este documento, me parece que sería muy recomendable que exista una normativa en México, la cual estandarice y regule el uso de los muros mecánicamente estabilizados así como sus características y componentes, de tal manera que todos los involucrados en la realización de estas estructuras de contención, diseñadores, constructores, inspectores y operadores, cuenten con un lineamiento único que impida las discrepancias que hoy en día se llegan a dar.

En casos donde la estructura se vea comprometida debido a aspectos o factores que represente incertidumbre en su comportamiento, como el caso de un muro muy alto o con serios problemas de estabilidad global, se propone generar un plan de

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

instrumentación que contenga un programa de monitoreo establecido. El plan puede contener el uso de inclinómetros para identificar posibles deslizamientos de tierra, celdas de presión para conocer los esfuerzos reales en la estructura, sensores de movimiento por si existen vibraciones importantes o efectos sísmicos frecuentes, piezómetros para monitorear la presión de poro e inclusive puntos de control topográfico en la fachada para que hagan la función de testigos ante posibles deformaciones.

Es recomendable que el material de relleno sea friccionante para que logre la interacción con el geosintético de refuerzo, sin embargo, este no deberá contener partículas mayores a 3 pulgadas (7.5 cm) ya que puede generar problemas con la calidad en la compactación de las capas del muro provocando deformaciones excesivas. En caso de que el índice de plasticidad sea mayor al 6%, se recomienda agregar cal al relleno para estabilizarlo. La proporción de cal deberá ser determinada en función del índice de plasticidad.

El sistema de drenaje en estas obras es muy importante debido a que no se consideran cargas hidráulicas en el diseño. Este sistema deberá incluir drenes planares entre las capas de refuerzo geosintético, además de los sistemas complementarios en la espalda del muro compuestos por drenes franceses y geodrenes. Se recomienda evitar que la superficie del muro no se sature por las lluvias para no provocar hundimientos o deformaciones.

Se recomienda la práctica de sondeos de penetración estándar que permitan conocer la estratigrafía de la zona de desplante, esto garantizará que el terreno esté libre de cualquier problema que represente inestabilidad en la estructura, como oquedades, cavernas, etc.

Este documento puede servir como base para la supervisión encargada de observar y calificar las estructuras de las características tratadas, ya que en México aún carecemos de fuentes o referencias nacionales que funcionen como guía para estos fines.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

BIBLIOGRAFÍA

- Amigó, V., Salvador, M. D., Sahuquillo, Ó., Llorens, R., & Martí, F. (2008). Aprovechamiento de residuos de fibras naturales como elementos de refuerzo de materiales poliméricos. *Quinto Congreso Internacional de Fibras Naturales*.
- Braja, M. D. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: International Thomson Editores.
- Coulomb, C. A. (1776). *Essai sur une Application des Règles de Maximis et Minimis à quelques Problèmes de Statique, relatifs a l'Architecture*. París: Mem. Roy. des Sciences.
- Cruz Vargas, E. (2013). *Influencia de Geomallas en los Parámetros Mecánicos de Materiales para Vías Terrestres*. México.
- Geosistemas PAVCO de Mexichem. (2009). *Manual de Diseño con Geosintéticos*. Bogotá, Colombia: Zetta Comunicadores.
- Jaky, J. (1944). *The Coefficient of Earth Pressure at Rest*. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2013). *Mecánica de Suelos II Teoría y Aplicaciones*. México: Limusa.
- Lay, M. G. (1992). *Ways of the World: A History of the World's Roads and of the Vehicles that Used Them*. Rutgers University Press.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

Massarsch, K. R. (1979). *Lateral Earth Pressure in Normally Consolidated Clay*. England: Proceedings of the seventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

Meza A., M. d. (2008). El ahuejote en la restauración del paisaje de Xochimilco. *Bitácora Arquitectura*, 50-53.

Suárez, J. (2008). *Análisis Geotécnico, Vol. 1*.

Tingay, G. I., & Badcock, J. (1989). *These Were The Romans*. Pennsylvania: Dufour Editions.

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDOS A BASE DE GEOSINTÉTICOS. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE
LA CARRETERA MITLA – TEHUANTEPEC II**

**ANEXO A, PLANOS DE MUROS MECANICAMENTE
ESTABILIZADOS CON GEOSINTÉTICOS SELECCIONADOS**