



**GUÍA DE PROCEDIMIENTOS Y  
LINEAMIENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN  
DE MUROS MECÁNICAMENTE  
ESTABILIZADOS**

2 0 1 4

**Secretaría de Comunicaciones y Transportes**

**Subsecretaría de Infraestructura**

**Dirección General de Servicios Técnicos**

Av. Coyoacán No. 1895

Col. Acacias

Delegación Benito Juárez

03240 México, D.F.

Derechos Reservados

Prohibida su reproducción para fines comerciales

**Primera Edición      2014**

# Agradecimiento

**La Secretaría de Comunicaciones y Transportes:** Agradece a las dependencias Federales, Estatales y del Distrito Federal, a las Instituciones de Investigación y Académicas, a las Sociedades Técnicas, Cámaras y Asociaciones del Autotransporte, así como a las empresas privadas, por sus conocimientos y experiencia vertidos para la elaboración de esta Guía

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>- 6 -</b>
<b>1.1. Objetivo</b>	<b>- 6 -</b>
<b>1.2. Alcance de la Guía</b>	<b>- 6 -</b>
<b>1.3. Generalidades</b>	<b>- 6 -</b>
1.3.1. Definición de Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.)	- 7 -
1.3.2. Elementos que conforman un M.M.E.	- 7 -
1.3.2.1. Paramento	- 8 -
1.3.2.2. Elementos de refuerzo	- 11 -
1.3.2.3. Material de relleno	- 12 -
<b>2. ESTUDIOS PRELIMINARES</b>	<b>- 14 -</b>
<b>2.1. Determinación de condiciones generales y particulares para el desarrollo de proyectos de Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.)</b>	<b>- 14 -</b>
2.1.1. Condiciones geométricas	- 14 -
2.1.1.1. Esviajes	- 14 -
2.1.1.2. Gálibos	- 14 -
2.1.1.3. Radios mínimos	- 15 -
2.1.1.4. Deflexiones	- 16 -
2.1.1.5. Rasantes	- 16 -
2.1.1.6. Empotramiento o profundidad de empotre	- 16 -
2.1.2. Condiciones topográficas	- 17 -
2.1.2.1. Secciones transversales	- 17 -
2.1.2.2. Secciones constructivas	- 17 -
2.1.2.3. Terreno natural	- 17 -
2.1.2.4. Cortes y terraplenes	- 17 -
2.1.3. Estructuras	- 18 -
2.1.3.1. Caballetes	- 18 -
2.1.3.2. Cargaderos	- 18 -
2.1.3.3. Zapatas	- 18 -
2.1.3.4. Parapetos	- 18 -
2.1.3.5. Sismo	- 19 -
2.1.4. Estudios adicionales	- 20 -
2.1.4.1. Estudios hidrológicos e hidráulicos	- 20 -
2.1.4.2. Estudios de sobrecargas especiales	- 20 -
2.1.4.3. Procedimientos constructivos	- 21 -
2.1.5. Condiciones geotécnicas de la zona de proyecto	- 21 -
2.1.5.1. Investigación de tipos de suelos y bancos disponibles de material de relleno para M.M.E., incluyendo sus propiedades índice	- 21 -
2.1.5.2. Estudio de mecánica de suelos	- 23 -
2.1.5.3. Estudio de (de los) mejoramiento (s) propuesto (s)	- 28 -
2.1.5.4. Estudio de asentamientos en función a esfuerzos preliminares	- 29 -
2.1.6. Tipología de Muros Mecánicamente Estabilizados	- 30 -
2.1.6.1. Uso	- 30 -
2.1.6.2. Tipo de panel	- 31 -
2.1.6.3. Refuerzos	- 32 -

<b>3. PROYECTO</b>	<b>- 34 -</b>
<b>3.1. Bases de diseño</b>	<b>- 34 -</b>
<b>3.2. Combinaciones de cargas</b>	<b>- 35 -</b>
3.2.1. Cargas	- 35 -
3.2.1.1. Definición y clasificación	- 35 -
3.2.1.2. Cargas permanentes	- 35 -
3.2.1.3. Cargas variables	- 36 -
3.2.1.4. Cargas accidentales	- 37 -
3.2.2. Combinaciones de cargas	- 37 -
3.2.2.1. Combinaciones normales	- 38 -
3.2.2.2. Combinaciones accidentales	- 38 -
3.2.3. Coeficientes de seguridad	- 38 -
<b>3.3. Dimensiones de las estructuras</b>	<b>- 39 -</b>
3.3.1. Longitud de los refuerzos	- 40 -
3.3.2. Empotramiento de la cara frontal	- 41 -
<b>3.4. Paramento</b>	<b>- 43 -</b>
3.4.1. Paramentos de concreto	- 43 -
3.4.2. Paramentos metálicos	- 44 -
3.4.3. Paramentos verdes o vegetables	- 45 -
3.4.4. Corrosión	- 45 -
<b>3.5. Condiciones de cargas especiales</b>	<b>- 45 -</b>
3.5.1. Sobrecargas permanentes	- 45 -
3.5.1.1. Sobrecargas permanentes	- 45 -
3.5.1.2. Cargas del suelo	- 46 -
3.5.2. Sobrecargas accidentales	- 48 -
3.5.2.1. Sobrecarga por sismo	- 48 -
3.5.2.2. Sobrecarga por viento	- 48 -
3.5.2.3. Choques de vehículos contra dispositivos de retención	- 49 -
3.5.3. Presiones hidrostáticas	- 49 -
3.5.3.1. Oleaje	- 49 -
3.5.3.2. Socavación	- 49 -
<b>3.6. Estabilidad externa</b>	<b>- 49 -</b>
3.6.1. Combinación de cargas	- 53 -
3.6.1.1. Cargas	- 54 -
3.6.1.2. Condiciones estáticas	- 56 -
3.6.1.3. Condiciones dinámicas	- 56 -
3.6.2. Deslizamiento	- 57 -
3.6.3. Esfuerzos al suelo	- 58 -
3.6.3.1. Falla por corte general.	- 59 -
3.6.3.2. Falla por corte local	- 59 -
3.6.4. Volteo	- 59 -
3.6.4.1. Análisis por excentricidad	- 59 -
3.6.4.2. Volteo	- 60 -
<b>3.7. Estabilidad interna</b>	<b>- 61 -</b>
3.7.1. Tipos de refuerzos	- 61 -
3.7.1.1. Refuerzos inextensibles	- 61 -
3.7.1.2. Refuerzos extensibles	- 62 -

3.7.2.	Adherencia de los refuerzos del suelo _____	- 62 -
3.7.2.1.	Límite entre la zona activa y la zona resistente _____	- 62 -
3.7.2.2.	Diseño contra la extracción de los refuerzos (adherencia) _____	- 64 -
3.7.3.	Resistencia de los refuerzos _____	- 67 -
3.7.3.1.	Requisitos generales _____	- 67 -
3.7.3.2.	Consideraciones relacionadas con la vida útil de diseño _____	- 67 -
3.7.3.3.	Resistencia a la tensión _____	- 71 -
3.7.3.4.	Resistencia de diseño de las conexiones _____	- 73 -
3.7.3.5.	Especificaciones de los refuerzos _____	- 77 -
<b>3.8.</b>	<b>Obras de drenaje _____</b>	<b>- 77 -</b>
3.8.1.	Cunetas _____	- 78 -
3.8.2.	Drenes _____	- 78 -
3.8.3.	Lavaderos _____	- 79 -
3.8.4.	Alcantarillas _____	- 79 -
3.8.5.	Geodrén _____	- 79 -
3.8.6.	Filtros _____	- 80 -
3.8.6.1.	Permeabilidad _____	- 81 -
3.8.6.2.	Migración de partículas finas _____	- 82 -
3.8.6.3.	Obstrucción _____	- 82 -
3.8.6.4.	Uniformidad _____	- 82 -
<b>3.9.</b>	<b>Revisiones geotécnicas _____</b>	<b>- 84 -</b>
3.9.1.	Capacidad de carga _____	- 85 -
3.9.1.1.	Ecuación general de capacidad de carga _____	- 87 -
3.9.2.	Asentamientos _____	- 88 -
3.9.2.1.	Desplazamiento Lateral _____	- 89 -
3.9.3.	Estabilidad global _____	- 90 -
3.9.4.	Mejoramientos _____	- 92 -
3.9.4.1.	Anclajes _____	- 93 -
3.9.4.2.	Sustitución de material _____	- 94 -
3.9.4.3.	Inyecciones _____	- 94 -
3.9.4.4.	Inclusiones _____	- 94 -
3.9.4.5.	Micropilotes _____	- 95 -
3.9.4.6.	Geosintéticos _____	- 95 -
<b>3.10.</b>	<b>Especificaciones generales de proyecto _____</b>	<b>- 95 -</b>
<b>4.</b>	<b>PROYECTO EJECUTIVO _____</b>	<b>- 97 -</b>
<b>4.1.</b>	<b>Planos de construcción _____</b>	<b>- 98 -</b>
4.1.1.	Plano general con ubicación de muros _____	- 98 -
4.1.2.	Detalles generales y particulares _____	- 99 -
4.1.3.	Perfil del (de los) muro (s) _____	- 100 -
<b>4.2.</b>	<b>Planos de procedimiento constructivo _____</b>	<b>- 102 -</b>
<b>4.3.</b>	<b>Planos de seguridad _____</b>	<b>- 104 -</b>
<b>4.4.</b>	<b>Memoria de cálculo _____</b>	<b>- 106 -</b>
<b>5.</b>	<b>CONSTRUCCIÓN _____</b>	<b>- 108 -</b>
<b>5.1.</b>	<b>Introducción _____</b>	<b>- 108 -</b>

**5.2. Presentación de proyecto ejecutivo para construcción de M.M.E. \_ - 108 -**

5.2.1. Planos de procedimiento constructivo y seguridad _____	- 108 -
5.2.1.1. Planos de procedimiento constructivo _____	- 109 -
5.2.1.2. Planos de seguridad _____	- 110 -
5.2.2. Especificaciones del sistema del M.M.E. _____	- 111 -

**5.3. Trabajos preliminares \_\_\_\_\_ - 111 -**

5.3.1. Distribución física de los elementos (layout) _____	- 112 -
5.3.2. Herramientas y equipo _____	- 112 -
5.3.3. Materiales _____	- 115 -
5.3.3.1. Elementos prefabricados de concreto. _____	- 115 -
5.3.3.2. Elementos de refuerzo. _____	- 117 -
5.3.3.3. Materiales para las juntas del paramento. _____	- 117 -
5.3.4. Ensayes de laboratorio del suelo de cimentación en etapa previa al montaje _____	- 118 -
5.3.4.1. Sondeos verifcatorios _____	- 118 -
5.3.4.2. Recomendaciones _____	- 119 -
5.3.5. Ensayes de laboratorio del material de relleno en etapa previa al montaje -119-	
5.3.5.1. Materiales _____	- 119 -
5.3.5.2. Condiciones mecánicas _____	- 119 -
5.3.5.3. Condiciones electroquímicas _____	- 120 -
5.3.6. Fabricación de paramentos de concreto en sitio o en planta ____	- 120 -
5.3.6.1. Habilitado de acero _____	- 120 -
5.3.6.2. Colado de paneles _____	- 120 -
5.3.6.3. Desmolde _____	- 121 -
5.3.6.4. Transporte _____	- 121 -
5.3.6.5. Estiba _____	- 122 -
5.3.7. Seguridad _____	- 122 -
5.3.8. Recomendaciones generales _____	- 124 -

**6. CONTROL DE CALIDAD \_\_\_\_\_ - 125 -**

**6.1. Control de calidad de paramentos y refuerzos del sistema \_\_\_\_ - 125 -**

6.1.1. Revestimientos de concreto _____	- 125 -
6.1.1.1. Revestimientos flexibles _____	- 126 -
6.1.1.2. Acabados _____	- 126 -
6.1.2. Suministros _____	- 126 -
6.1.2.1. Almohadillas _____	- 126 -
6.1.2.2. Geotextil _____	- 126 -
6.1.2.3. Refuerzos metálicos _____	- 127 -
6.1.2.4. Refuerzos geosintéticos _____	- 127 -
6.1.3. Tolerancias _____	- 127 -

**6.2. Control de calidad durante el montaje \_\_\_\_\_ - 127 -**

6.2.1. Organización _____	- 128 -
6.2.2. Control del material de relleno _____	- 128 -
6.2.3. Dala de nivelación _____	- 129 -
6.2.4. Montaje de elementos del paramento _____	- 129 -
6.2.5. Colocación de relleno y compactación _____	- 131 -
6.2.5.1. Colocación de capas posteriores de paramento (Paneles segmentados) _____	- 133 -

6.2.6.	Colocación de elementos de refuerzo_____	- 133 -
6.2.6.1.	Conexiones_____	- 133 -
6.2.7.	Tolerancias de alineación de los paneles_____	- 134 -
6.2.8.	Equipo necesario para el montaje_____	- 137 -
6.2.9.	Suministros_____	- 139 -
6.2.10.	Tolerancias_____	- 139 -
6.2.11.	Control de cambios_____	- 139 -
6.2.12.	Proyecto vs. Obra_____	- 139 -
<b>6.3.</b>	<b>Verificación de la calidad del montaje terminado_____</b>	<b>- 139 -</b>
6.3.1.	Normas y especificaciones_____	- 139 -
6.3.2.	Metodología_____	- 139 -
6.3.2.1.	Programas de seguimiento del comportamiento_____	- 140 -
6.3.2.2.	Propósito del programa de monitoreo_____	- 140 -
6.3.2.3.	Programa de monitoreo limitado_____	- 141 -
6.3.2.4.	Programa de monitoreo integral_____	- 142 -
6.3.2.5.	Programa de Implementación_____	- 142 -
6.3.3.	Tolerancias_____	- 145 -
6.3.4.	Control topográfico_____	- 145 -
6.3.5.	Planos conforme a obra_____	- 145 -
<b>6.4.</b>	<b>Supervisión_____</b>	<b>- 145 -</b>
6.4.1.	Supervisión del montaje de paramentos y elementos de refuerzo_____	- 147 -
6.4.2.	Supervisión de la extensión del material de relleno_____	- 147 -
6.4.3.	Supervisión de la compactación del relleno_____	- 147 -
6.4.4.	Control geométrico del muro mecánicamente estabilizado. _____	- 148 -
<b>7.</b>	<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS_____</b>	<b>- 149 -</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA_____</b>	<b>- 151 -</b>

# GUÍA DE PROCEDIMIENTOS Y LINEAMIENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MUROS MECÁNICAMENTE ESTABILIZADOS

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Objetivo

El presente documento tiene por objeto uniformizar, los procedimientos de diseño, construcción y mantenimiento de los Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.); de igual forma se prevé que la Guía sirva como base, para la generación, revisión y actualización de libros y documentos referentes al sistema de contención.

Se pretende que los profesionales relacionados en el área de la construcción cuenten con una herramienta técnica de consulta, la cual les sirva de apoyo para el diseño, construcción, control de calidad y mantenimiento de los Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.).

### 1.2. Alcance de la Guía

La Guía de Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.) es un documento de carácter normativo, en el que se establecen políticas, criterios, procedimientos y métodos que implican las condiciones que deben cumplir los proyectos, tales como la planificación, estudio, evaluación, diseño, construcción, seguridad, conservación, calidad e impacto ambiental.

El contenido de esta Guía va dirigido a los profesionistas, instituciones de educación profesional, empresas de diseño y de construcción.

A pesar de que en esta guía se describen diversos aspectos básicos relacionados con los M.M.E., no sustituirá el conocimiento, la experiencia y el buen criterio que se recomienda sea parte integral del profesional del área de la construcción.

Por tal motivo este documento solo será de consulta y apoyo para los profesionales, no se pretende considerarlo como una metodología a seguir en todos los proyectos, ya que es recomendable que el profesional tenga los conocimientos teóricos y prácticos y la capacidad de tomar decisiones para la viabilidad del proyecto.

### 1.3. Generalidades

La tecnología de los Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.) fue desarrollado en Francia hace más de 50 años, como una alternativa técnica y económica a la solución tradicional de muros de contención de concreto armado y mampostería.

Un Muro Mecánicamente Estabilizado (M.M.E.) se define como una estructura de contención en la cual se utilizan refuerzo junto con un sistema de placas para

contener el material (suelo) que se encuentra en la parte posterior del sistema, al conjunto podemos llamarle macizo.

En los últimos años el sistema de contención de tierras mediante Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.), ha ganado gran mercado en comparación con los sistemas de contención tradicionales, esto debido a su competitividad económica, rapidez de montaje y variadas posibilidades arquitectónicas.

A través de los años este sistema de contención ha evolucionado considerablemente, debido a las necesidades que presenta en nuestro entorno, motivo por el cual se ha tenido que innovar en diferentes tipos de refuerzo que se coloca en el macizo, así como los diferentes tipos de paramentos que se pueden emplear.

Debido a los cambios e innovaciones que se han presentado en los Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.), se han creado nuevas combinaciones de paramento-refuerzo, los cuales han generado mayor competencia, seguridad y calidad en la construcción de proyectos de contención de tierras.

El punto relacionado con los tipos de refuerzos a emplear en los M.M.E. se planteara con mayor detalle, más adelante.

Debido a los fenómenos y aspectos que presenta el medio ambiente, tales como lluvia, viento, inestabilidades locales y la topografía de la zona, se debe proteger la parte frontal del muro (paramento), cubriéndolo para evitar problemas de erosión, socavación u otros que se presenten.

El M.M.E. se construye como un terraplén, en donde a cada cierto número de capas se incorporan elementos de refuerzo longitudinal y perpendicular al paramento. Este refuerzo se unirá con el paramento mediante una conexión especial, para una mejor interacción, del conjunto suelo, refuerzo y paramento.

Para el diseño y construcción de Muros Mecánicamente Estabilizados se deben tomar ciertas consideraciones importantes que se describen en esta guía. Con la finalidad de garantizar la estabilidad tanto interna como externa del muro.

#### **1.3.1. Definición de Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.)**

Los Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.) consisten en la estabilización mecánica de un terraplén por medio de un sistema de refuerzo y paramento, gracias a la interacción que se presenta entre estos elementos. El suelo al querer deslizarse, es retenido por el elemento de refuerzo, el cual entra en tensión formando un bloque o macizo de tierra mecánicamente estabilizada.

#### **1.3.2. Elementos que conforman un M.M.E.**

Un Muro Mecánicamente Estabilizado se conforma básicamente por tres elementos (véase Figura 1):

- Paramento
- Refuerzos
- Material de Relleno

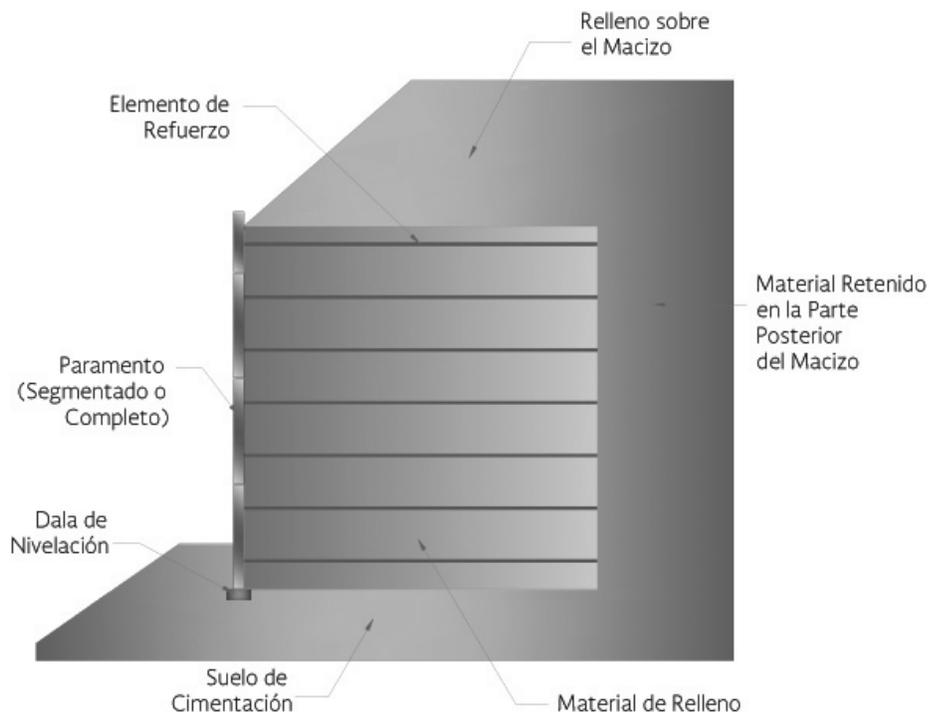


Figura 1.- Elementos que conforman un Muro Mecánicamente Estabilizado (M.M.E.)

#### 1.3.2.1. Paramento

El paramento es la cara del Muro Mecánicamente Estabilizado, es un componente más del sistema de contención, usado para prevenir la erosión, pérdida de confinamiento y en su caso la socavación del material de relleno. Esta protección, que se coloca en la parte frontal del M.M.E., puede ser formado por:

- Paneles o bloques prefabricados de concreto armado.
- Muro de concreto armado colado en sitio.
- Paneles metálicos (mallas)

La elección del paramento a emplear para el Muro Mecánicamente Estabilizado, se realizará, de acuerdo a las necesidades que exija el proyecto, factores externos que influyan (clima, topografía, presencia de agua, obstrucciones, etc.), requerimientos del contratista o dependencia y acabado, los cuales deben ser indicados de origen en las especificaciones particulares.

##### 1.3.2.1.1. Paneles prefabricados de concreto armado

Los paneles de concreto armado empleados en los Muros Mecánicamente Estabilizados, son bloques prefabricados de diferente geometría, colocados como recubrimiento y formando la parte aparente del sistema de contención.

Los paneles de concreto, son prefabricados, y serán diseñados estructuralmente para soportar las fuerzas horizontales que se presenten; adicionalmente a estas fuerzas, se consideraran los esfuerzos que se presentan en el panel debido a la compactación que ocurre cerca del paramento durante la construcción.

Es importante mencionar que al realizar el montaje del M.M.E., es recomendable colocar almohadillas de neopreno en las juntas horizontales de los paneles con el fin de evitar desportilladuras entre los mismos. En dichos paneles se ahogaran los elementos que conectaran al refuerzo del sistema.

#### 1.3.2.1.1.1. Geometría de los paneles

Los paneles usados pueden ser de diferentes geometrías: cuadrados, rectangulares, hexagonales, cruciformes, etc. (véase Figura 2).

El proyectista o contratista puede adoptar la geometría de panel que considere adecuada. También puede proponer nuevas geometrías, que cumplan con los requerimientos de los paramentos para los muros.

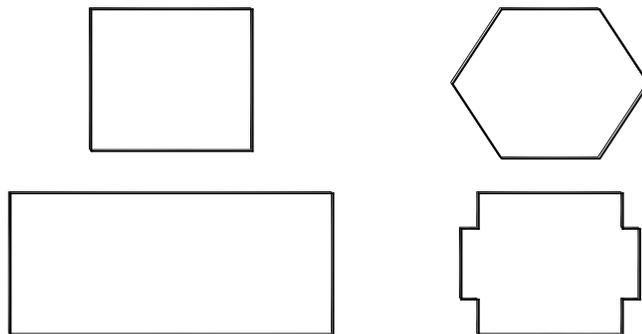


Figura 2.- Geometrías comunes de los paneles

#### 1.3.2.1.1.2. Acabado de los paneles

El acabado del panel puede variar de acuerdo a lo requerido, para darle una mejor vista al Muro Mecánicamente Estabilizado. Las características principales de estos acabados se pueden presentar con diversos colores, relieves, grabados o texturas.

Esto comúnmente es para generar una arquitectura urbana.



Figura 3.- Acabados en paneles

#### 1.3.2.1.2. Paramento de concreto armado colado en el lugar

Son muros de concreto armado colados en el lugar, con preparaciones y conexiones ahogadas para la colocación de refuerzos, ya sea metálicos o sintéticos para su estabilización mecánica.

Comúnmente un muro de concreto armado, construido como paramento de un Muro Mecánicamente Estabilizado, no presenta el espesor y el refuerzo de acero que un muro de contención tradicional. Estos muros son conocidos como paramentos rígidos (véase Figura 4).



Figura 4.- Paramento de concreto colado en sitio

#### 1.3.2.1.3. Paneles metálicos (mallas)

Los paramentos metálicos para Muros Mecánicamente Estabilizados, son paneles de malla electrosoldada, metal expandido o similar.



Figura 5.- Muro Mecánicamente Estabilizado con paramento de malla metálica

Cuando se use este tipo de paramento para los Muros Mecánicamente Estabilizado, se diseñaran para prevenir deformaciones excesivas entre los niveles de los elementos de refuerzo debido a la compactación del material de relleno, peso propio del material o cargas adicionales que se puedan presentar. Esto puede lograrse, limitando el tamaño del panel o reduciendo la separación vertical de los elementos de refuerzo.

#### 1.3.2.2. Elementos de refuerzo

Un suelo granular con baja o nula cohesión en estado de reposo genera taludes, si a estas partículas se les incorporan láminas rugosas o con resaltes, las partículas en contacto con ellas restringirán su movimiento por el fenómeno de fricción o efecto pasivo, permitiendo conformar taludes verticales estables. La introducción de los elementos de refuerzo en el suelo presenta una mejora en su resistencia a la tensión. El suelo es muy resistente a la compresión, no así a la tensión, por lo que es necesario colocar elementos de refuerzos horizontales, para mejorar sus características mecánicas, es decir, aumentar la fricción, y poder formar terraplenes totalmente estables.

Los tipos de refuerzo pueden variar de acuerdo a la geometría, material de relleno, temperatura, presencia de agua y vida útil.

El refuerzo colocado en el macizo de tierra puede ser:

- **Metálico:** Armaduras de acero galvanizado o sin galvanizar tipo barra y armaduras de acero galvanizado o sin galvanizar tipo malla.
- **Sintético (Geosintéticos):** Armaduras compuestas por geotextiles de polipropileno, polietileno o poliéster, armaduras de geomallas de polipropileno de alta densidad, polietileno, armaduras de PVC u otros plásticos.

La FHWA (Federal Highway Administration) establece la siguiente clasificación de refuerzos:

- Lineal unidireccional: Soleras metálicas lisas o corrugadas y bandas de geosintéticos.
- Compuesto unidireccional: Geomallas o mallas metálicas.
- Plana bidireccional: Refuerzo geosintético de lámina continua, mallas electrosoldadas, malla de alambre tejido

##### 1.3.2.2.1. Refuerzos metálicos

Los refuerzos metálicos pueden ser armaduras de acero galvanizado o sin galvanizar, ya sea de tipo solera o tipo malla.

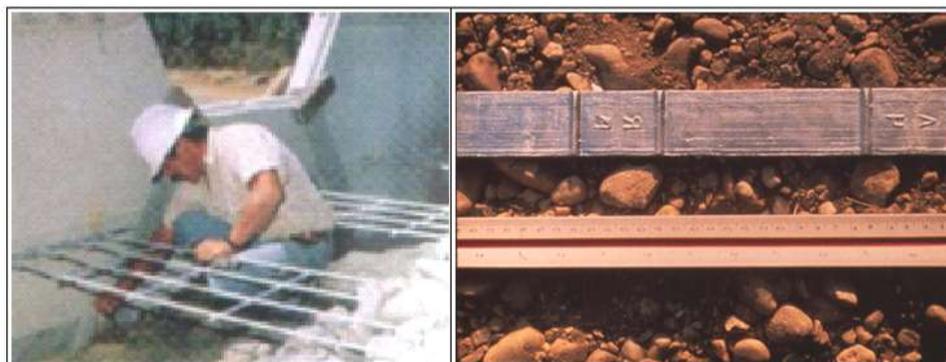


Figura 6.- Refuerzo metálico tipo malla y tipo barra

##### 1.3.2.2.2. Refuerzos sintéticos

Los geosintéticos son materiales elaborados principalmente a partir de polietileno, polipropileno y poliéster. Los refuerzos geosintéticos pueden ser del tipo banda o tipo geomalla.



Figura 7.- Refuerzo sintético tipo malla y tipo banda

La elección del refuerzo para los Muros Mecánicamente Estabilizados, se definirá de acuerdo a las necesidades, requerimientos y exigencias que presente el proyecto.

#### 1.3.2.3. Material de relleno

Se recomienda ampliamente que el material de relleno que se emplee sea de tipo granular y que permita el libre drenaje. En caso de que se tenga material fino es necesario proveer de drenaje para reducir la presión hidrostática detrás del muro.

El material que se emplee cumplirá con la granulometría que establece la norma AASHTO T-27, es la que se señala en la Tabla 1.

**TABLA 1.- Granulometría recomendada para M.M.E. (Especificaciones AASHTO Highway Bridges, División II, Sección 7.3.6.3)**

Tamaño de la Malla	Porcentaje que Pasa %
4 " +	100
No. 40	0 - 60
No. 200	0 - 15 *

\* El Índice de Plasticidad (IP) como se determina en la norma AASHTO T-90, no excederá de 6 %.

Esta granulometría será la que se acepte siempre y cuando el suelo no se considere agresivo. El que un suelo se considere o no agresivo también estará en función del tipo de refuerzo que se emplee en el M.M.E., por ejemplo en el caso de geosintéticos un suelo es agresivo cuando las partículas del suelo sean mayores a  $\frac{3}{4}$ ", a menos que se realicen pruebas a escala real que demuestren que no existe daño durante la instalación o que se usen recubrimientos epóxicos en refuerzos de acero.

Es importante que el suelo tenga un contenido orgánico inferior o igual al 1% medido de acuerdo con la norma AASHTO T-267 para material más fino que la malla No. 10.

Los requerimientos electroquímicos para el relleno en suelos con refuerzos de acero son los siguientes:

- Resistividad no menor a 3,000 ohm-cm

- Cloruros no mayores a las 100 ppm
- Sulfatos no mayores a las 200 ppm

Los requisitos electroquímicos para el suelo de relleno con refuerzos permanentes de geosintéticos serán los siguientes:

- pH de 4.5 a 9.0 para estructuras permanentes  
de 3 a 10 para estructuras temporales

Los métodos recomendables para la determinación de las propiedades químicas incluyen las normas AASHTO T-289 para el pH la AASHTO T-288 para la resistividad, la AASHTO T-291 para cloruros, y la AASHTO T-290 para sulfatos.

En el punto 2.5.1.1 Investigación de tipos de suelos y bancos de material de relleno para MME, se especifica a detalle las características que debe cumplir el material de relleno para MME.

## 2. ESTUDIOS PRELIMINARES

### 2.1. Determinación de condiciones generales y particulares para el desarrollo de proyectos de Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.)

Los Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.) son estructuras con una gran capacidad de adaptación a las diversas condiciones de contención, esto da como resultado diversas soluciones, variando en la capacidad final que se desea alcanzar.

Previo a elección del tipo de M.M.E que se empleará y del tipo de refuerzo del mismo, es necesario realizar un análisis de la información del proyecto geométrico planteado, la topografía del lugar, la naturaleza del suelo de desplante, condiciones especiales, sobrecargas, etc.

#### 2.1.1. Condiciones geométricas

##### 2.1.1.1. Esviajes

Los esviajes formados por cabezales o cargaderos serán de vital importancia para la geometría de los Muros Mecánicamente Estabilizados. Los esviajes pueden ser variados; sin embargo, es recomendable no se presenten esviajes pronunciados cuyos ángulos sean mayores a  $45^\circ$ , pero no inferiores a los  $30^\circ$ .

##### 2.1.1.2. Gálibos

Según la Norma de la SCT N·PRY·CAR·6·01·002/01, Proyecto de Puentes y Estructuras; cuando se trate de un puente o de una estructura que tenga por objeto cruzar una carretera o una vía férrea, el gálibo vertical, es decir, el espacio libre vertical definido por la distancia mínima entre el intradós o cara interior de la superestructura y cualquier punto de la superficie de rodamiento y de sus acotamientos, la parte superior del riel más alto, o el nivel de aguas de diseño (NADI) de la corriente, cumplirá con lo señalado en la Figura 8 y Figura 9.):

La propuesta de un M.M.E. garantiza que su disposición no afectará a gálibos horizontales, para ello es importante contar con los espacios suficientes para no alterar dichos gálibos, y dependen esencialmente de las dimensiones de la superestructura y subestructura.

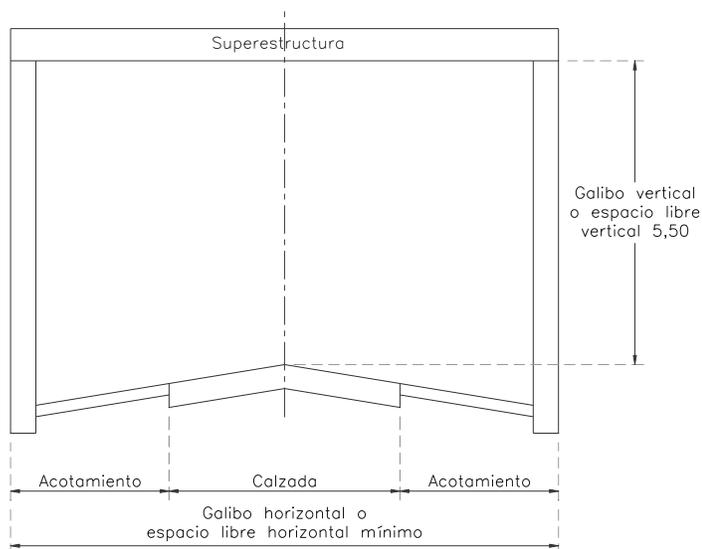


Figura 8.- Gálidos o espacios libres vertical y horizontal para estructuras que crucen una carretera /N-PRY-CAR-6-01-002/01)

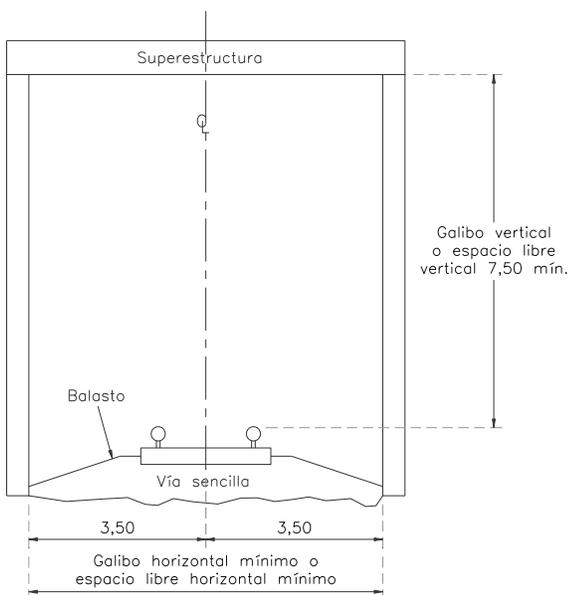


Figura 9.- Gálidos o espacios libres vertical y horizontal para estructuras que crucen una vía férrea /N-PRY-CAR-6-01-002/01)

**2.1.1.3. Radios mínimos**

Se preverá espacio suficiente para construir un macizo de aproximadamente 0.7 H de ancho, siendo H la altura del muro a efectos mecánicos.

El radio mínimo de curvatura del muro con paramento de concreto está en función del ancho del paramento prefabricado ya que la deflexión entre paneles no tiene que dejar aperturas excesivas que puedan propiciar la fuga del material de relleno.

Los refuerzos se colocan horizontalmente y perpendiculares al paramento y en algunos casos formando un ángulo entre el paramento el elemento de refuerzo de no menos de 60°.

**2.1.1.4. Deflexiones**

Es el ángulo comprendido entre dos columnas de paneles prefabricados, esta deflexión esta también basada en el tipo de junta vertical del panel o machihembrado, el cual no debe girar más de lo que su geometría permita, sin que se abra una junta vertical que permita la fuga del relleno, o se cierre hasta impedir su giro.

**2.1.1.5. Rasantes**

Proyección del desarrollo del eje de la corona de una carretera sobre un plano vertical.

Definitivamente, se trata de un elemento importante en la proyección de los muros mecánicamente estabilizados, ya que este nivel proyectado al hombro definirá junto con el desplante la altura del muro.

**2.1.1.6. Empotramiento o profundidad de empotre**

La profundidad mínima de empotramiento de la parte inferior del M.M.E. (parte superior de la base de nivelación) se basará en los requisitos sobre capacidad de carga, asentamientos y estabilidad del terreno de cimentación.

A menos que se construya sobre suelos rocosos, la profundidad de empotramiento en la cara frontal del muro, no será menor que los siguientes valores:

- a) 0,60 m si se trata de terreno inclinado (pendiente mayor o igual que 4,0 H: 1,0 V) o si es posible que el suelo delante de la base del muro sea removido debido a procesos erosivos o excavaciones futuras.
- b) 0,30 m si se trata de terreno plano y no existe el riesgo de erosión ni de futuras excavaciones del suelo delante de la base del muro.

En el caso de los muros construidos a lo largo de ríos y arroyos, las profundidades de empotramiento se establecerán como mínimo a 0,60 m por debajo de la profundidad potencial de socavación.

La capa de refuerzo más baja estará ubicada por encima de la superficie del terreno delante del muro.

Las profundidades mínimas de empotramiento indicadas en la Tabla 2 se pueden utilizar para evitar fallas por hundimiento localizadas debajo de la dala de nivelación. Ésta tabla se basa principalmente en la pendiente del terreno natural de desplante y en la altura prevista del muro.

**TABLA 2.- Profundidades de empotramiento de la cara frontal del muro (Especificaciones AASHTO para el Diseño de Puentes por el Método LRFD, Edición-2004, Sección 11.10.2.2.)**

Pendiente delante de las estructuras		Profundidad mínima de empotramiento
Horizontal	Para muros	H / 20,0
	Para estribos verdaderos	H / 10,0
3 : 1	Para muros	H / 10,0
2 : 1	Para muros	H / 7,0
1,5 : 1	Para muros	H / 5,0

Delante de los muros desplantados sobre un talud se proveerá una berma o escalón horizontal con un ancho mínimo de 1,20 m. La berma puede ser moldeada o bien el talud puede continuar por encima de dicho nivel como se ilustra en la Figura 10.

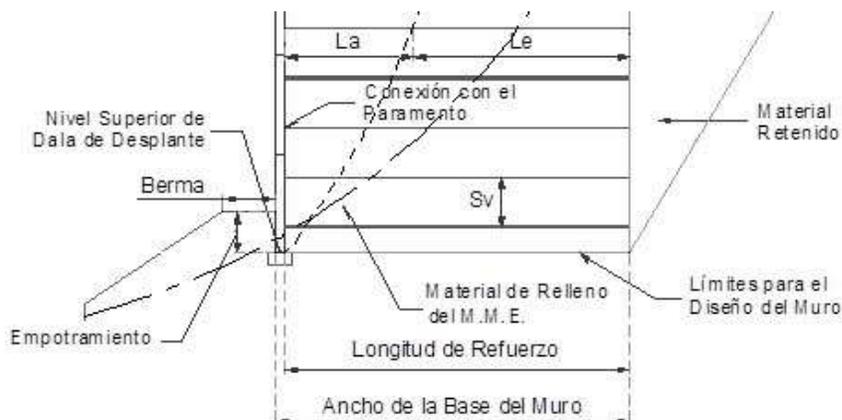


Figura 10.- Talud y escalón de un Muro Mecánicamente Estabilizado

## 2.1.2. Condiciones topográficas

### 2.1.2.1. Secciones transversales

Estas secciones permiten definir la disposición o configuración del terreno. Las secciones se realizan sobre la línea de trazo, comúnmente a cada 20 m, el ancho que se va a levantar depende de las condiciones topográficas del lugar. La distancia más usual para las secciones transversales es de 30 m a cada lado del eje de trazo.

Este levantamiento comprende todos los accidentes notables del terreno así como los ríos, barrancas, construcciones, líneas de conducción, etc.

El objetivo de contar con ellas es poder determinar la posición de los desplantes de los muros y el procedimiento de terracerías empleado.

### 2.1.2.2. Secciones constructivas

Son secciones o perfiles del terreno normales al eje proyectado en planta, que se obtienen a cada 20 m siguiendo el kilometraje, y a veces también se requiere en puntos intermedios especiales.

Serán en corte y terraplén según lo indique el perfil en el punto correspondiente. Dichas secciones deberán contener el trazo de los Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.), así como carpeta, bombeos, cunetas, taludes de terraplén, de corte, terreno natural, etc.

### 2.1.2.3. Terreno natural

Es el terreno sobre el que se desplantará el M.M.E., o terraplén en el que se realizará el corte; por ello será de vital importancia la configuración del mismo, ya que de ello dependerá la determinación del nivel de empotramiento del muro.

### 2.1.2.4. Cortes y terraplenes

A continuación se muestran las definiciones de terraplén y corte:

- a) Área de terraplén: se llama así a la parte del terraplén que queda debajo de la subcorona; está formada por una o más porciones de

material según la elevación del terraplén, sus características y el tratamiento que se le dé.

- b) Área de un corte: así se le designa a los diferentes estratos que aparecen en una sección, cuando cada una de ellas está formada por materiales de diferentes características de las demás.

La disposición o propuesta del M.M.E. en estos casos es de suma importancia ya que junto con las secciones constructivas se podrá evaluar la estabilidad de dichos muros.

### **2.1.3. Estructuras**

Resulta de gran importancia el conocimiento del proyecto estructural (caballetes, cargaderos, zapatas, tipo de parapeto y las consideraciones a usar por sismo); ya que de esta información dependerá la configuración geométrica del M.M.E.

#### **2.1.3.1. Caballetes**

Los caballetes están unidos rígidamente a la subestructura (columnas y/o pilas) para que sean capaces de permitir los movimientos horizontales necesarios de la superestructura

La mayor parte de M.M.E., se proyectan alrededor de los caballetes y/o justo por detrás del muro de respaldo del caballete. Esto dependerá de condiciones de gálibos, acabados, confinamientos, etc.

#### **2.1.3.2. Cargaderos**

Los cargaderos, son aquellas estructuras que proporcionan un apoyo a la superestructura junto con el material de relleno sobre cual descansa. Cuando se diseñan M.M.E., que funcionarán como apoyo del cargadero, se necesita tener conocimiento de las descargas de la superestructura, capacidades de carga del suelo de desplante y los asentamientos previstos.

#### **2.1.3.3. Zapatas**

Son elementos de cimentación usados en pilas. Cuando existe este tipo de elementos en la subestructura, se necesita emplear elementos especiales adosados al paramento para separar la estructura del M.M.E. de la estructura, previendo asentamientos diferenciales.

#### **2.1.3.4. Parapetos**

El uso de parapetos es recomendable para delimitar la zona de superestructura, además tienen la propiedad de soportar el impacto de los vehículos. Para el caso de los M.M.E. este tema es relevante ya que dichos elementos deben considerarse en el diseño.

Los M.M.E. normalmente llevan un elemento de acabado final en la parte superior, que en la mayoría de los casos no soportan los impactos de vehículos.

Cuando se propongan parapetos en los accesos o al hombro de los muros es recomendable estructurar éstos independientemente de los muros. Ya sea la recomendación parapeto o defensa, la geometría de estos junto con su estructuración deberá contemplar la geometría de los paneles y sus elementos de fijación.

2.1.3.5. Sismo

Para la consideración de los espectros sísmicos se recomienda tomar en consideración lo que establece el Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE. En este manual se divide la República Mexicana en cinco zonas sísmicas, las cuales se presentan a continuación:

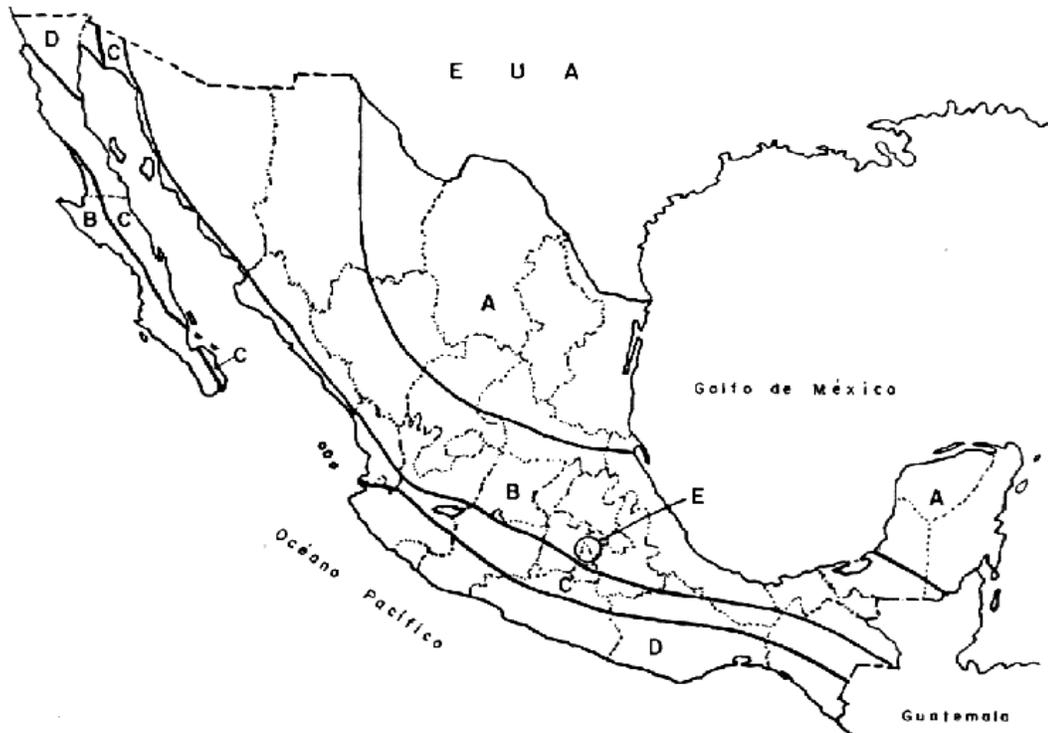


Figura 11.- Regionalización sísmica de la República Mexicana de acuerdo a la Norma SCT N-PRY-CAR-6-01-005-01 (SCT, 2001)

**TABLA 3.-Valores característicos del espectro sísmico (Norma N-PRY-CAR-6-01-005, SCT)**

Zona Sísmica	Tipo de suelo	Ao	C	Ta (seg)	Tb (seg)	r
A	I	0.02	0.08	0.20	0.60	1/2
	II	0.04	0.16	0.30	1.50	2/3
	III	0.05	0.20	0.60	2.90	1
B	I	0.04	0.14	0.20	0.60	1/2
	II	0.08	0.30	0.30	1.50	2/3
	III	0.10	0.36	0.60	2.90	1
C	I	0.09	0.36	0.20	0.60	1/2
	II	0.13	0.50	0.30	1.40	2/3
	III	0.16	0.64	0.60	1.90	1
D	I	0.13	0.50	0.20	0.60	1/2
	II	0.17	0.68	0.30	1.20	2/3
	III	0.21	0.86	0.60	1.70	1
E	I	0.04	0.16	0.20	0.60	1/2
	II	0.08	0.32	0.30	1.50	2/3
	III	0.10	0.40	0.60	3.90	1

Donde:

- I corresponde a terreno firme
- II corresponde a terreno transición
- III corresponde a terreno blando

#### **2.1.4. Estudios adicionales**

##### **2.1.4.1. Estudios hidrológicos e hidráulicos**

Hablando de M.M.E., los estudios hidrológicos en donde el proyecto lo requiera, deberá incluir NAME, NAMO, NAMOC, si estos mismos afectan directamente al muro, donde:

- NAME: Nivel Máximo de Aguas Extraordinario
- NAMO: Nivel Máximo de Aguas Ordinario
- NAMOC: Nivel de Aguas Máximas Observadas en Campo

Si esto ocurre, el muro deberá diseñarse para soportar la presión hidrostática (muro inundable), y tener como consideraciones lo que la presencia de agua provoque, como la necesidad de colocar material especial para la filtración del agua, el uso de protección en el desarrollo de muro como protección, etc.

En general los muros marítimos y fluviales se analizan como cualquier otro muro, considerando adicionalmente el efecto del agua, la posible simultaneidad entre ocurrencia de un sismo y presencia de agua y la presencia de supresiones, en caso que estas sean esperables.

En el caso de obras fluviales, es imprescindible realizar los siguientes estudios, sin los cuales, de forma general se proyectarán estructuras permanentes:

- Estudio topohidráulico
- Estudio hidrológico
- Estudio hidráulico
- Estudio de socavación

Con ésta información se determinarán caudales, velocidades y niveles hidráulicos para los diferentes periodos de retorno de diseño y se obtendrán los datos hidráulicos para el análisis de socavación. Los muros situados en zona marítima, en general no se realizarán estos estudios, sino sus equivalentes marítimos.

- Estudios de oleaje, corrientes y mareas.
- Estudio mecánico marítimo.

Tanto para obras marítimas como fluviales, se analizará con especial cuidado la fuga del material fino. , esta situación ocurre en las juntas entre paneles, en el desplante y en los sectores de transición expuestos a la acción de agua. Estas zonas deberán protegerse mediante el uso de geotextiles, filtros y otros elementos adecuados.

A su vez, el drenaje del muro se realiza a través de las juntas entre placas y otros mecanismos (drenes, subdrenes, filtros, etc.). El efecto de presiones hidrostáticas en el muro será considerado en el diseño, en función de la velocidad de descenso del agua y la permeabilidad del suelo que conforma el macizo.

##### **2.1.4.2. Estudios de sobrecargas especiales**

Son múltiples los casos especiales que pueden surgir. y dependerá de la complejidad del problema de ingeniería a resolver. En general, pueden existir

tanto solicitaciones verticales como horizontales adicionales en diferentes puntos del macizo, cuyos efectos serán considerados en el dimensionamiento de los esfuerzos.

Cuando se aplican cargas puntuales en zonas próximas al muro, en la determinación de los esfuerzos de los refuerzos suelen incluirse dichas solicitaciones sin considerar un modelo de distribución específico. Otras solicitaciones, como explosiones o impactos, pueden ser modeladas como efectos sísmicos.

Existen sobrecargas consideradas así, ya que representan un cálculo extra a las consideraciones de diseño de dicho muro. Se pueden considerar como sobrecargas especiales a:

1. Sobrecarga generada por equipos especiales.
2. Sobrecarga generada por camiones fuera de carretera (minas).
3. Sobrecarga generada por estructuras (edificios, naves industriales, muros. etc.)
4. Sobrecarga generada por trenes de alta velocidad

#### **2.1.4.3. Procedimientos constructivos**

Generalmente el procedimiento constructivo siempre será el mismo, y solo será diferenciado por la geometría en el desarrollo del muro y por cargas y/o consideraciones especiales.

Estas sobrecargas se evaluarán en la etapa de construcción del M.M.E. ya que es justamente cuando los esfuerzos pueden variar o incluso incrementarse y que en estado final no son solicitados así.

Es necesario conocer el procedimiento constructivo para que en ellos se plasmen los pasos a seguir para la construcción de cualquier M.M.E. Entre los pasos que se deberá incluir, están:

1. Disposición del patio de fabricación, maniobras y almacenamiento
2. Dispositivos de seguridad y tránsito
3. Material a usar para la fabricación y montaje
4. Inicio de la fabricación y/o montaje del muro
5. Colocación de los elementos refuerzos del M.M.E.
6. Colocación del material de relleno del M.M.E.
7. Coronamiento (nivel superior del mismo)

#### **2.1.5. Condiciones geotécnicas de la zona de proyecto**

##### **2.1.5.1. Investigación de tipos de suelos y bancos disponibles de material de relleno para M.M.E., incluyendo sus propiedades índice**

En todas las obras será necesario realizar un informe geotécnico de los tipos de suelos que en una primera instancia ayuden a determinar si cabe la posibilidad de algún problema de estabilidad externa que haga necesario un estudio más profundo por parte del contratista.

La ubicación de bancos aledaños ayuda a determinar el tipo de suelo existente en el perímetro de la obra.

Para el uso del material de relleno de Muros Mecánicamente Estabilizados (MME), se identificarán los bancos de materiales más cercanos a la zona de proyecto, se recomienda consultar el Inventario Nacional de Banco de Materiales, en su versión más reciente, editada por la Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes; posteriormente se evaluará la calidad, cantidad y costo de cada uno de los materiales en los bancos que puedan cumplir con las características

mencionadas en esta Guía, para elegir aquellos que proporcionen el material óptimo para la obra.

Los materiales que se utilicen para el relleno de M.M.E. cumplirán con los requisitos de calidad indicados en la norma *N-CMT-1-01/02.- Materiales para Terraplén.*

A continuación se presentan los requerimientos mínimos que tendrá el material granular de relleno para la zona de suelo reforzado, del Muro Mecánicamente Estabilizado.

**2.1.5.1.1. Propiedades índice**

El material de relleno utilizado en Muros Mecánicamente Estabilizados será un material granular con comportamiento predominantemente friccionante, es decir, tipo arena o gravas limosas. Las características del material de relleno del suelo reforzado cumplirán con las siguientes propiedades índice:

- a) Análisis granulométrico. Para asegurar que el material de relleno del suelo reforzado, cumple con los requisitos granulométricos de la Tabla 1 de esta Guía, se seguirán los procedimientos mencionados en la Norma *M-MMP-1.06/03.- Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías,* para determinarlos contenidos de grava, arena y finos.

**TABLA 4.- Requisitos granulométricos para el material de relleno del suelo reforzado para Muros Mecánicamente Estabilizados (Especificaciones AASHTO Highway Bridges, División II, Sección 7.3.6.3)**

Tamaño de la Malla	Porcentaje que Pasa
4 " + (100 mm) <sup>(1)</sup>	100
No. 40 (0,425 mm)	0 - 60
No. 200 (0,075 mm)	0 - 15 *

\* El Índice de Plasticidad (IP) determinado conforme a la norma AASHTO T-90, no excederá de 6.

(1) En caso de utilizar geosintéticos se recomienda limitar el tamaño máximo a 19 mm (¾ ")

El Coeficiente de uniformidad cumplirá con  $C_u = D_{60}/D_{10} < 4$ .

Donde:

$D_{60}$  = Tamaño tal, que el 60%, en peso del suelo, sea igual o menor.

$D_{10}$  = Diámetro efectivo, tamaño tal que sea igual o mayor que el 10%, en peso del suelo.

- a) Límites de Consistencia. El Índice de Plasticidad no será mayor de 6%. El límite líquido será menor o igual a 30%.

Se verificarán las especificaciones anteriores en base a los Manuales para *Muestreo y Prueba de Materiales M-MMP-1-02 Clasificación de Fragmentos en Roca y Suelos,* y al *M-MMP-1-06 Límites de Consistencia,* editados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, en sus versiones más recientes.

**2.1.5.1.2. Propiedades mecánicas**

Las características del material de relleno del suelo reforzado cumplirán con las siguientes propiedades de resistencia mecánica:

Para la determinación de los parámetros de resistencia al corte se empleará el ensaye de compresión triaxial, puede utilizarse la prueba no consolidada no drenada (UU), o el ensaye de corte directo, el cual se realizará con la porción fina de la muestra, la cual estará compactada al 95% de la prueba AASHTO (M-MMP-1-09/06), con el contenido de agua óptimo de acuerdo a la Norma N-CMT-1-01, *Materiales para terraplén*.

El ángulo de fricción interna, en ningún caso, será menor de 34°.

Se podrá omitir la prueba de corte directo, si el 80% de las partículas son mayores de 19 mm (3/4"), de acuerdo a los resultados del análisis granulométrico.

#### **2.1.5.1.3. Propiedades físico químicas**

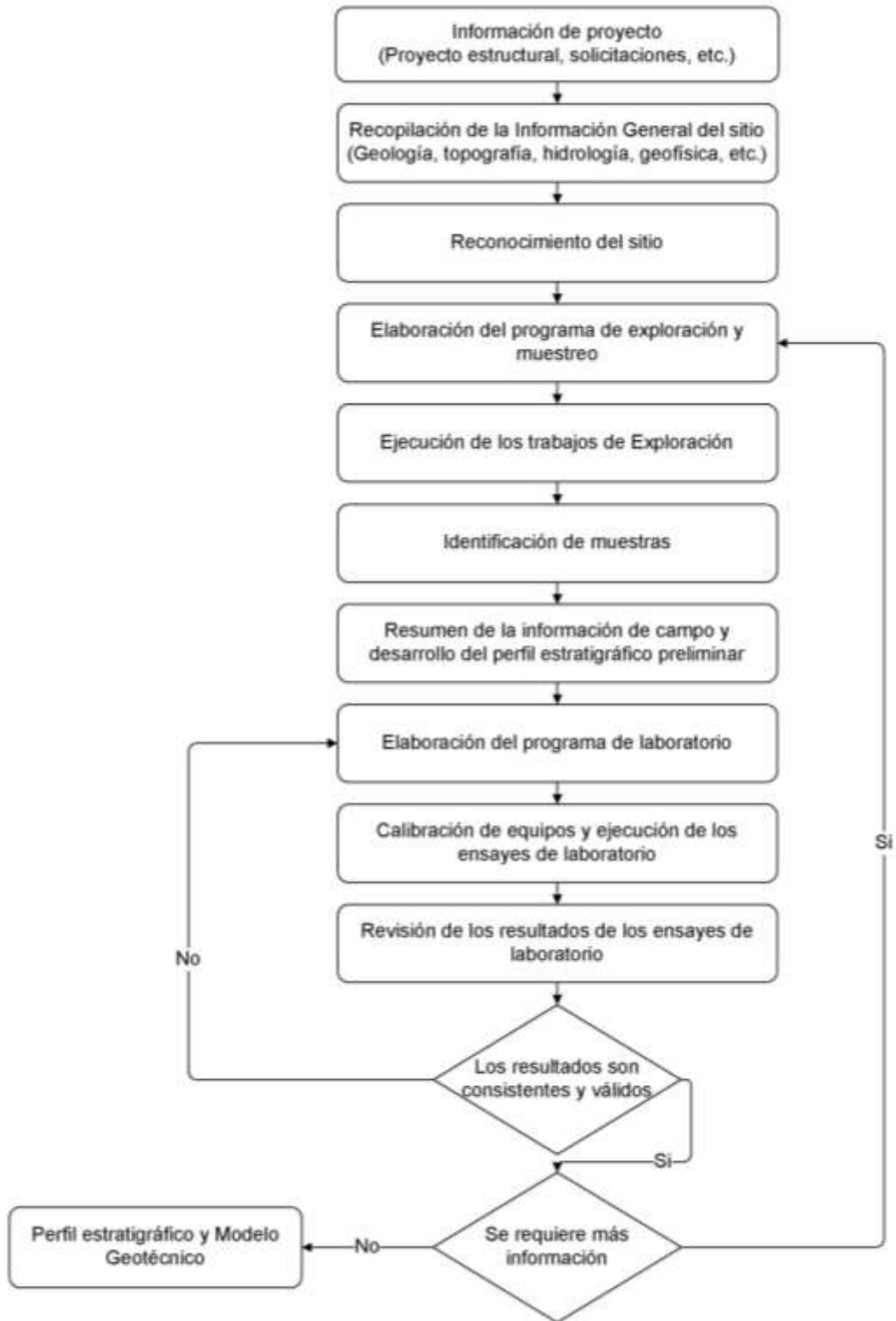
El material de relleno para los muros mecánicamente estabilizados se considerará no agresivo si cumple con los siguientes requerimientos electroquímicos:

- a) Resistividad  $\geq 3\ 000\ \Omega\ \text{cm}$ , conforme a AASHTO T288. Si la resistividad es  $\geq 5\ 000\ \Omega\ \text{cm}$ , no es necesario realizar la prueba de contenido cloruros y contenido de sulfatos.
- b) El Ph estará limitado por  $5 < \text{Ph} < 10$ , y se determinará conforme a lo indicado en la norma AASHTO T-289.
- c) El material estará libre de material orgánica, esquisto u otras partículas suaves y de pobre durabilidad, aceptando un contenido orgánico  $\leq 1\%$  en el material menor de 1,998 mm (Malla No. 10).
- d) El material tendrá una pérdida sólida de magnesio de menos de 30% después de 4 ciclos.
- e) Contenido de cloruros  $\leq 100\ \text{ppm}$  conforme a AASHTO T-291.
- f) Contenido de sulfatos  $\leq 200\ \text{ppm}$  conforme a AASHTO T-290.

Los resultados de estas pruebas proporcionarán la información necesaria para determinar si el material de relleno será considerado como agresivo o no agresivo con el objetivo de evaluar la degradación de los refuerzos, así como de sus conectores. Si uno o más de los requerimientos mencionados no se cumplen, se considerará al Muro Mecánicamente Estabilizado como un caso especial y será necesario que el análisis sea realizado específicamente por un laboratorio especialista en corrosión.

#### **2.1.5.2. Estudio de mecánica de suelos**

Para diseñar geotécnicamente el Muro Mecánicamente Estabilizado es necesario conocer el suelo de desplante de la zona del proyecto, así como el suelo circundante, la necesidad de evaluar la estabilidad global dependerá de las condiciones topográficas del proyecto. A continuación se presentan los elementos mínimos necesarios para realizar el diseño de estabilidad interna y externa del M.M.E, desde el punto de vista geotécnico.



**2.1.5.2.1. Información de proyecto**

Es importante que como primer paso, se evalúe, organice y analice la información preliminar de proyecto, es decir se delimiten cuáles son las solicitudes del proyecto, tanto geométricas como estructurales, las cargas preliminares a las que estará sujeto, la ubicación, y el tipo de muro propuesto.

#### **2.1.5.2.2. Recopilación de la información**

Antes de realizar el reconocimiento del sitio es importante realizar la recopilación de toda la información existente, ya sea de Estudios realizados para el proyecto o de Cartas de INEGI. Se revisará la información Topográfica, Geológica, Geofísica, Hidrológica e Hidráulica del sitio.

#### **2.1.5.2.3. Reconocimiento del sitio y factibilidad de estudios**

El reconocimiento del sitio tendrá como propósito principal determinar las condiciones actuales del lugar, en el caso de un Muro Mecánicamente Estabilizado nuevo se determinarán las zonas de interés para su diseño, y en caso de ser un Muro existente que presente daños ó requiera una ampliación ó modificación, se definirá la información requerida para su análisis y/o se identificará el problema.

Además, el reconocimiento del sitio en estudio tiene la finalidad de recolectar cualquier información útil para el proyecto, como:

- áreas de inestabilidad potencial, tales como depósitos profundos de suelos débiles, cohesivos u orgánicos, deslizamiento de escombros, manto freático somero, afloramiento de camas de roca, rellenos, etc.
- características geológicas de la superficie, incluyendo afloramientos rocosos y geomorfología, cortes o excavaciones existentes que pueden proveer información sobre las condiciones del subsuelo.
- patrones de superficie de drenaje, filtración y características de vegetación.
- disponibilidad del derecho de vía, y limitantes topográficas.
- condiciones de acceso para la mano de obra y equipo.

Se recomienda que el reconocimiento del sitio sea realizado por un ingeniero geotecnista o un ingeniero geólogo.

#### **2.1.5.2.4. Programa de exploración y muestreo**

Las investigaciones del subsuelo no solo son requeridas en el área de proyección del MME, sino también detrás y al frente de la estructura para evaluar la estabilidad global de la estructura. El tipo y cantidad de exploración serán definidos después de revisar los datos preliminares obtenidos del reconocimiento de campo y recopilación de la información, y serán suficientes para evaluar la geología y subsuelo en el área de construcción.

A continuación se enuncian los requerimientos mínimos de exploración del subsuelo para Muros Mecánicamente Estabilizados:

##### **2.1.5.2.4.1. Cantidad, localización y profundidad de mínima de sondeos de Exploración**

- Se realizará por lo menos un sondeo puntual de exploración por cada Muro Mecánicamente Estabilizado para muro de más de 30.00 m de longitud, se realizará una exploración cada 30.00 o 60.00 m, alternando la localización del sitio explorado (Frente y atrás del MME).
- Se realizará por lo menos un sondeo puntual de exploración a cada 45 m de la parte posterior de la estructura de suelo reforzado del MME, esto debido a que el ancho de las estructuras de los muros puede asumirse como 0.8 veces la altura del muro.
- La profundidad mínima de exploración por debajo del nivel de desplante proyectado del muro, será por lo menos la profundidad a la cual el esfuerzo transmitido por el MME sea igual o menor al 10% por ciento de la carga, y no será menor de dos veces la altura del muro.

- La profundidad de exploración pasará completamente los suelos suaves y altamente compresibles, por ejemplo, turba, limo o arcilla orgánica, suelos suaves de grano fino. Esta profundidad también se puede delimitar por las condiciones generales del subsuelo, es decir, cuando se encuentre roca, se perforará por lo menos 3 m, obteniendo núcleos de roca; esta longitud de extracción de núcleos de roca pretende obtener y poder distinguir entre la roca alterada y la roca intacta del macizo rocoso.
- Se requiere una exploración profunda para caracterizar mejor los taludes en roca, en este caso la profundidad de exploración será igual o mayor a la altura del muro o talud, y para los taludes en suelo la profundidad de exploración será igual a dos veces la altura del muro o del talud, la que sea mayor.
- En caso de que las condiciones del subsuelo, dentro de las profundidades mencionadas anteriormente, sean débiles e inadecuadas para las presiones que generará la estructura, entonces las perforaciones continuarán hasta encontrar un suelo en mejores condiciones.
- En caso de que el sitio de proyecto se encuentren rellenos sueltos, galerías de minas, grietas u otras oquedades y estas se encuentren por debajo del nivel de desplante proyectado se definirá su contacto con el apoyo de métodos indirectos.

#### **2.1.5.2.5. Tipos de exploración geotécnica**

En función de los datos recabados en el reconocimiento del sitio, se elegirá el tipo de exploración más apropiado para el subsuelo, el cual nos proporcione datos de resistencia y deformación de los suelos y/o rocas. A continuación se enuncian varios métodos; sin embargo, el uso de estos dependerá de la importancia del Muro Mecánicamente Estabilizado, de la factibilidad de ejecución, del costo, etc.

##### **2.1.5.2.5.1. Métodos directos**

Se puede hacer uso de los siguientes métodos directos: Pozo a cielo abierto (PCA), Método de Penetración Estándar (SPT), Tubo de pared delgada (Shelby), Tubo de pared gruesa, Tubo dentado, Barril Denison, Barriles muestreadores en roca, Barriles convencionales (Barril sencillo, barril doble, barril doble tubo rígido, barril doble tubo giratorio), Barriles no convencionales (Barriles del grupo M, Barriles de gran diámetro), etc.

###### **2.1.5.2.5.1.1. Pozos a Cielo Abierto (PCA)**

Las exploraciones a cielo abierto pueden ser realizadas en áreas que muestren inestabilidad o para explorar el material de relleno de muros existentes, con alguna falla y en muros con alturas menores o igual a 3 metros. Se obtendrán muestras cúbicas inalteradas conforme el *M-MMP-1-01.- Muestreo de Materiales para Terracerías*, a nivel de desplante del MME.

###### **2.1.5.2.5.1.2. Sondeos de penetración estándar (SPT)**

La prueba de penetración estándar (SPT), consiste en hincar un penetrómetro de 45 cm en el suelo por medio de golpes aplicados con una masa de 64 kg, la cual se deja caer de una altura de 75 cm. Se cuenta el número de golpes en cada uno de los tres tramos de 15 cm que debe penetrar el muestreador y se define la resistencia a la penetración como el número de golpes,  $N_{spt}$ , necesarios para avanzar los últimos 30 cm.

En caso de que el penetrómetro no pueda penetrar los 45 cm, la prueba se suspende cuando se han dado 50 o más golpes. Tomando en consideración que los primeros 15 cm no se toman en cuenta debido a que en esta zona se tiene una alteración, inducida por la prueba. Cuando se encuentren suelos muy compactos

con un número de golpes mayor de 50, se emplea para su avance, broca tricónica, o bien, mediante el procedimiento de lavado en suelos.

#### **2.1.5.2.5.2. Métodos indirectos**

Se puede hacer uso de los siguientes métodos indirectos: Cono Estático, Cono dinámico, Presurímetro, Dilatómetro, Piezocono, etc. El uso de estos métodos depende de las condiciones específicas del sitio en estudio, de la importancia de la obra y de los datos requeridos por el Ingeniero, para realizar los análisis geotécnicos.

##### **2.1.5.2.5.2.1. Sondeos de Cono Eléctrico (CPT)**

La prueba de cono eléctrico (CPT) a pesar de que recupera muestras de suelo, ha sido utilizado para determinar las variaciones del suelo mediante la medición de las resistencias a la penetración por punta y la de fricción del cono; la interpretación de estos parámetros permite definir con precisión cambios en las condiciones estratigráficas del sitio y estimar la resistencia al corte de los suelos mediante correlaciones empíricas.

El cono se hinca en el suelo empujándolo con una columna de barras de acero, usualmente de 3.6 cm de diámetro exterior, por cuyo interior sale el cable que lleva la señal a la superficie. La fuerza necesaria para el hincado se genera con un sistema hidráulico con velocidad de penetración controlada.

La velocidad de hincado del cono es usualmente de 2 cm/s; sin embargo, en la norma ASTM D 3441-75T para operación del cono eléctrico se propone de 1 a 2 cm/s  $\pm$  25 %. Para las arcillas de la Ciudad de México se ha adoptado 1 cm/s porque así se controla mejor la prueba; sin embargo, es admisible operar con 2 cm/s, sabiendo que se obtienen valores ligeramente más altos, es muy importante que durante la prueba la velocidad de penetración se mantenga constante.

##### **2.1.5.2.6. Trabajos de laboratorio**

A partir de las muestras de suelo o roca obtenidas, el Ingeniero realizará una examinación visual y física de las mismas, y en base al tipo de material observado de forma macroscópica y a su experiencia, realizará un programa de laboratorio que proporcione los resultados suficientes para que el ingeniero pueda decidir el comportamiento del suelo o roca en el sitio en estudio.

Para poder clasificar el suelo de desplante del MME, que pueden estar compuestos por suelo o roca, se realizarán las pruebas que permitan clasificar el material con base en su composición granulométrica, determinada mediante los procedimientos indicados en el Manual *M-MMP-1-06, Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías*, y en sus características de plasticidad, representada por los límites de consistencia determinados de acuerdo con lo indicado en el Manual *M-MMP-1-07, Límites de Consistencia*.

Los suelos se clasificarán en base en el sistema SUCS, como se indica en la norma *M-MMP-1-02/03.-Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos*.

Una vez definido el tipo de material de desplante, se recomienda realizar pruebas mecánicas que permitan estimar las propiedades mecánicas del material y, con base en éstas, realizar los análisis geotécnicos necesarios.

##### **2.1.5.2.6.1. Pruebas índice**

Los ensayos que definen las principales propiedades índice de los suelos utilizados para el relleno del Muro Mecánicamente Estabilizado, son: Análisis granulométrico, Límites de Atterberg, Tamaño máximo del agregado y Porcentaje máximo de finos.

Se clasificará el material de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos realizando las pruebas de laboratorio necesarias para realizarla, como son: Contenido de humedad, Límites de Atterberg, Análisis granulométricos.

#### **2.1.5.2.6.2. Pruebas mecánicas**

Los ensayos que definen las principales propiedades mecánicas son los ensayos triaxiales y de compactación. Los parámetros que se obtendrán son: Peso volumétrico, Ángulo de fricción interna y Módulo de elasticidad.

La determinación de la resistencia al esfuerzo cortante mediante pruebas de compresión no confinada, pruebas de cortante directo o pruebas de compresión triaxial, pueden ser realizadas para el análisis externo de los Muros Mecánicamente Estabilizados.

En los sitios donde los suelos cohesivos compresibles se localicen por debajo de los muros mecánicamente estabilizados, se debe realizar una prueba de consolidación para obtener los parámetros necesarios para el análisis de asentamientos. Los parámetros de drenaje (esfuerzo efectivo) y sin drenaje podrían ser obtenidos para suelos cohesivos, los cuales permiten la evaluación de las condiciones a largo y a corto plazo; pruebas adicionales podrían ser las de corte directo sobre algunas muestras preparadas de manera similar, para determinar los parámetros del esfuerzo cortante bajo condiciones a corto y largo plazo.

#### **2.1.5.2.7. Sondeos de penetración estándar SPT (que incluyan granulometrías, propiedades índice y mecánicas de las muestras obtenidas)**

La factibilidad de usar un Muro Mecánicamente Estabilizado, u otro sistema de contención de tierra dependerá de la topografía del sitio, y sobre todo de las condiciones del subsuelo en donde se desplantará, es decir de las propiedades del suelo o roca de desplante. Por lo que el Ingeniero realizará un programa de exploración que permita conocer las características del subsuelo antes de reparar, ampliar, o proyectar un muro.

Los objetivos de los sondeos SPT son determinar la resistencia a la penetración y obtener porciones de material con un muestreador en suelos no cohesivos, y con ellos determinar la granulometría de la muestra obtenida, así como sus propiedades índices y mecánicas.

#### **2.1.5.2.8. Estudio de capacidad de carga**

La capacidad de carga admisible para los muros mecánicamente estabilizados deberá calcularse utilizando un factor de seguridad mínimo de 2,5, aplicado a la capacidad de carga última calculada.

Un factor de seguridad (FS) menor de 2,0 puede utilizarse si se justifica mediante un análisis geotécnico. El ancho de la cimentación para los cálculos de capacidad de carga última deberá considerarse que la longitud del refuerzo calculado en el nivel de desplante, de acuerdo a lo indicado en el punto I.1 Capacidad de Carga

#### **2.1.5.3. Estudio de (de los) mejoramiento (s) propuesto (s)**

En una obra determinada, pueden adoptarse distintas soluciones de diseño, que provocaran diferentes cambios tensionales en el terreno afectado disminuyendo la presión sobre el terreno; para transferir las cargas a niveles firmes más profundos.

Otra opción ante un terreno no apto para la construcción puede ser la de eliminarlo y sustituirlo por otro que no lo sea. Por ejemplo, sustituir el

terreno bajo la cimentación de un terraplén o en las capas superiores de una zona con arcillas expansivas.

Todo terreno, por bueno que sea, puede ser tratado para mejorar sus características. Aun con todo, las técnicas de mejoramiento se aplican en terrenos de muy baja calidad, que son susceptibles a la ruptura parcial con grandes deformaciones, colapsos, licuefacciones, sifonamientos, etc., y que requieren un cambio sustancial de propiedades.

Las propiedades mejoradas mediante los diferentes tratamientos son:

- Mayor resistencia al corte, para aumentar las cargas admisibles de cimentaciones superficiales.
- Mayor capacidad de resistencia a esfuerzos, licuefacciones, etc.
- Menos deformabilidad con disminución de los asentamientos diferenciales tanto en cimentaciones de estructuras como en terraplenes, cargas extensas, etc.
- Menos permeabilidad del terreno, con mejora de su capacidad de resistencia frente a los procesos de erosión interna producida por el flujo de agua.

De acuerdo a la temporalidad del método:

a) Temporales, limitados al periodo de la obra:

- Rebajamiento del nivel freático.
- Abatimiento del nivel freático.

b) Permanentes, sin adición de materiales:

- Compactación superficial.
- Compactación dinámica.
- Compactación con elementos vibrantes.
- Precarga sin drenes.

c) Permanentes, con adición de materiales:

- Estabilización con cemento
- Estabilización con cal
- Columnas de cal (por inyección a presión)
- Inclusiones
- Columnas de cemento (jet-grouting)
- Inyecciones
- Precarga con drenes
- Refuerzo de suelos
- Con geotextiles

En el punto 3.9.4. Mejoramientos, se explica a detalle las Técnicas de mejoramiento de suelos.

#### **2.1.5.4. Estudio de asentamientos en función a esfuerzos preliminares**

Un incremento del esfuerzo provocado por la construcción de cimentaciones u otras cargas comprime los estratos del suelo. La compresión es causada por a) deformación de las partículas del suelo, b) reacomodo de las partículas del suelo, y c) expulsión de agua o aire de los espacios vacíos.

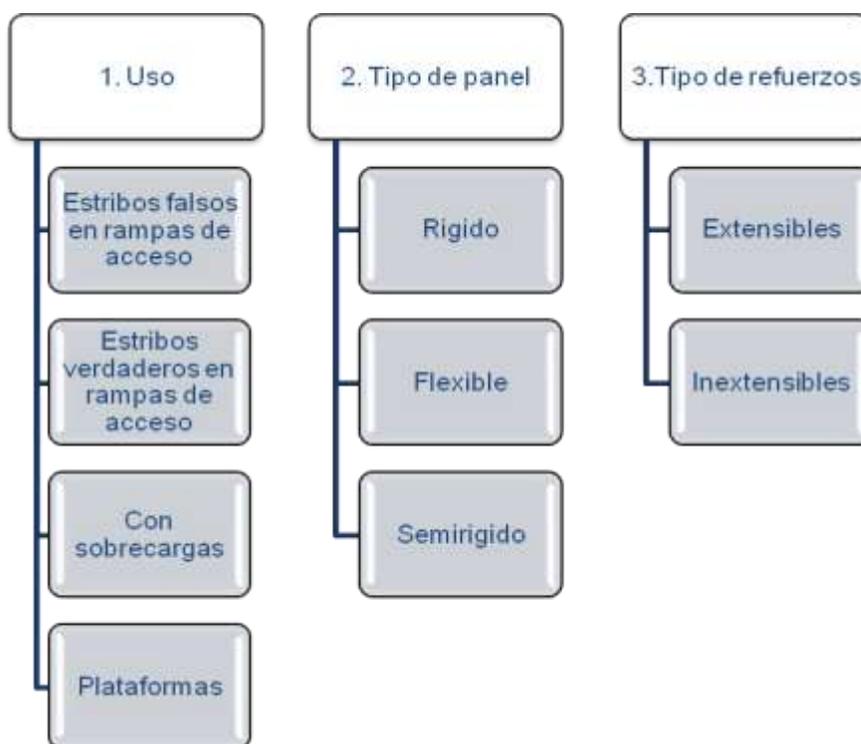
En general, el asentamiento del suelo causado por cargas se divide en tres amplias categorías:

1. Asentamiento inmediato, provocado por la deformación elástica del suelo seco y de suelos húmedos y saturados sin ningún cambio en el contenido de agua. los cálculos de los asentamientos inmediatos se basan, generalmente, en ecuaciones derivadas de la teoría de la elasticidad.
2. Asentamiento por consolidación primaria, es el resultado de un cambio de volumen en suelos saturados cohesivos debido a la expulsión de agua que ocupa espacios vacíos.
3. Asentamiento por consolidación secundaria, se observa en suelos saturados cohesivos y es el resultado del ajuste plástico de la estructura del suelo. Este sigue al asentamiento por consolidación primaria bajo un esfuerzo efectivo constante.

Se considerará lo indicado en el punto 3.9.2. Asentamientos.

### 2.1.6. Tipología de Muros Mecánicamente Estabilizados

Los muros podrían dividirse en:



#### 2.1.6.1. Uso

**ESTRIBOS FALSOS.** Estos muros son construidos para estructuras con estribo (pila-caballote). Un estribo falso de puente y que confina a la pila puede ser considerado como muro de contención con cargas adicionales.

Tal y como se ha mencionado, los Muros Mecánicamente Estabilizados poseen una gran capacidad para resistir grandes solicitaciones y alcanzar importantes alturas, haciendo por ello su uso como estribo una solución muy frecuente a nivel mundial. Es por ello que no son raros los estribos de 15 o 20 metros de alto, lo que en algunos viaductos puede incluso suponer el ahorro de tramos de puentes.

**ESTRIBOS VERDADEROS.** La aplicación de esta tecnología como estribo verdadero permite construir dicha estructura al mismo tiempo que la rampa de acceso, eliminando los asentamientos diferenciales. En muros mecánicamente

estabilizados, los estribos que funcionan como estribos verdaderos, reciben la superestructura a través de un macizo que se denomina cargadero.

El cargadero se analiza de forma independiente, como elemento de concreto armado, sujeto a las diferentes comprobaciones según los diferentes estados de carga. Tendrá que ser estable por sí solo (verificando deslizamiento y volcamiento) y estará reforzado para transmitir adecuadamente las cargas de tierras al macizo y repartir las reacciones de los apoyos.

**PARA SOBRECARGAS.** Las aplicaciones de los muros mecánicamente estabilizados son múltiples. Se utilizan como muros de protección con sobrecarga de estructuras metálicas o de concreto, contra derrames de petróleo, como defensa contra explosiones en aplicaciones militares. También se han empleado exitosamente en grandes muros mineros, con fuertes solicitaciones y rellenos muy agresivos, pero con vidas útiles menores de las que comúnmente se consideran en obras civiles.

**PLATAFORMAS.** El uso de muros mecánicamente estabilizados como plataformas para estacionamientos, supermercados y naves industriales, han sido de gran ayuda para el desarrollo en grandes complejos en las ciudades.

#### 2.1.6.2. Tipo de panel

**RÍGIDO.** El panel o paramento se considera rígido en un Muro Mecánicamente Estabilizado, cuando está comprendido por un solo muro de concreto con refuerzos conectados en su respaldo. Véase Figura 12.



Figura 12.- Panel rígido de concreto

**FLEXIBLE.** Considerado así, cuando el paramento formado por mallas, permite ciertas deformaciones.



Figura 13.- Panel flexible conformado por mallas

**SEMI RÍGIDO.** Estará compuesto de paneles de ciertas dimensiones, los cuales permiten absorber ciertos asentamientos debido a las juntas que existe entre cada panel.



Figura 14.- Panel semi rígido, paneles segmentados

### 2.1.6.3. Refuerzos

**INEXTENSIBLES.** Los muros mecánicamente estabilizados con refuerzos inextensibles, son aquellos en que la deformación en ruptura del elemento de refuerzo es menor que la deformación de falla del suelo, para condiciones de operación similares; por ejemplo refuerzos de acero galvanizado, armaduras tipo malla, o refuerzos sintéticos con limitación de deformación.





Figura 15.- Ejemplos de refuerzos considerados inextensibles

**EXTENSIBLES.** Los muros mecánicamente estabilizados con refuerzos extensibles de polipropileno, polietileno, refuerzos de geomallas de polipropileno de alta densidad, polietileno y otros plásticos, refuerzos metálicos con alta deformación, elementos que por su fijación generen deformaciones importantes, etc.

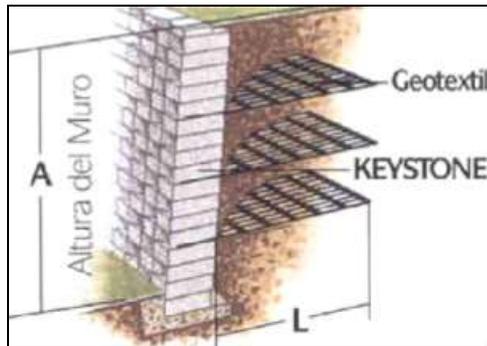


Figura 16.- Ejemplos de refuerzos considerados extensibles

### 3. PROYECTO

#### 3.1. Bases de diseño

El diseño de los Muros Mecánicamente Estabilizados (M.M.E.) se realizará considerando tanto la estabilidad externa como la estabilidad interna de la masa del suelo retenido detrás de los paneles; siendo también necesario que se hagan revisiones de estabilidad global.

Se puede considerar el uso de los M.M.E. en los mismos casos en los cuales se considera el uso de muros de contención convencionales, en especial cuando se esperan asentamientos totales y diferenciales significativos.

Sin embargo los M.M.E. no se deberán utilizar en ninguna de las situaciones siguientes:

- a) Cuando se necesiten construir instalaciones para servicios públicos dentro de la zona reforzada y la fractura de las tuberías pueda llegar a afectar negativamente la estabilidad de la estructura, a menos que se provea acceso a las instalaciones, que no interfiera con los refuerzos o que se trate del drenaje de la carretera.
- b) Si la socavación de la zona de inundación pueda llegar a afectar el relleno armado, el paramento o cualquier estructura de apoyo.
- c) Cuando los refuerzos puedan llegar a estar en contacto con líquidos industriales contaminantes o condiciones ambientales agresivas, a menos que se realicen estudios de corrosión o degradación a largo plazo y que específicamente se contemplen estas condiciones.

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

- a) La estabilidad externa, que depende de la geometría del muro (véase Figura 17.), las propiedades de los materiales de relleno detrás del muro y las sobrecargas.
- b) La estabilidad interna del muro reforzado detrás del paramento, donde intervienen las propiedades a corto y largo plazo de los materiales utilizados para reforzar el suelo.
- c) Fallas por estabilidad global y compuesta, que dependen del entorno y la zona específica donde se localiza el muro.
- d) Diseño estructural del paramento que contempla los tipos de paneles que formarán este paramento, garantizando la retención correcta del material.

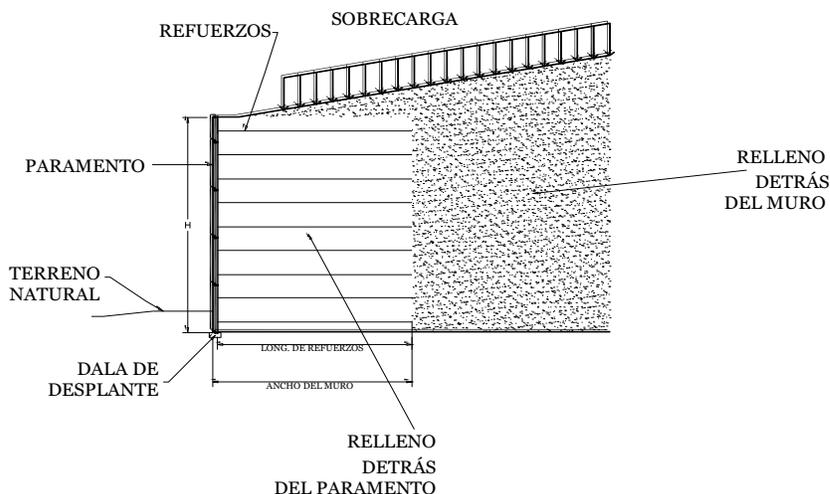


Figura 17.- Geometría del M.M.E.

### 3.2. Combinaciones de cargas

Salvo justificación por las características especiales de un determinado sistema constructivo o condiciones especiales del lugar o del proyecto, para el cálculo de los M.M.E. se emplea una misma combinación de acciones, con valores obtenidos a partir de parámetros básicos afectados por factores de seguridad.

Estas combinaciones de cargas darán lugar a solicitaciones en los elementos del M.M.E. y en el suelo de desplante del muro, y se deberá comprobar que en ningún caso estas solicitaciones sean mayores a la resistencia del M.M.E.

#### 3.2.1. Cargas

##### 3.2.1.1. Definición y clasificación

Las cargas que se consideran en un proyecto se clasifican en:

- a) Cargas permanentes: son aquellas que actúan en todo momento sobre la estructura, considerándose constantes todo el tiempo, en posición y en magnitud.
- b) Cargas variables: son las cargas cuya posición y magnitud varían de forma notable con el tiempo.
- c) Cargas accidentales: son aquellas que como su nombre lo dicen ocurren de carácter fortuito o de magnitud excepcional, y que se producen ocasionalmente.

En el caso de que las cargas permanentes o variables puedan intervenir en el cálculo de solicitaciones, ya sea en el sentido favorable o desfavorable, se pueden definir dos valores característicos: máximo y mínimo, esto con el propósito de ser utilizados adecuadamente en el cálculo de diseño de las mismas estructuras. Indiscutiblemente, para el cálculo de una solicitación a partir de una combinación de cargas, sólo se podrá utilizar uno de los valores (el máximo o el mínimo).

##### 3.2.1.2. Cargas permanentes

###### 3.2.1.2.1. Peso propio

Las cargas debidas al peso propio de los elementos o partes del M.M.E. pueden ser correspondidas a:

- a) Peso propio del macizo de suelo reforzado.
- b) Peso de terraplenes o rellenos adicionales.

- c) Peso de equipos o estructuras de cualquier tipo, de posición y magnitud fijas.
- d) Otras cargas, tales como el pavimento de la carretera.
- e) Peso debido a la carga permanente de tableros de puente, elementos de reparto, etc.

Es evidente que el peso propio del material de relleno no suele ser bien conocido y que, de igual manera puede variar con el transcurso del tiempo (terreno seco, húmedo o saturado). A pesar de esto, se consideran como cargas permanentes, considerándose dos valores característicos (mínimo y máximo) siguientes (de acuerdo a las condiciones de los materiales utilizados en cada lugar):

**TABLA 5.- Peso propio del material de relleno (Manual para el proyecto ejecutivo de estructuras de suelo reforzado)**

	$\gamma_{\text{máx}}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{\text{mín}}$ (KN/m <sup>3</sup> )
$\gamma$	20	18
$\gamma'$ (sumergido)	12	10

### 3.2.1.2.2. Cargas debidas al empuje del terreno

Comúnmente, las fuerzas debidas al empuje del terreno tienen carácter desfavorable, por lo que sólo se define el valor característico máximo. Por esta razón también se incluyen dentro de las cargas permanentes a los empujes de suelo.

El cálculo del empuje del suelo sobre el macizo de suelo reforzado, se realizará por métodos usuales para el cálculo de empujes del suelo sobre estructuras rígidas, a partir del peso específico del relleno o terreno natural sujeto por dicho macizo y de las cargas permanentes situadas sobre dicho relleno o terreno natural.

La deformabilidad del macizo del suelo reforzado es, en general, algo menor que la del relleno o terreno sujeto, aunque es, sin embargo, mucho mayor que la de un muro convencional.

Debido a esto, puede considerarse una cierta continuidad entre el macizo y el relleno o terreno natural, por lo que el ángulo de fricción entre ambos puede tomarse igual al ángulo de fricción interna que se tiene en el plano vertical dentro del relleno o suelo natural. Esto equivale a utilizar el método de Rankine para calcular el empuje.

El método de Rankine no será válido si el ángulo de fricción interna del material de relleno utilizado en el macizo fuera menor que el del relleno o terreno natural sujeto por este macizo, no se tomará como ángulo de fricción del macizo relleno (terreno natural) ningún valor superior al del ángulo de rozamiento interno del relleno utilizado en el macizo.

El cálculo se realizará a largo plazo y se supondrá una cohesión efectiva nula, de acuerdo a lo indicado en el punto E.1.2.1 Empuje del suelo.

### 3.2.1.3. Cargas variables

#### 3.2.1.3.1. Cargas de uso

En éste tipo de obras, las cargas de explotación son principalmente debidas a la circulación de los vehículos. Éstas mismas, pueden provocar un aumento en el empuje de tierra a considerar en los cálculos.

En general, se debe considerar una carga uniforme sobre el terreno de 10 Ton/m<sup>2</sup>.

En el caso de que trate de una vía de circulación, se considerará independientemente de lo anterior, la acción local de un vehículo pesado de 60 Ton, situado en la posición más desfavorable.

#### **3.2.1.3.2. Cargas producidas por el agua**

Las cargas generadas por el agua, se pueden transmitir por múltiples efectos en los M.M.E., de los que se enfatizan los siguientes:

- a) La presión hidrostática.
- b) Las presiones de filtración.
- c) La modificación de los parámetros geomecánicos del suelo reforzado.
- d) El fenómeno de sumersión correspondiente al principio de Arquímedes en forma de supresión a todos los niveles.

Por regla general las cargas producidas por el agua atañen a las obras parcialmente saturadas (orillas de río o de mar), para las cuales conviene realizar un estudio específico.

#### **3.2.1.4. Cargas accidentales**

Las cargas accidentales que pueden afectar a los M.M.E. son las siguientes:

- a) Los efectos sísmicos.
- b) Los choques de vehículos.
- c) Los efectos de hundimientos mineros o Kársticos.

##### **3.2.1.4.1. Estabilidad sísmica de los taludes y muros de suelo reforzado**

En general, pueden manejarse métodos pseudoestáticos para el análisis de la estabilidad sísmica, para que no exista ningún riesgo de licuefacción o pérdida importante de resistencia en el suelo reforzado.

El coeficiente de seguridad resultante deberá ser:

$$F \geq 1.15$$

Se debe asegurar que bajo la ocurrencia de algún sismo, no se produzca la falla del refuerzo, esto con el fin de garantizar que la estructura siga cumpliendo su función, a pesar de producirse, fortuitamente, deformaciones importantes. Cuando se quieran limitar las deformaciones se utilizarán armaduras inextensibles en lugar de fibras sintéticas.

Es importante mencionar, que salvo en zonas de alta sismicidad o en estructuras muy poco reforzadas, la estabilidad se consigue con un ligero aumento de la longitud del refuerzo. Así como también, basado en observaciones en zonas de actividad sísmica, estas estructuras han demostrado tener una mayor resistencia a cargas sísmicas, que las estructuras de concreto.

#### **3.2.2. Combinaciones de cargas**

Se consideran únicamente dos grupos de combinaciones: las combinaciones normales centradas en las cargas variables, y las combinaciones accidentales centradas en una carga accidental.

En cuanto a las combinaciones se refiere, las cargas permanentes se distribuyen en dos grupos: el de las cargas desfavorables que actúan en el mismo sentido que las cargas variables de base y el de las cargas desfavorables que actúan en sentido contrario.

**3.2.2.1. Combinaciones normales**

**3.2.2.1.1. Obras en seco**

Se considera la siguiente combinación de carga:

$$1.5x(G_{\text{máx}} + Q) + 0.9G_{\text{mín}} \quad \text{Ec. 1}$$

En donde:

- $G_{\text{máx}}$  = es el conjunto de las acciones permanentes desfavorables.
- $G_{\text{mín}}$  = es el conjunto de las acciones permanentes favorables.
- $Q$  = es el conjunto de acciones variables.

Las cargas variables de base son las cargas de servicio, por ejemplo, las que actúan sobre la calzada que soportará el macizo. También se pueden considerar los esfuerzos causados por la maquinaria de compactación empleada.

**3.2.2.1.2. Obras parcialmente saturadas**

En este caso, se pueden aislar a las cargas variables causadas por el agua, empujes y supresiones, para incluirlas en la combinación multiplicándolas por un coeficiente de ponderación igual a la unidad.

**3.2.2.2. Combinaciones accidentales**

Los esfuerzos que se transmiten por aquellos dispositivos eventuales de retención, afectan principalmente a las capas superiores del macizo, para esto conviene prevenir con refuerzos locales. Las únicas combinaciones accidentales a tomarse en cuenta en la estabilidad global son las que comprenden los efectos de un terremoto. Lo cual se expresa de la manera siguiente:

$$G_{\text{máx}} + G_{\text{mín}} + F_A \quad \text{Ec. 2}$$

En donde:

- $G_{\text{máx}}$  = Ver Ec. 1.
- $G_{\text{mín}}$  = Ver Ec. 1.
- $F_A$  = es el conjunto de esfuerzos horizontales causados por la inercia frente a la aceleración horizontal.

**3.2.3. Coeficientes de seguridad**

Estos coeficientes de seguridad son los valores por los que se tienen que dividir las resistencias de los diversos elementos del M.M.E. y el suelo de desplante, esto con el propósito de obtener las capacidades portantes admisibles de dichos elementos.

Los coeficientes de seguridad a aplicar en los tipos de refuerzos serán los que se indican en la Tabla 6. siguiente:

**TABLA 6.- Granulometría recomendada para M.M.E. (Especificaciones AASHTO Highway Bridges, División II, Sección 7.3.6.3)**

Parámetro o sollicitación	Combinaciones de cargas Normales	Combinaciones de cargas Accidentales
a) Terreno natural		
Ángulo de rozamiento interno (s/tg $\phi$ ).	1.20	1.10
Cohesión (Taludes u obras de contención)	1.50	1.40
Cohesión (cimentaciones)	1.80	1.60
	1.10	1.00
b) Suelo de aportación	1.40	1.30
Ángulo de rozamiento interno (s/tg $\phi$ ).		
Cohesión	1.30	1.20
	1.50	1.30
c) Sollicitaciones	1.50	1.25
Deslizamiento de taludes		
Estabilidad general de muros o estribos	1.30	1.10
	1.50	1.30
Hundimiento de cimentaciones		
Deslizamiento del contacto suelo-terreno	1.35	1.15
	1.50	1.25
Obras de contención	1.65	1.50
Estructuras		
Deslizamiento del contacto suelo-armadura		
Obras de contención		
Estructuras		
Resistencia de las armaduras a tensión		

### 3.3. Dimensiones de las estructuras

El dimensionamiento de los M.M.E. comienza añadiendo la dimensión del empotramiento a la altura del muro bajo algunos criterios que se mencionaran más adelante, esto con el fin de determinar la altura de diseño para cada sección que se vaya analizando, ya que la estructura se construye de abajo hacia arriba, esta condición permanece hasta final de la construcción del muro.

Es necesario que las dimensiones que se den a los M.M.E. sean tales que se asegure que los factores mínimos de seguridad requeridos, tanto contra deslizamiento como contra volteo, se cumplan. Esto último aunado a que se cumpla con los factores de seguridad que se requieran para la capacidad de carga del suelo de desplante. En la Figura 18. se muestran estas dimensiones.

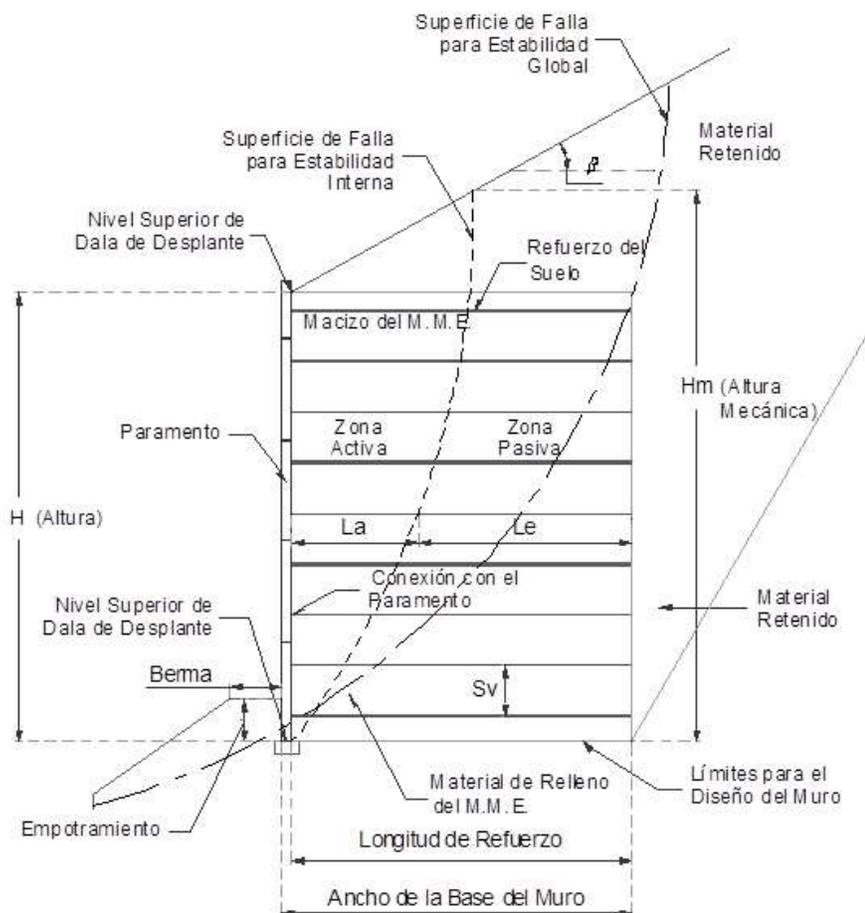


Figura 18.- Elementos para el diseño de un M.M.E. (Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método (Load and Resistance Factor Design) LRFD 2004, Sección 11.10.2.)

### 3.3.1. Longitud de los refuerzos

La longitud de los refuerzos tipo tira, será el 70 por ciento de la altura del muro medida a partir de la dala de nivelación. Este requisito no posee ninguna justificación técnica, sin embargo, se ha utilizado como base para muchos diseños exitosos elaborados hasta el momento.

Los estudios paramétricos realizados tomando en cuenta las resistencias mínimas aceptables del suelo exponen que para que las dimensiones de una estructura satisfagan los criterios de excentricidad y deslizamiento relacionados con estructuras que trabajan por gravedad, necesitan relaciones longitud/altura comprendidas entre 0,8 en el caso de las estructuras bajas (por ejemplo 3 m) y 0,63 para estructuras altas (por ejemplo 12 m).

Sin embargo, se puede disminuir la longitud de los refuerzos si se asegura la resistencia del suelo de relleno detrás del muro y del suelo de cimentación, ya que se ha registrado que relaciones longitud/altura menores al 0,7 (por ejemplo 0,5 a 0,6) aumentan significativamente los asentamientos.

La longitud de los refuerzos debe ser uniforme a lo largo de la altura del muro, a menos que una variación justifique un comportamiento satisfactorio, como en los casos siguientes:

- a) Aumentar la longitud de los refuerzos en las capas superiores (arriba del 70 por ciento de la altura del muro) para evitar problemas por

falta de adherencia entre el refuerzo y el material de relleno, o para tomar en cuenta cargas sísmicas o de impacto.

- b) Aumentar la longitud de los refuerzos en las capas inferiores (abajo del 70 por ciento de la altura del muro) cuando el análisis de estabilidad global lo requiera.
- c) Disminuir la longitud de los refuerzos en las capas inferiores (abajo del 70 por ciento de la altura del muro) para optimizar el volumen de excavación, siempre y cuando el muro se apoye sobre roca o sobre un suelo con muy buena capacidad de carga.

El diseño indicado en el inciso "c" requiere dos análisis: un diseño usando reglas simplificadas para garantizar la estabilidad externa y un análisis de estabilidad global.

Las reglas de diseño simplificado para este tipo de estructuras son las siguientes:

- a) El muro es representado por un bloque rectangular que tiene la misma altura total y la misma sección transversal que la sección trapezoidal de los cálculos de la estabilidad externa.
- b) La línea de máxima fuerza de tensión es la misma que en los muros con longitud de refuerzo uniforme (lineal o bilineal, dependiendo de la extensibilidad de los refuerzos).
- c) La longitud mínima debe ser mayor a 0,4 veces la altura del muro, con diferencias entre longitudes consecutivas mayores a 1,5 veces la altura del muro.

Para los cálculos de estabilidad interna, el muro se divide en secciones rectangulares y para cada sección la longitud correspondiente "L".

### 3.3.2. Empotramiento de la cara frontal

El empotramiento mínimo requerido en la parte inferior del M.M.E ( $D_f$ ), se debe basar en los requerimientos sobre capacidad de carga, asentamiento y estabilidad como se muestra en la Figura 19.:

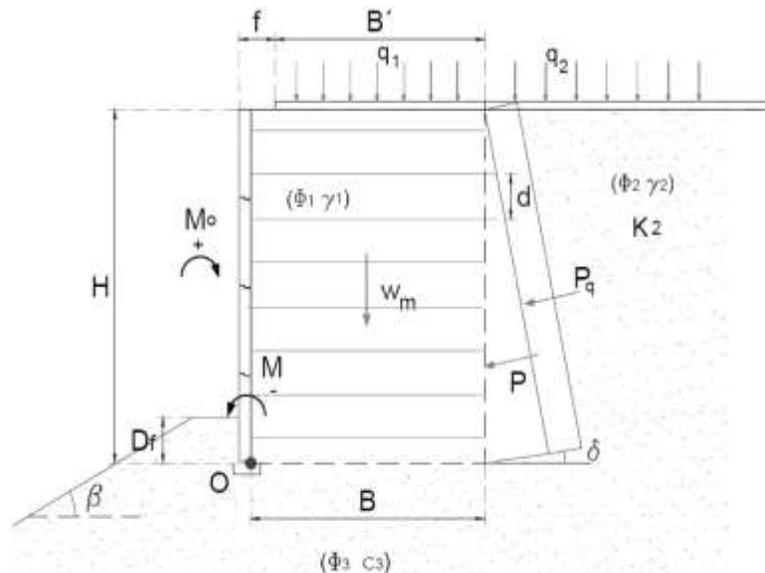


Figura 19.- Empotramiento mínimo de un M.M.E. (Manual para el proyecto ejecutivo de estructuras de suelo reforzado)

La profundidad  $D_f$  debe dimensionarse en principio para evitar el hundimiento del terreno situado debajo del paramento, y al mismo tiempo evitar socavación por flujo en torno al mismo. Este valor  $D_f$  depende de los siguientes factores:

- a) Riesgo de excavación de la obra durante trabajos posteriores (zanjas) o bajo ciertas condiciones naturales (terrenos en pendiente, etc.).
- b) Riesgo de socavación en caso de concentrarse las filtraciones bajo el paramento.

En cualquier caso se debe prever una profundidad  $D_f \geq 0,40$  m para todas las obras, a no ser que estén cimentadas sobre un terreno compacto (roca firme, losa de concreto, antigua calzada, etc.) y no sea sensible a la helada.

La profundidad de empotramiento en la cara frontal del muro, no deberá ser menor que los siguientes valores:

- a) 0,60 m si se trata de un terreno con pendiente mayor o igual que 4:1, o si es posible que se remueva el suelo delante de la base del muro en algún futuro, o 0,30 m si se trata de terreno plano y que no exista la posibilidad de futuras excavaciones del suelo delante de la base del muro.
- b) 0,60 m como mínimo, por debajo del nivel de socavación, para los muros que se vayan a construir a la orilla de ríos o arroyos.

Para las obras comunes (estribos en terreno horizontal y muros sin sobrecarga) se puede hacer el dimensionamiento de  $D_f$  previo directamente a partir de la altura del M.M.E. a efectos mecánicos (H) mediante la Tabla 7.:

**TABLA 7.- Empotramientos mínimos (Especificaciones AASHTO Highway Bridges, 17<sup>th</sup> Edition, 2002)**

Pendiente delante de las estructuras bs	$D_f$ (m)
Horizontal	H / 20.00
3:1	H / 10.00
2:1	H / 7.00
3:2	H / 5.00

Cuando se quiere evitar que la tensión debajo del paramento rebase la capacidad de carga del suelo de cimentación, se utilizan normalmente los valores de la Tabla 8. que permiten obtener  $D_f$  en función de la tensión vertical de referencia en  $Ton/m^2$  ( $q_{ref}$ ) aplicada al terreno de cimentación así como de la geometría del terreno.

**TABLA 8.- Empotramientos mínimos en función a la tensión vertical (Manual para el proyecto y ejecución de estructuras de suelo reforzado)**

Pendiente del terreno	$D_{min}/ q_{ref}$
$\beta = 0^\circ$	$1.5 \times 10^{-3}$
$\beta = 18^\circ$ (cot $\beta = 3/1$ )	$3 \times 10^{-3}$
$\beta = 27^\circ$ (cot $\beta = 2/1$ )	$4.5 \times 10^{-3}$
$\beta = 34^\circ$ (cot $\beta = 3/2$ )	$6.5 \times 10^{-3}$

Cuando el M.M.E. se encuentre en algún talud,  $D_f$  se calculará a partir de una berma realizada en la coronación del talud y cuyo ancho será del orden de 1 m. Como se aprecia en la Figura 20:

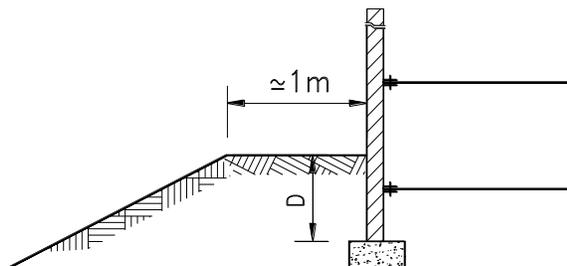


Figura 20.- Berma del M.M.E. (Manual para el proyecto y ejecución de estructuras de suelo reforzado)

### 3.4. Paramento

El paramento se diseñará para soportar la fuerza horizontal en la conexión entre el paramento y los refuerzos, las cargas sísmicas, y las tensiones provocadas por las operaciones de compactación cerca del paramento durante la construcción del muro, todo esto según el material de que se trate, además se estabilizará de manera que no se exceda los desplomes permitidos.

Para los M.M.E., sin importar el tipo de revestimiento y refuerzos, la tensión máxima aplicada en la conexión de los refuerzos con el paramento,  $T_o$ , será igual a la máxima tensión en los refuerzos,  $T_{máx}$ .

#### 3.4.1. Paramentos de concreto

Los paramentos elaborados con concreto, ya sea segmentados o completos, deberán diseñarse para soportar los esfuerzos que se transmiten al mismo, siendo su espesor variable, debiendo en todos los casos ser suficiente para evitar pandeos o fallas del mismo.

El recubrimiento mínimo de concreto sobre el acero de refuerzo de los paramentos será de 38 mm.

En el paramento se suministrará el acero necesario para resistir las condiciones de carga promedio.

Cuando se utilicen paneles de concreto segmentados, los cálculos de estabilidad del paramento evaluarán: la máxima separación vertical entre las capas de refuerzos, la altura máxima admisible de paramento por encima de la capa superior de refuerzos, la capacidad de corte entre las unidades y la resistencia a la contra flecha del paramento.

- a) La máxima separación entre las capas de refuerzos cuando se trata de paramento segmentado, será menor o igual que dos veces el ancho de uno de los bloques de concreto o menor o igual que 810 mm, cualquiera sea el valor que resulte menor.
- b) La máxima altura del revestimiento por encima de la capa superior de refuerzos será menor o igual que:

$$1,5 W_u \text{ ó } \leq 600 \text{ mm (cualquiera sea el valor que resulte menor)}$$

En donde:

Wu es el ancho de los bloques de los paneles

Siempre que mediante cálculos detallados se demuestre que el revestimiento por encima de la capa superior de refuerzos es estable contra las fallas por desmoronamiento.

La profundidad del revestimiento por debajo de la capa inferior de refuerzos será menor o igual que el ancho Wu de los bloques de concreto que se empleen para construir el revestimiento por segmentos.

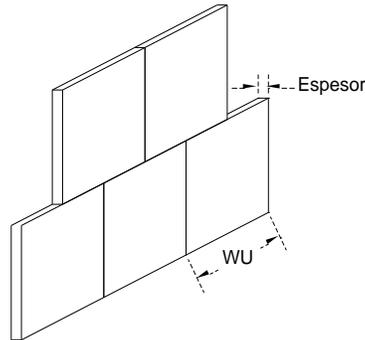


Figura 21.- Dimensiones de los paneles segmentados (AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 17<sup>th</sup> Edition, 2002, Section 5.8.7.2)

En este tipo de paramento segmentado se dispondrá de armado para las tensiones provocadas por contracción y temperatura cerca de las superficies de concreto expuestas a variaciones diarias de la temperatura. Se agregará armadura de contracción y temperatura para asegurar que la armadura total en las superficies expuestas no sea menor que la especificada en la AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD (Load and Resistance Factor Design), la cual indica que:

Los componentes con espesores menores a 0,12 m, el área de acero en cada dirección debe satisfacer:

$$A_s \geq 0.11 \frac{A_g}{f_y} \quad \text{Ec. 3}$$

En donde:

Ag es el área bruta de la sección ( $mm^2$ )  
 fy es la tensión de fluencia especificada de las barras de armadura (MPa)

El acero se debe distribuir uniformemente en ambas caras; sin embargo, en los elementos de 0,15 m de espesor o menores, el acero se puede colocar en una sola capa.

La separación del acero de contracción y temperatura no excederá 3 veces el espesor del paramento ó 0,45 m.

#### **3.4.2. Paramentos metálicos**

Este tipo de paramentos se refiere a las mallas soldadas, metal etc.; todos estos materiales se diseñarán de manera que se evite la generación de pandeos excesivos al momento de comprimir el relleno detrás del paramento causado por las tensiones de compactación o al mismo peso del relleno.

Esto puede lograrse al disminuir las dimensiones verticales de los elementos individuales del paramento y la separación horizontal (se debe limitar a 0,90

m) y vertical (a un máximo de 06,60 mm) de las capas de refuerzo del suelo, del mismo modo se tiene que cumplir que el paramento tenga un adecuado deslizamiento vertical y superposición entre elementos adyacentes.

De igual manera en la parte superior de este tipo de paramento flexible debe estar unido a una capa de refuerzos del muro para lograr la estabilidad del M.M.E.

#### **3.4.3. Paramentos verdes o vegetales**

Es una manera benéfica de emplear mallas, y a través de sus huecos es posible implantar vegetales en el material de relleno. La semilla se podrá plantar durante el proceso constructivo de los M.M.E. siendo conveniente extender sobre el paramento capas de abono o tratamientos que favorezcan las primeras fases de crecimiento. Se asegurará el recubrimiento del paramento utilizando concreto lanzado, esto con el fin de que se garantice una protección duradera del mismo.

#### **3.4.4. Corrosión**

Es necesario evitar el contacto entre diferentes metales, por ejemplo entre la conexión del refuerzo y la del acero de refuerzo del paramento, para evitarlo es necesario colocar un material no conductor (aplicación de recubrimientos el acero, selladores o el uso de paneles de mayor espesor) entre estas conexiones.

### **3.5. Condiciones de cargas especiales**

Aparte de las cargas ya mencionadas, en este apartado se incluyen las provocadas por sobrecargas permanentes, accidentales así como presiones hidrostáticas. Es conveniente resaltar que una sobrecarga es aquella carga que se añade a una carga regular de un M.M.E, así como aquella acción a la que puede llegar a estar sometido el muro.

#### **3.5.1. Sobrecargas permanentes**

Las sobrecargas permanentes no son causadas por el peso del suelo reforzado, algunos ejemplos que se pueden considerar son las sobrecargas de los siguientes elementos, mismos que se tendrán que considerar dentro del análisis de diseño de un M.M.E:

- Edificios, casas
- Naves industriales, almacenes
- Zapatas corridas apoyadas sobre el relleno reforzado
- Cimentaciones para grúas o plumas así como el peso propio de las mismas.
- Cargaderos
- Losas
- Lanzadoras (mismas que se utilizan para el proceso constructivo de la superestructura)
- Grúas viajeras
- Empujes

##### **3.5.1.1. Sobrecargas permanentes**

Como ya se mencionó las cargas permanentes son todas aquellas que contienen el peso propio de todos los elementos de la estructura (DC), accesorios e instalaciones de servicios públicos y superficie de rodamiento (DW), presión vertical del peso propio del suelo de relleno (EV), futuras sobrecargas y ensanchamientos previstos.

**3.5.1.2. Cargas del suelo**

Estas cargas corresponden al empuje horizontal del suelo (EH), a las sobrecargas del suelo (ES) y a la fricción negativa (DD).

**3.5.1.2.1. Empuje del suelo**

El empuje del suelo (EH) se deberá considerar en función de los siguientes factores:

- Tipo y densidad del suelo,
- Contenido de agua,
- Grado de compactación,
- Ubicación del nivel freático,
- Interacción suelo-estructura,
- Cantidad de sobrecarga,
- Efectos sísmicos,
- Pendiente del relleno, e
- Inclinação del muro.

El movimiento que se necesita para llegar al empuje activo mínimo o al empuje pasivo máximo depende de la altura del muro y del tipo de suelo. En la Tabla 9 se aprecian los valores aproximados de los movimientos relativos que se solicitan para llegar a condiciones de empuje activo o pasivo del suelo.

**TABLA 9.- Valores para empujes pasivos y activos**

Tipo de relleno	Valores de D / H	
	Activo	Pasivo
Arena densa	0.001	0.01
Arena de densidad media	0.002	0.02
Arena suelta	0.004	0.04
Limo compactado	0.002	0.02
Arcilla magra compactada	0.01	0.05

**3.5.1.2.1.1. Coeficiente de Empuje Lateral en Reposo,  $k_o$ .**

Quando se presentan suelos normalmente consolidados, muro vertical y terreno nivelado, el coeficiente de empuje lateral en reposo se puede tomar como:

$$k_o = 1 - \text{sen } \phi' f \tag{Ec. 4}$$

Donde:

- $\phi' f$  = ángulo efectivo de fricción del suelo
- $k_o$  = coeficiente de empuje lateral del suelo en reposo

Por otro lado, para los suelos sobreconsolidados tenemos lo siguiente:

$$k_o = (1 - \text{sen } \phi' f)(\text{OCR})^{\text{sen } \phi' f} \tag{Ec. 5}$$

Donde:

- $\phi' f$  = ver Ec. 4.
- OCR = relación de sobreconsolidación.

Es muy importante mencionar que no se deberá utilizar material fino como limo ó arcilla como relleno. De igual manera, en ningún caso se debe emplear arcilla altamente plástica como material de relleno.

**3.5.1.2.1.2. Coeficiente de Empuje Lateral Activo,  $k_a$ .**

El coeficiente de empuje lateral activo se puede tomar como:

$$k_a = \frac{\text{sen}^2(\theta + \phi'f)}{\gamma(\text{sen}^2\theta \cdot \text{sen}(\theta - \delta))} \quad \text{Ec. 6}$$

De donde:

$$\gamma = 1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi'f + \delta)\text{sen}(\phi'f - \beta)}{\text{sen}(\theta - \delta)\text{sen}(\theta + \beta)}} \quad \text{Ec. 7}$$

En donde:

- $\delta$  = ángulo de fricción entre relleno y muro.
- $\beta$  = ángulo que forma la superficie del relleno respecto de la horizontal
- $\theta$  = ángulo que forma el respaldo del muro respecto de la horizontal
- $\phi'f$  = ángulo efectivo de fricción interna

**3.5.1.2.2. Sobrecargas del suelo: ES**

**3.5.1.2.2.1. Sobrecarga Uniforme**

Si existe una sobrecarga uniforme, al empuje básico del suelo se le deberá sumar un empuje horizontal constante tomado como:

$$\Delta p = k_s q_s \quad \text{Ec. 8}$$

- $\Delta p$  = empuje horizontal constante debido a la sobrecarga uniforme (MPa)
- $k_s$  = coeficiente de empuje del suelo debido a la sobrecarga
- $q_s$  = sobrecarga uniforme aplicada sobre la superficie superior de la cuña de suelo activo (MPa)

**3.5.1.2.2.2. Cargas puntuales**

Este empuje sobre un muro debido a una carga puntual ( $\Delta p_h$ ) se puede tomar como sigue:

$$\Delta p_h = \frac{P}{\pi R^2} \left( \frac{3ZX^2}{R^3} - \frac{R(1-2v)}{R+Z} \right) \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

- $P$  = carga puntual (N)
- $R$  = distancia radial desde el punto de aplicación de la carga hasta un punto en el muro.
- $X$  = distancia horizontal desde el paramento posterior del muro hasta el punto de aplicación de la carga (mm)
- $Z$  = distancia vertical desde el punto de aplicación de la carga hasta la elevación de un punto sobre el muro considerado (mm)
- $v$  = coeficiente de Poisson (adimensional)

Bajo esta sección es donde se pueden considerar las sobrecargas permanentes causadas por los edificios, las casas, las estructuras, las zapatas, las cimentaciones para grúas, naves industriales, cargaderos, losas, albercas.

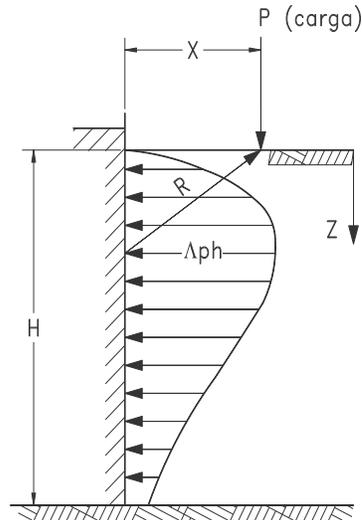


Figura 22.- Diagrama de distribución de una carga puntual (AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 17<sup>th</sup> Edition, 2002, Section 5.8.7.2)

### 3.5.2. Sobrecargas accidentales

Una carga accidental es aquella que ocurre de manera fortuita en la vida de cualquier estructura, por tal razón no es una carga constante y puede alcanzar grandes magnitudes al momento en que se presentan durante breves lapsos de tiempo.

Parte elemental del diseño de todas las estructuras es el análisis de sobrecargas accidentales, ya que este tipo de acciones pueden afectar los elementos responsables de la capacidad de carga de una edificación e incluso llevarla a la falla.

Una sobrecarga accidental puede ser la ocasionada a un M.M.E. por: sismos (primordialmente), viento y alguna colisión causada por un vehículo.

#### 3.5.2.1. Sobrecarga por sismo

Un sismo es un movimiento de tierras que se ocasiona por la liberación de presión en las capas tectónicas, ocasionada por el choque o roce de las mismas, así como por actividad volcánica.

El impacto que tiene un sismo sobre una estructura depende sobre todo de las características del lugar (tipo de suelo, la sismicidad de la zona), del sismo (de su intensidad y duración) y de la estructura (tamaño y peso).

El propósito de este tipo de análisis permite asegurar la resistencia de una estructura ante un sismo, esto no significa que la estructura permanezca intacta después de un evento de éste tipo. No obstante, se establecen requerimientos mínimos de resistencia respecto a ciertos estados límite. Se debe asegurar que bajo la presencia de algún sismo, no se produzca la ruptura del refuerzo, esto con el fin de garantizar que la estructura siga cumpliendo su función, a pesar de originarse esporádicamente deformaciones importantes.

El muro y cualquier estructura soportada por el muro deben tolerar movimientos laterales resultantes del deslizamiento de la estructura. Para estudiar la estabilidad global del muro de sostenimiento se incluye la carga sísmica se deberá utilizar un factor de resistencia  $\phi = 0.9$ .

#### 3.5.2.2. Sobrecarga por viento

Se define como sobrecarga de viento aquella carga de naturaleza variable producida por acción directa del viento sobre el M.M.E. o sobre los elementos no estructurales que incidan sobre él.

#### **3.5.2.3. Choques de vehículos contra dispositivos de retención**

Por regla general, los esfuerzos motivados por los choques de vehículos contra los dispositivos de retención M.M.E. afectan esencialmente a la zona superior del macizo. No es preciso por tanto hacerlos intervenir en las combinaciones generales relativas a los cálculos. Es suficiente añadir a los esfuerzos determinados para dicha zona las tensiones complementarias motivadas por los dispositivos de retención en función de su tipo.

Los elementos de muro verticales se deberán diseñar para resistir todas las cargas debidas al empuje horizontal del suelo, las sobrecargas, la presión hidrostática y las cargas sísmicas.

#### **3.5.3. Presiones hidrostáticas**

La presión hidrostática actúa de manera perpendicular a la superficie que retiene el agua en este caso el paramento de un M.M.E. La presión hidrostática se deberá calcular como el producto entre la altura de la columna de agua sobre el punto considerado, la densidad de agua y  $g$  (aceleración de la gravedad).

Los niveles de agua de diseño para los distintos estados límites serán los especificados y/o aprobados por el propietario.

##### **3.5.3.1. Oleaje**

Se deberá considerar la acción del oleaje sobre las estructuras expuestas si se anticipa que se pueden desarrollar fuerzas de oleaje significativas.

##### **3.5.3.2. Socavación**

Las consecuencias de los cambios de las condiciones de cimentación provocados por la inundación de diseño para socavación se deberán considerar en los estados límites de resistencia y servicio. Las consecuencias de los cambios de las condiciones de cimentación provocados por la socavación resultante de la inundación de control para socavación y por los huracanes se deberán considerar en los estados límites correspondientes a eventos extremos.

### **3.6. Estabilidad externa**

El análisis de estabilidad externa es esencialmente el mismo que se realiza para la revisión de taludes. Debiéndose cuidar que el coeficiente de seguridad no sea inferior que el que se requiera de acuerdo a la condición de estudio.

En este cálculo se asume como un macizo rígido conformado por el paramento y la masa de suelo reforzada. El coeficiente de presión activo  $K_{af}$  se calculara en base al ángulo de fricción interna del material de relleno. En caso de no conocerse éste dato se empleara un ángulo de  $30^\circ$ .

Para el análisis de estabilidad para muros con cara vertical, consideramos que la masa del muro mecánicamente estabilizado actúa como un cuerpo rígido, desarrollando las presiones de tierra sobre un plano vertical aplicadas en la parte posterior o final del refuerzo.

El coeficiente activo de presiones de tierra es calculado para muros verticales (muros con una inclinación en su cara de menos de 8° con respecto a la vertical) y un relleno horizontal (Figura 23.), por lo tanto tenemos que:

$$K_a = \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad \text{Ec. 10}$$

Sin embargo, se pueden presentar diferentes tipos de relleno por los cuales consideramos que en los casos donde se presenta un relleno en talud (Figura 24.) existe un coeficiente activo de presiones de la siguiente manera:

$$K_a = \cos \beta \left( \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}} \right) \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

- $\varphi =$  ángulo de fricción del relleno
- $\beta =$  ángulo de la carga de relleno en talud

En el caso de que la cara del muro tenga una inclinación mayor o igual que ocho grados, el coeficiente de presión de tierra puede ser calculado por medio del caso general de Coulomb el cual es:

$$K_a = \frac{\sin^2(\theta + \varphi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta - \delta) \left[ 1 + \frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\theta - \delta) \sin(\theta + \beta)} \right]^2} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

- $\varphi =$  ángulo de fricción del relleno
- $\theta =$  ángulo de fricción de la cara del muro
- $\beta =$  ángulo del talud
- $\delta =$  ángulo de fricción del muro, el cual es igual a un máximo de  $\beta$  pero menor o igual que  $\varphi$

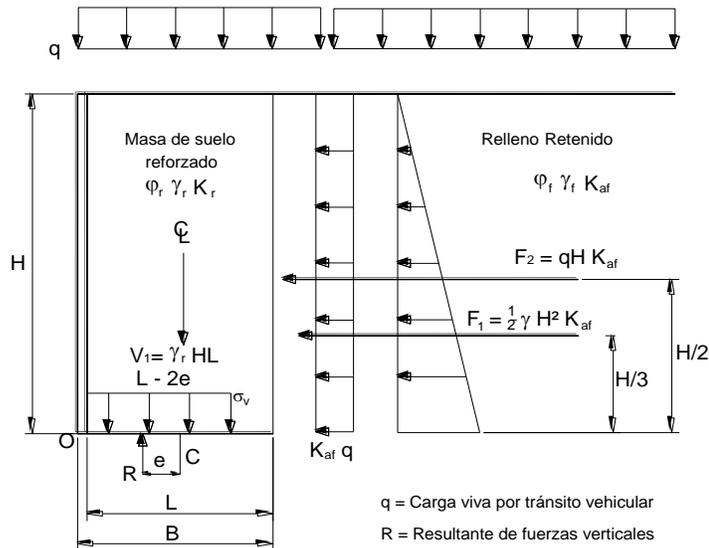


Figura 23.- Cálculo de esfuerzo vertical para capacidad de carga para condición de relleno horizontal (AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 17<sup>th</sup> Edition, 2002)

SUMA DE MOMENTOS CON RESPECTO AL PUNTO C:

$$e = \frac{F_1(H/3) + F_2(H/2)}{V_1 + qL} \quad \text{Ec. 13}$$

$$s = \frac{V_1 + qL}{L - 2e} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

- $\gamma_r$  = peso volumétrico del relleno reforzado
- $\gamma_f$  = peso volumétrico del relleno detrás del muro
- $\phi_r$  = ángulo de fricción interna del relleno reforzado
- $\phi_f$  = ángulo de fricción interna del relleno detrás del muro
- $k_r$  = coeficiente de empuje activo horizontal del relleno reforzado
- $k_{af}$  = coeficiente de empuje activo del suelo del relleno
- $V_1$  = peso del suelo soportado por el muro, excluyendo el peso de la sobrecarga
- $H$  = altura del muro
- $L$  = longitud de los refuerzos
- $B$  = ancho de la base del muro
- $e$  = excentricidad de la carga
- $F_1$  = presión de tierra debida al empuje del relleno
- $F_2$  = presión de tierra debida a la sobrecarga
- $q$  = sobrecarga
- $R$  = fuerza resultante en la base del muro

Si se tienen cargas muertas concentradas, las fuerzas externas resultantes de esas cargas muertas se sumarán a las fuerzas de empuje de tierra.

Nota: Para elementos del paramento relativamente gruesos puede ser conveniente incluir la dimensión del paramento y peso para el cálculo de la capacidad de carga (usar "B" en lugar de "L").

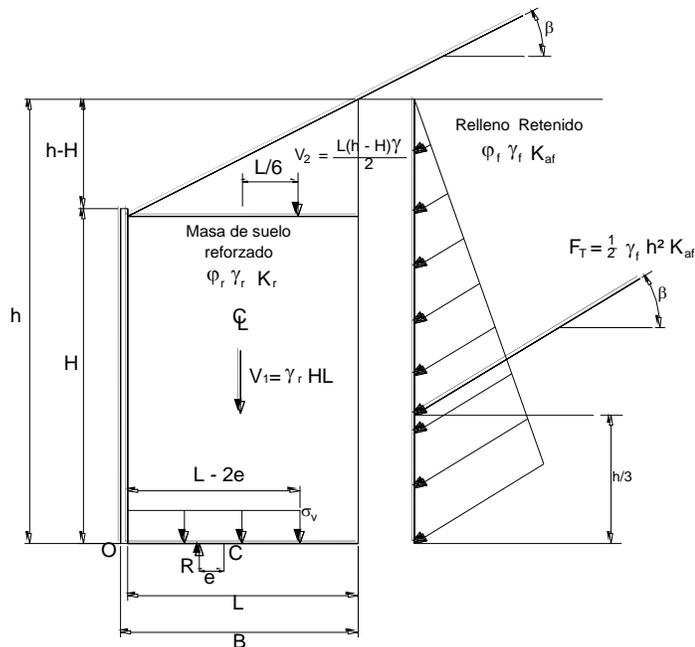


Figura 24.- Cálculo de esfuerzo vertical para capacidad de carga para condición de relleno en talud (AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 17<sup>th</sup> Edition, 2002)

SUMA DE MOMENTOS CON RESPECTO AL PUNTO C:

$$e = \frac{F_r (\cos \beta) h / 3 - F_r (\sin \beta) L / 2 - \frac{1}{2} (L / 6)}{V_1 + V_2 + F_T \sin \beta} \quad \text{Ec. 15}$$

$$s_v = \frac{V_1 + V_2 + F_T \sin \beta}{L - 2e} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

- $\gamma_r$  = peso volumétrico del relleno reforzado
- $\gamma_f$  = peso volumétrico del relleno detrás del muro
- $\theta_r$  = ángulo de fricción interna del relleno reforzado
- $\theta_f$  = ángulo de fricción interna del relleno detrás del muro
- $k_r$  = coeficiente de empuje activo horizontal del relleno reforzado
- $k_{af}$  = coeficiente de empuje activo del suelo del relleno
- $\beta$  = inclinación de la superficie del relleno detrás del muro
- $V_1$  = peso del suelo soportado por el muro, excluyendo el peso de la sobrecarga
- $V_2$  = peso de la sobrecarga
- $H$  = altura del muro
- $h$  = altura mecánica del muro
- $L$  = longitud de los refuerzos
- $B$  = ancho de la base del muro
- $e$  = excentricidad de la carga
- $F_r$  = fuerza resultante del empuje activo lateral del suelo
- $R$  = resultante de las fuerzas verticales

Si se tienen cargas muertas concentradas, incluir el efecto de esas sobrecargas. Si existe la condición de talud interrumpido, se debe diseñar utilizando el talud equivalente "l", como se muestra en la Figura 25. Donde "H" es la altura total del muro en el paramento.

Nota: Para elementos del paramento relativamente gruesos puede ser conveniente incluir la dimensión del paramento y peso para el cálculo de la capacidad de carga (usar "B" en lugar de "L").

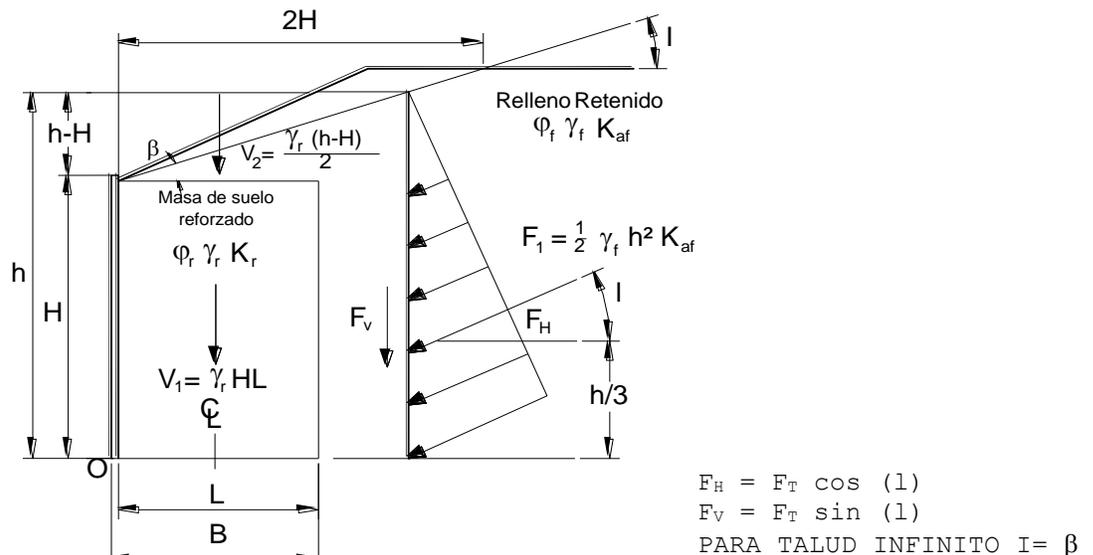


Figura 25.- Estabilidad externa para muro con talud de relleno interrumpido (AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 17<sup>th</sup> Edition, 2002)

$K_a$  Para relleno retenido usando  $\delta = \beta = 1$

$$K_a = \frac{\sin^2(\theta + \phi)}{\sin^2 \theta \cdot \sin(\theta - \delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - 1)}{\sin(\theta - \delta) \sin(\theta + 1)}} \right]^2} \quad \text{Ec. 17}$$

FACTOR DE SEGURIDAD CONTRA VOLTEO (MOMENTOS CON RESPECTO AL PUNTO O):

$$FS = \frac{\Sigma M_R}{\Sigma M_0} = \frac{V_1(L/2) + V_2(2L/3) + F_v(L)}{F_H(h/3)} \geq 2.0 \quad \text{Ec. 18}$$

FACTOR DE SEGURIDAD CONTRA DESLIZAMIENTO:

$$FS = \frac{\Sigma F_R}{\Sigma F_a} = \frac{(V_1 + V_2 + F_v)(\tan \rho \text{ ó } \tan \phi)}{F_H} \geq 1.5 \quad \text{Ec. 19}$$

$\phi$  = ángulo de fricción interno del relleno ó del suelo de desplante, el que sea menor.

$\tan \rho$  = para esfuerzos de suelos continuos (mallas y geotextiles)

Para esfuerzos de suelo discontinuos (tiras) usar  $\tan \rho$ ,  $\rho$  es el ángulo de fricción de la interfase suelo/refuerzo, usar el valor mínimo de  $\tan \phi$  en la base del muro ó  $\tan \rho$  en la capa inferior del refuerzo para refuerzos continuos.

Nota: Para elementos del paramento relativamente gruesos puede ser conveniente incluir la dimensión del paramento y peso para el cálculo de la capacidad de carga (usar "B" en lugar de "L").

### 3.6.1. Combinación de cargas

Los muros de sostenimiento se diseñarán para las siguientes cargas:

- Los empujes laterales del suelo y las presiones hidrostáticas, incluyendo cualquier sobrecarga de suelo;
- El peso propio del muro de sostenimiento;
- Las cargas aplicadas por la superestructura del puente;
- Los efectos térmicos y la deformación por contracción; y
- Las cargas sísmicas.

El diseño se realizará considerando cualquier combinación de esfuerzos que pudiera producir la condición de carga más desfavorable.

Cargas a considerar:

- **Carga muerta**  
Peso del material de relleno compactado:  $\gamma_1$   
Considerar ambos valores:  $\gamma_1$  min y  $\gamma_1$  máx.
- **Empuje del relleno detrás del muro.**  
Considerar la presión más desfavorable  $K_2$   $\gamma_2$  máx.
- **Carga viva**  
La carga actuando sobre el cuerpo del muro ( $q_1$ ) y detrás del macizo ( $q_2$ ), generalmente  $q_1$  y  $q_2$  tienen el mismo valor.  
En condiciones de servicio se considera ya sea  $q_1$  y  $q_2$  o únicamente  $q_2$  (para casos de carga más realistas).
- **Empuje de suelo debido a carga viva**

Considerar la condición más desfavorable como  $K_2 q_{2max}$ .

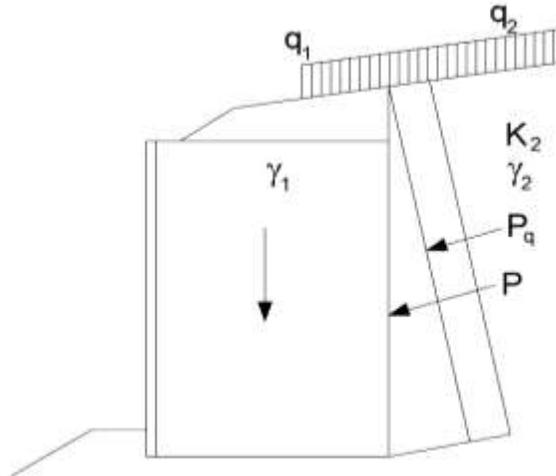


Figura 26.- Ejemplo de un muro de retención con relleno no cohesivo

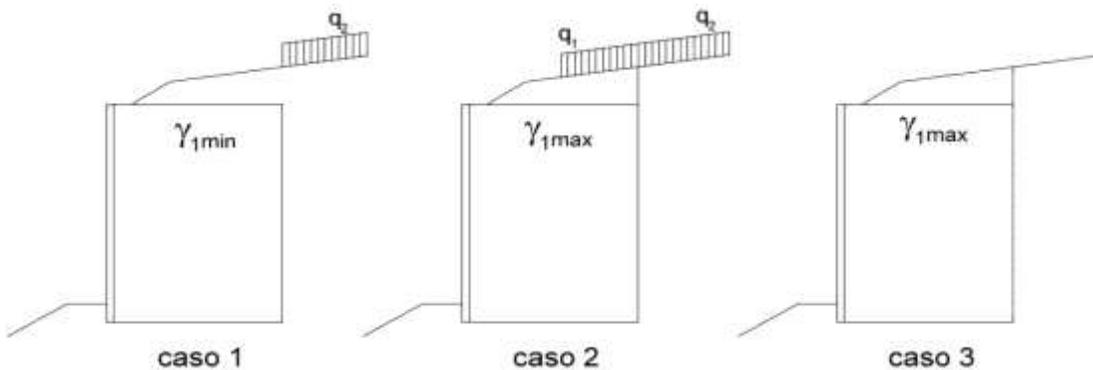


Figura 27.- Casos a considerar para las combinaciones de carga de un M.M.E.

**TABLA 10.- Criterios para cada caso de carga**

Caso	1	2	3
<b>Estabilidad externa</b>			
Deslizamiento	Posible		
Volteo	Posible		
Capacidad de carga	Desfavorable (1)	Posible	
Asentamiento			Posible
<b>Estabilidad interna</b>			
Tensión refuerzo	Desfavorable (1)	Posible	
Adherencia	Posible	Desfavorable	

### 3.6.1.1. Cargas

Las cargas que se deben considerar para el diseño de M.M.E. se dividen en:

- Transitorias: estas cargas consideran acciones como por ejemplo: Fuerzas de frenado de vehículos, sismos, cargas variables por el paso de vehículos y otras sobrecargas variables como ser las cargas de impacto en vallas de protección laterales.

- **Permanentes:** Para este tipo de cargas se pueden tomar en cuenta, las presiones de tierras, sobrecargas con carácter permanente como el pavimento y las presiones verticales inducidas por rellenos construidos sobre la superficie del muro.

**TABLA 11.- Cargas consideradas para el diseño de M.M.E.  
(Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método de diseño por factores de carga y resistencia LRFD, 2004, Sección 3.3.2.)**

Permanentes	Transitorias
DC = Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales	LS = sobrecarga vida
DW = Peso propio de las superficies de rodamiento	
EH = empuje horizontal del suelo	WA = carga hidráulica y presión del flujo del agua
ES = sobrecarga del suelo	
EV = empuje vertical debido al peso propio del material	

Estas mismas acciones se afectaran por factores preestablecidos que ayudaran a garantizar la estabilidad del muro.

**3.6.1.1.1. Factores de carga**

Los factores de carga producen las solicitaciones extremas mayoradas para evaluar la estabilidad los M.M.E.

Las Tablas 12 y 13, contienen los valores de los factores de carga, y su aplicación depende de la influencia que tengan las cargas para el tipo de análisis que se trate, es decir se tomara el valor máximo o mínimo procurando que generen las condiciones más desfavorables para el diseño del MME.

**TABLA 12.- Factores de carga (Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método de diseño por factores de carga y resistencia LRFD, 2004, Sección 3.4.1)**

Tipo de Carga	Factor de carga	
	Máximo	Mínimo
DC	1.25	0.90
DW	1.50	0.65
EH activo	1.50	0.90
EH reposo	1.35	0.90
ES	1.50	0.75
EV estabilidad global	1.00	n/a
EV muros de contención y estribos	1.35	0.90

Las combinaciones de carga que deberán considerarse, dependerán de las acciones a las que pueda llegar a estar sometido el MME, las cuales se describen en la sección 3.4.1 de las especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD.

**TABLA 13.- Combinaciones de cargas (Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método de diseño por factores de carga y resistencia LRFD, 2004, Sección 3.4.1)**

Estado Límite	Combinaciones de cargas												
	DC	LL								Usar sólo uno por vez			
	DD DW EH EV ES EL	IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU CR SH	TG	SE	EQ	IC	CT	CV
RESISTENCIA I (a menos que se especifique lo contrario)	$\gamma_P$	1.75	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	-	-	-	-
RESISTENCIA II	$\gamma_P$	1.35	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	-	-	-	-
RESISTENCIA III	$\gamma_P$	-	1.00	1.40	-	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	-	-	-	-
RESISTENCIA IV - Sólo EH, EV, ES, DW, DC	$\gamma_P$ 1.5	-	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-
RESISTENCIA V	$\gamma_P$	1.35	1.00	0.40	1.00	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	-	-	-	-
EVENTO EXTREMO I	$\gamma_P$	$\gamma_{EQ}$	1.00	-	-	1.00	-	-	-	1.00	-	-	-
EVENTO EXTREMO II	$\gamma_P$	0.50	1.00	-	-	1.00	-	-	-	-	1.00	1.00	1.00
SERVICIO I	1.00	1.00	1.00	0.30	1.00	1.00	1.00/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	-	-	-	-
SERVICIO II	1.00	1.30	1.00	-	-	1.00	1.00/1.20	-	-	-	-	-	-
SERVICIO III	1.00	0.80	1.00	-	-	1.00	1.00/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	-	-	-	-
SERVICIO IV	1.00	-	1.00	0.70	-	1.00	1.00/1.20	-	1.0	-	-	-	-
FATIGA - Sólo LL, IM y CE	-	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**3.6.1.2. Condiciones estáticas**

Las cargas que deben ser consideradas para las condiciones estáticas son:

- Carga muerta: Es el peso propio de la estructura de M.M.E. que va de acuerdo al porcentaje de compactación y normas, el peso del relleno compactado,  $\gamma$ , puede considerar dos extremos de valores:  $\gamma_{\text{mínimo}}$  y  $\gamma_{\text{máximo}}$ .
- Presión de relleno: Es la generada por el peso del material detrás del M.M.E., debe considerar la presión más desfavorable P.

$$P = k \gamma_{\text{max}} \quad \text{Ec. 20}$$

**3.6.1.3. Condiciones dinámicas**

Durante un sismo, el relleno retenido ejerce un empuje horizontal dinámico, PAE, sobre el muro mecánicamente estabilizado, adicional al empuje estático de la estructura. Por otra parte, la masa de suelo reforzado está sujeta a una fuerza de inercia horizontal:

$$P_{IR} = M \cdot A_M \quad \text{Ec. 21}$$

Dónde:

M = es la masa de la zona activa de la sección reforzada del muro suponiendo en la base un ancho de 0,5 H.  
 $A_M$  = aceleración horizontal máxima en el suelo reforzado del muro.

El empuje horizontal dinámico puede ser evaluado por un análisis pseudoestático de Mononobe-Okabe, por lo que este empuje se añade a las fuerzas estáticas actuantes sobre el muro (peso, sobrecarga, empuje estático). Por lo tanto se evalúa la estabilidad dinámica con respecto a la estabilidad externa. Los factores de seguridad dinámico mínimo admisible están dados por un 75 por ciento de los factores de seguridad en estado estático.

La ecuación anterior para  $P_{AE}$  fue desarrollada suponiendo un relleno horizontal, con un ángulo de fricción de 30° y puede ser ajustada para otros ángulos de fricción, usando el método Mononobe-Okabe, 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 realizado de la siguiente manera:

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

$$A_m = (1.45 - A)A \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

A = Coeficiente de aceleración máxima del terreno. (Dadas por la norma N-PRY-CAR-6-01-005/01).  
 $A_m$  = Coeficiente de aceleración máxima en el centroide de la masa del muro.

3. Se calcula la fuerza de inercia horizontal  $P_{IR}$ , dada con términos de las propiedades del muro tenemos que:

$$P_{IR} = 0.5A_m \gamma_r H^2 \quad \text{Para rellenos horizontales} \quad \text{Ec. 23}$$

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

$$P_{AE} = 0.375A_m \gamma_f H^2 \quad \text{Para rellenos horizontales} \quad \text{Ec. 24}$$

Se agregan las fuerzas sísmicas obtenidas en los pasos anteriores a las fuerzas actuantes en la estructura, con una relación de 50 % del empuje sísmico  $P_{AE}$  y la totalidad de la fuerza de inercia  $P_{IR}$ . La reducción de  $P_{AE}$  es implementada puesto que es poco probable que se presenten las dos fuerzas máximas, simultáneamente.

### 3.6.2. Deslizamiento

Una de las fallas principales que se pueden presentar en un muro mecánicamente estabilizado es la falla por deslizamiento, por lo tanto, de acuerdo con el dimensionamiento inicial, se puede presentar principalmente en la capa base del muro puesto que es la profundidad más crítica donde actúa el peso del relleno retenido. Por lo tanto, este factor de seguridad está dado por:

$$F.S. = \frac{\sum P_R}{\sum P_d} \geq 1.5 \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

$P_R$  = Fuerzas resistentes por unidad de longitud del muro.  
 $P_d$  = Fuerzas horizontales actuantes.

Determinar la fuerza actuante:

$$P_d = F_H = F_T \cos \beta \quad \text{Ec. 26}$$

Determinar el coeficiente de fricción más crítico en la base del muro y es elegido como el mínimo de las siguientes posibilidades:

- 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 en la interacción suelo-refuerzo " $\rho$ ", preferentemente se medirá por medio de pruebas de corte directo

Calcular la fuerza resistente por unidad de longitud del muro:

$$P_R = (V_1 + V_2 + F_T \sin \beta) \cdot \mu \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

$$\mu = \min [\tan \phi_f, \tan \phi_{fr}, \text{ o (para refuerzo continuo) } \tan \rho]$$

El efecto de las cargas externas sobre la masa de relleno reforzado, el cual incrementa la resistencia al deslizamiento, podrían ser incluidas si las cargas son permanentes. Por ejemplo, la carga viva del tráfico puede ser excluida del análisis.

El coeficiente de fricción por deslizamiento en la base de la masa de suelo reforzado se determinará utilizando el ángulo de fricción del suelo de cimentación.

Si los refuerzos del suelo son discontinuos, como por ejemplo en forma de fajas, el ángulo de fricción por deslizamiento se tomará como el menor valor entre el  $\phi_r$  del suelo reforzado y el  $\phi_f$  del suelo de cimentación. Si los refuerzos del suelo son continuos, por ejemplo en forma de mallas o láminas, el ángulo de fricción de resbalamiento se tomará como el menor valor entre  $\phi_r$ ,  $\phi_f$  y  $\rho$ , siendo  $\rho$  el ángulo de fricción en la interfase entre el suelo y los refuerzos.

En ausencia de datos específicos estará permitido utilizar un ángulo de fricción máximo,  $\phi_f$ , igual a  $30^\circ$  y un ángulo de fricción máximo en la interfase suelo refuerzos,  $\rho$  igual a  $2/3 \phi_f$ .

### **3.6.3. Esfuerzos al suelo**

Para calcular la capacidad de carga se considerará una zapata equivalente cuya longitud es igual a la longitud del muro y cuyo ancho es igual a la longitud del refuerzo a nivel de la cimentación. Las presiones de contacto se calcularán utilizando una distribución uniforme de las presiones en un ancho de zapata.

La falla por capacidad de carga se presenta en dos modos probables: falla por corte general y falla por corte local, esta última caracterizada por un acomodamiento de los suelos de desplante cuando suelos sueltos o blandos existen debajo del muro.

**3.6.3.1. Falla por corte general.**

Para prevenir la falla por cortante general, requerimos que el esfuerzo vertical en la base calculado con el tipo de distribución de Meyerhof no exceda la capacidad de carga admisible determinada para el suelo de desplante, consideramos un factor de seguridad de 2,5, por lo que:

$$\sigma_v \leq q_a = \frac{q_{ult}}{F.S.} \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

$q_a$  = capacidad de carga admisible  
 $q_{ult}$  = capacidad de carga última

Un factor de seguridad de 2,0 puede ser usado si se justifica con análisis geotécnicos, la determinación de asentamientos aceptables.

Por lo tanto, para determinar la capacidad de carga última " $q_{ult}$ " usando métodos de mecánica de suelos, por ejemplo para un nivel de grado en frente del muro y sin la influencia de aguas subterráneas tenemos que:

$$q_{ult} = c_f N_c + 0.5(L - 2e)\gamma_f N_\gamma \quad \text{Ec. 29}$$

Donde:

$c_f$  = cohesión del suelo  
 $\gamma_f$  = peso volumétrico del suelo de desplante  
 $N_c$  y  $N_\gamma$  = coeficientes de capacidad de carga adimensionales

**3.6.3.2. Falla por corte local**

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

$$\gamma H \leq 3c \quad \text{Ec. 30}$$

Si las condiciones de carga no son las adecuadas, es necesario realizar un mejoramiento del suelo de desplante.

**3.6.4. Volteo**

En las cimentaciones en suelo la ubicación de la resultante de las fuerzas de reacción estará dentro del medio central del ancho de la base. En las cimentaciones en roca la ubicación de la resultante de las fuerzas de reacción estará dentro de los tres cuartos centrales del ancho de la base.

Los criterios especificados para la ubicación de la resultante, junto con la investigación de la presión de contacto, reemplaza la investigación de la relación entre el momento estabilizador y el momento de vuelco. Ubicar la resultante dentro del medio central del ancho de la base en el caso de las fundaciones en suelo se basa en el uso de la distribución plástica de la presión de contacto para el estado límite.

**3.6.4.1. Análisis por excentricidad**

La excentricidad del muro se calculará con la siguiente expresión:

$$e = \frac{\sum M_P - \sum M_R}{\sum V} \quad \text{Ec. 31}$$

Donde:

- $\sum M_p =$  sumatoria de momentos desestabilizadores en el centro del muro (0.5 L)
- $\sum M_r =$  sumatoria de los momentos resistentes en el centro de la base del muro (0.5 L)
- $\sum V =$  sumatoria de las fuerzas verticales

La revisión por excentricidad de un M.M.E. será consideraba como admisible si el valor obtenido no excede los siguientes valores dependiendo del tipo de suelo de cimentación:

Cimentaciones en suelos

$$e_{max} = \frac{L}{4} \quad \text{Ec. 32}$$

Cimentaciones en roca

$$e_{max} = \frac{3}{8}L \quad \text{Ec. 33}$$

En caso de no cumplir la revisión por excentricidad se deberá aumentar la longitud de refuerzo (L). La excentricidad se considera aceptable si la localización de la fuerza resultante en la base está dentro del medio de la mitad de la longitud del refuerzo (L/4) para cimentaciones en suelos y dentro del medio de tres cuartos de la longitud del refuerzo (3/8 L) cimentaciones en roca.

Una vez realizada el análisis por excentricidad, se podrá ahora analizar el M.M.E. por volteo.

**3.6.4.2. Volteo**

Cuando la cimentación se trate de un suelo, la ubicación de la resultante de las fuerzas que generen momentos deberán localizarse a la mitad de ancho de la base, en cambio si se tratara de roca, la ubicación de esta fuerzas deberán ubicarse a tres cuartas partes del ancho de base, a partir del punto de análisis.

Para garantizar la estabilidad en cuanto a fallas por volteo, se debe cumplir la siguiente expresión:

$$\frac{\sum \text{Momentos resistentes}}{\sum \text{Momentos de volteo}} \geq 2 \quad \text{Ec. 34}$$

De esta manera para:

Muros con relleno horizontal (véase Figura 23.)

$$\frac{(V_1)\left(\frac{L}{2}\right)}{F_1\left(\frac{H}{3}\right) + F_2\left(\frac{H}{2}\right)} \geq 2 \quad \text{Ec. 35}$$

Muros de relleno con talud y talud interrumpido (véase Figuras 24. y 25.)

$$\frac{(V_1)\left(\frac{L}{2}\right) + (V_2)\left(\frac{2L}{3}\right) + (F_v)(L)}{F_H\left(\frac{h}{3}\right)} \geq 2 \quad \text{Ec. 36}$$

### **3.7. Estabilidad interna**

Como se ha mencionado anteriormente, el mecanismo de funcionamiento de un M.M.E. consiste en el rozamiento entre el relleno y las armaduras. Para el análisis de estabilidad interna se supone que el comportamiento del material de relleno corresponde al de un suelo que posee una cohesión anisotrópica proporcional a la resistencia a la tensión de las armaduras.

El M.M.E. puede también sufrir problemas debido a la estabilidad interna en dos formas distintas:

- Ruptura de los refuerzos
- Falta de adherencia entre el refuerzo y el material de relleno

La estabilidad interna se determina igualando la carga de tensión mayorada de los refuerzos, siendo la resistencia a la tensión determinada por la ruptura y la extracción de los refuerzos.

#### **3.7.1. Tipos de refuerzos**

La colocación de refuerzos dentro de los M.M.E. ayuda a que las propiedades mecánicas de este macizo sean mejoradas, su colocación es paralela a la dirección de la deformación principal, compensando la falta de resistencia a la tensión del suelo.

La principal función de los refuerzos es retener la deformación de los suelos; al hacerlo, los esfuerzos se transfieren hacia el suelo que ha sido reforzado. Estos esfuerzos están conducidos por los refuerzos en dos direcciones: en tensión o en cortante y flexión. Las cargas que soportan los refuerzos en los M.M.E. son el resultado de los empujes verticales y horizontales que existen dentro de la masa de suelo reforzado.

Los modos de falla por estabilidad interna incluyen la ruptura de los refuerzos del suelo (estado límite de resistencia) y el alargamiento excesivo de los refuerzos bajo la carga de diseño (estado límite de servicio). Actualmente para el diseño de la estabilidad interna no se evalúa el estado límite de servicio.

La inestabilidad de un M.M.E. por ruptura de los refuerzos se puede deber a su infradimensionamiento, a un nivel de sollicitación mayor para el que se diseñó ó un debilitamiento de la sección resistente debido a la corrosión de los materiales de los refuerzos.

##### **3.7.1.1. Refuerzos inextensibles**

Los refuerzos inextensibles consisten típicamente de acero, el cual es usualmente galvanizado o cubierto con epóxicos:

- Tiras metálicas,
- Mallas de barras ó
- Mallas de alambres soldados;

Citaremos de ahora en adelante a este tipo de refuerzos como refuerzos metálicos. Este tipo de refuerzos logran su resistencia pico bajo

deformaciones específicas menores que las necesarias para que el suelo alcance su resistencia pico.

Dentro de este apartado se pueden incluir los refuerzos con cubiertas de polietileno, haciéndose los estudios de laboratorio pertinentes con los que se demuestre que en ningún caso se lleva a su estado límite de servicio y que no se produce ninguna deformación sobre la cubierta o el centro del mismo.

#### **3.7.1.2. Refuerzos extensibles**

Este tipo de refuerzos consisten en geotextiles o geomallas:

- Geomallas de polietileno de alta densidad (HDPE).
- Geomallas de poliéster cubierto con PVC
- Geotextiles de polipropileno o de poliéster.

De éste punto en adelante se mencionara a este tipo de refuerzos como geosintéticos. Logran su resistencia pico bajo deformaciones específicas mayores que las necesarias para que el suelo alcance su resistencia pico.

Cabe recalcar que los refuerzos inextensibles no se combinan con refuerzos extensibles en un mismo muro.

#### **3.7.2. Adherencia de los refuerzos del suelo**

La resistencia a la extracción del refuerzo es la capacidad del refuerzo de no ser extraído hacia el exterior. Su valor determina la longitud máxima de refuerzo en el relleno.

El análisis de adherencia o extracción consiste en comprobar que el esfuerzo máximo de tensión de las armaduras es inferior a la resistencia disponible que se evalúa a partir del valor del coeficiente aparente de fricción.

La estabilidad de un muro por falta de adherencia ocurre cuando el coeficiente de rozamiento entre el suelo y el refuerzo no es suficiente para equilibrar el esfuerzo a la tensión al que se llega a someter. La variación de los esfuerzos de rozamiento a lo largo de los refuerzos depende primordialmente del desplazamiento relativo de los refuerzos en relación con el suelo en cada punto del refuerzo.

Para simplificar el análisis puede suponerse un valor constante de dicho coeficiente de fricción a lo largo de los refuerzos. En el caso de armaduras lisas no se considera el peso del material de relleno, de manera que el coeficiente tiene el mismo valor a lo largo de todo el macizo de tierra, pero si se tratara de armaduras con rugosidades se debe tomar en cuenta los efectos del peso de las tierras según la ley de variación de  $f^*$  en función de la tensión vertical a la que estará sometida la armadura.

##### **3.7.2.1. Límite entre la zona activa y la zona resistente**

La carga de refuerzo se determina en dos puntos críticos, en la zona de máximo esfuerzo y en la unión con el paramento, para asegurar la estabilidad del sistema. La ruptura potencial y la adherencia se evalúan en la zona de máximo esfuerzo. Se considera que la zona de máximo esfuerzo se localiza en la frontera de la zona activa y la zona resistente. El potencial de ruptura del refuerzo y adherencia también se evalúan en la unión del refuerzo al paramento.

La zona de máximo esfuerzo para sistemas de muros inextensibles y extensibles siendo la frontera entre las zonas activa y resistente, se determina como en las Figuras 28. y 29.

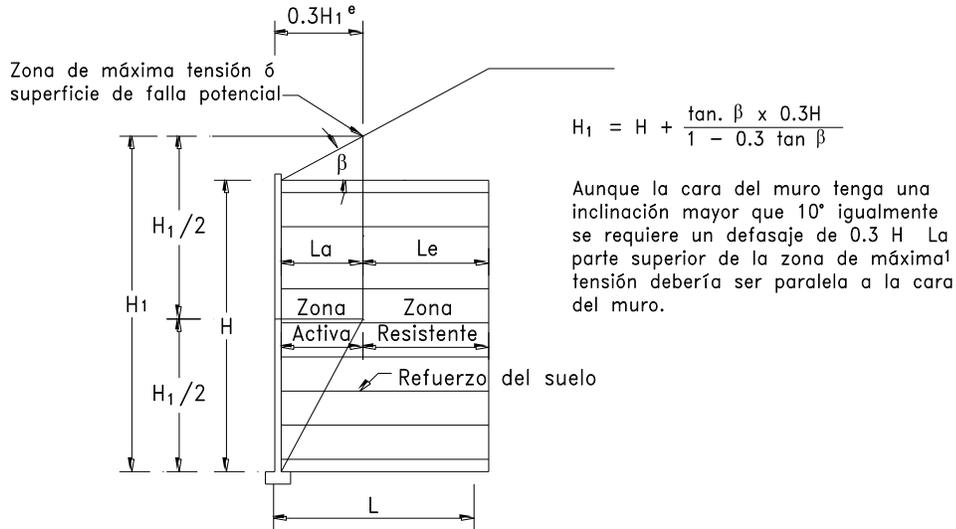


Figura 28.- Refuerzos inextensibles (AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 17<sup>th</sup> Edition, 2002)

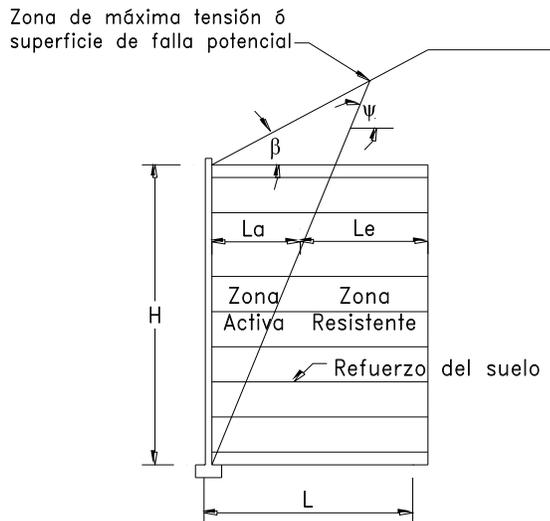


Figura 29.- Refuerzos extensibles (AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 17<sup>th</sup> Edition, 2002)

Para muros verticales:

$$\psi = 45 + \frac{\phi_r}{2} \quad \text{Ec. 37}$$

Para muros con su cara inclinada mas de  $10^\circ$  con respecto a la vertical:

$$\tan(\psi - \phi_r) = \frac{-\tan(\phi_r - \beta) + \sqrt{\tan(\phi_r - \beta)[\tan(\phi_r - \beta) + \cot(\phi_r + \theta - 90)][1 + \tan(\delta + 90 - \theta)\cot(\phi_r + \theta - 90)]}}{1 + \tan(\delta + 90 - \theta)[\tan(\phi_r - \beta) + \cot(\phi_r + \theta - 90)]}$$

Ec. 38

Para los M.M.E. con refuerzo extensible y desplomes menores a  $10^\circ$  con la vertical, la zona de máximo esfuerzo se calculara utilizando el método de Rankine, debido a que este método no toma en cuenta los desplomes del paramento o el efecto de las sobrecargas concentradas sobre la zona del relleno reforzado.

En el caso de muros con refuerzos extensibles y desplomes mayores o iguales a los 10° se debe utilizar el método de Coulomb.

**3.7.2.2. Diseño contra la extracción de los refuerzos (adherencia)**

Para evitar una falla por estabilidad interna por deslizamiento del refuerzo, la revisión se realizará en cada nivel de refuerzo, de este modo la tensión mayorada  $\sigma_H$  en cada nivel se deberá determinar de la siguiente manera:

$$\sigma_H = \gamma_p (\sigma_v k_r + \Delta\sigma_H) \quad \text{Ec. 39}$$

Donde:

- $\gamma_p$ = Factor de carga EV correspondiente al empuje vertical del suelo. (Véase Tabla 12.)
- $\sigma_v$ = Presión vertical resultante debido al peso propio del suelo dentro, sobre o detrás del M.M.E. y cualquier sobrecarga presente.
- $k_r$ = Coeficiente de empuje horizontal
- $\Delta\sigma_H$ = Tensión horizontal en cada nivel de refuerzos

El ángulo máximo de fricción usado para determinar la fuerza horizontal dentro del refuerzo del macizo de tierras será de 34°.

La tensión vertical se determinará como muestran las Figuras 31. y 32.

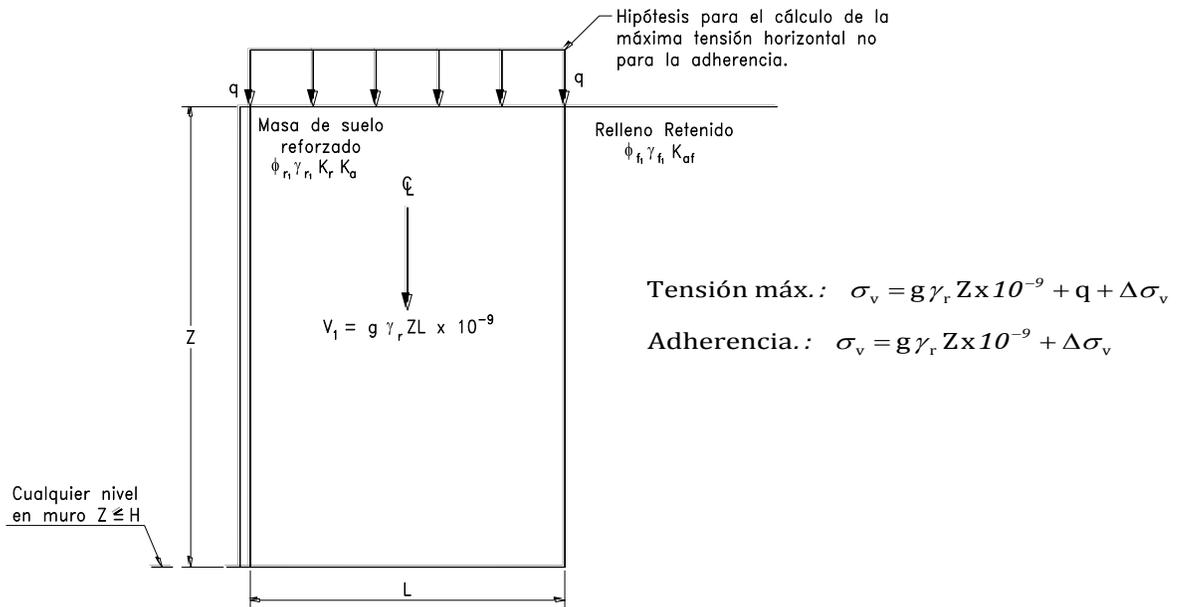


Figura 30.- M.M.E. con relleno de superficie horizontal (Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD, 2004, Sección 11.10.6.2.1)



Donde:

$\sigma_H$  = tensión horizontal mayorada del suelo en los refuerzos  
 $S_v$  = separación vertical de los refuerzos.

La tensión mayorada aplicada a la conexión de los refuerzos con el paramento  $T_o$  deberá ser igual a la tensión máxima mayorada en los refuerzos  $T_{max}$ , independientemente del tipo de paramento y de refuerzos.

Para garantizar la estabilidad de los M.M.E., contra posibles fallas debidas a la extracción de los refuerzos, se deberá considerar una longitud de refuerzo que cubra la longitud  $L = L_a + L_e$ , como se observa en la Figura 32.

Para este cálculo de resistencia a la extracción de refuerzos no se tomará en cuenta las sobrecargas sobre el macizo como lo especifica la Figura 28. de manera que se pueda considerar la condición más desfavorable para la adherencia.

La longitud  $L_e$  es la longitud requerida para evitar que el refuerzo sea extraído del M.M.E. su valor mínimo será 2,50 m. Y su valor efectivo se deberá determinar de la siguiente manera:

$$L_e \geq \frac{T_{max}}{\phi F^* \alpha \sigma_v C R_c} \quad \text{Ec. 41}$$

Donde:

- $L_e$  = Longitud del refuerzo en la zona resistente.
- $\phi$  = Factor de seguridad contra el deslizamiento
- $F^*$  = Factor de fricción para la extracción de los refuerzos
- $\alpha$  = Factor de corrección de escala
- $\sigma_v$  = Esfuerzo vertical en el refuerzo en la zona resistente.
- $C$  = Factor geométrico de la superficie del área del refuerzo basado en el perímetro del refuerzo (para soleras, malla y refuerzos tipo lamina que cuentan con dos lados Su valor es 2)
- $R_c$  = Relación de cobertura del refuerzo

$F^*$  y  $\alpha$  se determinan por medio de pruebas de resistencia al deslizamiento con el material de relleno de proyecto, en caso de no contar con el valor de se podrán utilizar los valores de la Figura 33, para el caso de a, se usara la Tabla 15.

**TABLA 14.- Factores de resistencia**

Condición del M.M.E.		Factor de Resistencia
Resistencia a la tensión de los refuerzos metálicos y sus conectores	Refuerzos en forma de tira:	
	- Carga estática	0,75
	- Carga combinada: estática/ sísmica	1,00
	Refuerzos en forma de malla:	
- Carga estática	0,65	
- Carga combinada: estática/ sísmica	0,85	
Resistencia a la tensión de los refuerzos geosintéticos y sus conectores	- Carga estática	0,90
	- Carga combinada: estática/ sísmica	1,20
Resistencia a la extracción de los	- Carga estática	0,90
		1,20

refuerzos por tensión	- Carga combinada: estática/ sísmica	
-----------------------	---	--

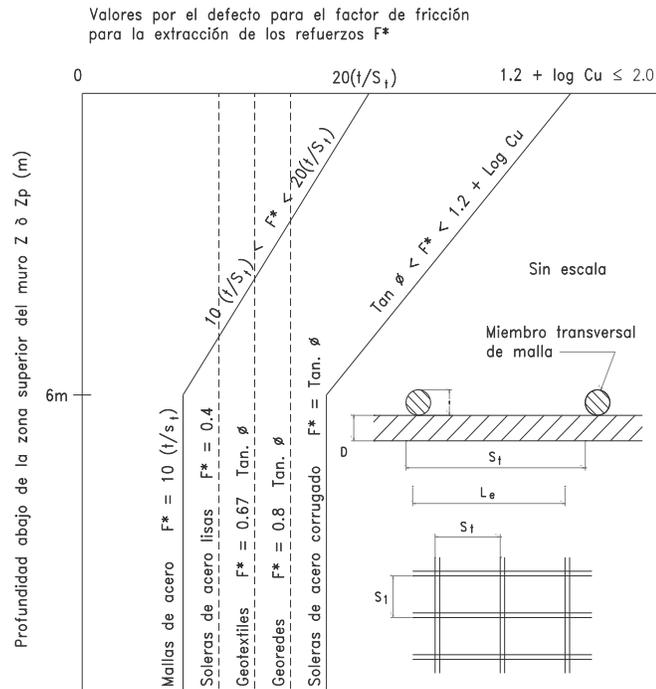


Figura 33.- Valores del factor de fricción para la adherencia (Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD, 2004, Sección 11.10.6.3.2)

**TABLA 15.- Valor del factor de corrección de escala (a)**  
(Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD, 2004, Sección 11.10.6.3.2)

Tipo de Refuerzo	Valor de por defecto
Refuerzos de acero	1,0
Geomallas	0,8
Geotextiles	0,6

### 3.7.3. Resistencia de los refuerzos

#### 3.7.3.1. Requisitos generales

La resistencia del refuerzo necesaria para la estabilidad interna, para resistir las cargas aplicadas a lo largo de la vida de diseño del muro debe ser determinada donde la carga sobre el refuerzo es máximo (en el contacto entre las zonas activa y pasiva) y en la conexión del refuerzo con el paramento.

#### 3.7.3.2. Consideraciones relacionadas con la vida útil de diseño

Se consideran dos tipos de estructuras dentro de los Muros Mecánicamente Estabilizados: las estructuras provisionales, con un periodo de servicio inferior a los 5 años; y las estructuras definitivas, en las cuales se considera un tiempo de vida útil de 75 años.

Para aplicaciones y estructuras de contención que tengan consecuencias severas en el caso de que tengan un comportamiento pobre ocurra una falla, debe considerarse una vida de servicio de 100 años.

En todos los casos se garantizara que la resistencia y funcionalidad de los elementos que conforman al muro sea por el tiempo de vida útil para el que se diseño.

Para garantizar la funcionalidad es necesario prestar especial atención a la corrosión de los refuerzos metálicos, la alteración físico química de los materiales sintéticos, la presencia de aguas freáticas o la infiltración al macizo, factores atmosféricos y medio ambientales.

Cuando se trate de productos nuevos será necesario realizarse pruebas de laboratorio para determinar con seguridad su comportamiento a mediano y a largo plazo. Recomendándose también la realización de análisis comparativos con otros materiales.

### 3.7.3.2.1. Refuerzos de acero

El diseño estructural de los refuerzos de acero galvanizado utilizados en el suelo y sus conexiones se deberá realizar en base a  $F_y$ , la resistencia al flujo del acero, y el área de la sección transversal del acero se determina usando el espesor del acero después de la pérdida por corrosión,  $E_c$ , determinado de la siguiente manera:

$$E_c = E_n - E_s \quad \text{Ec. 42}$$

Donde:

- $E_c$  = espesor del refuerzo metálico al final de su vida de servicio (mm)
- $E_n$  = espesor nominal del refuerzo de acero en el momento de la construcción (mm)
- $E_s$  = espesor de metal sacrificable que se anticipa se perderá por corrosión uniforme durante la vida de servicio de la estructura (mm)

Se considerara un espesor de sacrificio por cada superficie expuesta, bajo la suposición de que no se tiene un material de relleno agresivo.

El espesor de sacrificio se calcula de la siguiente manera:

- Perdida de galvanizado = 15 micras por año durante los 2 primeros años
- = 4 micras por año durante los años siguientes
- Perdida de acero al carbono = 12 micras por año una vez agotado el zinc

La capa de galvanizado tendrá como mínimo un espesor de 0,086 mm.

Los suelos se consideran no agresivos si cumplen con los siguientes criterios:

- pH entre 5 y 10
- Resistividad no menor de 3000 ohm-cm
- Cloruros no mayores a 100 ppm
- Sulfatos no mayores a 200 ppm
- Contenido orgánico no mayor a 1 %

Los requerimientos de espesor de sacrificio no son aplicables para suelos que no cumplan uno o más de los criterios de suelos no agresivos. Adicionalmente, estos requerimientos de espesor de sacrificio no son aplicables donde:

- El material de relleno sea agresivo;
- El M.M.E. esté expuesto a un ambiente marino o rico en cloruros;
- El espesor del galvanizado sea menor a lo especificado; ó

- El M.M.E. esté expuesto a corrientes vagabundas provenientes de alguna fuente de poder cercana y bajo tierra ó de vías eléctricas adyacentes.

La sustitución con elementos reforzados no susceptibles a la corrosión pueden ser considerados como una alternativa.

### 3.7.3.2.2. Refuerzos geosintéticos

La durabilidad de refuerzos geosintéticos está influenciada por factores ambientales como lo son: la temperatura, el tiempo, los daños mecánicos, los niveles de esfuerzos, la exposición química tales como oxígeno, agua y pH, por mencionar los factores químicos más habituales.

De igual manera el ataque microbiológico puede afectar a ciertos polímeros, aunque en general la mayoría de los polímeros utilizados para soportar carga en las aplicaciones de refuerzos de la tierra no son afectados por esto. Los efectos de estos factores en la durabilidad del producto depende del tipo de polímero usado (tipo de resina, grado, aditivos y proceso de fabricación) y de la marco estructura del refuerzo.

Esto permite aplicar a la resistencia última a la tensión un único factor de reducción (RF), como se muestra en la Tabla 14 que considera las pérdidas de resistencia a largo plazo.

Si el uso del muro, la agresividad del suelo y las características de los polímeros son consistentes con las condiciones listadas a continuación estará permitido utilizar un único factor de reducción por defecto tal como se especifica:

#### 1. Aplicación del M.M.E.:

Se tendrá que identificar los usos de las estructuras en las cuales las consecuencias de un comportamiento pobre o la falla del muro sean severa. En estas aplicaciones no se podrá utilizar un único factor de reducción por defecto para el diseño final.

#### 2. Determinación de la agresividad de la Tierra:

En base al pH de la tierra, granulometría, plasticidad, contenido orgánico y temperatura dentro del relleno es posible determinar la agresividad de la tierra para geosintéticos. El suelo se definirá como no agresivo si se cumple con el siguiente criterio:

- El pH va de 4.5 y 9 para aplicaciones permanentes y entre 3 y 10 para aplicaciones temporales.
- El tamaño máximo de las partículas del suelo es menor a 20 mm (0.75 pulgadas).
- El contenido de suelo orgánico para material más fino de 2 mm (malla No. 10), es menor o igual a 1%, y
- La temperatura de diseño en el lugar donde está construido el M.M.E., es menor a 30°C para aplicaciones permanentes y 35°C para aplicaciones temporales.

El material de relleno que no cumpla con los requerimientos anteriores (tamaño de partícula y temperatura dentro del relleno) se considerara como agresivo, y en este caso no se podrá utilizar un solo factor de reducción.

Las propiedades químicas del terreno natural alrededor del relleno mecánicamente estabilizado también se consideran si existe un potencial de infiltración de agua del terreno alrededor hacia el relleno mecánicamente estabilizado. Si esto ocurre, el material de alrededor cumplirá el criterio

químico requerido para el material de relleno si el ambiente se considera no agresivo, ó se puede proveer un drenaje adecuado, a largo plazo, alrededor de la masa reforzada con geosintético para asegurar que la agresividad química del líquido no penetre dentro del relleno reforzado.

3. Requerimientos del polímero:

Los polímeros que presentan buena resistencia a la degradación química a largo plazo se usaran si se usa un factor de reducción recomendado, esto con el fin de disminuir el riesgo de degradación significativa a largo plazo.

Para que esto se cumpla se tienen que satisfacer los requerimientos referentes a los materiales poliméricos que se muestran en la Tabla 16. si no se cuentan con datos específicos del material en particular a utilizar. Sólo se podrán usar materiales poliméricos que no satisfagan los requisitos de la Tabla 16. si se obtienen datos específicos sobre el producto particular a utilizar.

**TABLA 16.- Requisitos mínimos que satisficieran los productos geosintéticos para poder utilizar el factor de reducción por defecto para la degradación a largo plazo (Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD, 2004, Sección 11.10.6.4.2b)**

<b>Tipo de polímero</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Método de ensayo</b>	<b>Criterio para permitir el uso de RF por defecto</b>
Polipropileno	Resistencia a la oxidación por rayos UV	ASTM D4355	Mantiene como mínimo el 70% de la resistencia luego de 500 hr en aparato de meteorización
Poliétileno	Resistencia a la oxidación por rayos UV	ASTM D4355	Mantiene como mínimo el 70% de la resistencia luego de 500 hr en aparato de meteorización
Poliéster	Resistencia a la hidrólisis	Método de viscosidad inherente (ASTM D 4603) y método de ensayo GRI GG8 o determinar directamente usando cromatografía por permeabilidad en gel	Peso mínimo molecular promedio de 25000
Poliéster	Resistencia a la hidrólisis	Método de ensayo GRI GG/	Contenido máximo de grupo carboxilo terminales: 30
Todos los polímeros	Capacidad de conservación	Peso por área unitaria (ASTM D5261)	Mínimo de 270 g/m <sup>2</sup>
Todos los polímeros	Porcentaje en peso de material reciclado (después de consumido)		

**TABLA 17.- Requisitos mínimos que satisficieran los productos geosintéticos para poder utilizar el factor de reducción por defecto para la degradación a largo plazo (Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD, 2004, Sección 11.10.6.4.2b)**

Aplicación	Factor de reducción total RF
Todas las aplicaciones pero con datos específicos de los productos obtenidos y analizados de acuerdo con la publicación FHWA SA-96-071 apéndice B y FHWA SA-96-072	Basado en los ensayos de los productos $R_{FD}$ y $R_{FD}$ no pueden ser menores de 1.1
Aplicaciones permanentes que no tengan consecuencias severas en el caso de que ocurra comportamiento pobre o falla, en suelos no agresivos y con los polímeros cumpliendo con los requisitos de la tabla 5.8.6.1.2A, y no se provea información específica de los productos.	7.00
Aplicaciones temporales que no tengan consecuencias severas en el caso de que ocurra comportamiento pobre o falla, en suelos no agresivos y con los polímeros cumpliendo con los requisitos de la tabla 5.8.6.1.2A, y no se provea información específica de los productos.	3.5

**3.7.3.3. Resistencia a la tensión**

La resistencia del refuerzo requerida se tendrá que comprobar en todos y cada uno de los niveles dentro del M.M.E., para el estado límite último de las zonas activa y pasiva, como en la conexión de los refuerzos al paramento del muro.

La zona donde la tensión es máxima se cumplirá la siguiente expresión:

$$T_{\max} \leq \phi T_{al} R_c \quad \text{Ec. 43}$$

Donde:

- $T_{\max}$  = carga mayorada aplicada en el refuerzo
- $\phi$  = factor de resistencia para tensión de los refuerzos (adimensional), especificado en la Tabla 11.5.6-1 de la AASHTO.
- $T_{al}$  = resistencia nominal de diseño a largo plazo de los refuerzos (N/mm).
- $R_c$  = relación de cobertura de los refuerzos, adimensional

Como ya se mencionó  $T_{al}$  será determinada para una resistencia a largo plazo en base a la unidad del ancho por el radio de cobertura del refuerzo  $R_c$  para poder compararlo directamente con  $T_{\max}$  la cual se determina para la carga por unidad del ancho del muro (esto también aplica a  $T_{ac}$  y  $T_o$ ).

Para refuerzos metálicos la resistencia de los refuerzos se convierte a una resistencia por unidad de ancho del muro como se ilustra en las Figuras 34. Y 35 para las capas de refuerzos geosintéticos  $b = 1$  y  $R_c = 1$ .

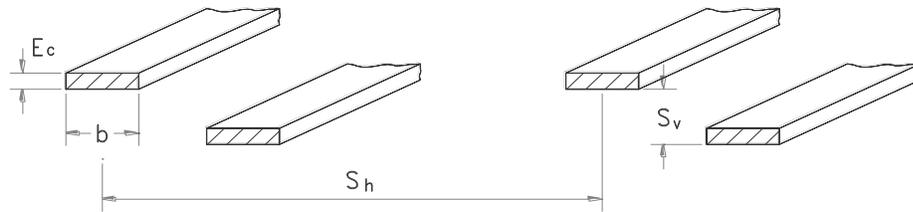


Figura 34.- Relación de cobertura de los refuerzos para el caso de refuerzos metálicos en tiras (Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD, 2004, Sección 11.10.6.4.1)

$$A_c = bE_c \quad \text{Ec. 44}$$

$E_c$  = espesor de la tira corregido para considerar las pérdidas por corrosión

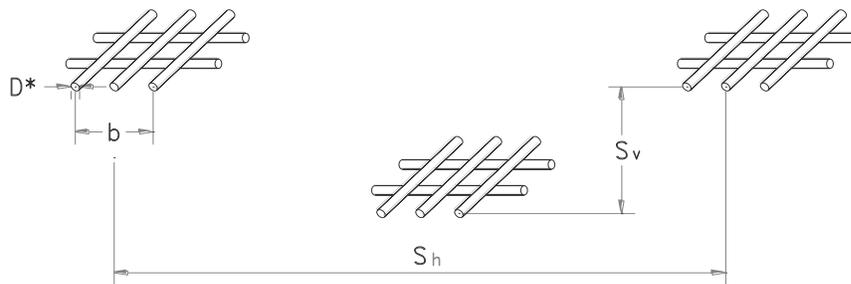


Figura 35.- Relación de cobertura de los refuerzos para el caso de refuerzos metálicos en mallas (Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD, 2004, Sección 11.10.6.4.1)

$$A_c = (\text{No. de barras longitudinales}) \left( \pi \frac{D^2}{4} \right)$$

$D^*$  = diámetro de las barras o alambres corregido para considerar las pérdidas de barras en un ancho de refuerzo igual a la unidad.

$$R_c = \text{relación de cobertura de los refuerzos} = \left( \frac{b}{S_h} \right)$$

Para los refuerzos continuos utilizar  $R_c = 1$  (es decir  $S_h = b = 1$  unidad de ancho)

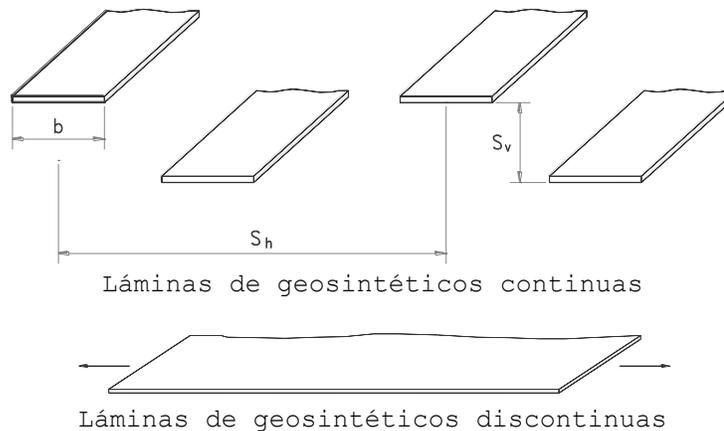


Figura 36.- Relación de cobertura de los refuerzos para el caso de refuerzos geosintéticos (Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD, 2004, Sección 11.10.6.4.1)

Para los refuerzos continuos utilizar  $R_c = 1$  (es decir  $S_h = b = 1$  unidad de ancho)

**3.7.3.3.1. Refuerzos de acero**

La resistencia del refuerzo a la tensión se calculara multiplicando la tensión de fluencia por el área de la sección transversal del refuerzo después de haber sufrido las perdidas por corrosión, de manera que la resistencia a la tensión de los refuerzos se obtendrá con la siguiente expresión:

$$T_{al} = \frac{A_c F_y}{b} \quad \text{Ec. 45}$$

Donde:

- $T_{al}$  = Resistencia nominal de diseño de los refuerzos a largo plazo (N/mm)
- $F_y$  = Resistencia a la fluencia del acero (MPa)
- $A_c$  = Área de la sección transversal de los refuerzos considerando las perdidas por corrosión. (mm<sup>2</sup>)
- $b$  = Ancho unitario de los refuerzos (Figuras 34 y 35)

**3.7.3.3.2. Refuerzos geosintéticos**

En el caso de refuerzos sintéticos, la resistencia nominal a la tensión a largo plazo se determinara con:

$$T_{al} = \frac{T_{ult}}{RF} \quad \text{Ec. 46}$$

Donde:

- $T_{al}$  = Resistencia nominal de diseño de los refuerzos a largo plazo. (N/mm)
- $T_{ult}$  = Resistencia ultima a la tensión del refuerzo, valor mínimo promedio del rollo de producto que considera la variación estadística de la resistencia del material. (N/mm)
- $RF$  = Factor de reducción de la resistencia

$$RF = RF_{ID} \times RF_{CR} \times RF_D \quad \text{Ec. 47}$$

Donde:

- $RF_{ID}$  = Factor de reducción de la resistencia que considera los daños durante la instalación.
- $RF_{CR}$  = Factor de reducción de la resistencia para contrarrestar la fluencia a largo plazo de los refuerzos.
- $RF_D$  = Factor de reducción de la resistencia para impedir la ruptura de los refuerzos debido a la degradación química y biológica.

Los valores de estos factores se calcularan a partir de ensayos específicos de cada producto, (para  $RF_{ID}$  y  $RF_D$  los valores no podrán ser menores a 1.1).

Cuando en algún caso se especifique que no existirán consecuencias severas en caso de falla, comportamiento pobre, el suelo no sea agresivo o el producto geosintéticos satisfaga los requisitos mínimos que se mencionan en la Tabla 17, se podrá usar el factor de reducción por defecto que indica la misma tabla.

**3.7.3.4. Resistencia de diseño de las conexiones**

La tensión en la conexión con la cara del muro tendrá que cumplir con:

$$T_o \leq \phi T_{ac} R_c \quad \text{Ec. 48}$$

Donde:

- $T_o$  = carga de tensión mayorada en la conexión refuerzo/revestimiento, especificada en el Artículo 11.10.6.2.2 de la ASSHTO (N/mm).
- $\phi$  = factor de resistencia para tensión de los refuerzos, especificado en la Tabla 11.5.6-1 de la ASSHTO (adimensional)
- $T_{ac}$  = resistencia nominal de diseño a largo plazo de la conexión refuerzo/revestimiento (N/mm). Se deberá determinar en la unión al paramento del muro tal como se especifica en el Artículo 11.10.6.4.4a si se trata de refuerzos de acero y como se especifica en el Artículo 11.10.6.4.4b si se trata de refuerzos geosintéticos. Además, la diferencia en el medio ambiente presente inmediatamente atrás del paramento en relación con el medio ambiente dentro del relleno reforzado y su efecto en la durabilidad a largo plazo del refuerzo/unión deberá considerarse cuando se determine  $T_{ac}$ .
- $R_c$  = relación de cobertura de los refuerzos, especificada en el Artículo 11.10.6.4.1 de la ASSHTO (adimensional).

#### **3.7.3.4.1. Refuerzos de acero**

Todas las conexiones se diseñaran para que puedan resistir los esfuerzos resultantes de las fuerzas activas ( $T_o$ ) así como también de los movimientos diferenciales entre el relleno reforzado y los elementos del paramento del M.M.E.

Los elementos de la conexión que están impregnados en los elementos del paramento se deberán diseñar con una longitud de unión (anclaje) apropiada y un área de soporte en el concreto para resistir los esfuerzos en la conexión.

Los materiales utilizados para las conexiones se diseñaran considerando las pérdidas por corrosión de acuerdo a lo mencionado anteriormente. Las diferencias potenciales entre el medio ambiente en el parámetro y el medio ambiente dentro de la masa de suelo reforzado serán consideradas cuando se valoren las pérdidas potenciales por corrosión.

#### **3.7.3.4.2. Refuerzos geosintéticos**

Para evaluar la resistencia de los geosintéticos a largo plazo en la conexión con el paramento del muro, reduzca el  $T_{ult}$  (resistencia última a tensión del reforzamiento geosintético por ancho unitario de reforzamiento en  $kN/m$ , utilizando la resistencia de la conexión determinada de acuerdo a ASTM D 4884, para conexiones estructurales (conexiones no parciales o totales a fricción).

La resistencia nominal a largo plazo de una conexión,  $T_{ac}$ , expresada como carga por unidad de ancho de los refuerzos, se determinara de la siguiente manera:

$$T_{ac} = \frac{T_{ult} \times CR_{cr}}{RF_D} \quad \text{Ec. 49}$$

Donde:

- $T_{ac}$  = resistencia nominal de diseño a largo plazo de la conexión refuerzo/revestimiento por unidad de ancho de los refuerzos para una presión de confinamiento especificada (N/mm)
- $T_{ult}$  = valor mínimo promedio del rollo de la resistencia última a la tensión de los refuerzos del suelo (N/mm)
- $CR_{cr}$  = factor de reducción de la resistencia de la conexión a largo plazo que considera la reducción de la resistencia última debido a la conexión (adimensional)
- $RF_D$  = factor de reducción para impedir la rotura de los refuerzos debido a la degradación química y biológica (Artículo 11.10.6.4.3b) (adimensional)

La resistencia reducida a largo plazo debido a la fluencia lenta del geosintético en la conexión con el revestimiento del muro se obtiene reduciendo  $T_{ult}$  aplicando  $CR_{cr}$  usando la resistencia de la conexión/ costura determinada de acuerdo con el protocolo de ensayos de resistencia a largo plazo de las conexiones.

El objetivo del diseño de las conexiones es evaluar la capacidad de las mismas a largo plazo. Si el modo de falla es por ruptura se consideraran los efectos a largo plazo de la fluencia lenta y durabilidad sobre el refuerzo geosintético en la conexión, ya que la capacidad es controlada por la resistencia a largo plazo del refuerzo o del conector.

Si el modo de falla es por arrancamiento la capacidad de la conexión es controlada por la interfase friccional entre los bloques del revestimiento y el refuerzo geosintético.

Los valores de  $CR_{cr}$  y  $RF_D$  se determinaran a partir de los resultados de las pruebas. Las condiciones ambientales en la conexión a la cara del muro pueden ser diferentes a las condiciones ambientales en el relleno detrás del muro.

El  $CR_{cr}$  se determinará para la presión de confinamiento vertical anticipada entre los bloques del revestimiento en la cara del muro. La presión de confinamiento vertical se determinara usando el Método de la Altura Contribuyente (altura del muro que contribuye al esfuerzo normal) como se ilustra en la Figura 37; si la inclinación de la cara del muro,  $\psi$  es mayor que  $8^\circ$ .  $Tac$  no será mayor que  $Tal$ .

La altura contribuyente,  $H_h$  considerará que la totalidad del peso de todos los bloques que forman parte del revestimiento en la altura  $H_h$  actúa sobre la base del primer bloque:

$$H_h = 2 \frac{(W_u - G_u - 0.5H_u \tan l_b) \cos l_b}{\tan(\varphi + l_b)} \quad \text{Ec. 50}$$

Donde:

- $H_u$  = altura de una unidad (bloque) del revestimiento (mm)
- $W_u$  = ancho total de una unidad (bloque del revestimiento) (mm)
- $G_u$  = distancia hasta el centro de gravedad de una unidad (bloque) horizontal, incluyendo el material de relleno, medida a partir del frente de la unidad (mm)
- $H$  = altura total del muro (mm)
- $H_h$  = altura contribuyente

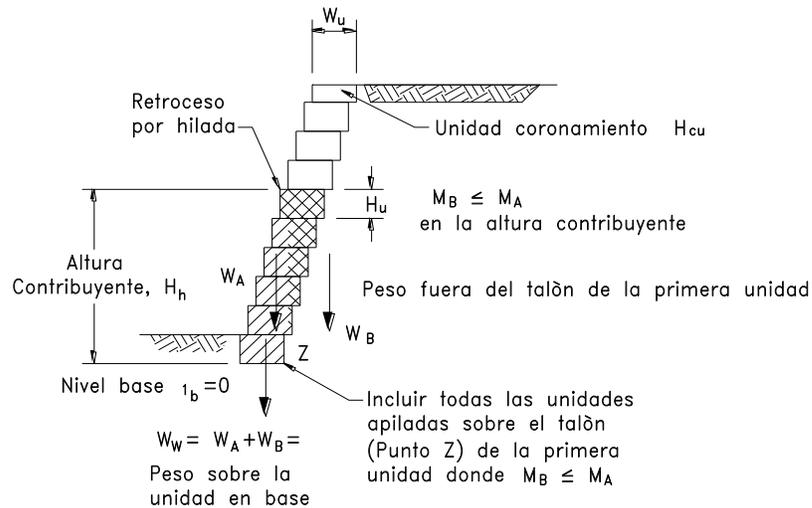


Figura 37.- Determinación de la altura contribuyente en un M.M.E. (AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 17<sup>th</sup> Edition, 2002)

Para aplicaciones en muros que se define que no tienen consecuencias severas si ocurre un comportamiento pobre o una falla, tienen condiciones no agresivas de los suelos, y si el producto geosintético cumple los requisitos mínimos indicados en la Tabla 18 la resistencia a largo plazo de la conexión puede ser de ensayos específicos de los productos.

**TABLA 18.- Valores mínimos y por defecto de los factores de reducción de la resistencia total de estado último de los geosintéticos en las conexiones del paramento RFc) (Normas AASHTO 2002)**

Aplicación	Factor total de reducción $RF_c$
Todas las aplicaciones pero con datos específicos de los productos obtenidos y analizados de acuerdo con la publicación FHWA SA-96-071 apéndice B y FHWA SA-96-072.	Basado en los ensayos de los productos. $RF_{TD}$ y $RF_P$ no deben ser menores de 1.1
Aplicaciones permanentes que no tengan consecuencias severas en el caso de que ocurra comportamiento pobre o falla, en suelos no agresivos y con los polímeros cumpliendo con los requisitos de la Tabla 16. y no se provea información específica de los productos. Si se usa refuerzo de poliéster debe investigarse el régimen de pH en la conexión y determinar que se encuentra dentro de los requerimientos de pH para ambientes no agresivos (véase División II artículo 7.3.6.3)	4,0
Aplicaciones temporales que no tengan consecuencias severas en el caso de que ocurra comportamiento pobre o falla, en suelos no agresivos y con los polímeros cumpliendo con los requisitos de la Tabla 16. y que no se prevea información específica de los productos	2,5

### 3.7.3.5. Especificaciones de los refuerzos

Para bloques de concreto, los bloques localizados por encima de la capa más alta de refuerzo se diseñaran para resistir fallas al volteo durante carga sísmica.

La carga de tensión aplicada al refuerzo de la conexión en el paramento del muro  $T_o$  será igual a  $T_{m\acute{a}x}$  para todos los sistemas de muro, independientemente del tipo de paramento y refuerzo.

Para conexiones de geosintéticos la resistencia a largo plazo de la conexión será mayor a  $T_{m\acute{a}x} + T_{md}$ . Donde la resistencia a largo plazo de la conexión es parcial o totalmente dependiente de la fricción entre los bloques del paramento y el refuerzo y el modo de falla controlador es la extracción de la conexión.

La resistencia a largo plazo de la conexión para resistir cargas sísmicas se reducirá a 80% de su valor estático.

Si la categoría de comportamiento sísmico es categoría "C" o mayor, las conexiones del paramento con bloques no serán totalmente dependientes de la resistencia a la fricción entre el refuerzo y los bloques. Se utilizarán elementos o aparatos resistentes al cortante entre los bloques y el refuerzo del relleno tales como llaves, pines, etc.

Para conexiones con refuerzo de acero los factores de seguridad combinados para cargas estáticas y dinámicas pueden reducirse a 75% de los factores de seguridad utilizados para cargas estáticas.

Cuando están presentes sobrecargas muertas encima o dentro de la zona de suelo reforzado, las conexiones del refuerzo a la pared del muro se diseñara para el 100% de la  $T_{m\acute{a}x}$  ó  $T_{total}$  para cargas sísmicas) a lo largo de toda la altura del muro.

Se prevendrá el contacto metal - metal entre las conexiones del refuerzo y el refuerzo de acero de los elementos de concreto de fachada, en tal forma que el contacto entre metales no similares (acero desnudo y acero galvanizado) no ocurra. El contacto puede prevenirse colocando un material no conductivo entre el refuerzo de la conexión y el refuerzo de los elementos de concreto.

### 3.8. Obras de drenaje

El agua es la principal causa de problemas en las obras civiles y una de las causas más relevantes de su deterioro, el exceso de agua en los suelos afecta sus propiedades geomecánicas, los mecanismos de transferencia de carga, incrementa la presión de poro, subpresiones de flujo, presiones hidrostáticas y afecta la susceptibilidad a los cambios volumétricos, por lo que es indispensable realizar obras de drenaje que permitan desalojar el agua.

En todas las estructuras se considerarán medidas para su drenaje interno para evitar la saturación del relleno reforzado e interceptar cualquier flujo superficial que contenga elementos agresivos.

Los muros de tierra estabilizada mecánicamente en áreas de desmonte y relleno en las cuales se conoce el nivel freático se construirán con mantos de drenaje detrás y debajo de la zona reforzada.

### 3.8.1. Cunetas

Con el fin de canalizar el agua sobre el muro se construirán cunetas impermeables con pendiente transversal al proyecto, para desfogar el agua hacia los lavaderos extremos.

La conformación de las zanjas para formar las cunetas, se efectuará mediante una excavación con equipo manual o mecánico, de acuerdo con las secciones, niveles, alineación y acabados establecidos en el proyecto.

La pendiente longitudinal mínima de la cuneta será de 0.5 %, se construirán con una sección triangular, el talud será de 3:1, serán revestidas de concreto hidráulico de resistencia  $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$  y malla electrosoldada.

Previo a la colocación del revestimiento, la superficie por cubrir estará afinada, humedecida y compactada al grado establecido en el proyecto.

Los materiales que se utilicen en la construcción de cunetas, cumplirán con lo establecido en las Normas aplicables del *Libro CMT. Características de los Materiales*.

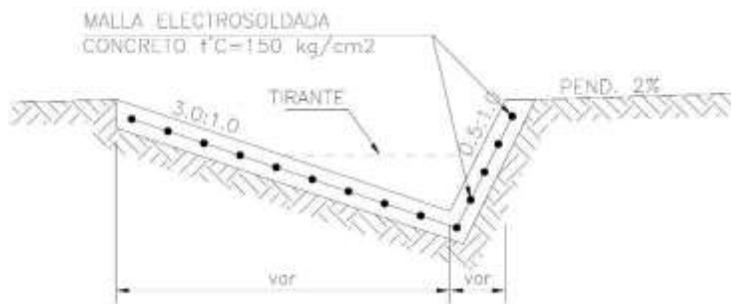


Figura 38.- Detalle de cuneta

### 3.8.2. Drenes

Los drenes de penetración transversal constituyen un sistema de subdrenaje, que consiste en tuberías horizontales, ranuradas e insertadas transversalmente en los taludes de cortes o rellenos para aliviar la presión de poro, en la mayor parte de los casos extrayendo agua de los suelos o rocas.

Los drenes son instalaciones de subdrenaje que tienen la función de abatir del interior de los taludes del corte las presiones generadas por el agua, que sean susceptibles de provocar la falla del corte.

Consisten en tubos perforados en toda su periferia que penetran en el terreno en dirección transversal al eje de la vía para captar las aguas internas y abatir sus presiones neutrales.

La parte del tubo perforado del dren que queda próxima a la salida debe dejarse sin perforar en uno o dos metros, para evitar la invasión de vegetación a través de las perforaciones y la obstrucción del tubo.

Los materiales que se utilicen en la instalación de drenes de penetración transversal, cumplirán con lo establecido en las Normas aplicables del *Título 04. Materiales para Subdrenes, de la Parte 3. Materiales para Obras de Drenaje y Subdrenaje, del Libro CMT. Características de los Materiales, así como del Título 01. Geosintéticos, de la Parte 6. Materiales Diversos, del mismo Libro.*

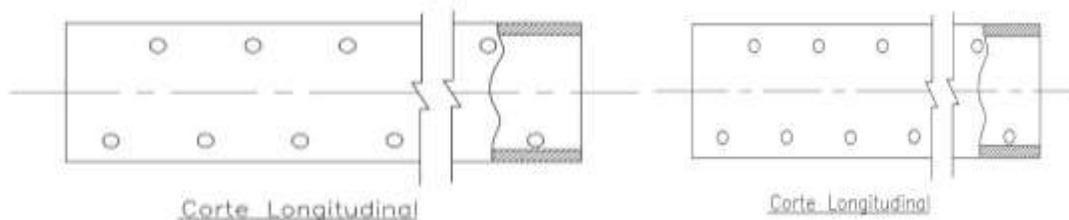


Figura 39.- Detalle de dren, corte longitudinal y corte transversal (norma SCT N-CMT-3-04-003/05)

### 3.8.3. Lavaderos

Los lavaderos son canales que conducen y descargan el agua recolectada por los bordillos, cunetas y guarniciones a lugares donde no cause daño a la estructura. Los lavaderos pueden ser de mampostería, concreto hidráulico o metálicos.

La excavación tendrá un ancho igual al ancho exterior del lavadero y una profundidad máxima igual a la profundidad del mismo, con las paredes correctamente perfiladas para alojar la sección del lavadero, prolongando la excavación hasta interceptar la superficie. El fondo de la excavación en que se asiente el lavadero estará exento de cualquier irregularidad como son oquedades o material saliente.

Una vez terminada la excavación se revestirá el lavadero mediante un zampeado para protegerlo contra la erosión. Previa a la colocación del revestimiento, la superficie por cubrir estará afinada, humedecida y compactada al grado establecido en el proyecto.

Los materiales que se utilicen en la construcción de lavaderos, cumplirán con lo establecido en las Normas aplicables de los *Títulos 01. Materiales para Mamposterías y 02. Materiales para Concreto Hidráulico, de la Parte 2. Materiales para Estructuras, del Libro CMT. Características de los Materiales*, así como en la Norma N·CMT·3·03, *Tubos y Arcos de Lámina Corrugada de Acero*.

### 3.8.4. Alcantarillas

Las alcantarillas son estructuras rígidas, que se construyen mediante tubos de concreto con o sin refuerzo, colocados sobre el terreno en una o varias líneas para dar paso libre al agua de un lado a otro de la vialidad. Según el terreno donde se construyan, pueden ser zanja, en zanja con terraplén o en terraplén; según su ubicación se clasifican en normal y enviada.

Para la construcción de alcantarillas se considerará lo indicado en la norma N-CTR-CAR-1-03-002/00 *Alcantarillas Tubulares de Concreto*.

Los materiales que se utilicen en la construcción de alcantarillas tubulares de concreto, cumplirán con lo establecido en las Normas N·CMT·3·01, *Tubos de Concreto sin Refuerzo* y N·CMT·3·02, *Tubos de Concreto con Refuerzo*, así como en las demás Normas aplicables del *Libro CMT. Características de los Materiales*.

### 3.8.5. Geodrén

El geodrén es un sistema de subdrenaje, conformado por geotextiles no tejidos punzonados por agujas y geored de polietileno de alta densidad (HDPE). El geotextil cumple la función de filtración, reteniendo las partículas del suelo y permitiendo el paso de los fluidos, para abatir el nivel freático y prevenir la tubificación o erosión del suelo. La geored por su parte, es el medio

drenante encargado de transportar el agua que pasa a través del filtro. El geodrén planar es el sistema más adecuado para captar y conducir los fluidos en su plano hacia un sistema de evacuación.

El geodrén es un sistema de integral de captación, conducción y evacuación de fluidos que está compuesto por un geodrén planar y tubería corrugada de drenaje. Este sistema es resistente a agentes químicos y biológicos.

Los materiales que se utilicen en la construcción de geodrenes, cumplirán con lo establecido en las normas de SCT, del libro *CMT. Características de los Materiales*.

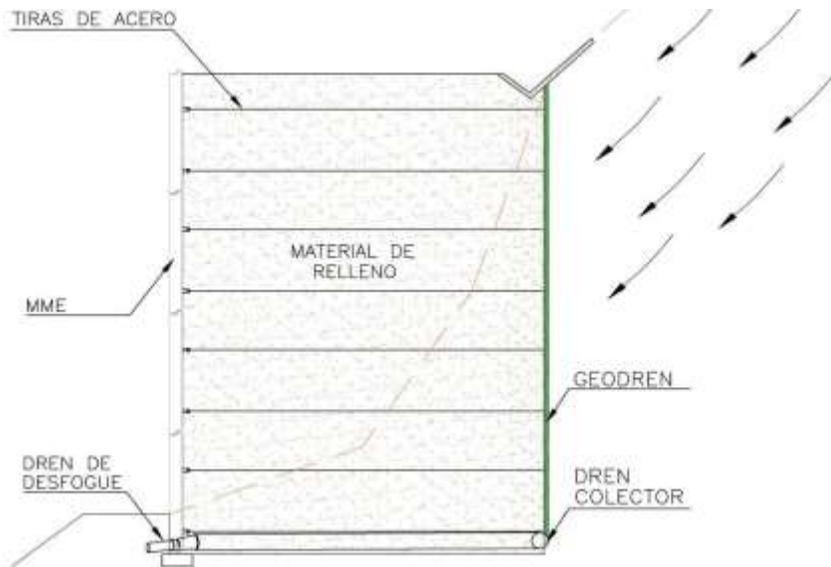


Figura 40.- Sección transversal de geodrén como sistema de drenaje

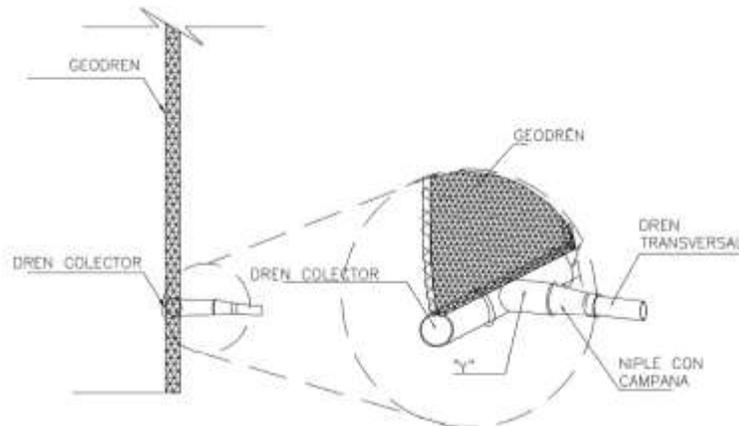


Figura 41.- Detalle de geodrén

### 3.8.6. Filtros

Los materiales que constituyen un filtro deben satisfacer ciertas condiciones con objeto de asegurar que el filtro cumpla sus funciones. Por una parte, debe cumplir el libre paso del agua que se produce por el material al que protege, y por otra, evitar el paso de las partículas que constituyen el material protegido. Estas dos funciones implican tendencias contrarias en cuanto a la granulometría del filtro, pues la primera requiere que el diámetro de los poros del filtro sea suficientemente grande, mientras que la segunda obliga a que dichos poros sean reducidos.

Puesto que el tamaño de los poros está en función del tamaño de las partículas y de su distribución granulométrica, las especificaciones están dadas en función de las granulometrías de los materiales para proteger y de los que forman el filtro. Los requisitos de calidad de los materiales que se utilicen como filtros en los sistemas de subdrenaje cumplirán con lo establecido en la norma *N·CMT·3·04·001/05 Materiales para Subdrenes*. El material tendrá las características granulométricas que se establecen en la Tabla 19, así como los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 20, se recomienda evitar el uso de roca caliza, debido a la alta solubilidad que presenta.

**TABLA 19.- Requisitos de granulometría de los materiales para filtros**

Designación	Abertura nominal mm	Material que pasa %
1 ½ "	37,5	100
1"	25	80 - 100
¾ "	19	65 - 100
⅜ "	9,5	40 - 80
N° 4	4,75	20 - 55
N° 10	2	0 - 35
N° 20	0,85	0 - 20
N° 40	0,425	0 - 12
N° 60	0,25	0 - 9
N° 100	0,15	0 - 7
N° 200	0,075	0 - 5

**TABLA 20.- Requisitos de calidad de los materiales para filtros**

Característica	Valor %
Límite líquido, máximo	25
Índice plástico, máximo	6
Equivalente de arena, mínimo	30
Desgaste Los Ángeles, máximo	40

Si la granulometría del material obtenido en un banco no cumple con los requisitos establecidos, se podrá mezclar con materiales de otros bancos, en la proporción adecuada para que cumpla con dichos requisitos.

El material para filtro será permeable, facilitará el drenaje del agua subterránea e impedirá que las partículas del suelo por proteger sean arrastradas por el agua hacia el interior del material para filtro.

**3.8.6.1. Permeabilidad**

Para que el material permita el flujo de agua, cumplirá la siguiente relación:

$$\frac{D^F_{15}}{D^S_{15}} \geq 5 \quad \text{Ec. 51}$$

Donde:

$D^F_{15}$  = Tamaño de las partículas del material de filtro, para el cual el 15% en masa del material es menor que ese tamaño, determinado gráficamente de la curva granulométrica, (mm)

$D^S_{15}$  = Tamaño de las partículas del material de suelo que circunda al subdrén, para el cual el 15% en masa del material es menor que ese tamaño, determinado gráficamente de la curva granulométrica, (mm)

**3.8.6.2. Migración de partículas finas**

Para evitar la migración de partículas finas del suelo circundante, hacia el interior del material de filtro, se cumplirán las desigualdades siguientes:

$$\frac{D^F_{15}}{D^S_{85}} \leq 5 \quad \text{y} \quad \frac{D^F_{50}}{D^S_{50}} \leq 25 \quad \text{Ec. 52}$$

Donde:

$D^F_{15}, D^F_{50}$  = Tamaños de las partículas del material de filtro, para los cuales el 15% y el 50 % en masa del material, respectivamente, son menores que esos tamaños, determinados gráficamente de la curva granulométrica, (mm)

$D^S_{85}, D^S_{50}$  = Tamaños de las partículas del material de suelo que circunda al subdrén, para los cuales el 15% y el 50 % en masa del material, respectivamente, son menores que esos tamaños, determinados gráficamente de la curva granulométrica, (mm)

**3.8.6.3. Obstrucción**

Para evitar la obstrucción de las perforaciones del tubo colector o la fuga de finos del material para filtro se cumplirá con la siguiente relación:

$$\frac{D^F_{85}}{d} \geq 1,5$$

Para perforaciones circulares:

Ec. 53

Donde:

$D^F_{85}$  = Tamaño de las partículas del material de filtro, para el cual el 85% en masa del material es menor que ese tamaño, determinado gráficamente de la curva granulométrica, (mm)

$d$  = Diámetro de las perforaciones del tubo, (mm)

$$\frac{D^F_{85}}{\alpha} \geq 1,2$$

Para ranuras:

Ec. 54

Donde:

$D^F_{85}$  = Tamaño de las partículas del material para filtro, para el cual el 85% en masa del material es menor que ese tamaño, determinado gráficamente de la curva granulométrica, (mm)

$\alpha$  = Ancho de la ranura, (mm)

**3.8.6.4. Uniformidad**

Para evitar la segregación del material para filtro al momento de colocarlo, el coeficiente de uniformidad será:

$$\frac{D^F_{60}}{D^F_{10}} \leq 20 \quad \text{Ec. 55}$$

Donde:

$D^F_{60}$  = Tamaño de las partículas del material de filtro, para el cual el 60% en masa del material es menor que ese tamaño, determinado gráficamente de la curva granulométrica, (mm)

$D^F_{10}$  = Tamaño de las partículas del material de filtro, que corresponde al 10% en masa del material es menor que ese tamaño, determinado gráficamente de la curva granulométrica, (mm)

$$5 \leq \frac{D_{15}^F}{D_{15}^S} \leq 40 \quad \text{Ec. 56}$$

Donde:

$D_{15}^F$  = Tamaño de las partículas del material de filtro, para el cual el 15% en masa del material es menor que ese tamaño, determinado gráficamente de la curva granulométrica, (mm)

$D_{15}^S$  = Tamaño de las partículas del material de suelo que circunda al subdrén, para el cual el 15% en masa del material es menor que ese tamaño, determinado gráficamente de la curva granulométrica, (mm)

Además deberá cumplir lo siguiente:

1. El material que constituye el filtro debe de ser de buena graduación y contener menos de 5% de finos (Material que pasa la malla No.200).
2. El tamaño máximo del material que se utilice para formar el filtro, debe de ser menor que 3", para minimizar la segregación y puenteo entre partículas grandes durante su colocación.

Las anteriores especificaciones resultan demasiado rígidas en algunos casos, cuando no se dispone de los materiales que las satisfagan en forma natural. Es evidente que casi siempre se estará en condiciones de recurrir a la trituración de roca para obtener la granulometría deseada; sin embargo, este procedimiento es costoso.

Por otra parte, la experiencia basada en la observación del comportamiento de estructuras existentes en las que no se cumplen totalmente los requisitos anteriores, permite concluir que, en determinadas condiciones es aceptable desviarse un poco de tales especificaciones, sin el riesgo de la falla por tubificación.

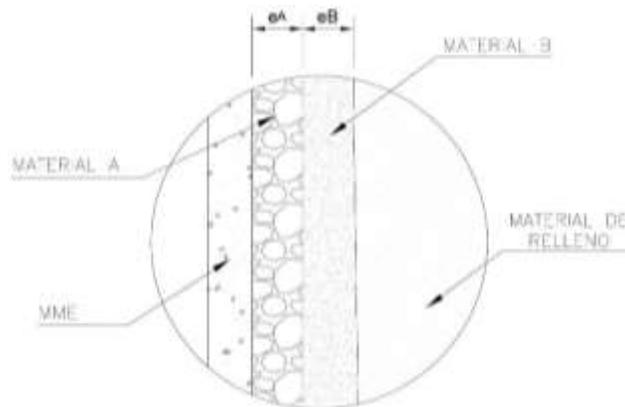


Figura 42.- Detalle de material para filtro

Material para filtro

A: material de filtro A base de grava bien graduada (GW).

B: material de filtro B de arena limpia bien graduada (SW).

El porcentaje de finos en ambos filtros no excederá el 5 %.

Los materiales para filtro cumplirán con las siguientes consideraciones:

Criterio de filtración y protección de erosión interna.

$D_{15}$  (filtro A)/ $D_{85}$  (filtro B)  $\leq 4$

$D_{15}$  (filtro B)/ $D_{85}$  (material del relleno)  $\leq 4$

Además cumplirán las siguientes condiciones

$D_{15}$  (filtro A)/ $D_{15}$  (filtro B)  $< 40$

$$D_{50} \text{ (filtro A)}/D_{50} \text{ (filtro B)} < 25$$
$$D_{15} \text{ (filtro B)}/D_{15} \text{ (material de relleno)} < 40$$
$$D_{50} \text{ (filtro B)}/D_{50} \text{ (material de relleno)} < 25$$

Criterio de permeabilidad

$$D_{15} \text{ (filtro A)} / D_{15} \text{ (filtro B)} \geq 4$$
$$D_{15} \text{ (filtro B)} / D_{15} \text{ (material de relleno)} \geq 4$$

Es importante que el material de filtro no posea más de un 5% de material que pase de la malla 200, para evitar la migración de finos del filtro hacia las tuberías de drenaje, para garantizar una permeabilidad suficiente.

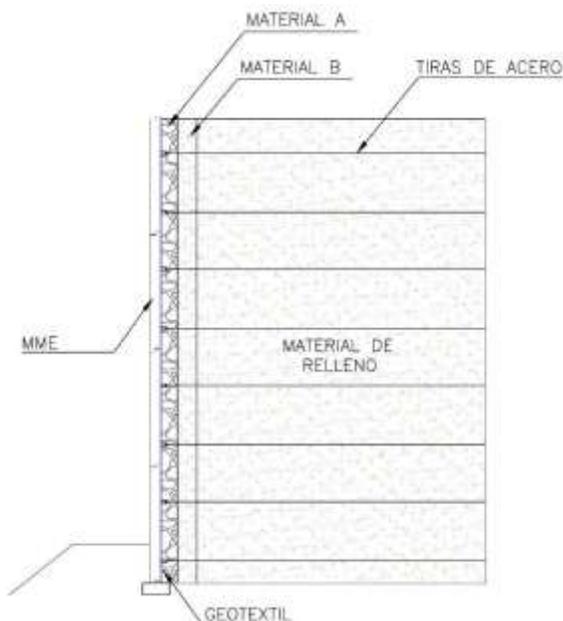


Figura 43.- Sección caso 1, materiales de filtro detrás del M.M.E.

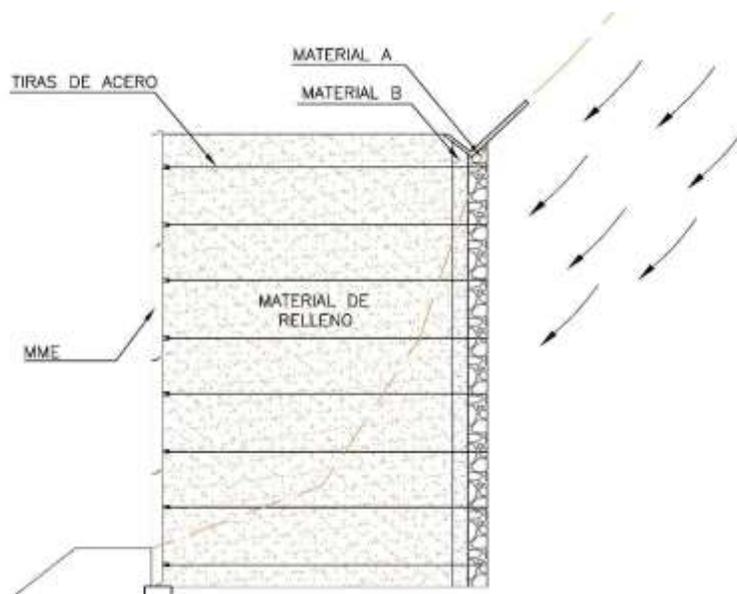


Figura 44.- Sección caso 2, materiales de filtro detrás del M.M.E.

### 3.9. Revisiones geotécnicas

Los estudios geotécnicos habituales que se realizan para el cálculo y diseño de M.M.E. son utilizados para determinar los parámetros de resistencia al

corte del terreno de cimentación, como son: cohesión aparente ( $C_u$ ), ángulo de fricción interna ( $\emptyset$ ), y cohesión efectiva ( $c'$ ), para realizar los estudios de estabilidad externa, asentamientos y resistencia del contacto entre el M.M.E. y el suelo de desplante, en este último caso no se considerará ninguna resistencia cohesiva o adhesión superior a 0,1 MPa.

### 3.9.1. Capacidad de carga

Ésta sección tiene como objetivo presentar una metodología para el diseño de Muros Mecánicamente Estabilizados tomando en cuenta los aspectos indicados, dando como resultado la realización de un análisis adecuado para la obtención de las dimensiones necesarias para prevenir las fallas tanto externas como internas.

El diseño de cimentaciones para el estado límite de resistencia incluirá:

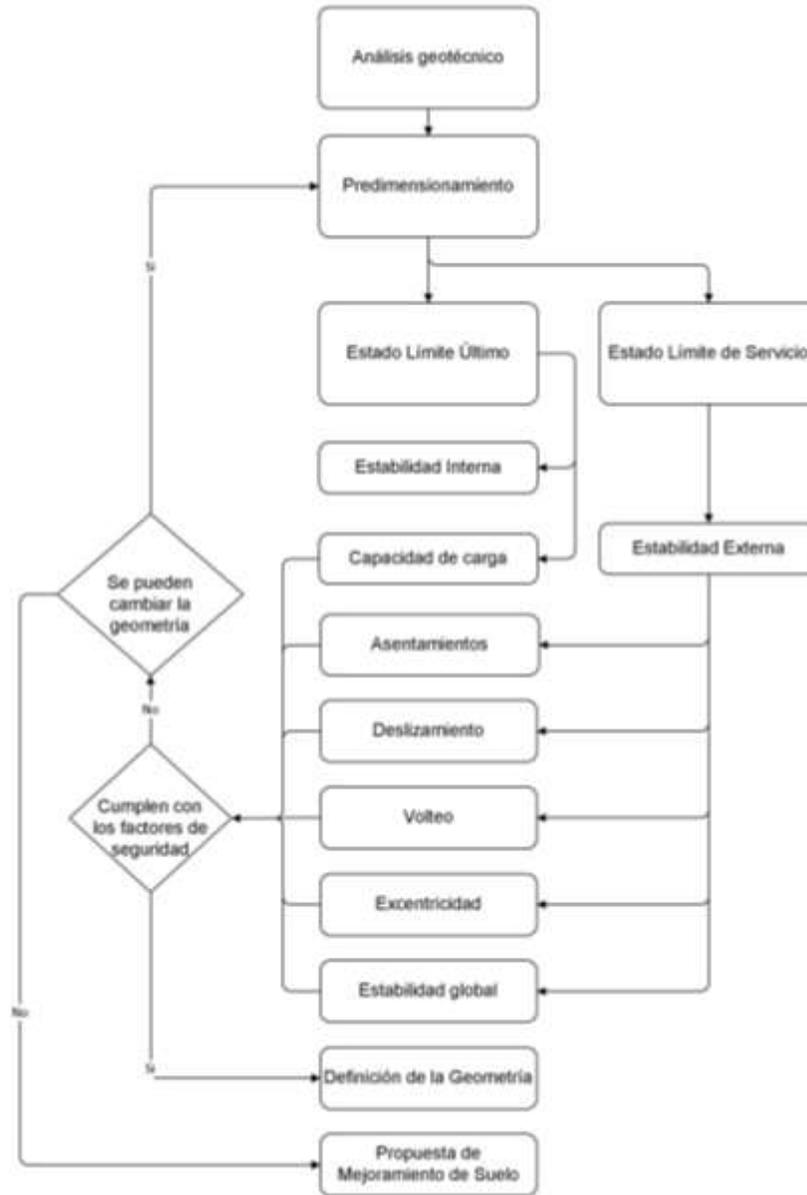
- capacidad de carga, excepto la presión de contacto supuesta
- pérdida de contacto excesiva
- deslizamiento en la base de la zapata
- pérdida de apoyo lateral
- capacidad estructural.

Las cimentaciones se dimensionarán de tal manera que la resistencia mayorada sea mayor o igual que las solicitaciones correspondientes a las cargas mayoradas definidas en cada caso.

La capacidad de carga admisible para MME se obtendrá utilizando un factor de seguridad mínimo de 2,5 para cargas del Grupo 1 aplicadas a la capacidad de carga última calculada. Se puede emplear un factor menor de 2,0 si lo justifica un análisis geotécnico.

El ancho de la cimentación para los cálculos de la capacidad de carga última será la longitud del refuerzo calculado en el nivel de desplante. Si la localización de la resultante cumple con el criterio establecido, no es necesario un análisis de estabilidad por volteo.

Donde están presentes suelos suaves o con pendiente, la diferencia en el cálculo de los esfuerzos en la cimentación para la zona del muro con suelo reforzado con relación a los esfuerzos en la capacidad local debajo de los elementos del paramento se considerará cuando se evalúe la capacidad de carga. Además, los asentamientos diferenciales entre los elementos del paramento y la zona de suelo reforzado del muro debido a esfuerzos concentrados por el peso del paramento en suelos blandos pueden crear esfuerzos concentrados en la conexión entre el paramento y el relleno reforzado del muro. En ambos casos, la dala de desplante estará empotrada lo necesario para obtener la capacidad de carga y los asentamientos requeridos y diseñada para mantener los esfuerzos debajo de la dala de desplante y el resto del muro lo más uniforme posible.



La capacidad de carga última para una falla general será estimada usando la siguiente relación para una cimentación continua:

$$q_{ult} = cN_c + 0.5\gamma BN_\gamma + qN_q \dots \quad \text{Ec. 57}$$

Donde:

- c = cohesión del suelo de desplante
- B = ancho de la cimentación
- $\gamma$  = peso volumétrico del suelo de desplante
- q = sobrecarga
- $N_c, N_\gamma, N_q$  = factores de capacidad de carga (Tabla 21)

La capacidad de carga admisible se determinará de la siguiente forma:

$$q_{adm} = q_{ult} / FS \quad \text{Ec. 58}$$

Donde:

- $q_{ult}$  = capacidad de carga última
- $q_{adm}$  = capacidad de carga admisible

FS = factor de seguridad

Para una falla local el valor de la capacidad de carga última  $q_{ult}$  se estima usando los parámetros de resistencia reducidos  $c^*$  y  $\phi^*$ , de acuerdo a lo siguiente:

$$c^* = 0.67c \quad \text{Ec. 59}$$

$$\phi^* = \tan^{-1}(0.67 \tan \phi) \quad \text{Ec. 60}$$

Se utilizarán métodos de análisis de esfuerzos efectivos y parámetros de resistencia al corte drenados para determinar los factores de capacidad de carga para condiciones de carga en suelos drenados. La capacidad de carga en suelos cohesivos se calculará para condiciones de carga no drenados usando los factores de capacidad basados en los parámetros de corte no drenados.

**TABLA 21.- Factores de capacidad de carga  $N_c$ ,  $N_\gamma$ ,  $N_q$  (AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 2002)**

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.14	1.00	0.00	26	22.25	11.85	12.54
1	5.38	1.09	0.07	27	23.94	13.20	14.47
2	5.63	1.20	0.15	28	25.80	14.72	16.72
3	5.90	1.31	0.24	29	27.86	16.44	19.34
4	6.19	1.43	0.34	30	30.14	18.40	22.40
5	6.49	1.57	0.45	31	32.67	20.63	25.99
6	6.81	1.72	0.57	32	35.49	23.18	30.22
7	7.16	1.88	0.71	33	38.61	26.09	35.19
8	7.53	2.06	0.83	34	42.16	29.44	41.06
9	7.92	2.25	1.03	35	46.12	33.30	48.03
10	8.35	2.47	1.22	36	50.59	37.75	56.31
11	8.8	2.71	1.44	37	55.63	42.92	66.19
12	9.28	2.97	1.69	38	61.35	48.93	78.03
13	9.81	3.26	1.97	39	67.87	55.96	92.25
14	10.37	3.59	2.29	40	75.31	64.20	109.41
15	10.98	3.94	2.65	41	83.86	73.90	130.22
16	11.63	4.34	3.06	42	93.71	85.38	155.55
17	12.34	4.77	3.53	43	105.11	99.02	186.54
18	13.10	5.26	4.07	44	118.37	115.31	224.64
19	13.93	5.80	4.68	45	133.88	134.88	271.76
20	14.83	6.40	5.39	46	152.10	158.51	330.35
21	15.82	7.07	6.20	47	173.64	187.21	403.67
22	16.88	7.82	7.13	48	199.26	222.31	496.01
23	18.05	8.66	8.20	49	229.93	265.51	613.16
24	19.32	9.60	9.44	50	266.89	319.07	762.89
25	20.72	10.66	10.88	-	-	-	-

**3.9.1.1. Ecuación general de capacidad de carga**

Para una carga inclinada, efectos de forma de la cimentación y para tomar en cuenta otros factores, Meyerhof (1963) sugirió la siguiente ecuación general de capacidad:

$$q_{ult} = cN_c s_c b_c i_c + 0.5\gamma B N_\gamma s_\gamma b_\gamma i_\gamma + q N_q s_q b_q i_q \quad \text{Ec. 61}$$

Donde:

- c = cohesión del suelo de desplante
- B = ancho de la cimentación
- g = peso volumétrico del suelo de desplante

$q =$  sobrecarga  
 $N_c, N_g, N_q =$  factores de capacidad de carga  
 $s_c, s_g, s_q =$  factores de forma  
 $b_c, b_g, b_q =$  factores de profundidad  
 $i_c, i_g, i_q =$  factores de capacidad de carga

**Factores de forma**

Los factores de forma se revisan aplicando las siguientes ecuaciones:

$$s_c = 1 + (B/L)(N_q/N_c) \quad \text{Ec. 62}$$

$$s_q = 1 + (B/L)\tan\phi \quad \text{Ec. 63}$$

$$s_\gamma = 1 - 0.4(B/L) \quad \text{Ec. 64}$$

**Para una carga inclinada:**

$$i_c = i_q - [(1 - i_q)/N_c \tan\phi] \quad (\text{para } f > 0) \quad \text{Ec. 65}$$

$$i_c = 1 - (nP/BLcN_c) \quad (\text{para } f = 0) \quad \text{Ec. 66}$$

$$i_q = [1 - P/(Q + BLc \cot\phi)]^n \quad \text{Ec. 67}$$

$$i_\gamma = [1 - P/(Q + BLc \cot\phi)]^{(n+1)} \quad \text{Ec. 68}$$

$$n = [(2 + L/B)/(1 + L/B)]\cos^2\theta + [(2 + B/L)/(1 + B/L)]\sin^2\theta \quad \text{Ec. 69}$$

**3.9.2. Asentamientos**

El asentamiento admisible para los M.M.E. se basara en la capacidad de deformación longitudinal del revestimiento y el propósito final de la estructura.

Si al realizarle pruebas al suelo de cimentación resulta que en una distancia corta horizontal los asentamientos diferenciales pueden ser demasiado grandes, se colocaran juntas de deslizamiento a lo largo de toda la altura del muro para limitar la distorsión del paramento.

Además de la deformación a lo largo del muro, también se evaluara el asentamiento diferencial entre el frente y la parte posterior del muro (zona reforzada del M.M.E. y paramento), para considerar que puede tener problemas de deformación, alineación y las tensiones en la conexión entre el paramento y los refuerzos.

El límite de los asentamientos diferenciales en los M.M.E., serán los que indican la Tabla 22.

**TABLA 22.- Tabla de asentamientos permisibles. (Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD, 2004, Sección 11.10.4.1)**

Ancho de las juntas (mm)	Área $\leq 2800000 \text{ mm}^2$	$2800000 \text{ mm}^2 \leq \text{área} \leq 7000000 \text{ mm}^2$
19	1/100	1/200
13	1/200	1/300
6	1/300	1/600

Para los Muros Mecánicamente Estabilizados con revestimientos de paneles de concreto prefabricado el asentamiento total se debería limitar a 50 mm y el asentamiento diferencial límite debería ser de 1/500. Para los muros con revestimientos de bloques de concreto construidos por segmentos el asentamiento diferencial límite debería ser de 1/200.

Para los muros con revestimientos de mallas de alambres soldados o muros en los cuales se coloca un revestimiento de concreto lanzado, una vez que básicamente ha finalizado el asentamiento del muro, el asentamiento diferencial límite debería ser de 1/50.

Estos criterios para el asentamiento diferencial límite consideran exclusivamente las necesidades estructurales del revestimiento. Es posible que sea necesario aplicar criterios más estrictos para satisfacer requisitos estéticos.

### 3.9.2.1. Desplazamiento Lateral

Los desplazamientos laterales de un muro se estimarán en función de la rigidez global de la estructura, el grado de compactación, el tipo de suelo, la longitud de los refuerzos utilizados, el grado de ajuste de las conexiones entre los refuerzos y el revestimiento, y la deformabilidad del sistema de revestimiento.

La Figura 45. permite obtener una estimación de primer orden de los desplazamientos laterales de un muro que ocurren durante su construcción para el caso de muros simples de tierra estabilizada mecánicamente construidos sobre fundaciones firmes. Si se anticipan asentamientos verticales significativos o si hay grandes sobrecargas presentes es posible que los desplazamientos laterales sean considerablemente mayores.

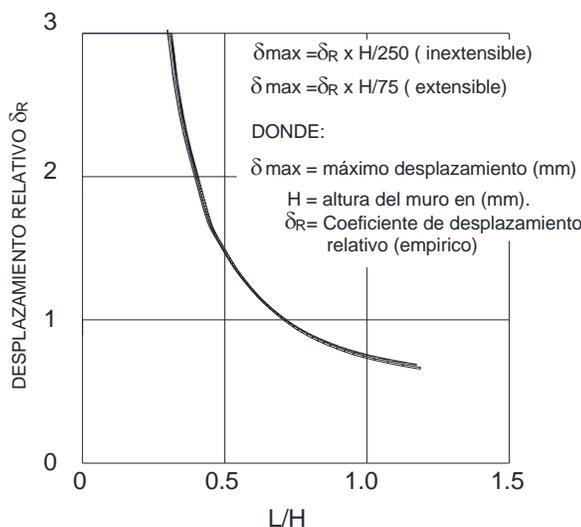


Figura 45.- Curva empírica para estimar el desplazamiento lateral anticipado durante la construcción de un M.M.E. (Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD, 2004, Sección 11.10.4.2)

Nota: Esta figura sólo debe ser utilizada a modo de guía. El desplazamiento real dependerá no sólo de los parámetros especificados en la figura sino también de las características del suelo, de los esfuerzos durante la compactación y de la calidad de trabajo del contratista.

En base a muros de 6100 mm de altura, el desplazamiento relativo aumenta aproximadamente 25% por cada 0,0192 MPa de sobrecarga. La experiencia indica

que en el caso de muros de mayor altura el efecto de la sobrecarga de suelo puede ser aún mayor.

Para los muros especiales con revestimiento de mallas de alambres soldados u otros revestimientos similares, la máxima curvatura admisible del revestimiento entre las conexiones de los refuerzos del suelo, tanto horizontal como verticalmente, es de aproximadamente 50 mm.

Para los revestimientos geosintéticos la máxima curvatura del revestimiento entre capas de refuerzos debería ser de aproximadamente 70 mm para una separación vertical entre refuerzos de 300 mm hasta 125 mm para una separación vertical entre refuerzos de 600 mm.

### **3.9.3. Estabilidad global**

La estabilidad global de la estructura está determinada por análisis rotacionales, el cual puede ser realizado usando métodos de análisis de estabilidad de taludes. El muro de suelo reforzado 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 externas de alta magnitud, estructuras con la cara del muro inclinada, taludes pronunciados que descansan tanto en el pie como en la parte superior del muro, o estructuras apiladas, se considerará la falla global.

Si el factor de seguridad mínimo es menor que el recomendado (F.S. de 1,3), entonces se incrementa la longitud efectiva del refuerzo o se mejora el suelo de desplante.

Además, para los muros mecánicamente estabilizados de geometría compleja también se investigarán las superficies de falla compuestas que atraviesan una porción de la masa de suelo reforzado como se ilustra en la Figura 12, especialmente si el muro está ubicado en terreno inclinado o blando donde la estabilidad global podría no ser adecuada. En el análisis del equilibrio límite para la estabilidad de taludes las resistencias a largo plazo de cada capa de refuerzo de suelo intersecada por la superficie de falla se deberían considerar como fuerzas restablecedoras.

Se pueden emplear métodos o análisis de equilibrio que utilicen el método de análisis de estabilidad de taludes de Bishop modificado, de Janbu simplificado, de Spencer u otro de aceptación generalizada.

La investigación de la estabilidad global es particularmente importante para las cimentaciones ubicadas próximas a:

- Un talud natural o sobre terreno inclinado,
- Un terraplén o una excavación,
- Un cuerpo de agua,
- Una explotación minera, o
- Un muro de sostenimiento.

El modo de falla será determinado por las condiciones del suelo en la proximidad de la zapata. Cuando las condiciones del suelo son relativamente homogéneas y estas condiciones se extienden debajo de la zapata, la superficie de falla crítica probablemente será curva.

Cuando las condiciones subsuperficiales incluyen una zona o estrato particularmente débil o una superficie rocosa inclinada a poca profundidad, la superficie de falla crítica probablemente será plana. En muchos casos es necesario analizar ambos modos de falla para determinar cuál es el modo de falla más crítico.

Aun cuando la estabilidad global sea satisfactoria, puede ser necesario realizar exploraciones, ensayos y análisis especiales para muros de sostenimiento construidos sobre suelos blandos, si la consolidación y/o el desplazamiento lateral de los suelos blandos pueden provocar un asentamiento a largo plazo inaceptable o el movimiento lateral de los muros.

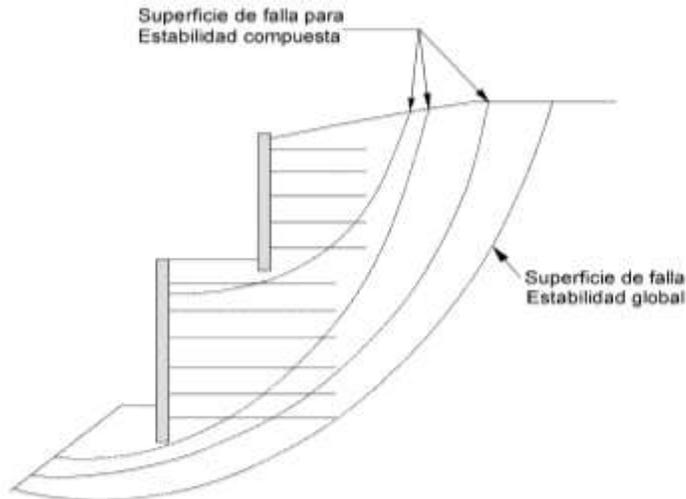


Figura 46. - Estabilidad global y compuesta de un sistema de M.M.E. de geometría compleja (AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 17<sup>th</sup> Edition, 2002)

El análisis de estabilidad puede desarrollarse utilizando cualquier método clásico de análisis de estabilidad de taludes mediante programas computacionales estándar. Sin embargo, es importante conocer la manera en que se introducirá el refuerzo en el cálculo. Para este propósito en la Figura 47. se muestran las fuerzas a considerar.

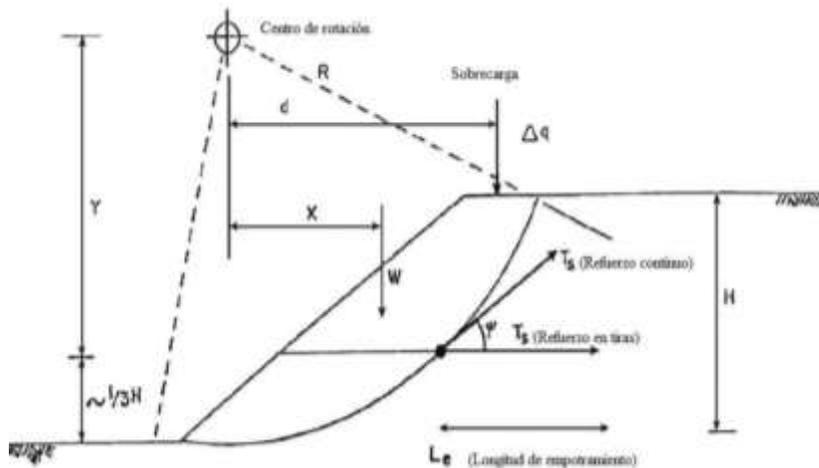


Figura 47.- Estabilidad global (FHWA-NH1-10-024)

El análisis de estabilidad global por medio de un programa computacional se realizara después de haber verificado el diseño de la estabilidad externa e interna. Es decir, después de haber definido la longitud del refuerzo, espaciamiento vertical del refuerzo y su resistencia.

Si el diseño del M.M.E. no cumple con la estabilidad global, la longitud y la resistencia del refuerzo deben incrementarse o disminuirse la separación del refuerzo. Además, puede considerarse la mejora del suelo de fundación.

#### **3.9.4. Mejoramientos**

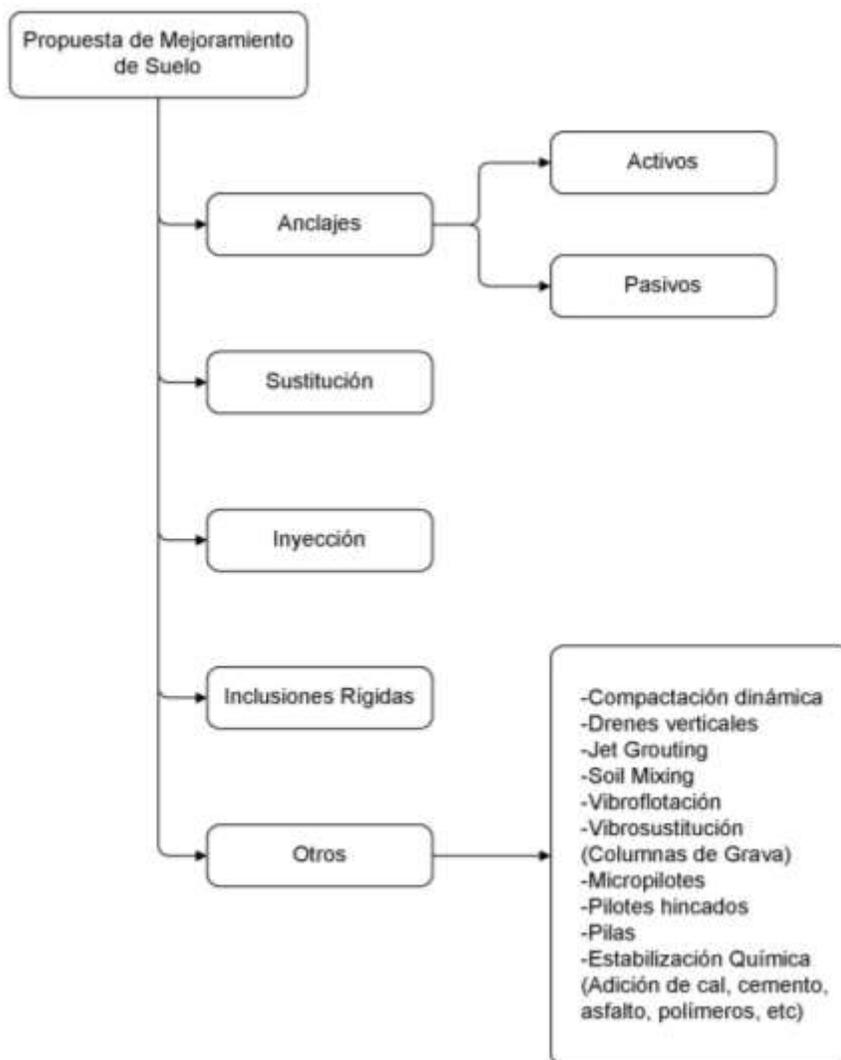
Cuando no se cumplen las condiciones, las técnicas de mejoramiento del suelo se considerarán para aumentar la capacidad de carga a nivel de desplante de los Muros Mecánicamente Estabilizados.

Las propiedades mejoradas mediante los diferentes tratamientos son:

- Mayor resistencia al corte, para aumentar las cargas admisibles de cimentaciones superficiales.
- Mayor capacidad de resistencia a esfuerzos, licuefacciones, etc.
- Menos deformabilidad con disminución de los asentos tanto en cimentaciones de estructuras como en terraplenes, cargas extensas, etc.
- Menos permeabilidad del terreno, con mejora de su capacidad de resistencia frente a los procesos de erosión interna producida por el flujo de agua.

El procedimiento para el mejoramiento de suelos se emplea para:

1. Reducir los asentamientos a corto y largo plazo.
2. Mejorar la resistencia al corte del suelo e incrementar así la capacidad de carga.



### 3.9.4.1. Anclajes

Los anclajes se utilizan para aplicar fuerzas dentro de una masa de suelo o roca proporcionando fuerzas externas para lograr la estabilidad de taludes o excavaciones.

Las anclas son barras metálicas que se alojan en un barreno perforado en el talud y se inyectan parcial o totalmente en su longitud, para estabilizar y proporcionar soporte al terreno natural desde antes, durante o después de la excavación en zonas inestables. Pueden colocarse en arreglos especiales, en función de los requerimientos de soporte o como elementos aislados para soportar algún bloque o cuña de suelo o roca potencialmente inestable. Las anclas se clasifican según su forma de fijación en:

#### 3.9.4.1.1. Anclas de tensión

Proporcionan activamente fuerzas externas para lograr la estabilidad de taludes o excavaciones, las anclas de tensión trabajan cuando se aplica una fuerza axial mediante dispositivos especiales.

Son aquellas que se fijan sólo en su extremo interior, ya sea mediante dispositivos de ranura y cuña, casquillos expansivos u otros dispositivos mecánicos, o mediante la inyección de resina o mortero en parte de su longitud.

#### **3.9.4.1.2. Anclas de fricción**

Son elementos pasivos que proporcionan fuerzas externas para lograr la estabilidad de taludes. Las anclas de fricción trabajan cuando el suelo o roca que las circunda sufre desplazamientos o deformaciones.

Las anclas de fricción se fijan mediante inyección de mortero o resina en toda la longitud del barreno.

Las anclas y los materiales que se utilicen en su elaboración y colocación, cumplirán con lo establecido en las Normas aplicables de los *Títulos 02. Materiales para Concreto Hidráulico* y *03. Acero y Productos de Acero*, de la Parte 2. *Materiales para Estructuras*, del Libro CMT. *Características de los Materiales*.

#### **3.9.4.2. Sustitución de material**

Algunas veces, las capas superiores de suelo no son adecuadas y deben retirarse y reemplazarse con material de mejor calidad sobre el cual pueda construirse la estructura. El suelo usado como relleno debe estar bien compactado para soportar la carga estructural.

#### **3.9.4.3. Inyecciones**

Con los tratamientos de inyección se pretende la introducción en el terreno a presión y caudal relativamente regulado y con magnitudes muy diferentes, de un material que, bien rellenando huecos, desplazando el terreno existente, o bien, creando un nuevo material, consiga una mejora de las características geotécnicas resistentes, reduciendo su deformabilidad y su permeabilidad.

Las inyecciones son aplicadas para compactar e impermeabilizar la parte sólida de las rocas fracturadas y los suelos porosos. Para hacer más fácil, o posible, el relleno completo de los huecos existentes es necesario que estos huecos estén conectados entre sí. El proceso de inyección se realiza mediante perforaciones espaciadas ampliamente, en el sentido que tal espaciado exceda en mucho a la anchura de los huecos a inyectar.

El material de inyección se mantiene en movimiento con la presión de inyección hasta alcanzar el radio efectivo final. El radio efectivo y la presión de inyección, ésta sobre todo en inyecciones de relleno y fracturación, deben ser limitados tanto por razones económicas como para no alterar la zona inyectada. Una presión inadecuada en la inyección puede originar levantamientos en la superficie, movimientos indeseados de la roca o del suelo e incluso esfuerzos excesivos.

Los materiales de inyección como el cemento, el agua y los aditivos se añaden al mezclador coloidal, el cual suele ser de alta velocidad, siendo todos ellos mezclados enérgicamente y las partículas de arena disgregadas y humectadas. Al cabo de unos minutos, la mezcla es impulsada al agitador, donde se mezclará lentamente. La función de este equipo es mantener la mezcla agitada hasta que se realice la inyección. Las bombas de inyección aspiran la mezcla desde el agitador y la bombean a través de las líneas de inyección a la perforación. Una vez dentro de la perforación el uso de obturadores o manguitos ayudan a distribuirla de forma correcta.

#### **3.9.4.4. Inclusiones**

Con el objeto de reducir y controlar los asentamientos que se presentan en suelos blandos por efecto del peso de las estructuras y de los abatimientos piezométricos, se encuentra el uso de inclusiones para reducir su compresibilidad, las cuales también mejoran la capacidad de carga.

Las inclusiones son elementos de forma cilíndrica, no conectados con la estructura, que pueden incluirse en el suelo recurriendo a diferentes técnicas como el hincado de elementos de concreto prefabricados o tubos de acero, inyección a baja presión, jet grouting y la perforación previa con relleno de materiales granulares (columnas de gravas) o de una mezcla de suelo con un material estabilizante formado de cal y cemento (columnas de cal cemento).

#### **3.9.4.5. Micropilotes**

Los micropilotes pueden utilizarse en condiciones de acceso restringido, proporcionan un excelente soporte estructural y minimizan los asentamientos. La característica principal

Son pilotes de pequeño diámetro (de 75 a 250 mm) de concreto ejecutados in situ, usualmente reforzados por una barra de acero en el centro. Se instalan en grupos de pilotes verticales o inclinados. Pueden emplearse tanto como sostenimiento de estructuras como en la estabilización del terreno frente a deslizamientos o pérdida de estabilidad.

#### **3.9.4.6. Geosintéticos**

Las propiedades principales de los geosintéticos adecuados a proyectos de refuerzo del terreno son la resistencia a la tensión, la deformabilidad y la fluencia con el tiempo. La resistencia a la rotura de los productos terminados puede variar entre 100 kg y más de 100 Ton, por metro. En cuanto a la deformabilidad, los geosintéticos son muy deformables respecto a otros materiales, e incluso a muchos suelos. El alargamiento en rotura puede ser del 10 a más del 70%. Esta característica debe ser considerada en los problemas en los que la deformación relativa entre geotextil y terreno tiene una importancia decisiva en el comportamiento del conjunto.

Los geosintéticos como elementos de refuerzo del terreno proporcionan al mismo tiempo resistencia a tensión, cohesión, o la introducción de fuerzas estabilizadoras de la que carece el terreno en condiciones normales. Es importante que el elemento sea capaz de proporcionar tal resistencia con un nivel de deformaciones en ambos, suelo y geosintético.

Las aplicaciones más importantes de los geosintéticos como refuerzo del terreno son en taludes, terraplenes, muros de contención, mejora de cimentaciones y refuerzo de pistas.

### **3.10. Especificaciones generales de proyecto**

- Dentro de las especificaciones para la construcción de Muros Mecánicamente Estabilizados se solicitarán los certificados de calidad de los tipos de refuerzos usados, las conexiones, fijaciones, etc. y muestras para ser analizadas, y que queden como testigos de dicho proyecto.
- Del mismo modo en la especificación se anexará que en los paramentos de los Muros Mecánicamente Estabilizados se dejarán reservaciones o testigos para realizar pruebas de extracción de los elementos de refuerzo, por lo tanto este concepto debe incluir dicha actividad, con el fin de poder realizar pruebas a escalas reales a corto o largo plazo. Este concepto debe quedar también indicado en la forma E7 para su evaluación económica.
- La especificación en el desplante de los Muros Mecánicamente Estabilizados se indicará las dimensiones generales y el tipo de materiales utilizado, la volumetría estará dada normalmente en

metros lineales, pero si se juzga pertinente por el tipo de material puede ser volumétrica y la cual debe estar indicada en la forma E7.

- Para especificar los paramentos a utilizar, la especificación particular aclarara las condiciones geométricas y estructurales de dicho paramento, con las densidades correspondientes de los materiales y su justificación técnica, su forma de pago estará determinada en M2 y en la forma E7 se indicara también dichas densidades.
- La especificación de remates de muros estará determinada por el proyecto en general, y que de acuerdo a la patente se podrá adaptar pero invariablemente deberá ser justificada técnicamente y expresada en dimensiones y tipos de materiales a emplear, del mismo modo estará indicada en la forma E7.
- Se entregaran las especificaciones particulares del material de relleno seleccionado para conformar el macizo de los Muros Mecánicamente Estabilizados, en ellas se indicara las características de dichos rellenos (propiedades índice y mecánicas de acuerdo a diseño) y de ninguna manera corresponderán a los que conforma el resto de las terracerías, del mismo modo se incluirán dentro de la colocación de dicho relleno las pruebas correspondientes que en el apartado de control de calidad se recomiendan, los volúmenes de dichos rellenos seleccionados estarán indicados en la forma E7.
- Para el caso de mejoramientos por baja capacidad de carga o asentamientos se especificara dichos trabajos aclarando que son en la zona de influencia de los Muros Mecánicamente Estabilizados, el método se aclarara y si existen varios conceptos que involucren a la actividad estos deben estar en una especificación particular que incluirá las actividades y volumetrías para este fin, en el caso ser necesario pruebas a dichos mejoramientos se incluirá el concepto y que incluye el costo por esta actividad; del mismo modo esta estarán en el apartado de Muros Mecánicamente Estabilizados de la forma E7.
- En caso de existir instalaciones especiales que interfieran con los Muros Mecánicamente Estabilizados se incluirá dicha especificación indicando las actividades para ello, la unidad podrá ser por pieza o volumétrica del mismo modo estará en el apartado de Muros Mecánicamente Estabilizados en la forma E7.

#### 4. PROYECTO EJECUTIVO

Todos los planos generados para entregarse como proyecto ejecutivo, sin importar que tipo de planos sean (planos de construcción, despiece, procedimiento constructivo, etc.), llevarán un recuadro de bitácoras de cambios y un recuadro de control de emisión e identificación, cumplirá, sin importar su distribución, con las siguientes características mínimas:

R E V I S I O N E S					
REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA
a)	b)	c)			

Figura 48.- Recuadro de bitácora de cambios

- a) Número de revisión: identifica el número de revisión del plano.
- b) Descripción: se realizará una breve descripción de las modificaciones realizadas o el motivo de la revisión correspondiente.
- c) Fecha: se indicará la fecha en la que se realizó la revisión del plano.
- d) Título de proyecto: se indicara el título de proyecto con un nombre breve, para identificar el proyecto.
- e) Título de plano: cada plano tendrá un nombre diferente en este rubro, ya que podrán ser planos generales de ubicación de muros, detalles generales y particulares, perfiles de muros, etc.
- f) Numero de plano: para controlar el orden de los planos, se recomienda que se indique la paginación de los planos con el siguiente formato: 1 de 9, 2 de 9, etc.
- g) Layout: a cada plano que se genere se le deberá asignar un diferente nombre de layout y en éste también indicar la revisión en la que se generó.
- h) Nombre del archivo: será el nombre que se le dará al plano y con el cual se identificará.
- i) Acotaciones: indicar las unidades que se utilizaron en el plano.
- j) Revisión: identifica el número de revisión del plano.
- k) Dibujó: se indicarán las iniciales de la persona encargada del dibujo y construcción de los planos, se sugiere el uso de mayúsculas y un tamaño de letra proporcional al tamaño del plano y visible para quien haga uso del plano.
- l) Diseñó: se indicarán las iniciales de la persona encargada del diseño de los muros mecánicamente estabilizados, se sugiere el uso de mayúsculas y un tamaño de letra proporcional al tamaño del plano y visible para quien haga uso del plano.
- m) Revisó: se mostrarán las iniciales de la persona que revisó tanto el diseño de los MME y el dibujo de los planos, se sugiere el uso de mayúsculas y un tamaño de letra proporcional al tamaño del plano y visible para quien haga uso del plano.
- n) Aprobó: se mostrarán las iniciales de la persona encargada de revisar, verificar y aprobar el contenido de los planos tanto como en el diseño como en el dibujo y construcción de planos, se sugiere el uso de mayúsculas y un tamaño de letra proporcional al tamaño del plano y visible para quien haga uso del plano.

- o) Escala: identificación de la escala utilizada en los planos, si varios de los detalles cuentan con escalas diferentes, la escala se deberá indicar en cada uno de estos.

PROYECTO:		<b>d)</b>	DIBUJÓ:	<b>k)</b>
NOMBRE DEL PLANO:		<b>e)</b>	DISEÑO:	<b>l)</b>
Nº. DE PLANO		<b>f)</b>	REVISÓ:	<b>m)</b>
			APROBÓ:	<b>n)</b>
LAYOUT	NOMBRE DEL ARCHIVO	ACOTACIONES:	REVISIÓN	ESCALA :
<b>g)</b>	<b>h)</b>	<b>i)</b>	<b>j)</b>	<b>o)</b>

Figura 49.- Recuadro de control de emisión e identificación

#### **4.1. Planos de construcción**

Los planos de construcción, cumplen una función muy importante, ya que sirven como guía para el personal de obra y su elaboración requiere de un gran cuidado y meticulosidad por parte del ingeniero a cargo. Se dividirá la estructura de los planos en los siguientes apartados:

- a) plano general con ubicación de muros,
- b) detalles generales y particulares
- c) perfiles de muros,

##### **4.1.1. Plano general con ubicación de muros**

El plano general contiene la ubicación de los muros y respecto al orden de los planos, es recomendable sea el primero en la numeración de los planos. Los elementos principales que contendrá el plano general serán:

- a) Notas generales
  - Dentro de las notas generales se indicarán las unidades de las acotaciones y escalas en:
    - Perfiles de muros
    - Detalles
    - Plantas
    - Elevaciones

Se indicará el significado de la nomenclatura que se use dentro de los planos, de acuerdo a la patente o sistema empleado y recomendaciones que el cliente debe realizar como:

- Verificación de niveles y cadenamientos en campo.
- Verificación del cumplimiento de la capacidad de carga del suelo de cimentación para los muros, sin embargo, si el suelo no cuenta con la capacidad de carga mínima se realizará un mejoramiento que recomiende Mecánica de Suelos.

Dentro de las notas generales, la empresa encargada de realizar el proyecto indicará los lineamientos y alcances que garantice el proyecto.

En la sección de las bases de diseño, se tendrán que incluir los límites y propiedades del material de relleno sustentado con especificaciones de la AASHTO, FHWA o alguna autoridad reconocida.

Finalmente, se indicará el área de los perfiles de muros que se están diseñando.

- b) Croquis de localización

Se recomienda que el primer plano muestre la planta general del proyecto y haga énfasis en las siguientes indicaciones:

- Kilometrajes de inicio y término del muro.
- Kilometrajes de puntos de control.
- Kilometraje del caballete, cargadero o alguna estructura que esté involucrada con los muros mecánicamente estabilizados.
- Indicar si existe alguna estructura importante que influya en el diseño de los MME o que el ingeniero de proyecto considere que es importante indicar su ubicación en los planos.

c) Detalles específicos del plano general

Los planos tendrán que incluir el tipo de paramento, el tipo de refuerzo que se utilizó en el sistema y toda la nomenclatura necesaria para que el constructor o cualquier persona ajena al diseño de muros mecánicamente estabilizados sean capaces de interpretar los planos.

Dentro de la estructura de los planos, los detalles cumplen una función de vital importancia, los más importantes son:

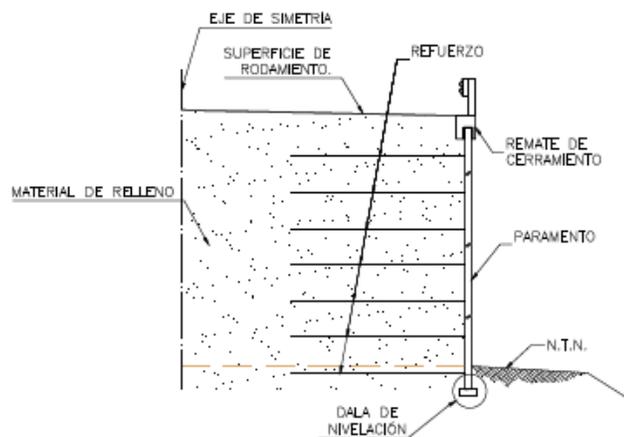
- Detalle de dala de nivelación: es responsabilidad del ingeniero de proyecto indicar en una sección transversal el f'c del concreto, el nivel de desplante y las dimensiones de la dala.
- Detalle de montaje del paramento: en este detalle, se mostrará gráficamente como se acomodarán los elementos que conforman el paramento, las dimensiones de éstos y la separación que tendrán en caso de que el nivel de desplante este en forma escalonada, se recomienda realizar cortes horizontales y verticales para mostrar con mayor detalle y énfasis la interacción entre los elementos del paramento y la junta de neopreno o algún material que tenga la función de permitir y controlar los movimientos que se llegasen a producir entre dos partes de la estructura, ya sean debidos a variaciones de temperatura y humedad y/o movimientos externos.

#### **4.1.2. Detalles generales y particulares**

Todos los planos tendrán detalles generales que permitan una correcta interpretación de éste, y si se requiere se encontrarán detalles particulares dependiendo de la complejidad del proyecto.

Los detalles más comunes son:

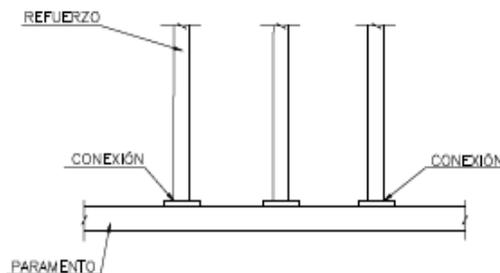
- Secciones transversales: se mostrará la sección típica del muro, en un corte transversal al muro, este detalle mostrará si el refuerzo es back to back o es independiente al refuerzo del otro lado del paramento, también expondrá el nivel de desplante del muro, la o las diferentes longitudes de refuerzo que pueda presentar el muro, el paramento de concreto, las conexiones, el remate de cerramiento, taludes y todo lo que forme parte del corte de la sección transversal.



SECCIÓN TRANSVERSAL

Figura 50.- Detalle general de una sección transversal

- Colocación del sistema de refuerzo: se tendrá que agregar una vista en planta acerca de la interacción del paramento, la conexión y el refuerzo, para que el personal de obra conozca la forma en la que se debe de realizar la colocación del refuerzo. Es conveniente que se indiquen todos los elementos que forman parte de este detalle.



COLOCACIÓN DEL SISTEMA DE REFUERZO

Figura 51.- Detalle de colocación del sistema de refuerzo

- Detalle de geometría de elementos: se tendrá que incluir todos los elementos que interactúen con el M.M.E. como el remate de cerramiento, postes, defensas, etcétera e indicar las dimensiones de cada elemento o distancias de vital importancia para la construcción del proyecto.
- Secciones de cálculo: en este detalle se mostrará de una forma breve y concisa el número de capas que existen a lo largo del perfil del muro, el tipo de refuerzo y características específicas que deberá contener cada capa. Se recomienda el uso de tablas para mostrar este detalle, sin embargo dependerá del diseño, del proyectista y del sistema de refuerzo.

Respecto a los detalles particulares, dependerán de cada proyecto, de su complejidad, características específicas del cliente y del criterio del ingeniero de proyecto.

**4.1.3. Perfil del (de los) muro (s)**

El perfil de los muros, se tendrá que acomodar dentro de los planos de tal manera que se entienda la continuidad de éste, por lo que se recomienda que si el perfil se corta en varios segmentos y cada uno se acomoda en un plano

diferente, indicar el corte y la continuidad del muro con una línea y el enunciado "Línea de ensamble en el plano X de Y ", siendo X el número del plano donde el segmento del perfil del muro está acomodado y Y el número total de planos; si los segmentos del perfil se distribuyen en el mismo plano se sugiere que se inserte la línea de corte, con el enunciado " línea de ensamble en este plano" y en la parte inferior de la línea de corte se tendrá que poner una letra mayúscula, la cual debe de tener relación con el siguiente segmento del corte del perfil y la misma letra mayúscula agregando un apóstrofe. (Las letras deben seguir el orden alfabético, para que se identifique con que segmento del perfil continúa)

Se tendrá que indicar en los perfiles de los muros lo siguiente:

- Nivel tope de muro: es el nivel, en el cual el paramento alcanza su altura máxima.
- Nivel de rasante: es el nivel de la carpeta de rodamiento.
- Nivel inferior de faldón: es el nivel inferior donde termina el remate de cerramiento.
- Nivel superior de remate: es el nivel más alto del remate.
- Kilometrajes a lo largo del perfil.
- Elevaciones del nivel tope de muro.
- Elevaciones de la dala de nivelación.
- Elevaciones del nivel del terreno natural.
- A lo largo del perfil se tendrá que indicar que segmento del perfil pertenecen a la misma sección de cálculo y las longitudes de los elementos del paramento.
- Indicar si existe algún elemento importante de mencionar para la construcción de los muros, como postes, dala de nivelación, obras de drenaje, estructuras que interfieran con los muros, etc.

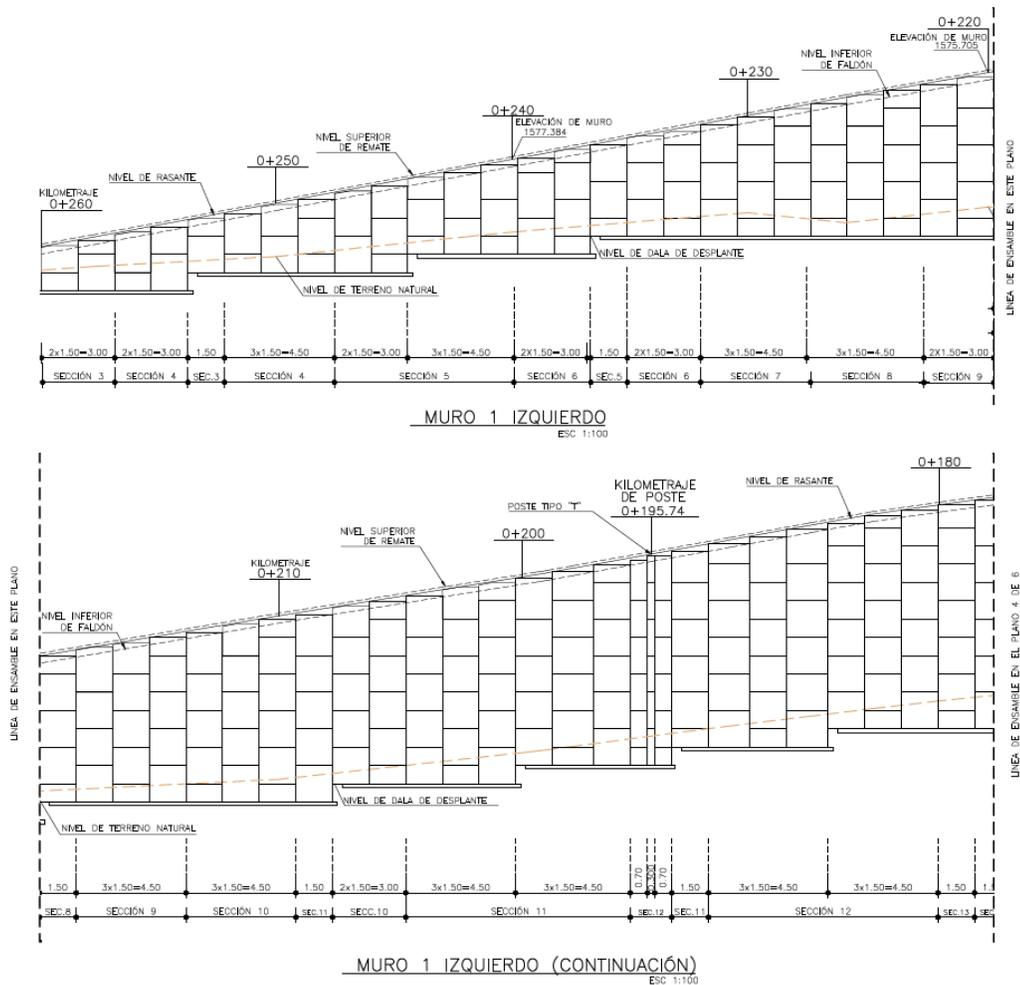


Figura 52.- Representación gráfica de los diferentes cortes del perfil del muro

#### 4.2. Planos de procedimiento constructivo

Los planos de procedimiento constructivo son normas para el montaje y construcción de un muro mecánicamente estabilizado, estos planos dependerán del tipo de refuerzo y las siguientes recomendaciones son de aplicación general. Cuando la estructura a montar tenga alguna especificación especial será definida en los planos del proyecto.

Los planos de procedimiento constructivo se dividirán en las siguientes etapas:

1. Operaciones previas al montaje de la estructura
 

Antes de realizar el montaje se necesita realizar la planeación de éste, se sugiere que en el plano de procedimiento constructivo se indique lo siguiente:

  - Tipo de organización: la ejecución de los muros mecánicamente estabilizados debe ser identificada como una obra de movimiento de tierras. El rendimiento en el montaje del paramento y la colocación de los refuerzos dependerá directamente de una buena organización del movimiento de tierras.
  - El espesor de las capas de relleno está determinado por las recomendaciones de terracerías y podrá ajustarse a la distancia vertical entre los refuerzos y el volumen de cada una de las capas

viene determinado por la longitud del muro y la longitud del refuerzo.

- Estimación del equipo necesario para el montaje: es conveniente indicar el equipo humano y maquinaria que se considera necesario para la ejecución del montaje del muro mecánicamente estabilizado.

2. Elementos necesarios para el muro mecánicamente estabilizados

En esta sección del plano de procedimiento constructivo, se hará mención de todos los elementos materiales que son necesarios para que se lleve a cabo el montaje del muro.

Dentro de esta sección se sugiere mostrar dibujos de los elementos que el ingeniero de proyecto considere que es de suma importancia indicar en el plano, los dibujos pueden ser diferentes tipos de vistas de un elemento en la etapa de montaje, elementos con sus dimensiones y secciones transversales o longitudinales, etc.

Con todos los elementos que se mencionarán en el plano de procedimientos constructivos se deben realizar todas las operaciones necesarias de: descarga, acopio, montaje, reglaje y colocación de refuerzos.

3. Rendimiento

Es importante hacer mención del rendimiento normal del montaje, para que el cliente y las personas que se encuentran en obra, conozcan la cantidad de metros cuadrados que se pueden construir en una jornada.

En condiciones aceptables de acceso a la obra y de longitud de la misma, puede cifrarse entre 40 y 50  $m^2/día$  de paramento terminado.

4. Descarga y acopio de los elementos

Se aconseja disponer de un espacio para acopiar o estibar los elementos y paneles prefabricados, para prever posibles inconvenientes derivados fundamentalmente del transporte.

5. Transporte del paramento al tramo

Se tendrá que considerar un acceso adecuado a la obra para la llegada y descarga de los paneles del paramento y en los planos de procedimiento constructivo se recomienda indicar como se deben de almacenar los elementos que conforman el paramento que formarán parte del muro mecánicamente estabilizado y todos los requisitos necesarios para lograr el mejor cuidado de éstas.

6. Operación de montaje

Las operaciones de montaje pertenecen a una secuencia de actividades para obtener como resultado final la construcción de un muro mecánicamente estabilizado. Se recomienda que dentro de los planos de procesos constructivos se describa detalladamente el proceso que se tendrá que llevar a cabo para las siguientes actividades y si es necesario incluir imágenes o cualquier elemento que se preciso para el entendimiento de las operaciones de montaje:

- Excavación
- Dala de nivelación
- Empotramiento del muro mecánicamente estabilizado
- Colocación de los paneles
- Colocación de apoyos de neopreno
- Juntas (malla, geotextil, etc.)

- Plomeado
- Nivelación del panel
- Terraplenado
- Colocación del refuerzo
- Nivelación del panel
- Notas generales o notas particulares

#### **4.3. Planos de seguridad**

Los planos de seguridad tendrán como función guiar, orientar, delimitar áreas, prevenir y organizar a un conjunto de personas dentro del lugar donde se llevará a cabo la construcción de los muros mecánicamente estabilizados y evitar que surjan problemas, accidentes o se realicen actividades sin las medidas de seguridad correspondientes.

Estos planos se entregaran y estudiaran antes de comenzar la construcción de los muros mecánicamente estabilizados, para tomar las medidas de precaución necesarias y que en un futuro se eviten accidentes lo más que se pueda. Los elementos que formaran parte del plano de seguridad son:

- Antes de comenzar una obra, se elegirá e indicará el lugar que será el patio de fabricación.
- Lonas de seguridad: estarán ubicadas en todos los accesos que se tengan a la obra, y a que su finalidad es indicar el uso obligatorio de los dispositivos de seguridad. Dentro del plano de seguridad se recomienda que aparezca una imagen de la lona de seguridad y todo lo que esta contiene.
- Dispositivos de señalamiento: son elementos que se deben de instalar para impedir el desarrollo de una acción peligrosa. Es importante que la señalización de obra esté formada por: conos preventivos, cintas de seguridad, señales preventivas, trafitambos, indicaciones y señalamientos en obra para ubicar elementos importantes como el botiquín de primeros auxilios, extintores o indicar que el área es una zona de alto voltaje, no fumar en áreas restringidas, existe peligro de sustancias tóxicas, material inflamable, etc.
- Equipo de protección personal: es el conjunto de elementos y dispositivos diseñados específicamente para proteger al trabajador contra accidentes y enfermedades que pudieran ser adquiridas al ser el resultado de sus actividades de trabajo. Se determinará el equipo de protección que utilizaran los trabajadores en función de los riesgos de trabajo a los que se puedan estar expuestos por las actividades que desarrollan o por las áreas en donde se encuentran. Se recomienda que el plano de seguridad contenga la señalización de los equipos de uso obligatorio, para que el personal de obra se familiarice con estos y los identifique dentro de su área de trabajo.
- Independientemente de la función que realicen los trabajadores, todo el personal que ingrese a la obra necesitará usar casco de seguridad, chaleco y zapato de protección con casquillo y se tendrá que mencionar dentro de los planos de seguridad.
- Se sugiere describir detalladamente en los planos de seguridad la ergonomía en el lugar del trabajo, y se indicarán los lugares de trabajo, herramientas a utilizar y las tareas que se realizarán, con la finalidad de evitar accidentes y enfermedades de trabajo y al mismo tiempo optimizar las actividades del trabajador con el menor esfuerzo, fatiga y evitar el error humano.
- Si la construcción de un muro mecánicamente estabilizado, requiere un patio de fabricación, tendrán que describir detalladamente las especificaciones necesarias para la fabricación del elemento que se

necesite como su ubicación, nivelaciones, herramientas a usar, equipo de protección, dimensiones del terreno, maniobras de maquinaria pesada si es el caso, etc.

- Seguridad en la fabricación: una vez que se han cumplido con todos los requisitos para el patio de fabricación, se procede con la fabricación. Es conveniente mencionar el equipo de seguridad que el personal de obra necesita usar, una planta general con dimensiones importantes para una buena ejecución de la fabricación y se tendrán que identificar las diferentes áreas que intervienen como; área para lavado, área de carga y descarga, área de maniobras, etc.

- En los planos de seguridad se describirán todas las actividades que se realizarán en obra junto con todos los lineamientos de seguridad que se necesitan para ejecutar cada actividad de la mejor manera y evitar accidentes. Se incluirán recomendaciones o instrucciones que el personal de obra necesita saber para llevar el control de cada una de las actividades realizadas, se podrán apoyar con bitácoras, asignar responsables de actividades, indicaciones de equipos de seguridad a usar, constancias de habilidades, manuales y planos de seguridad, etc.

- En la mayoría de las obras de M.M.E., es necesario contar con un espacio de almacenaje, si se llegase a requerir es conveniente mencionar las características con las que debe contar el lugar (dimensiones de la zona, líneas divisorias, dispositivos de señalización, etc.) y los cuidados que se tendrán para almacenar o usar, ya sea herramientas, prefabricados, refuerzos, elementos de paramento, equipos, etc.

- Se evitará en todo momento la cercanía de elementos flameables con sustancia químicas.

- Se recomienda que exista una oficina que proporcione los servicios básicos (agua, luz) y tendrá que contar con extintor y botiquín de primeros auxilios para alguna emergencia que pudiese presentarse.

- El plano de seguridad tendrá que contar con un detalle de la planta, en la cual se pondrán localizar las salidas de emergencia, los sanitarios, las oficinas, primeros auxilios, estacionamiento, extintores, botiquines de primeros auxilios, planta generadora, tinaco de agua potable, tinacos de agua para consumo y todo lo que se considere necesario.

- La etapa de montaje del paramento, también estará incluida en los planos de seguridad y es de vital importancia que se describan todas las medidas de seguridad que sean necesarias en el momento del montaje, siguiendo el procedimiento constructivo de los muros M.M.E.

- Durante la etapa de montaje se tomarán las siguientes medidas de seguridad: acordonar el entorno de acción donde se realicen actividades con maquinaria y equipo, revisar que la maquinaria cuente con sus elementos de protección en las partes móviles antes de operarla, verificar que las plataformas de la maquinaria y equipo se encuentren libres de grasas y aceites para evitar caídas, los neumáticos no deberán de presentar grietas, incrustaciones o deformaciones, así como que se encuentre en alguna posición incorrecta, se colocarán señalamientos y se apoyará con bandereros para el control del tránsito de personas y de vehículos.

- Sendero peatonal: es de vital importancia en toda obra y con el fin de proteger al peatón, es conveniente ubicar el sendero peatonal lejos de cualquier zona de maniobras y de zonas donde se ponga en peligro constante la seguridad del peatón.

- Se recomienda que se presenten dibujos o plantas generales para describir cada una de las etapas mencionadas y de esta manera facilitar el entendimiento.

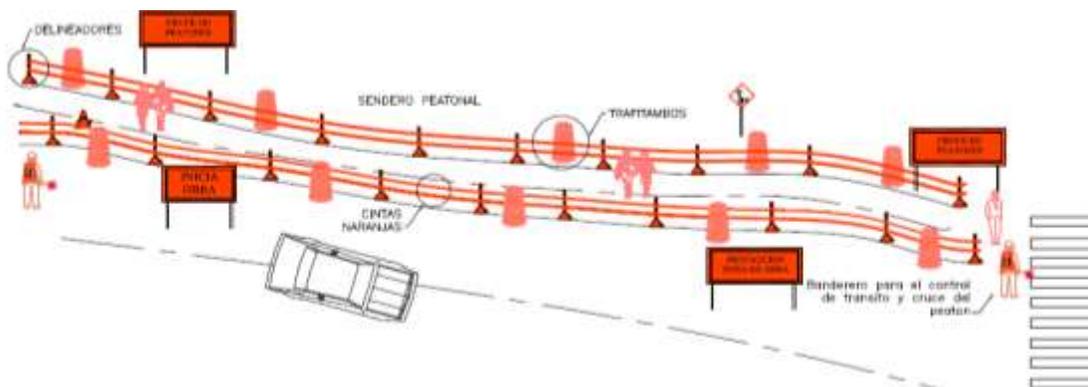


Figura 53.- Ejemplo de una planta general dentro de un plano de seguridad

#### 4.4. Memoria de cálculo

La memoria de cálculo es un documento donde se representará la información detallada de cómo se realizaron los cálculos de los muros mecánicamente estabilizados.

Se sugiere que todas las memorias de cálculo, en la portada contengan los siguientes elementos:

- Logo del contratista y/o logo del cliente
- Logo de la empresa que realizó el diseño de los muros mecánicamente estabilizados.
- Imagen representativa de la memoria de cálculo
- Título del proyecto al que corresponde la memoria de cálculo
- Recuadro de control de emisión, el cual contendrá el nombre de quien emitió, revisó y aprobó la memoria de cálculo, así como el número de proyecto y el código de documento.
- Recuadro de bitácora de cambios, la cual llevará el control del número de revisiones que se hayan realizado, una breve descripción de los cambios, el nombre de quien realizó los cambios y la fecha de emisión.

Se recomienda que las memorias de cálculo tengan un índice, en el cual se indique el título de los capítulos en los que se dividirá la memoria de cálculo y el número de página en donde empieza el contenido de dicho capítulo, por lo que es de vital importancia que todas las hojas de la memoria de cálculo estén enumeradas.

El contenido mínimo, que se recomienda, para la memoria de cálculo es:

- Introducción: se realizará una breve descripción de que son y cómo se comportan los muros mecánicamente estabilizados, de la misma manera se mencionaran las especificaciones, normas vigentes y software que se utilizaron para el diseño de los muros mecánicamente estabilizados.
- Consideraciones de diseño: se describirán todos los elementos que influyen en el diseño de los M.M.E., como dimensiones de la estructura, factores que se usaron para la estabilidad externa, consideraciones para la capacidad de carga y estabilidad en el desplante, cálculo de cargas para diseño por estabilidad interna y requerimientos para la vida de diseño.
- Interpretación de los cálculos: en este apartado, se describirá el procedimiento de cálculo para garantizar la estabilidad de los muros mecánicamente estabilizados. Se recomienda que los siguientes requisitos se describan minuciosamente:

- Tipo de estructura: se mencionará la vida de servicio del muro mecánicamente estabilizado y todas las características del sitio donde el muro se vaya a construir.
  - Características del refuerzo y la conexión: es conveniente describir el material de refuerzo y el de la conexión, las normas con las que cumplen y todas las propiedades de los materiales, así como con que certificados de calidad cuentan.
  - Características del paramento: se indicará la resistencia del concreto y del acero que se uso o la resistencia del material que constituya al paramento y todas las características del paramento.
  - Datos sísmicos: es de vital importancia hacer referencia de los coeficientes sísmicos que se usaron para el diseño de los muros mecánicamente estabilizados.
- Tipo de estructura: se describirán detalladamente todas las características geométricas del muro mecánicamente estabilizado, las propiedades del suelo, propiedades del material de relleno y la presión de la tierra.
  - Estabilidad: tendrá que haber un apartado, donde se hable y se garantice la estabilidad externa e interna de los muros mecánicamente estabilizados, los estados límites que se consideraron, empujes, tensión en los refuerzos, deslizamientos, volteo, adherencia, factores de seguridad y todos los factores que influyan en la estabilidad interna y externa de los muros mecánicamente estabilizados.
  - Cálculos para el diseño de muros mecánicamente estabilizados: el ingeniero de proyecto tendrá que incluir en la memoria de cálculo los resultados, producto de un software, hoja de cálculo o de alguna herramienta que se haya utilizado para justificar el diseño de los muros mecánicamente estabilizados.
  - Anexos: si se requiere se incluirá un apartado de todos los anexos que formen parte de la memoria de cálculo.

## 5. CONSTRUCCIÓN

### 5.1. Introducción

La Construcción de Muros Mecánicamente Estabilizados (MME) es relativamente simple y rápida. La secuencia de construcción se compone principalmente de la preparación del desplante, instalación de los elementos que componen el paramento, colocación y compactación de relleno, tendido del refuerzo en su posición (puede ser necesaria tensión del refuerzo en los geosintéticos). La mayoría de los proveedores de materiales proporcionan capacitación para la construcción de sus sistemas.

Existen algunas consideraciones especiales de construcción, de las cuales deben estar conscientes tanto el diseñador, personal de la construcción y el equipo de inspección para evitar problemas potenciales en el rendimiento y estabilidad de los M.M.E. Estas consideraciones se refieren al tipo de sistema que se va a implementar, a las condiciones específicas del sitio, al material de relleno utilizado y a las especificaciones del paramento.

### 5.2. Presentación de proyecto ejecutivo para construcción de M.M.E.

Es altamente recomendable que antes de la construcción de la estructura, el constructor, la supervisión y todos trabajadores relacionados con la construcción del Muro Mecánicamente Estabilizado se familiaricen con los siguientes elementos:

- a) Los planos y especificaciones.
- b) Las condiciones del lugar relevantes a los requerimientos de la construcción (Geométricas, topográficas, geotécnicas, obras e instalaciones existentes o a construir, presencia de escurrimientos y otros aspectos generales que intervengan en la construcción de la estructura).
- c) Características de los materiales (refuerzos, relleno, etc).
- d) Procedimientos constructivos (dependiendo del sistema de muro a construir) y de seguridad.

La presentación de los planos de construcción, deberán ser lo más claro, detallados y desglosados posibles, para facilitar la interpretación y obtener un buen proceso de construcción del M.M.E.

#### 5.2.1. Planos de procedimiento constructivo y seguridad

Antes de la construcción del M.M.E., es recomendable que el constructor tenga los conocimientos básicos y teóricos del sistema a construir, con el propósito de facilitar la interpretación de los planos de proyecto y la correcta ejecución del mismo.

Además de contar con un conocimiento teórico y práctico acerca del sistema de contención a construir, también tendrá conocimiento sobre la información de campo, tales como:

- Condiciones topográficas
- Alteración y movimientos de tierras realizados en la zona
- Localización de bancos de materiales de relleno para el M.M.E.
- Accesos, cercanos y en buenas condiciones a la zona de la obra
- Clima y condiciones sociales

- Ubicación de planta de prefabricado de paneles
- Proveedores

#### **5.2.1.1. Planos de procedimiento constructivo**

Los planos de procedimiento constructivo, serán claros, breves y precisos. Conteniendo la descripción clara de los pasos a realizar para la construcción de los M.M.E. de ser necesario se anexaran diagramas y dibujos, los cuales muestren las maniobras y acciones a realizar, para la correcta ejecución del sistema.

Los planos de procedimiento constructivo pueden variar de acuerdo al sistema de Muro Mecánicamente Estabilizado que se construya. Antes de proceder a la ejecución del proyecto se tomaran en cuenta las siguientes consideraciones importantes:

- Comprobar las condiciones del sitio y las necesidades de desplante.
- Preparar los desplantes de acuerdo al proyecto.
- Dala de nivelación (comprobar el nivel y alineación)
- Verificar accesibilidad del sitio
- Cotejar límites de excavación
- Desalojo de agua durante la construcción
- Revisar las características de drenaje; filtraciones, arroyos adyacentes, lagos, etc.
- Revisar las etiquetas de refuerzo para verificar si coinciden con los documentos de certificación.

Información importante en los procedimientos constructivos:

- Planeación y control del equipo de trabajo.
- Contar con todos los materiales, equipo y herramienta necesaria.
- Transporte, descarga y acopio de elementos de refuerzo.
- Transporte, descarga y acopio de paneles prefabricados.
- Procesos de excavación.
- Detalles de colado y descripción de la dala de nivelación.
- Colocación de las primeras filas de paneles (Procedimiento de izaje y montaje, diagramas y dibujos ilustrativos y recomendaciones adicionales),
- Detalles y elementos colocados en juntas de paneles.
- Plomeado y estabilidad de paneles antes de colocar el elemento de refuerzo y el relleno.
- Procedimiento de colocación de elementos de refuerzo y conexión con panel.
- Procedimiento de terraplenado, indicando los espesores de capas de compactación y características del mismo. También se indicara el tipo de equipo y herramienta que se usara para la ejecución de estos trabajos.
- Procedimiento para garantizar el drenaje del muro.
- Colocación y montaje del resto del muro.
- En caso de ser necesario se describirán los procedimientos de obras complementarias, adicionales y/o especiales que intervengan en la construcción del M.M.E. o que complementen el muro.

En muchos casos es responsabilidad de la empresa que brinda el servicio del M.M.E., quien proporciona esta información. De lo contrario, el constructor responsable tendrá que realizar estos procedimientos.

#### 5.2.1.2. Planos de seguridad

Los planos de seguridad indicaran los procedimientos, equipos, accesorios, herramientas, normas y reglamentos que garanticen la seguridad de los trabajadores y personas involucradas en la ejecución de los trabajos.

Es importante procurar el bienestar y seguridad de los trabajadores, por lo tanto se presentara esta información antes del inicio de los trabajos.

Para la construcción de los M.M.E. se contarán con dos áreas de trabajo: el lugar donde se prefabricaran los paneles (patio de prefabricados) y la zona de montaje. Estas dos áreas de trabajo cumplirán con ciertas especificaciones que garanticen la seguridad y prevención de accidentes.

Para garantizar la seguridad en la construcción del M.M.E. se tomaran las siguientes medidas:

- Se colocaran lonas de seguridad, en las cuales se indique el reglamento interno.
- Se instalaran todos los dispositivos de señalamiento para prevenir el desarrollo de un evento peligroso. es importante contar con la señalización de obra especificada en el Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad de la SCT. La función de estos dispositivos es limitar los espacios, ofreciendo protección al trabajador y al transeúnte.
- También se colocaran indicaciones y señalamientos en áreas de restricciones y prevenciones, tales como el botiquín de primeros auxilios, teléfono celular, zonas de hidratación y descanso, zona de extintores, alto voltaje, peligro de sustancias toxicas, etc.
- En lo que se refiera al equipo de protección personal, los trabajadores contarán con los elementos y dispositivos diseñados específicamente para protegerlo contra accidentes y enfermedades que puedan ser causados por factores y agentes generados por actividades de trabajo. Se determinara el equipo de protección idóneo a emplearse en función de los riesgos de trabajo a los que puedan estar expuestos y del área donde se encuentran. El equipo de uso obligatorio para el trabajador ser:
  - Casco de seguridad no metálico con barbiquejo.
  - Guantes de seguridad.
  - Orejeras y/o tapones auditivos.
  - Botas de seguridad con casquillo metálico.
  - Gafas de seguridad.
  - Arnés de seguridad.
  - Chaleco reflejante.
  - Faja sacrolumbar.
  - Mascarillas.
  - Otros equipo que se considere importante.
- Se tomaran medidas preventivas cuando se realicen trabajos en espacios confinados.
- El equipo, maquinaria y herramientas de trabajo, estará ubicado en el lugar adecuado.
- La maquinaria contará con alarma de reversa.
- El patio de prefabricados se ubicara en un lugar firme y nivelado para realizar la correcta fabricación de paneles.
- Se tomaran medidas preventivas en la fabricación de paneles tales como:

- Patio de grandes dimensiones, en el cual se permitan maniobras de camiones y grúas para manipulaciones de paneles.
  - Patio nivelado.
  - Existirán espacios entre paneles, tanto en la zona de colados, como también en la zona de estiba.
  - Se seguirán los lineamientos indicados para el desmolde de los paneles así como la prevenciones para el transporte, con personal capacitado y con el equipo adecuado.
  - Para el lugar de almacenaje, se seleccionara un lugar firme y nivelado y no se estibarán mas de 5 piezas, para evitar fracturas en paneles.
- Se tomarán medidas preventivas en el montaje de los paneles, siguiendo el procedimiento constructivo para M.M.E., empleando el equipo, herramientas y maquinarias adecuadas para la ejecución de estos trabajos.

Es de vital importancia en toda obra y con el fin de proteger al peatón, ubicar un sendero peatonal, lejos de cualquier zona de maniobras y de zonas donde pongan el peligro constante la seguridad del peatón.

Es responsabilidad del constructor tomar en cuenta estas medidas y en caso de ser necesario, incorporar otras medidas que brinden una mayor seguridad de los trabajadores y el transeúnte.

#### **5.2.2. Especificaciones del sistema del M.M.E.**

Es importante que el responsable lea las especificaciones y se familiarícese con:

- Especificaciones de los materiales
- Los procedimientos de construcción
- Procedimientos de compactación del suelo
- Tolerancias en alineamiento
- Criterios de Aceptación/Rechazo

#### **5.3. Trabajos preliminares**

Antes de la construcción, el personal responsable de la ejecución de los trabajos realizará los siguientes trabajos:

1. Conocimiento de la zona de trabajo
2. Localización del patio de prefabricados
3. Localización del banco para material de rellenos.
4. Levantamiento topográfico de la zona para conocer la configuración del terreno actual y real.
5. Desmonte y despalme de la zona de trabajo.
6. Cuando se construyan muros para acceso a estructuras, tales como puentes, pasos vehiculares o similares, estas estructuras estarán construidas, para el correcto montaje de los paneles.
7. Excavaciones para dala de nivelación (de preferencia).
8. Cortes y movimientos de tierra, para la colocación de elementos de refuerzo longitudinal.

Previo a la planeación de los trabajos preliminares y de construcción, se debe contar con un proyecto ejecutivo, revisado y aprobado por las instancias correspondientes.

### 5.3.1. Distribución física de los elementos (layout)

La elaboración del Layout, consiste en la división de las áreas de trabajo en la zona o patio de prefabricación de los paneles de concreto para los M.M.E.

Se delimitaran las áreas de trabajo para tener un buen proceso de fabricación de paneles y un mejor control de calidad.

Para la elaboración del Layout se delimitaran las siguientes áreas de trabajo:

- Área de habilitado de acero de refuerzo o mallas.
- Almacén de armados.
- Área de colado de paneles.
- Estiba y almacén de paneles.
- Comedor/cocina.
- Enfermería.
- Bodega.
- Estacionamientos.
- Área para residuos y materiales peligrosos.
- Almacenamiento de desperdicios.
- Baños.
- Accesos (Tendrán la amplitud suficiente para maniobras de camiones que suministren concreto, equipo de desmolde y transporte, así como de otros equipos que se puedan emplear).
- Caseta de vigilancia.
- Oficinas.
- Se anexaran y/o indicaran otras áreas que el responsable de los trabajos considere importantes.

### 5.3.2. Herramientas y equipo

Para que se lleve a cabo en buen término la construcción del M.M.E. es preferible conocer el equipo necesario y conocer los proveedores del mismo en caso de que no se cuente con él.

En los apartados siguientes se menciona una breve explicación del equipo que se requerirá durante las diferentes etapas de construcción de los Muros Mecánicamente Estabilizados.

**Equipo para tendido de material.** Al colocar el material de relleno para terraplenar el Muro Mecánicamente Estabilizado, este debe ser extendido para su compactación y dejar una superficie plana para la colocación del refuerzo.

En caminos el equipo que se emplea para el tendido de materiales para conformación de terraplenes es la motoconformadora. Para los muros Mecánicamente Estabilizados, se recomienda el uso de este equipo tal como se muestra en la Figura 54.



Figura 54.- Tendido de material de relleno con motoconformadora

**Equipo de riego.** Tal y como se realiza en caminos, las terracerías llevan el mismo proceso de compactación, por lo cual es importante el riego de la capa a compactar, para alcanzar la humedad óptima, de acuerdo a lo indicado en las normas SCT.

Se recomienda que el riego del material se realice con equipo de aspersión para la mejor distribución de la humedad del suelo.

**Equipo de Compactación.** Con la excepción de la zona de 1,00 m directamente detrás de los elementos del paramento, rodillos grandes, lisos y vibratorios se utilizan generalmente para obtener la compactación deseada como se muestra en la Figura 55.a.

Rodillos compactadores de pata de cabra no se permitirán a causa de posibles daños a los refuerzos. Al compactar arenas uniformes de medias a finas (más del 60 por ciento pasando la malla N ° 40) se utiliza un rodillo estático del tambor liso o un rodillo ligero vibratorio. El uso de equipos de gran compactación vibratoria con este tipo de material de relleno hará difícil el control de la alineación del muro.

Dentro de 1 m del paramento del muro, se usara un pequeño tambor simple o doble, rodillos vibratorios manuales o compactadores de planchas vibratorias, como se muestra en la Figura 55.b. La colocación del material de relleno cerca del paramento no quedará detrás del resto de la estructura por más de un nivel. La mala colocación de relleno y compactación en esta área en algunos casos ha dado lugar a un vacío vertical en forma de chimenea inmediatamente detrás de los elementos del paramento.

Dentro de esta zona de 1 m, el control de calidad se mantendrá por una especificación de métodos tales como tres pasadas de un compactador ligero de tambor. Es recomendable emplear rellenos de mayor calidad cerca del paramento del muro, de modo que las propiedades deseadas se pueden lograr con un menor esfuerzo de compactación.



Figura 55.- Equipo de compactación, se muestra: a) Equipo grande sólo permitido si está alejado del paramento; b) Equipo ligero dentro del 1 m de separación del paramento

Un esfuerzo de compactación excesivo o uso de equipos muy pesados cerca de la cara del muro podría dar lugar a un movimiento excesivo y desplome o daño estructural.

Una compactación inconsistente y una compactación deficiente causada por insuficiente esfuerzo de compactación o el permitir que el contratista "compacte" el relleno con camiones u otro tipo de maquinaria no apta, dará lugar a desajustes graves y problemas de asentamiento y de estabilidad interna del Muro Mecánicamente Estabilizado, lo cual no debe permitirse. Las inundaciones del relleno para facilitar la compactación no deben ser permitidas.

Las pruebas de control de compactación del material de relleno reforzado se deben realizar de forma regular durante el proyecto de construcción. Una frecuencia mínima de un ensayo en la zona de suelo reforzado por cada 1,5 m de altura del muro por cada 30 m (100 pies) de la longitud es recomendada.

**Equipo para montaje de paneles prefabricados.** Para el montaje de los paneles prefabricados se usará equipo especializado, los cuales garanticen la seguridad de los trabajadores y el buen montaje de los paneles.

La colocación de paneles de mallas electrosoldadas, se puede realizar por los trabajadores, siempre y cuando no represente un riesgo para la seguridad del personal de la obra y la colocación adecuada de los paneles.

Para el caso de paramentos de concreto colados en sitio, no se empleará el mismo equipo de montaje que para los paneles prefabricados, ya que el armado y colado de este paramento se realizara en la obra, siguiendo el mismo procedimiento que el que se usa en un muro de contención de concreto armado.

Para el izaje y montaje de los paneles se recomienda usar grúas tipo HIAB, como se muestra en la Figura 56.



Figura 56.- Izaje y montaje de paneles prefabricados para M.M.E.

**Herramienta menor.** Se considerara la herramienta menor, como una herramienta de suma importancia, ya que con esta herramienta se realizaran trabajos menores por parte del personal que labore en la obra.

Durante el montaje y construcción del M.M.E. se presentaran trabajos menores, los cuales no requieran de grandes equipos ni herramienta especializada, por lo cual se deberá contar con herramienta menor necesaria, para efectuar estos trabajos.

### 5.3.3. Materiales

Los materiales se examinaran en el patio de colado (para sistemas con elementos prefabricados) y en el sitio. La aceptación del material se basa en una combinación de ensayos de materiales, certificaciones, y observaciones visuales.

En el sitio de proyecto el supervisor revisará cuidadosamente todos los materiales (elementos prefabricados del paramento, elementos de refuerzo, elementos de juntas verticales y horizontales, materiales para las juntas del paramento prefabricado o cuando se requiere colado en sitio, y el material para el relleno).

En el lugar, todos los componentes del sistema estarán adecuadamente almacenados y manipulados para evitar daños. El manual del proveedor de materiales de construcción contendrá información adicional sobre particularidades de los mismos.

#### 5.3.3.1. Elementos prefabricados de concreto.

En el patio de colado, el inspector se asegurará que los elementos del paramento están siendo fabricados de acuerdo con las especificaciones estándares de norma. Por ejemplo, se recomienda que los paneles de concreto prefabricados para el paramento se cuelen sobre una superficie plana, como se muestra en la Figura 57.



Figura 57.- Patio de colado para elementos prefabricados del paramento

Para minimizar la corrosión, es especialmente importante que los dispositivos de conexión no entren en contacto o estén unidos al acero de refuerzo del elemento del paramento.

Los elementos del paramento prefabricados entregados en el sitio del proyecto serán examinados antes de la erección. Los paneles podrán ser rechazados en base a las siguientes deficiencias o defectos:

- Resistencia a la compresión menor a los requisitos de la especificación
- Moldeado imperfecto
- Porosidades excesivas en el concreto
- Agrietamiento severo, astillado o cuarteado
- Cuando los paneles por especificación de proyecto lleven color y/o acabado se verificará la no variación del color
- Dimensiones fuera de tolerancia
- Fijaciones desalineadas

Es importante mencionar que los elementos de fijación además de revisarse que no estén desalineadas y con la separación especificada en los planos, es necesario, comprobar a través de una memoria de cálculo que sean capaces de soportar las tensiones a las que estarán sometidos.

Las siguientes dimensiones de tolerancias máximas se especifican usualmente para elementos del paramento de concreto prefabricado.

- Dimensiones en general (cuando existe junta) - 13 mm.
- Ubicación de los dispositivos de fijación- 25 mm
- Cuadratura del elemento - 13 mm entre diagonales.
- Acabado de la superficie - 1,3 - 2,0 mm en 1,0 - 1,524 m (superficie lisa).
- Acabado de la superficie - 5,2 - 7,94 mm en 1,0 - 1,524 m (superficie texturizada)

En caso de que la reparación sea posible en elementos del paramento dañados, se llevara a cabo a satisfacción de supervisión.

Para bloques modulares colados en sitio, es esencial que la resistencia a la compresión y la absorción de agua sea comprobada cuidadosamente y constantemente. Se mencionan a continuación las tolerancias dimensionales:

- Dimensiones en general -  $\pm 3,2$  mm (2/16")

- Altura de cada bloque -  $\pm 1,6$  mm (1/16")

#### 5.3.3.2. Elementos de refuerzo.

Elementos de refuerzo (tiras, malla, hojas) se entregaran en el sitio del proyecto bien sujetos o empaquetados para evitar daños (véase Figura 63). Estos materiales están disponibles en una variedad de tipos, configuraciones y tamaños (calibre, la longitud, estilos de productos).

Los elementos de refuerzo colocado en el macizo de tierra pueden ser:

- Metálico: Armaduras de acero galvanizado o sin galvanizar tipo barra y armaduras de acero galvanizado o sin galvanizar tipo malla.
- Sintético (Geosintéticos): Armaduras compuestas por geotextiles de polipropileno, polietileno o poliéster, armaduras de geomallas de alta densidad de polipropileno, polietileno, armaduras de PVC u otros plásticos.

El constructor, residente o responsable de la obra, verificará que el material esté correctamente identificado y revisara la designación especificada (AASHTO, ASTM, etc.). La verificación del material es especialmente importante para los geotextiles y geomallas ya que diferentes tipos de productos parecen similares pero que tienen diferentes propiedades.

El refuerzo de malla será revisado por área bruta, longitud, ancho y el espaciamiento de los miembros transversales. La longitud y el grosor serán revisados en los refuerzos metálicos. Muestras de geomallas o geotextil serán enviadas al laboratorio para realizar pruebas de verificación.

Los revestimientos de protección, tal como, la galvanización se verificara mediante agencias de certificación y se examinará en busca de defectos.

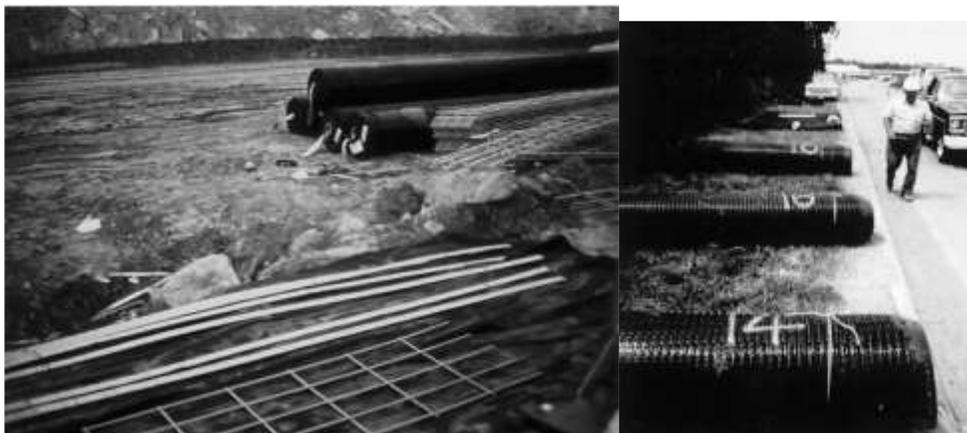


Figura 58.- Inspección de elementos de refuerzos

#### 5.3.3.3. Materiales para las juntas del paramento.

Los accesorios de apoyo (corcho, neopreno, etc.), relleno de juntas y cubierta de juntas (geotextil) estarán correctamente empaquetados para minimizar los daños de descarga y manipulación. Por ejemplo, se recomienda que el material de relleno de polímero y los geotextiles estén protegidos de la luz solar durante el almacenamiento.

Aunque estos artículos son a menudo considerados como artículos varios, es importante que el inspector reconozca que el uso del material equivocado o su

colocación incorrecta puede dar como resultado problemas significativos en la estructura.



Figura 59.- Colocación de geotextil y almohadillas de neopreno de juntas

#### **5.3.4. Ensayes de laboratorio del suelo de cimentación en etapa previa al montaje**

La necesidad de contar con las propiedades físicas del suelo tanto en la etapa de proyecto, como durante la ejecución de la obra, con datos firmes, seguros y abundantes respecto al suelo con el que se está tratando, ha obligado a realizar pruebas y sondeos en el lugar. Esta información se conocerá previo a la realización del proyecto, para que el proyectista tome en cuenta estas consideraciones para su trabajo.

Para la ejecución de estas pruebas, se deberá contar con un laboratorio en campo o llevar el material al laboratorio correspondiente para su análisis.

Se recomienda obtener las siguientes características y estudios de los suelos de desplante:

- Estratigrafía del suelo.
- Propiedades mecánicas e índice (ángulo de fricción, cohesión), granulometría, límites de consistencia.
- Capacidad de carga.
- Asentamientos.

##### **5.3.4.1. Sondeos verifcatorios**

Para fines de muestreo y conocimiento del subsuelo en general se emplearan métodos exploratorios, los cuales pueden ser:

- Pozo a cielo abierto con muestreo alterado o inalterado.
- Perforaciones con posteadora, barrenos helicoidales o métodos similares.
- Método de lavado.
- Método de penetración estándar.
- Método de penetración cónica.

El número, tipo y profundidad de los sondeos dependerá fundamentalmente de la magnitud del proyecto y del tipo de subsuelo que se presente.

El supervisor responsable de la obra estará siempre pendiente cuando se realicen excavaciones para observar y conocer el comportamiento que el suelo en general vaya revelando.

#### **5.3.4.2. Recomendaciones**

Es importante realizar pruebas y sondeos en el suelo de desplante, con la finalidad de conocer el comportamiento real del suelo ante la presencia del M.M.E. En algunos casos, cuando el suelo de cimentación no cumpla con la capacidad de carga exigida por el M.M.E., se recomienda realizar un mejoramiento del terreno. El mejoramiento tendrá que ser realizado y recomendado por el departamento de mecánica de suelos correspondiente.

En suelos con presencia de agua o nivel freático muy superficial, el muro mecánicamente estabilizado tendrá presencia de agua por el fenómeno de capilaridad, esta situación se tendrá que tomar en cuenta para el diseño del muro.

#### **5.3.5. Ensayes de laboratorio del material de relleno en etapa previa al montaje**

El relleno en los M.M.E. es el elemento clave para un desempeño satisfactorio. Tanto el uso del material adecuado como su correcta colocación son propiedades importantes. El material de relleno se especifica para cumplir con cierta graduación, plasticidad, y requisitos electroquímicos.

En función del tipo de contrato, las pruebas para asegurar el cumplimiento serán realizadas por el contratista o el propietario. Las pruebas llevadas a cabo antes de la construcción y periódicamente durante la construcción son destinadas a asegurar la calidad y a fundamentar la aprobación del material. Estas pruebas incluyen granulometrías, pruebas de índice de plasticidad a la tasa de un ensayo por cada 1500 m<sup>3</sup> de material colocado y siempre que la apariencia y/o cuando el comportamiento del relleno cambie notablemente.

Pruebas para los materiales de relleno:

- Granulometría (Norma ASTM D 422-63)
- Límites de consistencia (Norma ASTM D 4318-00)
- Obtención del ángulo de fricción interna mediante Prueba Triaxial (Norma ASTM D 20166-00, D 2850-95, D 4767-95 o de Corte Directo (Norma ASTM D 3080-98)).

#### **5.3.5.1. Materiales**

Los materiales para relleno en M.M.E. son suelos granulares que se utilizan para formar el cuerpo de los macizos, mediante su colocación y compactación adecuada. Estos materiales pueden ser gravas y arenas.

#### **5.3.5.2. Condiciones mecánicas**

A continuación se presentan los requisitos que cumplirá un material para ser considerado como relleno en un M.M.E., los cuales puede parecer que varían de acuerdo con lo establecido en la Norma AASHTO, sin embargo, esta diferencia en realidad es una especificación más concreta, ya que AASHTO establece un margen muy amplio para el material de relleno. Las características son:

- Ángulo de fricción interna del material mayor o igual a 34°.
- Tamaño máximo de partícula de 150 mm (6 ").
- Granulometría general del material de relleno (véase Tabla 23.)
- Coeficiente de uniformidad mayor a 2
- Límite líquido del material no mayor a 30%.
- Índice plástico no mayor a 6%.

**TABLA 23.- Granulometría para material de relleno del M.M.E.**

Apertura de la malla		% que pasa
3 ½	90 mm	100
¾	19 mm	70 - 100
No. 4	4,75 mm	30 - 100
No. 40	425 µm	15 - 100
No. 100	150 µm	5 - 65
No. 200	75 µm	0 - 15

**5.3.5.3. Condiciones electroquímicas**

Las características electroquímicas del material cumplirán con un conjunto de especificaciones, las que podrán variar de acuerdo al tipo de proyecto. Estas características son:

**Resistividad eléctrica.**

La resistividad eléctrica del suelo saturado (ASTM G 57) D será superior a:

- 1.000 Ω cm para obras secas.
- 3.000 Ω cm para obras saturadas.

**Actividad de iones de hidrogeno.**

El pH de la mezcla agua suelo estará comprendido entre 5 y 10.

**Contenido de sales solubles.**

La mezcla agua-suelo tendrá un contenido de iones cloruro y sulfato.

**Contenido orgánico.**

El relleno estará libre de todo contenido orgánico.

Además de las características mecánicas y físico químicas, el material de relleno, tendrá que cumplir con las características exigidas para sub-bases y, terraplenes.

**5.3.6. Fabricación de paramentos de concreto en sitio o en planta**

Previo a la fabricación de los paneles, se tendrá que contar con los planos de armados y especificaciones, diseñados de acuerdo a los requerimientos del proyecto. Se tendrán que cumplir con todas las especificaciones, espacios de fabricación, equipo y materiales.

**5.3.6.1. Habilidad de acero**

Se designara un área específica dentro del patio de fabricación para el corte, dobles y habilitado del acero.

El panel será diseñado para que soporte los esfuerzos horizontales presentados. Se recomienda colocar acero por temperatura, para evitar fracturas y fallas del panel; o sin acero, si se demuestra la no presencia de acero mediante una memoria justificativa o de control de calidad.

Los trabajadores contarán con la herramienta, equipo y material para la realización de estos trabajos.

**5.3.6.2. Colado de paneles**

Se designara un área específica dentro del patio de fabricación, para el colado de paneles. Esta área contará con el espacio suficiente para las maniobras del camión de concreto y el equipo de desmolde y transporte.

En los planos y procedimientos de construcción se indicaran las especificaciones del concreto y los requerimientos, elementos, equipo y herramientas necesarias para el colado de los paneles. Previo al colado se contara con el armado del acero de refuerzo.

**Instalación de Cimbra o Moldes.** Antes del colado se contara con la instalación de la cimbra (metálica o de madera). Se tendrán limpios los moldes de polvo, residuos u otras sustancias ajenas a este. Se colocará el producto desmoldante que se considere adecuado, pudiendo ser a base de parafinas, a base de aceite vegetal u otros. La aplicación del desmoldante se realizara siguiendo siempre la ficha técnica e instrucciones del fabricante.

Se hará la revisión de las geometrías de la cimbra o molde antes del colado, para evitar paneles descuadrados y prevenir problemas en el montaje.

**Vaciado de concreto.** El colado del concreto se realizará una vez que se haya autorizado el uso de cimbras o moldes. Dependiendo de la magnitud de la obra, el patio de fabricación podrá contar con servicios de laboratorio de control de calidad de concreto.

**Compactación o vibrado de concreto.** Se realizara la vibración del concreto para obtener un panel compactado con textura uniforme y superficie deseada en la cara visible.

La vibración del concreto se realizara en base a lo indicando en la norma *N-CTR-CAR-1-02-003/04 SCT*.

Cuando los dispositivos de fijación de los elementos de refuerzo y el panel sean metálicos, se deberá prever que no estén en contacto con el acero del panel para evitar problemas por corrosión.

Previo al colado, se dejarán preparaciones en el panel, para facilitar el izaje tanto para el desmolde, como para el montaje.

#### **5.3.6.3. Desmolde**

El desmolde se realizara con una grúa tipo HIAB, para el izaje adecuado del panel y evitar daños y fracturas. Es importante contar con la bitácora de la grúa para tener conocimiento sobre su funcionamiento. El operador responsable de la grúa está obligado a contar con una constancia que garantice sus conocimientos sobre la maquinaria empleada.

#### **5.3.6.4. Transporte**

Se recomienda realizar estos trabajos con una grúa tipo HIAB, ya que con este equipo se podrán realizar los trabajos correspondientes al desmolde, transporte y descarga de los paneles.

Se colocaran elementos que funcionen como almohadillas entre cada uno de los paneles, para evitar daños tanto en los elementos de fijación de los elementos de refuerzo, así como fracturas en los paneles. Se recomienda transportar 5 paneles como máximo por viaje, siempre y cuando el vehículo tenga la capacidad para transportar este peso. Los paneles estarán sujetos para evitar cualquier imprevisto en el trayecto del patio de prefabricados al lugar de montaje.

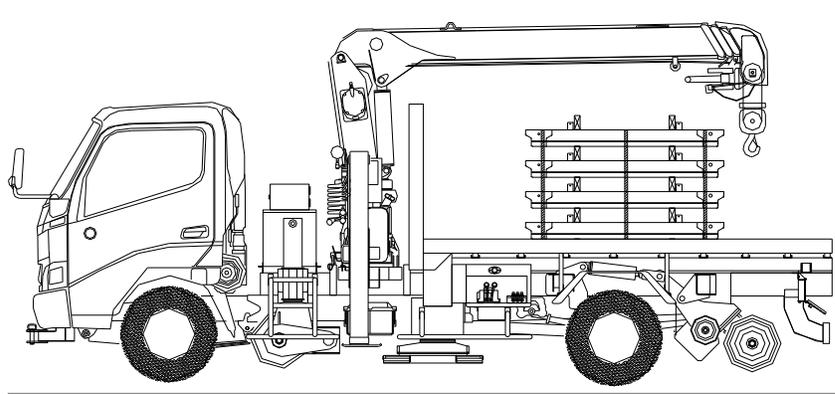


Figura 60.- Transporte de paneles prefabricados

#### 5.3.6.5. Estiba

Después de descimbrar los paneles prefabricados, se almacenarán en un área designada, para posteriormente transportarlos al lugar de montaje.

La zona en la cual se realice la estiba de los paneles será un lugar limpio, firme y nivelado, para proteger los paneles de manchas y daños.

No se podrán estibar más de 5 niveles de paneles para evitar daños en los niveles inferiores. Se tendrán que colocar elementos que funciones como almohadillas (polines, neopreno o similar) entre cada panel para evitar fracturas y daño en las conexiones ahogadas dentro de estos (véase Figura 61).

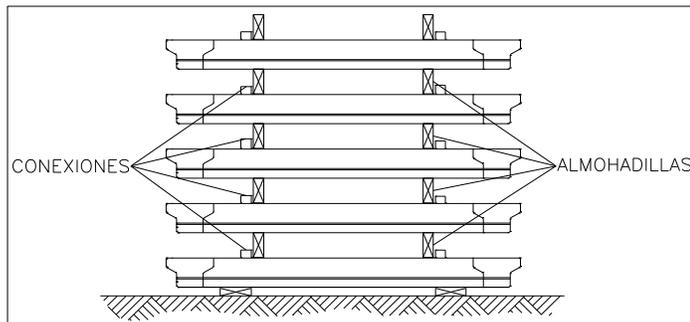


Figura 61.- Almacenaje y estiba de paneles

#### 5.3.7. Seguridad

Para la ejecución de todos los trabajos, el personal portará el equipo de seguridad correspondiente (véase Figura 62).

En la zona de los trabajos se colocarán señales preventivas para el personal. Estas señales indicarán las restricciones que el personal considerara en algunas áreas: La indicación de materiales y sustancias peligrosas, zonas de riesgo y zonas de seguridad y zona de atención a trabajadores lesionados (véase Figura 63).



Figura 62.- Equipo de uso obligatorio de los trabajadores



Figura 63.- Señalamiento para trabajadores en obra

Es importante colocar en la zona de obra señalamiento provisional que permita garantizar la integridad de los usuarios de vialidades, peatones y personal de la obra, durante la ejecución de trabajos. También se colocaran dispositivos de canalización y protección de obra. El señalamiento y dispositivos de protección de obra se realizaran en base a lo indicado en las normas SCT (N-PRY-CAR-10-03-001/01 en los 4 capítulos) para señalamiento y dispositivos de seguridad en obra (véase Figura 64).



Figura 64.- Dispositivos y señalamientos de obras

**5.3.8. Recomendaciones generales**

Es importante que el personal a cargo de los trabajos realice el análisis de los posibles riesgos que se puedan presentar, esto con la finalidad de prevenir enfermedades y evitar accidentes.

Se recomienda asignar un profesional el cual sea el responsable de los trabajos de seguridad, tanto de la planeación, aplicación de las normas y reglamentos y las sanciones para los trabajadores que no acaten estas.

Es importante concientizar al personal de la importancia que tiene la aplicación de normas de seguridad, tanto para salvaguardar su integridad, así como también para proteger la de los peatones y conductores que circulen cerca de la zona donde se realizan los trabajos.

## 6. CONTROL DE CALIDAD

### 6.1. Control de calidad de paramentos y refuerzos del sistema

El control de calidad abarcará los siguientes aspectos:

- Comportamiento mecánico
- Durabilidad
- Aspecto

Algunos de estos parámetros son controlados en fábrica y otros dentro de la obra. Cuando se trate de control desde fábrica, éste quedara plasmado en un certificado de garantía o documento que garantice la calidad de los elementos.

El paramento es un componente de los M.M.E. utilizado para interactuar con el suelo y realizar mejoras de las propiedades mecánicas entre las filas de refuerzo. Los revestimientos comunes incluyen paneles prefabricados de concreto, bloques modulares, láminas de metal, placas, mallas de alambre, láminas envueltas con geosintéticos. El revestimiento desempeña un papel estructural de menor importancia en la estabilidad de la estructura, pero contribuye al de control de la erosión.

Se puede asumir que la tensión en los refuerzos es resistida por un empuje del suelo uniformemente distribuido en la parte posterior del bloque reforzado.

Se buscara utilizar un revestimiento que no se deforme lateralmente y que no se desplome más allá de las tolerancias establecidas.

#### 6.1.1. Revestimientos de concreto

En caso de que los elementos se elaboren en fábrica se realizara un control de la resistencia a flexión realizando ensayos con las mismas frecuencias y sobre el número de muestras especificado en las normas vigentes.

En la recepción en obra se controlarán las dimensiones geométricas y el aspecto superficial de todos los paneles, que deberán cumplir las especificaciones exigidas por los planos y las especificaciones técnicas.

Se tomarán todas las precauciones necesarias en el manejo y almacenamiento para evitar dañar los elementos, manchar la superficie exterior (paramento) y doblar las fijaciones para conectar los refuerzos. Los paramentos no tendrán contacto directo con el suelo.

Los paneles se almacenarán siempre con las fijaciones hacia arriba, sobre tacos de madera de mayor espesor que la longitud de las conexiones, alineados y colocados junto a éstos. Nunca se apilarán más de 5 paneles.

Se indicará claramente en cada panel, en su parte trasera, la fecha de fabricación.

Queda descartada toda reparación de desconches, fisuras o rupturas en los elementos.

#### **6.1.1.1. Revestimientos flexibles**

El control de calidad de los paramentos metálicos (mallas soldadas, etc.) se realizará fundamentalmente en fábrica, de forma que los diferentes elementos puedan venir provistos de un certificado de garantía

Los parámetros siguientes que se controlan en fábrica son, como mínimo los siguientes:

- Resistencia a rotura por tensión
- Alargamiento de rotura
- Espesor del recubrimiento galvanizado
- Uniformidad del recubrimiento galvanizado
- Adherencia del recubrimiento galvanizado

Los dos primeros están relacionados con las características mecánicas y los tres últimos con las de durabilidad.

Además se hará en fábrica un control del aspecto superficial del galvanizado, en su caso, para verificar que cumple lo exigido en las normas correspondientes.

El control en obra podrá omitirse siempre que exista un certificado de calidad, excepto en lo referente al aspecto superficial del recubrimiento, y a la integridad física del paramento (que deberán carecer de fisuras, rebabas, etc., y no haber sufrido deformaciones plásticas) y la comprobación de las dimensiones.

En el caso de que sólo se proporcione certificado de calidad y para obras con control intenso, se recomienda realizar en obra medidas no destructivas del espesor del recubrimiento. La frecuencia de estas medidas será de 1 ensayo por cada 1460 kg de armadura o 100,0 m<sup>2</sup> de muro.

#### **6.1.1.2. Acabados**

Los acabados de los paneles pueden tener una gran variedad de colores, formas texturas y materiales brindando una atmosfera amigable con el medio ambiente que lo rodea adicionando un valor alternativo a el proyecto en cuestión.

#### **6.1.2. Suministros**

##### **6.1.2.1. Almohadillas**

Son los elementos situados entre dos paneles de concreto que están colocadas una encima de otra, tiene por misión obtener un contacto flexible que permita el giro y un cierto desplazamiento relativo entre los dos paneles. Esta junta es horizontal

El material deberá presentar un buen aspecto, sin grietas ni signos de descomposición. Será suficientemente resistente como para permitir su manejo y puesta en obra sin sufrir daños

##### **6.1.2.2. Geotextil**

El geotextil complementará a las almohadillas para evitar pérdidas de material fino a través del paramento, tanto en las juntas verticales como horizontales.

El geotextil se colocará pegado a la parte trasera del paramento tapando las juntas verticales.

#### **6.1.2.3. Refuerzos metálicos**

Se fijarán las características de los refuerzos metálicos en las especificaciones técnicas particulares.

Todos los elementos metálicos se fabricarán en acero dulce de bajo contenido en carbono, o en el mismo material con un recubrimiento de zinc por galvanización en caliente.

El aspecto superficial deberá ser homogéneo en su conjunto.

#### **6.1.2.4. Refuerzos geosintéticos**

Los geotextiles se suministrarán a obra en rollos. Los rollos llevarán un empaque opaco para evitar su deterioro por la luz solar, e irán debidamente etiquetados indicando:

- Descripción del material
- Datos del fabricante
- Fecha de fabricación y número de envío
- Dimensiones de los rollos

En el transporte, carga y descarga se vigilará que no se produzcan daños mecánicos en las capas exteriores de los rollos (pinchazos, cortes, etc.).

Para almacenamientos de duración inferior a 15 días no es necesario adoptar precauciones especiales. Para almacenamientos de mayor duración se respetarán las indicaciones del fabricante y los rollos se protegerán de la acción directa de los rayos solares.

En el momento de la colocación el residente de obra podrá ordenar la eliminación de las capas más exteriores de los rollos si éstas muestran síntomas de deterioro.

Las fibras sintéticas se obtienen en procesos industriales de alta tecnología por lo que en general los certificados de calidad solicitados por el fabricante a laboratorios oficiales u homologados proporcionan una garantía suficiente a efectos de recepción.

#### **6.1.3. Tolerancias**

Las dimensiones y tolerancias de los elementos serán los fijados en planos o especificaciones de los diferentes proveedores así como por la empresa responsable de la fabricación de los elementos prefabricados de concreto.

Los fabricantes de los materiales empleados en los M.M.E. tienen la obligación de proveer un certificado en el que se garantice la calidad de manufactura del material considerando tolerancias de espesores, galvanizados, recubrimientos entre otros.

### **6.2. Control de calidad durante el montaje**

Los aspectos que se tomaran en cuenta para el control de calidad durante el proceso de montaje son:

- Materiales que constituyen el material de relleno
- Montaje del paramento y refuerzos
- Extensión del relleno
- Compactación del relleno

- Geometría del macizo

#### **6.2.1. Organización**

Se recomienda solicitar procedimientos o manuales de construcción de los propietarios de sistemas de M.M.E. para obtener orientación durante la supervisión de la construcción y la inspección. Cada uno de los pasos secuenciales de la construcción del M.M.E. es controlada por los requisitos y tolerancias.

#### **6.2.2. Control del material de relleno**

El objeto de este control es comprobar que el material que se va a utilizar cumple lo establecido en las prescripciones técnicas tanto en el lugar de origen como en el de empleo para evitar las alteraciones que puedan producirse como consecuencia de las operaciones de extracción, carga, transporte y descarga.

Se comprenderán las siguientes etapas en este control:

##### **a) Antes de la iniciación de la obra** y siempre que se sospechen variaciones el material,

Sobre el número de muestras representativas de cada tipo de material que señale el responsable de las obra y que serán dos (2) como mínimo. Se efectuarán los siguientes ensayos en cada muestra:

- 1 Proctor
- 1 Ensayo granulométrico completo
- 1 Equivalente de arena
- 1 Determinación de resistividad
- 1 Determinación de pH
- 1 Determinación del contenido en materia orgánica
- 1 Ensayo cualitativo de la presencia de sulfuros

##### **b) En banco**

Se realizarán las siguientes operaciones:

- Comprobar el retiro de tierra vegetal antes del comienzo.
- Comprobar la explotación racional del frente y en su caso la exclusión de las vetas no utilizables.
- Tomar muestras representativas, de acuerdo con el criterio del responsable de la obra, del material excavado en cada desmonte o préstamo. Sobre ellas se efectuaran los siguiente ensayos si el control es intenso
- 1 Determinación de la resistividad
- 1 Ensayo granulométrico
- 1 Proctor
- 1 Determinación de pH
- 1 Contenido en materia orgánica

##### **c) En el lugar de colocación.**

Se examinarán los montones procedentes de la descarga de camiones, desechando de entrada aquéllos que, a simple vista, presenten restos vegetales, materia orgánica, o boleos de mayor tamaño que el admitido como máximo; y señalando aquellos otros que presenten alguna anomalía en cuanto al aspecto que se recomienda tenga el material que llegue a obra de los bancos aprobadas, tales como distinta coloración, exceso de plasticidad,

etc. Se tomarán muestras de los montones señalados como sospechosos para repetir los ensayos efectuados en el lugar de procedencia.

### 6.2.3. Dala de nivelación

Se recomienda que la dala de nivelación de concreto tenga unas dimensiones mínimas que dependerán del tipo de paramento y una resistencia mínima a la compresión de 150 kg/cm<sup>2</sup>.

Es preferible que las dalas coladas en sitio se fabriquen con un mínimo de 12 horas de anterioridad a la colocación de los paneles de revestimiento. Se recomienda se realice una cuidadosa inspección de la dala de nivelación para asegurar una correcta alineación y nivel.

La tolerancia vertical recomendada es de 3 mm con respecto a la elevación de diseño. Si la dala de nivelación no está en la elevación correcta, la parte superior del muro no estará en la elevación correcta. Una dala de nivelación colocada incorrectamente involucrará una mala alineación del panel posterior, el agrietamiento y astillamiento desportillamiento del mismo.

Los elementos prefabricados de altura completa para el paramento requerirán una dala de nivelación de dimensiones mayores para mantener la alineación y proporcionar apoyo temporal como cimentación.



Figura 65.- Dala de nivelación de concreto

### 6.2.4. Montaje de elementos del paramento

Los paneles prefabricados del paramento se colocan ligeramente hacia atrás (hacia el relleno) con el fin de asegurar una correcta alineación vertical final después de la colocación de relleno. Se produce un movimiento mínimo hacia fuera de los elementos del paramento durante la colocación del relleno del muro y la compactación, no pudiéndose evitar, y se espera mientras que la interacción entre el refuerzo y relleno reforzado se produzca.

La mayoría de los sistemas con paneles prefabricados tienen alguna forma de machihembrado de alineación entre elementos adyacentes que ayudan en la construcción apropiada. Un típico desplome de los paneles prefabricados segmentados es de 20 mm por metro ( $\frac{1}{4}$ " por pie) de altura del panel. La revisión del alineamiento vertical de los paneles segmentados de muestra en la Figura 66.



Figura 66.- Revisión del plomo y alineamiento de los elementos del paramento

Los paneles prefabricados de altura completa, mostrados en la Figura 67. son más susceptibles a la desalineación que los paneles. Cuando se utilizan paneles de altura completa, el procedimiento de construcción debe ser controlado cuidadosamente para mantener las tolerancias. Puede ser necesario la implementación de procedimientos especiales de construcción, tales como refuerzos adicionales y mayor desplome de la cara del panel.



Figura 67.- La colocación de paneles de altura completa requiere cuidado especial en su alineación

**Primera fila de elementos del paramento:** El ajuste de la primera fila de los elementos del paramento es un detalle clave como se muestra en la Figura 68. La construcción comenzará siempre adyacente a cualquier estructura existente y se continuará hacia el extremo abierto del muro.



Figura 68.- Colocación de la primera fila de elementos prefabricados para el paramento

Los paneles se fijaran directamente en la dala de nivelación de concreto. Entre la primera hilera de paneles y la dala de nivelación no serán permitidos los materiales para la junta horizontal o cuñas de madera. Se aceptarán el uso de cuñas temporales de madera entre la primera hilera de paneles y la base de nivelación para ajustar el desplome del panel, pero éstas deben ser removidas posteriormente durante la construcción.

Algunos detalles adicionales importantes son:

- a) Para los muros de paneles segmentados, es aconsejable utilizar escantillones, que establecen la separación horizontal entre paneles, de modo que las filas siguientes de paneles se ajusten correctamente.
- b) La primera fila de paneles estará continuamente sujeta hasta que varias capas de refuerzos y rellenos han sido colocados. Los paneles adyacentes se sujetaran juntos para evitar el desplazamiento del panel individual.
- c) Después de establecer el desplome de la primera fila de paneles, la alineación horizontal se comprobará visualmente con instrumentos de medición o con una línea de referencia.
- d) Cuando se utilicen paneles de altura completa, la alineación inicial de sujeción y de fijación es aún más crítica ya que pequeñas desalineaciones no se pueden corregir fácilmente conforme la construcción continúa.
- e) La mayoría de los distintos sistemas de MME usa una variedad de tipos de paneles en el mismo proyecto para acomodar los requerimientos geométricos y de diseño (forma geométrica, el tamaño, el acabado, los puntos de conexión). Los tipos de elementos del paramento se revisarán para asegurarse de que estén instalados tal y como se muestra en los planos.

Las cuñas de madera, mostradas en la Figura 68, colocadas durante el montaje para ayudar en la alineación permanecerán en el lugar hasta que la tercera capa de paneles modulares es colocada, momento en el cual la capa inferior de cuñas se eliminará. Cada capa sucesiva de cuñas será eliminada conforme la capa de panel subsiguiente se coloca. Cuando el muro se completa, todas las cuñas temporales se retirarán.

#### **6.2.5. Colocación de relleno y compactación**

El control de humedad y la densidad es imprescindible para la construcción de los M.M.E. Incluso cuando se utilizan materiales granulares de alta calidad,

los problemas pueden ocurrir si no se ejerce un control en la compactación. El material de relleno del macizo será colocado y compactado en o dentro del 2 por ciento seco del contenido de humedad óptimo.

Si el relleno reforzado es drenante, con menos de 5 por ciento de material que pasa la malla N ° 200 (material fino), el contenido de agua podrá estar dentro de  $\pm 3$  puntos porcentuales de la óptima.

La colocación del contenido de humedad puede tener un efecto significativo en la interacción del suelo con el refuerzo. Un contenido de humedad demasiado alto hace que sea cada vez más difícil mantener una alineación aceptable en el paramento, especialmente si el contenido de finos es alto. El contenido de humedad demasiado seco puede resultar en asentamientos significativos durante los períodos de precipitación.

Una densidad de 95 por ciento del valor máximo del PVSM se recomienda para muros de contención, y el 100 por ciento se recomienda para muros estribo y muros soportando cimentaciones de estructuras.

Es preferible se solicite una especificación de procedimiento cuando un porcentaje significativo de material grueso, generalmente 30 por ciento o superior es retenido en la malla de 19 mm ( $\frac{3}{4}$ " ). En esta situación, típicamente tres a cinco pasadas con equipos convencionales de compactación con rodillo vibratorio es adecuado para alcanzar la densidad máxima práctica. Los requisitos reales se determinaran con base a las pruebas de campo.

El material de relleno será descargado sobre o de forma paralela a la parte trasera y media de los refuerzos y bandeado hacia la cara frontal como se muestra en la Figuras 69. En ningún momento estará en contacto directo con los refuerzos algún equipo de construcción porque los revestimientos protectores de los refuerzos pueden ser dañados. Las capas de suelo serán compactadas hasta o ligeramente por encima de la elevación de cada nivel de las conexiones de refuerzo antes de colocar la capa de elementos de refuerzo.





Figura 69.- Colocación de la primera fila de elementos prefabricados para el paramento

#### **6.2.5.1. Colocación de capas posteriores de paramento (Paneles segmentados)**

A lo largo de la construcción de muros con paneles segmentados, los paneles del paramento sólo deben fijarse a nivel; la colocación de un panel en la parte superior de uno que no esté completamente relleno no puede permitirse.

Al final de cada jornada de trabajo, el Contratista nivelará el relleno del muro con una pendiente en contra del paramento y compactará ligeramente la superficie para reducir la infiltración de agua superficial por la lluvia. Al inicio de los trabajos del día siguiente, se escarificará la superficie de relleno.

#### **6.2.6. Colocación de elementos de refuerzo**

Los elementos de refuerzo de los sistemas de M.M.E. se instalarán en estricto cumplimiento de los requisitos de espacio y longitud indicados en los planos. Los refuerzos generalmente se colocan perpendicularmente a la parte posterior del panel del paramento. En situaciones específicas, muros estribo y muros en curva, por ejemplo, puede ser admisible sesgar los refuerzos de su ubicación de diseño en la dirección horizontal o vertical. En todos los casos, las capas superpuestas de refuerzos deben estar separadas por 75 mm (3") de espesor mínimo de relleno.

Los muros en curvas, cóncavas o convexas, crean problemas especiales con los paneles de los M.M.E y con los detalles del refuerzo; recomendándose generar diferentes procedimientos de colocación. Para sistemas de relleno con paneles prefabricados, las juntas se cerrarán o abrirán aún más por los movimientos normales del paramento en función de si la curva es cóncava o convexa.

##### **6.2.6.1. Conexiones**

Cada sistema de M.M.E. tiene un detalle de conexión distinto, algunos de ellos se muestran Figura 70. Todas las conexiones se harán de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

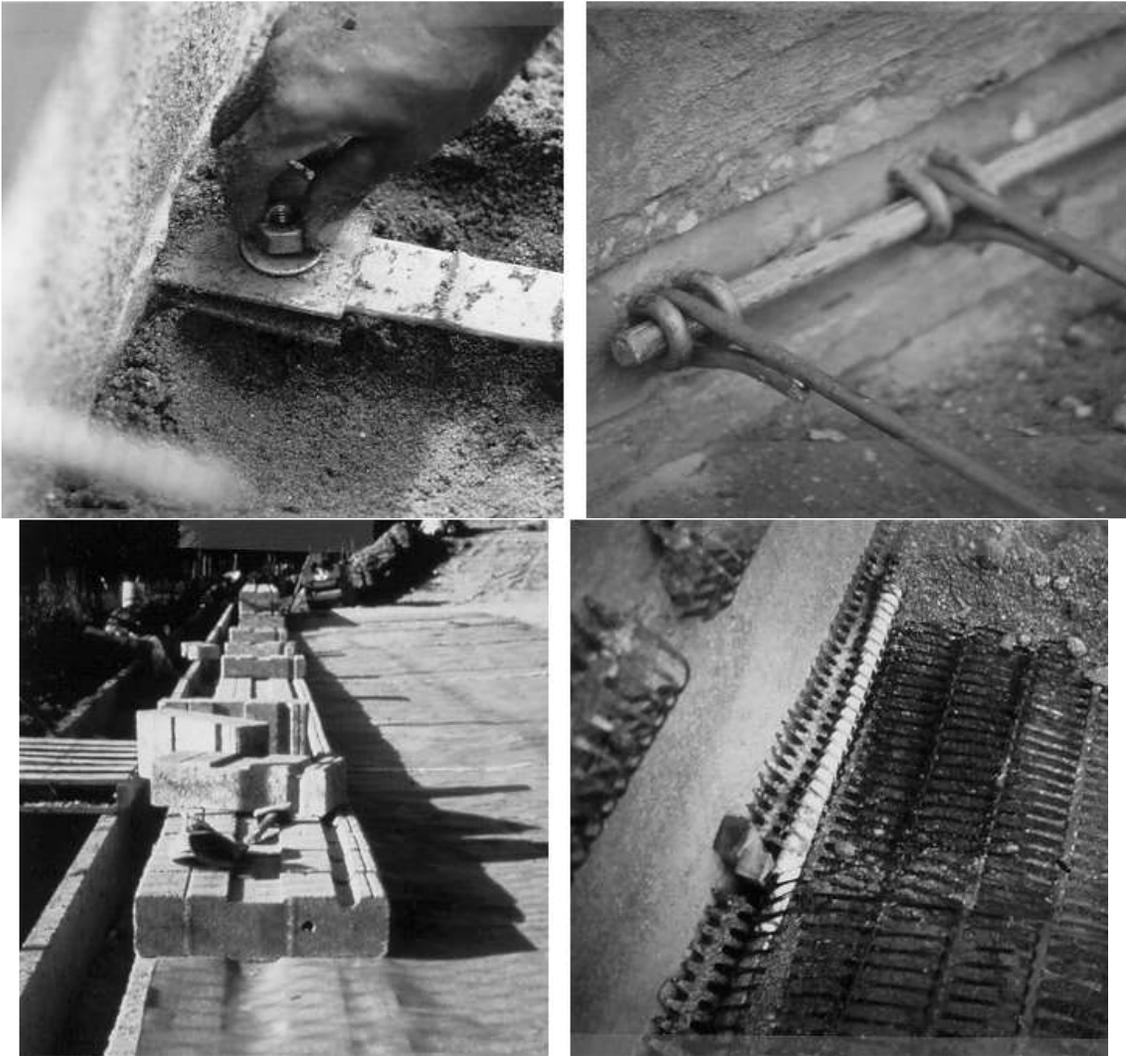


Figura 70.- Ejemplos de conexiones en el paramento

Los refuerzos flexibles, como son los geotextiles y las geomallas, por lo general requieren de un tensado para eliminar la holgura en el refuerzo; la tensión se mantiene con estacas o mediante la colocación de relleno durante el tensado. El tensado y replanteo reducirá movimientos horizontales posteriores del panel del paramento conforme el relleno se coloca.

#### 6.2.7. Tolerancias de alineación de los paneles

La clave para un producto final satisfactorio es mantener las alineaciones horizontal y vertical durante la construcción. Generalmente, el grado de dificultad de mantener la alineación vertical y horizontal aumenta a medida que la distancia vertical entre las capas de refuerzo aumenta.

Se recomiendan las siguientes tolerancias en la alineación:

- a) Espacios en las juntas de los paneles adyacentes (todos los refuerzos):  
19 mm  $\pm$  6 mm
- b) Paneles prefabricados del paramento (todos los refuerzos): 6 mm por m  
(direcciones horizontal y vertical).
- c) Muros de paramento envuelto y taludes (por ejemplo, malla electrosoldada o paramento geosintético): 15 mm por metro (dirección horizontal y vertical).

- d) Muros de paramento envuelto y taludes (por ejemplo, malla electrosoldada o paramento geosintético) en general vertical: 8 mm por m
- e) Muros de paramento envuelto y taludes (por ejemplo, malla electrosoldada o paramento geosintético) abultado: 25 a 50 mm como máximo.
- f) Elevaciones para la colocación del refuerzo: 25 mm en la elevación para la conexión.

Cuando los elementos del paramento estén desalineados no es recomendable jalar de nuevo a su lugar porque esto podría dañar los paneles y los refuerzos y, por lo tanto, debilitar el sistema. Las medidas apropiadas para corregir un problema de alineación son remover el material de relleno y los elementos de refuerzo, seguido por la recolocación de los paneles. La decisión de rechazar tramos de la estructura que estén desalineados debe ser rápida, debido a que la recolocación del panel y la manipulación del material de relleno, consume mucho tiempo.

En ocasiones, los paneles modulares inferiores pueden experimentar algún movimiento después de que varios paneles han sido colocados sobre éste. Esto podría deberse a un asentamiento en la cimentación, exceso del contenido de humedad después de lluvias intensas, o una compactación excesiva. La construcción debe ser detenida de inmediato y evaluarse la situación por especialistas calificados en geotecnia, cuando estas deformaciones "post-construcción" ocurran.

Aberturas excesivas en las juntas horizontales y verticales pueden dar lugar a la desalineación en los paneles del paramento, agrietamiento y desprendimiento debido a las tensiones puntuales.

El calce con piedras o trozos de concreto para nivelar los paneles del paramento no estará permitido. Es imprescindible contemplar almohadillas de apoyo en las juntas horizontales entre los paneles segmentados del paramento para evitar tensiones puntuales (corcho, neopreno, o caucho se utilizan típicamente). Estos materiales se colocaran en estricta conformidad con los planos y especificaciones, especialmente en relación con el espesor y la cantidad. Las almohadillas de apoyo y cubiertas de geotextil se muestran en la Figura 71.



Figura 71.- Juntas cubiertas con geotextil y colocación de almohadillas de neopreno

Otros materiales de unión se utilizan para evitar tensiones puntuales y la erosión de relleno a través de las articulaciones del paramento (espuma sintética y geotextiles, etc.).

En la Tabla 24. que se muestra a continuación se resumen varias condiciones fuera de tolerancia y sus posibles causas.

**TABLA 24.- Condiciones fuera de tolerancia y posibles causas**

No.	Condición	Posible causa
1	Falla en el muro : a) asentamiento diferencial b) inclinación del muro más allá de la tolerancia de alineación vertical c) choque entre paneles, teniéndose desprendimientos, astillado en las orillas	Material de cimentación (subsuelo) demasiado blando o húmedo para tener suficiente apoyo. Material de relleno de mala calidad o sin una compactación adecuada.
2	Primera fila de paneles difícil de ajustar o mantener su nivel. Contacto entre paneles con desprendimientos y/o astillado.	Dala de nivelación construido fuera de desplante.
3	Muro con alineación vertical con inclinación hacia afuera fuera de tolerancia.	a) Paneles sin el desplome suficiente. b) Equipo de relleno y/o compactación de gran tamaño dentro del 1.0 m cercano a la parte posterior de los paneles. c) Material de relleno con más humedad que el contenido de humedad óptimo. Material con un contenido excesivo de material fino (porcentaje mayor del material que pasa la malla No. 200) d) El material de relleno empuja el panel del paramento antes de ser compactado por encima de los elementos de refuerzo. e) Compactación excesiva o vibratoria de una arena uniforme, medianamente fina (más del 60% pasa por la malla No. 40). f) El material de relleno es arrojado cerca del extremo libre de los elementos de refuerzo, luego extendido hacia la parte posterior del muro, provocando el desplazamiento de los refuerzos y empujando hacia afuera el panel. g) Cuñas no ajustadas firmemente. h) Sargentos en los paneles que no ajustan firmemente i) Holgura en el refuerzo hacia las conexiones del paramento j) Tensado inconsistente en el refuerzo geosintético. k) Sobrecompactación en algunas zonas del relleno.
4	Muro con alineación vertical con inclinación hacia dentro fuera de tolerancia.	a) Exceso de desplome en los paneles instalados en relación al material granular seleccionado como

		relleno. b) Compactación inadecuada del relleno. c) Posible falla de capacidad de carga. d) Muro con paneles modulares fuera de la tolerancia vertical
5	Muro fuera de la tolerancia de alineación horizontal o con abultamiento.	Revisar las causas 3c, 3d, 3e, 3j y 3k. El relleno suturado por fuertes lluvias o una nivelación incorrecta del relleno después de las operaciones de cada día.

**TABLA 24.- Condiciones fuera de tolerancia y posibles causas (continuación)**

No.	Condición	Posible causa
6	Los paneles no se ajustan correctamente en el lugar previsto	a) Los paneles no están al mismo nivel por asentamientos diferenciales (ver posible causa 1) b) Panel colado fuera de tolerancia c) Falla al emplear el escantillón
7	Grandes variaciones en el movimiento de los paneles adyacentes	a) Material de relleno no uniforme b) Compactación de relleno no uniforme c) Colocación inconsistente de los paneles del paramento.

**6.2.8. Equipo necesario para el montaje**

El equipo mínimo necesario será definido por el proveedor del sistema dependiendo los alcances de contrato, teniendo en consideración como referencia:

**Grúa:** Se considerará que la capacidad en toneladas de la grúa se ve disminuida dependiendo su capacidad de extensión, como referencia básica se tiene la grúa tipo HIAB articulada, la capacidad será definida por el tipo de proyecto.



**Maquinas oruga:** Se considerara que la maquinaria nunca este en contacto con el material de refuerzo, para su ejecución se tendrá que consultar el procedimiento constructivo del proveedor.



**Compactador:** No está permitido el uso de rodillos compactadores con pata de cabra para no dañar el material de refuerzo. Se tendrá que considerar un compactado adecuado para no crear problemas al paramento, este equipo no podrá emplearse en el 1,00 m próximo al paramento.



**Compactador manual:** Para evitar desplomes y posibles daños a las conexiones del paramento se compactara en la proximidad del paramento, donde no tuvo alcance la compactadora de rodillo, con una compactadora manual (bailarina).



Además de la maquinaria antes mencionada se preverá algunos elementos extra como son:

- izajes de montaje.
- sargentos para rigidizar los paneles durante el montaje.
- cuñas de madera para los paneles.
- regla metálica de 3 m.
- nivel y plomada
- puntales para la primera fila de paramentos
- polines y largueros, para el acopio de los paramentos
- además del equipo y materiales que no son mencionados, pero que aparecen en el procedimiento constructivo del proveedor.

#### **6.2.9. Suministros**

Es de vital importancia tener los suministros operacionales para poder ejecutar la obra en tiempo y forma para ello se contará con:

- combustibles
- aceites
- lubricantes
- electricidad ó plantas de emergencia
- anticongelante

Además de contar con la organización adecuada para administrar distribuir y almacenar dichos suministros, tomando en cuenta los patios de colados y almacenamiento, de tal manera que exista una buena dinámica operacional paralela al procedimiento constructivo y no perder tiempo, calidad y poner en riesgo al personal y los trabajos por no llevar un control adecuado.

#### **6.2.10. Tolerancias**

Se considerara en el programa de obra las consecuencias de no contar con el equipo y suministros que el procedimiento constructivo indica ya que no tendrá que respetar el tipo de maquinaria mencionada dentro de los procedimientos constructivos, no pudiéndose cambiar una maquinaria por otra que no cumpla con las características técnicas y de diseño.

#### **6.2.11. Control de cambios**

Se tendrá documentado a detalle cualquier cambio para ser reflejado en diseño, cantidades y ejecución de los mismos, indicando en planos las fechas y cambios correspondientes, así como dar aviso al equipo de trabajo, incluyendo al departamento técnico que avale e implante en planos los cambios.

#### **6.2.12. Proyecto vs. Obra**

Cuando el responsable de obra tome decisiones en sitio se tendrá que hacer saber al equipo correspondiente para realizar la comprobación correspondiente y actualizar los planos del proyecto o en su defecto se creen los planos as-built.

### **6.3. Verificación de la calidad del montaje terminado**

#### **6.3.1. Normas y especificaciones**

Se tomara como referencia o indicado en el documento *FHWA NHI-10-024, BS 8006* y *EBGEO 2010* en los apartados de montajes y paramentos, además de las especificaciones técnicas que se requiera en cuanto a tolerancias por: asentamientos, desplomes y apariencia estética que por la naturaleza del proyecto se demanden.

#### **6.3.2. Metodología**

Los M.M.E. se construirán en estricto cumplimiento a los requisitos estructurales y estéticos de los planos, especificaciones y documentos del contrato. Los resultados deseados por lo general se pueden lograr mediante el uso de materiales de calidad, procedimientos adecuados de construcción / montaje y en una inspección adecuada. Sin embargo, puede haber ocasiones en las que las tolerancias dimensionales y/o límites estéticos son excedidos. Las medidas correctivas se deben tomar rápidamente para que el trabajo quede dentro de los límites aceptables.

El control abarcará los aspectos siguientes:

- Comportamiento mecánico
- Durabilidad
- Aspecto

Algunos parámetros relacionados con cada uno de estos tres puntos serán controlados en fábrica y otros lo han de ser en obra. El control de fábrica quedará plasmado en un certificado de garantía de acuerdo con la normativa vigente.

En lo referente al control en obra de los parámetros relacionados con la durabilidad se diferencian tres modalidades:

- Control reducido
- Control normal
- Control intenso

Para escoger el tipo de control adecuado a cada obra en particular se tomarán en cuenta los siguientes aspectos:

- Importancia funcional de la obra
- Medio ambiente en el que está colocada la obra
- Características del relleno utilizado

#### **6.3.2.1. Programas de seguimiento del comportamiento**

Dado que la tecnología de los M.M.E. está bien establecida, la necesidad de programas de control deberían limitarse a los casos en que elementos o materiales nuevos se han incorporado en el diseño, asentamientos importantes posteriores a la construcción se hayan anticipado y/o los rendimientos en la construcción requieren de cierto control y donde la tasa de degradación/corrosión de los refuerzos requieren seguimiento debido a la utilización de un mal material de relleno o cambios previstos en la situación del sitio. Bajo las condiciones descritas el seguimiento se puede utilizar para:

- Comprobar los niveles de esfuerzos de diseño y monitorear la seguridad durante la construcción.
- Permitir que los procedimientos de construcción sean modificados por seguridad o economía.
- Controlar los rendimientos de construcción.
- Mejorar el conocimiento del comportamiento de las estructuras de M.M.E. para proporcionar una referencia base para futuros diseños, con la posibilidad de mejorar los procedimientos de diseño y / o la reducción de costos.
- Proporcionar una idea de las necesidades de mantenimiento, al controlar el comportamiento a largo plazo.

#### **6.3.2.2. Propósito del programa de monitoreo**

El primer paso en la planificación de un programa de monitoreo es definir el propósito de las medidas. Cada instrumento en un proyecto será seleccionado y situado para ayudar a responder a una pregunta específica.

Los parámetros más importantes de interés serán seleccionados con cuidado para identificar los parámetros secundarios que serán medidos si es que influyen en los parámetros primarios.

Para todas las estructuras, parámetros importantes que serán considerados incluyen:

- Desplazamientos horizontales del paramento.
- Desplazamientos verticales de la superficie de la estructura en general.
- Desplazamientos locales o deterioro de los elementos del paramento.
- Comportamiento del drenaje del relleno detrás del muro.
- El comportamiento de cualquier estructura que esté apoyada sobre el relleno reforzado, tales como losas de aproximación para estribos de puentes.
- Desplazamientos horizontales de la estructura en general.
- Desplazamientos verticales de la estructura en general.
- Empuje lateral de tierras en la parte posterior de los elementos del paramento.
- Distribución de los esfuerzos verticales en la base de la estructura.
- Esfuerzos en el refuerzo, con especial atención a la magnitud y la localización del esfuerzo máximo.
- Distribución de los esfuerzos en el refuerzo debido a la sobrecarga.
- Relación entre el asentamiento y distribución de la tensión-deformación.
- Relajación de la tensión en el refuerzo con el paso del tiempo.
- El esfuerzo total horizontal dentro del relleno y en la parte posterior de la sección del muro reforzado.
- Condición de envejecimiento de refuerzo tales como las pérdidas por corrosión o degradación de los refuerzos poliméricos.
- Respuesta ante la presión de poro debajo de la estructura.
- La temperatura que a menudo es una causa de cambios reales en otros parámetros, y también puede afectar a las lecturas del instrumento.
- Las precipitaciones que a menudo son causa de cambios reales en otros parámetros.
- La presión barométrica, que puede afectar en las lecturas de la presión de la tierra y los instrumentos de medición de presión de poro.

Las características del material del subsuelo, relleno, refuerzo, y los elementos del paramento en relación con sus efectos sobre el comportamiento de la estructura se evaluarán antes de desarrollar el programa de instrumentación. Es importante recordar que los asentamientos en la cimentación afectarán en la distribución de tensiones dentro de la estructura.

#### **6.3.2.3. Programa de monitoreo limitado**

Las observaciones limitadas y el monitoreo suelen incluir:

- Desplazamientos horizontales del paramento
- Desplazamientos horizontales de la superficie de la estructura en general
- Desplazamientos locales o deterioro de los elementos del paramento.
- El comportamiento de cualquier estructura que esté apoyada sobre el relleno reforzado, tales como losas de aproximación para estribos de puentes.

Los desplazamientos horizontales y verticales pueden ser monitoreados por métodos de topografía, utilizando adecuados puntos de medición en el paramento del muro de contención o en el pavimento o la superficie del suelo retenido. Se requieren puntos de referencia permanentes para el control vertical. Para el control horizontal, una estación de control horizontal debe ser proporcionada en cada extremo de la estructura.

El desplazamiento máximo lateral de la cara del muro durante la construcción se prevé que sea del orden de H/250 para refuerzo rígido y H/75 para el refuerzo flexible. La inclinación debida al desplazamiento diferencial lateral desde la parte inferior a la parte superior del muro se prevé que sea inferior a 4 mm por m ( $\frac{1}{4}$  pulgadas por 5 pies) de altura del muro, en cualquier sistema.

Desplazamientos horizontales post-construcción se prevé que sean muy pequeños. Desplazamientos verticales post-construcción se estimaran a partir de los análisis de asentamientos en la cimentación, y se harán mediciones del asentamiento real de la cimentación durante y después de la construcción.

#### **6.3.2.4. Programa de monitoreo integral**

Estudios amplios incluyen el monitoreo del comportamiento de la superficie, así como el comportamiento interno del relleno reforzado. Un programa completo puede implicar la medición de casi todos los parámetros enumerados anteriormente y en la predicción de la magnitud de cada parámetro en esfuerzos de trabajo para establecer el rango de exactitud de cada instrumento.

Cada vez que se efectúan mediciones para el control de la construcción o por seguridad, o cuando se utiliza para apoyar diseños menos conservadores, se hará una predeterminación de los niveles de alerta. Se establecerá un plan de acción, incluyendo la notificación del personal clave y alternativas de diseño a fin de que las medidas correctivas se puedan discutir o aplicar en cualquier momento.

Un programa integral puede incluir todos o algunos de los propósitos fundamentales siguientes:

- Monitoreo de la deflexión para establecer el desempeño bruto de la estructura y como un indicador de la localización y la magnitud de la falla potencial local para ser completamente investigada.
- Monitoreo del desempeño estructural para establecer ante todo los niveles de esfuerzos de tensión en el refuerzo y/o en las conexiones. Un segundo tipo de monitoreo del desempeño estructural para medir o establecer las tasas de degradación de los refuerzos.
- Prueba de resistencia a la extracción para establecer el nivel de resistencia al arrancamiento dentro de una masa reforzada como una función de la profundidad y la elongación.

#### **6.3.2.5. Programa de Implementación**

La selección de la ubicación de los instrumentos consta de tres pasos.

- En primer lugar, las secciones que contienen las características únicas de diseño se identifican. Por ejemplo, las secciones con sobrecarga o secciones con mayor esfuerzo. La instrumentación apropiada se encuentra en estas secciones.
- En segundo lugar, se realiza una selección de las secciones transversales donde se considera que el comportamiento predicho represente el comportamiento de la estructura en conjunto. Estas secciones se consideran entonces como las secciones instrumentadas primarias, y los instrumentos se instalan para suministrar datos completos del comportamiento. Debe haber por lo menos dos secciones instrumentadas "primarias".
- Tercero, debido a que la selección de zonas representativas pueden no ser representativas de todos los puntos de la estructura, la instrumentación simple debe ser instalada en un número de secciones instrumentadas "secundarias" para servir como índices de

comportamiento comparativo. Por ejemplo, monitoreando el paramento del muro en secciones transversales secundarias examinaría si el estudio integral y las mediciones del inclinómetro en secciones primarias son representativos del comportamiento del muro.

Es importante considerar el acceso a los lugares de instrumentación y en las consideraciones para la facilidad de medición durante la construcción. Los lugares deben ser seleccionados, siempre que sea posible, para facilitar el cotejo entre los tipos de instrumentos. La mayoría de los instrumentos miden las condiciones en un punto.

En la mayoría de los casos, sin embargo, los parámetros son de interés en toda una sección de la estructura. Por lo tanto, un gran número de puntos de medición puede ser necesario para evaluar los parámetros tales como la distribución de tensiones en los niveles de refuerzo y la tensión por debajo de la estructura de contención. Por ejemplo, la ubicación precisa de la tensión máxima en la masa de suelo reforzado requerirá un número importante de puntos de medición, generalmente espaciados en el orden de 30 cm de distancia en la zona crítica. Una reducción en el número de puntos de medición hará difícil la interpretación, si no es que imposible, y puede comprometer los objetivos del programa.

En la preparación del plan de instalación, se debe tener en cuenta la compatibilidad de la programación de la instalación y el calendario de construcción. Si es posible, el contratista deberá ser consultado sobre los detalles que puedan afectar a sus operaciones o a su calendario.

Los procedimientos de instalación paso a paso deben prepararse mucho antes de las fechas previstas de instalación para la todos los instrumentos. Las directrices detalladas para la elección de tipos de instrumentos, los lugares y los procedimientos de instalación se pueden encontrar en el documento *FHWA RD89-043*.

Los posibles instrumentos para el monitoreo se resumen en la Tabla 25.

**TABLA 25.- Condiciones fuera de tolerancia y posibles causas**

Parámetros	Posibles instrumentos
1. Desplazamientos horizontales del paramento	1. Observación visual Métodos topográficos Estaciones de control horizontal Inclinómetros
2. Desplazamientos verticales de la estructura en general	2. Observación visual Métodos topográficos Puntos de referencia Inclinómetros
3. Desplazamientos locales o deterioro de los elementos del paramento	3. Observación visual Medidores de grietas

**TABLA 25.- Condiciones fuera de tolerancia y posibles causas (continuación)**

Parámetros	Posibles instrumentos
4. Comportamiento del drenaje del relleno detrás del muro	4. Observación visual de los puntos de salida Piezómetros de tubo vertical abiertos

5. Desplazamientos horizontales dentro de la estructura general	5. Métodos topográficos Estaciones de control horizontal Extensómetros de sonda Extensómetros fijos en el terraplén Inclinómetros
6. Desplazamientos verticales dentro de la estructura general	6. Métodos topográficos Puntos de referencia Extensómetros de sonda Inclinómetros horizontales Medidores de nivel líquido
7. Desempeño de la estructura apoyada sobre el M.M.E.	7. Numerosos instrumentos posibles (depende de los detalles de la estructura)
8. Empuje lateral de tierras en la parte posterior de los elementos del paramento	8. Células de empuje de tierras Medidores de deformación en las conexiones Celdas de carga en las conexiones
9. Distribución de esfuerzos en la base de la estructura	9. Células de empuje de tierras
10. Esfuerzo en el refuerzo	10. Medidores de esfuerzo de resistencia Medidores de bobina de inducción Manómetros hidráulicos de tensión Medidor de deformaciones de cable vibrador
11. Distribución de esfuerzos en el refuerzo debido a las sobrecargas	11. Mismos instrumentos que en el esfuerzo en el refuerzo (No. 10)
12. Relación entre los asentamientos y la distribución esfuerzo - deformación	12. Mismos instrumentos que: - Desplazamientos verticales de la superficie de la estructura en general (No. 2) - Desplazamientos verticales dentro de la masa de la estructura en general (No. 6) - Esfuerzos en el refuerzo (No. 10) - Células de empuje de tierras
13. Relajación del esfuerzo en los esfuerzos	13. Mismos instrumentos que en el esfuerzo en el refuerzo (No. 10)
14. Esfuerzo total dentro del relleno y en la parte posterior de la sección del muro	14. Células de empuje de tierras
15. Respuesta a la presión de poro por debajo de la estructura	15. Piezómetros de tubo vertical abierto Piezómetros neumáticos Piezómetros de cuerda vibratoria
16. Temperatura	16. Registro de temperatura ambiente Termopares Termistores Dispositivos de resistencia a la temperatura Medidores de escarcha
17. Lluvia	17. Medidor de precipitaciones
18. Presión atmosférica	18. Medidor de presión barométrica

### **6.3.3. Tolerancias**

Las tolerancias permitidas son las que se describen en el Control de Calidad durante el montaje de esta Guía.

### **6.3.4. Control topográfico**

Se deberá monitorear constantemente el avance del montaje con estación total teniendo como referencia un banco de nivel con coordenadas conocidas para tener control total del paramento, detectar posibles errores y corregirlos inmediatamente, ya que de otra manera el desplome se acumularía causando problemas geométricos y estructurales en los paneles del paramento, que con un simple monitoreo se pueden prevenir.

### **6.3.5. Planos conforme a obra**

Debido a la naturaleza y grado de complejidad del proyecto el directo de obra tendrá la obligación de notificar cualquier cambio para que el departamento técnico avale el cambio y se pueda representar en los planos finales, en los cuales se especificarán los cambios realizados en cuanto a procedimiento, cantidades de materiales, especificaciones técnicas, etc.

Es esencial tener en el levantamiento de campo a detalle las estructuras existentes como postes, alcantarillas o cualquier elemento que haya afectado el proyecto en cuestión.

Cuando aparezcan en los planos obras especiales deberá hacerse la mención mediante nota al plano en el que aparece el detalle en cuestión.

En los planos conforme a obra es conveniente marcar cualquier obra de infraestructura encontrada y que no figure en los planos de obra como ductos de servicios públicos, otras líneas que no se hayan reportado en los primeros planos, toda esta información con sus debidas cotas y representadas también en el perfil del plano.

## **6.4. Supervisión**

La construcción de M.M.E. es relativamente simple y rápida. La secuencia de construcción se compone principalmente de la preparación del desplante, colocación y compactación de relleno, tendido del refuerzo en su posición y la instalación de los elementos que componen el paramento (puede ser necesaria tensión del refuerzo). No son requeridos equipo o habilidades especiales y puede ser utilizada la mano de obra local disponible. La mayoría de los proveedores de materiales proporcionan capacitación para la construcción de sus sistemas.

Hay algunas consideraciones especiales de construcción que el equipo de inspección tiene que ser consciente para evitar problemas potenciales en el rendimiento. Estas consideraciones se refieren al tipo de sistema que se va a implementar, a las condiciones específicas del sitio, al material de relleno utilizado y especificaciones del paramento.

Una lista de requisitos generales para la vigilancia y la inspección los M.M.E. se presenta en la Tabla 26.

**TABLA 26.- M.M.E. Lista de inspección de campo**

**1. Lectura de las especificaciones y familiarización con:**

- Requisitos de los materiales
- Los procedimientos de construcción
- Procedimientos de compactación del suelo
- Tolerancias en alineamiento
- Criterios de Aceptación/Rechazo

**TABLA 26.- M.M.E. Lista de inspección de campo (continuación)**

**2. Revisión de los planos de construcción y familiarización con:**

- Secuencia de construcción
- Sistemas de protección a la corrosión
- Colocación especial para reducir daños
- Restricciones de compactación del suelo
- Detalles de los requisitos de drenaje
- Detalles para la construcción de instalaciones
- Construcción del paramento
- Documentos del contratista

**3. Revisión de los requisitos de los materiales, las fichas técnicas y de calidad.**

**4. Comprobación de las condiciones del sitio y las necesidades de cimentación.**

**Observación de:**

- Preparación de la cimentación
- Dala de desplante (comprobar el nivel y alineación)
- Accesibilidad del sitio
- Límites de excavación
- Desalojo de agua en la construcción
- Características de drenaje; filtraciones, arroyos adyacentes, lagos, etc.

**5. En el sitio, comprobación de refuerzos y piezas prefabricadas. Realización de inspecciones de los elementos prefabricados (Ej. patio de colado) según sea necesario. Rechazar elementos prefabricados del paramento sí:**

- Resistencia a la compresión < requisitos de la especificación
- Moldeado imperfecto
- Porosidades en el concreto
- Agrietamiento severo, astillado o cuarteado
- Cuando los paneles por especificación de proyecto lleven color y/o acabado se verificará la no variación del color
- Dimensiones fuera de tolerancia
- Conexiones desalineadas

**6. Revisión de las etiquetas de refuerzo para verificar si coinciden con los documentos de certificación.**

**7. Observación de los materiales en lotes de refuerzos para asegurarse de que son los mismos. Verificación de los refuerzos por fallas y falta de uniformidad.**

**8. Obtención de pruebas de ensayo de acuerdo con los requisitos de especificación a refuerzos seleccionados al azar.**

**9. Observación de la construcción para ver que el contratista cumpla con los requisitos de especificación para la instalación.**

**10. Si es posible, comprobación de los refuerzos después de la colocación del relleno para detectar posibles daños. Esto se puede hacer ya sea mediante la construcción de una instalación de prueba, o removiendo una pequeña sección de relleno y observando el refuerzo después de la colocación y la**

compactación del agregado, al comienzo del proyecto. Si se producen daños, póngase en contacto con el ingeniero de diseño.

11. Comparación de todos los refuerzos y piezas prefabricadas contra el envío inicial aprobado y recoger muestras de prueba adicionales.

12. Monitoreo de la alineación del paramento:

- Juntas de los paneles adyacentes (típicamente  $19 \text{ mm} \pm 6 \text{ mm}$ )
- Paramento de paneles prefabricados: (6 mm por m horizontal y vertical; 4 mm por m general vertical)
- Muros de cara envuelta: (15 mm por m horizontal y vertical; 8 mm total vertical)
- Alineamiento y nivelación

#### 6.4.1. Supervisión del montaje de paramentos y elementos de refuerzo

El objetivo es vigilar y comprobar que el montaje se hace de acuerdo a planos, especificaciones técnicas y los procesos constructivos.

El procedimiento a seguir comprende los puntos siguientes:

- Comprobar que se colocan las cuñas de madera suficientes para impedir el movimiento de las últimas filas de paneles.
- Comprobar que se van retirando todas las cuñas de madera a medida que avanza el montaje
- Comprobar que no se coloca más de una fila de paneles por encima del nivel de relleno.
- Comprobar que ningún punto del paramento recién colocado esté alejado más de lo que corresponde a su posición teórica.
- Medir el desplome local de la última fila de paneles con regla de 4,5 m.
- Aplicar a toda la superficie del paramento la regla de 4,5 m para detectar posibles defectos locales.
- Comprobar que se colocan en las juntas horizontales los neoprenos, así como en las juntas horizontales y verticales geotextiles.
- Comprobar que se colocan los refuerzos prescritos y que se colocan y/o atornillan adecuadamente en las conexiones.
- Comprobar que toda la extensión del refuerzo reposa adecuadamente sobre la capa inferior del relleno, sobre todo en la zona cercana a la conexión.

#### 6.4.2. Supervisión de la extensión del material de relleno

El procedimiento comprende:

- Comprobar aproximadamente el espesor y anchura de las capas.
- Vigilar la temperatura ambiente.
- Comprobar que la extensión se realiza paralelamente al paramento en las secuencias que se señale en el procedimiento constructivo.
- Comprobar que no se altere la colocación de los refuerzos.

#### 6.4.3. Supervisión de la compactación del relleno

El objetivo de esta supervisión comprende:

- Comprobar que en la franja de 1,0 m contigua al paramento no se utilicen compactadoras no autorizadas en los procedimientos constructivos
- Comprobar que no se produzcan blandones durante la compactación.

- Comprobar que la compactación de cada capa cumpla con las condiciones de densidad establecidas en las prescripciones técnicas.
- Además se realizaran una serie de pruebas de laboratorio: contenido de humedad, y densidad.

**6.4.4. Control geométrico del muro mecánicamente estabilizado.**

El procedimiento consiste en comprobar las cotas de replanteo del eje, con una mira cada 20 m más los puntos singulares (tangentes de curvas horizontales y verticales, etc.), colocando estacas niveladas en mm. En esos mismos puntos se comprobará la anchura y la pendiente transversal colocando estacas en los bordes del perfil transversal.

Desde los puntos de replanteo se comprobará si aparecen desigualdades de anchura, de rasante o de pendiente transversal y se aplicará la regla de 3 m donde se sospechen variaciones superiores a las tolerables.

Se medirá el desplome total del paramento.

Se aceptarán las secciones que cumplan las condiciones geométricas exigidas en los planos constructivos. Las irregularidades que excedan de las tolerancias admitidas deberán ser corregidas por el contratista, mediante excavaciones o añadido de material y escarificado previo de la superficie subyacente.

Una vez compactada la zona objeto de reparación, deberán repetirse en ella los ensayos de densidad, así como la comprobación geométrica. Se desmontará la parte superior del macizo y se volverá a montar una vez subsanado el exceso de desplome

## 7. GLOSARIO DE TÉRMINOS

- Análisis Global.* Análisis de una estructura en conjunto, no en forma individual.
- Análisis Local.* Estudio en profundidad de los esfuerzos - deformaciones en o entre componentes de un sistema.
- Ángulo de Fricción Interna.* Básicamente es una propiedad de los materiales granulares, estando relacionada con el ángulo de reposo o el ángulo máximo posible de la pendiente de un conjunto de ése material.
- Berma.* Talud empleado para estabilizar el terraplén, relleno o un terreno blando.
- Carga.* Efecto de la aceleración, incluyendo el ocasionado por la gravedad, deformaciones impuestas, o cambios volumétricos.
- Carga Factorizada.* Cargas nominales multiplicadas por los factores de carga apropiados especificados para las combinaciones de carga bajo estudio.
- Cargas Permanentes.* Cargas y las fuerzas que son, o se asumen son, una constante hasta la terminación de la estructura.
- Cimentación.* Elemento de soporte que emana su resistencia por transferir su carga a la tierra o roca de soporte.
- Cohesión.* Es la cualidad por la cual las partículas del terreno se mantienen unidas en virtud de fuerzas internas, que dependen, entre otras cosas del número de puntos de contacto que cada partícula tiene con las partículas aledañas.
- Diseño de Factores de Cargas y Resistencia* (Load and Resistance Factor Design, LRFD). Metodología de diseño de confiabilidad basada en que los efectos de las fuerzas causados por las cargas factorizadas no se les permite superar la resistencia factorizada de los componentes.
- Efecto de una Fuerza.* Deformación, tensión o esfuerzo resultante (p.e. fuerza axial, fuerza cortante, momento flexionante, etc.) causados por cargas aplicadas, deformaciones impuestas o cambios volumétricos.
- Empotrar.* Dejar fijo un elemento en el suelo, generalmente al colocar una superficie de choque contra el elemento a fijarse.
- Estado Límite.* Una condición más allá del cual la estructura o componente deja de satisfacer las disposiciones para el cual fue diseñado
- Estado Límite de Servicio.* Estados límite relativos a los esfuerzos, deformación y el agrietamiento bajo condiciones de funcionamiento normales.
- Estado Límite de Resistencia.* Estados límite relacionados con fuerza y estabilidad durante la vida de diseño.
- Factor de Carga.* Multiplicador aplicado para forzar a los efectos tomados principalmente por la variabilidad de las cargas, la falta de precisión en el análisis y la probabilidad de la ocurrencia simultánea de diversas cargas, pero también relacionados con las estadísticas de la resistencia a través de un proceso de calibración.
- Factor de Resistencia.* Multiplicador aplicado a la resistencia nominal que representa principalmente la variabilidad de las propiedades del material, dimensiones estructurales y la falta de certeza en la predicción de la resistencia, pero también relacionado con las estadísticas de las cargas a través de un proceso de calibración.
- Geosintético.* Término genérico que abarca materiales poliméricos flexibles utilizados en geotecnia como geotextiles, geomembranas, geomallas, etc.
- Límite Elástico.* Resistencia la fluencia especificada del refuerzo.

- Modelo.* Idealización física o matemática de una estructura con la finalidad de obtener un análisis.
- Muro Mecánicamente Estabilizado.* Sistema de retención del suelo, empleando tiras o rejillas, tipo metálicos o refuerzos poliméricos en la masa del suelo y un elemento de revestimiento vertical o casi vertical.
- Paramento.* Componente de un Muro Mecánicamente Estabilizado empleado para prevenir que el suelo se disgregue a través de las filas de refuerzos.
- Presión Activa de Tierra.* Presión lateral resultante de la retención de la tierra por una estructura o componente que tiende a alejarse de la masa del suelo.
- Presión en Reposo de Tierra.* Presión horizontal de la tierra actuando en una estructura rígida. Se asume en donde es necesario reducir al mínimo las deformaciones laterales y horizontales de los suelos.
- Presión Pasiva de Tierra.* Presión lateral resultante de la resistencia de la tierra para el movimiento lateral de una estructura o componente en la masa de suelo.
- Recubrimiento Mínimo del Concreto.* Distancia mínima especificada entre la superficie de las varillas de refuerzo, conductos pos tensores, anclajes y otros elementos ahogados, y la superficie del concreto.
- Refuerzos.* Son elementos horizontales ubicados dentro del suelo para mejorar su comportamiento.
- Refuerzos Extensibles.* Son aquellos que sufren deformación al estar sometidos a tensión, normalmente se trata de Geomallas o geotextiles. Sus propiedades se ven afectadas por factores como al instalación, temperatura, degradación química, etc.
- Refuerzos Inextensibles.* Son aquellos que no sufren una deformación importante al estar sometidos a tensión, normalmente consisten en tiras o mallas de acero. Su vida útil depende principalmente de la reducción de su sección transversal.
- Resistencia Factorizada.* Resistencia nominal multiplicada por un factor de resistencia.
- Resistencia Nominal.* Resistencia de un componente o una conexión a la fuerza, según lo indicado por las dimensiones especificadas en los documentos del contrato y por las tensiones admisibles, deformaciones o determinada resistencia de materiales.
- Sobrecarga.* Carga utilizada para modelar el peso del terraplén de tierra u otras cargas aplicadas a la parte superior del material retenido.
- Suelo Normalmente Consolidado.* Un suelo para la cual la presión efectiva de sobrecarga actual es que igual que la presión máxima que se ha experimentado.
- Suelo Sobreconsolidado.* Un suelo que ha estado bajo una presión mayor de sobrecarga que existe en la actualidad.
- Talud.* Superficie inclinada de un muro o de un terreno con respecto a la horizontal.
- Vida de Diseño.* Período de tiempo en que se basa la derivación estadística de carga transitoria: 75 años de acuerdo al AASHTO.
- Vida de Servicio.* Período de tiempo en el que se espera que la estructura esté en funcionamiento.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Christopher B.R., Gill S.A., Giroud J.P., Mitchell J.K., Schlosser F., and Dunicliff J. Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Structures - Volume I, Design and Construction Guidelines - Volume II, Summary of Research and Systems Information, by, FHWA-NHI-00-043.

AASHTO, 2012, LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D.C.

AASHTO, 2010, AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications, Third Edition, LRFDCONS-3, American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D.C.

Evaluation of Soil and Rock Properties

ASTM. 2010. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, P.A.

ASTM C 136-01 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates

ASTM C 117-95 Standard Test For Materials Finer Than 75  $\mu\text{m}$  Sieve in Mineral

Aggregates by Whashing

ASTM D 2488-69 Unified Soil Classification System

ASTM D 1586 Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils

ASTM D 3441 Cone Penetration Test

ASTM D 2974 Contenido orgánico

ASTM D 3080 Direct Shear Test (AASHTO T 236)

ASTM G57 o AASHTO T288 I Resistividad

ASTM D 4972 o AASHTO T 289 I PH

AASHTO T 291 I Chlorides

AASHTO T 290 I Sulfates

AASHTO T 267 Standard Method of Test for Determination of Organic Content in Soils by Loss on Ignition.

AASHTO T99

AASHTO T90 Plasticity Index (PI)

AASHTO T27 Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates

Juárez, B. E. y Rico, R. A., Mecánica de Suelos, Tomo III, Capítulo VI, Editorial LIMUSA, México, D.F. (1998).

Rico, R. A. y Del Castillo, H., *La Ingeniería de Suelos en la Vías Terrestres*.- Volumen 1, Capítulo 7, primera edición, Editorial LIMUSA, México, D.F. (1974).

Editorial LIMUSA, México, D.F. (1998).

Cristiano Melo and Sunil Sharma, Vancouver, Canada 2004, "Seismic Coefficients for Pseudostatic Slope Analysis", 13th World Conference on Earthquake Engineering.

Federal Highway Administration, Washington D.C 2011, "LRFD Seismic Analysis and Design of Transportation Geotechnical Features and Structural Foundations", Reference Manual.

Neven Matasovic, St. Louis, Missouri 1991, "Selection of Method for Seismic Slope Stability Analysis", Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.

Bielza, Feliú Ana, Manual de Técnicas de Tratamiento del Terreno. Madrid 1999.

Petros P. Xanthakos, "Ground Anchors and Anchored Structures" A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. Canada.

Roberto Ucar Navarro, "Manual de Anclajes en Ingeniería Civil", Madrid 2004.

SMMS, "Manual de Construcción Geotécnica", Tomo I, Capítulo 5 Sistemas