

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**Comparación entre Muros de Suelo Reforzado  
con elementos extensibles y no extensibles**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

**Miguel Alonso Pinedo Arévalo**

**ASESOR: Augusto Martin Alza Vilela**

Lima, Mayo del 2012

## RESUMEN

Existen diversos tipos de estructuras de suelo reforzado, entre los que destacan los muros de suelo reforzado con elementos extensibles y los reforzados con elementos inextensibles. Los elementos de refuerzo inextensibles consisten en flejes o mallas de acero, mientras que los elementos de refuerzo extensible son las geomallas o geotextiles.

Con el propósito de poder establecer una comparación entre ambos sistemas de muros de suelo reforzado, se realizó el diseño para ambos sistemas, teniendo en consideración los mismos parámetros de diseño.

En el diseño de muros de suelo reforzados con elementos extensibles, se puede verificar que los elementos de refuerzo (Geomallas) están afectados por numerosos factores de reducción, los cuales reducen significativamente su resistencia a la tracción en un 72%, lo cual genera un mayor factor de seguridad para la estructura.

El factor de reducción de resistencia más influyente para los refuerzos extensibles es el que se debe al creep. Mientras que para los refuerzos inextensibles el factor más importante en la reducción de la resistencia es la disminución del espesor. Es por ello que el diseño para muros de suelo reforzados con elementos extensibles es mucho más conservador que para los muros reforzados con elementos inextensibles.

Se puede concluir que los muros de suelo reforzados con elementos inextensibles son entre un 23 a 34% más costosos que los muros de suelo reforzados con elementos extensibles. Esta tendencia solo pudo ser verificada hasta una altura de diseño de 11.25m, la cual corresponde a la máxima altura diseñada para cada uno de los dos sistemas de muro de suelo reforzado.

La envergadura de ambos sistemas de muros de suelo reforzados tiene influencia en los costos de los materiales. En el caso de los muros de suelo reforzados con elementos extensibles y fachada de bloques de concreto, para cualquier altura, el movimiento de tierra es el que tiene mayor influencia en el costo total del muro (de 46 a 51%) para el rango de alturas diseñadas ( $H=4.5\text{m}$  a  $H=11.25\text{m}$ ).

En el caso de los muros de suelo reforzado con elementos inextensibles y fachada de paneles de concreto, para cualquier altura, los elementos de refuerzo y el movimiento de tierra son los materiales que más influencia tienen en el costo total del muro de suelo reforzado.



# ÍNDICE

<b>Capítulo I - Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo II - Marco Teórico .....</b>	<b>3</b>
2.1. Reseña Histórica y comparación con Muros Convencionales.....	3
2.2. Muros de Suelo Reforzado. ....	11
2.3. Elementos del Muro de Suelo Reforzado .....	12
2.3.1. Elementos de Refuerzo.....	12
2.3.1.1. Propiedades de los refuerzos Extensibles.....	12
2.3.1.1. Factores de Reducción.....	13
2.3.1.2. Propiedades de los refuerzos Inextensibles .....	17
2.3.2. Suelos involucrados en el diseño.....	21
2.3.2.1. Suelo Reforzado .....	21
2.3.2.1.1. Propiedades Electroquímicas .....	23
2.3.2.2. Suelo Retenido.....	24
2.3.2.3. Suelo Fundación .....	24
2.3.3. Clasificación de los Sistemas de Muro Suelo Reforzado .....	25
2.3.3.1. Por tipo de elementos de Refuerzo .....	25
2.3.3.2. Por tipo de Paramento externo.....	30
2.4. Mecanismo de transferencia de esfuerzos .....	34
2.4.1. Modo de acción del refuerzo.....	35
2.4.2. Características geométricas del refuerzo .....	36
2.4.3. Interacción del suelo reforzado.....	37
2.5. Diseño de Muros de Suelo Reforzado .....	43
2.5.1. Metodología de Diseño.....	43
2.5.2. Predimensionamiento del Muro de Suelo Reforzado. ....	44
2.5.3. Análisis de la estabilidad Externa.....	48
2.5.3.1. Análisis Sísmico .....	54
2.5.4. Análisis de la estabilidad Interna.....	58
2.5.4.1. Muros de Suelo Reforzado con elementos Extensibles.....	59
2.5.4.1.1. Análisis Sísmico .....	64
2.5.4.2. Muros de Suelo Reforzado con elementos Inextensibles .....	66
2.5.4.2.1. Análisis Sísmico .....	70
2.5.5. Resistencia de diseño de las conexiones de los refuerzos .....	72
2.5.6. Drenaje del Muro de Suelo Reforzado .....	74
<b>Capítulo III - Diseños de Muros de Suelo Reforzado del Proyecto Bayovar .....</b>	<b>76</b>
3.1. Descripción del Proyecto.....	76
3.1.1. Ubicación.....	76
3.1.2. Parámetros de Suelos.....	76
3.1.3. Sobrecargas.....	76

3.2. Softwares empleados para el diseño .....	77
3.2.1. Descripción del Software MSEW 3.0 .....	77
3.2.2. Descripción del Software TAI-VALDEZ 3.0.....	78
3.3. Diseños de Muros de Suelo Reforzado.....	79
3.3.1. Diseño de Muro de Suelo Reforzado con elementos Extensibles .....	79
3.3.1.1. Geometría del Muro .....	79
3.3.1.2. Geomallas Estructurales .....	80
3.3.1.3. Diseño Hidrostático .....	80
3.3.1.4. Resultados de los distintos diseños.....	80
3.3.2. Diseño de Muro de Suelo Reforzado con elementos Inextensibles.....	81
3.3.2.1. Geometría del Muro .....	81
3.3.2.2. Flejes Metálicos.....	81
3.3.2.3. Diseño Hidrostático .....	82
3.3.2.4. Resultados de los distintos diseños.....	82
 <b>Capítulo IV - Comparacion Técnica y Económica.....</b>	<b>83</b>
4.1. Comparación Técnica .....	83
4.1.1. Análisis Pseudoestático .....	83
4.1.1.1. Estabilidad Externa.....	83
4.1.1.1. Estabilidad Interna.....	86
4.2. Comparación Económica.....	88
4.2.1. Criterios de Comparación Económica.....	88
4.2.1.1. Costo por metro cuadrado de Muro de Suelo Reforzado .....	88
4.2.1.2. Costo por metro lineal de Muro de Suelo Reforzado .....	90
4.2.2. Comparación económica entre ambos sistemas en porcentajes .....	91
4.2.3. Incidencia de costos de los materiales constituyentes .....	92
4.2.3.1. Muros de Suelo Reforzado con elementos Extensibles.....	92
4.2.3.2. Muros de Suelo Reforzado con elementos Inextensibles .....	93
 <b>Capítulo V - Conclusiones.....</b>	<b>95</b>
5.1. Conclusiones.....	95
 <b>Capítulo VI - Bibliografía .....</b>	<b>97</b>
6.1. Bibliografía.....	97

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla N°	Pág.
2.1. Factores de reducción por daños de instalación .....	- 14 -
2.2. Factores de reducción por Creep .....	- 14 -
2.3. Criterios para la aplicación de factores de reducción por defecto .....	- 16 -
2.4. Productoria de factores de reducción. ....	- 17 -
2.5. Factores de Resistencia de los elementos de refuerzo inextensible .....	- 18 -
2.6. Velocidades de corrosión de los refuerzos inextensibles. ....	- 20 -
2.7. Gradaciones recomendadas y Requisitos de Plasticidad para relleno reforzado .....	- 22 -
2.8. Propiedades electroquímicas para el material de relleno reforzado con elementos inextensibles .....	- 23 -
2.9. Propiedades electroquímicas para el material de relleno reforzado con elementos extensibles .....	- 24 -
2.10. Factores de corrección por efecto de escala de los elementos de refuerzo .....	- 40 -
2.11. Factores de Seguridad Elementos Inextensibles .....	- 44 -
2.12. Factores de Seguridad Elementos Extensibles .....	- 44 -
2.13. Longitud Mínima de los elementos de refuerzo .....	- 46 -
2.14. Coeficientes de Soporte .....	- 54 -
2.15. Recomendaciones para la gradación del relleno del drenaje .....	- 40 -
3.1. Parámetros de Suelos .....	- 76 -
3.2. Factores de reducción empleados para calcular la resistencia a la tensión de diseño de las geomallas de HDPE .....	- 80 -
3.3. Características de los flejes metálicos.....	- 81 -
4.1. F.S por Norma y F.S del diseño al deslizamiento para cada altura de diseño .....	- 84 -
4.2. F.S por Norma y F.S del diseño al volteo para cada altura de diseño .....	- 84 -
4.3. Configuración Geométrica de los muros de suelo reforzado con elementos extensibles y reforzado con elementos inextensibles.....	- 85 -
4.4. F.S a la rotura de los elementos de refuerzo (Geomallas y Flejes metálicos) para cada altura de diseño .....	- 86 -
4.5. Costo por metro cuadrado para muros de suelo reforzado con elementos extensibles (Geomallas) y elementos inextensibles (Flejes metálicos).....	- 89 -
4.6. Costo por metro lineal para muros de suelo reforzado con elementos extensibles (Geomallas) y elementos inextensibles (Flejes metálicos).....	- 90 -
4.7. Comparación económica de un Muro de Suelo Reforzado con elementos extensibles respecto a uno reforzado con elementos inextensibles.....	- 91 -
4.8. Porcentajes de incidencia de los materiales constituyentes.....	- 92 -

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

---

Gráfico N°	Pág.
4.1. F.S a la rotura versus Altura de diseño .....	- 87 -
4.2. Altura versus costo por metro cuadrado para muros de suelo reforzado.....	- 89 -
4.3. Altura versus costo por metro lineal para muros de suelo reforzado .....	- 91 -
4.4. Economía en porcentaje de un Muro de Suelo Reforzado con elementos inextensibles respecto a uno reforzado con elementos extensibles.....	- 92 -
4.5. Porcentaje de incidencia de los materiales constituyentes (Elementos Extensibles) .....	- 93 -
4.6. Porcentaje de incidencia de los materiales constituyentes (Elementos Inextensibles) .....	- 94 -





## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°	Pág.
2.1. Estructura Romana - "Wharfroman" .....	- 4 -
2.2. Estructura de suelo reforzado Munster.....	- 4 -
2.3. Muro Vidal.....	- 5 -
2.4. Manejo de Terraplén con refuerzo en una vía férrea. ....	- 8 -
2.5. Esquema de estabilización de talud .....	- 8 -
2.6. Sección Transversal Típica de un Muro de Suelo Reforzado .....	- 11 -
2.7. Tipos de refuerzo para muros de suelo reforzado.....	- 26 -
2.8. Esquema de una estructura de suelo reforzado con geomallas.....	- 29 -
2.9. California Department of Transportation.....	- 30 -
2.10. FHWA-Western Federal Lands Highway Division .....	- 31 -
2.11. FHWA-Western Federal Lands Highway Division .....	- 31 -
2.12. Muro de Suelo Reforzado Vía Expresa del Callao .....	- 32 -
2.13. U.S Forest Service - Klamath National Forest.....	- 32 -
2.14. Transferencia de esfuerzos friccionantes entre el suelo y la superficie del refuerzo.....	- 34 -
2.15. Resistencia pasiva del suelo en contacto con los refuerzos .....	- 35 -
2.16. Cobertura de los elementos de refuerzos.....	- 37 -
2.17a. Ubicación de la zona de máxima tensión para Elementos de Refuerzo inextensibles.....	- 38 -
2.17b. Ubicación de la zona de máxima tensión para Elementos de Refuerzo extensibles.....	- 39 -
2.18. Cargas externas en muro sin talud superior y ubicación de sobrecarga de tráfico según análisis a realizar .....	- 47 -
2.19. Mecanismo de falla en el análisis de la estabilidad externa .....	- 48 -
2.20. Condición de muro sin sobrecarga de talud .....	- 56 -
2.21. Condición de muro con sobrecarga de talud .....	- 57 -
2.22. Mecanismos de Falla para Análisis por Estabilidad Interna .....	- 59 -
2.23. Localización de la superficie de falla potencial para el análisis de estabilidad interna.....	- 60 -
2.24. Definición de profundidades "dn" .....	- 61 -
2.25. Análisis Sísmico de la estabilidad interna para refuerzos extensibles .....	- 64 -
2.26. Distribución del coeficiente de adherencia .....	- 69 -
2.27. Distribución del coeficiente horizontal de empuje.....	- 69 -
2.28. Líneas de Máximas tensiones en elementos inextensibles.....	- 70 -
2.29. Sección de la Cuña Activa.....	- 71 -
3.1. Interfase gráfica del software MSEW 3.0 .....	- 78 -



## 1.1 Introducción

Los muros de suelo reforzado son estructuras que surgen como alternativa a los muros convencionales de concreto armado. El concepto o la idea que se manejó en los inicios de los muros de suelo reforzado está directamente relacionado con el concepto de Tierra Armada, el cual fue introducido por el francés Henri Vidal y patentado en 1963. En el Perú la primera obra que aplicó esta técnica fue ejecutada en el año 1972.

Es a partir del concepto de Tierra Armada, suelo reforzado con elementos inextensibles, que surge el concepto de Muro de Suelo Reforzado, el cual no solamente involucra la técnica de Tierra Armada, sino también la técnica de Muros de Suelo Reforzado con elementos extensibles, como es el caso de los geosintéticos. Desde ese entonces se han construido en todo el mundo más de 40000 estructuras de muro de suelo reforzado, las cuales cubren alrededor de 30 millones de metros cuadrados.

La construcción de estructuras que aplican la técnica de muros de suelo reforzado con elementos extensibles en nuestro país comienza a mediados de los años 90. Fue sin embargo, en el año 2000 en que dicha técnica alcanzó un alto grado de desarrollo y difusión. En la actualidad este tipo de estructuras son cada vez más requeridas, ya que tienen diversas aplicaciones en el campo de la ingeniería civil.

Los muros de suelo reforzado son sistemas compuestos de suelo compactado y elementos de refuerzo en tensión. Su resistencia interna se debe principalmente al refuerzo y externamente se diseñan como estructuras masivas por gravedad. Son fáciles, sencillas y rápidas de construir; utilizan el suelo como su principal componente y pueden adaptarse fácilmente a la topografía. Los muros de suelo pueden ser reforzados con elementos inextensibles entre los cuales se destaca a los flejes o mallas metálicas, y con refuerzos extensibles (refuerzos plásticos) como es el caso de los geosintéticos (geotextiles o geomallas). El estudio y análisis de las estructuras de muro de suelo reforzado están basadas en la normativa propuesta por la AASTHO en la Standard Specifications for Highway Bridges y por la Publication N° FHWA-NHI-00-043 de la FHWA.

Para poder establecer una comparación entre muros de suelo reforzado con elementos extensibles, geomallas, y con elementos inextensibles, flejes o mallas de acero, se evaluará el proyecto Bayóvar de la Compañía Minera Miski Mayo S.A.C, el cual se encuentra ubicado en el distrito y provincia de Sechura, departamento de Piura,

aproximadamente a 1000 km al norte de la ciudad de Lima, a 110 km al sur de la ciudad de Piura y a 30 km del Océano Pacífico. Dicho proyecto estuvo a cargo de la Compañía Vale del Río Doce (CVRD).

En dicho proyecto se hizo empleo de los muros de suelo reforzado con elementos extensibles para la zona de descarga del mineral de los camiones. La construcción de los muros estuvo a cargo de la empresa Constructora Odebrecht. Con el propósito de realizar la comparación ya mencionada se planteó una alternativa distinta, la cual consistió en el diseño de un muro de suelo reforzado con elementos inextensibles, flejes de acero. La comparación tiene como finalidad poder establecer semejanzas y diferencias técnicas y económicas entre uno y otro sistema.



## 2.1. RESEÑA HISTÓRICA Y COMPARACIÓN CON MUROS CONVENCIONALES

Desde tiempos inmemorables la idea de relacionar distintos elementos de refuerzo con las obras civiles acompañó a la historia de la humanidad. Caminos persas y la gran muralla china son ejemplos de un sistema de refuerzo que generalmente se realizaban con materiales vegetales fibrosos.

Respecto a la gran muralla china, se tiene conocimiento de que para su construcción se empleó la técnica de suelo reforzado. En esta estructura se empleó como material de relleno una combinación de grava y arena que fue reforzada con ramas de un arbusto llamado “tamarisk”. (NCMA, Design Manual for Segmental Retaining Walls, 1997).

Otro de los claros ejemplos en donde se empleó la técnica de suelo reforzado es el Ziggurat, hoy conocida como Agar-Quf de la Antigua ciudad de Dur-Kurigatzu. En la actualidad dicha estructura tiene 45m de altura y está ubicado a cinco kilómetros de la ciudad de Bagdad. La construcción se realizó empleando ladrillos de arcilla, lo cual constituía la fachada de la estructura, además se hizo empleo de esteras tejidas de caña, espaciadas verticalmente entre 0.5 y 2 metros, que eran colocadas como refuerzo horizontal dentro de un estrato de arena y grava. Se calcula que la estructura está por encima de los 3000 años de antigüedad. (BAGIR, 1944, citado por JONES, 1996).

La cultura romana también tuvo conocimiento del concepto de suelo reforzado. Es por ello que construyeron diques a lo largo de río Tiber, el tercero más grande de Italia. Un reciente descubrimiento pone al descubierto que en la ciudad de Londres la Armada Romana construyó un muelle para el puerto de “Londinium”, en el cual se emplearon técnicas muy similares a los que usamos hoy en día respecto al suelo reforzado. El muelle de madera, el cual se estima que tiene una longitud de 1.5 kilómetros ha sido conservado por alrededor de 1900 años. Los 2 metros de altura de dicha construcción se realizó empleando bloques de roble que median hasta 9 metros de longitud, los cuales mantenían su cara vertical mediante refuerzos de madera incrustados en el relleno posterior. (Fig. 2.1) (BASSETT, 1981, citado por JONES, 1996).

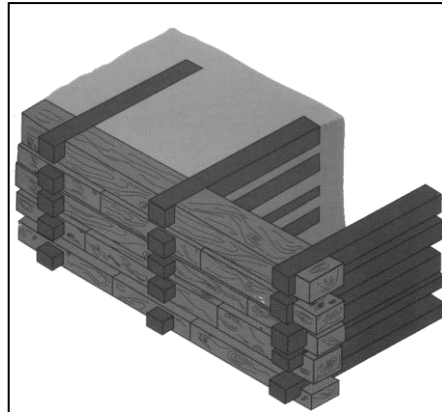


Figura 2.1. Estructura Romana – “wharfroman” (JONES, 1996)

Al parecer el inicio de estructuras de suelo reforzado estuvo directamente relacionado con el control del río por medio de obras de contención y diques. Estas estructuras eran formadas teniendo como refuerzo cañas y relleno de arcilla, tal es el caso que se puede apreciar a lo largo del río Tigres y Eufrates, todo esto mucho antes de que los romanos adoptaron mencionada técnica (FHWA-NHI-00-043, 2001).

En 1925 en los Estados Unidos, Munster desarrollo un muro de suelo reforzado, para lo cual se empleó elementos de madera como refuerzo y un pequeño paramento. Los problemas que este sistema podría generar durante su construcción fueron minimizados por medio del uso de conectores deslizantes que interactuaban entre los elementos de refuerzo y la cara del muro. Las técnicas usadas para la construcción de dicho muro son en esencia las que se utilizan en la actualidad (JONES, 1996) (Fig. 2.2).

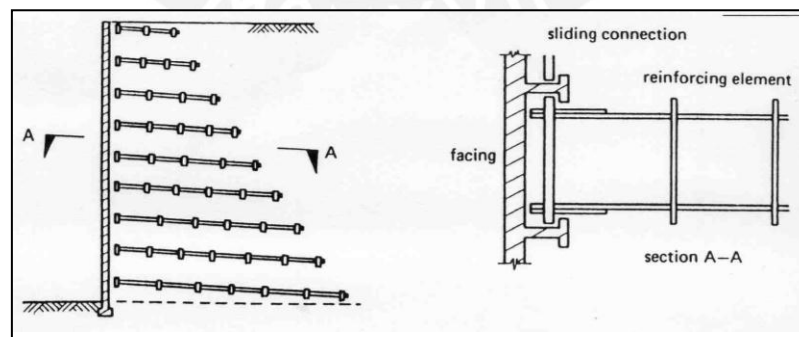


Figura 2.2. Estructura de suelo reforzado Munster (JONES, 1996)

La idea de una estructura de muro de suelo reforzado comenzó a gestarse durante la década de 1960. El concepto denominado “Tierra Armada” fue patentado por el

arquitecto francés Henri Vidal en 1966. La idea inicial que tuvo Vidal fue la de un material de relleno reforzado por tiras planas colocadas de manera horizontal sobre un determinado suelo friccionante. El término de “tierra Armada actualmente se emplea para describir las distintas formas de suelo reforzado (Jones, 1996).

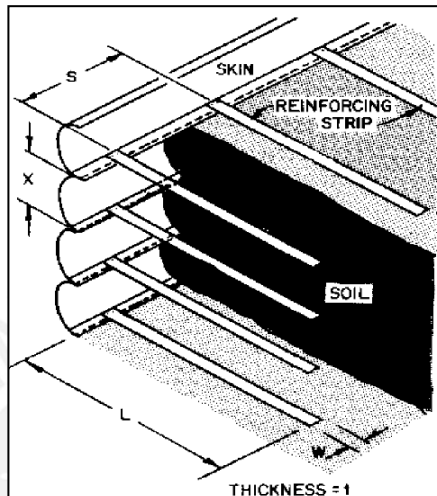


Figura 2.3. Muro Vidal. (NAVFAC, 1986).

Jewell (1992) manifestaba que la construcción de “Tierra Armada” involucraba distintos elementos y materiales tales como tiras metálicas, suelo granular y paramento de paneles. Se pudo constatar que la técnica resultaba económica, razón por la cual se generó interés no solo comercial sino también académico. Según lo manifestado por Elias (2001) el uso de materiales sintéticos en suelos reforzados fue iniciado a partir del año de 1971 en Francia y en 1974 se hizo en los Estados Unidos. Para el año 1981 se logró construir el primer muro de suelo reforzado con geomallas.

El sistema de “Tierra Armada” propuesto por Vidal se desarrolló de manera muy rápida. Fue así que se comenzó a realizar importantes estudios por importantes compañías entre las cuales destaca el “Laboratoire des Pont Et Chaussées” (LCPC) en Francia, el “United Kingdom Department of Transport”, así como también el “United States Department of Transportation” de los Estados Unidos. Este trabajo de investigación permitió la introducción de distintos elementos perfeccionados que servirían como refuerzo, así mismo permitió mejorar y ahondar mucho más en el concepto que se tenía sobre el diseño del denominado sistema de suelo reforzado.



Fue a partir de la investigación realizada por estas compañías que se comenzó a introducir al mercado distintos elementos de refuerzo, entre los cuales destacan los textiles, aunque finalmente estos elementos terminaron siendo utilizados en aplicaciones geotécnicas fuera del suelo reforzado. El mayor uso de las telas geotextiles ha sido desarrollado en las áreas de separación, filtración y drenaje. En el año 1974, el “California Department of Transportation” introdujo el uso de mallas o grillas como elementos de refuerzo en los denominados muros de contención, lo cual significó un nuevo avance en el desarrollo de este tipo de estructuras. (JONES y HASSAN, 1992).

La evolución que se viene dando en los materiales tiene consecuencia directa en el desarrollo del suelo reforzado. Los avances tecnológicos que se vienen dando en la actualidad permiten la utilización de materiales artificiales o de ingeniería no sólo para este tipo de estructuras sino para cualquiera que pueda existir.

Dentro del campo de las geomallas existen las geomallas uniaxiales de polietileno de alta densidad, las cuales se vienen usando dentro del campo de la ingeniería civil desde la década de 1960. Una de sus primeras aplicaciones fue en la construcción de terraplenes para una estación ferroviaria, estas geomallas uniaxiales sirvieron como refuerzo del relleno formado por ceniza volcánica y con el propósito de poder conseguir niveles más altos de compactación. Por esa misma década, las geomallas biaxiales de polipropileno fueron empleadas para recuperar suelos blandos en el Aeropuerto de Nyeta en Tokio y a su vez mejorar la capacidad portante de la sub-base, todo de esto de acuerdo a la línea de acción de la “California Highway Authority” y la West Yorkshire Metropolitan Country. (JONES y HASSAN, 1992)

Hoy en la actualidad el empleo de materiales Geosintéticos en suelos reforzados y taludes ha crecido con gran notoriedad. Este gran crecimiento se debe fundamentalmente a que el sistema en general constituye una alternativa económica y de fácil construcción

Las razones por las cuales los muros de suelo reforzado se han popularizado se debe son las siguientes:

- **Economía**

En la mayoría de los países tropicales, por lo general los gaviones se constituyen en el material más utilizado para estructuras de contención, seguido muy de cerca por los muros de suelo reforzado con geosintéticos. Estas estructura

que se acaban de mencionar son mucho más económicas que los muros convencionales de concreto simple o reforzado.

Es importante mencionar que por lo general en estas estructuras se acostumbra emplear como elemento de refuerzo los geotextiles, debido a que son más baratos que las geomallas u otros tipos de refuerzo, a pesar de que su comportamiento resulte en la mayoría de los casos menos eficientes.

- **Comportamiento**

La flexibilidad con la que cuentan los muros de suelo reforzado con geosintéticos resulta una enorme ventaja sobre los muros rígidos. Cabe destacar que los muros de suelo reforzado con geosintéticos tienen un mejor comportamiento que los terraplenes sin refuerzo.

- **Estética**

Las estructuras de muros de suelo reforzado tienen la posibilidad de ser recubiertas con vegetación lo cual resulta mucho más atractivo no solo desde el punto de vista paisajístico sino también desde el punto de vista ambiental.

Los muros de suelo reforzado suelen estar asociados con proyectos relacionados con lo siguiente:

- **Terraplenes para Carreteras**

La construcción de muros de suelo reforzado para la conformación de terraplenes en carreteras o en vías férreas es una práctica muy frecuente (Fig.2.4). La principal ventaja de realizar este tipo de estructuras está en el hecho de que se requiere un menor volumen de material de relleno. Frente a solicitaciones sísmicas los terraplenes tienen una respuesta aceptable.



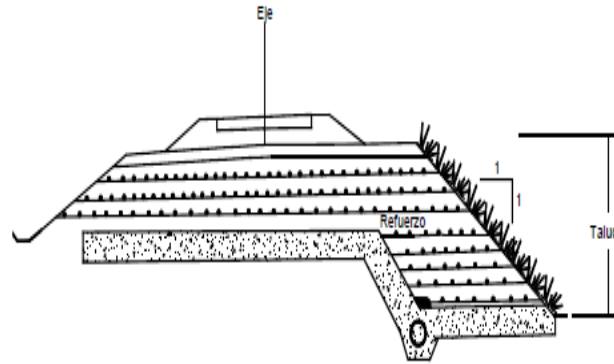


Figura 2.4 .Manejo de Terraplén con refuerzo en una vía férrea

(Modificada de Wayne y Miller, 1996)

- **Estabilización de taludes de corte**

En situaciones en las que exista riesgo de posibles deslizamientos en los cortes de carreteras, una alternativa frente a esta problemática es la construcción de un muro de suelo reforzado, tal y como se muestra en la siguiente figura.

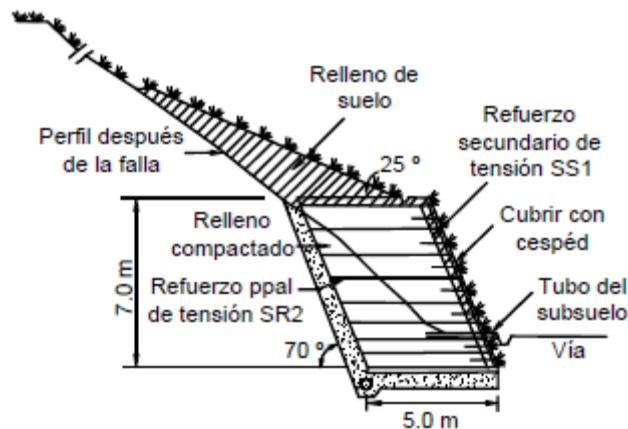


Figura 2.5. Esquema de estabilización de talud

(JAIME SUAREZ, 1996)

- **Conformación de áreas planas en zonas urbanas**

En los distintos proyectos de urbanizaciones en zonas en las cuales hay presencia de montañas, con frecuencia se requerirá construir terraplenes que permitan lograr áreas planas para las viviendas. El empleo de este tipo de estructuras se vuelve atractivo cuando se cuenta con material de relleno disponible. Una de las principales ventajas de construir estos muros es que

permite usar fachadas de gran pendiente, lo cual permite usar menos espacio que los terraplenes comunes.

Con el propósito de poder establecer correctamente una comparación entre los muros de suelo reforzado, ya sea con elementos extensibles o inextensibles, con los muros de concreto armado convencionales, a continuación se describen las principales ventajas y desventajas de los muros de suelo reforzado.

- **Ventajas**

Los muros de suelo reforzado tienen múltiples ventajas si se compara con muros de concreto armado, Entre las principales ventajas se encuentran las que se mencionan a continuación

- ❖ Utilizan procedimientos de construcción rápidos, simples y no requieren de gran cantidad de equipos para la construcción.
- ❖ No se requieren de conocimientos especiales para poder llevar a cabo su construcción.
- ❖ Requiere de menos preparación del terreno que otras alternativas.
- ❖ Necesita menos espacio enfrente de las estructura para realizar distintas operaciones de construcción.
- ❖ Son rentables.
- ❖ Son técnicamente factibles para alturas por encima de los 30 metros.
- ❖ La prefabricación de los materiales, la construcción rápida y sencilla se ha traducido en una reducción de costos en comparación a los muros de contención tradicionales.

- **Desventajas Potenciales**

Las desventajas que suelen estar asociadas con las estructuras de suelo reforzado van a depender de las distintas condiciones locales y del tipo de proyecto. Algunas de estas potenciales desventajas son las que siguen a continuación:

- ❖ Requieren de un espacio relativamente grande detrás del muro en el cual se colocará el refuerzo.

- ❖ Los muros de suelo reforzado requieren de relleno granular cuidadosamente seleccionado. Dependiendo de la ubicación de la obra, el flete por importación del material de relleno adecuado puede hacer que el sistema, es decir la construcción de un muro de suelo reforzado resulte antieconómico.
- ❖ El diseño de los sistemas de muro de suelo reforzado involucran una responsabilidad compartida entre los diseñadores y los proveedores de las materias, es decir propietarios de las canteras de donde se extraerá el material, y los proveedores de los elementos de refuerzo.

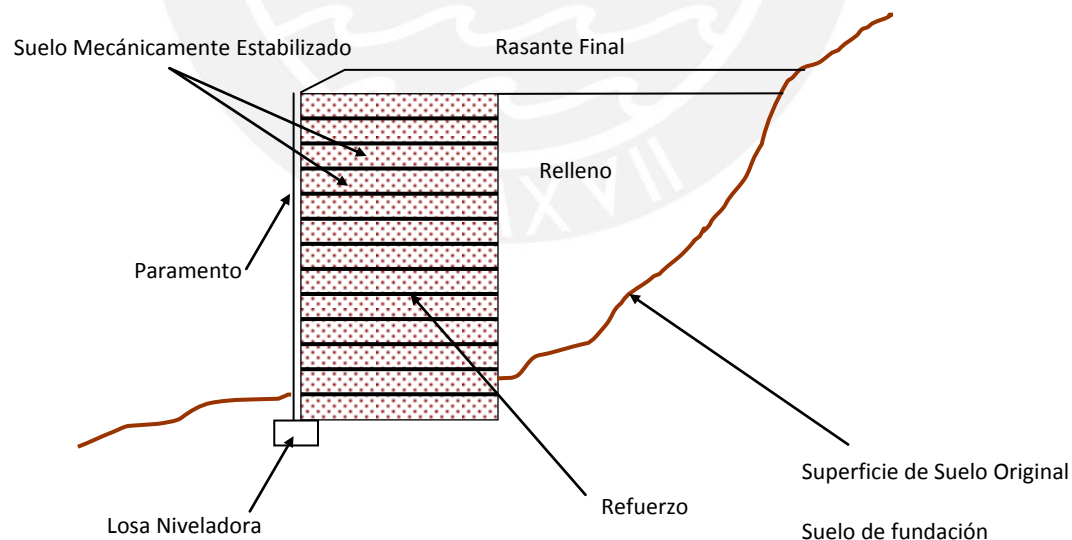


## 2.2. MUROS DE SUELO REFORZADO

Las estructuras de suelo reforzado son sistemas compuestos de suelo compactado y elementos de refuerzo en tensión. Su resistencia interna se debe principalmente al refuerzo y externamente se diseñan como estructuras masivas por gravedad. Son fáciles, sencillas y rápidas de construir; utilizan el suelo como su principal componente y pueden adaptarse fácilmente a la topografía. Los muros de suelo pueden ser reforzados con flejes o mallas metálicas o con geosintéticos (geotextiles o geomallas).

Son alternativas rentables para la mayoría de aplicaciones con concreto armado o muros de gravedad que tradicionalmente han sido utilizados para retener el suelo. Estos muros ofrecen diversas ventajas técnicas y económicas en comparación con las estructuras convencionales de concreto armado en lugares con pobres condiciones del suelo de fundación.

Los muros de suelo reforzado han sido por mucho tiempo estructuras temporales que han resultado convenientemente rentables en la construcción de desvíos provisionales en los proyectos de construcción de carreteras. Así también los muros de suelo reforzado se emplean como soporte de los pilares de un puente provisional.



**Figura 2.6.** Sección Transversal Típica de un Muro de Suelo Reforzado.  
Fuente: FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 (2001).

## 2.3. ELEMENTOS DEL MURO DEL SUELO REFORZADO

### 2.3.1 Elementos de Refuerzo

Se entiende por refuerzo o inclusión a todo elemento que haya sido creado por el hombre y que pueda ser introducido en la tierra con la finalidad o propósito de mejorar su comportamiento. Existe una diversidad de elementos de refuerzos o inclusiones, tales como los geotextiles, mallas de acero, flejes de acero, etc. El término reforzado solo se podrá aplicar siempre y cuando el suelo transfiera los esfuerzos de manera continua a lo largo de todo el refuerzo o inclusión.

#### 2.3.1.1 Propiedades de los refuerzos Extensibles

La selección de la resistencia a la tensión nominal o resistencia permisible ( $P_{per}$ ) a largo plazo para los refuerzos de geosintéticos se determina a partir de un estudio a fondo de todas las pérdidas posibles que puede sufrir a lo largo de su vida útil. Las propiedades de tracción de los geosintéticos se ven seriamente afectadas por diversos factores tales como la instalación, el envejecimiento, así como también la temperatura y el esfuerzo de confinamiento. Los geosintéticos fabricados de polímeros, a pesar de que no son susceptibles a la corrosión, se pueden degradar debido distintos factores tales como la actividad físico-química en el suelo, la hidrólisis, la oxidación, así como también las grietas y estrés ambiental el cual depende del tipo de polímero.

Es muy importante tener en cuenta que estos elementos de refuerzo son muy susceptibles a los daños por instalación así como también a los efectos por altas temperaturas. Las condiciones de durabilidad de estos elementos de refuerzo con geosintéticos dependen básicamente del tipo de polímero, es decir, del tipo de resina, el grado los aditivos empleados y del proceso de manufactura empleado para su fabricación, así como también de la macroestructura del refuerzo.

La resistencia nominal a la tracción o tensión permisible de los refuerzos con geosintéticos se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$T_{perm} = \frac{T_{ult}}{\Pi FR} \quad (2.1)$$

$$\Pi FR = FR_{DI} * FR_{CR} * FR_D \quad (2.1.a)$$

#### 2.3.1.1.1 Factores de Reducción de Resistencia

En esta sección se describirá cada uno de los términos que se muestran en las fórmulas anteriores.

- **Resistencia última a la tracción, T-ult**

T-ult es la resistencia a la tensión máxima que puede resistir el elemento de refuerzo. Es calculada en base a la carga por unidad de ancho del refuerzo. Este valor es determinado por medio del ensayo de carga ancha (ASTM D 4595).

- **Factor de reducción por daños de instalación, FR-DI**

Los geosintéticos son los elementos de refuerzo que sufren considerablemente los daños por instalación debido a muchos factores tales como la abrasión, desgaste, rotura y golpes. Cada uno de estos tipos de daños se puede evitar brindando una adecuada atención al transporte y puesta en obra de los distintos elementos de refuerzo.

Los factores de reducción por daños de instalación dependen prioritariamente de las características del material de relleno, básicamente de su gradación y de su angulosidad. En la tabla que se presenta a continuación se muestran rangos de factores de reducción por daños de instalación para los diferentes tipos de elementos de refuerzo de geosintéticos de acuerdo a las características del material de relleno que se tenga pensado emplear.

**Tabla 2.1.** Factores de Reducción por daños de instalación

Factores de Reducción por Daños de Instalación		
Tipo de Geosintético	Material de Relleno Tipo 1 Tamaño máx. 100mm D50 de 30 mm	Material de Relleno Tipo 2 Tamaño máx. 20mm D50 de 0.7 mm
Geomalla Uniaxial HPDE	1.20 - 1.45	1.10 - 1.20
Geomalla Biaxial PP	1.20 - 1.45	1.10 - 1.20
Geomalla PET cubierta con PVC	1.30 - 1.85	1.10 - 1.30
Geomalla PET cubierta con acrílico	1.30 - 2.05	1.20 - 1.40

Fuente: FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 (2001)

○ **Factor de reducción por creep, FR-CR**

El factor de reducción por creep nos permite limitar la carga aplicable sobre el elemento de refuerzo, es decir, lo que se debe de garantizar es que no se produzca el alargamiento excesivo y finalmente la ruptura del elemento de refuerzo a lo largo de su vida útil.

Los rangos típicos de los factores de reducción por creep, de acuerdo al tipo de polímero de los elementos de refuerzo, son los que se muestran a continuación:

**Tabla 2.2.** Factores de Reducción por Creep

Tipo de Polímero	Factor de Reducción por Creep
Poliéster(PET)	2.5 a 1.6
Polipropileno (PP)	5.0 a 4.0
Polipropileno de alta densidad (HDPE)	5.0 a 2.6

Fuente: FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 (2001)

○ **Factor de Reducción de Resistencia, FR-D**

El factor de reducción de resistencia depende de la susceptibilidad de los elementos de refuerzo de geosintéticos a diversos ataques producidos por productos químicos, a la oxidación térmica a la hidrólisis, a los microorganismos



así como también al agrietamiento por tensión ambiental. El valor del factor de reducción de resistencia puede variar entre 1.1 y 2.0.

Los geosintéticos de poliéster (PET) son muy susceptibles a la reducción de su resistencia al envejecimiento debido a la hidrólisis. Los productos de poliolefinas (PP y HDPE) son muy susceptibles a la reducción de su resistencia al envejecimiento debido a la oxidación. La oxidación de este tipo de elementos de refuerzo es acelerado por la presencia de metales de transición en el suelo de relleno reforzado (Fe, Cu, Mn, Co, Cr).

Teniendo en consideración que los elementos de refuerzo de geosintéticos son enterrados, la influencia que tienen los rayos UV en la resistencia, deben de ser analizados solamente durante la construcción y en caso se empleen como fachada del muro de suelo reforzado. Para el caso en el cual los geosintéticos funcionen como elemento de fachada, estos deberán de ser protegidos con cierto recubrimiento que permita evitar su deterioro. Las pruebas realizadas para detectar los daños por rayos UV (ASTM D4355) deben permitirnos obtener resultados de su desempeño para periodos largos (varios meses).

En la actualidad se realizan pruebas o ensayos índices, los cuales nos permiten conocer los daños por rayos UV en los geosintéticos en un corto plazo. Estos ensayos constituyen indicadores que nos permiten determinar los daños por rayos UV en un largo plazo de acuerdo a lo manifestado por Elías (1990).

La resistencia a largo plazo de los elementos de refuerzo con geosintéticos a los rayos UV se puede estimar utilizando factores de reducción por defecto, ya que no se cuenta con resultados de los ensayos realizados a los productos. A continuación se describen los criterios a partir de los cuales es posible aplicar los factores de reducción por defecto.

Tabla 2.3. Criterios para la aplicación de factores de reducción por defecto

Tipo de Polímero	Propiedad	Ensayo Realizado	Criterio Para aplicar el uso de FR por defecto
Polipropileno	Resistencia a la Oxidación UV	ASTM D 4355	Mínimo 70% de resistencia retenida después de 500 horas en el medidor de clima.
Poliétileno	Resistencia a la Oxidación UV	ASTM D 4355	Mínimo 70% de resistencia retenida después de 500 horas en el medidor de clima.
Poliéster	Resistencia a la hidrólisis	Método de viscosidad inherente (ASTM D 4603 o GRI-GG)	Número mínimo de peso promedio molecular de 25
Poliéster	Resistencia a la hidrólisis	Método GRI-GG7	Máximo contenido de grupo carboxil final de 30.
Todos los Polímeros	Supervivencia	Peso por unidad de área (ASTM D 5261)	Mínimo 270 gr/m <sup>2</sup>

Fuente: FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 (2001)

Teniendo en consideración ciertos parámetros, en la tabla que se presenta a continuación se muestra la productoria total de los distintos factores de reducción de la resistencia última de los geosintéticos para distintas aplicaciones.

Tabla 2.4. Productoria de Factores de Reducción

Aplicación	Productoria de Factores de Reducción
En todas las aplicaciones que se tengan 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. FR-DI y FR-D no deben ser menores de 1.1.
En aplicaciones permanentes que no tengan graves consecuencias en caso de que ocurra la falla. En suelos no agresivos, que además los polímeros cumplan con los requisitos de la tabla anterior, y en caso no se tenga información específica de los productos.	7
En aplicaciones temporales que no tengan graves consecuencias en el caso de que ocurra la falla. En suelos no agresivos y que además los polímeros cumplan con los requisitos de la tabla anterior, y en caso no se tenga información específica de los productos.	3.5

Fuente: FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 (2001)

### 2.3.1.2 Propiedades de los refuerzos Inextensibles

En el caso específico de los elementos de refuerzo de acero, la vida útil depende fundamentalmente de la reducción de su sección transversal. Es por ello que el diseño está enfocado en determinar las pérdidas debidas a la corrosión durante el tiempo de vida útil de los elementos de refuerzo a partir de la siguiente expresión:

$$E_c = E_n - E_r \quad (2.2)$$

Donde cada uno de los términos significa lo siguiente:

- $E_c$  : Espesor del refuerzo al final de la vida útil de diseño
- $E_n$  : Espesor nominal de la construcción.
- $E_r$  : Espesor de metal que se tiene esperado perder debido a la corrosión.

La resistencia nominal a la tracción de los elementos de refuerzo, es decir la resistencia permisible, ( $T_{per}$ ) para los flejes de acero y las mallas de acero se determina a partir de las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$T_{per} = \frac{F_y A_c}{b} \quad (2.3)$$

A su vez esta resistencia nominal o valor permisible se puede expresar como la cantidad de tensión que realiza el elemento de refuerzo ( $P_{per}$ ), de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_{per} = F_y A_c \quad (2.4)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

- $b$  : Ancho bruto del fleje o malla de acero
- $F_y$  : Esfuerzo de fluencia del acero
- $A_c$  : Área de la sección transversal del elemento de refuerzo de acero, el cual queda definido como el área de la sección original menos las perdidas por corrosión que se prevén que se producirán durante la vida útil del refuerzo.

Los factores de resistencia de los distintos refuerzos metálicos para diferentes condiciones en el diseño de muros de suelo reforzado se muestran a continuación en la siguiente tabla:

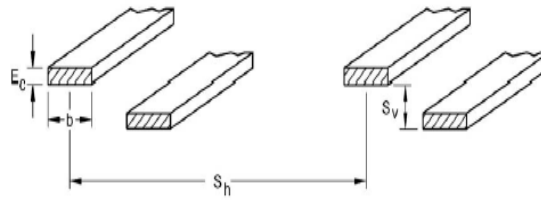
**Tabla 2.5.** Factores de Resistencia de los elementos de refuerzos Inextensibles

Refuerzo tipo y condición de carga		Factor de resistencia
Refuerzo Metálico	<b>Refuerzos con flejes</b>	
	Carga Estática	0.75
	Combinación entre carga estática y sísmica	1
	<b>Refuerzo con malla</b>	
	Carga Estática	0.65
	Combinación entre carga estática y sísmica	0.85

Fuente: FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 (2001)

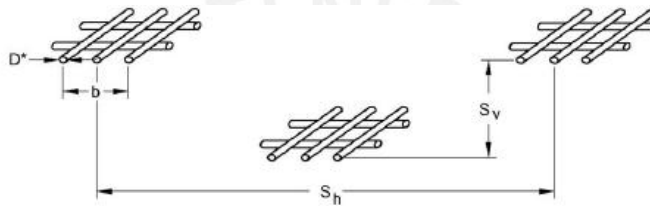
Parámetros para cálculo de la resistencia de refuerzos metálicos:

- Para flejes de acero



$$A_c = bE_c \quad (2.5)$$

- Para mallas de acero



$$A_c = (N^{\circ} \text{ de barras longitudinales}) \pi \frac{D^2}{4} \quad (2.6)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

- D : Diámetro de la barra de acero corregido por pérdida por corrosión
- b : Unidad de ancho de refuerzo (si el refuerzo es continuo, b es el número de barras de acero necesarios para completar un ancho igual a la unidad)

Además de lo ya mencionado, también se conoce lo siguiente:

$$T_{m\acute{a}x} \leq T_a R_c = \frac{FS * A_c * F_y * R_c}{b} \quad (2.7)$$

$$R_c = \frac{b}{S_h} \quad (2.8)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

- T<sub>máx</sub> : Máxima carga que se le puede aplicar al elemento de refuerzo

- $T_a$  : Tensión admisible a largo plazo del refuerzo (resistencia por unidad de ancho del refuerzo)
- FS : Factor de Seguridad
- $F_y$  : Esfuerzo de fluencia del acero
- $R_c$  : Relación de cobertura del refuerzo.

En el caso de emplearse en el diseño refuerzos continuos el valor de  $R_c$  debe ser igual a 1, es decir  $S_h=b=1$  unidad de ancho.

Las velocidades de corrosión de los elementos de refuerzo inextensible (refuerzos metálicos) que se muestran en la siguiente tabla son adecuadas para el diseño conservador. Dichos valores han sido determinados tomando en consideración un material de relleno moderadamente corrosivo. Es a partir de estos valores que se puede obtener el espesor de sacrificio de cada una de las superficies del elemento de refuerzo expuestas al material de relleno.

**Tabla 2.6.** Velocidades de corrosión de los refuerzos inextensibles

<b>Pérdida de Galvanización</b>	15 $\mu$ m/año para los dos primeros años
	4 $\mu$ m/año para los años subsiguientes
<b>Pérdida del acero</b>	12 $\mu$ m/año después que el zinc haya desaparecido

Fuente: FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 (2001)

Se debe de tener en cuenta que estos valores propuestos como espesores de sacrificio tienen ciertas restricciones en condiciones como las que se mencionan a continuación:

- ✚ El muro de suelo reforzado se encuentra expuesto a ambientes marinos u otros ambientes ricos en cloruros.
- ✚ El muro de suelo reforzado se encuentra expuesto a corrientes magnéticas, ya sean líneas eléctricas subterráneas, o cercano a trenes eléctricos.
- ✚ El material de relleno que se vaya a emplear es muy agresivo.

Estos ratios que acaban de describir no son aplicables a otros metales que sean diferentes al acero. Así mismo no se recomienda el uso de aleaciones tales como acero inoxidable y aleaciones con aluminio.

Existe poca evidencia sobre el comportamiento a largo plazo de las cubiertas de epóxicos de manera que puedan ser considerados equivalentes al galvanizado. En caso se tenga pensado emplear cubiertas epóxicas, estas deben cumplir ciertos requerimientos propuestos en la ASTM A84 para barras de refuerzo y en la ASTM M 284 (ASTM D 3969) para flejes de acero. Se recomienda que dichas cubiertas epóxicas tenga un espesor mínimo de 0.41 mm.

### **2.3.2 Suelos involucrados en el diseño**

Los suelos involucrados en toda estructura de suelo reforzado son el suelo reforzado, llamado también suelo de relleno, el suelo retenido y el suelo de fundación. Cada uno de estos debe de cumplir con determinadas características. A continuación se describirá a cada uno de los suelos que se acaban de mencionar.

#### **2.3.2.1 Suelo Reforzado**

Suelo reforzado es aquel que internamente está compuesto por elementos de refuerzo en tensión. En la mayoría de los muros de suelo reforzado se emplea suelos granulares, limpios, no cohesivos. Generalmente estos materiales son más costosos que los suelos cohesivos.

Para escoger de una manera adecuada el material de relleno que se va a emplear y que posteriormente va a ser reforzado, es muy importante considerar el rendimiento que tendrá dicho material en un período de largo plazo, en su correspondiente etapa de construcción y la degradación de los refuerzos producto del medio ambiente lo cual afecta directamente la estabilidad de la estructura. Lo que se recomienda por norma como material de relleno son los suelos granulares, los cuales a su vez deben estar libres de materiales nocivos orgánicos, debido a que pueden llegar afectar de una manera negativa el rendimiento de la estructura. Se recomienda que el material que vaya a ser utilizado como material de relleno reforzado tenga las siguientes propiedades:



**Tabla 2.7.** Gradaciones recomendadas y Requisitos de Plasticidad para Relleno Reforzado.

AASHTO		NCMA	
Tamaño	% que pasa	Tamaño	% que pasa
4"	100	4"	100-75
No. 4	100	No. 4	100-20
No. 40	0-60	No. 40	0-60
No. 200	0-15	No. 200	0-35
Requerimientos de plasticidad		Requerimientos de plasticidad	
PI	< 6	PI	< 20

Fuente: *Design Manual for Segmental Retaining Walls*. NCMA, 1997.

El material de relleno debe estar debidamente clasificado de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) el cual se describe en la Norma ASTM D2487. Se debe de evitar contar con suelos inestables, ya que estos tienen la tendencia a erosionar cerca de las tuberías, lo cual no sólo crea problemas con la pérdida de los materiales sino que también termina obstruyendo el sistema de drenaje. Se debe de tener muy en cuenta que no se puede emplear como material de relleno materiales que hayan sido recuperados, ya sea moliendas de cemento Portland o escombros de concreto.

Las necesidades de drenaje en la parte posterior del muro, en las cercanías de la fachada, así como por debajo de la zona reforzada deben ser cuidadosamente evaluadas. Es recomendable hacer uso de una geomembrana por encima del muro de manera que se pueda evitar cualquier tipo de infiltración en el material de relleno.

Se considera que el material de relleno reforzado es de piedra cuando dicho material está compuesto por fragmentos de roca; es decir, el porcentaje que pasa la malla de abertura de tamiz de  $\frac{3}{4}$ " (20mm) es inferior al 25%.

Los muros de suelo reforzado deben cumplir con los requisitos de gradación presentados en la **Tabla 2.7**, así como también deben de tener un ángulo de fricción que no supere los  $34^\circ$  (valor establecido de acuerdo al artículo 11.10.6.2, AASHTO, 2007). Para el caso en el cual se utilice arena fina casi uniforme como material de relleno reforzado se puede presentar ángulos de fricción con valores que van desde  $30$  a  $32^\circ$ . Se puede utilizar otro material de relleno con ángulo de fricción superior a lo establecido,

siempre y cuando se justifique por el laboratorio las pruebas de corte directo o triaxial. Bajo esta condición que se acaba de mencionar, el ángulo de fricción que se vaya a utilizar en el diseño puede ser mayor a los  $34^\circ$ , pero por ningún motivo debe ser superior a los  $40^\circ$  (artículo 11.10.6.2, AASHTO 2007), En todos los casos se debe de tener en cuenta que el valor de la cohesión se supone que es cero. Se debe tener en cuenta que los límites del material de relleno reforzado se extienden alrededor de 0.3m más allá de la longitud de refuerzo.

### 2.3.2.1.1 Propiedades Electroquímicas

- **Refuerzos Inextensibles**

Algunos de los muros de suelo reforzado emplean como elemento de refuerzo elementos inextensibles como es el caso del acero. Las propiedades electroquímicas del material de relleno que va ser reforzado son determinadas por medio de pruebas establecidas por distintas normas, las cuales establecen valores límites. Estas propiedades electroquímicas que se hayan determinado deben encontrarse dentro del rango de valores ya establecidos por las normas. Con dichas propiedades electroquímicas se realizará el diseño de la estructura para una velocidad máxima de corrosión. A continuación se muestra una tabla en la que se describe lo que acabamos de mencionar.

**Tabla 2.8.** Propiedades electroquímicas para el material de relleno reforzado con elementos Inextensibles.

Propiedades	Criterio	Método de Prueba
Resistividad	3000 ohm-cm	AASHTO T-288
pH	< 5 y < 10	AASHTO T-289
Cloruros	< 100 PPM	ASTM D4327
Sulfatos	< 200 PPM	ASTM D4327
Contenido Orgánico	1% máx.	AASHTO T-267

Fuente: Design Manual for Segmental Retaining Walls. NCMA, 1997.

- **Refuerzos Extensibles**

Al igual que para el caso de los muros de suelo reforzado con elementos inextensibles (acero), también se recomiendan ciertos límites en los valores de las propiedades electroquímicas del material de relleno para el caso en que dicho material se vaya a reforzar con elementos extensibles como es el caso de los geosintéticos. Esto que se acaba de mencionar se detalla en la siguiente tabla:

**Tabla 2.9.** *Propiedades electroquímicas para el material de relleno reforzado con elementos Extensibles.*

Polímero	Propiedad	Criterio	Método de Prueba
Polyester	(PET)	$3 < \text{pH} < 9$	AASHTO T-289
Polyolefin (PP & HDPE)	pH	$\text{pH} > 3$	AASHTO T-289

*Fuente: Design Manual for Segmental Retaining Walls. NCMA, 1997.*

En los muros de suelo reforzado en los cuales se haya previsto emplear como elemento de refuerzo elementos extensibles, los límites de las propiedades electroquímicas pueden variar dependiendo de qué tipo de polímero se ha utilizado en la fabricación de los geosintéticos.

### **2.3.2.2 Suelo Retenido**

Se denomina suelo retenido al material que se localiza inmediatamente detrás de la zona de material de relleno reforzado, no existe algún requerimiento especial en su granulometría y en sus propiedades de resistencia. Los parámetros más importantes y que son requeridos para el diseño de un muro de suelo reforzado son el peso específico del material, la cohesión y el ángulo de fricción.

### **2.3.2.3 Suelo de Fundación**

Es muy importante considerar todas las características de los suelos de fundación así como también los distintos factores que pueden llegar a alterar dichas características, ya que si se llega a producir algún tipo de falla considerable en el suelo de fundación el resultado de ello puede terminar siendo algo catastrófico. El estudio sobre los suelos de

fundación debe de estar enfocado en establecer la estabilidad global de la estructura, los potenciales asentamientos, así como también el nivel de aguas subterráneas.

Para poder determinar la capacidad de carga del suelo de fundación es necesario saber los parámetros de fricción y cohesión ( $\phi$ ,  $c$ ), el valor del peso específico y el nivel de aguas subterráneas. Esto que acabamos de mencionar tiene conformidad con el artículo 10.6.3.1 para suelo y 10.6.3.2 para roca en AASHTO (2007).

### **2.3.3 Clasificación de los Sistemas de Muro de Suelo Reforzado**

#### **2.3.3.1 Por tipo de elementos de Refuerzo**

Los tipos de elementos de refuerzo pueden ser clasificados de acuerdo a su extensibilidad, su geometría y al material del cual estén hechos. A continuación se describirá a cada uno de ellos.

- **Extensibilidad del elemento de refuerzo**

Existen dos clases de extensibilidad, la cual es relativa a la extensibilidad de los suelos.

- **Inextensible**

La deformación del refuerzo al momento de la falla es mucho menor a la deformación del suelo. Las tiras de acero son refuerzos inextensibles.

- **Extensible**

La deformación del refuerzo al momento de la falla es igual o mayor a la deformación propia del suelo. Dentro de los refuerzos extensibles encontramos a las geomallas, los geotextiles, las mallas de acero tejidas o soldadas.

- **Geometría del elemento de refuerzo**

Básicamente existen tres tipos de geometría de refuerzo, las cuales se describen a continuación:

➤ **Unidireccional Simple**

Se emplean tiras o cintas de acero lisas, las cuales pueden ser texturadas o cubiertas por algún tipo de geosintético.

➤ **Unidireccional Compuesta**

Este tipo de geometría lo constituyen las mallas o barras de acero entrelazadas, cuya principal característica es que la longitud de las aberturas son mayores a los 150 mm.

➤ **Bi-direccional plana**

Este tipo de geometría lo constituye tiras continuas de mallas geosintéticas, mallas acero soldado y/o tejidas. Su principal característica es que la longitud de las aberturas son menores a los 150 mm.

• **Material del elemento de refuerzo**

Dentro de este parámetro se puede hacer una distinción entre los refuerzos metálicos y no metálicos.

La durabilidad y el rendimiento de cualquiera de estos dos tipos de material de refuerzo varían considerablemente dependiendo de las condiciones a las cuales se encuentren expuestas.

Los muros pueden ser reforzados con flejes o malla metálica o con geosintéticos (geomallas o geotextiles), tal como se muestra en la figura:

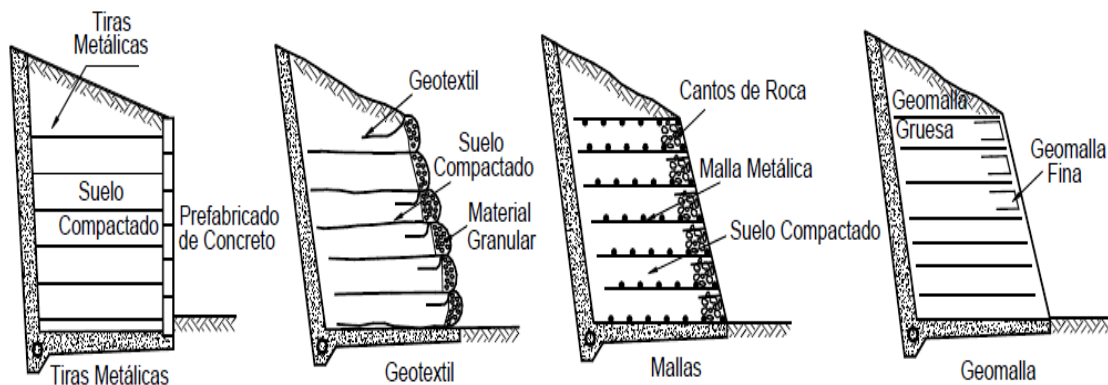


Figura2.7. Tipos de Refuerzo para muros de suelo reforzado (JAIME SUAREZ, 1996).

➤ **Refuerzos Metálicos**

Los muros de suelo reforzado que tiene como paramento paneles de concreto prefabricado utilizan en su gran mayoría refuerzos de acero galvanizado. Los dos tipos de refuerzo que se emplean son los siguientes:

○ **Refuerzo con flejes metálicos**

Los tipos de láminas que se comercializan son corrugadas por ambos lados. Tienen un ancho aproximado de 50 milímetros y un espesor aproximado de 4 milímetros.

**Ventajas**

- Los refuerzos metálicos tienen la función de dar rigidez al muro, y el paramento prefabricado de concreto le da un aspecto presentable y decorativo.
- No se presenta acumulación de agua entre capas.

**Desventajas**

- Las zonas en las cuales se utiliza dicho refuerzo requieren de una protección adecuada contra la corrosión.
- El material de relleno debe de cumplir con ciertas características de manera que no sea perjudicial para los elementos de refuerzo.

○ **Refuerzo con Malla Metálica**

Las mallas de acero que normalmente se emplean para la construcción de muros de suelo reforzado tiene espaciamientos longitudinales que varían entre 150 y 200mm, y el espaciamiento transversal se encuentra entre 230 y 600mm.

**Ventajas**

- Al igual que los flejes metálicos, la malla metálica le da rigidez al muro, solo que en este caso en un grado menor.
- Las capas en las que se coloca la malla metálica no constituyen superficies de debilidad.



- No se presenta acumulación de agua entre capas.

### **Desventajas**

- El material de relleno debe cumplir con ciertas características de manera que no resulte perjudicial para la malla metálica.

### ➤ **Refuerzos de Geosintéticos**

Geosintético es un término genérico que abarca materiales poliméricos flexibles usados en ingeniería geotécnica. Los principales son los geotextiles, las geomembranas, las geonets y las geomallas. El empleo de los geotextiles en los muros de suelo mecánicamente estabilizados se inició después de constatar el efecto beneficioso en terraplenes construidos sobre las sub-bases débiles.

A diferencia de los muros con paramento de paneles prefabricados de concreto, los muros de suelo reforzado con paramento de bloques prefabricados de concreto en su gran mayoría usan refuerzo geosintético, en especial las geomallas. Los elementos que mencionaremos a continuación son ampliamente utilizados y se encuentran disponibles en el mercado.

#### ○ **Geotextiles de polipropileno o de poliéster**

Estos elementos son de alta resistencia. Su aplicación principal es en la estabilización de taludes. Comercialmente se dispone de geotextiles de poliéster como de polipropileno.

### **Ventajas**

- Su mayor ventaja es que son muy económicos.
- Su instalación in situ es muy rápida y sencilla.

### **Desventajas**

- Son demasiado flexibles y se deforman con mucha facilidad.
- Conforme pase el tiempo, las capas en donde fueron colocados pueden llegar a convertirse en superficies de debilidad para los deslizamientos.

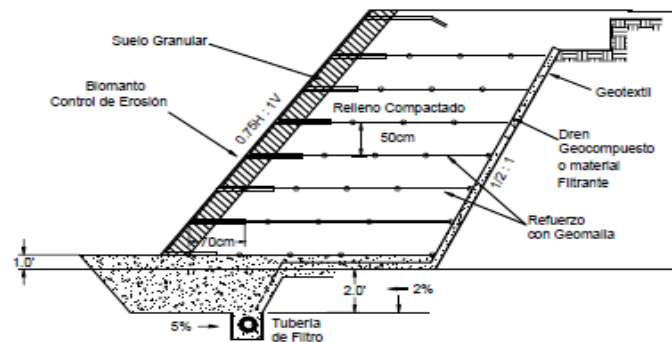


- La exposición a los rayos ultravioleta daña a los geotextiles
- Es posible la acumulación de agua entre las capas.

○ **Refuerzo con Geomalla**

✚ **Geomallas de polietileno de alta densidad (HDPE)**

Consisten en mallas uniaxiales, las cuales se ofrecen comercialmente hasta en seis resistencias distintas. Un esquema de una estructura reforzada con geomallas se muestra a continuación.



**Figura 2.8.** Esquema de una estructura de suelo reforzado con geomallas (JAIME SUAREZ, 1996).

✚ **Geomallas de poliéster cubierto con PVC**

Están caracterizadas por la alta tenacidad de las fibras de poliéster en el sentido longitudinal. Para poder garantizar una larga vida útil del poliéster, este debe poseer un alto peso molecular y a su vez un bajo número de grupo carboxil.

**Ventajas**

- El muro se vuelve relativamente rígido. La deformación de las geomallas es mucho menor que la de los geotextiles.
- No se presenta acumulación de agua entre las capas

**Desventajas**

- De acuerdo a la rigidez que pueda presentar la geomalla, se puede optar por un material diferente para la fachada.

- Se puede emplear como paramento bloques de concreto prefabricados.

### 2.3.3.2 Por tipo de Paramento externo

Son una parte muy importante dentro de la estructura de los muros de suelo reforzado, ya que evitan que el material de relleno pueda erosionarse. Existe una gran variedad de elementos que en conjunto pueden llegar a formar una fachada, entre estos elementos tenemos los paneles prefabricados de concreto, los bloques prefabricados de concreto, gaviones, etc. No contribuyen, de manera importante, en la estabilidad de la estructura.

Los distintos tipos de elementos que se emplean en la fachada para los muros de suelo reforzado son los que controlan la estética de toda la estructura. Esto se debe a que es el único elemento visible de toda la estructura terminada. Existen comercialmente una amplia variedad de acabados y colores en lo que respecta al paramento externo.

El paramento externo a su vez permite evitar la erosión y el desprendimiento del material de relleno. El tipo de paramento externo de los muros de suelo reforzado a su vez limita la tolerancia de los asentamientos. Entre los principales sistemas de fachadas tenemos los siguientes:

- **Paneles de Concreto prefabricado**

Comercialmente se disponen de una serie de paneles de concreto prefabricados. Existen una gran variedad de formas y dimensiones, algunas de las cuales se muestran a continuación:



Figura2.9. California Department of Transportation  
(<http://gallery.company39.com/FLH/gallery/>)



**Figura 2.10.** FHWA-Western Federal Lands Highway Division  
(<http://gallery.company39.com/FLH/gallery/>)



**Figura 2.11.** FHWA-Western Federal Lands Highway Division  
(<http://gallery.company39.com/FLH/gallery/>)

Los paneles prefabricados de concreto tienen un espesor mínimo de 140 mm y son de varias formas (cuadrada, rectangular, cruciforme o geometría hexagonal). Las dimensiones típicas de un panel de concreto prefabricado es de 1.5 m de altura y 1.5 ó 3 m de ancho.

- **Bloques de Concreto**

Estos elementos son relativamente pequeños. Usualmente este tipo de elementos son empleados en proyectos de carreteras. Sus dimensiones por lo general están dentro de un determinado rango de valores; es decir la altura varía entre 100 a 300 mm, la longitud de la cara expuesta por lo general es un valor entre 200 a 450 mm, el ancho nominal de estos elementos oscila entre 200 y 600 mm. El peso de este tipo de elementos se encuentra entre 35 a 50 kg. Normalmente la conexión entre bloques verticalmente adyacentes es por medio de pasadores de seguridad.



**Figura 2.12.** Muro de Suelo Reforzado con Bloques de Concreto. By Pass Av. Quilca con Av. Faucett en la Vía Expresa del Callao. Lima, Perú. (Centurión, 2006).



**Figura 2.13.** U.S Forest Service - Klamath National Forest (<http://gallery.company39.com/FLH/gallery/>)

- **Paramento Metálico**

Consiste en una malla metálica que puede fácilmente ser doblado en la parte delantera y adoptar la forma de la cara del muro que se desee establecer. Este tipo de paramentos se emplea frecuentemente en muros de contención. Este tipo de paramentos son frecuentemente usados en taludes de suelo reforzado.

- **Paramento de Gaviones**

Los gaviones son una especie de cestas o canastas de alambre que van llenas de piedras. Normalmente este tipo de elementos suelen emplearse tanto en muros como en taludes de suelo reforzado. En ambos casos son usados como paramento con algún elemento de refuerzo, el cual puede ser una cola de la misma malla hexagonal (Sistema Terramesh), geomallas, geotextiles, mallas electrosoldadas.



- **Fachada con Geosintéticos**

Para este tipo de fachada se puede emplear diversos elementos tales como geotextiles, geomallas biaxiales, biomantas, geomantas, etc., los cuales se colocan formando una envoltura alrededor de la fachada. Pueden ser empleados como fachada tanto para muros como para taludes de suelo reforzado. Las principales desventajas de hacer uso de este tipo de fachadas son la degradación debido a los rayos ultravioletas, los daños debido al fuego y al vandalismo. Cuando se hace uso de geomantas o biomantas, estas permiten que crezca vegetación, lo cual evita la degradación por rayos ultravioletas al mismo tiempo que otorga una apariencia más agradable a la estructura.

Los muros de suelo reforzado que tienen un paramento o fachada metálico poseen la desventaja de tener una vida útil mucho más corta respecto a los muros de suelo reforzado con paramento de paneles de concreto o bloques, esto debido a la corrosión que experimentan con el correr del tiempo. Así mismo los revestimientos hechos con alambres electrosoldados y los gaviones presentan una superficie irregular, así mismo permiten que el material de relleno este expuesto a la intemperie, lo cual tiene como consecuencia que se produzca erosión del suelo, lo cual finalmente termina ocasionando una menor vida útil, no sólo del paramento sino también, sino se tiene los cuidados necesarios, de la estructura en general.

Todas estas desventajas que se acaban de mencionar pueden ser contrarrestadas si se toman en cuenta una serie de consideraciones. La ventaja de hacer uso de paramentos metálicos o con geosintéticos es que reducen los costos, permiten mayor flexibilidad en el diseño, la instalación se vuelve mucho más sencilla, poseen un buen drenaje (dependiendo el tipo de fachada que se instale) que proporciona una mejor estabilidad y un posible tratamiento de la fachada para efectos de arquitectura vegetal, en comparación con los paramentos de paneles y bloques de concreto.

## 2.4 Mecanismos de Transferencia de Esfuerzos

La transferencia de tensión entre el material de relleno y elemento de refuerzo se lleva a cabo de manera continua a lo largo de la armadura. A partir de lo ya mencionado, a continuación mostraremos los distintos mecanismos de transferencia de tensión entre el material de relleno y los elementos de refuerzo.

- **Fricción**

Se desarrolla en aquellos lugares en donde no existe desplazamiento relativo entre el material de relleno y la superficie de refuerzo. Es por este motivo que los elementos de refuerzo deben de estar correctamente alineados en la dirección del movimiento relativo entre el material de relleno y el refuerzo. Los elementos que garantizan que el mecanismo de transferencia de tensión se lleve a cabo por medio de fricción, son los flejes de acero, las mallas soldadas de acero y el geotextil.

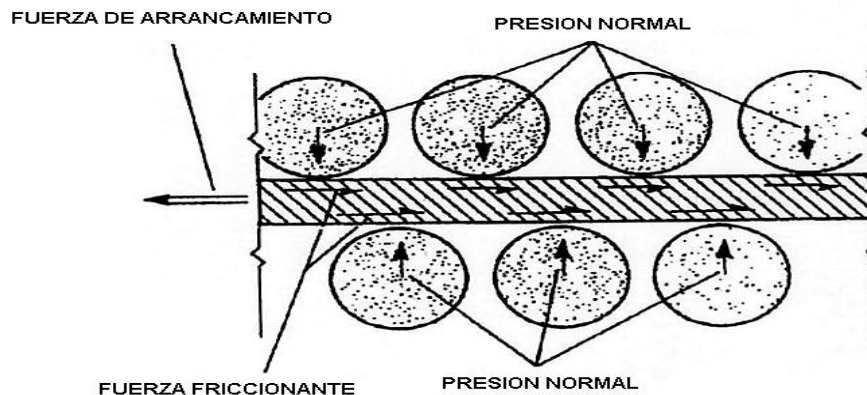


Figura 2.14. Transferencia de esfuerzos friccionantes entre el suelo y la superficie del reforzamiento.

- **Resistencia Pasiva o trabazón**

La resistencia pasiva es un fenómeno que se debe al hecho de soportar tensiones en la superficie del refuerzo “transversal” normal a la dirección del



movimiento relativo del material de suelo reforzado. La resistencia pasiva es considerada como la principal manera de interacción entre el material de relleno y la malla de acero o la geomalla.

El grado de transferencia que se pueda presentar para un determinado mecanismo va a depender de la rugosidad de la superficie del elemento de refuerzo, de las dimensiones de la apertura de la malla, del espesor de los elementos transversales, así como también de las características de alargamiento de la armadura. No obstante, también son importantes las características del material de relleno. Entre las principales características tenemos el tamaño de partícula, la granulometría, la densidad, el contenido de agua, la rigidez y la cohesión.

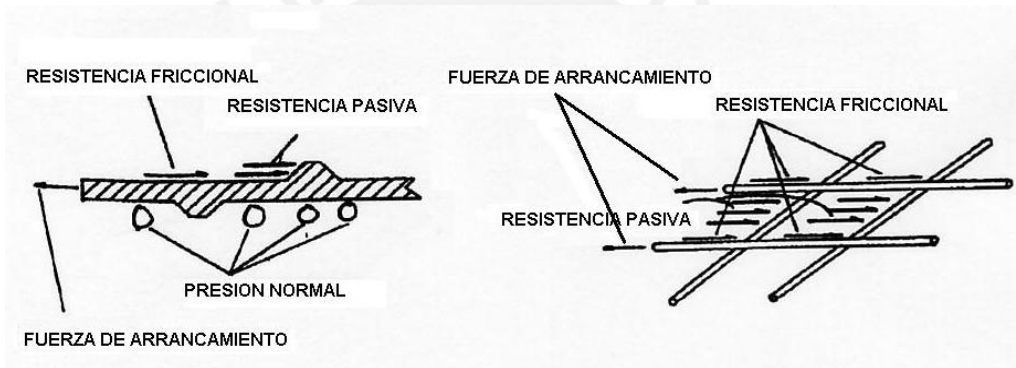


Figura 2.15. Resistencia pasiva o trabazón mecánica del suelo en contacto con los refuerzos.

#### 2.4.1 Modo de Acción del Refuerzo

La función primordial de los elementos de refuerzo consiste en restringir las deformaciones del material de relleno que se vaya a emplear, razón por la cual los esfuerzos son transferidos del material de relleno hacia los elementos que lo refuerzan. Todas estas tensiones o esfuerzos son tomados por los elementos de refuerzo de dos formas, las cuales se describen a continuación:

- **Tensión**

Es la manera más común de la acción de los refuerzos de tracción. Todos y cada uno de los elementos de refuerzo “longitudinales” están por lo general sometidos a altas tensiones de tracción.

- **Corte y Rigidez Torsional**

Cada uno de los elementos de refuerzo transversales que tenga alguna rigidez podrá soportar los esfuerzos cortantes y los momentos flectores.

#### **2.4.2 Características geométricas del refuerzo**

Las principales características geométricas de los elementos de refuerzo dependen del tipo que sean, es decir, elementos de refuerzo inextensibles o elementos de refuerzo extensibles. Estas características se detallan a continuación:

- **Flejes y mallas de acero**

Tanto los flejes como las mallas de acero se caracterizan por su sección transversal, su perímetro, su espesor y la distancia de centro a centro de las capas de refuerzo colocadas horizontalmente.

- **Geotextiles y Geomallas**

Las capas de refuerzo con geosintéticos se caracterizan por su ancho y por la distancia de centro a centro de las capas colocadas horizontalmente. El área de la sección transversal no es una característica importante, ya que la fuerza de una capa de geosintético se expresa por la fuerza de tracción por unidad de ancho.

El ratio de cobertura  $R_c$  de los distintos elementos de refuerzo, es un parámetro que se emplea para relacionar la fuerza por unidad de ancho de un elemento de refuerzo con la fuerza por unidad de ancho necesaria alrededor de toda la estructura. De acuerdo a lo que acabamos de mencionar el ratio de cobertura queda expresado tal y como se muestra a continuación:

$$R_c = \frac{b}{s_h} \quad (2.9)$$

Donde cada una de los términos significa lo siguiente:

b : Ancho bruto del elemento de refuerzo que se vaya a emplear.

Sh : Distancia de centro a centro de los elementos de refuerzo colocados horizontalmente

Se debe de tener en cuenta que para el caso de elementos de refuerzo continuos, el  $R_c$  es igual a la unidad. Esto se debe a que cada capa de refuerzo cubre toda la superficie horizontal de la zona de suelo reforzado.

La imagen que se muestra a continuación ilustra lo que acabamos de describir:

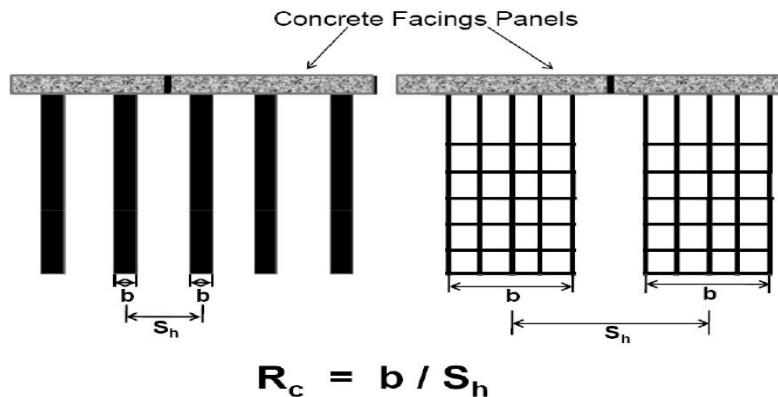


Figura 2.16. Cobertura de los elementos de refuerzo

### 2.4.3 Interacción del Suelo Reforzado

La interacción del suelo de refuerzo ha sido determinada por estudios realizados tanto en el laboratorio como en el campo. Los conceptos que se obtuvieron de tales estudios permitieron a la FHWA realizar un enfoque normalizado, el cual se describe a continuación.

- **Evaluación del Pullout**

- **Capacidad de Tracción**

Se refiere básicamente a la resistencia que pone cada elemento de refuerzo al arrancamiento o "pullout". Dicha resistencia debe ser la adecuada de manera que sea capaz de resistir la fuerza de tracción con un factor de seguridad adecuado.

- **Desplazamiento Admisible**

Es un parámetro que debe ser mayor que el desplazamiento relativo entre el material de relleno y el elemento reforzado que se genere debido a las distintas fuerzas de tracción.

➤ **Desplazamiento a largo plazo**

Dicho desplazamiento debe garantizar que la fuerza necesaria para ocasionar el arrancamiento del elemento de refuerzo sea menor que la fuerza crítica.

• **Evaluación de la máxima tensión en los Muros de Suelo Reforzado**

La ubicación de la zona de máxima tensión (límite entre la zona activa y la zona resistente) de los sistemas de muros de suelo reforzado, ya sea con elementos extensibles o inextensibles, se deberá determinar tal y como se muestra en la **Figura 2.17**. Para cualquier sistema de muro de suelo reforzado se deberá de considerar que la zona de máxima tensión tiene su inicio en la parte posterior de los elementos de fachada en la base del muro. Se debe de tener en consideración que la forma y ubicación de la superficie de falla crítica se basa en estructuras instrumentadas y estudios teóricos. Para los sistemas de muros de suelo reforzado con elementos extensibles cuya inclinación de la fachada sea menor de  $10^\circ$  con respecto de la vertical, la zona de máxima tensión se deberá determinar empleando el método de Rankine. Para el caso de los muros reforzados con elementos extensibles cuya inclinación de la fachada sea de  $10^\circ$  ó más respecto a la vertical, la zona de máxima tensión se deberá determinar haciendo empleo del método de Coulomb y considerando las sobrecargas concentradas.

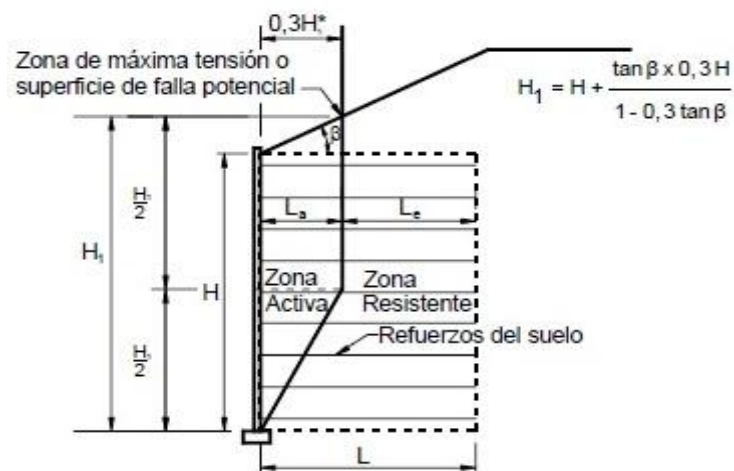


Figura 2.17.a. Ubicación de la zona de máxima tensión para Elementos de Refuerzo Inextensibles

(Especificaciones AASHTO para el diseño de Puentes por el método LRFD, 2004)

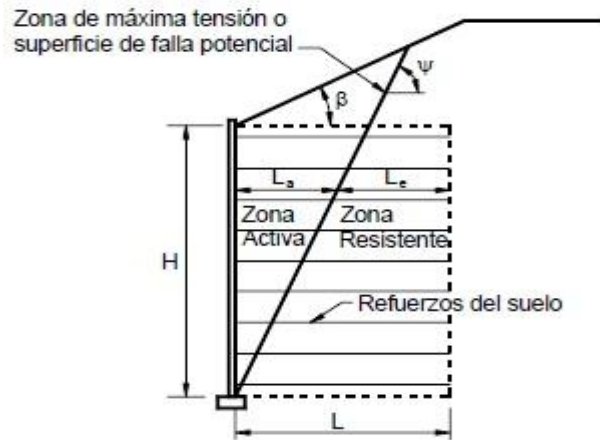


Figura 2.17.b. Ubicación de la zona de máxima tensión para Elementos de Refuerzo Extensibles

(Especificaciones AASHTO para el diseño de Puentes por el método LRFD, 2004)

Para muros con fachada vertical se tiene lo siguiente:

$$\psi = 45 + \frac{\phi_r}{2} \quad (2.10)$$

Para muros con fachada inclinada más de  $10^\circ$  respecto a la vertical se tiene lo siguiente:

$$\tan(\psi - \phi_r) = \frac{-\tan(\phi_r - \beta) + \sqrt{\tan(\phi_r - \beta)[\tan(\phi_r - \beta) + \cot(\phi_r + \theta - 90)][1 + \tan(\delta + 90 - \theta) \cot(\phi_r + \theta - 90)]}}{1 + \tan(\delta + 90 - \theta)[\tan(\phi_r - \beta) + \cot(\phi_r + \theta - 90)]} \quad (2.11)$$

$$\delta = \beta$$

La resistencia que otorga el elemento de refuerzo frente al arrancamiento o pullout es necesaria para evitar el deslizamiento de los elementos de refuerzo hacia el exterior del muro de suelo reforzado debido a las cargas de tracción. Para poder estimar el valor de esta resistencia se han planteado distintas ecuaciones en función a una serie de enfoques de diseño, en la cual se tuvo en cuenta la resistencia de fricción, la resistencia pasiva y una combinación de ambas resistencias.

De manera que se pueda uniformizar la metodología en el diseño y poder realizar comparaciones, se ha establecido una definición normalizada de la resistencia al arrancamiento o pullout. La resistencia de arrancamiento,  $P_r$ , en cada uno de los niveles en los cuales se coloca elementos de refuerzo está dada por la siguiente expresión:

$$Pr = F^* * \alpha * \sigma'_v * L_e * C \quad (2.12)$$

Donde cada una de los términos significa lo siguiente:

- Le : Longitud de empotramiento de los elementos de refuerzo
- C : Ancho tributario del refuerzo, C=2 para geomallas.
- F\* : Factor de resistencia al arrancamiento
- $\alpha$  : Factor de corrección por efecto de escala que permite compensar la reducción no lineal de esfuerzos a lo largo de los refuerzos que tienden a ser altamente extensibles. Por lo general este factor es 1 para el caso de los refuerzos metálicos, en cambio para los refuerzos de Geosintéticos este factor esta entre 0.6 y 1.
- $\sigma'_v$  : Tensión vertical efectiva, la cual se calcula en las distintas interfaces entre el elemento de refuerzo y el suelo.

Adicionalmente a lo que acabamos de mencionar se deberá de considerar una longitud mínima de empotramiento de 0.9 metros en zona resistente.

Es importante reconocer que el valor de corrección  $\alpha$  depende principalmente del tipo de material de relleno compactado que se vaya a utilizar, así como también de la extensibilidad y la longitud del elemento de refuerzo. Tal y como lo acabamos de mencionar, para los elementos de refuerzo de acero, es decir, elementos inextensibles, el factor de corrección  $\alpha$  es 1, mientras que para los elementos de refuerzo extensibles este factor de corrección en muchos casos son muy inferiores a 1. A continuación se muestra una tabla con los diferentes valores de corrección por escala para cada tipo de elemento de refuerzo:

**Tabla 2.10.** Factores de corrección por efecto de escala de los elementos de refuerzo

Tipo de Refuerzo	Factor de Corrección
Todos los refuerzo de acero	1
Geomallas	0.8
Geotextiles	0.6

Fuente: FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 (2001)



El factor de resistencia al arrancamiento  $F^*$  se puede estimar de una manera muy precisa a partir de distintas pruebas de laboratorio o pruebas hechas en campo empleando el material de relleno que va ser reforzado. Para cualquier tipo de elemento de refuerzo que se tenga pensado emplear en el diseño de un muro de suelo reforzado, el valor del factor de resistencia al arrancamiento puede ser determinado en base a la siguiente expresión:

$$F^* = \text{Resistencia Pasiva} + \text{Resistencia de Fricción} \quad (2.13)$$

$$F^* = F_q * \alpha_\beta + \tan\rho \quad (2.13.a)$$

Donde cada una de los términos significa lo siguiente:

- $F_q$  : Factor por capacidad de carga.
- $\alpha_\beta$  : Factor que depende de la resistencia pasiva, la cual se basa en el espesor por unidad de ancho del elemento de refuerzo.
- $\rho$  : Ángulo de la interacción suelo-refuerzo de la fricción.

La mayoría de las empresas proveedoras de elementos de refuerzo para los sistemas de muro de suelo reforzado han desarrollado distintos parámetros a partir de una serie de pruebas de laboratorio y en campo, lo cual les permite recomendar un determinado elemento de refuerzo que garantice una resistencia al arrancamiento, el cual va a depender del tipo de material de relleno que se tenga pensado emplear. A continuación se detallan ciertas relaciones semi-empíricas obtenidas a partir de pruebas realizadas en campo y en laboratorio y que nos garantizan un 95% de confiabilidad.

Para los elementos de refuerzo inextensibles, es decir de acero, el factor de arrancamiento  $F^*$  se determina de acuerdo a la siguiente:

- ✚ En la parte superior de la estructura, = 2 máx.

$$F^* = \tan\rho = 1.2 + \log C_u \quad (2.14)$$

- ✚ A una profundidad de 6 metros.

$$F^* = \tan\emptyset \quad (2.15)$$

En la primera ecuación Cu representa el coeficiente de uniformidad del material de relleno.

Para refuerzos de acero con un espaciamiento transversal de  $St > 150\text{mm}$  (Figura 8), el factor de arrancamiento  $F^*$  es una función del factor de empotramiento,  $F_q$ , y se expresa de la siguiente manera:

✚ En la parte superior de la estructura.

$$F^* = F_q * \alpha_\beta = 40\alpha_\beta = 40(t/2S_t) \quad (2.16)$$

✚ A una profundidad de 6 metros.

$$F^* = F_q * \alpha_\beta = 20\alpha_\beta = 20(t/2S_t) \quad (2.17)$$

Donde cada uno de los términos significa lo siguiente:

- t : Espesor de la barra transversal.  
St : Se debe de mantener uniforme a lo largo de la longitud del refuerzo.  
La longitud máxima del St es de 610mm.

Para los elementos de refuerzo de geosintéticos, geomallas y geotextiles, la resistencia al arrancamiento se determina en base a la reducción de la fricción disponible del suelo, por medio de un factor de reducción que a menudo es referido al coeficiente de interacción del suelo,  $C_i$ . Cuando no se disponga de datos, el valor de  $F^*$ , para los geosintéticos, debe ser un valor conservador, el cual se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$F^* = \frac{2}{3} \tan\phi \quad (2.18)$$

## 2.5. Diseño de Muro de Suelo Reforzado

### 2.5.1 Metodología de Diseño

El diseño de muros de suelo reforzado con elementos extensibles y no extensibles se realizará siguiendo las directrices propuestas en la metodología LFRD (LOAD AND RESISTANCE FACTOR DESIGN). La metodología LFRD consiste básicamente en evaluar la estabilidad externa como interna en todos los estados límites de resistencia, mientras que la estabilidad global y el movimiento vertical o lateral de la fachada se evalúan en los estados límite de servicio.

La metodología de diseño LFRD, establece determinados factores de seguridad para los muros de suelo reforzado ya sea con elementos extensibles o inextensibles para los distintos modos de falla dentro del análisis de la estabilidad externa como interna. A continuación se detallan dichos factores de seguridad los cuales se deberán de satisfacer para el diseño de los muros de suelo reforzado.

- **Elementos inextensibles**

- **Estados Límites (LS)**

Se deberá de establecer un factor de seguridad a la ruptura de la armadura a partir de los factores de seguridad habituales. A dichos factores de seguridad se les deberá de aplicar los factores de carga, los cuales amplifican las sobrecargas entre un 30 y 60% y a su vez aumentan los empujes que actúan en la misma dirección.

- **Tensiones Admisibles (WS)**

En este caso se debe definir un factor de seguridad contra la fluencia de la armadura. Este factor de seguridad va a depender del tipo de refuerzo que se vaya a emplear, para los cuales el valor se encontrará entre 1.8 y 2.0.

De acuerdo a lo que se acaba de mencionar se presenta la siguiente tabla con los factores de seguridad estáticos usuales.

Tabla 2.11: Factores de Seguridad Elementos Inextensibles

Criterio	Factores de Seguridad	
<b>Estabilidad Externa</b>	<b>WS</b>	<b>LS</b>
Deslizamiento en la base	1.5	1.2
Excentricidad	2	1.5
Capacidad de Soporte	2	1.5
<b>Estabilidad Interna</b>		
Resistencia a la tracción de armaduras	$\sigma$	1.5
Adherencia suelo/armadura	1.5	1.3

Fuente: Muros de Retención de suelos con sistema de Tierra Armada: Vera, 2004)

- **Elementos extensibles**

Los factores de seguridad recomendados por la FHWA en su publicación FHWA-NHI-00-043 para muros de suelo reforzado con elementos extensibles, ya sea geomallas o geotextiles, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.12: Factores de Seguridad Elementos Extensibles

Criterio	Factores de Seguridad
<b>Estabilidad Externa</b>	
Deslizamiento den la base	>1.5
Excentricidad en la base	L/6 en suelo, L/4 en roca
Capacidad Portante	>2.5
Estabilidad por asentamientos	>1.3
Estabilidad bajo sismos	>75% de los F.S estáticos en todos los criterios de falla mencionados anteriormente
<b>Estabilidad Interna</b>	
Resistencia al Pullout	>1.5
Estabilidad interna para muros	>1.3

Fuente: FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 (2001)

### 2.5.2 Predimensionamiento del Muro de Suelo Reforzado

El predimensionamiento del muro de suelo reforzado consiste básicamente en determinar lo siguiente:

- **Geometría**
  - Altura e inclinación del muro

- Inclinación y longitud del talud por encima del muro.
- Inclinación y longitud del talud al pie del muro.
- Condiciones de agua

- **Condiciones de Carga**

- Sobrecarga del suelo (sobrecargas por carga viva y por carga muerta).
- Las cargas de estructuras adyacentes al muro de suelo reforzado (zapatas, cimentaciones profundas, etc.) pueden influir tanto en la estabilidad interna como externa.
- Cargas Sísmicas
- Impacto de barrera de tráfico.

Así mismo es importante conocer los parámetros y condiciones propias del proyecto. Cada uno de estos parámetros deberá ser definido por el propietario del proyecto y por el diseñador. A continuación se detallan dichos parámetros y condiciones:

- **Topografía existente**

- **Suelo de Fundación**
  - Propiedades de ingeniería ( $\gamma_f, \phi_f, c_f$ )
  - Condiciones de agua subterránea.
- **Relleno reforzado**
  - Propiedades de ingeniería ( $\gamma_r, \phi_r, c_r$ )
- **Relleno retenido**
  - Propiedades de ingeniería ( $\gamma_c, \phi_c, c_c$ )

Tal y como se detalló anteriormente el relleno que vaya ser reforzado debe ser un material granular, el ángulo de fricción máximo debe ser de  $34^\circ$ , salvo condiciones especiales, para lo cual se debe de tener en cuenta que el ángulo de fricción por ningún

motivo debe ser mayor de  $40^\circ$ . Se debe tener en cuenta que al usar material granular no cohesivo como relleno reforzado, la cohesión se supone igual a cero. (Artículo 11.10.6.2 - AASHTO, 2007).

Para el caso de los suelos de fundación, cuando no se disponga de datos específicos, el ángulo de fricción máxima que se debe de asumir es de  $30^\circ$ , mientras que para el relleno retenido se puede asumir un valor de  $30^\circ$ . Se debe de tener en cuenta que estos valores asumidos solo deben servir para predefinir el tamaño. (Artículo 11.10.5.3 - AASHTO, 2007).

- **Estimaciones de la longitud del elemento de refuerzo**

Al momento de dimensionar el muro de suelo reforzado es importante determinar el empotramiento del muro en el suelo así como también la altura de la fachada expuesta del muro. La combinación de ambas determinara la altura total de muro (H) para cada sección que se esté analizando.

Para determinar una longitud inicial del elemento de refuerzo, se debe de tener en cuenta que esta longitud debe ser mayor a  $0.7H$  y  $2.5m$ , donde H queda determinado por la altura total del muro de suelo reforzado. En determinadas estructuras de muros de suelo reforzado que tengan cargas concentradas, tal y como es el caso de los pilares, y para cargas sísmicas por lo general se recomienda emplear una longitud de refuerzo que se encuentre dentro del rango de  $0.8H$  y  $1.1H$ . A continuación se presenta una tabla en la cual se puede apreciar lo que acabamos de mencionar.

**Tabla 2.13:** Longitud Mínima de los elementos de refuerzo

Longitud Mínima del Elemento de Refuerzo	
Caso	Ratio Mínimo (L/H)
Carga estática	0.7
cargas concentradas	0.8
cargas sísmicas	0.8 a 1.1

Fuente: FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 (2001)

Se debe de tener muy en claro que por lo general la longitud del elemento de refuerzo se debe mantener constante a lo largo de toda la altura



de muro de suelo reforzado. Se recomienda que las dos capas superiores de elementos de refuerzo se extiendan 0.9m más allá de las otras.

- **Definir las cargas**

Una vez que se haya definido las dimensiones del muro de suelo reforzado se debe de identificar las cargas principales que actúan sobre el mismo. Las principales cargas son las siguientes:

- Presión horizontal del suelo
- Presión vertical del suelo
- Carga viva
- Presión del agua
- Cargas sísmicas

En la figura que se muestra a continuación se ilustra todo lo que se acaba de mencionar:

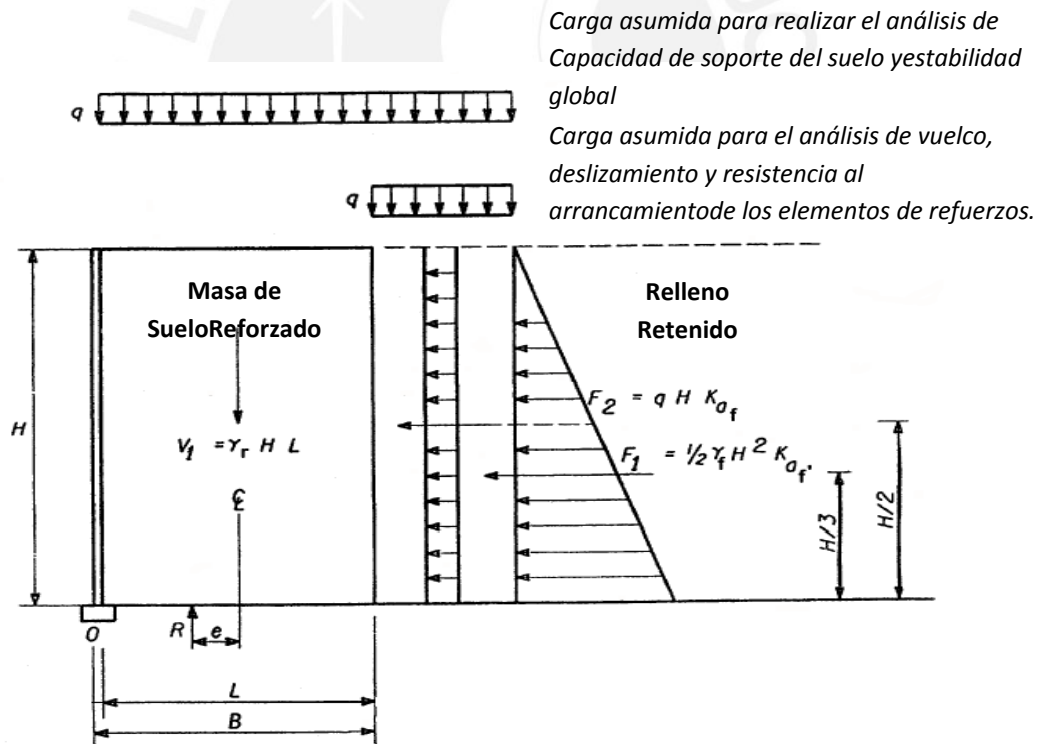


Figura. 2.18. Cargas externas en muro sin talud superior y ubicación de sobrecarga de tráfico según análisis a realizar. (FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043, 2001).

De acuerdo a la geometría de la figura que acabamos de mostrar, el coeficiente de empuje activo se debe de calcular cerca de la fachada vertical del muro de suelo reforzado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.19)$$

Para muros de suelo reforzado que tengan un talud en la parte superior, el coeficiente de empuje activo se calculara de acuerdo a la siguiente expresión:

$$K_a = \cos\beta \left[ \frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi}} \right] \quad (2.20)$$

### 2.5.3 Análisis de la estabilidad Externa

El análisis de la estabilidad externa de los muros de suelo reforzado es similar al que se realiza en muros clásicos de gravedad. Dentro de este análisis se consideran cuatro posibles mecanismos de falla, los cuales son los que se mencionan a continuación:

- Deslizamiento en la base
- Falla por excentricidad o Vuelco
- Capacidad de soporte
- Estabilidad global

Para una mayor ilustración de lo que se acaba de mencionar, a continuación se muestra la siguiente figura:

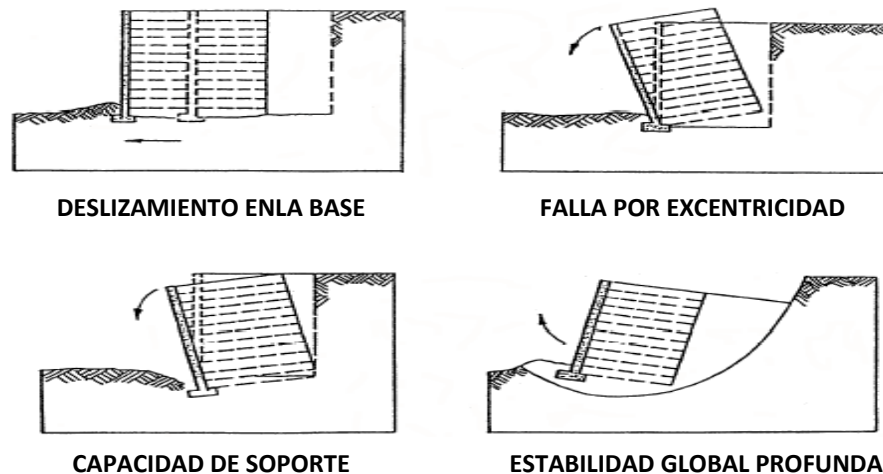


Figura. 2.19. Mecanismos de Falla FHWA  
Fuente: FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 (2001).

- **Evaluación de la estabilidad frente al deslizamiento**

La carga viva adicional, como se muestra en la **Figura 2.18**, no debe ser considerada como una fuerza estabilizadora para realizar la comprobación de deslizamiento. Para la comprobación de la estabilidad frente al deslizamiento solo se debe considerar la carga viva que actúa sobre el relleno retenido.

Las fuerzas a favor del deslizamiento generalmente son las cargas horizontales, debidas a la tierra, el agua y los movimientos sísmicos. Es importante tener en consideración que cualquier resistencia pasiva del suelo en la parte de la base en contra del deslizamiento debe ser ignorada. Esto último que se acaba de mencionar se debe básicamente a que dicho suelo puede llegar a ser removido por medio de procesos naturales o por acciones de los hombres. Además, la resistencia pasiva normalmente no suele estar presente durante el proceso de construcción.

La evaluación de la resistencia al deslizamiento, a lo largo de la base del muro de suelo reforzado, se realiza de acuerdo al artículo 10.6.3.4 (AASHTO, 2007). El procedimiento de evaluación de la estabilidad frente al deslizamiento se describe a continuación:

Se debe de verificar el tamaño preliminar con respecto al deslizamiento de la zona reforzada más cerca a la base del muro de suelo reforzado, ya que es aquí donde se presenta el caso más crítico. La verificación se establece de la siguiente manera:

$$FS_{deslizamiento} = \frac{\sum \text{Fuerzas Resistentes}}{\sum \text{Fuerzas Actuales}} \geq 1.5 \quad (2.21)$$

Donde cada uno de los términos significa lo siguiente:

Fuerza resistente : El menor valor entre la resistencia al corte a largo plazo y la resistencia de la zona reforzada más cerca a la base.

Fuerza Actante : La componente horizontal de empuje en el plano vertical en la parte posterior del muro.

El empuje horizontal en la parte posterior del muro se calcula de la siguiente manera:

$$F_1 = F_T = \frac{1}{2} K_a * \gamma * H^2 \quad (2.22)$$

Para una carga uniforme aplicada en la parte superior del muro el empuje horizontal adicional se calcula de la siguiente manera:

$$F_2 = K_a q H \quad (2.23)$$

Donde cada uno de los términos significa lo siguiente:

- Ka : Empuje activo debido al suelo retenido
- $\gamma$  : Peso específico del suelo retenido
- H : Altura total del muro de suelo reforzado
- q : carga uniforme distribuida en la parte superior del muro

Para muros de suelo reforzado que tengan un talud en la parte superior el empuje horizontal se calcula de la siguiente manera:

$$F_T = \frac{1}{2} K_a * \gamma * h^2 \quad (2.24)$$

$$h = H + L \tan \beta \quad (2.25)$$

Las fuerza actuantes se obtienen de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_{actuante} = F_H = F_T * \cos \beta + F_2 * \cos \beta \quad (2.26)$$

Así mismo se debe determinar la fuerza resistente por unidad de longitud del muro de suelo reforzado. Esto que se acaba de mencionar se obtiene de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_{Resistente} = (V_1 + V_2 + F_T \sin \beta) * \mu \quad (2.27)$$

$$\mu = \tan \phi \quad (2.27.a)$$

Donde  $\mu$  = mínimo valor ( $\tan \phi_f$ ,  $\tan \phi_r$  ó (para refuerzos continuos)  $\tan \rho$ )

Las cargas externas aplicadas en la cara del muro de suelo reforzado, las cuales favorecen la resistencia al deslizamiento, solo deben ser incluidas en el análisis de estabilidad, si y solo si estas cargas actúan de manera permanente. En tal caso las cargas vivas producto del tráfico no deben ser consideradas dentro de este análisis.

Finalmente se deberá de calcular el factor de seguridad frente a una falla por deslizamiento y a su vez verificar si es un valor mayor a lo mínimo requerido, es decir mayor a 1.5.

- **Verificación del Límite de excentricidad (Vuelco)**

Para la verificación del límite de excentricidad es necesario tener en cuenta que tanto el peso como el ancho del frente del muro de suelo reforzado suelen ser parámetros secundarios dentro de los cálculos. Para la verificación del límite de excentricidad solo se tomará en cuenta la carga viva sobre el relleno retenido.

El valor de la excentricidad  $e$ , es la distancia entre la resultante del suelo de fundación y el centro de la zona reforzada. En relación con lo que acabamos de mencionar podemos establecer la siguiente igualdad:

$$e = \frac{\sum M_{actvantes} - \sum M_{resistentes}}{\sum V} \quad (2.28)$$

Para un muro de suelo reforzado cuyo nivel superior es completamente horizontal, la ecuación anterior puede quedar expresada de la siguiente manera:

$$e = \frac{F_1(H/3) + F_2(H/2)}{V_1} \quad (2.29)$$

Para muros de suelo reforzado que tengan un talud en la parte superior la misma ecuación puede quedar expresa de la siguiente manera:

$$e = \frac{F_T \cos \beta (h/3) - F_T \sin \beta (L/2) - V_2 (L/6)}{V_1 + V_2 + F_T \sin \beta} \quad (2.30)$$

El valor de la excentricidad,  $e$ , será aceptable siempre y cuando sea menor que  $L/6$  en suelo o que  $L/4$  en roca.

Verificado el límite de excentricidad se deberá de determinar el factor de seguridad a la falla por excentricidad o vuelco, el cual deberá ser mayor que 2.0. Este factor de seguridad se deberá de calcular de acuerdo a la siguiente expresión:

$$FS_{vuelco} = \frac{\sum \text{Momentos Resistentes}}{\sum \text{Momentos Actuantes}} \geq 2.0 \quad (2.31)$$

Un parámetro importante dentro del análisis de estabilidad frente a una falla por excentricidad es la presión vertical equivalente en la base. El valor de este parámetro de debe de calcular de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\sigma_v = \frac{\text{Reacción Vertical}}{L-2e} \quad (2.32)$$

$$\sigma_v = \frac{V_1+V_2+F_T \text{sen} \beta}{L-2e} \quad (2.32.a)$$

Dicho parámetro supone que la carga excéntrica es resultado de una redistribución uniforme de la presión en un área reducida en la base del muro. El área queda definida por un ancho igual al ancho del muro menos el doble de la excentricidad.

- **Falla en la capacidad de Soporte**

Con el propósito de evitar que se presenten fallas en la capacidad de soporte, se debe de verificar que la tensión vertical en la base, la cual será calculada con la distribución de Meyerhof, no exceda la capacidad de soporte permitida por el suelo de fundación, teniendo en consideración un factor de seguridad de 2.5. (FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043, 2001).

Esto que acabamos de mencionar se determina de acuerdo a las siguientes expresiones:



$$q_{ult} = C_f N_c + 0.5B * \gamma_f * N_\gamma + \gamma_f * D_f * N_q \quad (2.33)$$

$$q_{ult} = C_f N_c + 0.5(L - 2e)(\gamma_f)(N_\gamma) \quad (2.34)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

- $C_f$  : Cohesión
- $\gamma_f$  : Peso unitario del suelo de fundación
- $D_f$  : Profundidad de cimentación. De manera conservadora se asume que el muro de suelo reforzado está a nivel del suelo de fundación.
- $N_c, N_q, N_\gamma$  : Coeficientes de capacidad de soporte.

A continuación se presenta un recuadro en el cual se observa los diferentes valores de los coeficientes de soporte de acuerdo al ángulo de fricción del suelo de fundación.

Tabla 2.14: Coeficientes de Soporte

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.14	1.0	0.0	23	18.1	8.7	8.2
1	5.4	1.1	0.1	24	19.3	9.6	9.4
2	5.6	1.2	0.2	25	20.7	10.7	10.9
3	5.9	1.3	0.2	26	22.3	11.9	12.5
4	6.2	1.4	0.3	27	23.9	13.2	14.5
5	6.5	1.6	0.5	28	25.8	14.7	16.7
6	6.8	1.7	0.6	29	27.9	16.4	19.3
7	7.2	1.9	0.7	30	30.1	18.4	22.4
8	7.5	2.1	0.9	31	32.7	20.6	25.9
9	7.9	2.3	1.0	32	35.5	23.2	30.2
10	8.4	2.5	1.2	33	38.6	26.1	35.2
11	8.8	2.7	1.4	34	42.2	29.4	41.1
12	9.3	3.0	1.7	35	46.1	33.3	48.0
13	9.8	3.3	2.0	36	50.6	37.8	56.3
14	10.4	3.6	2.3	37	55.6	42.9	66.2
15	11.0	3.9	2.7	38	61.4	48.9	78.0
16	11.6	4.3	3.1	39	67.9	56.0	92.3
17	12.3	4.8	3.5	40	75.3	64.2	109.4
18	13.1	5.3	4.1	41	83.9	73.9	130.2
19	13.9	5.8	4.7	42	93.7	85.4	155.6
20	14.8	6.4	5.4	43	105.1	99.0	186.5
21	15.8	7.1	6.2	44	118.4	115.3	224.6
22	16.9	7.8	7.1	45	133.9	134.9	271.8

Fuente: FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 (2001)

### 2.5.3.1 Análisis Sísmico

De acuerdo a lo establecido en la publicación No FHWA-NHI-00-043 de la Federal Highway Administration (2001), ante la presencia de un sismo, el material de relleno retenido ejerce un empuje horizontal, denominado PAE, adicional al empuje estático sobre el muro. A pesar de ello, se debe de tener en consideración que la masa del material de relleno reforzado sigue estando sujeta a la fuerza de inercia horizontal PIR.

Para el cálculo de la fuerza PAE, se deberá de realizar el análisis de “Mononobe-Okabe” pseudo-estático al cual se le puede agregar las fuerzas estáticas que actúan en el muro de suelo reforzado. Posterior a dicho análisis se deberá evaluar la estabilidad dinámica con respecto a la estabilidad externa. Se debe de tener en consideración que los

factores de seguridad dinámicos mínimos permitidos son el 75% de los factores de seguridad estáticos.

El análisis y la posterior evaluación de la estabilidad sísmica externa, se realizará de acuerdo a la publicación No FHWA-NHI-00-043, la cual se describe a continuación:

Se deberá de seleccionar la aceleración máxima horizontal del terreno basado en los sismos de diseño.

Con dicha aceleración se deberá de calcular la aceleración máxima ( $A_m$ ) que se logra desarrollar en el muro de suelo reforzado. Dicho cálculo se realizará de acuerdo a la siguiente expresión:

$$A_m = (1.45 - A)A \quad (2.35)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

A : Aceleración máxima del terreno.

$A_m$  : Máximo coeficiente de aceleración del muro en el baricentro (adimensional)

Así mismo se deberá de determinar la fuerza de inercia horizontal  $P_{IR}$ , así como también el empuje sísmico  $P_{AE}$ . Para el caso en el que el talud superior del muro de suelo reforzado sea horizontal se cuenta con las siguientes fórmulas:

$$P_{IR} = 0.5A_m * \gamma_r * H^2 \quad (2.36)$$

$$P_{AE} = 0.375A_m * \gamma * H^2 \quad (2.37)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

$\gamma_r$  : Peso unitario del material de relleno reforzado

$\gamma$  : Peso unitario del suelo retenido

Esto último que acabamos de mencionar queda ilustrado en la siguiente figura:

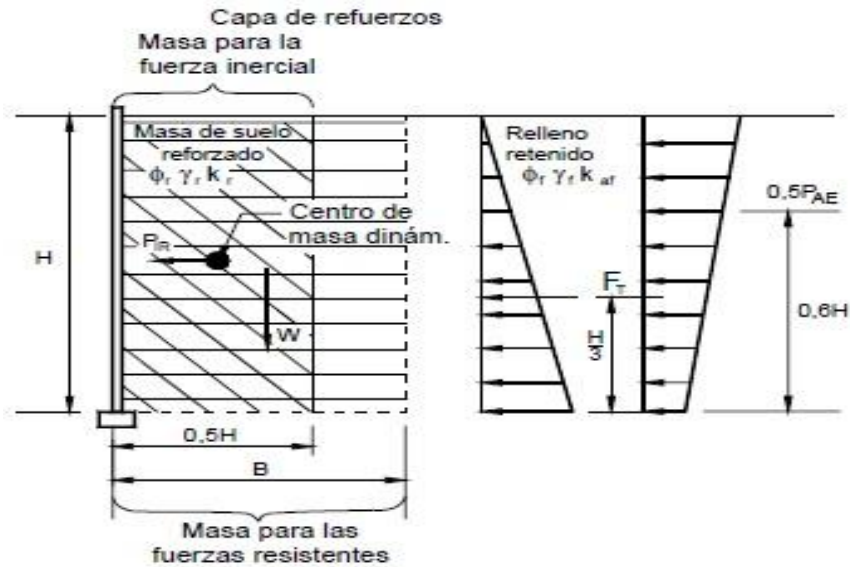


Figura 2.20: Condición de muro sin sobrecarga de talud (FHWA-NHI-00-043, 2001)

En el caso de muros de suelo reforzado con talud superior, la fuerza dinámica  $P_{AE}$  y la fuerza de inercia  $P_{IR}$  se determinan en función a una altura "H2", de acuerdo a la siguiente expresión:

$$H_2 = H + \frac{\tan\beta * 0.5H}{(1 - 0.5\tan\beta)} \quad (2.38)$$

Donde  $\beta$  corresponde a la inclinación del talud superior por encima del muro de suelo reforzado.

El valor de  $P_{IR}$  será determinado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_{IR} = P_{ir} + P_{is} \quad (2.39)$$

$$P_{ir} = 0.5 * \gamma * Am * H^2 \quad (2.40)$$

$$P_{is} = 0.125 * \gamma * Am * H_2^2 \tan\beta \quad (2.41)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguientes:

$P_{ir}$  : Fuerza de inercia generada por la aceleración del material de relleno reforzado

$P_{is}$  : Fuerza de inercia generada por la aceleración de la sobrecarga del talud sobre el material de relleno reforzado.

Se debe de tener muy en cuenta que la masa que contribuye a PIR deberá ser igual a  $0.5H_2$ . La fuerza PIR deberá de actuar en el baricentro combinado de  $P_{ir}$  y  $P_{is}$ .

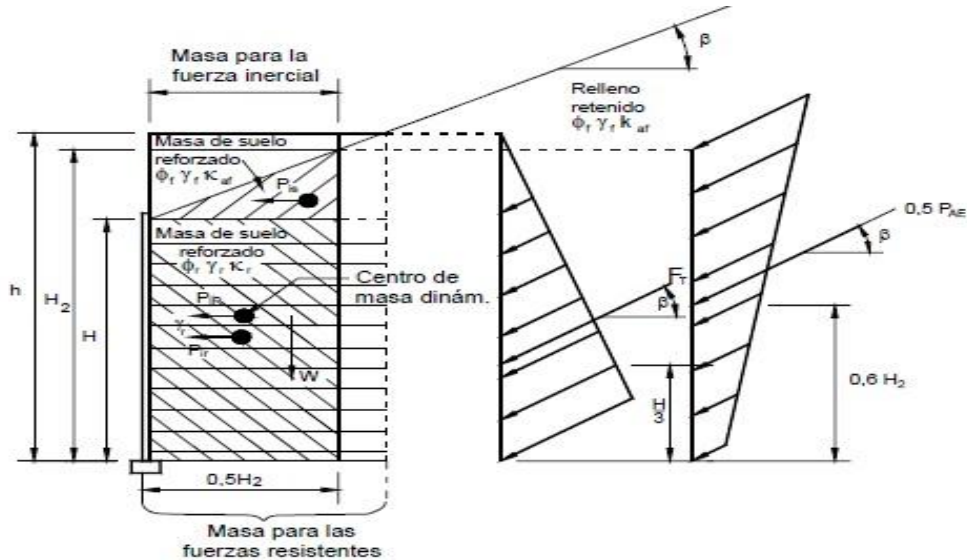


Figura 2.21: Condición de muro con sobrecarga de talud (FHWA-NHI-00-043, 2001)

El coeficiente sísmico total de presión de la tierra será denominado  $K_{AE}$  y se obtendrá de acuerdo a la expresión de Mononobe-Okabe, para lo cual se tiene la siguiente expresión:

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\phi - \xi - 90 + \theta)}{\cos(\xi) \cos^2(90 - \theta) \cos(I + 90 - \theta + \xi) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi + I) \text{sen}(\phi - \xi - I)}{\cos(I + 90 - \theta + \xi) \cos(I - 90 + \theta)}} \right]^2} \quad (2.42)$$

$$\Delta K_{AE} = K_{AE} - K_a \quad (2.43)$$

$$\xi = \arctan\left(\frac{kh}{1} - Kv\right) \quad (2.44)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

- I : Ángulo de inclinación del talud por encima del muro de suelo reforzado =  $\beta$
- $\phi$  : Ángulo de fricción del material de relleno reforzado.
- $\theta$  : Ángulo de inclinación de la fachada del muro de suelo reforzado.

Finalmente para completar el diseño se debe de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Se deberá de agregar a las fuerzas estáticas que actúan sobre la estructura (ver figura 2.20) el 50 % del empuje sísmico PAE y el 100% de la fuerza de inercia PIR. El motivo por el cual se utiliza el PAE reducido se debe básicamente a que es muy poco probable que ambas fuerzas lleguen a su máximo valor simultáneamente.

Tal y como se detalló anteriormente se deberá de evaluar la estabilidad al deslizamiento, al vuelco, a la excentricidad y a la capacidad de soporte, tal y como corresponde para un análisis de la estabilidad externa.

Así mismo se deberá de verificar que los factores de seguridad calculados sean mayores o en el peor de los casos iguales al 75% de los factores de seguridad mínimos para el caso del análisis estático, y que la excentricidad se encuentre dentro de los L/3 tanto para el suelo como para la roca.

Las distintas normas tales como la AASHTO, FHWA y la metodología de la TENSAR EARTH TECHNOLOGIES, recomiendan emplear para el diseño el 50% de la aceleración sísmica máxima, solamente en los cálculos correspondientes al análisis de estabilidad externa, ya que con esto se sigue manteniendo la premisa de que los muros de suelo reforzado se comportan como un bloque rígido.

Para el análisis interno la consideración es otra. Esto se debe básicamente a que la respuesta a la deformación del muro de suelo reforzado es mucho más compleja y no se cuenta con información alguna sobre cuánto podría llegar a disminuir el coeficiente de aceleración. Es por ello que de una manera conservadora se asume para los cálculos, dentro del análisis de la estabilidad interna, el 100% de la aceleración sísmica máxima de diseño.

#### **2.5.4 Análisis de la Estabilidad Interna**

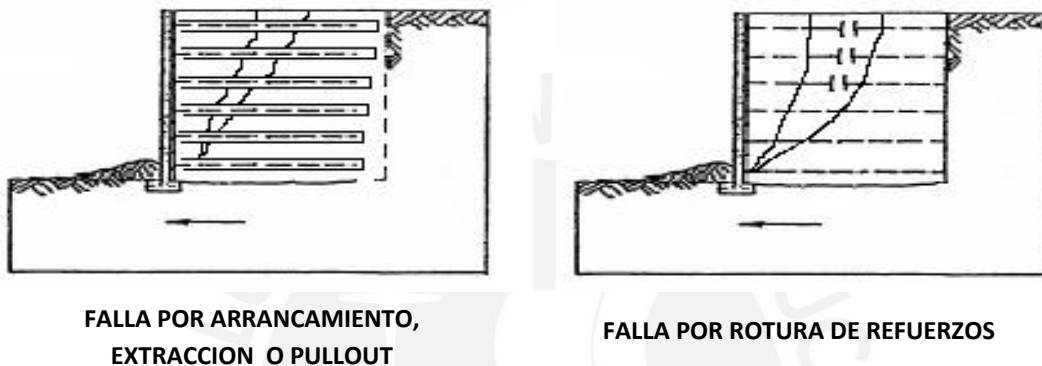
La falla de la estabilidad interna puede ocurrir de dos diferentes maneras, cada una de las cuales se procederá a describir a continuación:

- Cuando las fuerzas de tensión (en el caso de las armaduras rígidas, las fuerzas de corte) de las mallas, pueden llegar a ser tan grandes que estas se expanden excesivamente hasta llegar a la ruptura, ocasionando que se produzcan grandes movimientos y en el peor de los casos el colapso total de la estructura. A este modo de falla lo definiremos como falla por elongación o rotura de los elementos



de refuerzo, y será empleado para determinar el espaciamiento vertical y la resistencia de los elementos de refuerzo.

- Cuando las fuerzas de tensión en los elementos de refuerzo son mucho mayores que la resistencia al arrancamiento, generando de esta manera grandes movimientos y un posible colapso de la estructura. A este modo de falla lo definiremos como falla por “pullout”, y será empleado para determinar la longitud mínima de los refuerzos.



**Figura 2.22:** Mecanismos de Falla para Análisis por Estabilidad Interna.  
(Mechanically Stabilized Earth Walls Program MESAPRO, 2004)

La elección de elementos de refuerzo se debe de realizar justo en esta etapa del diseño. La diferencia fundamental entre los refuerzos extensibles y los inextensibles radica en la predicción de la vida útil de cada uno de ellos. Mientras que la vida útil de los elementos de refuerzo extensible depende la de degradación del polímero, en los elementos de refuerzo inextensible la vida útil depende de la corrosión del metal. A continuación se describirá como es que se realiza en análisis de la estabilidad interna para cada uno de los dos tipos de refuerzo.

#### **2.5.4.1 Muro de Suelo Reforzado con elementos Extensibles**

Lo primero que se debe de establecer es la superficie de deslizamiento crítico. En los muros de suelo reforzado se supone que dicha superficie coincide con el lugar de la fuerza de tracción máxima para cada capa de refuerzo. La superficie de falla a la cual se hace referencia se asume lineal para el caso de los elementos extensibles tal y como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 2.23:** Localización de la superficie de falla potencial para el análisis de estabilidad interna  
(FHWA-NHI-00-043, 2001)

Las principales cargas que están involucradas dentro del análisis de la estabilidad interna son el empuje del material de suelo reforzado y cualquier carga extra en la parte superior de la zona reforzada.

- **Cálculo de las fuerzas de tensión máxima en las capas de refuerzo**

El coeficiente de empuje activo queda determinado usando las relaciones de presión de tierras propuestas por Coulomb, teniendo en consideración que no existe fricción en el muro y que el ángulo  $\beta$  es igual a cero. Para muros verticales la reducción de la presión de la tierra se expresa de acuerdo a la ecuación de Rankine:

$$K_a = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.45)$$

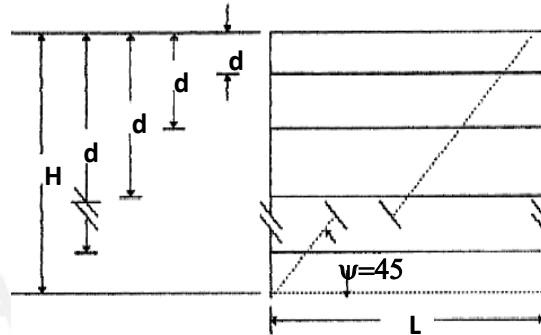
Para inclinaciones en la fachada, se empleara la ecuación simple propuesta por Coulomb. Las suposiciones siguen siendo las mismas, es decir, no existe fricción en el muro y el ángulo  $\beta$  es igual a cero.

$$K_a = \frac{\text{sen}^2(\theta + \phi)}{\text{sen}^3 \left( 1 + \frac{\text{sen}\phi}{\text{sen}\theta} \right)^2} \quad (2.46)$$

Donde la variable  $\theta$  corresponde a la inclinación de la parte posterior de la fachada medida desde la horizontal, partiendo de la parte frontal del muro.

A continuación se describen cada uno de los pasos, a partir de los cuales se calculará la tensión máxima en las distintas capas de los elementos de refuerzo.

Lo primero que se debe de realizar es determinar las distintas profundidades para cada nivel de la geomalla “dn”. La ilustración de lo que acabamos de mencionar la podemos apreciar en la siguiente figura.



**Figura 2.24.** Definición de profundidades “dn”. (FHWA-NHI-00-043, 2001)

Posterior a lo que acabamos de describir se procederá a calcular los anchos tributarios para cada refuerzo “Sv”, de acuerdo a las siguientes expresiones:

- ❖ Para la Geomalla Superior

$$S_{v1} = d_1 + \frac{1}{2}(d_2 - d_1) \quad (2.47)$$

- ❖ Para capas de geomallas intermedias

$$S_{v2} = d_1 + \frac{1}{2}(d_2 - d_1) + \frac{1}{2}(d_3 - d_2) \quad (2.48)$$

- ❖ Para capa de geomalla inferior

$$S_{vn} = d_1 + \frac{1}{2}(d_{n-1} - d_{n-2}) + (H - d_{n-1}) \quad (2.49)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

- Sv : Ancho tributario para cada elemento de refuerzo de geomalla.
- dn: Profundidad a la que se encuentra la capa del elemento de refuerzo en análisis.

Se deberá de calcular para cada nivel de refuerzo las tensiones horizontales “ $\sigma_H$ ” a lo largo de la posible línea de falla. Para ello será necesario considerar la sumatoria de las fuerzas verticales, tales como el peso propio del suelo, el peso de material inmediatamente encima del material de relleno reforzado, en caso exista la presencia de un talud superior, la sobrecarga uniforme S/C, así como también las distintas cargas concentradas  $\Delta\sigma_v$  y  $\Delta\sigma_h$  si es que las hubieran .

A continuación se describen algunas expresiones las cuales nos permiten calcular lo último que se acaba de mencionar.

$$\sigma_v = \gamma * d_n + \frac{s}{c} + \Delta\sigma_v \quad (2.50)$$

$$\sigma_H = \sigma_v * K_a + \Delta\sigma_h \quad (2.51)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

- $\Delta\sigma_v$  : Incremento de la tensión vertical debido a las cargas verticales.
- $\Delta\sigma_h$  : Incremento de la tensión horizontal, en el caso de que existieran sobrecargas horizontales concentradas.
- S/C : Sobrecarga aplicada sobre el muro de suelo reforzado.
- $\gamma$  : Peso unitario del material de relleno reforzado.

Como siguiente paso dentro del estudio y análisis de la estabilidad interna del muro de suelo reforzado, se debe calcular la tensión máxima  $T_{m\acute{a}x}$ , para cada capa en la cual se coloca el elemento de refuerzo.

Calcular la tensión máxima  $T_{max}$  en cada capa del elemento de refuerzo, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$T_{max} = \sigma_H * S_v \quad (2.52)$$

Adicionalmente se deberá realizar el análisis de la estabilidad interna con respecto a la falla por rotura del refuerzo. Para ello es necesario tomar en consideración la siguiente expresión:

$$T_{max} \leq \frac{Ta * Rc}{FS} \quad (2.53)$$

Donde cada uno de los términos significa lo siguiente:

- Rc : Porcentaje de cobertura parcial del refuerzo
- Ta : Capacidad a la tensión admisible del refuerzo.
- FS : Factor de Seguridad.

Dentro del estudio y el análisis de la estabilidad interna es importante tomar en consideración la estabilidad interna respecto a la resistencia al arrancamiento o extracción del refuerzo.

Para poder garantizar dicha estabilidad se requiere que se satisfagan ciertos criterios que vienen expresados en ecuaciones que se muestran a continuación:

$$P_r \leq \frac{2}{FS_{PO}} * \gamma * d_n * L_e * Tan(\emptyset) * ci * R_c * \alpha \quad (2.54)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

- $FS_{PO}$  : Factor de seguridad contra la extracción o “pullout.
- $Pr=Tmax$ : Tensión máxima que soporta el elemento de refuerzo al arrancamiento.
- $Tan(\emptyset) * ci$  : Factor de resistencia al arrancamiento.
- Rc : Porcentaje de cobertura parcial del refuerzo
- $\alpha$  : Factor por corrección por efecto de escala.

Se debe de tener en consideración que para el cálculo de la estabilidad interna por arrancamiento o extracción del elemento de refuerzo no se deberán de considerar las cargas de tráfico u otras cargas vivas.

Un parámetro importante para el cálculo de la estabilidad interna es la longitud del refuerzo “L”, la cual se determina a partir de la siguiente expresión:

$$L = L_a + L_e \quad (2.55)$$

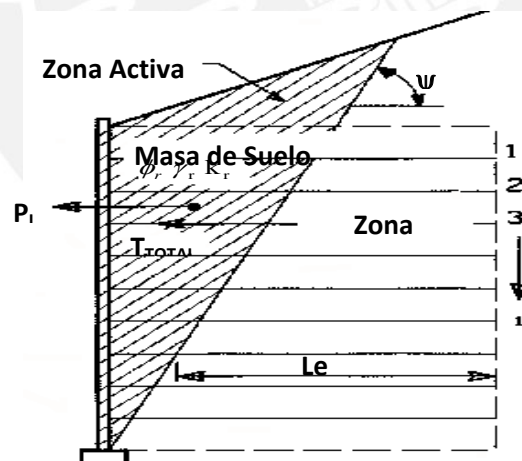
$$L_a = (H - d_n) \tan(45 - \frac{\phi}{2}) \quad (2.55.a)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

- L : Longitud del elemento de refuerzo  
 La : Longitud de anclaje del elemento de refuerzo  
 Le : Longitud de empotramiento, se despeja de la ecuación anterior.

#### 2.5.4.1.1 Análisis Sísmico

La consideración especial con respecto a las carga sísmica es que produce una fuerza de inercia "Pi", la cual actúa horizontalmente, tal y como lo hacen las fuerzas estáticas existentes. Esta fuerza de inercia tiene como consecuencia que se generen aumentos dinámicos en las fuerzas de tensión máxima de los elementos de refuerzo. Para dicho cálculo debemos de tener en consideración que la superficie de falla es lineal durante la carga sísmica. A continuación se ilustra lo que se acaba de mencionar en la siguiente figura:



**Figura 2.25:** Análisis Sísmico de la estabilidad interna para refuerzos extensibles (FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 .2001)

A continuación describiremos como se realiza el estudio y análisis de la estabilidad interna tomando en consideración la carga sísmica.



Se deberá de determinar la aceleración máxima en el muro de suelo reforzado y la fuerza “PI”, por el ancho unitario que actúa sobre la base, de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$P_I = A_m * W_a \quad (2.56)$$

$$A_m = (1.45 - A)A \quad (2.56.a)$$

$$W_a = 0.5 * H^2 * \tan\left(45 - \frac{\phi_{ref}}{2}\right) * \gamma_{ref} \quad (2.56.b)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

- PI : Fuerza de Inercia
- Am : Aceleración máxima
- A : Coeficiente de aceleración sísmica
- Wa : Peso de la zona activa para muros con paramento vertical y sin sobrecarga de talud.

Adicionalmente se deberá de calcular el incremento dinámico “Tmd”, el cual es generado directamente por la fuerza de inercia “PI” sobre los elementos de refuerzo. Cada elemento de refuerzo recibirá un incremento dinámico proporcional a su “área de resistencia” (Le) sobre una base de carga por ancho unitario del muro. Dicho incremento dinámico para cada elemento de refuerzo se calculará de acuerdo a la siguiente expresión:

$$T_{md} = P_I \left[ \frac{Le_i}{\sum_{i=1}^n (Le_i)} \right] \quad (2.57)$$

De acuerdo a lo que acabamos de mencionar, la nueva tensión máxima queda expresada de la siguiente manera:

$$T'_{max} = T_{max} + T_{md} \quad (2.58)$$

Adicionalmente se deberá de verificar la estabilidad interna con respecto a la rotura y extracción del elemento de refuerzo con factores sísmicos de seguridad de alrededor 75% del factor mínimo de seguridad estático. El elemento de refuerzo debe ser

diseñado de manera que sea capaz de resistir la carga estática y dinámica, para ello se procederá de la siguiente manera:

La componente estática se calculará de acuerdo a la siguiente expresión, la cual está basada en una fórmula descrita anteriormente:

$$FS \leq \frac{T_{ult} * Rc}{FR_D * FR_{DI} * FR_C * T_{max}} \quad (2.59)$$

La componente dinámica se calculará de acuerdo a la siguiente expresión:

$$FS \leq \frac{T_{ult} * Rc}{FR_{DI} * FR_D * T_{max} + FR_D * FR_{DI} * T_{md}} \quad (2.60)$$

Debido a que la carga dinámica es aplicada durante un período corto de tiempo, no se considerará el factor de reducción por creep.

$$FS \leq \frac{T_{ult} * Rc}{FR_C * FR_D * FR_{DI} * T_{max} + FR_D * FR_{DI} * T_{md}} \quad (2.61)$$

Para la verificación de la extracción del elemento de refuerzo o arrancamiento, se deberá de reducir el coeficiente de fricción ( $\tan\phi * Ci$ ) a un 80% del valor estático, tal y como se muestra en la siguiente expresión:

$$T_{Total} \leq \frac{P_r * Rc}{FS} = \frac{C * (0.8F^*)}{1.125} * \gamma * Z * L_e * Rc * \alpha \quad (2.62)$$

#### 2.5.4.2 Muro de Suelo Reforzado con elementos inextensibles

El estudio y análisis de la estabilidad interna consiste en establecer el equilibrio entre las fuerzas de empuje y las fuerzas de rozamiento entre el suelo y la armadura. Para ello se establecerá una secuencia en el análisis para cada uno de los niveles de los flejes o mallas metálicas.

Para cada nivel donde vaya colocado la armadura metálica (z), se deberá de calcular la tensión vertical ( $\sigma_v$ ), la cual se obtiene de dividir la carga vertical entre el área de aplicación, para el análisis por ancho unitario.

$$\sigma_v(z) = \frac{Rv(z)}{Lv} \quad (2.63)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

$\sigma_v(z)$ : Tensión vertical a una profundidad  $z$ , medida desde la parte superior del muro.

$R_v(z)$  : Carga vertical

$L_v$  : Área de aplicación de la carga.

Así mismo se deberá de calcular la tensión horizontal ( $\sigma_h$ ), la cual se determinará de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\sigma_h = K * \sigma_v \quad (2.64)$$

Una vez calculada tanto la tensión vertical como horizontal para cada nivel donde se colocará el elemento de refuerzo ( $z$ ), se deberá de calcular la presión horizontal ( $T_m$ ), la cual es una función del espaciamiento vertical ( $\Delta H$ ) y el número de armaduras que se vaya a colocar por metro lineal de muro ( $n$ ), tal y como se muestra en la siguiente expresión:

$$T_m = \frac{\sigma_h * \Delta H}{n} \quad (2.65)$$

Posterior al cálculo de la presión horizontal de deberá de comprobar que dicho valor sea menor que la resistencia máxima a la tracción de las armaduras.

$$T_m = T_r \quad (2.66)$$

$$T_r = \frac{R * \Gamma}{FS_t} \quad (2.66.a)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

$R$  : Resistencia máxima a la tensión de fluencia (WS) o a la tracción del acero (LS)

$\Gamma$  : Espesor de sacrificio

$FS_t$  : Factor de seguridad a la ruptura de las armaduras de acero.

Un parámetro importante en el análisis de la estabilidad interna consiste en determinar la tensión máxima en la conexión de la armadura con la placa de concreto, la cual se obtiene como se muestra a continuación:

$$T_{ro} = \lambda * Tr \quad (2.67)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

$T_{ro}$  : Tensión admisible en la conexión

$\lambda$  : Función del tipo de armadura

Para el caso de las barras atornilladas se tiene lo siguiente:

$$\lambda = \frac{b-d}{b} \quad (2.68)$$

Donde  $b$  corresponde al ancho de la barra y  $d$  al diámetro de perforación.

Finalmente se deberá de verificar la capacidad de adherencia o fricción entre el elemento de armadura y el suelo. Esto que se acaba de describir queda establecido de acuerdo a lo siguiente:

$$T_f = \frac{1}{FS_f} * C_r * f * L_a * (\gamma_1 * h_a) \quad (2.69)$$

Donde cada uno de los términos significa lo siguiente:

$f$  : Coeficiente de adherencia

$C_r$  : Coeficiente de refuerzo, el cual representa la superficie de roce

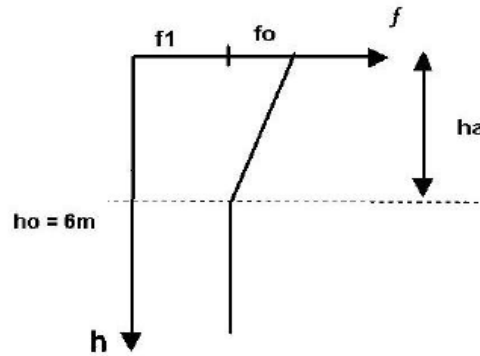
$L_a$  : Longitud de anclaje

$h_a$  : Altura efectiva del relleno sobre la barra en análisis

$\gamma_1$  : Peso unitario del material de relleno reforzado

$FS_f$  : Factor de Seguridad a la adherencia.

El coeficiente de adherencia tiene una distribución tal y como se muestra en la figura, en la cual se observa que dicho coeficiente es mayor en la parte superior del muro y menor conforme disminuye la altura.



**Figura 2.26.** Distribución del coeficiente de adherencia

(FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 .2001)

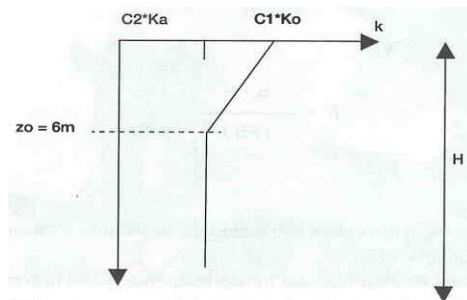
El coeficiente de adherencia queda determinado de acuerdo a la granulometría del material de relleno y por el tipo de armadura que se vaya a emplear como elemento de refuerzo.

Finalmente se debe de cumplir lo siguiente:

$$T_m = T_f \quad (2.70)$$

De acuerdo a estudios de investigación (Collin, 1986; Christopher et al., 1990; Allen et al., 2001) se sabe que la fuerza de tracción máxima está relacionada directamente con el tipo de refuerzo que se vaya a emplear en el muro de suelo reforzado, así como también de la extensibilidad y la densidad del refuerzo

A partir de estos estudios de investigación se ha establecido una relación entre la armadura de refuerzo y el esfuerzo que puede desarrollar ( $K_r/K_a$ ). La relación  $K_r/K_a$  para elementos de refuerzo inextensible se aprecia en la figura que se muestra a continuación:



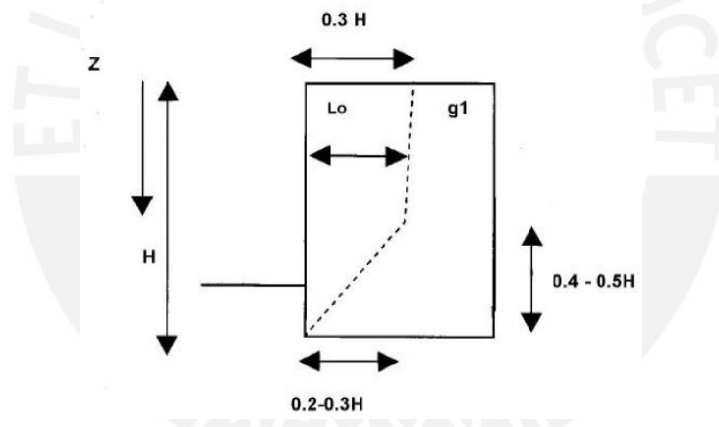
**Figura 2.27.** Distribución del coeficiente horizontal de empuje

(FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 .2001)

Para el caso de los elementos de refuerzo inextensibles, se puede apreciar que dicha relación permanece constante desde la parte inferior del muro hasta una profundidad de 6 metros por debajo de la parte superior del muro y dicho valor va en aumento dependiendo del tipo de armadura inextensible que se vaya a emplear. Así mismo se puede apreciar que para el caso de los elementos extensibles, como el caso de los geosintéticos, el valor de dicha relación permanece constante para cualquier profundidad.

### 2.5.4.2.1 Análisis Sísmico

El análisis sísmico de la estabilidad interna se deberá de analizar de manera similar al análisis que se hizo para la estabilidad externa con la particularidad de que se deberá de añadir la inercia de la “cuña” activa. Dicho parámetro queda definido por la localización de las líneas de máximas tensiones de los elementos inextensibles. En la siguiente figura se ilustra lo que se acaba de describir.



**Figura 2.28:** Líneas de Máximas tensiones en elementos inextensibles

(FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 .2001)

De acuerdo a la figura se puede concluir con lo siguiente:

$$Tm = Tm_1 + Tm_2 \quad (2.71)$$

$$Tm_1 = \frac{\sigma_h \cdot \Delta H}{n} \quad (2.72)$$

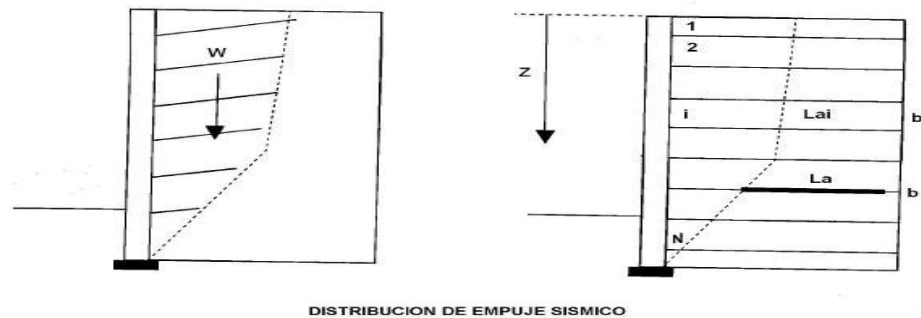
Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

$\sigma_h$  : Tensión horizontal



- $\Delta H$  : Espaciamiento entre barras  
n : Número de barras por metro lineal

El valor de  $Tm_2$  corresponde al incremento sísmico, es decir, a la inercia de la cuña activa. Para poder determinar el valor de esta variable se deberá de considerar la masa de la cuña activa por el coeficiente sísmico horizontal. A continuación se muestra una figura en la cual se ilustra lo que se acaba de describir.



**Figura 2.29.** Sección de la Cuña Activa  
(FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 .2001)

De acuerdo a la figura se puede concluir con lo siguiente:

$$Tm_2 = \frac{b \cdot La}{\sum_{i=1} n_i \cdot b_i \cdot La_i} * Ed \quad (2.73)$$

$$Ed = (Wa + Q_1) * C_o * \frac{ac}{g} \quad (2.74)$$

Donde cada uno de los siguientes términos significa lo siguiente:

- $Q_1$  : Sobrecarga sobre el muro de suelo reforzado, en caso exista la presencia de un talud superior.  
b : Ancho de la barra de acero  
 $La_i$  : Longitud de adherencia del elemento de refuerzo inextensible en el nivel i.  
 $n_i$  : Cantidad de barras por metro lineal para cada nivel i.

El valor del coeficiente  $C_o$  deberá de ser menor o igual a 1.

De la ecuación se puede concluir que el valor de  $E_d$  se distribuye a lo largo de los elementos inextensibles (barras de acero) en proporción al producto del ancho de la barra y el largo resistente.

### **2.5.5 Resistencia de diseño de las conexiones de los elementos de refuerzo**

- **Refuerzo Inextensible**

Las conexiones de los elementos de refuerzo inextensible deberán de ser diseñadas para resistir las tensiones resultantes de las fuerzas activas,  $T_o$ , además de aquellas fuerzas resultantes que se generan producto de los movimientos diferenciales entre el material de relleno reforzado y los elementos que forman la fachada del muro del suelo reforzado.

Aquellos elementos de conexión que están embebidos en un elemento de la fachada, deberán de ser diseñados con una longitud adherente y con una área de contacto adecuado de manera que se puedan resistir los esfuerzos.

La capacidad de resistencia de los conectores embebidos deberá ser verificada por medio de ensayos. Los materiales utilizados para las conexiones deberán de ser diseñados teniendo en consideración las pérdidas por corrosión anteriormente mencionadas. Al momento de realizar una evaluación sobre las potenciales pérdidas por corrosión se deberá de tener muy en cuenta las potenciales diferencias entre la temperatura en la cara del muro y la temperatura dentro del material de suelo reforzado.

- **Refuerzo extensible**

Con el propósito de garantizar una resistencia de conexión adecuada, el procedimiento para determinar dicha resistencia requiere que sea la menor entre las siguientes que se muestran a continuación:

- Resistencia de diseño permitida para los elementos de refuerzo “Ta”

$$T_{max} \leq \frac{Ta * Rc}{FS} \quad (2.75)$$

- Resistencia a la ruptura de la conexión

$$Tac_s = \frac{Tult * CR_u * Rc}{FR_D * FR_{CR}} \quad (2.76)$$

$$T_{max} \leq \frac{Tult * CR_u * Rc}{FR_D * FR_{CR} * FS} \quad (2.77)$$

Donde CR<sub>u</sub>, es un factor de reducción por efecto de la ruptura de la conexión. Dicho valor se obtiene por medio del ensayo ASTM D-4884 denominado “*Long term pullout testing*”. *Tensar Earth Technologies, Inc.* considera un valor igual a 1.0 dentro de sus cálculos para los conectores HPDE.

- Resistencia al arrancamiento de la conexión

$$Tac_{po} = Tult * CR_s * Rc \quad (2.78)$$

$$T_{max} \leq \frac{Tult * CR_s * Rc}{FS} \quad (2.79)$$

Donde CR<sub>s</sub>, es un factor de reducción por efecto del arrancamiento de la conexión. Dicho valor se obtiene por medio de ensayos descritos en el *apéndice A.3 de la Publication No FHWA-NHI-00-043. Tensar Earth Technologies, Inc.* considera un valor igual a 0.32 dentro de sus cálculos para los conectores HPDE.

Para el análisis sísmico de las conexiones de los elementos de refuerzo extensibles, se debe de garantizar que la resistencia a largo plazo de la conexión sea mayor que  $T_{max} + T_{md}$ . Se debe de tener en cuenta que la componente dinámica “T<sub>md</sub>” deberá de ser reducida a un 80% de su valor estático.

En relación con esto último que acabamos de mencionar se tiene lo siguiente:

- Resistencia del elemento de Refuerzo ante sollicitación sísmica

$$FS \leq \frac{T_{ult} * R_c}{F_{RD} * F_{RDI} * (F_{RCR} * T_{max} + T_{md})} \quad (2.80)$$

- Ruptura de la conexión ante sollicitación sísmica

$$FS \leq \left( \frac{T_{ult} * C_{Ru} * R_c}{F_{RD} * (F_{RCR} * T_{max} + T_{md})} \right) \quad (2.81)$$

- Extracción de la conexión ante sollicitación sísmica

$$FS \leq \left( \frac{T_{ult} * C_{RS} * R_c}{T_{max} + T_{md}} \right) \quad (2.82)$$

### 2.5.6 Drenaje del Muro de Suelo Reforzado

En todos los sistemas de muros de suelo reforzado se deberá de establecer medidas de drenaje interno de manera que se pueda garantizar la posible saturación del material de relleno reforzado así como también poder captar cualquier flujo superficial que contenga elementos agresivos. Los muros de suelo reforzado en áreas de desmonte y rellenos y en los cuales se conozca el nivel freático, deberán de ser construidos con mantos de drenaje colocados detrás y debajo de la zona reforzada.

Otra de las consideraciones especiales que se debe de tener con respecto al drenaje de los muros de suelo reforzado, en los que en épocas de invierno se aplican productos anticongelantes, es que se deberá de emplear una membrana impermeable por debajo del pavimento e inmediatamente por encima de la primera capa de refuerzos del suelo, de manera que se pueda interceptar cualquier flujo, el cual pueda contener productos anticongelantes. Dicha membrana impermeable deberá de ser colocada con una pendiente la cual permita que el flujo del drenaje sea en sentido contrario al revestimiento y hacia un drenaje longitudinal ubicado más allá de la zona reforzada. Normalmente se recomienda que las membranas impermeables sean de PVC, HDPE o LLDPE de superficie rugosa de 0.76mm de

espesor. Todos los traslapes de la membrana impermeable deberán de ser soldadas de manera que se pueda evitar que ocurran pérdidas.

Otra de las consideraciones que se debe de tener con respecto al drenaje del muro de suelo reforzado es que por detrás de los elementos de fachada se deberá de colocar una capa de relleno de filtro/drenaje de 30 cm de espesor mínimo, la cual deberá cumplir las siguientes finalidades:

- ✚ Mejorar la capacidad de drenaje para cualquier tipo de infiltración de algún líquido en la zona del material de relleno reforzado. Para ello se requiere un material de relleno selecto, basicamente una arena bien gradada o una mezcla de arena gruesa con un buen agregado.
- ✚ Actuar como un filtro natural en la intersección de los elementos de fachada con el material de relleno reforzado, con el propósito de evitar la fuga de finos a causa de escorrentías internas.

La AASHTO y la NCMA, establecen las gradaciones y especificaciones que deben de cumplir el material de filtro/drenaje junto al material de relleno reforzado. A continuación en la siguiente tabla se detallan dichas especificaciones:

**Tabla 2.15:** Recomendaciones para la gradación del relleno del drenaje.

AASHTO		NCMA	
Tamaño	Porcentaje que	Tamaño	Porcentaje que pasa
1"	100-75	1"	100-75
¾"	50-75	¾"	50-75
No.4	0-60	No.4	0-60
No. 40	0-50	No. 40	0-50
No. 200	0-5	No. 200	0-5

Fuente: Design Manual for Segmental Retaining Walls, NCMA 1997.

## 3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### 3.1.1. Ubicación

El proyecto Bayóvar de la Compañía Minera Miski Mayo S.A.C, se encuentra ubicado en el distrito y provincia de Sechura, departamento de Piura, aproximadamente a 1000 km al norte de la ciudad de Lima, a 110 km al sur de la ciudad de Piura y a 30 km del Océano Pacífico. Dicho proyecto estuvo a cargo de la Compañía Vale do Río Doce (CVRD).

En dicho proyecto se hizo empleo de los muros de suelo reforzado con elementos extensibles para la zona de descarga del mineral de los camiones.

### 3.1.2. Parámetros de Suelos

TABLA 3.1. Parámetros de Suelos

Tipo de Suelo	Peso Unitario y kN/m <sup>3</sup>	Ángulo de Fricción $\phi$ (°)	Cohesión KN/m <sup>2</sup>
Suelo de Fundación	20	34	0
Suelo Reforzado	18	36	0
Suelo Retenido	20	30	0

### 3.1.3. Sobrecargas

- **Sobrecarga viva:** Se considera como vehículo de diseño al MAMUT ANDINO TIPO RODOTRAIN con volteo lateral que genera una carga uniformemente distribuida equivalente de 30.00kPa (Adoptado).
- **Carga Sísmica (aceleración horizontal máxima a nivel del suelo) :** El valor de la aceleración horizontal máxima a nivel del suelo es de 0.40g, factor representativo de la zona sísmica 3, donde la obra está ubicada, en conformidad a la norma técnica E-030.



## 3.2 SOFTWARES UTILIZADOS

### 3.2.1 Descripción del Software MSEW 3.0

El MSEW 3.0 es un programa interactivo, de gran riqueza gráfica, muy fácil de emplear y que permite al diseñador poder realizar análisis de estabilidad interna, externa y global. El MSEW 3.0 cumple con los parámetros de diseño de la AASHTO (LFRD) así como también de la NCMA.

El MSEW 3.0 es un programa que permite el diseño de muros de suelo reforzado con elementos extensibles, ya sea con geomallas o con geotextiles, así como también con elementos inextensibles, armaduras de acero o flejes metálicos. Para estos diseños es posible aplicar distintos factores de reducción de resistencia, los cuales dependen del tipo de refuerzo que se vaya a utilizar. El programa permite al diseñador escoger entre los distintos elementos de fachada que existen para los muros de suelo reforzado. En el caso de que el muro de suelo reforzado tenga un talud superior el programa permite indicar el ángulo de inclinación. El diseñador deberá de ingresar el ángulo de fricción, el valor de la cohesión y el peso específico del suelo reforzado, del suelo retenido, así como también del suelo de fundación. Es posible especificar hasta cinco tipos de refuerzo por cada altura de muro que se desee diseñar.

El programa MSEW tiene dos modos de funcionamiento, los cuales son el Diseño y el Análisis. En la función de diseño, el programa calcula la longitud y la separación vertical de los elementos de refuerzo teniendo en consideración que se cumplan con los factores de seguridad establecidos. En la función de análisis, el programa calcula los distintos factores de seguridad para cada uno de los modos de falla. El diseño se adecuará posteriormente de manera iterativa de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis. El mismo procedimiento se realiza en análisis sísmico tanto para estabilidad externa como interna. Así mismo el programa nos permite evaluar el factor de seguridad de los elementos de refuerzo contra la resistencia a largo plazo así como también la resistencia al arrancamiento para cada elevación.

La presentación de los resultados se muestra de manera específica para cada modo de falla. Esta característica permite al diseñador establecer los parámetros que controlan el diseño y de esto modo poder adoptar las medidas concretas que permitan mejorar los resultados del diseño, es decir, que el diseño sea técnica y económicamente rentable.

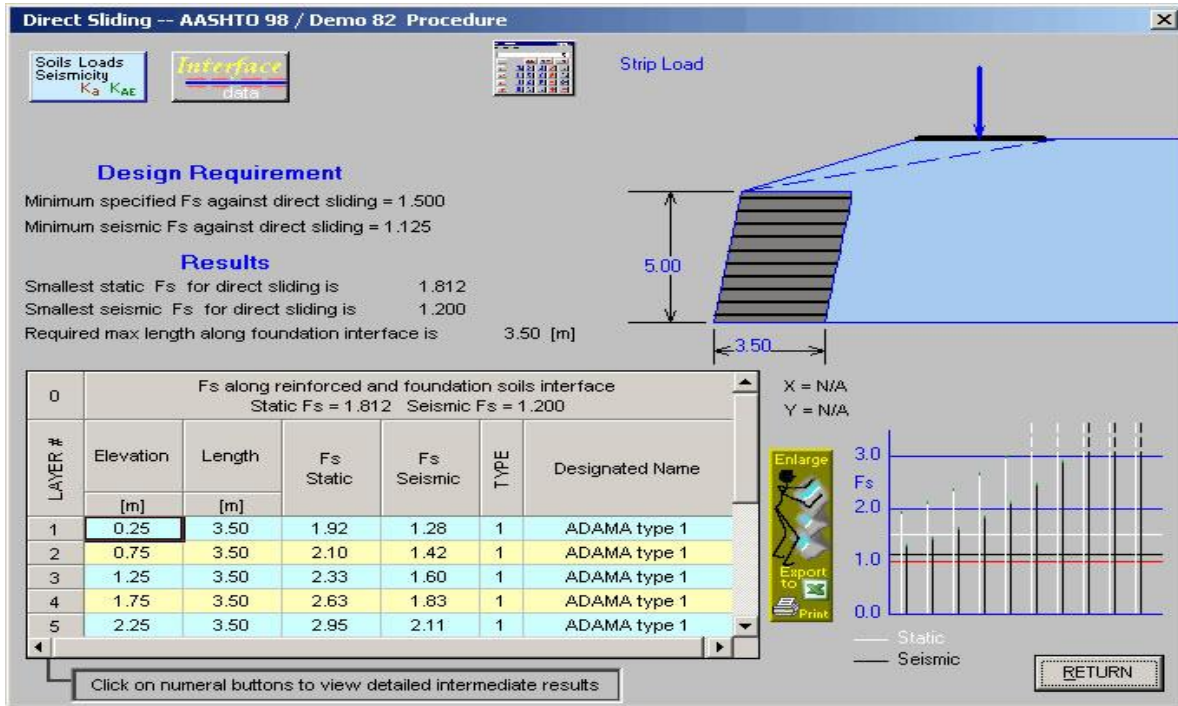


Fig. 3.1. Interfase gráfica del software MSEW 3.0  
 (Adama Engineering MSEW 3.0)

### 3.2.2 Descripción del TAI-VALDEZ 3.0

El programa computador TAI-VALDEZ en su versión 3.0 es un programa que a diferencia de otros que utilizan, dentro de sus cálculos internos, el método de tensiones admisibles, este software internamente pondera las cargas permanentes y accidentales.

## 3.3 DISEÑO DE MUROS DE SUELO REFORZADO

### 3.3.1 Diseño de Muros de Suelo Reforzado con elementos Extensibles

#### 3.3.1.1 Geometría del Muro

El desarrollo de proyecto consistía en el diseño de 3 perfiles de muro de suelo reforzado con elementos extensibles, geomallas. A continuación se describen las características geométricas de dichos perfiles:

- **Perfil AB:** Muro que van desde 2.64m hasta 11.16m de altura con una longitud aproximada de 38.70m.
- **Perfil BC:** Muro de 10.16m de altura con una longitud aproximada de 64.85m.
- **Perfil CD:** Muro que van desde 7.52m hasta 11.16m de altura con una longitud aproximada de 22.50m.

La fachada del muro de suelo reforzado será vertical y estará conformada por bloques de concreto armado de 280Kg/cm<sup>2</sup> de resistencia a la compresión. No habrá talud en la parte superior del muro de suelo reforzado.

### 3.3.1.2 Geomallas estructurales

**Tabla 3.2** Factores de reducción empleados para calcular la resistencia a la tensión de diseño de las geomallas de HDPE

Tipo de Geomalla	Esfuerzo Último KN/m	FRDI	FRD	FRC	Esfuerzo LTDS, KN/m
Geomalla Uniaxial polietileno Tipo 2	70	1.1	1.1	2.6	22.25
Geomalla Uniaxial polietileno Tipo 3	114	1.1	1.1	2.6	36.24
Geomalla Uniaxial polietileno Tipo 4	144	1.1	1.1	2.6	45.77

Los factores de reducción empleados para el cálculo de la resistencia a la tensión a largo plazo (LTDS) de las geomallas están basados en las recomendaciones de AASHTO a través del manual FHWA – NHI – 00 – 043 (Pág. 71 a 79). El cálculo de la tensión a largo plazo (LTDS) se realizó de acuerdo a GRI-GG4(a) y FHWA (a través de FHWA – NHI – 00 – 043) =  $T_{ult} / (FS_{daño\ construcción} \times FR_{durabilidad} \times FR_{creep} \times FS_{insertidumbres})$ , para  $FS_{insertidumbres}$  se usó 1.0. Estos factores de reducción son considerando un periodo de diseño de 120 años.

### 3.3.1.3 Diseño Hidrostático

El nivel freático se asumió lo suficientemente profundo como para no afectar la estabilidad de la estructura.

### 3.3.1.4 Resultados de los distintos diseños

Los reportes de diseño para cada una de las alturas que se serán presentados en el ANEXO A. En dichos reportes se muestra los distintos factores de seguridad alcanzados, bajo las condiciones del terreno y de servicio, para cada uno de los análisis realizados ya sea dentro de la estabilidad externa como de la interna.

### 3.3.2 Diseño de Muros de Suelo reforzado con elementos inextensibles

#### 3.3.2.1 Geometría del Muro

El desarrollo de proyecto consistía en el diseño de 3 perfiles de muro de suelo reforzado con elementos inextensibles, flejes metálicos. A continuación se describen las características geométricas de dichos perfiles:

- **Perfil AB:** Muro que van desde 3.00m hasta 12.00m de altura con una longitud aproximada de 28.90m.
- **Perfil BC:** Muro de 10.50m de altura con una longitud aproximada de 64.85m.
- **Perfil CD:** Muro que van desde 3.00m hasta 12.00m de altura con una longitud aproximada de 22.50m.

La fachada del muro de suelo reforzado será vertical y estará conformado por paneles de concreto armado de  $350\text{Kg/cm}^2$  de resistencia a la compresión. No habrá talud en la parte superior del muro de suelo reforzado.

#### 3.3.2.2 Flejes metálicos

Tabla 3.3. Características de los flejes metálicos

Flejes Metálicos	
Tipo	HA50x4mm
Grado (Mpa)	520
Ancho (mm)	50
Espesor eo (mm)	4
Espesor de sacrificio es (mm)	0.5
Tadm (KN)	60.67
Tadm Conexión (KN)	45.26

### 3.3.2.3 *Diseño Hidrostático*

El nivel freático se asumió lo suficientemente profundo como para no afectar la estabilidad de la estructura.

### 3.3.2.4 **Resultados para los distintos diseños**

Los reportes de diseño para cada una de las alturas serán presentados en el ANEXO A. En dichos reportes se muestra los distintos factores de seguridad alcanzados, bajo las condiciones del terreno y de servicio, para cada uno de los análisis realizados ya sea dentro de la estabilidad externa como de la interna.





## 4.1. COMPARACIÓN TÉCNICA

Con los resultados obtenidos por medio de los reportes de diseño del proyecto evaluado, los cuales se muestran en el ANEXO A, se procederá a establecer una comparación técnica entre los dos sistemas analizados, muros de suelo reforzado con elementos extensibles (GEOMALLAS) y muros de suelo reforzado con elementos inextensibles (FLEJES DE ACERO). Para establecer la comparación técnica se evaluará los distintos desempeños dentro de la estabilidad externa y la estabilidad interna.

De acuerdo a lo descrito en el CAPÍTULO III, cada uno de los dos sistemas de suelo reforzado tiene diferentes alturas de diseño. Es por este motivo que tanto para la comparación técnica como económica se consideró solo cinco alturas, las cuales son iguales, o muy similares, en ambos sistemas de muros de suelo reforzado.

A continuación se describirá el comportamiento de los muros de suelo reforzado con elementos extensibles y de los muros de suelo reforzado con elementos inextensibles para un análisis de diseño pseudoestático. El motivo por el cual se estudiará los resultados del comportamiento de ambos sistemas de muro de suelo reforzado para un análisis pseudoestático, se debe a que este análisis es el que gobierna los diseños, es decir, con los resultados de este análisis se garantiza un correcto desempeño de cualquiera de los dos sistemas para el caso estático, algo que no sucede a la inversa.

### 4.1.1. *Análisis Pseudoestático*

#### 4.1.1.1 *Estabilidad Externa*

Los distintos factores de seguridad que aparecen en las tablas que se muestran a continuación, para cada tipo de sistema de muro de suelo reforzado, no tienen fines comparativos sino más bien se presentan con un fin netamente informativo. Lo que realmente se intenta mostrar es que dichos factores de seguridad cumplen con los mínimos establecidos por las distintas normas.

- **Factor de Seguridad a la falla por deslizamiento en la base**

**Tabla 4.1.** F.S por Norma y F.S del diseño al deslizamiento para cada altura de diseño.

Altura (m)	Muros de Suelo Reforzado con elementos Extensibles		Muros de Suelo Reforzado con elementos Inextensibles	
	Factores de Seguridad			
	Norma	Diseño	Norma	Diseño
H=4.5	1.5	1.585	1.2	1.49
H=7.5	1.5	1.626	1.2	1.56
H=8.25	1.5	1.528	1.2	1.58
H=10.50	1.5	1.61	1.2	1.62
H=11.25	1.5	1.50	1.2	1.63

- **Factor de Seguridad a la falla por excentricidad en la base (Volteo)**

**Tabla 4.2.** F.S por Norma y F.S del diseño al volteo para cada altura de diseño.

Altura (m)	Muros de Suelo Reforzado con elementos Extensibles		Muros de Suelo Reforzado con elementos Inextensibles	
	Factores de Seguridad			
	Norma	Diseño	Norma	Diseño
H=4.5	1.5	2.75	1.5	2.31
H=7.5	1.5	2.59	1.5	2.14
H=8.25	1.5	2.26	1.5	2.15
H=10.50	1.5	2.43	1.5	2.16
H=11.25	1.5	2.02	1.5	2.15

La diferencia entre los factores de seguridad para cada uno de los análisis de estabilidad de los dos sistemas de muros de suelo reforzado se debe a distintas variables. Una de las principales es que cada uno de los software para el diseño de muros de suelo reforzado considera metodologías de diseño distintas, es decir mientras que los muros de suelo reforzado con elementos extensibles emplean la metodología de diseño por “Tensiones Admisibles” (WS), los muros de suelo reforzado con elementos inextensibles emplean la metodología de diseño por “Estados Límites” (LS), lo cual finalmente trae como consecuencia que estos valores no coincidan. Otra variable, pero no menos

importante, fue que para cada altura de diseño, no necesariamente se tenía la misma configuración geométrica del muro de suelo reforzado, ya que en cada una de ellas se puede apreciar, de acuerdo a los reportes de diseño, los cuales se muestran en el ANEXO A, que las longitudes de empotramiento, largo de material de suelo reforzado, y el largo de la sección del muro, ancho del material de suelo reforzado, no son los mismos, por lo que las fuerzas verticales que actúan en la base del muro de suelo reforzado tampoco serán las mismas. Esto tiene como consecuencia que los factores de seguridad para cada análisis de estabilidad difieran. A continuación se muestra la justificación de lo que se acaba de mencionar.

**Tabla 4.3.** Configuración Geométrica de los muros de suelo reforzado con elementos extensibles y reforzados con elementos inextensibles

Altura (m)	Muros de Suelo Reforzado con elementos Extensibles			Muros de Suelo Reforzado con elementos Inextensibles		
	Longitud de Empotramiento	Longitud de la Sección	Volumen (m3)	Longitud de Empotramiento	Longitud de la Sección	Volumen (m3)
H=4.5	5.50	5.48	39.23	4.50	1.50	30.38
H=7.5	8.50	7.42	103.66	7.50	1.50	84.38
H=8.25	8.50	5.49	107.15	8.00	1.50	99.00
H=10.50	10.00	3.66	169.05	9.50	1.50	149.63
H=11.25	10.00	12.8	163.01	9.50	1.50	160.31

Se puede apreciar claramente que para una misma altura de diseño los volúmenes de suelo reforzado difieren entre uno y otro sistema de muro de suelo reforzado. Esto se debe a que las longitudes de empotramiento y las longitudes de las secciones no son las mismas. Como consecuencia de ello es que las fuerzas verticales que actúan directamente en la base no serán las mismas para cada sistema de muro de suelo reforzado, en tal sentido los F.S al deslizamiento y los F.S al volteo variarán de un sistema de muro de suelo reforzado respecto al otro.

Sin embargo, tal y como se mencionó en el CAPÍTULO II, el análisis de la estabilidad externa para muros de suelo reforzado, ya sea con refuerzos extensibles o refuerzos inextensibles, se realiza tal y como se hace con los muros de gravedad. Esto quiere decir que el análisis de la estabilidad externa no depende del tipo de paramento externo o el tipo de refuerzo que se emplee en el muro de suelo reforzado, las únicas

variables que afectan dicha estabilidad son los diferentes tipos de suelo, es decir, suelo de fundación, suelo retenido y suelo reforzado, y la geometría del muro. De acuerdo a esto que se acaba de mencionar y garantizando la misma configuración geométrica en ambos sistemas de suelo reforzado para una determinada altura, los factores de seguridad para cada uno de los análisis de la estabilidad externa deberían ser los mismos.

#### 4.1.1.2 Estabilidad Interna

- **Factor de Seguridad a la Rotura de los elementos de refuerzo**

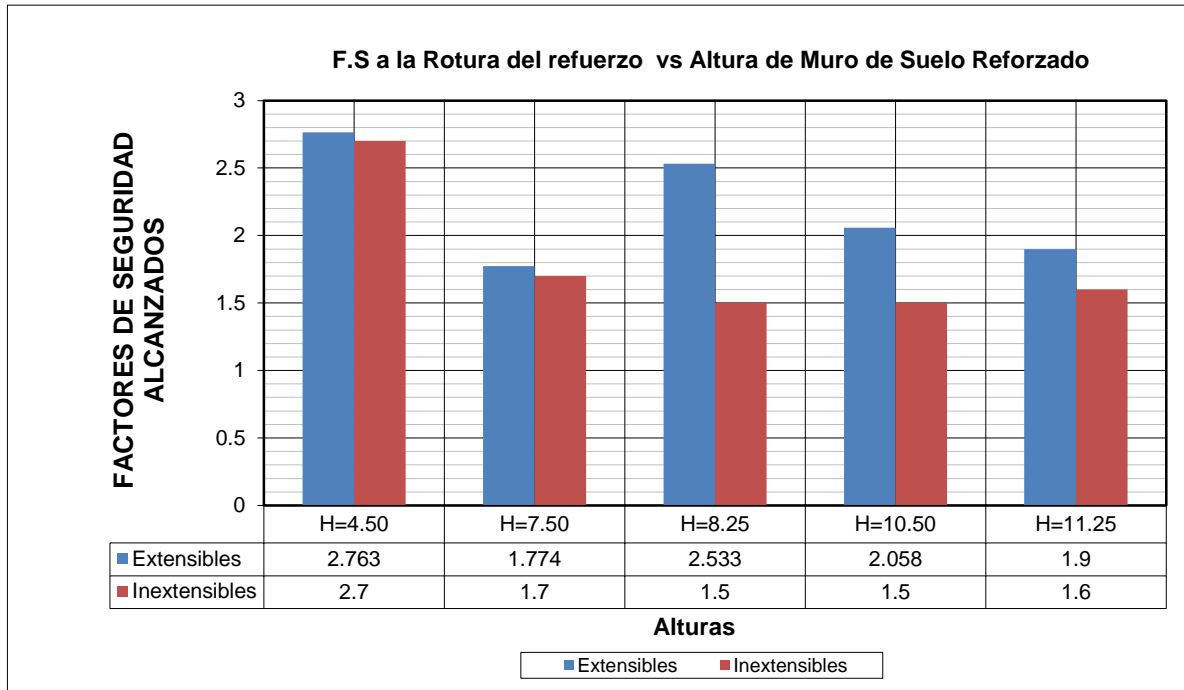
**Tabla 4.4.** F.S a la rotura de los elementos de refuerzo (Geomallas y Flejes metálicos) para cada altura de diseño

Altura (m)	Muros de Suelo Reforzado con elementos Extensibles				Muros de Suelo Reforzado con elementos Inextensibles			
	Factores de Seguridad		Longitud de Empotramiento	Z (m)↑	Factores de Seguridad		Longitud de Empotramiento	Z (m)↑
	Norma	Diseño			Norma	Diseño		
H=4.5	1.5	2.763	4.50	0.20	1.5	2.7	4.50	0.37
H=7.5	1.5	1.774	7.00	0.20	1.5	1.7	6.00	0.37
H=8.25	1.5	2.533	7.00	0.20	1.5	1.5	6.50	0.37
H=10.50	1.5	2.058	9.00	0.20	1.5	1.5	8.00	0.37
H=11.25	1.5	1.9	9.00	0.20	1.5	1.6	8.50	0.37

Los factores de seguridad que aparecen en ambas tablas, son los más críticos, es decir, aquellos valores más cercanos a los establecidos como los mínimos aceptables. Se puede apreciar claramente que estos valores corresponden al primer nivel o capa de refuerzo, considerado desde la parte inferior del muro.

En el siguiente gráfico se puede apreciar claramente los factores de seguridad a la Rotura de los elementos de refuerzo versus las distintas alturas de diseño obtenidos de los reportes de diseño para cada uno de los dos sistemas evaluados.

Gráfico 4.1. F.S a la rotura vs Alturas de Diseño



El principal motivo por el cual los factores de seguridad a la rotura de los refuerzos extensibles es mayor a los factores de seguridad de los elementos inextensibles para cada altura de diseño, se debe a que la separación vertical entre elementos de refuerzo es menor en los muros de suelo reforzado con elementos extensibles, es decir existe un mayor confinamiento, esto que sustentado a su vez debido a que los factores de seguridad al arrancamiento de los elementos de refuerzo extensibles es mayor que el de los elementos de refuerzo inextensible, lo cual impide que el elemento de refuerzo pueda ser fácilmente arrancado de su sitio.

## 4.2. COMPARACIÓN ECONÓMICA

Con los resultados obtenidos por medio de los reportes de diseño del proyecto evaluado, el cual fue descrito en el capítulo anterior, se procederá a establecer una comparación económica de los dos sistemas analizados, muros de suelo reforzado con elementos extensibles (GEOMALLAS) y muros de suelo reforzado con elementos inextensibles (FLEJES METÁLICOS). Para establecer la comparación económica se procedió a realizar el metrado de todos los componentes involucrados en la construcción del ambos sistemas, es decir, movimiento de tierras, elementos de fachada y elementos de refuerzo. Así mismo se realizó el análisis de precios unitarios de todas las partidas involucradas en la instalación de cada uno de los sistemas de muros de suelo reforzado.

De acuerdo a lo descrito en el capítulo III, para cada uno de los dos sistemas de suelo reforzado se tiene diferentes alturas de diseño. Es por este motivo que tanto para la comparación técnica como económica se consideró solo cinco alturas, las cuales son iguales, o muy similares, en ambos sistemas de muros de suelo reforzado.

Los metrados y los análisis de precios unitarios de cada uno de los dos sistemas que se está comparando se encuentran en el ANEXO B.

### 4.2.1. Criterios de Comparación Económica

#### 4.2.1.1. Costos por metro cuadrado de Muro de Suelo Reforzado

Para poder realizar una comparación económica bajo el criterio de costo por metro cuadrado de muro de suelo reforzado se tuvo en consideración los costos de los elementos o materiales necesarios para la construcción así como también los costos de instalación de cada uno de los sistemas de muros de suelo reforzado.

En las tablas que se muestran a continuación se presentan los costos por metro cuadrado para cada una de las alturas de diseño, descritas anteriormente, para cada uno de los dos sistemas de muros de suelo reforzado (con refuerzos extensibles y no extensibles).

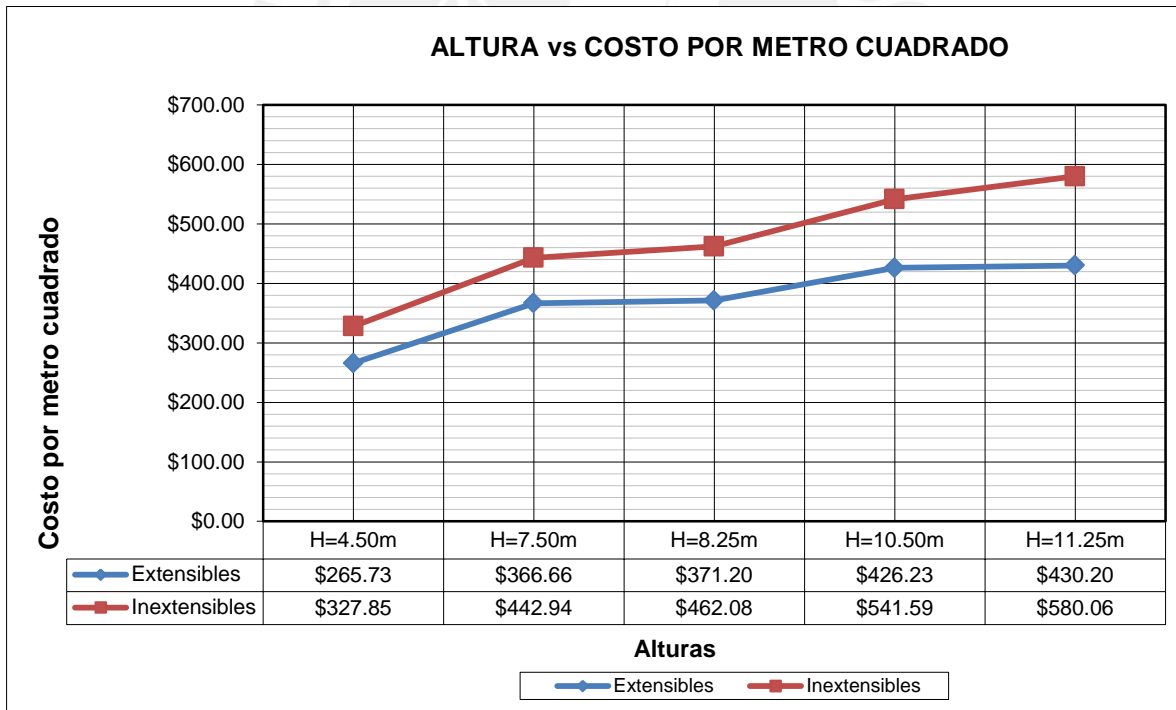


**Tabla 4.5.** Costo por metro cuadrado para muros de suelo reforzado con elementos extensibles (Geomallas) y elementos inextensibles (Flejes metálicas)

H (m)	Muro de Suelo reforzado con Geomallas	Muro de Suelo reforzado con Flejes Metálicos
	Costo/m2	Costo/m2
H=4.50m	\$265.73	\$327.85
H=7.50m	\$366.66	\$442.94
H=8.25m	\$371.20	\$462.08
H=10.50m	\$426.23	\$541.59
H=11.25m	\$430.20	\$580.06

A continuación se presenta un gráfico en el cual se muestran los costos por metro cuadrado versus las alturas de diseño de cada uno de los dos sistemas de muros de suelo reforzado.

**Gráfico 4.2.** Altura vs Costo por metro cuadrado para muros de suelo reforzado



#### 4.2.1.2. Costos por metro lineal de área de Muro de Suelo Reforzado

Para poder realizar una comparación económica bajo el criterio de costo por metro lineal de muro de suelo reforzado se tuvo en consideración los costos de los elementos o materiales necesarios para la construcción así como también los costos de instalación de cada uno de los sistemas de muros de suelo reforzado.

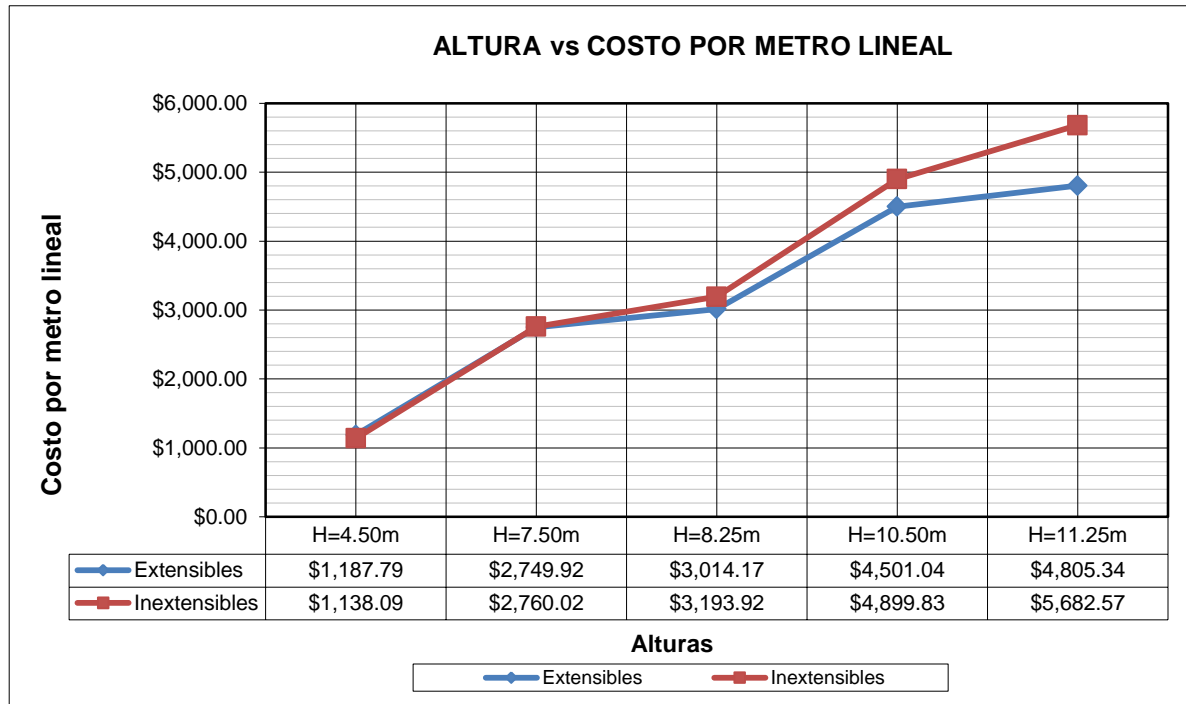
En las tablas que se muestran a continuación se presentan los costos por metro lineal para cada una de las alturas de diseño, descritas anteriormente, para cada uno de los dos sistemas de muros de suelo reforzado (con refuerzos extensibles y no extensibles).

**Tabla 4.6.** Costo por metro lineal para muros de suelo reforzado con elementos extensibles (Geomallas) y elementos inextensibles (Flejes metálicas)

H (m)	Muro de Suelo reforzado con Geomallas	Muro de Suelo reforzado con Flejes Metálicos
	Costo/m	Costo/m
H=4.50m	\$1,187.79	\$1,138.09
H=7.50m	\$2,749.92	\$2,760.02
H=8.25m	\$3,014.17	\$3,193.92
H=10.50m	\$4,501.04	\$4,899.83
H=11.25m	\$4,805.34	\$5,682.57

A continuación se presenta un gráfico en el cual se muestran los costos por metro lineal versus las alturas de diseño de cada uno de los dos sistemas de muros de suelo reforzado.

Gráfico 4.3. Altura vs Costo por metro lineal para muros de suelo reforzado



#### 4.2.2. Comparación económica entre ambos sistemas en porcentajes

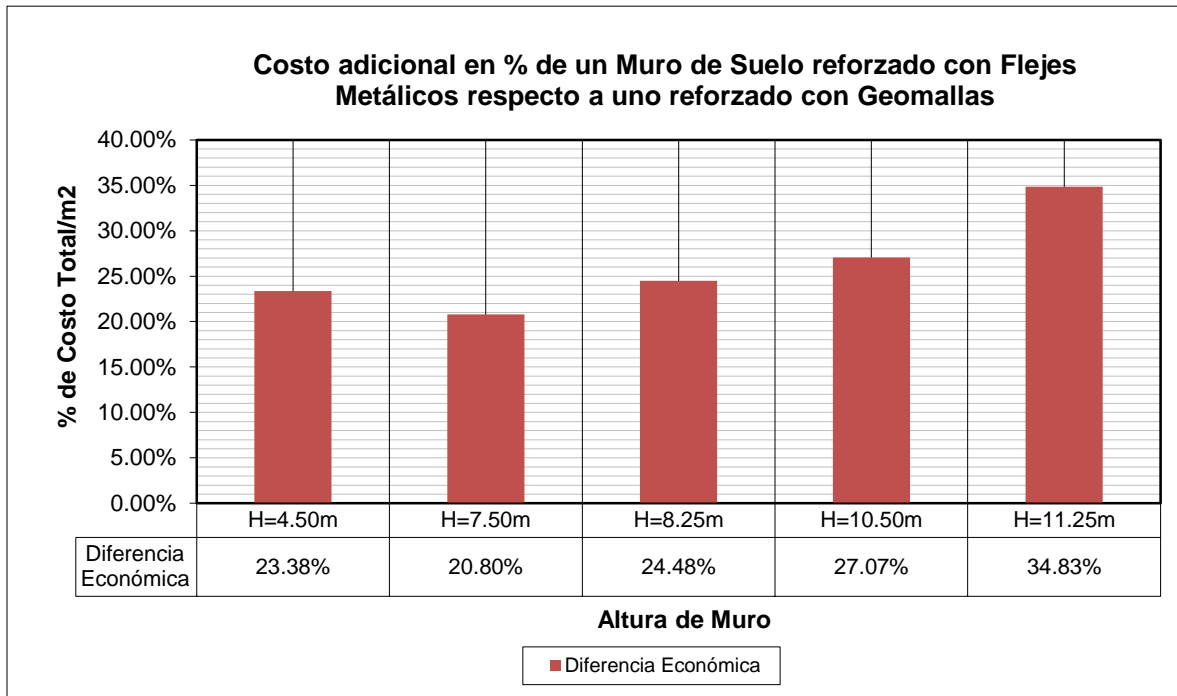
De acuerdo a los gráficos que se acaban de presentar, a continuación se establecerá la comparación económica en porcentajes de un muro de suelo reforzado con elementos inextensibles respecto a un muro de suelo reforzado con elementos extensibles.

Tabla 4.7. Comparación económica de un Muro de Suelo Reforzado con elementos extensibles respecto a uno reforzado con elementos inextensibles

Altura	Muro de Suelo reforzado con Geomallas	Muro de Suelo reforzado con Flejes metálicos	Δ (%)
H=4.50m	265.73	327.85	23.38%
H=7.50m	366.66	442.94	20.80%
H=8.25m	371.20	462.08	24.48%
H=10.50m	426.23	541.59	27.07%
H=11.25m	430.20	580.06	34.83%

Esto que se acaba de describir en la tabla anterior se presenta a continuación por medio de un gráfico.

**Gráfico 4.4.** Costo adicional de un Muro de Suelo Reforzado con elementos inextensibles respecto a uno reforzado con elementos extensibles



### 4.2.3. Incidencia en Costos de los materiales constituyentes

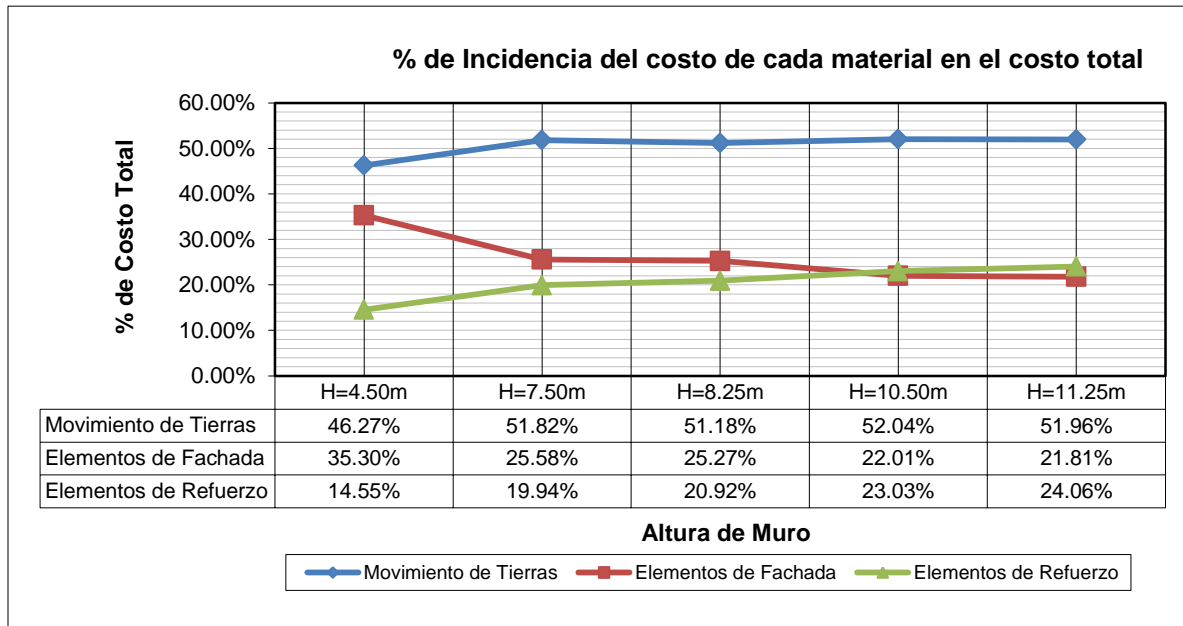
#### 4.2.3.1. Muro de Suelo Reforzado con elementos extensibles

**Tabla 4.8.** Porcentajes de incidencia de los materiales constituyentes

Altura	Movimiento de tierra	Elementos de Fachada	Elementos de Refuerzo
H=4.50m	46.27%	35.30%	14.55%
H=7.50m	51.82%	25.58%	19.94%
H=8.25m	51.18%	25.27%	20.92%
H=10.50m	52.04%	22.01%	23.03%
H=11.25m	51.96%	21.81%	24.06%

Esto que se acaba de describir en la tabla anterior se presenta a continuación por medio de un gráfico.

Gráfico 4.5. Porcentajes de incidencia de los materiales constituyentes



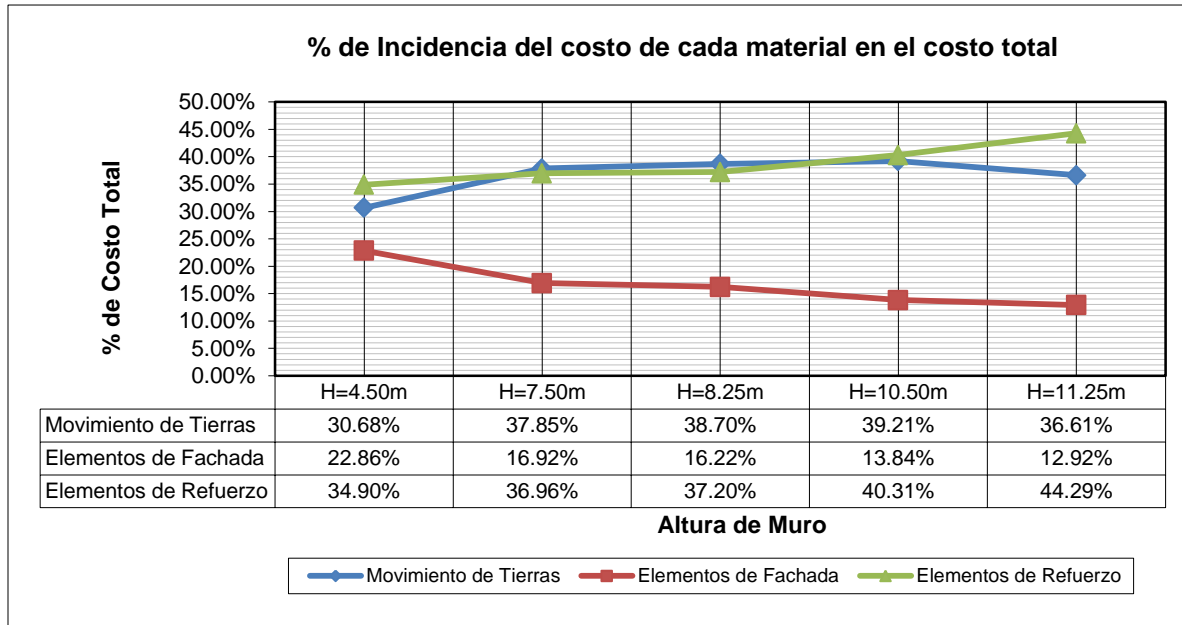
**4.2.3.2. Muro de Suelo Reforzado con elementos inextensibles**

Tabla 4.9. Porcentajes de incidencia de los materiales constituyentes

Altura	Movimiento de tierra	Elementos de Fachada	Elementos de Refuerzo
H=4.50m	30.68%	22.86%	34.90%
H=7.50m	37.85%	16.92%	36.96%
H=8.25m	38.70%	16.22%	37.20%
H=10.50m	39.21%	13.84%	40.31%
H=11.25m	36.61%	12.92%	44.29%

Esto que se acaba de describir en la tabla anterior se presenta a continuación por medio de un gráfico.

Gráfico 4.6. Porcentajes de incidencia de los materiales constituyentes





## 5.1. Conclusiones

De acuerdo a lo desarrollado en la comparación de muros de suelo reforzado con elementos extensibles y fachada de bloques de concreto con muros de suelo reforzado con elementos inextensibles y fachada de paneles de concreto y de acuerdo a los resultados obtenidos en los reportes de diseño (ANEXO A), podemos concluir lo siguiente:

- En el diseño de muros de suelo reforzado con elementos extensibles, se puede verificar que los elementos de refuerzo (Geomallas) están afectados por numerosos factores de reducción, los cuales reducen significativamente su resistencia a la tracción en un 72%, lo cual genera un mayor factor de seguridad para la estructura. Los factores de reducción de resistencia no son otra cosa más que factores de incertidumbre, es por ello que los refuerzos extensibles se encuentran más afectados por estos, ya que es muy difícil prever su comportamiento a largo plazo.
- Los factores de reducción de resistencia para los refuerzos extensibles se deben a distintas razones, tales como el creep, daños de instalación y la durabilidad. Siendo de estos tres el factor de reducción por creep el más influyente. En el caso de los refuerzos inextensibles el factor más importante en la reducción de la resistencia es la disminución del espesor del elemento de refuerzo, para lo cual se prevé un espesor de sacrificio. De acuerdo a esto que se acaba de mencionar podemos concluir que los diseños de muros de suelo reforzado con elementos extensibles son mucho más conservadores que los diseños de muros de suelo reforzado con elementos inextensibles.
- De acuerdo a los resultados de diseño de ambos sistemas, se puede observar que conforme se aumenta la altura del muro, aumenta la longitud del refuerzo, de acuerdo a esto podemos concluir que la altura del muro de suelo reforzado ya sea con elementos extensibles o con elementos inextensibles está directamente relacionada con el espacio disponible para la colocación de los elementos de refuerzo.

- En base a los resultados obtenidos en los reportes de diseño para cada uno de los sistemas de muro de suelo reforzado, se puede llegar a la conclusión que los muros de suelo reforzado con elementos inextensibles son en un 23 a 34 por ciento más costosos que los muros de suelo reforzado con elementos extensibles. Cabe destacar que esta tendencia solo pudo ser verificada hasta una de diseño de 11.25m, la cual corresponde a la máxima altura diseñada para cada uno de los dos sistemas de muro de suelo reforzado
- La envergadura de los muros de suelo reforzado ya sea con elementos extensibles o inextensibles tiene influencia en los costos de los materiales. En el caso de los muros de suelo reforzado con elementos extensibles y fachada de bloques de concreto, para cualquier altura el movimiento de tierras, tiene mayor influencia en el costo total del muro (de 46 a 51%) para el rango de alturas diseñadas ( $H=4.5m$  a  $H=11.25m$ ).
- En el caso de los muros de suelo reforzado con elementos inextensibles y fachada de paneles de concreto, para cualquier altura, los elementos de refuerzo y el movimiento de tierra son los materiales que más influencia tienen en el costo total del muro de suelo reforzado. La tendencia va aumentando a favor de los elementos de refuerzo a partir de alturas de diseño superiores a los 10.50m.
- En ambos sistemas de muros de suelo reforzado, ya sea con elementos extensibles o inextensibles, conforme se incrementa la altura de diseño de la estructura de suelo reforzado el costo de los elementos de fachada disminuye mientras que el costo de los elementos de refuerzo aumenta.
- El costo del movimiento de tierras en ambos sistemas de muro de suelo reforzado aumenta conforme se incrementa la altura de diseño. Esto queda sustentado debido a que conforme se incrementa la altura de diseño, las longitudes de los elementos de refuerzo también se incrementan, motivo por el cual la geometría del muro de suelo reforzado será de mayores dimensiones por lo que se tendrá un mayor volumen, esto conlleva a que el movimiento de tierras sea mucho mayor.

## BIBLIOGRAFÍA

- **BOWLES, J.E., 1982.** Foundation Analysis and Design, Third Edition: Mc Graw – Hill.
- **U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. 2001.** Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines. Publication No FHWA–NHI–00–043. National Highway Institute - Office of Bridge Technology. Course NHI No. 132042.
- **ELIAS. V. 1990.** “Durability/Corrosion of Soils Reinforced Structures”. FHWA/R-89/186. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Washington DC, pág. 173.
- **GRI-GG4.1990.** Standard Test Method for Determination of the Long-Term Design Strength of Geogrids, Geosynthetic Research Institute, Drexel University, Philadelphia, PA.
- **GRI-GG5. 1990.** Test Method for Geogrid Pullout, Geosynthetic Research Institute, Drexel University, Philadelphia, PA.
- **GRUPO TÉCNICO TIERRA REFORZADA INEXTENSIBLE. 2002.** Recomendaciones para el diseño ejecución y control de suelo mecánicamente estabilizado con armadura inextensible. Santiago: Corporación de desarrollo Tecnológico, Cámara Chilena de la Construcción.
- **INSTITUTO DE LA CONSTRUCCION Y GERENCIA. 2002.** Norma E030 Diseño Sismo Resistente. IN: Reglamento Nacional de Estructuras. Lima, Perú. Pág. 25 – 42.
- **JONES, J.F.P. 1996.** Earth Reinforcement & Soil Structures. Nueva Edición. Editorial Thomas Telford. New York, USA. 379 pp.

- **KOERNER, R. M. 1989.** Designing with Geosynthetics, Fourth edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. p. 306.
- **KOERNER, R. M. s/a.** Designing with Geosynthetics, Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- **MOPU. 1989.** Manual para el proyecto y ejecución de estructuras de suelo reforzada: Tecnología Carreteras MOPU.
- **STANDARD SPECIFICATIONS FOR HIGHWAY BRIDGES. 1991.** Fourteenth Edition with Interim Specifications - Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- **SUAREZ, J. 2004.** Diseño de Muros de Suelo Reforzado con Geosintéticos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- **TENSAR EARTH TECHNOLOGIES, INC. 2003.** MESA Sistema de Muros de Retención. BRO – ARCH – SP – 3.03. Atlanta, USA. 12 pp.
- **U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. 2001.** Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines. Publication No FHWA–NHI–00–043. National Highway Institute - Office of Bridge Technology. Course NHI No. 132042.
- **VERA, L.A. 2004.** Muros de retención de suelos con sistemas de Tierra Armada. Valdivia: Universidad Austral de Chile, Facultad Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Construcción Civil.