



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Geotécnica

ANÁLISIS DE SUELO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO PARA CARGAS DE PUENTES

Inga. Marta Monica Figueroa Alvarez

Asesorado por el MSc. Ing. Víctor Manuel López Juárez

Guatemala, marzo de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DE SUELO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO PARA CARGAS DE PUENTES

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

INGA. MARTA MONICA FIGUEROA ALVAREZ

ASESORADO POR EL MSc. ING. VÍCTOR MANUEL LÓPEZ JUÁREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA

GUATEMALA, MARZO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Mtra. Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Mtro. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Mtra. Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. José Ramón López López
SECRETARIO	Mtro. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DE SUELO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO PARA CARGAS DE PUENTES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 28 de marzo de 2014.

Inga. Marta Monica Figueroa Alvarez



DTG. 113.2021.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE SUELO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO PARA CARGAS DE PUENTES**, presentado por la Ingeniera: **Marta Monica Figueroa Alvarez**, estudiante de la **Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, marzo de 2021.

AACE/asga




Guatemala, Marzo 2021

EEPF-0421-2021

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **"ANÁLISIS DE SUELO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO PARA CARGAS DE PUENTES"** presentado por la Ingeniera **Marta Monica Figueroa Alvarez** identifica con Carné **200230551** correspondiente al programa de **Maestría en Ingeniería en Geotécnica** apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director





Guatemala, Marzo 2021

EEPFI-0421-2021

Como Coordinador de la **Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"ANÁLISIS DE SUELO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO PARA CARGAS DE PUENTES"** presentado por el Ingeniera Marta Monica Figueroa Alvarez quien se identifica con Carné **200230551**.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

MSc. Armando Fuentes Roca
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, Marzo 2021

EEPI-0423-2021

En mi calidad como Asesor de la Ingeniera Marta Monica Figueroa Alvarez quien se identifica con número de carné **200230551** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"ANÁLISIS DE SUELO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO PARA CARGAS DE PUENTES"** quien se encuentra en el programa de **Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica** en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



MSc. Víctor Manuel López Juárez
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios y a la Virgen María

Quienes me han demostrado en cada momento que uno de sus propósitos para mí, es el valorar los buenos momentos para sonreír, agradecer sus bendiciones y al darme las fuerzas para poder alcanzar el éxito al culminar esta meta.

Mis padres

Oty Alvarez y Carlos Figueroa (q. d. e. p.) por ser mi motivación, mi luz, ejemplo de lucha y perseverancia en la vida.

Mis hermanos

Rosario, Luis y Edwin Figueroa Alvarez, quienes con su apoyo y tiempo siempre están fortaleciendo mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser una importante influencia en mi carrera.

**Escuela de Postgrados
de la Facultad de
Ingeniería**

Por su apoyo en todo momento del desarrollo de este trabajo.

**Maestros Ingenieros
Víctor Manuel López
Juárez y César Augusto
Castillo Morales**

Por ser una pieza clave en este proceso, brindarme su valioso tiempo, compartir sus conocimientos, experiencias y por guiarme para la elaboración del presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
HIPÓTESIS.....	XXIII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. MURO SUELO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO	1
1.1. Componentes de MSME.....	1
1.1.1. Suelos.....	1
1.1.2. Elementos de refuerzos	3
1.1.3. Fachada.....	4
1.1.4. Conectores.....	7
1.1.5. Losa de nivelación	9
1.1.6. Drenaje	10
1.1.7. Esquema general de MSME	12
1.2. Aplicaciones.....	12
1.2.1. Estribo para puente.....	13
1.2.2. Muros de contención	14
1.2.3. Otras aplicaciones.....	15

2.	MUROS DE SUELO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO CON REFUERZO EXTENSIBLE	17
2.1.	Geomallas.....	18
2.1.1.	Geomallas según su fabricación.....	19
2.1.2.	Geomallas según su aplicación en proyectos de MSME.....	22
3.	METODOLOGÍA DE DISEÑO EN MUROS DE SUELO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO	27
3.1.	Metodología de diseño.....	28
3.1.1.	Estabilidad global.....	33
3.1.2.	Estabilidad externa	34
3.1.3.	Estabilidad interna	42
4.	DISEÑO DE MSME PARA ESTRIBO VERDADERO DE PUENTE Y ESTRIBO DE CONCRETO REFORZADO PARA PUENTE	57
4.1.	MSME para estribo verdadero de puente.....	57
4.1.1.	Estabilidad externa	57
4.1.2.	Estabilidad global.....	77
4.1.3.	Estabilidad interna	83
4.2.	Estribo de concreto reforzado para puente.....	90
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS ENTRE UN MSME PARA ESTRIBO VERDADERO DE PUENTE Y ESTRIBO DE CONCRETO REFORZADO PARA PUENTE	113
5.1.	Diseño de estribo verdadero para puente utilizando un MSME, mediante normativa de FHWA	113
5.2.	Análisis de ventajas y desventajas del uso de MSME, como estribo verdadero de puentes	114

5.2.1.	Ventajas en MSME	114
5.2.2.	Desventajas en MSME.....	115
5.3.	Comparación del uso del sistema MSME para estribo de puente y el estribo concreto reforzado para puente	115
CONCLUSIONES		119
RECOMENDACIONES		121
REFERENCIAS		122

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Refuerzos extensibles	3
2.	Fachada de prefabricado de concreto.....	4
3.	Fachada de bloque de concreto - segmentado	5
4.	Fachada de geosintético	5
5.	Fachada de paneles de concreto de altura completa.....	6
6.	Fachada de malla metálica de doble torsión forrada en PVC	6
7.	Conector de polímero de alta densidad.....	7
8.	Conexión “ <i>Interlocking</i> ”	8
9.	Conexión mecánica.....	9
10.	Detalle común de losa de nivelación.....	10
11.	Detalle de drenaje de MSME	11
12.	Sección transversal de MSME	12
13.	Estribo de puente I-25 Castle Rock, Colorado	13
14.	Muro de contención St. Anthony's Hospital - Denver, Colorado.....	14
15.	Geomalla extruida	20
16.	Geomalla tejida	21
17.	Geomalla soldada	22
18.	Geomalla uniaxial.....	23
19.	Falla Estabilidad Global.....	34
20.	Volcamiento	35
21.	Deslizamiento.....	36
22.	Capacidad portante	38
23.	Falla por rotura del refuerzo	43

24.	Variación de la relación de tensiones con la profundidad de un MSME	45
25.	Distancia mínima de la viga cabezal para diseño en la corona del muro.....	46
26.	Mapa de zonificación sísmica de Guatemala.....	49
27.	Falla por estabilidad interna por extracción del refuerzo.....	51
28.	Sección transversal MSME como estribo verdadero de puente	59
29.	Sección transversal para verificación como muro de gravedad	77
30.	Sección transversal para verificación de la estabilidad global	81
31.	Sección transversal para cálculo de los asentamientos.....	83
32.	Sección transversal para estabilidad interna	89
33.	Propuesta de diseño MSME para estribo verdadero de puente	90
34.	Dimensiones sobre el estribo.....	92
35.	Propuesta de diseño de estribo de concreto reforzado para puente	111
36.	Esquema de comparación de espacio disponible para ambos sistemas.....	117

TABLAS

I.	Límites de gradación por AASHTO T-27	2
II.	Resistencia última versus deformación en geomallas	19
III.	Factores de reducción para geomallas en aplicaciones de refuerzo ..	24
IV.	Factores de seguridad mínimos para análisis estático	30
V.	Factores de seguridad mínimos para análisis sísmico	31
VI.	Factor de reducción por instalación	32
VII.	Factor de reducción por durabilidad	32
VIII.	Factor de reducción por creep	33
IX.	Factores de capacidad portante	40
X.	Coeficiente de interacción suelo-Geomalla.....	53

XI.	Suelo: ESTRATO 1 (Descripción: Arena limosa).....	58
XII.	Suelo: PIEDRA (Descripción: piedra para gavión)	58
XIII.	Suelo: RELLENO (Descripción: limo arenoso)	59
XIV.	Camada: P1 Descripción del suelo: perfil 1 suelo: ESTRATO 1 .	60
XV.	Camada: P2 Descripción del suelo: perfil 2 suelo: RELLENO.....	60
XVI.	Bloque: TM1	61
XVII.	Bloque: TM2	62
XVIII.	Bloque: TM3	63
XIX.	Bloque: TM4	64
XX.	Bloque: TM5	65
XXI.	Bloque: TM6	66
XXII.	Bloque: TM7	67
XXIII.	Bloque: TM8	68
XXIV.	Bloque: TM9	69
XXV.	Bloque: TM10	70
XXVI.	Bloque: TM11	71
XXVII.	Sobrecargas	72
XXVIII.	Propiedades de Maccaferri – Gaviones (H= 1.00 – Ancho P- 5.00)	73
XXIX.	Propiedades de Maccaferri - MacGrid WG - WG 90.....	74
XXX.	Propiedades de Maccaferri - Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años	75
XXXI.	Resultados del Análisis como muro de gravedad.....	76
XXXII.	Resultados del Análisis de Estabilidad Global.....	78
XXXIII.	Límites de búsqueda para las superficies de ruptura	78
XXXIV.	Bloque: TM1 Gaviones	78
XXXV.	Bloque: TM2 Terramesh System Polimac	79
XXXVI.	Bloque: TM2 MacGrid WG- WG 100	79
XXXVII.	Bloque: TM3 Terramesh System Polimac	79

XXXVIII.	Bloque: TM3 MacGrid WG- WG 100.....	80
XXXIX.	Bloque: TM4 MacGrid WG- WG 100.....	80
XL.	Bloque: TM5 MacGrid WG- WG 100.....	80
XLI.	Bloque: TM6 MacGrid WG- WG 100.....	81
XLII.	Coordenadas de la superficie poligonal que define el suelo contenido atrás de la estructura de suelo reforzado	82
XLIII.	Resultados del análisis de Estabilidad Global.....	84
XLIV.	Límites de búsqueda para las superficies de ruptura Bloque TM3.....	84
XLV.	Bloque: TM4 Terramesh System Polimac.....	84
XLVI.	Bloque: TM5 Terramesh System Polimac.....	85
XLVII.	Bloque: TM6 Terramesh System Polimac.....	85
XLVIII.	Bloque: TM6 MacGrid WG- WG 100.....	85
XLIX.	Bloque: TM7 Terramesh System Polimac.....	86
L.	Bloque: TM7 MacGrid WG- WG 100.....	86
LI.	Bloque: TM8 Terramesh System Polimac.....	86
LII.	Bloque: TM8 MacGrid WG- WG 100.....	87
LIII.	Bloque: TM9 Terramesh System Polimac.....	87
LIV.	Bloque: TM9 MacGrid WG- WG 100.....	87
LV.	Bloque: TM10 Terramesh System Polimac.....	88
LVI.	Bloque: TM10 MacGrid WG- WG 100.....	88
LVII.	Bloque: TM11 Terramesh System Polimac.....	88
LVIII.	Bloque: TM11 MacGrid WG- WG 100.....	89
LIX.	Datos del estribo de concreto reforzado	91
LX.	Peso de muro por metro de largo.....	93
LXI.	Centro de carga del peso del cuerpo del muro	93
LXII.	Cálculo del peso de la zapata y de los rellenos en un metro de longitud	94
LXIII.	Condiciones de carga	94

LXIV.	Carga muerta.....	94
LXV.	Carga viva	95
LXVI.	Cálculo del empuje activo, según la teoría de Rankine	95
LXVII.	Cálculo del empuje pasivo.....	96
LXVIII.	Capacidad de carga	98
LXIX.	Condición de carga muerta + empuje.....	98
LXX.	Condición de carga muerta + empuje + carga viva	100
LXXI.	Condición de carga muerta + empuje + sismo	101
LXXII.	Condición de 1.3 carga muerta + 1.3 empuje.....	103
LXXIII.	Condición de 1.3 carga muerta + 1.3 empuje + 1.7 carga viva .	104
LXXIV.	Condición de 1.3 carga muerta + 1.3 empuje + 1.3 sismo	105
LXXV.	Condición de 1.3 carga muerta + 1.3 empuje + 1.3 sismo	108
LXXVI.	Condición a la mitad de la altura	110
LXXVII.	Análisis de FS.....	116

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
@	A cada
H	Altura
φ	Ángulo de fricción del suelo
A	Área en cm ²
Vs	Capacidad soporte del suelo
cm	Centímetro
L	Claro o luz considerada a rostro de los elementos
C	Cohesión aparente del suelo
Cu	Cohesión del suelo
ω	Contenido de humedad
Δ	Delta
\emptyset	Diámetro
σ	Esfuerzo
FS	Factor de seguridad
°C	Grados Celsius
g	Gramo
IL	Índice de liquidez
IP	Índice plástico
kg	Kilogramo
kg/m ²	Kilogramos sobre metro cuadrado
kg/m ³	Kilogramos sobre metro cúbico
km	Kilómetro (s)
lb	Libras

lb/pie²	Libras sobre pie cuadrado
PVC	Material fabricado a base de cloruro de polivinilo
Max	Máximo
Min	Mínimo
m	Metro (s)
m²	Metros cuadrados
S	Pendiente
S%	Pendiente en porcentaje
β	Pendiente del talud
T	Período de vibración elástico fundamental, en la dirección en consideración
γ	Peso específico del suelo
%	Por ciento
plg	Pulgada
U	Resistencia requerida para resistir las cargas mayoradas o momentos y fuerzas internas
SC	Sobre carga
Ton	Tonelada métrica
Ton/m²	Tonelada métrica sobre metro cuadrado

GLOSARIO

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation</i> (Sociedad Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes).
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales).
Cargas	Fuerzas y otras acciones resultantes del peso de los materiales de construcción, los ocupantes y sus pertenencias, efectos ambientales, movimiento diferenciales y restricciones a la deformación.
Cimentación	Elemento estructural que distribuye las cargas provenientes de la superestructura al suelo.
Carga de diseño	Carga última que se utiliza en el diseño de los elementos estructurales de una edificación.
Concreto reforzado	Material de construcción, obtenido de una mezcla homogénea proporcionada de arena, cemento, grava y agua, combinado con acero.
Diseño	Descripción de la planificación sobre algún proyecto.

Estribo	Estructura sobre la cual se apoya la superestructura en un puente.
Estribo verdadero	Estructura de suelo mecánicamente reforzado sobre la cual se va a cargar la viga cabezal.
Esfuerzo	Es la fuerza aplicada por unidad de área, que soporta el material.
Especificaciones	Son las normas general y técnica de construcción contenidas en un proyecto, disposiciones especiales o cualquier otro documento que se emita antes o durante la ejecución de un proyecto.
Estructuras	Son construcciones artificiales, en las cuales todos sus elementos están en equilibrio y reposo, los unos con relación a los otros.
Factor de carga última	Factor que determina las cargas de servicio.
Factor de reducción	Coeficiente menor que la unidad empleado para reducir la resistencia nominal y convertirla en resistencia de diseño.
<i>FHWA</i>	<i>Federal Highway Administration</i> (Administración Federal de Carreteras).
Falla	Es una discontinuidad que se forma en las rocas someras de la tierra, por fracturas, cuando

concentraciones de fuerzas tectónicas exceden la resistencia de las rocas. La zona de ruptura tiene una superficie más o menos bien definida, denominada plano de falla y su formación va acompañada de deslizamiento tangencial (paralelo), de las rocas a este plano.

Fuerza de sismo	Carga que es inducida por un sismo y que provoca esfuerzos en la subestructura.
Flexión	Encorvamiento transitorio que experimenta un elemento por una fuerza que lo deforma elásticamente.
GRS	<i>Geosynthetic Reinforced Soil</i> (Suelo reforzado con geosintético).
HDPE	<i>High Density Polyethylene</i> (Poliétileno de Alta Densidad).
IGS	<i>International Geosynthetics Society</i> (Sociedad Internacional de Geosintéticos).
Momento	Magnitud que resulta de la multiplicación de una fuerza por una distancia a un punto referente.
MSEW	<i>Mechanically Stabilized Earth Walls</i> (Muros de suelo mecánicamente estabilizados).

MSME	Muro de Suelo Mecánicamente Estabilizado.
NCMA	<i>National Concrete Masonry Association</i> (Asociación Nacional del Concreto y Mampostería)
Predimensionar	Efecto de colocarle dimensiones a los miembros estructurales de forma parcial.
Resistencia	Propiedad que tiene un elemento para aguantar una carga o fuerza.
Superestructura	Parte de la estructura de un puente, la cual permite el tránsito de vehículos, transmitiendo las cargas a la subestructura.
Subestructura	Parte de la estructura de un puente, constituida por los estribos, siendo éstos los apoyos extremos de la superestructura.
Terraplén	Es la tierra con que se rellena un terreno para levantar su nivel y formar un plano de apoyo adecuado para hacer una obra.
Voladizo	Parte de una losa que vuela o sale de lo macizo en las paredes o edificios.
Valor soporte	Capacidad de carga de un suelo, que es dado en unidades de fuerza por unidad de área.

RESUMEN

El presente trabajo, se enfocó en el análisis de muros de suelo mecánicamente estabilizado para ser utilizados como estribo verdadero de puentes; por medio de la estabilización mecánica del suelo de relleno del muro de contención que conforma el estribo de un puente, aplicando el uso de refuerzos geosintéticos extensibles. Este refuerzo con su capacidad a la tracción genera juntamente con el suelo, un elemento monolítico que puede ser analizado como un muro de gravedad. Este sistema cuenta con una fachada conectada al refuerzo geosintético, que actúa como protección contra la erosión e intemperismo, que a la vez le proporciona un toque estético a la estructura.

Se está dando a conocer otra alternativa respecto al tema de muros de suelo mecánicamente estabilizado, que ahora en adelante se llama MSME, utilizados para estribo verdadero de puentes, ha generado que dicha tecnología sea poco utilizada.

Se realizó un análisis y diseño de MSME como estribo verdadero de puentes utilizando la normativa de la FHWA-NHI-00-043, comparándolo con un sistema tradicional de estribo de concreto reforzado.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los MSME, han sido utilizados alrededor del mundo desde hace más de 50 años, y en América Latina, su uso se ha incrementado paulatinamente, en especial aquellos de refuerzos extensibles, debido a su flexibilidad, rapidez de construcción, estética y su capacidad para soportar grandes cargas.

La falta de investigación a nivel local de este sistema MSME, no ha permitido compararlo con otros sistemas tradicionales, aun cuando en el país se están desarrollando una serie de proyectos de infraestructura vial, donde se requieren puentes con estribo verdadero.

Este sistema, por medio de su análisis y diseño como estribo verdadero de puente, se realizó una comparación, con un sistema tradicional de estribo de concreto reforzado y así poder ofrecer la información comparativa necesaria sobre esta técnica.

Por lo anterior, se expone la pregunta central:

¿Cuáles son las ventajas del uso del sistema de MSME como estribo verdadero de puentes, respecto al sistema tradicional utilizado en Guatemala?

También se establecen los interrogantes auxiliares:

¿Existe una normativa para el diseño de un estribo verdadero para puentes?

¿Qué diferencias existirán entre el uso del sistema MSME como estribo verdadero de puentes respecto a un estribo de concreto reforzado en Guatemala?

OBJETIVOS

General

Determinar las ventajas y desventajas del uso de MSME, como estribo verdadero de puentes en Guatemala.

Específicos

- Diseñar un estribo verdadero para puente utilizando un MSME, mediante normativa de FHWA.
- Comparar las diferencias del uso de la estructura del sistema MSME para estribo verdadero de puentes y estribo de concreto reforzado para puente.

HIPÓTESIS

El uso del sistema de MSME provee ventaja en la optimización de por lo menos un 30 % de área de construcción hacia atrás para un estribo verdadero de puentes en Guatemala, en comparación con el sistema tradicional.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La investigación que a continuación se presenta, describe el estudio del uso de MSME como estribo verdadero de puentes. Como resultado se desarrolló lo siguiente:

- Fase de investigación

Contiene la información correspondiente de conceptos generales, metodología de diseño, así como las especificaciones que requieren este sistema estructural.

- Fase de análisis y diseño

Diseño de un MSME para estribo verdadero de puentes, siguiendo con las recomendaciones de la metodología FHWA.

INTRODUCCIÓN

La tecnología de MSME, fue desarrollada en Francia, hace más de 50 años, como una técnica alternativa a la solución tradicional de muros de contención de hormigón armado en zonas de relleno. Inicialmente se empleaba el sistema de refuerzo inextensible de acero, pero a mediados de los años 70 se empezó a utilizar refuerzos extensibles a base de polímeros.

La norma "*Standard Specification for Highway Bridges*", de la AASHTO, (Sociedad Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes) de Estados Unidos, incorpora su diseño con dicha denominación Muro de Suelo Mecánicamente Estabilizado (*MSEW*) en la sección 5.8, mientras que la Administración Federal de Carreteras (*FHWA*), los especifica en su documento FHWA-NHI-00-043.

Este sistema, consiste en la estabilización mecánica del suelo, que se realiza por medio de un muro de contención, que forma parte de un estribo de un puente, combinado con refuerzos geosintéticos extensibles. Es decir; cuando éste refuerzo interactúa con el suelo, provoca que se tenga una resistencia a la tracción, originando un elemento monolítico similar a un muro de gravedad. Tomando en cuenta, que esta estructura es afectada por agua, viento, entre otros., se debe resguardar con una fachada conectada al refuerzo geosintético, ofreciéndole un toque estético al muro.

En Guatemala, su aplicación se ha venido utilizando lentamente, sin embargo, ya existen muros con geometrías complejas, estribos de cargas en puentes y muros con alturas elevadas.

La primera normativa de diseño realizada en Guatemala se encuentra en las *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, del Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda*, Edición 2001, en su sección 255 (Muros de Retención de Suelo Estabilizado Mecánicamente con Geosintéticos), donde se hace indicación a este tipo de estructuras, utilizando geosintético, siendo una herramienta para la aplicación del sistema estructural en obras civiles de todo tipo. Contempla desde recomendaciones para el pre-dimensionamiento de los muros y criterios de diseño hasta el diseño sísmico y detalles especiales.

La finalidad del presente trabajo es dar a conocer otra alternativa constructiva en Guatemala, para los estribos verdaderos de puentes, donde también se presentan las ventajas del uso de este tipo de estructura, comparándolo con el sistema tradicional de estribo de concreto reforzado, aportando el cálculo de diseño geotécnico de dicho sistema para estribo de puentes como instrumento de trabajo.

Se describen los conceptos y definiciones del sistema, las diferentes aplicaciones en el campo de la infraestructura, las clasificaciones de dicha tecnología. Se muestra el diseño de MSME y especificaciones de este. Todo esto enfocado a MSME con refuerzo extensible.

Se compara un MSME con un estribo de concreto reforzado, para dar a conocer una aplicación práctica de este sistema y describir sus ventajas en el campo de la Ingeniería Geotécnica.

1. MURO SUELO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO

Los MSME comprenden taludes y terraplenes, y son estructuras que mejoran las condiciones del suelo a la tracción por medio de refuerzos de geosintéticos, formando un bloque monolítico, comportándose como un muro de gravedad.

Al colocarle un material de refuerzo dentro del suelo de relleno, garantiza que tenga resistencia a la tensión, resistiendo empujes ante esfuerzos internos que puedan afectar a la estructura monolítica.

1.1. Componentes de MSME

Los tres elementos principales de un muro de suelo mecánicamente estabilizado son los suelos, elementos de refuerzo y fachada, los cuales se describen a continuación:

1.1.1. Suelos

Este es un elemento muy importante para los muros de suelo mecánicamente estabilizados, y los suelos para tomar en cuenta al diseñar son los siguientes:

- Suelos de fundación

Se deben establecer las propiedades mecánicas del suelo de fundación, y el nivel freático. Para calcular la capacidad de carga, se utiliza el ángulo de fricción interna, cohesión y peso unitario. (FHWA NHI-00-043, 2001)

- Suelos de relleno reforzado

Es el material de relleno en el que se le colocan los refuerzos, por lo general se utilizan los materiales granulares, debido a su buena interacción con el refuerzo, durabilidad, no cohesivo y libre de material orgánico, siendo el ángulo de fricción interna, la característica más importante requerida.

Se recomienda para este material de relleno, las siguientes gradaciones para el suelo de relleno:

Tabla I. **Límites de gradación por AASHTO T-27**

Tamaño del tamiz	Porcentaje de pasantes
4"	100%
No. 40	0 a 60%
No. 200	0 a 15%
El índice plástico no debe ser mayor de 6.	

Fuente: FHWA NHI-00-043. (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines.*

- Suelo retenido

Es el material de relleno ubicado detrás de la zona estabilizada y la superficie natural del suelo. Esta zona se conoce como relleno retenido.

1.1.2. Elementos de refuerzos

Los elementos de refuerzos en los MSME se dividen en extensibles e inextensibles. En esta investigación, se enfoca únicamente a refuerzos extensibles.

- Refuerzos extensibles

Los refuerzos extensibles se dividen en geotextiles y geomallas y son generalmente a base de polímeros y pueden ser de polietileno alta densidad o de poliéster cubierto con una capa de PVC.

Figura 1. **Refuerzos extensibles**



Fuente: FHWA HRT-11-027. (2011). *Geosynthetic Reinforced Soil*.

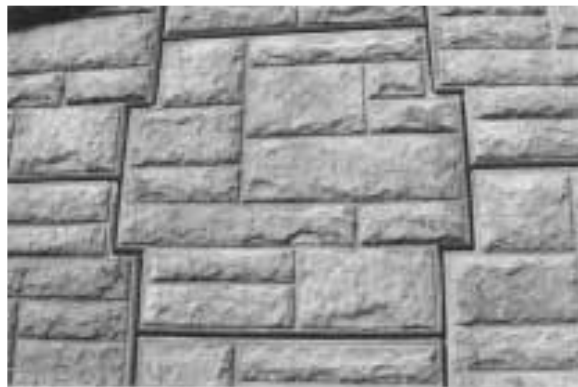
1.1.3. Fachada

Es la parte frontal de un MSME, que tiene como función cubrir y proteger la parte interna del muro de la erosión y desprendimiento, causada por agentes externos del ambiente.

La fachada de un MSME no es un elemento estructural que aporta a la estabilidad del muro, sin embargo, debe estar conectada estructuralmente al suelo de relleno reforzado y los materiales deben ser resistentes para tener un período de vida útil prolongado de la estructura. (Brabant, 2001)

La fachada puede ser de elementos prefabricados de concreto, bloques de concreto prefabricado-segmentado, geosintéticos, paneles de concreto de altura completa, malla metálica de doble torsión forrada en PVC.

Figura 2. **Fachada de prefabricado de concreto**



Fuente: Brabant. (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls for Support of Highway Bridges*.

Figura 3. **Fachada de bloque de concreto - segmentado**



Fuente: MESA®. (2002). *Mequon Bike Trail*.

Figura 4. **Fachada de geosintético**



Fuente: Tensar®. (2012). *System Overview*.

Figura 5. **Fachada de paneles de concreto de altura completa**



Fuente: Tensar®. (2012). *System Overview*.

Figura 6. **Fachada de malla metálica de doble torsión forrada en PVC**



Fuente: MACCAFERRI. *Fachada metálica*. Consultado el 19 de noviembre de 2020.
Recuperado de <https://www.maccaferri.com/br/wp-content/uploads/2020/08/Terramesh-System.jpg>.

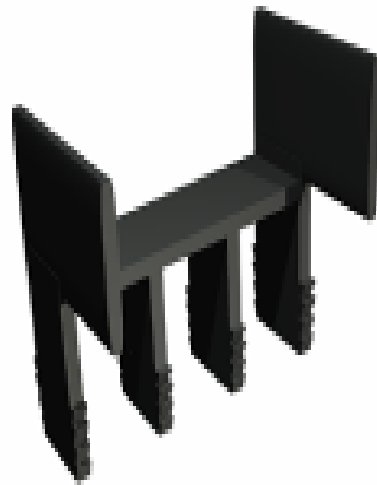
Además de los tres elementos principales de MSME descritos anteriormente, también están los componentes secundarios, tales como:

1.1.4. Conectores

Debe considerarse el material con que está elaborado el tipo de conexión de la fachada y si es compatible con el material de la fachada, para no tener problemas debido a la degradación química que producen al unirlos.

Los conectores para fachadas con bloques segmentales, pueden ser de materiales de polímero de alta densidad con inclusiones de fibra de vidrio.

Figura 7. **Conector de polímero de alta densidad**



Fuente: MESA®. (2012). *Sistemas de Muros de Retención*.

Los tipos de conexión en la fachada pueden ser mediante:

- Conector por trabazón (*Interlocking*)

Este conector tiene como función mantener el refuerzo extensible en su lugar.

Figura 8. **Conexión *Interlocking***



Fuente: My Supply Shed. *Conexiones*. Consultado el 5 de septiembre de 2020. Recuperado de https://cdn.shopify.com/s/files/1/1043/9138/products/Grid_RetainingWall_01_1400x.jpg?v=1548167565.

- **Conector mecánico**

Los conectores mecánicos aseguran la transferencia de carga de la fachada al refuerzo, conectando geomalla a geomalla. Además, contribuye en mantener la alineación de las unidades de la fachada.

- **Conector por fricción**

Se utiliza para muros que tienen fachada de bloques modulares, aumentando la capacidad de corte a través de la fricción entre bloques y geomalla.

Asimismo, se requiere de buen criterio para determinar el tipo de conexión que puede funcionar como un dispositivo de restricción de corte durante un movimiento sísmico, y para cumplimiento de los requerimientos en los lugares altamente sísmicos, en el Capítulo 3, específicamente en la sección 3.1.3., inciso a). Se amplía la información.

Figura 9. **Conexión mecánica**

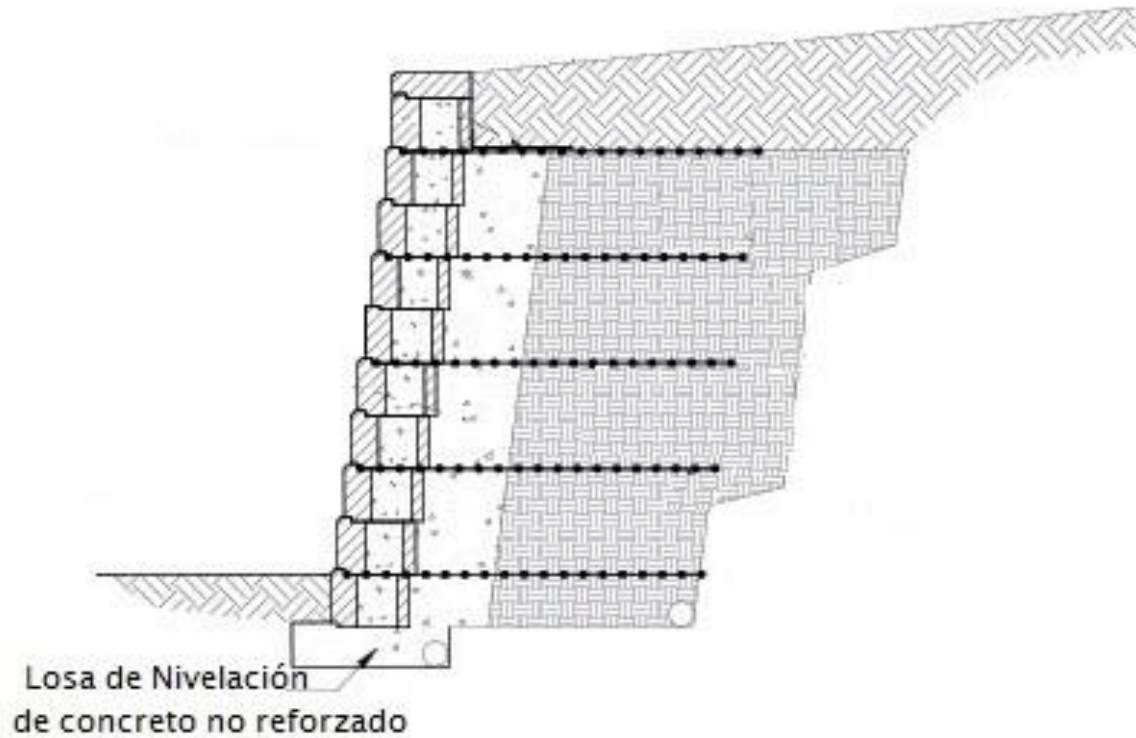


Fuente: MESA® (2011) *Installation and Special Considerations Manual*.

1.1.5. Losa de nivelación

Su función es importante al inicio de la construcción del MSME, ya que establece la alineación horizontal y vertical del mismo, aun cuando no sea un elemento estructural.

Figura 10. **Detalle común de losa de nivelación**

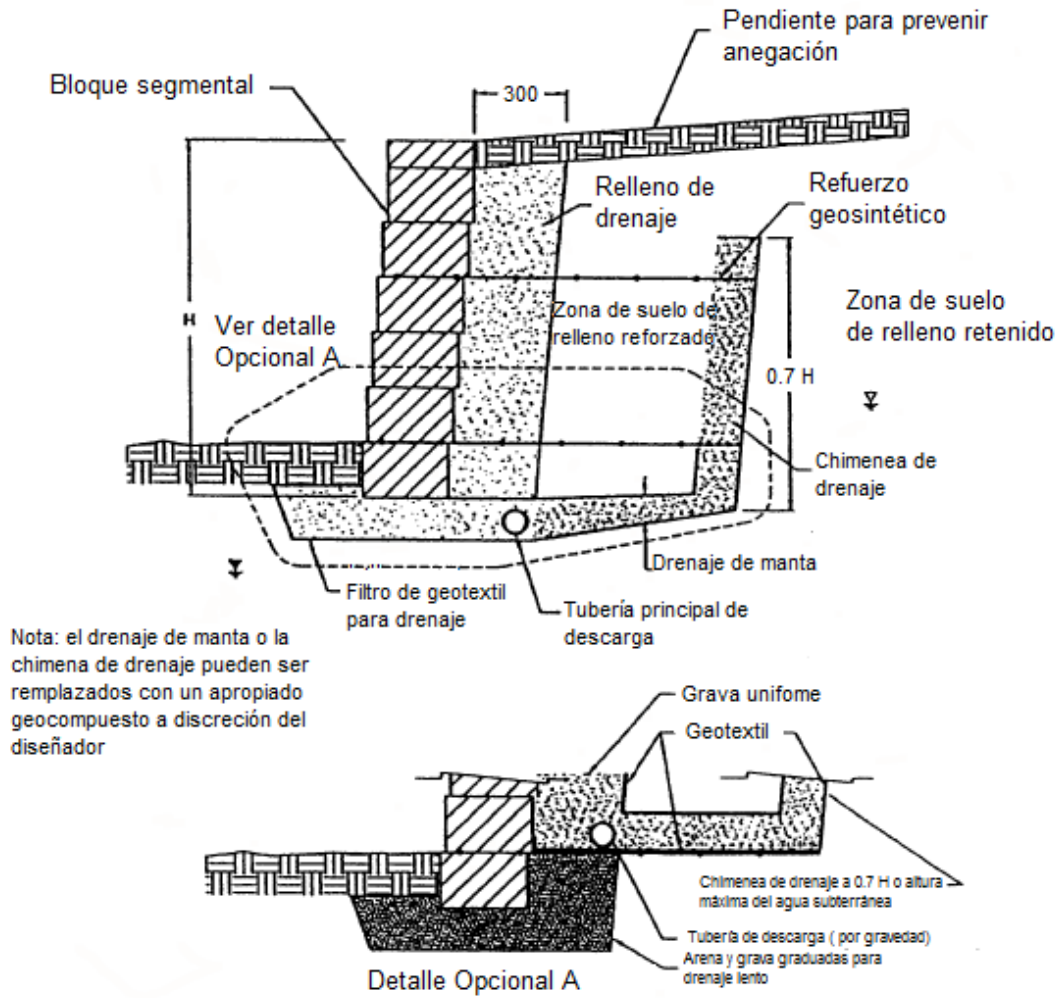


Fuente: Allan Block. *Losa de Nivelación*. Consultado el 5 de septiembre de 2020. Recuperado de <https://www.allanblock.com/retaining-walls/images-c/TypicalGrid.jpg>.

1.1.6. Drenaje

Los drenajes en los MSME, permite evacuar y conducir libremente el agua superficial o subterránea que pueda filtrar en el muro. Estos pueden ser internos y externos, dependiendo de las características del suelo de relleno reforzado.

Figura 11. Detalle de drenaje de MSME

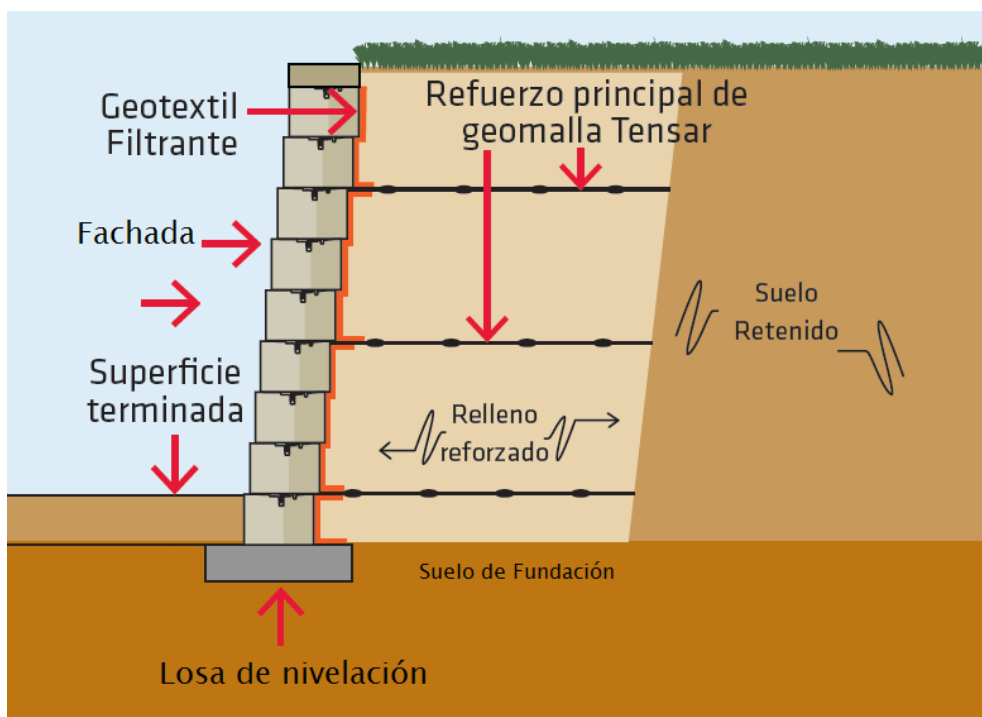


Fuente: FHWA NHI-00-043. (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines*.

1.1.7. Esquema general de MSME

A continuación, se muestra una sección transversal de cómo están incorporados todos los componentes en un muro de suelo mecánicamente estabilizado.

Figura 12. Sección transversal de MSME



Fuente: Tensar®. Sección Transversal de MSME. Consultado el 24 de agosto de 2020.
Recuperado de <https://www.tensarcorp.com/Sistemas-y-productos/Tensar-Uniaxial-UX-geogrids#>.

1.2. Aplicaciones

A continuación, se presentan algunas de las aplicaciones de un MSME con geosintéticos, tales como para estribo de puente, muros de contención, entre otras.

1.2.1. Estribo para puente

Los estribos para puente son las estructuras sobre la cual se apoya la superestructura de este, y los MSME como los estribos que funcionan como un muro de contención con sobrecargas en la parte superior del mismo.

La aplicación de MSME con refuerzos extensibles se empezó a utilizar en las estructuras que funcionan como bloque, donde las geomallas tienen la tarea de reforzar o estabilizar el suelo de relleno de la parte de atrás. (FHWA HRT-11-027, 2011)

En comparación con los sistemas tradicionales, la aplicación de MSME como estribos de puentes, disminuye considerablemente el problema de asentamientos diferenciales y el indeseable golpe en las transiciones de la superestructura y el muro, cuando el suelo de fundación sufre deformaciones. Igualmente, permite que se construya en etapas, permitiendo que las áreas de trabajo sean más pequeñas. (Zornberg, Abu-Hejleh y Wang, 2001)

Figura 13. **Estribo de puente I-25 Castle Rock, Colorado**



Fuente: Tensar®. (2012). *System Overview*.

1.2.2. Muros de contención

Los muros de contención de suelo estabilizado mecánicamente son estructuras que soportan suelos que presentan pendientes mayores que su ángulo de reposo, acompañados de refuerzos geosintéticos en el interior mejorando su comportamiento interno.

Estos muros tienen importantes ventajas técnicas y de costos en comparación de las estructuras convencionales de concreto reforzado, cuando se tiene condiciones no favorables en el suelo de fundación, igualmente se ajustan al área, cuando ésta restringido el espacio.

Estos muros son considerados como una excelente opción, si los suelos tienen capacidad portante baja o si es muy compleja su construcción respecto a la solución tradicional, siempre esta tecnología brinda evidentes beneficios.

Figura 14. **Muro de contención St. Anthony's Hospital - Denver, Colorado**



Fuente: Tensar®. (2012). *System Overview*.

1.2.3. Otras aplicaciones

Existe una gran variedad para la aplicación de esta técnica del suelo mecánicamente estabilizado, se mencionan algunas como: muros con geometrías complejas, provisionales, de protección de taludes en proyectos habitacionales, entre otros.

2. MUROS DE SUELO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO CON REFUERZO EXTENSIBLE

Los MSME con refuerzo extensible, son muros de gravedad, que al combinarlos con material de relleno compactado y un refuerzo (geomallas y geotextiles) colocado entre la masa de suelo, crean una estructura monolítica que mejora las propiedades de resistencia y deformación del suelo.

Los refuerzos extensibles, son elementos de refuerzo a base de polímeros sintéticos en forma de geotextiles o geomallas. (Geosistemas Pavco S.A., 2012)

La durabilidad de los refuerzos extensibles depende de agentes ambientales (tiempo, temperatura, pH, agua, oxígeno, entre otros) y microbiológicos, ya que pueden afectar algunos polímeros. Los daños en la durabilidad dependen de los procesos de fabricación, tipo, aditivos, entre otros., sin embargo, no todos estos daños afectarán a los refuerzos extensibles, sino que depende de las especificaciones propias de cada producto a largo plazo. (AASHTO, 2002)

Existen varios tipos de refuerzos extensibles, que son utilizados en proyectos de MSME, los más comunes son: geomallas y geotextiles. Y el tipo de refuerzo extensible, que se estudia en esta investigación son las geomallas, por lo que a continuación se presentan.

2.1. Geomallas

Son estructuras tridimensionales; mono, bi-orientadas o multi-direccionadas, formando parte de una clasificación del grupo de los geosintéticos, inicialmente diseñados para la función de refuerzo. (Zornberg y Christopher, 2006)

Éstas poseen una serie de agujeros distribuidos uniformemente entre sus elementos longitudinales y transversales, permitiendo el contacto entre las partículas del suelo y esta estructura, incrementando la interacción entre el material de relleno y la geomalla.

Pueden ser fabricadas de polietileno de alta densidad, o poliéster cubierto con una capa de PVC más un polímero, además las geomallas cuentan con una mayor adherencia al terreno y una mayor durabilidad en el mundo de los geosintéticos.

Cabe mencionar, que el poliéster es un material con mayor resistencia a la tensión, pero con deformaciones más grandes (Ver Tabla II), además tiene limitante cuando éste no tiene algún recubrimiento de polietileno o de PVC, y es utilizado en ambiente muy ácido con $\text{pH} < 3$ o alcalino con $\text{pH} > 9$, sufre de problemas de hidrólisis, es decir; la reacción ácido base que se produce al disolver en determinadas sales en agua, reduciendo sus propiedades y durabilidad.

Caso contrario, las geomallas de polietileno de alta densidad, que se pueden utilizar para todo tipo de proyecto, bajo cualquier circunstancia química y/o biológica. Por lo que en esta investigación se consideró la utilización de este tipo de material.

Tabla II. **Resistencia última versus deformación en geomallas**

Material Geomalla	Resistencia ultima (kN/m) -promedio	Deformación (%)
Polietileno de Alta Densidad	13	2
Poliéster	60	10

Fuente: ACE Geosynthetics. *Resistencia última versus deformación en geomalla*. Consultado el 13 de septiembre de 2020 Recuperado de <https://www.geoace.com/es/products/Geomallas/ACEGrid%C2%AE-GG->.

A continuación, se clasifica las geomallas según su fabricación y aplicación a proyectos de MSME.

2.1.1. Geomallas según su fabricación

Existen varios tipos de geomallas según su fabricación, las cuales se pueden mencionar las extruidas, tejidas y soldadas, y a continuación se describen cada una de ellas.

- **Extruidas**

Son fabricadas en polietileno de alta densidad, a través de la perforación y elongación de una lámina de polímero.

Debido al procedimiento de fabricación de estas geomallas, proporcionan mayor resistencia y rigidez en el sentido longitudinal que en el transversal, contribuye a la selección de este tipo de geomalla para el presente trabajo.

Figura 15. **Geomalla extruida**



Fuente: ACE Geosynthetics. *Geomalla Extruida*. Consultado el 28 de junio de 2020.
Recuperado de <https://www.geoace.com/es/images/702x377/5b222987020c9.png>.

- **Tejidas**

Son fabricadas de poliéster revestido, formando una red de alta resistencia. Y es necesario colocarle algún tipo de recubrimiento a la geomalla tejida, para evitar los daños de construcción y proteger las características originales de ésta. Generalmente se aplica cubiertas con látex, policloruro de vinilo (Polivinil Cloruro - PVC). (Zornberg y Christopher, 2006)

Figura 16. **Geomalla tejida**



Fuente: MACCAFERRI. (2017). *Refuerzo y estabilización de suelos*.

- **Soldadas**

Son fabricadas por tiras de poliéster de alta resistencia (resistencia a la tensión) cubiertas de material polímero (resistencia mecánica contra los daños de instalación y por degradación), cuyas juntas se unen por medio de una fusión.

Figura 17. **Geomalla soldada**



Fuente: MACCAFERRI. (2017). *Refuerzo y estabilización de suelos*.

2.1.2. Geomallas según su aplicación en proyectos de MSME

Las geomallas uniaxiales son las que se utilizan como refuerzo primario para este tipo de aplicación de muros de suelo mecánicamente estabilizados, enfocándose para esta investigación en ellas.

- Geomalla uniaxial

Son fabricadas por láminas de polietileno de alta densidad, son estructuras mono-dimensionales que se utiliza para refuerzo primario de taludes, muros, terraplenes, entre otros. (Suárez Díaz, 2009)

Estas láminas de polietileno de alta densidad perforadas de forma circular, formando elipses alargadas, creando una estructura con mayor durabilidad y resistente a la deformación.

Figura 18. **Geomalla uniaxial**



Fuente: DM Tecnologías, S.A. *Geomalla uniaxial*. Consultado el 26 de agosto de 2020. Recuperado de <https://www.dmttecnologias.com.mx/wp-content/uploads/2013/05/GEO-0023-528x356.jpg>.

Los factores de reducción para geomallas se dividen en:

- Daños por instalación: este factor de reducción es variable, debido a que cada proyecto es diferente, es decir; por la naturaleza del suelo de fundación, recubrimiento y el tránsito causado por la compactación de la máquina pesada durante el tiempo de instalación.

- Elongación o creep: este factor de reducción es la deformación que presenta el material durante el tiempo, cuando es sometido a una carga constante. Los geotextiles presentan más efectos de elongación en comparación de las geomallas debido a que su rigidez y espesor del material.
- Degradación química: este factor de reducción consiste en tomar en cuenta todas las condiciones químicas del ambiente del lugar del proyecto que pudieran estar presentes y tomarlas en cuenta en el diseño.

Tabla III. **Factores de reducción para geomallas en aplicaciones de refuerzo**

Area	Daños por Instalación	Creep o Fluencia	Degradación Química / Biológica
	FR _{Instalación}	FR _{Creep o Elongación}	FR _{Degradación}
Terraplenes sobre suelos blandos	1.1 a 1.4	2.0 a 3.0	1.1 a 1.5
Estabilización de taludes	1.1 a 1.4	2.0 a 3.0	1.1 a 1.5
Muros de contención	1.1 a 1.4	2.0 a 3.0	1.1 a 1.5
Fundaciones	1.2 a 1.5	2.0 a 3.0	1.1 a 1.6

Fuente: Geosistemas Pavco S.A. (2012). *Manual de Diseño con Geosintéticos*.

Además, por la necesidad de los parámetros exactos de cada geomalla a utilizarse para la elaboración de los MSME, tales como: los coeficientes interacción de suelo-geomalla, factores de reducción y factores de conexión, es fundamental la información dada por fabricantes. Lo que obliga a utilizar una marca para el diseño de una geomalla específica.

Al tomar en cuenta, para este caso en particular y por la accesibilidad de la información para los diferentes factores del refuerzo extensible, se utilizó como refuerzo primario las geomallas uniaxiales de poliéster cubiertas por una capa protectora de PVC (MacGrid® WG-100), junto con elemento secundario de mallas metálica de doble torsión forrada en PVC del sistema Terramesh® de Maccaferri que a su vez tienen como función de una fachada como protección de agentes externos, en esta investigación.

3. METODOLOGÍA DE DISEÑO EN MUROS DE SUELO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO

Los avances que se han tenido en los últimos años de los conceptos de reforzamiento del suelo y su aplicación para el diseño de estructuras de MSME, se han presentado, utilizado y perfeccionado distintos métodos de diseño. Actualmente radica en establecer los parámetros geométricos y del material de refuerzo para prevenir los modos de fallas internas y externas.

A continuación, se presentan algunos de los métodos de diseño de MSME:

- Método NCMA

La metodología de diseño de NCMA, en el Manual de Diseño para Muros de Contención Segmentados, utiliza la Teoría de Coulomb para modelar las fuerzas externas que actúan en el muro. La relación $L/H \geq 60\%$ de la altura, es para todo tipo de suelo de relleno y los requisitos de resistencia de la conexión se basan en pruebas a corto plazo.

- Método GRS

La metodología de diseño de GRS se utiliza específicamente para refuerzos geosintéticos del suelo y fachadas de bloques segmentales. La resistencia de la conexión no es un requisito de diseño donde la separación vertical máxima del refuerzo es de 8 pulgadas y el relleno reforzado es un material compactado.

- Método FHWA-NHI-00-043

La metodología de diseño de FHWA-NHI-00-043, utiliza la relación $L/H \geq 70\%$ de la altura, es para suelo de relleno granular y los requisitos de resistencia de la conexión se basan en pruebas a largo plazo.

Para determinar la estabilización externa, se utiliza el método de análisis de equilibrio límite, similar al que se diseña para cualquier estructura de gravedad.

Y para la estabilización interna, se utiliza el método de gravedad coherente simplificado, evaluando las posibles fallas, que se originen dentro del bloque de suelo reforzado.

En esta investigación, se utilizó siguiendo la metodología que emplea la Administración Federal de Carreteras (FHWA), en su publicación FHWA-NHI-00-043, debido que propone criterios generales de diseño de los MSME, el cual es más conservador y ha tenido una mayor aceptación a nivel mundial.

Además, para el análisis de la estabilidad global, se modeló por medio de un software, que fue desarrollado para la verificación de la estabilidad de MSME, que permite análisis de estructuras de contención de gravedad usando el Método del Equilibrio Límite. (Software MacStARS W – Rel. 4.0, 2020)

3.1. Metodología de diseño

Se analizó por medio del análisis de equilibrio límite, dentro de los elementos no exactos, basándose en el método de Dovelas, donde se tiene el segmento de muro y se divide en distintas franjas, calculando por los métodos aproximados, siendo Janbu y Bishop Simplificado.

Definición de parámetros de diseño de un muro:

- Definir la geometría del muro
 - Altura del muro
 - Altura del nivel freático
 - Pendiente del talud (β)

- Definir las propiedades del suelo
 - Suelo de relleno
 - Ángulo de fricción (φ)
 - Peso específico del suelo (γ)
 - Cohesión del suelo (C_u)
 - Suelo de fundación
 - Ángulo de fricción (φ)
 - Peso específico del suelo (γ)
 - Cohesión del suelo (C_u)
 - Suelo de refuerzo
 - Ángulo de fricción (φ)
 - Peso específico del suelo (γ)
 - Cohesión del suelo (C_u)

- Cargas estáticas

- Cargas sísmicas

- Predimensionamiento

Una longitud preliminar del refuerzo debe ser mayor de 0.7 H y no menor a 2.5 metros, donde H es la altura de diseño del muro.

- Criterios de servicio
 - Asentamiento diferencial
 - Desplazamiento horizontal
 - Vida útil de diseño

- Factores de seguridad a usar durante el diseño
 - Estabilidad externa

Estos factores que se presentan en las tablas IV y V, son los factores mínimos recomendados para el cálculo y diseño de MSME por la AASHTO, bajo los lineamientos de la FHWA.

Tabla IV. Factores de seguridad mínimos para análisis estático

Tipo de análisis	Factor de seguridad
Deslizamiento	1.5
Volcamiento	2.0
Capacidad portante	3.0
Estabilidad global	1.3
Asentamientos	Según los requerimientos del proyecto

Fuente: Geosistemas Pavco S.A. (2012). *Manual de Diseño con Geosintéticos*.

Tabla V. **Factores de seguridad mínimos para análisis sísmico**

Tipo de análisis	Factor de seguridad
Deslizamiento	1.125
Volcamiento	1.5
Estabilidad global	1.1

Fuente: Geosistemas Pavco S.A. (2012). *Manual de Diseño con Geosintéticos*.

- Estabilidad interna

La resistencia a la tensión última de la geomalla se basa en el comportamiento de la deformación por tensión a largo plazo del MSME, afectado por factores de reducción del refuerzo, tales como: daños por instalación, por durabilidad y por elongación del material (creep).

La resistencia a la tensión última se determina de la siguiente manera:

$$T_{ULP} = \frac{T_{ult}}{FR_{inst} * FR_{dur} * FR_{cr} * FS} \quad (1)$$

Donde:

T_{ULP} = Resistencia a tensión de diseño

T_{ult} = Resistencia a tensión última

FR = Multiplicación de todos los factores de reducción

= (FRinstalación) * (FRdurabilidad) * (FRcreep)

FS = Factor de seguridad recomendado=1.5

Los rangos típicos de factores de reducción por instalación, durabilidad y creep en función del tipo de polímero se indican a continuación:

- El factor de reducción de por instalación, son los daños ocurridos durante la instalación.

Tabla VI. **Factor de reducción por instalación**

Geosintético	Relleno Tamaño Max 102 mm D₅₀ 30 mm	Relleno Tamaño Max 20 mm D₅₀ 0.7 mm
Polietileno de alta densidad (HPDE) - geomalla uniaxial	1.20-1.45	1.10-1.20
Poliéster (PET) con recubrimiento PVC	1.30-1.85	1.10-1.30
Poliéster (PET) con recubrimiento acrílico	1.30-2.05	1.20-1.40
*Peso mínimo 270 g/m ²		

Fuente: FHWA NHI-00-043. (2001) . *Mechanically Stabilized Earth Walls And Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines.*

- El factor de reducción de la durabilidad depende de las características del refuerzo extensible a la degradación por reacción química, estos pueden entre 1.1 a 2.0.

Tabla VII. **Factor de reducción por durabilidad**

Poliéster	5 ≤ pH ≤ 8	3 ≤ pH ≤ 5 8 ≤ pH ≤ 9
Geotextiles, Mn < 20,000, 40 < CEG < 50	1.6	2
Geomallas Poliéster Con Recubrimiento y Geotextiles Mn > 25,000, CEG < 30	1.15	1.3
Mn = número promedio peso molecular CEG = carboxil end group *peso mínimo 270 g/m ²		

Fuente: FHWA NHI-00-043. (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls And Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines.*

- El factor de reducción por elongación del material (creep) es la deformación permanente por aplicación continua de carga o calor.

Tabla VIII. **Factor de reducción por creep**

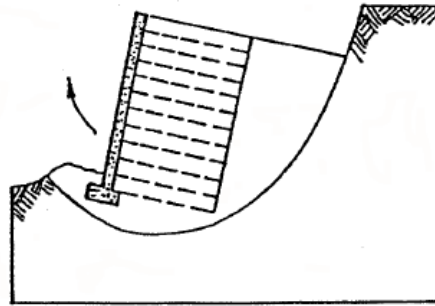
Geosintético	Creep
Poliéster (PET)	2.5-1.6
Polietileno de Alta Densidad (HDPE)	5.0-2.6

Fuente: FHWA NHI-00-043. (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls And Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines.*

3.1.1. Estabilidad global

La estabilidad general es analizada mediante el método análisis rotacionales o de cuña, utilizando un método clásico de análisis de estabilidad de taludes. Este análisis, implica fallas profundas que se desarrollan por debajo del muro y si el factor de seguridad (FS) mínimo es menor que el FS mínimo recomendado de 1.5, según Normativa AGIES NSE 2, entonces se tiene que aumentar la longitud de refuerzo o mejorar el suelo de fundación.

Figura 19. **Falla Estabilidad Global**



Fuente: FHWA NHI-00-043. (2001) . *Mechanically Stabilized Earth Walls And Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines*.

3.1.2. **Estabilidad externa**

El diseño de la estabilidad externa de los MSME con refuerzos extensible es semejante a los diseños tradicionales de estructuras de gravedad, considerando determinar las fuerzas que actúan por encima de la base de fundación con la finalidad de analizar la estabilidad al volcamiento, deslizamiento y capacidad portante.

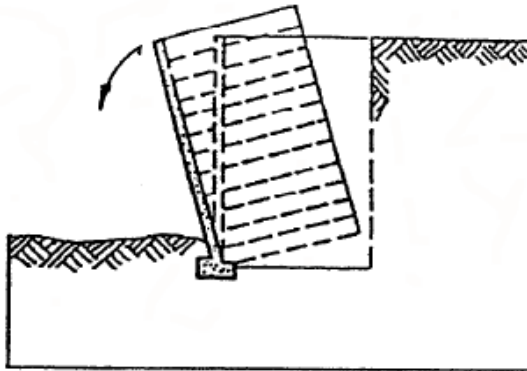
- **Volcamiento**

Comprobar que el momento producido por las fuerzas horizontales actuantes, comparadas con los momentos resistentes no vaya a originar un volcamiento del muro.

Las fallas por volcamiento de todo el muro son poco comunes, debido a la flexibilidad de los muros MSE. No obstante, la finalidad de los criterios de

volcamiento son calcular la excentricidad de la carga para obtener el FS a capacidad de soporte. (FHWA NHI-00-043, 2001)

Figura 20. **Volcamiento**

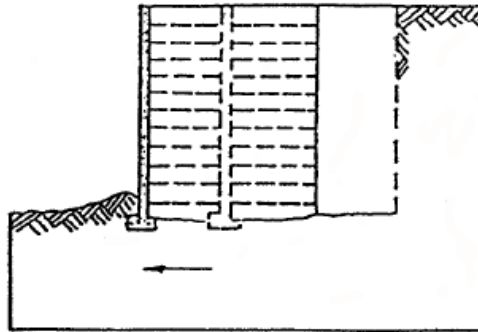


Fuente: FHWA NHI-00-043. (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls And Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines*.

- Deslizamiento

Comprobar que las fuerzas horizontales externas no vayan a originar un desplazamiento al muro.

Figura 21. **Deslizamiento**



Fuente: FHWA NHI-00-043. (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls And Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines*.

Tomar en cuenta, que la resistencia pasiva del suelo en el pie del muro por empotramiento es ignorada, debido a que el suelo puede ser eliminado, ya sea de manera natural o mecánica. Las cargas adicionales pueden incluir cargas vivas y muertas.

Los pasos para el cálculo son:

- Calcular empuje:

$$F_T = K_{af(\varphi, \beta)} \frac{1}{2} \gamma_f h^2 \quad (2)$$

Donde: $h = H + L \beta \tan$ (3)

- Calcular la fuerza motriz:

$$Pd = FH = FT \cos \beta \quad (4)$$

- Determinar las propiedades de fricción más críticas de la cimentación. Elegir el ϕ mínimo de tres posibilidades:
 - Deslizamiento a lo largo del terreno de fundación, si la resistencia al corte (c_u, ϕ_f) es menor que la del material de relleno.
 - Deslizamiento a lo largo del relleno reforzado (ϕ_r).
 - Deslizamiento a lo largo del refuerzo más débil, tanto superior como inferior del suelo reforzado. El ángulo de fricción ρ suelo-refuerzo, debe ser medido preferiblemente por medio de pruebas de corte directo del suelo. Alternativamente, puede ser tomado como ϕ .

- Calcular de la fuerza de resistencia por unidad de longitud del muro:

$$P_R = (V_1 + V_2 + F_T \sin \beta) * \mu \quad (5)$$

Donde:

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

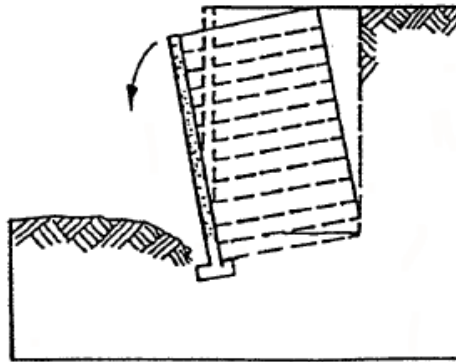
El efecto de las cargas externas sobre el muro es lo que aumenta la resistencia al deslizamiento, sólo debe incluirse si las cargas son permanentes. Por ejemplo, la carga de tráfico de carga viva debe ser excluida.

- Calcular el factor de seguridad con respecto al deslizamiento y comprobar si es mayor que el valor requerido, usando la ecuación 2.
- Si no: aumentar la longitud de refuerzo, L, y repetir los cálculos.

- Capacidad portante

Para el análisis de capacidad de soporte se aplican los procedimientos empleados para el diseño de cimentaciones. (Suárez Díaz, 2009)

Figura 22. **Capacidad portante**



Fuente: FHWA NHI-00-043. (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls And Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines*.

Se tienen dos modos de falla de la capacidad portante:

- Falla de corte general

Para prevenir la falla de corte general, se necesita que la tensión vertical en la base calculada con la distribución de tipo Meyerhof, no exceda la capacidad de carga admisible del suelo de fundación determinado, tomando en cuenta un factor de seguridad de 2.5 con respecto a la carga aplicada de la capacidad de carga máxima:

$$\sigma_v \leq q_a = \frac{q_{ult}}{FS} \quad (6)$$

Se podrá tomar un FS = 2.0, si está bien justificado por medio de un análisis geotécnico.

Los pasos para el cálculo son:

- Obtener la excentricidad e de la fuerza resultante en la base del muro. Tomar en cuenta que, en el predimensionamiento, si la excentricidad supera $L/6$, la longitud de refuerzo en la base se aumenta.
- Calcular el σ_v esfuerzo vertical en la base, suponiendo una distribución de tipo Meyerhof:

$$\sigma_v = \frac{V_1 + V_2 + F_T \sin \beta}{L - 2e} \quad (7)$$

- Determinar la capacidad de carga última q_{ult} utilizando métodos clásicos de mecánica de suelos, por ejemplo, para un grado de nivel en frente al muro y no hay influencia de las aguas subterráneas:

$$q_{ult} = c_u N_c + 0.5(L) \gamma_f N_\gamma \quad (8)$$

Donde:

c_u = Cohesión; γ_f = peso unitario; N_c y N_γ = coeficientes de capacidad portante adimensionales

Los factores de capacidad portante se pueden obtener en Tabla 4.4.7.1A de 1996 AASHTO, tal como se muestran en la tabla IX. Las modificaciones a q_{ult} (Ecuación 8) para una pendiente de la superficie del suelo y de alto nivel de las aguas subterráneas están dentro de 4.4.7.1.1.4 y 4.4.7.1.1.6, respectivamente de 1996 AASHTO.

Para el empotramiento excesivo, algunos de empotramiento parcial, puede ser considerada en la determinación de q_{ult} ,

Tabla IX. **Factores de capacidad portante**

ϕ	Nc	Nq	N γ	ϕ	Nc	Nq	N γ
0	5.14	1	0	26	22.25	11.85	12.54
1	5.38	1.09	0.07	27	23.94	13.2	14.47
2	5.63	1.2	0.15	28	25.8	14.72	16.72
3	5.9	1.31	0.24	29	27.86	16.44	19.34
4	6.19	1.43	0.34	30	30.14	18.4	22.4
5	6.49	1.57	0.45	31	32.67	20.63	25.9
6	6.81	1.72	0.57	32	35.49	23.18	30.22
7	7.16	1.88	0.71	33	38.64	26.09	35.19
8	7.53	2.06	0.86	34	42.16	29.44	41.06
9	7.92	2.25	1.03	35	46.12	33.3	48.03
10	8.35	2.47	1.22	36	50.59	37.75	56.31
11	8.8	2.71	1.44	37	55.63	42.92	66.19
12	9.28	2.97	1.69	38	61.35	48.93	78.03
13	9.81	3.26	1.97	39	67.87	55.96	92.25
14	10.37	3.59	2.29	40	75.31	64.2	109.4
15	10.98	3.94	2.65	41	83.86	73.9	130.2
16	11.63	4.34	3.06	42	93.71	85.38	155.6
17	12.34	4.77	3.53	43	105.1	99.02	186.5
18	13.1	5.26	4.07	44	118.4	115.3	224.6
19	13.93	5.8	4.68	45	133.9	134.9	271.8
20	14.83	6.4	5.39	46	152.1	158.5	330.4
21	15.82	7.07	6.2	47	173.6	187.2	403.7
22	16.88	7.82	7.13	48	199.3	222.3	496
23	18.05	8.66	8.2	49	229.9	265.5	613.2
24	19.32	9.6	9.44	50	266.9	319.1	762.9
25	20.72	10.66	10.88	-	-	-	-

Fuente: FHWA NHI-00-043. (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls And Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines.*

- Comprobar:

$$\sigma_v \leq q_a = \frac{q_{ult}}{FS} \quad (9)$$

- Como se indica en el paso (2) y el paso (3), σ_v se puede disminuir y q_{ult} aumentar alargando los refuerzos. Si las condiciones de apoyo adecuados no pueden ser alcanzados o refuerzos de alargamiento, es necesario mejorar el suelo de fundación.
- Falla de corte local

Para prevenir la falla de corte local en suelos blandos o sueltos debajo del muro, se debe aplicar la siguiente ecuación, para no tener movimientos horizontales grandes de la estructura.

$$\gamma H \leq 3c \quad (10)$$

- Análisis sísmico de estabilidad externa

Durante un sismo, el material de relleno retenido ejerce un empuje horizontal dinámico, P_{AE} , en los MSME, además del empuje estático. Por otra parte, la masa de suelo reforzado se somete a una fuerza de inercia horizontal $P_{IR} = M \cdot A_m$, donde M es la masa de la parte activa de la sección del muro reforzado, asumiendo el ancho de base es de $0.8 H$, y A_m es la aceleración máxima horizontal en el muro de suelo reforzado.

El análisis de la estabilidad externa sísmica incluye los siguientes pasos:

- Seleccionar una aceleración pico del terreno horizontal basada en el diseño sísmico. El coeficiente de aceleración del suelo se puede obtener de las Normativa AGIES NSE 2.
- Calcular la aceleración máxima A_m :

$$A_m = (1.45 - A) * A \quad (11)$$

Donde:

A = coeficiente máximo de aceleración del suelo

A_m = coeficiente máximo de aceleración en el centro de gravedad de la masa del muro

- Calcular la fuerza de inercia horizontal PIR y PAE empuje sísmico:

$$P_{IR} = 0.5 A_m \gamma_f H^2 (\text{Horizontal posterior}) \quad (12)$$

$$P_{AE} = 0.375 A_m \gamma_f H^2 (\text{Horizontal posterior}) \quad (13)$$

- Añadir a las fuerzas estáticas que actúan sobre la estructura, el 50 % de empuje sísmico PAE y la fuerza de inercia completa de PIR. La reducida PAE se utiliza debido a que estas dos fuerzas a pico son poco probables simultáneamente.

3.1.3. Estabilidad interna

Los pasos para el procedimiento del diseño de la estabilidad interna para los muros de suelo mecánicamente estabilizados para extensibles son los siguientes:

- Seleccionar un tipo de refuerzo extensible.
- Seleccionar la ubicación de la superficie de falla crítica.
- Seleccionar el espaciamiento del refuerzo compatible con el revestimiento.
- Calcular la fuerza de tensión máxima en cada capa de refuerzo, estática y dinámica.
- Calcular la fuerza de tensión máxima en la conexión con el revestimiento.
- Calcular la capacidad de extracción en cada capa de refuerzo.

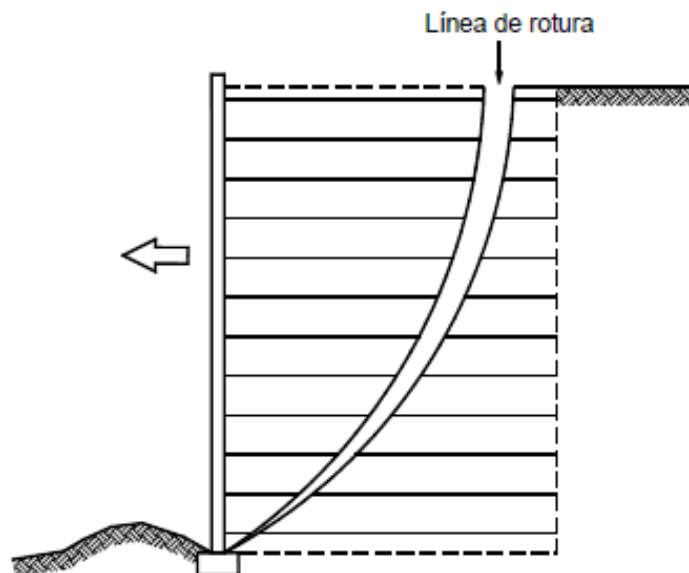
La falla para estabilidad interna puede ocurrir de dos maneras diferentes, las cuales son las siguientes:

- Elongación y ruptura de los refuerzos

Si las fuerzas de tensión son considerables, tanto que el material de refuerzo se deforma excesivamente o se rompe, generando grandes movimientos y posible colapso de la estructura.

En investigaciones recientes, se muestra que la fuerza de tensión máxima está relacionada primordialmente con el tipo de refuerzo del MSME, que está en función del módulo, extensibilidad y densidad del refuerzo.

Figura 23. **Falla por rotura del refuerzo**



Fuente: Suárez Díaz. (2009). *Deslizamientos: Técnicas de Remediación*.

El coeficiente lateral de presión K , se determina aplicando un multiplicador para el coeficiente de empuje activo. El coeficiente de empuje activo se determina utilizando una relación de presión de la tierra de Coulomb, suponiendo que no

hay fricción en el muro y un ángulo β igual a cero. La presión vertical del suelo sobre el muro se reduce a la ecuación de Rankine:

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (14)$$

En una fachada con un ángulo mayor o igual a 8° , la siguiente forma simplificada de la ecuación de Coulomb se puede utilizar:

$$K_a = \frac{\tan^2(\theta + \varphi')}{\sin^3\theta \left(1 + \frac{\sin\varphi'}{\sin\theta}\right)^2} \quad (15)$$

Donde:

θ = inclinación de la parte posterior del paramento, que se mide desde la horizontal del muro.

El esfuerzo vertical (γH) es el resultado de las fuerzas de gravedad del mismo peso dentro del suelo e inmediatamente por encima del relleno del muro reforzado y cualquier sobrecarga. El esfuerzo vertical para los cálculos de carga máxima de refuerzo.

Los pasos para el cálculo son:

- Calcular en cada capa de refuerzo, los esfuerzos horizontales σ_H a lo largo de la línea de falla potencial, en el peso retenido del relleno γrZ más la carga uniforme q y las cargas $\Delta\sigma_v$ y $\Delta\sigma_h$.

$$\sigma_H = \sigma_v * K_{r+} \Delta\sigma_h \quad (16)$$

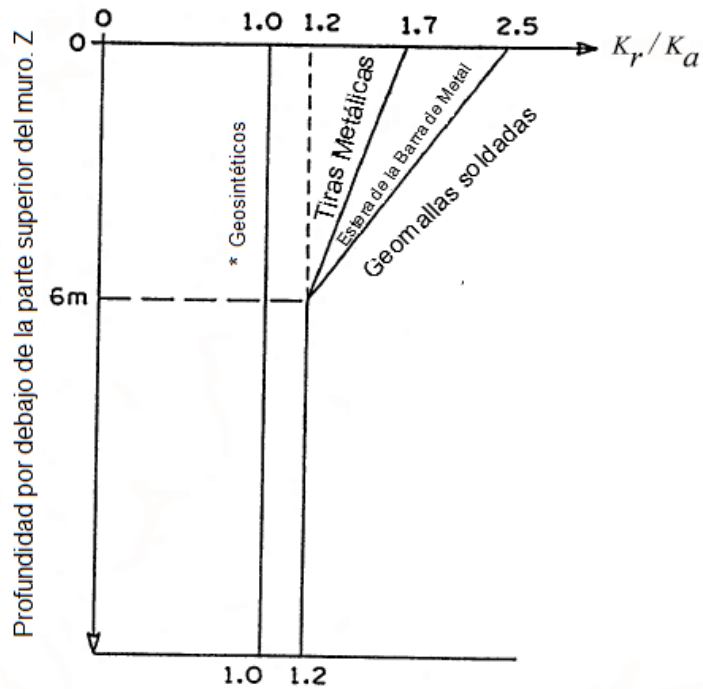
Donde: $\sigma_v = \sigma_v * Z + \sigma_2 + q + \Delta\sigma_v$

$K_r = K(z)$ se muestra en la figura 24 y Z es la profundidad de referencia por debajo de la parte superior del muro.

$\Delta\sigma_v$ = incremento de la tensión vertical debido a las cargas verticales usando un 2V:1H.

$\Delta\sigma_h$ = incremento de la tensión horizontal debido a cargas concentradas horizontales, si las hubiera.

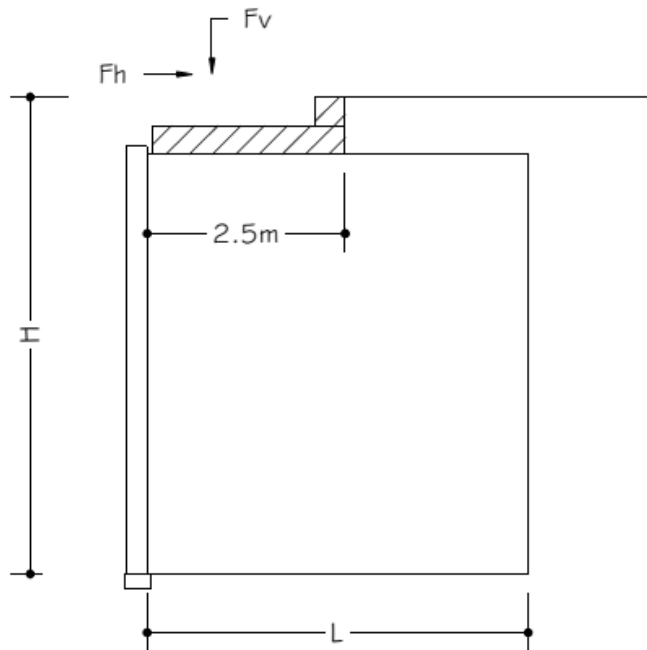
Figura 24. Variación de la relación de tensiones con la profundidad de un MSME



* No incluye refuerzo de polímero

Fuente: FHWA NHI-00-043. (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls And Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines.*

Figura 25. **Distancia mínima de la viga cabezal para diseño en la corona del muro**



Fuente: elaboración propia, empleando programa AutoCAD 2013.

- Calcular tensión máxima T_{max} en cada capa de refuerzo por unidad de ancho del muro sobre la base S_v . el espaciado vertical entre:

$$T_{max} = \sigma_H * S_v \quad (17)$$

T_{max} también puede ser calculado en cada capa de refuerzos (geomallas) por una unidad de longitud definida de cara del muro, a partir de:

$$T_{max} = \frac{\sigma_H * S_v}{R_C} \quad (18)$$

Alternativamente, los refuerzos y los bloques segmentales de concreto, $T_{m\acute{a}x}$ se calcula más por un área tributaria A_t , definida como el área igual a dos veces del ancho del espaciado vertical s_v .

$$T_{max} = \sigma_H * A_t \quad (19)$$

- Calcular la estabilidad interna con respecto a la ruptura del refuerzo requiere que:

$$T_a \geq \frac{T_{max}}{R_c} \quad (20)$$

Donde:

R_c = radio de cobertura

T_a = la fuerza de tensión admisible por unidad de ancho de la armadura

- Resistencia de la conexión

Los conectores deben diseñarse en tal forma que la resistencia total del conector no sea inferior a la resistencia total del refuerzo.

Tal como se mencionó en el capítulo 2, existen varios tipos de conexión y con base en las zonas sísmicas o aceleración sísmica se escoge el tipo de conexión.

(AASHTO, 2012), menciona que para lugares que se encuentren en zonas sísmicas 1 o 3, o bien aceleraciones máximas del suelo menores o igual de 0.4 g, no se considera obligatorio el diseño sísmico, a menos que sean suelos arcillosos o muros que cargan otra estructura.

Sin embargo, en las conexiones de muros con bloques segmentales como fachada, en zonas sísmicas 3 o 4, se debe considerar utilizar conectores, debido

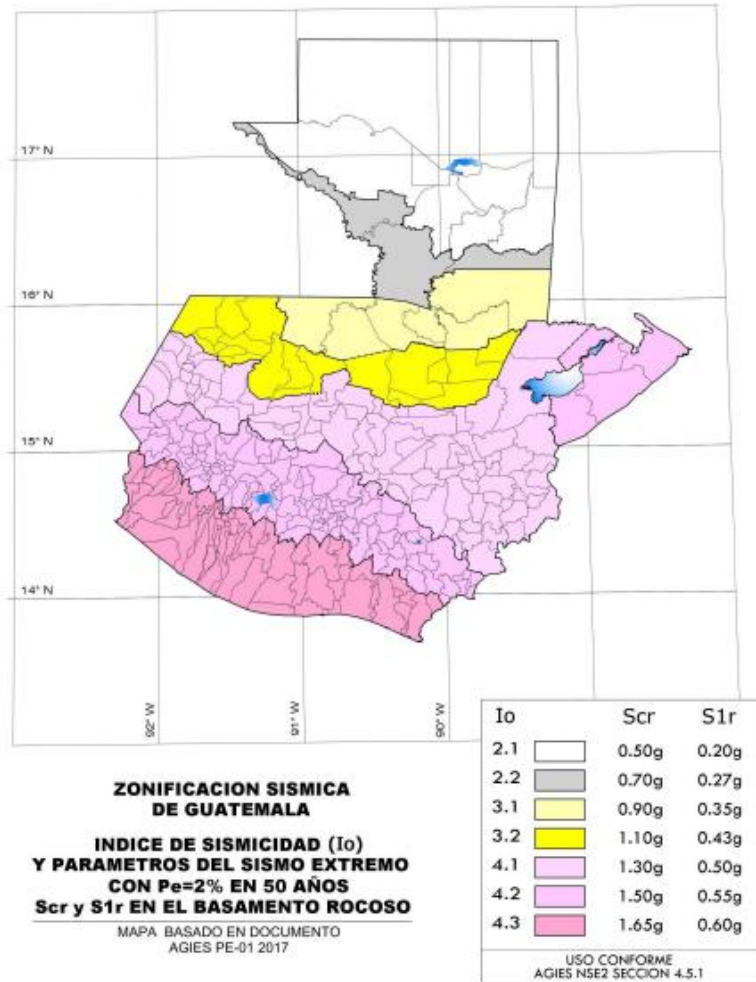
a la resistencia al corte que debe existir entre los bloques y el refuerzo del suelo. (AASHTO, 2012)

Igualmente, para lugares altamente sísmicos, en donde el coeficiente de aceleración (A) sea mayor a 0.29, debe analizarse la estabilidad sísmica. (AASHTO, 2012)

En Guatemala, a través de la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica – AGIES-, en su Normativa AGIES NSE 2, identifica un mapa de macro zonificación sísmica, mostrando su índice de sismicidad donde varía desde $I_0 = 2$ a $I_0 = 4$.

Tal como se ha mencionado anteriormente para esta investigación se consideró utilizar geomallas uniaxiales de poliéster revestida con PVC, empleando como fachada malla de doble torsión denominada Terramesh® System analizada por el (Software MacStARS W – Rel. 4.0, 2020), y por el tipo de elemento empleado por la fachada no fue necesario colocarle un conector.

Figura 26. **Mapa de zonificación sísmica de Guatemala**



Fuente: AGIES NSE 2. (2018). *Demandas Estructurales y Condiciones de Sitio.*

- Extracción de los refuerzos

Es el resultado de las fuerzas de tensión en los refuerzos son considerables que los refuerzos se salen o son extraídos hacia fuera de la masa de suelo. (Suárez Díaz, 2009)

La estabilidad con respecto a la extracción de los refuerzos requiere que se cumplan los siguientes criterios:

$$T_{m\acute{a}x} \leq \frac{1}{FS_{PO}} F^* \gamma Z_P L_e C R_C \alpha \quad (21)$$

Donde:

FS_{PO} = factor de seguridad contra la extracción ≥ 1.5

$T_{m\acute{a}x}$ = tensión máxima de refuerzo

C = perímetro efectivo del refuerzo = 2 (para refuerzos de geomallas, geotextiles)

α = factor de Corrección de escala

F^* = factor de resistencia a la extracción (pull-out)

R_c = radio de cobertura

γZ_P = sobrecarga, incluyendo carga muerta, despreciando carga de tráfico

L_e = longitud detrás de superficie de falla, en la zona resistente

α = factor de corrección por escala por reducción no lineal de esfuerzo a lo largo del refuerzo

Por lo tanto, la longitud de empotramiento requerida en la zona de resistencia se puede determinar a partir de:

$$L_e \geq \frac{1.5 * T_{m\acute{a}x}}{F^* \gamma Z_P C R_C \alpha} \geq 1 \text{ m} \quad (22)$$

Tener en cuenta que las cargas de tráfico y otras cargas vivas no se incluyen en los cálculos de extracción. Si el criterio no se cumple para todas las capas de refuerzo, la longitud de refuerzo tiene que ser aumentada y el refuerzo tiene que ser de mayor a la resistencia de la extracción.

La longitud total de refuerzo, L requerida para la estabilidad interna se determina a partir de:

$$L = L_a + L_e \quad (23)$$

Donde:

L_a = longitud antes superficie de falla, medido desde la fachada

L_e = longitud detrás de superficie de falla, en la zona resistente

Calcular longitud de refuerzo antes de la superficie de falla:

$$L_a = (H - Z) \tan(45 - \varphi/2) - (H - Z) * \tan\theta \quad (24)$$

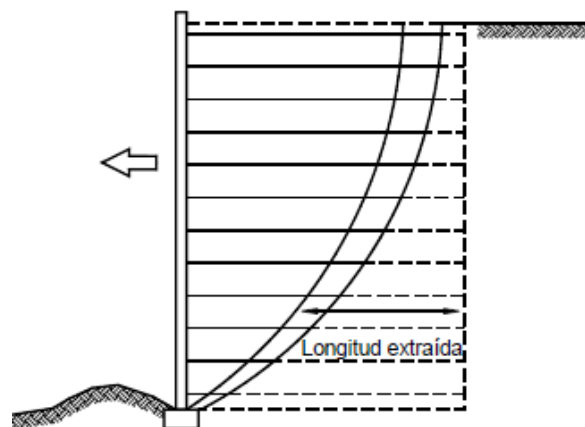
Donde:

H = altura total

Z = nivel de refuerzo

θ = ángulo de inclinación de la fachada

Figura 27. **Falla por estabilidad interna por extracción del refuerzo**



Fuente: Suárez Díaz. (2009). *Deslizamientos: Técnicas de Remediación*.

- Propiedades de diseño para refuerzo de geomalla

Las propiedades de los refuerzos utilizados en el diseño de MSME son los Coeficientes de Interacción Suelo -Geomalla (C_i) y la Resistencia a la tensión (T_{ult}). Cada proyecto de MSME, debe diseñarse con propiedades específicas de los refuerzos, es decir; los valores de las propiedades de la geomalla variarán según sean las condiciones de la estructura.

- Coeficiente de interacción suelo – Geomalla

Es una propiedad que se determina a partir de pruebas de extracción por medio de ensayos de pullout GRI-GG5 *Test Method for Geogrid Pullout* (Método de prueba para extracción de geomalla). Este coeficiente indica cuánto de la resistencia a la tensión que tiene el refuerzo es transferida al suelo para asegurar un comportamiento estructural uniforme de la masa de suelo reforzada. (MESA®, 2005)

Se calcula usando la siguiente ecuación:

$$C_i = \frac{F}{2L\sigma_n \tan\varphi} \quad (25)$$

Donde:

F= fuerza de extracción o pullout (lb/pie)

L= empotramiento de geomalla (pie)

σ_n = esfuerzo normal (lb/pie²)

φ = ángulo de fricción efectivo

Se debe tomar en cuenta que cada proveedor del refuerzo extensible debe indicar el valor del Coeficiente de Interacción Suelo – Geomalla.

Tabla X. **Coefficiente de interacción suelo-Geomalla**

Clasificación	Ángulo de Fricción	Ci
Grava, Grava Arenosa, y Mezclas de Grava-Arena-Limo (GW & GM)	>34°	0.80
Arenas bien Gradadas, Arenas Gruesas, y Mezclas de Arena-Limo (SW & SM)	>30°	0.75
Limos, Arenas Finas, Arenas Arcillosas, y Limos Arcillosos (SC & ML)	>28°	0.58

Fuente: MESA®. (2005). *Design Guidelness for Mesa Retaining Wall Systems*.

- Análisis sísmico de la estabilidad interna

Las cargas sísmicas producen un P_I , fuerza de inercia que actúa horizontalmente, además de las fuerzas estáticas existentes.

Esta fuerza dinámica aumentará en las fuerzas máximas de tensión en los refuerzos. Se supone que la ubicación y la pendiente de la línea de máxima fuerza de tracción no cambian durante la carga sísmica.

Los pasos para el cálculo de la estabilidad interna de análisis con respecto a la carga sísmica son los siguientes:

- Calcular la aceleración máxima en el muro y el P_I fuerza por unidad de ancho que actúa por encima de la base:

$$PI = Am W_A \quad (26)$$

$$A_m = (1.45 - A) * A \quad (27)$$

Donde:

W_A = peso de la zona activa

A = coeficiente de aceleración del lugar y donde A_m puede reducirse en base al movimiento lateral permisible

- Calcular la carga máxima estática total aplicada al refuerzo horizontal T_{max} de la siguiente manera:

- Calcular la tensión horizontal σH mediante el coeficiente K

$$\sigma H = K\sigma v + \Delta\sigma h = K\gamma Z + \Delta\sigma v K + \Delta\sigma h \quad (28)$$

- Calcular $T_{m\acute{a}x}$ componente máxima de carga de tensión:

$$T_{m\acute{a}x} = S_v \sigma H \quad (29)$$

- Calcular el incremento dinámico T_{md} directamente provocada por la PI fuerza de inercia en los refuerzos mediante la distribución de PI en los diferentes refuerzos proporcionalmente a su zona resistente (L_e). Esto lleva a:

$$T_{md} = P_I \frac{L_{ei}}{\sum_{i=1}^n L_{ei}} \quad (30)$$

Que es la longitud resistente del refuerzo en la capa i dividida por la suma de la longitud resistente para todas las capas de refuerzo.

- La fuerza máxima de tensión es:

$$T_{total} = T_{max} + T_{md} \quad (31)$$

Comprobar la estabilidad con respecto a la ruptura y retirada de la armadura, con factores de seguridad sísmica de 75 % del factor mínimo de seguridad estático permisible.

Para la ruptura de refuerzo geosintético, el refuerzo debe estar diseñado para resistir la componente estática y dinámica de la carga de la siguiente manera:

Para el componente estático:

$$T_{max} \leq \frac{S_{rs} * R_c}{(0.75) * F_S * R_F} \quad (32)$$

Para el componente dinámico, donde se aplica la carga por un corto tiempo, no se requiere una reducción lenta, por lo tanto:

$$T_{md} \leq \frac{S_{rt} * R_c}{(0.75) F_S * R_{F_D} * R_{F_{ID}}} \quad (33)$$

La resistencia a la ruptura del refuerzo geosintético es:

$$T_{ult} = S_{rs} + S_{rt} \quad (34)$$

Donde:

S_{rs} = fuerza del refuerzo para resistir la componente estática de la carga

S_{rt} = fuerza del refuerzo necesaria para resistir la carga dinámica

Para la ruptura bajo carga sísmica, para todos los refuerzos, el coeficiente de fricción F^* se debe reducir a 80 % del valor estático, que conduce a:

$$T_{total} \leq \frac{R_r R_c}{0.75 F_{SPO}} = \frac{C * (0.8 F^*)}{0.75 * 15} * \gamma Z * L_e * R_c \alpha \quad (35)$$

4. DISEÑO PARA MSME PARA ESTRIBO VERDADERO DE PUENTE Y ESTRIBO DE CONCRETO REFORZADO PARA PUENTE

4.1. MSME para estribo verdadero de puente

Están diseñados para apoyar las cargas del puente, considerando las cargas en la parte superior de la estructura. El procedimiento de diseño se ha ampliado en el capítulo anterior.

A continuación, se hace los cálculos para un MSME para estribo verdadero de puente, utilizando programa de diseño basado en metodología (FHWA NHI-00-043, 2001), a través de un software, que fue desarrollado para la verificación de la estabilidad de MSME, que permite análisis de estructuras de contención de gravedad usando el Método del Equilibrio Límite. (Software MacStARS W – Rel. 4.0, 2020) de la empresa Macafferri.

4.1.1. Estabilidad externa

En el diseño de la estabilidad externa del MSME, se calculó como una estructura de gravedad, considerando todas las fuerzas que actúan por encima de la base de fundición para analizar la estabilidad al volcamiento, deslizamiento y capacidad portante.

- Propiedades del suelo

Tabla XI. **Suelo: ESTRATO 1 (Descripción: arena limosa)**

Cohesión [kN/m ²]	95.61
Ángulo de fricción [°]	30.00
Valor de Ru	0.00
Peso unitario – natural [kN/m ³]	18.00
Peso unitario – saturado [kN/m ³]	18.00
Módulo elástico [kN/m ²]	0.00
Módulo de Poisson	0.30

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XII. **Suelo: PIEDRA (Descripción: piedra para gavión)**

Cohesión [kN/m ²]	10.00
Ángulo de fricción [°]	40.00
Valor de Ru	0.00
Peso unitario – natural [kN/m ³]	26.00
Peso unitario – saturado [kN/m ³]	26.00
Módulo elástico [kN/m ²]	0.00
Módulo de Poisson	0.30

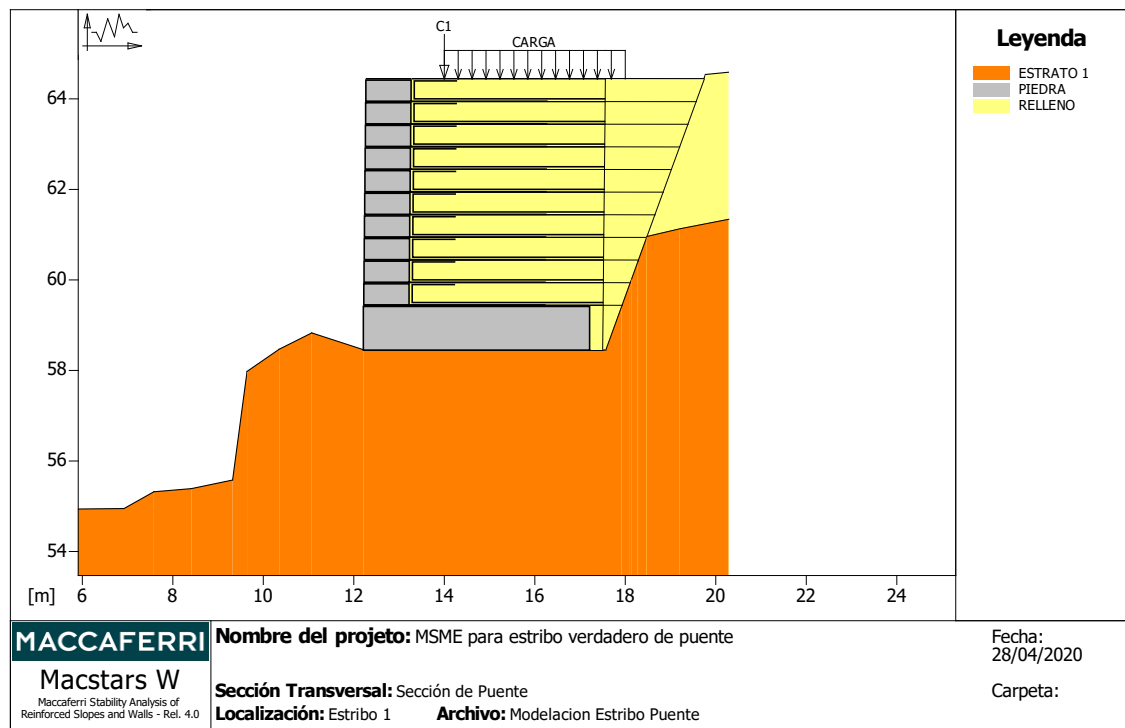
Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XIII. **Suelo: RELLENO (Descripción: limo arenoso)**

Cohesión [kN/m ²]	0.00
Ángulo de fricción [°]	28.00
Valor de Ru	0.00
Peso unitario – natural [kN/m ³]	19.00
Peso unitario – saturado [kN/m ³]	19.00
Módulo elástico [kN/m ²]	0.00
Módulo de Poisson	0.30

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Figura 28. **Sección transversal MSME como estribo verdadero de puente**



Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

- Perfil de la camada

Tabla XIV. **Camada: P1 Descripción del suelo: perfil 1 suelo:
ESTRATO 1**

X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
5.91	54.93	6.93	54.94	7.59	55.31	8.42	55.38
9.33	55.57	9.65	57.97	10.36	58.46	11.08	58.82
12.23	58.45	17.57	58.45	18.14	60.02	18.28	60.41
18.48	60.96	19.21	61.13	20.29	61.34		

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XV. **Camada: P2 Descripción del suelo: Perfil 2 suelo:
RELLENO**

X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
18.48	60.96	19.78	64.53	20.29	64.58		

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

- Bloques reforzados

Tabla XVI. **Bloque: TM1**

Dimensiones del bloque [m]	
Ancho de la Base=	5.28
Altura=	1.00
Origen del Bloque [m]	
Abscisa=	12.22
Ordenada=	58.44
Berma Inclinación Paramento [°]	0.00
Material de relleno para el Gavión	PIEDRA
Tipo de relleno estructural	Verificaciones como muro en gaviones
Relleno estructural	RELLENO
Suelo de relleno	RELLENO
Suelo del talud arriba de la estructura	RELLENO
Suelo de Fundación	ESTRATO 1
Parámetros para el cálculo de la capacidad portante según Brinch Hansen, Vesic o Meyerhof	
Profundidad de fundación [m]	0.00
Inclinación del talud al pie del muro [°]	0.00
Patrón de los refuerzos	
<i>Maccaferri – Gaviones (H= 1.00 – Ancho P-5.00)</i>	
Largo [m]	5.00
Ancho [m]	5.00
Altura [m]	1.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS .

Tabla XVII. **Bloque: TM2**

Dimensiones del bloque [m]	
Ancho de la Base=	5.28
Altura=	0.50
Inclinación Paramento [°]	0.00
Material de relleno para el Gavión	PIEDRA
Tipo de relleno estructural	Verificaciones como muro en gaviones
Relleno estructural	RELLENO
Suelo de relleno	RELLENO
Suelo del talud arriba de la estructura	RELLENO
Suelo de Fundación	ESTRATO 1
Parámetros para el cálculo de la capacidad portante según Brinch Hansen, Vesic o Meyerhof	
Profundidad de fundación [m]	0.00
Inclinación del talud al pie del muro [°]	0.00
Patrón de los refuerzos	
<i>Maccaferri- Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>	
<i>Maccaferri - Gaviones</i>	
Largo [m]	4.00
Ancho [m]	1.00
Altura [m]	0.50
<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 90</i>	
Largo [m]	4.28
Espaciamiento Vertical [m]	0.50
Offset [m]	0.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS

Tabla XVIII. **Bloque: TM3**

Dimensiones del bloque [m]	
Ancho de la Base=	5.28
Altura=	0.50
Inclinación Paramento [°]	0.00
Material de relleno para el Gavión	PIEDRA
Tipo de relleno estructural	Verificaciones como muro en gaviones
Relleno estructural	RELLENO
Suelo de relleno	RELLENO
Suelo del talud arriba de la estructura	RELLENO
Suelo de Fundación	ESTRATO 1
Parámetros para el cálculo de la capacidad portante según Brinch Hansen, Vesic o Meyerhof	
Profundidad de fundación [m]	0.00
Inclinación del talud al pie del muro [°]	0.00
Patrón de los refuerzos	
<i>Maccaferri- Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>	
<i>Maccaferri - Gaviones</i>	
Largo [m]	4.00
Ancho [m]	1.00
Altura [m]	0.50
<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 90</i>	
Largo [m]	4.28
Espaciamiento Vertical [m]	0.50
Offset [m]	0.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XIX. **Bloque: TM4**

Dimensiones del bloque [m]	
Ancho de la Base=	5.28
Altura=	0.50
Inclinación Paramento [°]	0.00
Material de relleno para el Gavión	PIEDRA
Tipo de relleno estructural	Verificaciones como muro en gaviones
Relleno estructural	RELLENO
Suelo de relleno	RELLENO
Suelo del talud arriba de la estructura	RELLENO
Suelo de Fundación	ESTRATO 1
Parámetros para el cálculo de la capacidad portante según Brinch Hansen, Vesic o Meyerhof	
Profundidad de fundación [m]	0.00
Inclinación del talud al pie del muro [°]	0.00
Patrón de los refuerzos	
<i>Maccaferri- Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>	
<i>Maccaferri - Gaviones</i>	
Largo [m]	4.00
Ancho [m]	1.00
Altura [m]	0.50
<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 90</i>	
Largo [m]	4.28
Espaciamiento Vertical [m]	0.50
Offset [m]	0.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XX. **Bloque: TM5**

Dimensiones del bloque [m]	
Ancho de la Base=	5.28
Altura=	0.50
Inclinación Paramento [°]	0.00
Material de relleno para el Gavión	PIEDRA
Tipo de relleno estructural	Verificaciones como muro en gaviones
Relleno estructural	RELLENO
Suelo de relleno	RELLENO
Suelo del talud arriba de la estructura	RELLENO
Suelo de Fundación	ESTRATO 1
Parámetros para el cálculo de la capacidad portante según Brinch Hansen, Vesic o Meyerhof	
Profundidad de fundación [m]	0.00
Inclinación del talud al pie del muro [°]	0.00
Patrón de los refuerzos	
<i>Maccaferri- Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>	
<i>Maccaferri - Gaviones</i>	
Largo [m]	4.00
Ancho [m]	1.00
Altura [m]	0.50
<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 90</i>	
Largo [m]	4.28
Espaciamiento Vertical [m]	0.50
Offset [m]	0.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XXI. **Bloque: TM6**

Dimensiones del bloque [m]	
Ancho de la Base=	5.28
Altura=	0.50
Inclinación Paramento [°]	0.00
Material de relleno para el Gavión	PIEDRA
Tipo de relleno estructural	Verificaciones como muro en gaviones
Relleno estructural	RELLENO
Suelo de relleno	RELLENO
Suelo del talud arriba de la estructura	RELLENO
Suelo de Fundación	ESTRATO 1
Parámetros para el cálculo de la capacidad portante según Brinch Hansen, Vesic o Meyerhof	
Profundidad de fundación [m]	0.00
Inclinación del talud al pie del muro [°]	0.00
Patrón de los refuerzos	
<i>Maccaferri- Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>	
<i>Maccaferri - Gaviones</i>	
Largo [m]	4.00
Ancho [m]	1.00
Altura [m]	0.50
<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 90</i>	
Largo [m]	4.28
Espaciamiento Vertical [m]	0.50
Offset [m]	0.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XXII. **Bloque: TM7**

Dimensiones del bloque [m]	
Ancho de la Base=	5.28
Altura=	0.50
Inclinación Paramento [°]	0.00
Material de relleno para el Gavión	PIEDRA
Tipo de relleno estructural	Verificaciones como muro en gaviones
Relleno estructural	RELLENO
Suelo de relleno	RELLENO
Suelo del talud arriba de la estructura	RELLENO
Suelo de Fundación	ESTRATO 1
Parámetros para el cálculo de la capacidad portante según Brinch Hansen, Vesic o Meyerhof	
Profundidad de fundación [m]	0.00
Inclinación del talud al pie del muro [°]	0.00
Patrón de los refuerzos	
<i>Maccaferri- Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>	
<i>Maccaferri - Gaviones</i>	
Largo [m]	4.00
Ancho [m]	1.00
Altura [m]	0.50
<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 90</i>	
Largo [m]	4.28
Espaciamiento Vertical [m]	0.50
Offset [m]	0.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XXIII. **Bloque: TM8**

Dimensiones del bloque [m]	
Ancho de la Base=	5.28
Altura=	0.50
Inclinación Paramento [°]	0.00
Material de relleno para el Gavión	PIEDRA
Tipo de relleno estructural	Verificaciones como muro en gaviones
Relleno estructural	RELLENO
Suelo de relleno	RELLENO
Suelo del talud arriba de la estructura	RELLENO
Suelo de Fundación	ESTRATO 1
Parámetros para el cálculo de la capacidad portante según Brinch Hansen, Vesic o Meyerhof	
Profundidad de fundación [m]	0.00
Inclinación del talud al pie del muro [°]	0.00
Patrón de los refuerzos	
<i>Maccaferri- Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>	
<i>Maccaferri - Gaviones</i>	
Largo [m]	4.00
Ancho [m]	1.00
Altura [m]	0.50
<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 90</i>	
Largo [m]	4.28
Espaciamiento Vertical [m]	0.50
Offset [m]	0.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XXIV. **Bloque: TM9**

Dimensiones del bloque [m]	
Ancho de la Base=	5.28
Altura=	0.50
Inclinación Paramento [°]	0.00
Material de relleno para el Gavión	PIEDRA
Tipo de relleno estructural	Verificaciones como muro en gaviones
Relleno estructural	RELLENO
Suelo de relleno	RELLENO
Suelo del talud arriba de la estructura	RELLENO
Suelo de Fundación	ESTRATO 1
Parámetros para el cálculo de la capacidad portante según Brinch Hansen, Vesic o Meyerhof	
Profundidad de fundación [m]	0.00
Inclinación del talud al pie del muro [°]	0.00
Patrón de los refuerzos	
<i>Maccaferri- Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>	
<i>Maccaferri - Gaviones</i>	
Largo [m]	4.00
Ancho [m]	1.00
Altura [m]	0.50
<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 90</i>	
Largo [m]	4.28
Espaciamiento Vertical [m]	0.50
Offset [m]	0.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XXV. **Bloque: TM10**

Dimensiones del bloque [m]	
Ancho de la Base=	5.28
Altura=	0.50
Inclinación Paramento [°]	0.00
Material de relleno para el Gavión	PIEDRA
Tipo de relleno estructural	Verificaciones como muro en gaviones
Relleno estructural	RELLENO
Suelo de relleno	RELLENO
Suelo del talud arriba de la estructura	RELLENO
Suelo de Fundación	ESTRATO 1
Parámetros para el cálculo de la capacidad portante según Brinch Hansen, Vesic o Meyerhof	
Profundidad de fundación [m]	0.00
Inclinación del talud al pie del muro [°]	0.00
Patrón de los refuerzos	
<i>Maccaferri- Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>	
<i>Maccaferri - Gaviones</i>	
Largo [m]	4.00
Ancho [m]	1.00
Altura [m]	0.50
<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 90</i>	
Largo [m]	4.28
Espaciamiento Vertical [m]	0.50
Offset [m]	0.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XXVI. **Bloque: TM11**

Dimensiones del bloque [m]	
Ancho de la Base=	5.28
Altura=	0.50
Inclinación Paramento [°]	0.00
Material de relleno para el Gavión	PIEDRA
Tipo de relleno estructural	Verificaciones como muro en gaviones
Relleno estructural	RELLENO
Suelo de relleno	RELLENO
Suelo del talud arriba de la estructura	RELLENO
Suelo de Fundación	ESTRATO 1
Parámetros para el cálculo de la capacidad portante según Brinch Hansen, Vesic o Meyerhof	
Profundidad de fundación [m]	0.00
Inclinación del talud al pie del muro [°]	0.00
Patrón de los refuerzos	
<i>Maccaferri- Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>	
<i>Maccaferri - Gaviones</i>	
Largo [m]	4.00
Ancho [m]	1.00
Altura [m]	0.50
<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 90</i>	
Largo [m]	4.28
Espaciamiento Vertical [m]	0.50
Offset [m]	0.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

- Sobrecargas

Tabla XXVII. **Sobrecargas**

Cargas Concentradas: C1	
Descripción: Carga Estribo 1	
Intensidad [kN/m]	1245.00
Inclinación [°]	0.00
Abscisa [m]	14.00
Cargas Distribuidas: CARGA	
Descripción: Carga	
Intensidad [kN/m ²]	30.00
Inclinación [°]	0.00
Abscisa [m]	De 14.00 hasta 18.00
Efectos Sísmicos	
Aceleración [m/s ²]	
Horizontal	2.84
Vertical [°]	1.77

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

- Propiedades de los refuerzos utilizados

Tabla XXVIII. **Propiedades de Maccaferri – Gaviones (H= 1.00 – Ancho P-5.00)**

Resistencia a la Tracción [kN/m]	50.00
Tasa de deformación plástica	2.00
Coefficiente de deformación elástica [m ³ /kN]	1.10e-04
Rigidez del refuerzo [kN/m]	500.00
Largo de anclaje Mínimo [m]	0.15
Factor de seg. contra la rotura (grava)	1.43
Factor de seg. contra el arrancamiento (Pull-out)	1.00
Factor de seg. contra la rotura (arena)	1.24
Factor de seg. contra el arrancamiento (Pull-out)	1.00
Factor de seg. contra la rotura (arena limosa)	1.15
Factor de seg. contra el arrancamiento (Pull-out)	1.00
Factor de seg. contra la rotura (arcilla arenosa)	1.24
Factor de seg. contra el arrancamiento (Pull-out)	1.00
Factor de interacción refuerzo/refuerzo	0.30
Coefficiente de interacción refuerzo-grava	0.90
Coefficiente de interacción refuerzo-arena	0.65
Coefficiente de interacción refuerzo-limo	0.50
Coefficiente de interacción refuerzo-arcilla	0.30

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XXIX. **Propiedades de Maccaferri - MacGrid WG - WG 90**

Resistencia a la Tracción [kN/m]	90.00
Tasa de deformación plástica	2.00
Coeficiente de deformación elástica [m ³ /kN]	1.10e-04
Rigidez del refuerzo [kN/m]	750.00
Largo de anclaje Mínimo [m]	0.15
Factor de seg. contra la rotura (grava)	1.75
Factor de seg. contra el arrancamiento (Pull-out)	1.00
Factor de seg. contra la rotura (arena)	1.69
Factor de seg. contra el arrancamiento (Pull-out)	1.00
Factor de seg. contra la rotura (arena limosa)	1.69
Factor de seg. contra el arrancamiento (Pull-out)	1.00
Factor de seg. contra la rotura (arcilla arenosa)	1.69
Factor de seg. contra el arrancamiento (Pull-out)	1.00
Factor de interacción refuerzo/refuerzo	0.20
Coeficiente de interacción refuerzo-grava	0.90
Coeficiente de interacción refuerzo-arena	0.90
Coeficiente de interacción refuerzo-limo	0.70
Coeficiente de interacción refuerzo-arcilla	0.50

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XXX. **Propiedades de Maccaferri - Terramesh System
Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años**

Resistencia a la Tracción [kN/m]	50.00
Tasa de deformación plástica	2.00
Coefficiente de deformación elástica [m ³ /kN]	1.10e-04
Rigidez del refuerzo [kN/m]	500.00
Largo de anclaje Mínimo [m]	0.15
Factor de seg. contra la rotura (grava)	1.43
Factor de seg. contra el arrancamiento (Pull-out)	1.00
Factor de seg. contra la rotura (arena)	1.24
Factor de seg. contra el arrancamiento (Pull-out)	1.00
Factor de seg. contra la rotura (arena limosa)	1.24
Factor de seg. contra el arrancamiento (Pull-out)	1.00
Factor de seg. contra la rotura (arcilla arenosa)	1.24
Factor de seg. contra el arrancamiento (Pull-out)	1.00
Factor de interacción refuerzo/refuerzo	0.30
Coefficiente de interacción refuerzo-grava	0.90
Coefficiente de interacción refuerzo-arena	0.65
Coefficiente de interacción refuerzo-limo	0.5
Coefficiente de interacción refuerzo-arcilla	0.30

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

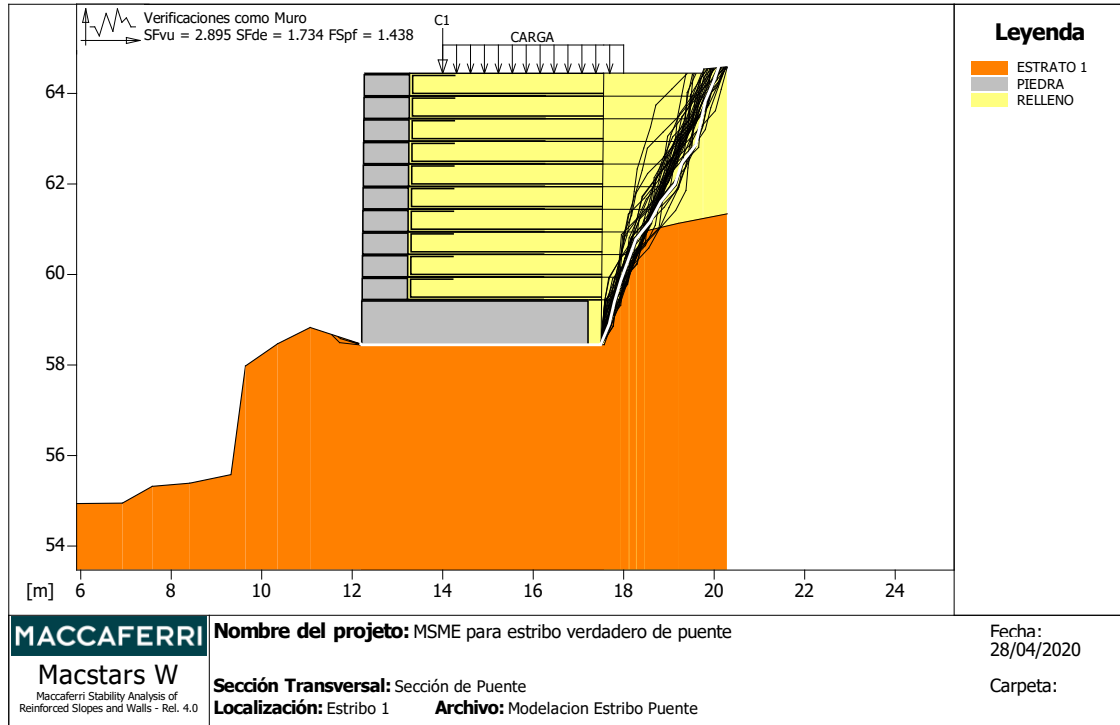
- Verificación como muro de gravedad

Tabla XXXI. **Resultados del Análisis como muro de gravedad**

Bloque Considerado: TM1	
Fuerza Estabilizante [kN/m]	884.58
Fuerza Solicitante [kN/m]	305.58
Factor de Seguridad contra el Deslizamiento	2.895
Momento Estabilizante [kN*m/m]	2093.50
Momento Solicitante [kN*m/m]	1207.70
Factor de Seguridad contra el Vuelco	1.734
Capacidad portante de acuerdo con el método del Equilibrio Limite	
Capacidad portante [kN/m ²]	387.05
Presión media [kN/m ²]	269.25
Factor de seguridad de la capacidad portante del suelo de apoyo	1.438
Fundación equivalente [m]	2.69
Excentricidad fuerza normal [m]	1.29
Brazo del momento [m]	3.95
Fuerza normal [kN]	657.75
Tensión normal (Máxima) en el borde externo [kN/m ²]	325.59
Tensión normal (Mínima) en el borde interno [kN/m ²]	0.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Figura 29. **Sección transversal para verificación como muro de gravedad**



Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

4.1.2. Estabilidad global

La estabilidad general se analizó mediante la fuerza (F) actuante en los refuerzos de acuerdo con el Método Rígido Análisis de estabilidad con superficies circulares de acuerdo con el Método de Bishop.

Tabla XXXII. **Resultados del Análisis de Estabilidad Global**

Factor de Seguridad Calculado	2.501
Número de puntos de inicio en el Primer segmento	5
Número total de superficies verificadas	105
Largo mínimo de la base de las lámelas [m]	0.50
Ángulo límite superior para la búsqueda [°]	0.00
Ángulo límite inferior para la búsqueda [°]	0.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XXXIII. **Límites de búsqueda para las superficies de ruptura**

Limite inicial, abscisas [m]		Limite final, abscisas [m]	
Primer punto	Segundo punto	Primer punto	Segundo punto
10.00	14.00	15.00	20.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XXXIV. **Bloque: TM1 Gaviones**

<i>Maccaferri – Gaviones (H= 1.00 – Ancho P-5.00)</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
[m]	rotura [kN/m]	arrancamiento [kN/m]	agente [kN/m]	1/Fmax	
0.000	50.0	313.7	40.3	1.24	7.78

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XXXV. **Bloque: TM2 Terramesh System Polimac**

<i>Maccaferri - Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	50.0	51.2	40.3	1.24	1.27

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XXXVI. **Bloque: TM2 MacGrid WG- WG 100**

<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 100</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	90.0	168.1	53.3	1.69	3.15

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XXXVII. **Bloque: TM3 Terramesh System Polimac**

<i>Maccaferri - Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	50.0	20.7	20.7	2.42	1.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XXXVIII. **Bloque: TM3 MacGrid WG- WG 100**

<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 100</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	90.0	113.1	53.3	1.69	2.12

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XXXIX. **Bloque: TM4 MacGrid WG- WG 100**

<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 100</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	90.0	70.9	53.3	1.69	1.33

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XL. **Bloque: TM5 MacGrid WG- WG 100**

<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 100</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	90.0	39.3	39.3	2.29	1.00

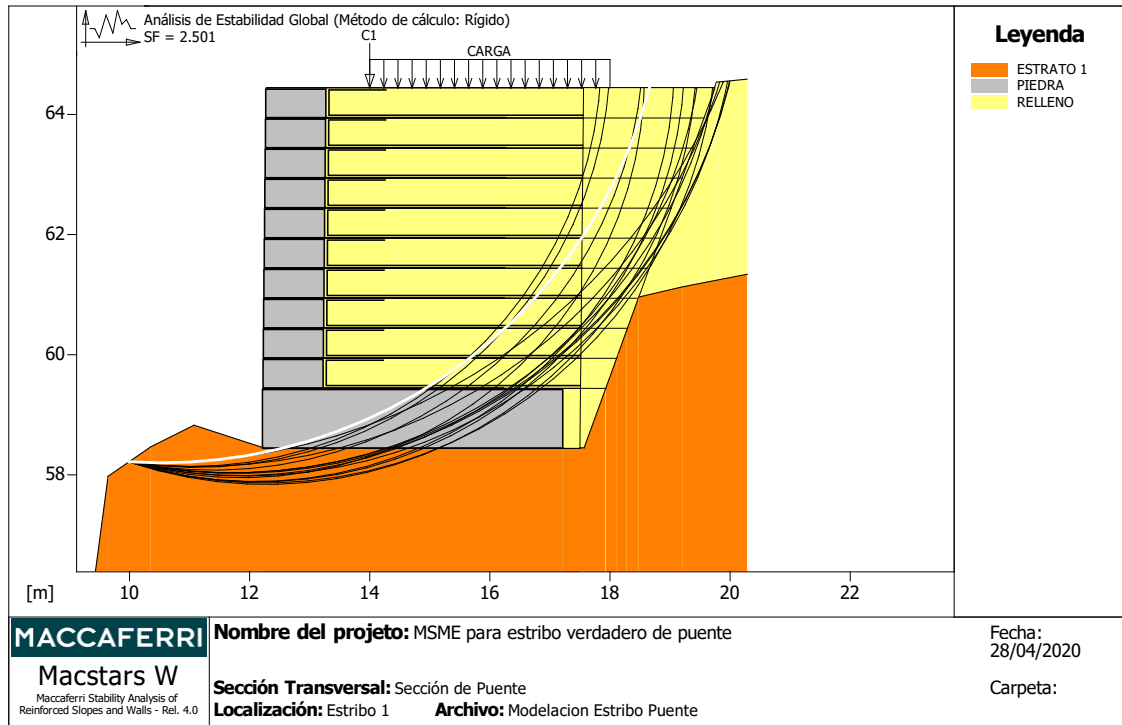
Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XLI. **Bloque: TM6 MacGrid WG- WG 100**

Maccaferri - MacGrid WG - WG 100					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	90.0	16.3	16.3	5.52	1.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Figura 30. **Sección transversal para verificación de la estabilidad global**



Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

- Cálculo de los asentamientos

Punto considerado (Abscisa) [m]: 15.00

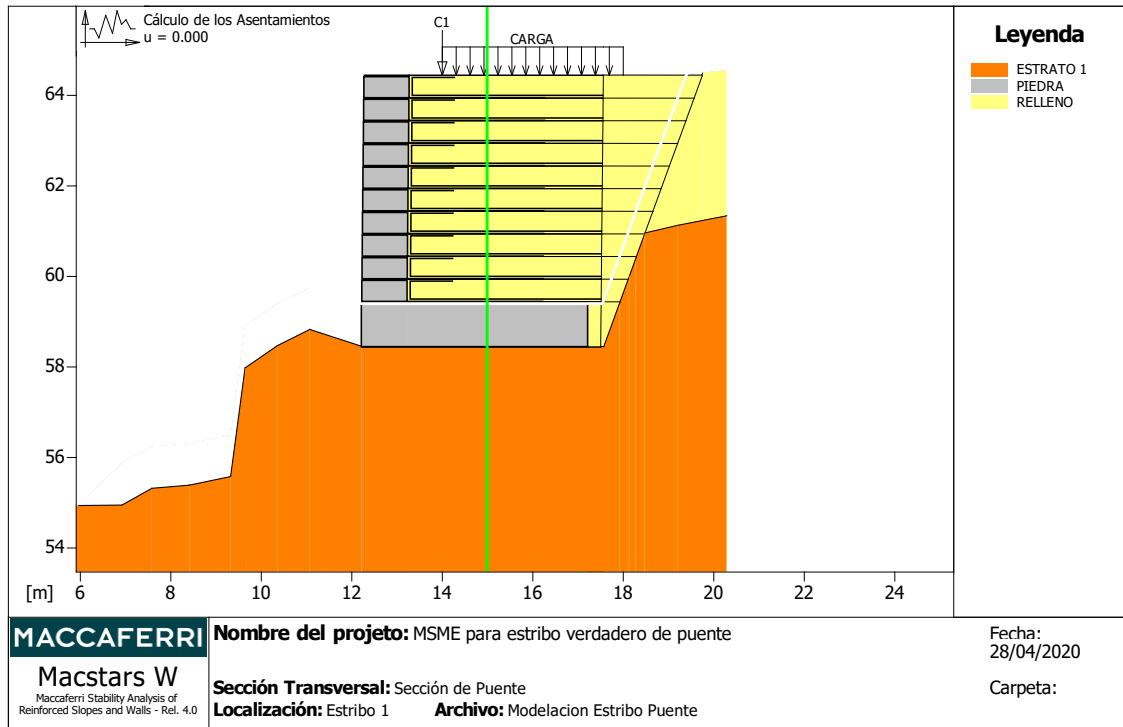
Asentamiento Correspondiente [m]: 0.00

Tabla XLII. **Coordenadas de la superficie poligonal que define el suelo contenido atrás de la estructura de suelo reforzado**

X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
5.91	55.87	6.91	55.89	7.57	56.26	8.40	56.33
9.31	56.51	9.62	58.91	10.34	59.41	11.06	59.76
12.20	59.39	17.55	59.39	18.12	60.96	18.26	61.35
18.46	61.91	19.42	64.49	20.29	64.57		

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS

Figura 31. Sección transversal para cálculo de los asentamientos



Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

4.1.3. Estabilidad interna

La resistencia a la tensión última de la geomalla se basa en el comportamiento de la deformación por tensión a largo plazo del MSME, de acuerdo con la fuerza actuante en los refuerzos de acuerdo con el Método Rígido; análisis de estabilidad con superficies circulares de acuerdo con el Método de Bishop.

Tabla XLIII. **Resultados del análisis de Estabilidad Global**

Factor de Seguridad Calculado	1.023
Número de puntos de inicio en el Primer segmento	1
Número total de superficies verificadas	100
Largo mínimo de la base de las lámelas [m]	0.50
Ángulo límite superior para la búsqueda [°]	90.00
Ángulo límite inferior para la búsqueda [°]	0.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XLIV. **Límites de búsqueda para las superficies de ruptura Bloque TM3**

Limite inicial, abscisas [m]		Limite final, abscisas [m]	
Primer punto	Segundo punto	Primer punto	Segundo punto
16.00	19.65	15.00	20.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XLV. **Bloque: TM4 Terramesh System Polimac**

<i>Maccaferri - Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	50.0	121.7	40.3	1.24	3.02

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XLVI. **Bloque: TM5 Terramesh System Polimac**

<i>Maccaferri - Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	50.0	91.3	40.3	1.24	2.27

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XLVII. **Bloque: TM6 Terramesh System Polimac**

<i>Maccaferri - Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	50.0	71.3	40.3	1.24	1.77

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XLVIII. **Bloque: TM6 MacGrid WG- WG 100**

<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 100</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	90.0	53.8	53.3	1.69	1.01

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla XLIX. **Bloque: TM7 Terramesh System Polimac**

<i>Maccaferri - Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	50.0	56.7	40.3	1.24	1.41

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla L. **Bloque: TM7 MacGrid WG- WG 100**

<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 100</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	90.0	52.5	52.5	1.71	1.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla LI. **Bloque: TM8 Terramesh System Polimac**

<i>Maccaferri - Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	50.0	41.1	40.3	1.24	1.02

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla LII. **Bloque: TM8 MacGrid WG- WG 100**

<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 100</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	90.0	53.2	53.2	1.69	1.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla LIII. **Bloque: TM9 Terramesh System Polimac**

<i>Maccaferri - Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	50.0	27.6	27.6	1.81	1.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla LIV. **Bloque: TM9 MacGrid WG- WG 100**

<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 100</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	90.0	52.1	52.1	1.73	1.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla LV. **Bloque: TM10 Terramesh System Polimac**

<i>Maccaferri - Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	50.0	16.7	16.7	2.99	1.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla LVI. **Bloque: TM10 MacGrid WG- WG 100**

<i>Maccaferri - MacGrid WG - WG 100</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	90.0	47.6	47.6	1.89	1.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla LVII. **Bloque: TM11 Terramesh System Polimac**

<i>Maccaferri - Terramesh System Polimac -80 – 3.7 – 0.5x 1.0 Polimac 120 años</i>					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	50.0	8.3	8.3	6.02	1.00

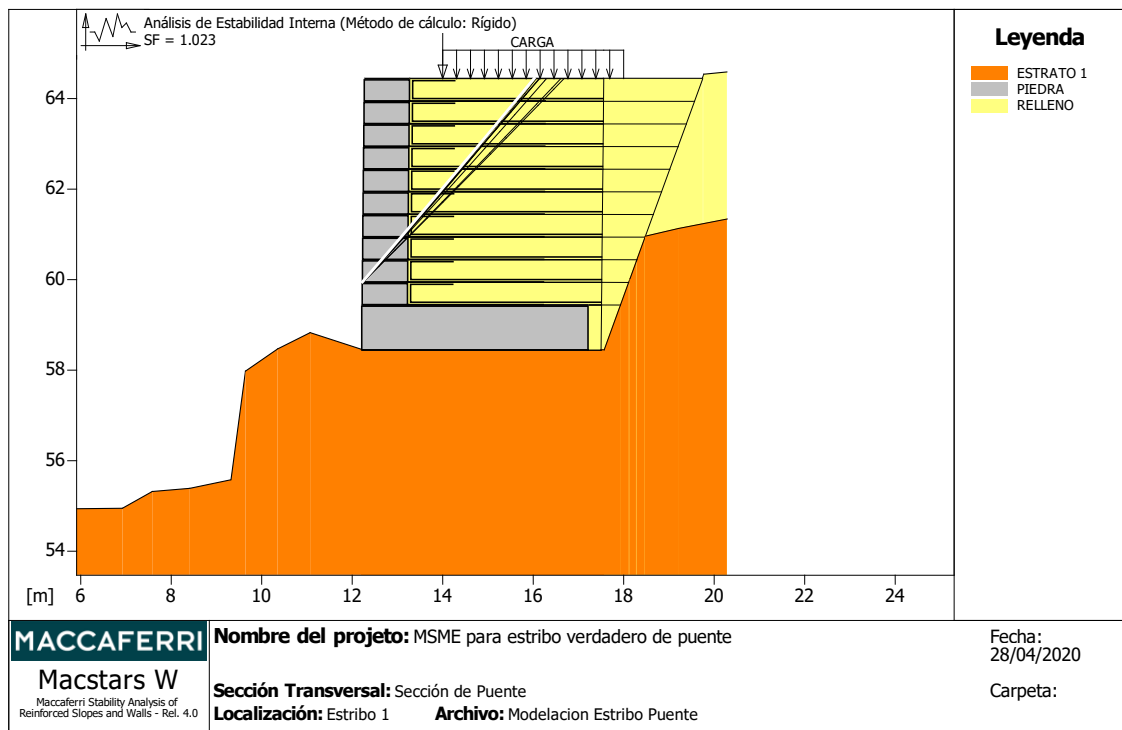
Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Tabla LVIII. **Bloque: TM11 MacGrid WG- WG 100**

Maccaferri - MacGrid WG - WG 100					
Y	Tb	Tp	Td	Tb/Td	Tp/Td
	rotura	arrancamiento	agente	1/Fmax	
[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
0.000	90.0	39.2	39.2	2.30	1.00

Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

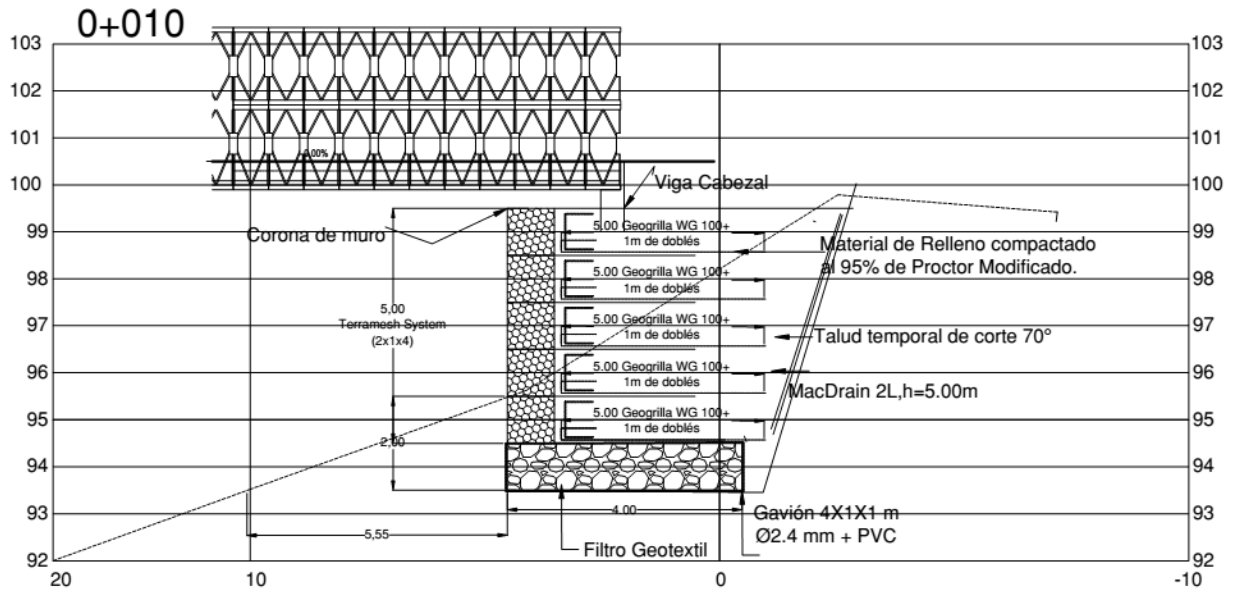
Figura 32. **Sección transversal para estabilidad interna**



Fuente: elaboración propia, empleando programa MacStARS.

Esta es la propuesta de diseño del MSME para estribo verdadero de puentes, empleando mallas de doble torsión forradas en PVC.

Figura 33. Propuesta de diseño MSME para estribo verdadero de puente



Fuente: elaboración propia, empleando programa AutoCAD 2013.

4.2. Estribo de concreto reforzado para puente

Los estribos son los apoyos extremos del puente, que al mismo tiempo soporta las cargas de la superestructura, sirve de contención del suelo en muros de accesos y por esto está sometido al empuje de las tierras (Herrera, 1996). A continuación, se presenta el diseño de un estribo de concreto reforzado:

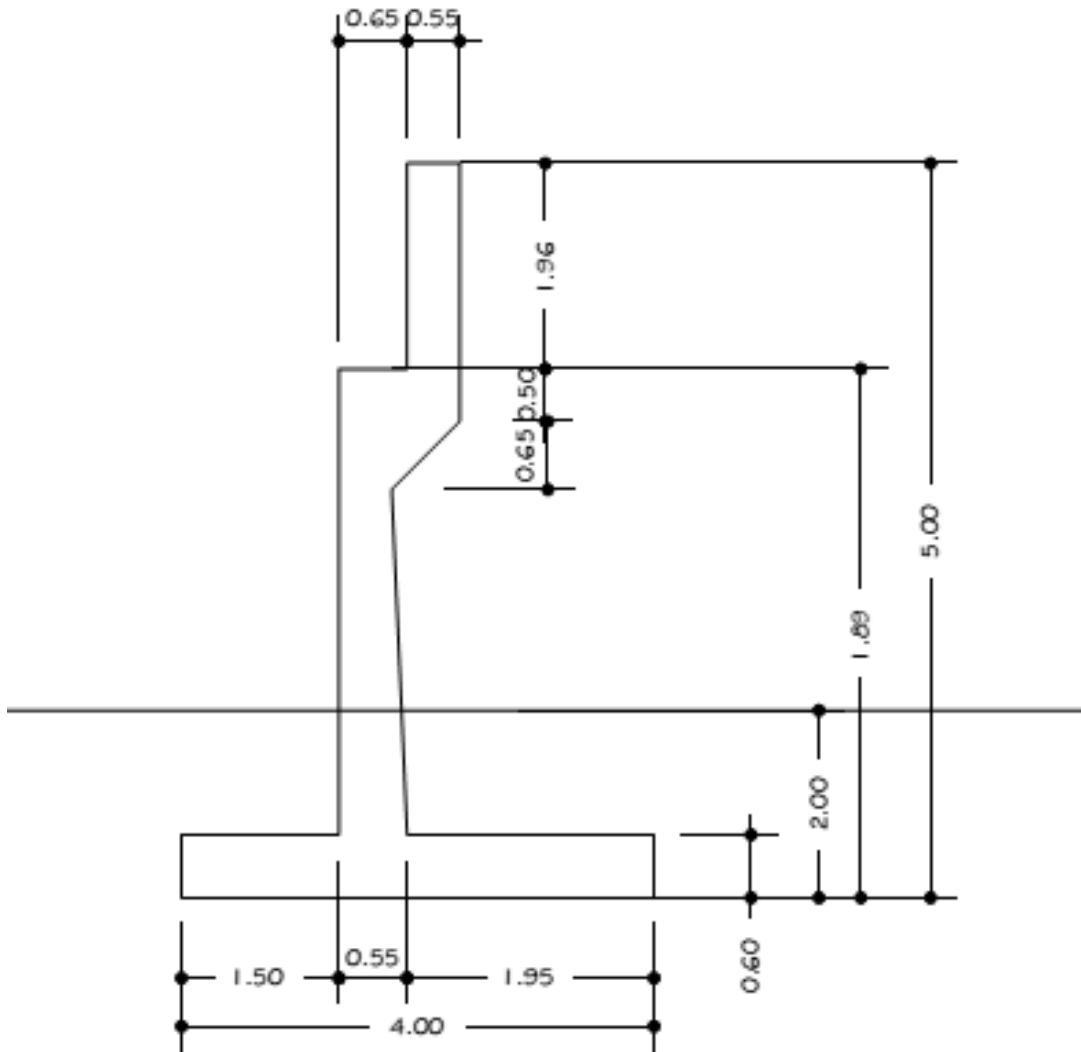
Tabla LIX. **Datos del estribo de concreto reforzado**

H=	5.00 m	Altura de estribo
L=	4.00 m	Longitud total
CC=	1245.00 KN/m	Cargas concentradas
CD=	30 KN/m ²	Carga distribuida
Vs =	100 Ton/m ²	Valor soporte del suelo
Φ =	30.00 °	Ángulo de fricción del suelo
γ =	1.80 Ton/m ³	Peso específico del suelo
f'c =	280 kg/m ²	Concreto
fy =	4,200 kg/m ²	Refuerzo
d=	2.00 m	Desplante
Kh =	0.29 g	Coefficiente sísmico horizontal
Kv =	0.18 g	Coefficiente sísmico vertical

Fuente: elaboración propia.

El valor soporte para este caso del estribo de concreto reforzado, se aumentó, por lo que se requiere una estabilización del suelo de cimentación, para llegar al valor ideal para mejorar las condiciones de este tipo de suelo de fundación.

Figura 34. Dimensiones sobre el estribo



Fuente: elaboración propia, empleando programa AutoCAD 2013.

- Cargas y fuerzas
 - Carga muerta

Tabla LX. **Peso de muro por metro de largo**

Elemento	Fórmula	
1	$(F \times (K - N - H)) \times 2.4 =$	2.93 Ton
2	$((B-F) \times (J-H) \times 0.5) \times 2.4 =$	0.08 Ton
3	$D \times N \times 2.4 =$	3.06 Ton
4	$(D+E-F) \times M \times 2.4 =$	0.78 Ton
5	$(D+E-F) \times L \times 0.5 \times 2.4 =$	0.51 Ton
SUMA		7.35 Ton/m

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXI. **Centro de carga del peso del cuerpo del muro**

Elemento	Peso	Distancia	Momento
	ton	m	t-m
1	2.93	2.20	6.44
2	0.08	2.47	0.19
3	3.06	2.78	8.48
4	0.78	2.78	2.16
5	0.51	2.67	1.35
Suma	7.35		18.63
X =	Momento / Peso Total		
X =	2.54 m		

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXII. **Cálculo del peso de la zapata y de los rellenos en un metro de longitud**

Fórmula	Peso	
$(L-(C+E+D))x(K-1)xg =$	7.13 Ton	Relleno tras respaldo
$Cx(I-H)xg =$	1.76 Ton	Relleno posterior al respaldo
$Lx2.4 =$	5.76 Ton	Zapata

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIII. **Condiciones de carga**

No. de vigas =	1
Longitud total de viga =	4.00 m
Peso /m de una viga =	12.45 Ton/m
Peso total de losa del claro =	28.20 Ton
Peso total de diafrag. =	8.00 Ton

Fuente: elaboración propia.

- Superestructura

Tabla LXIV. **Carga muerta**

Descarga sobre el muro por trabe =	43.00 Ton
Descarga total de todas las trabes =	43.00 Ton
Descarga por metro lineal en el estribo =	10.75 Ton

Fuente: elaboración propia.

- Carga Viva

Tabla LXV. **Carga viva**

Carga viva	
5.00 Ton	Carga viva peatonal total
2.50 Ton	Carga viva peatonal sobre el estribo
0.63 Ton	Carga viva peatonal en un metro del estribo
Carga viva de un camión T3-S3=T3-S2-R4	
11.40 Ton	Rmax una banda de circulación
5	No. de bandas de circulación
57.00 Ton	Rmax en el estribo por todas las bandas
9.91 Ton	Rmax por metro lineal del estribo

Fuente: elaboración propia.

- Empuje de tierras

Tabla LXVI. **Cálculo del empuje activo, según la teoría de Rankine**

$Ea = (g H^2 Ka) 0.5 = 7.50 \text{ Ton/m}$
$Ka = \tan^2 (45-f/2) = 0.33$
$f/2 = 15.00^\circ$
Localización = $H/3 = 1.67 \text{ m}$
Considerando una sobrecarga de 30 kg/m^2
$Esc = Ka Q H = 0.50 \text{ Ton/m}$
Localización = $H/2 = 2.50 \text{ m}$

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVII. **Cálculo del empuje pasivo**

Ep = ((g H² Kp) 0.5) Fc	
Ep =	1.09 Ton/m
localización = J / 3 =	0.37 m
Factor de corrección =	0.33
Kp =	tan² (45+f/2)
f/2 =	15.00 °
Kp =	3.00

Fuente: elaboración propia.

- Fuerza sísmica

Método de MONONOBE OKABE (fuerza de sísmica)

- Método pseudo estático
 - ✓ Cálculo del Empuje activo dinámico sísmico

$$E_{AE} = 1/2 \gamma(1 - K_V) * K_{AE} * H^2 = 13.66 \text{ Ton/m} \quad (36)$$

- ✓ Cálculo del coeficiente dinámico de empuje de tierras

Coeficiente de Empuje Lateral Activo, ka

$$ka = \frac{\text{sen}2(\theta+\phi'f)}{\Gamma [\text{sen}2\theta \text{se}(\theta-\delta)]} \quad (37)$$

$$ka = 0.741$$

Y Γ será igual a:

$$\Gamma = \left[1 + \sqrt{\frac{\text{se}(\phi'f+\delta)\text{sen}(\phi'f-\beta)}{\text{sen}(\theta-\delta)\text{sen}(\theta+\beta)}} \right]^2 \quad (38)$$

$$\Gamma = 2.326$$

Donde:

δ es el ángulo de fricción entre relleno y muro

β es el ángulo que forma la superficie del relleno respecto de la horizontal

θ es el ángulo que forma el respaldo del muro respecto de la horizontal

ϕ' es el ángulo efectivo de fricción interna

- Método de COULUMB

- ✓ Cálculo del empuje activo estático

$$E_A = \frac{1}{2} \gamma * K_A * H^2 = 7.50 \text{ ton/m} \quad (39)$$

- ✓ Cálculo del coeficiente estático de empuje de tierra
 $i=0$

$$K_A = (1 - \text{seno}\Phi)/(1 + \text{seno}\Phi) = 0.333 \quad (40)$$

- ✓ Cálculo de la distancia de la aplicación del empuje activo dinámico

$$H' = \frac{(E_{AE} - E_A) * 0.6H + \frac{E_A H}{3}}{E_{AE}} = 2.268 \text{ m} \quad (41)$$

- ✓ Cálculo de momento por empuje sísmico dinámico

$$F = H' * E_{AE} = 30.99 \text{ ton} - \text{m} \quad (42)$$

- Revisión por capacidad de carga

Tabla LXVIII. **Capacidad de carga**

Momento de volteo del empuje activo =	12.5 Ton-m
Momento de volteo de la sobrecarga =	1.2 Ton-m
Momento de volteo del empuje pasivo =	0.4 Ton-m
Momento de volteo por sismo dinámico =	31.0 Ton-m

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIX. **Condición de carga muerta + empuje**

Concepto	Carga	Distancia	Momento
	ton	m	ton - m
Descarga de traveses (CM)	10.8	2.20	23.7
Cuerpo del muro	7.4	2.54	18.6
Zapata	5.8	2.00	11.5
Relleno tras respaldo	7.1	3.25	23.2
Relleno posterior al respaldo	1.8	0.98	1.7
Empuje activo			-12.5
Empuje sobrecarga			-1.2
Empuje pasivo			0.4
Suma	32.7		65.3
X = momento / peso =		2.00 m	
excentricidad = (L/2) - X =		0.00 m	
Pt =		32.74 Ton	

Fuente: elaboración propia.

$$R = (Pt / A) \times (1 \pm (6e / L))$$

$$A = 1.0 \times L = 4.0 \quad \text{m}^2$$

$$R = 8.2 \times (1 \pm 0.01)$$

$$R = 8.2 \quad \text{ton / m}^2$$

$$R_{adm} = 100.0 \quad \text{ton / m}^2$$

$R_{adm} > R$ o.k. **SI CUMPLE**

- Revisión

$$Mv_{total} = M_{empuje\ activo} + M_{empuje\ sc} \quad (43)$$

$$M_v \text{ total} = 15.7 \text{ ton} - m$$

Temporal

$$M \text{ resistente} = M \text{ peso del muro} + \text{relleno ant. al respaldo} + \text{relleno post. al respaldo} + \text{zapata} \quad (44)$$

$$M \text{ resistente} = 55.0 \text{ ton} - m$$

$$F.S. = M_r / M_v$$

$$F.S. = 3.50 > 1.5 \quad \text{SI CUMPLE}$$

Servicio

$$M \text{ resistente} = M \text{ peso del muro} + \text{rellenos} + \text{zapata} + \text{descarga de traves (CM)} \quad (45)$$

$$M \text{ resistente} = 71.2 \text{ ton} - m$$

$$F.S. = M_r / M_v \quad (46)$$

$$F.S. = 4.50 > 1.5 \quad \text{SI CUMPLE}$$

Tabla LXX. Condición de carga muerta + empuje + carga viva

Concepto	Carga	Distancia	Momento
	ton	m	ton - m
Descarga de traves (CV)	14.9	2.20	32.7
Descarga de traves (CM)	10.8	2.20	23.7
Cuerpo del muro	7.4	2.54	18.6
Zapata	5.8	2.00	11.5
Relleno tras respaldo	7.1	3.25	23.2
Relleno posterior al respaldo	1.8	0.98	1.7
Empuje activo			-12.5
Empuje sobrecarga			-1.2
Empuje pasivo			0.4
Suma	47.6		65.3
X = momento / peso =		1.37 m	
excentricidad = (L/2) - X =		0.63 m	
Pt =		47.62 Ton	

Fuente: elaboración propia.

$$R = (Pt / A) \times (1 \pm (6 e / L))$$

$$A = 1.0 \times L = 4.00 \quad \text{m}^2$$

$$R = 11.9 \times (1 \pm 0.94)$$

$$R = 23.1 \quad \text{ton / m}^2$$

$$R_{adm} = 100 \quad \text{ton / m}^2$$

$R_{adm} > R$ o.k. **SI CUMPLE**

- Revisión

$$M_v \text{ total} = M_{empuje activo} + M_{empuje sc} \quad (47)$$

$$M_v \text{ total} = 13.7 \text{ ton} - m$$

Temporal

$$M \text{ resistente} = M \text{ peso del muro} + \text{relleno} + \text{zapata} \quad (48)$$

$$M \text{ resistente} = 52.0 \text{ ton} - m$$

$$F.S. = M_r / M_v$$

$$F.S. = 3.79 > 1.5 \text{ SI CUMPLE}$$

Servicio

$$M \text{ resistente} = M \text{ peso del muro} + \text{relleno} + \text{zapata} + \text{descarga de traves (CM)} \quad (49)$$

$$M \text{ resistente} = 78.7 \text{ ton} - m$$

$$F.S. = M_r / M_v$$

$$F.S. = 5.7 > 1.5 \text{ SI CUMPLE}$$

Tabla LXXI. **Condición de carga muerta + empuje + sismo**

Concepto	Carga	Distancia	Momento
	ton	m	ton - m
Sismo	10.8	2.20	-31.0
Descarga de traves (CM)	7.4	2.54	23.7
Cuerpo del muro	5.8	2.00	18.6
Zapata	7.1	3.25	11.5
Relleno tras respaldo	1.8	0.98	23.2
Relleno posterior al respaldo			1.7
Empuje activo			-12.5
Empuje sobrecarga			-1.2
Empuje pasivo			0.4
Suma	32.7		34.3
X = momento / peso =		1.05 m	
excentricidad = (L/2) - X =		0.95 m	
Pt =		32.74 Ton	

Fuente: elaboración propia.

$$R = (Pt / A) \times (1 \pm (6e / L))$$

$$A = 1.0 \times L = 4.00 \quad m^2$$

$$R = 8.2 \times (1 \pm 1.43)$$

$$R = 19.9 \quad \text{ton / m}^2$$

$$R_{adm} = 133.0 \quad \text{ton / m}^2$$

$R_{adm} > R$ ok **SI CUMPLE**

- Revisión

$$M_v \text{ total} = M_{\text{empuje activo}} + M_{\text{empuje sc}} + M_{\text{sismico}} + M_{\text{inc. sismico}}$$

$$M_v \text{ total} = 35.97 \text{ ton} - m$$

Temporal

$$M_{\text{resistente}} = M_{\text{peso del muro}} + \text{relleno} + \text{zapata} \quad (50)$$

$$M_{\text{resistente}} = 55.0 \text{ ton} - m$$

$$F.S. = M_r / M_v$$

$$F.S. = 1.53 > 1.5 \quad \text{SI CUMPLE}$$

Servicio

$$M_{\text{resistente}} = M_{\text{peso del muro}} + \text{relleno} + \text{zapata} + \text{descarga de trabes (CM)} \quad (51)$$

$$M_{\text{resistente}} = 1303.1 \text{ ton} - m$$

$$F.S. = M_r / M_v$$

$$F.S. = 1.76 > 1.5 \quad \text{SI CUMPLE}$$

- Diseño de elementos

- Cálculo de las presiones de diseño

Tabla LXXII. Condición de 1.3 carga muerta + 1.3 empuje

Concepto	Carga	Distancia	Cálculo de las presiones de diseño
	ton	m	ton - m
Descarga de traves (CM)	14.0	2.20	30.7
Cuerpo del muro	9.6	2.54	24.2
Zapata	7.5	2.00	15.0
Relleno tras respaldo	9.3	3.25	30.1
Relleno posterior al respaldo	2.3	0.98	2.2
Empuje activo			-16.2
Empuje sobrecarga			-1.2
Empuje pasivo			0.5
Suma	42.6		85.3
X = momento / peso =		2.00 m	
excentricidad = (L/2) - X =		0.00 m	
Pt =		42.57 Ton	

Fuente: elaboración propia.

$$L' = L - 2exc. = 4.01 \quad m$$

$$A' = 1.0 \times L' = 4.01 \quad m^2$$

$$R = Pt / A'$$

$$R = 42.6 / 4.01$$

$$R_{max} = 10.6 \quad ton / m^2$$

Tabla LXXIII. **Condición de 1.3 carga muerta + 1.3 empuje + 1.7 carga viva**

Concepto	Carga ton	Distancia m	Momento ton - m
Descarga de trabes (CV)	18.9	2.20	41.6
Descarga de trabes (CM)	14.0	2.20	30.7
Cuerpo del muro	9.6	2.54	24.2
Zapata	7.5	2.00	15.0
Relleno tras respaldo	9.3	3.25	30.1
Relleno posterior al respaldo	2.3	0.98	2.2
Empuje activo			-16.2
Empuje sobrecarga			-1.6
Empuje pasivo			0.5
Suma	61.5		126.5
X = momento / peso =		2.06 m	
excentricidad = (L/2) - X =		-0.06 m	
Pt =		61.46 Ton	

Fuente: elaboración propia.

$$L' = L - 2exc. = 4.12 \quad m$$

$$A' = 1.0 \times L' = 4.12 \quad m^2$$

$$R = Pt / A'$$

$$R = 61.5 / 4.12$$

$$R_{max} = 14.9 \quad ton / m^2$$

Tabla LXXIV. Condición de 1.3 carga muerta + 1.3 empuje + 1.3 sismo

Concepto	Carga	Distancia	Momento
Sismo			-40.3
Descarga de traveses cm	14.0	2.20	30.7
Cuerpo del muro	9.6	2.54	24.2
Zapata	7.5	2.00	15.0
Relleno tras respaldo	9.3	3.25	30.1
Relleno posterior al respaldo	2.3	0.98	2.2
Empuje activo			-16.2
Empuje sobrecarga			-1.6
Empuje pasivo			0.5
Suma	42.6		44.6
X = momento / peso =		1.05 m	
excentricidad = (L/2) - X =		0.95 m	
Pt =		42.57 Ton	

Fuente: elaboración propia.

$$L' = L - 2exc. = 2.10 \quad m$$

$$A' = 1.0 \times L' = 2.10 \quad m^2$$

$$R = Pt / A'$$

$$R = 42.6 / 2.10$$

$$R_{max} = 20.3 \quad ton / m^2$$

- Diseño de la zapata

- Flexión

De acuerdo con las presiones de diseño, la que rige es de $= 20.3$ ton/m²/m; de la condición de carga 1.3 cm + 1.3 empuje +1.3 sismo

$$A_s = \bar{n} \cdot d - \sqrt{(\bar{n} \cdot d)^2 - \frac{2 \cdot M_u \cdot \bar{n}}{\Phi \cdot F_y}} \quad (52)$$

$$d > \sqrt{\frac{M_u}{0.189 \cdot \Phi \cdot f'c \cdot b}} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{diseño}} &= Q \times (C^2 / 2) \\ M_d &= 20.3 \quad \text{x} \quad (3.8 / 2) \\ M_d &= 38.6 \quad \text{ton-m} \end{aligned}$$

$$\bar{n} = \frac{0.85 \cdot f'c \cdot b}{F_y} \quad (54)$$

- Revisión del peralte por flexión:

Se debe cumplir:

$$H1 > d + r$$

$\bar{n} =$	5.67		$d =$	28.5	cm
$d =$	52	cm	$r =$	8	cm
			$d + r =$	36.5	cm
$A_s =$	20.33	cm ²			OK
$A_{s\text{min}} =$					
$(0.003 \cdot b \cdot d) =$	15.60	cm ²			

	as	S
varilla	cm ²	cm
#5	1.98	12.7
#6	2.85	18.3
#8	5.07	32.5

- Revisión por cortante

$V_u =$	$Q (C - d)$	$d =$	$H1 - r$		
$V_u =$	29	ton	$r =$	8	cm
			$d =$	52	cm

$$V_{cr} = 46116.7 \text{ kg} = 46.1 \text{ ton}$$

$V_{cr} > V_u$ **SI CUMPLE**

- Armado por temperatura = $0.002 b d = 10.4 \text{ cm}^2$

	as	S
varilla	cm ²	cm
#5	1.98	19.0
#6	2.85	27.4
#8	5.07	48.8

- Armado en lecho superior

$M = M_{pp} \text{ (zapata)} + M_{relleno} \text{ en respaldo}$

$$M = 7.1 \text{ ton-m}$$

$$M_d = 1.3 M = 9.1 \text{ ton-m}$$

- Revisión del peralte por flexión:

Se debe cumplir:

$$H_1 > d + r$$

ñ=	5.67		d=	13.8	cm
d=	52	cm	r=	8	cm
			d+r=	21.8	cm

As=	4.64	cm ²	OK
Asmin=	15.60		
(0.003*b*d)=	cm ²		

	as	S
varilla	cm ²	cm
#5	1.98	12.7
#6	2.85	18.3

#8 5.07 32.5

- Diseño del muro del estribo

La condición crítica será la de 1.3 Empuje + 1.3 Sismo +1.3 Incremento sísmico.

Tabla LXXV. **Condición de 1.3 carga muerta + 1.3 empuje + 1.3 sismo**

	Fuerza	Distancia	Momento
	ton	m	ton-m
Empuje activo	9.7	1.07	10.4
Empuje sobrecarga	0.6	1.90	1.2
Sismo	0.0	-0.60	0.0
Inc. sísmico	0.0	-0.90	0.0
	10.4		11.6

Fuente: elaboración propia.

Debido a que es una condición de carga accidental, se tiene que

$$M_d = M_u \times 0.75$$
$$M_d = 8.7 \quad \text{ton-m}$$

- Revisión del peralte por flexión:

Se debe cumplir:

$$H_1 > d+r$$

ñ=	5.67		d=	13.5	cm
d=	52	cm	r=	8	cm
			d+r=	21.5	cm
As=	4.47	cm ²			OK

$$A_{smin} = (0.003 * b * d) = 15.60 \text{ cm}^2$$

varilla	as cm ²	S cm
#5	1.98	12.7
#6	2.85	18.3
#8	5.07	32.5

- Revisión por cortante

$$d = B - r$$

$$r = 8 \text{ cm}$$

$$d = 47 \text{ cm}$$

$$=V_u = 10.4 \text{ ton}$$

$$V_{cr} = 41682.40 \text{ kg} = 41.7 \text{ ton}$$

$$V_{cr} > V_u \quad \text{SI CUMPLE}$$

- Revisión a la mitad de la altura

$$H = H_4 / 2 = 2.550 \text{ m}$$

$$E_a = (g H^2 K_a) 0.5 = 3.7 \text{ ton / m}$$

$$f/2 = 15$$

$$\text{Localización} = H / 3 = 0.83 \text{ m}$$

Considerando una sobrecarga de 30 kg/m²

$$E_{sc} = K_a Q H = 0.2 \text{ ton / m}$$

$$\text{Localización} = H / 2 = 1.25 \text{ m}$$

Tabla LXXVI. **Condición a la mitad de la altura**

	Fuerza ton	Distancia m	Momento ton-m
Empuje activo	2.4	0.83	2.0
Empuje sobrecarga	0.3	1.25	0.4
Sismo	0.0	-3.10	0.0
Inc. sísmico	0.0	-3.40	0.0
	2.8		2.4

Fuente: elaboración propia.

- Revisión del peralte por flexión:

Se debe cumplir:

$$H1 > d+r$$

ñ=	5.67		d=	6.2	cm
d=	60	cm	r=	8	cm
			d+r=	14.2	cm
As=	0.81	cm ²			OK

	$A_{smin} = (0.003 \cdot b \cdot d) = 18.00 \text{ cm}^2$	
	as	S
varilla	cm ²	cm
#5	1.98	11.0
#6	2.85	15.8
#8	5.07	28.2

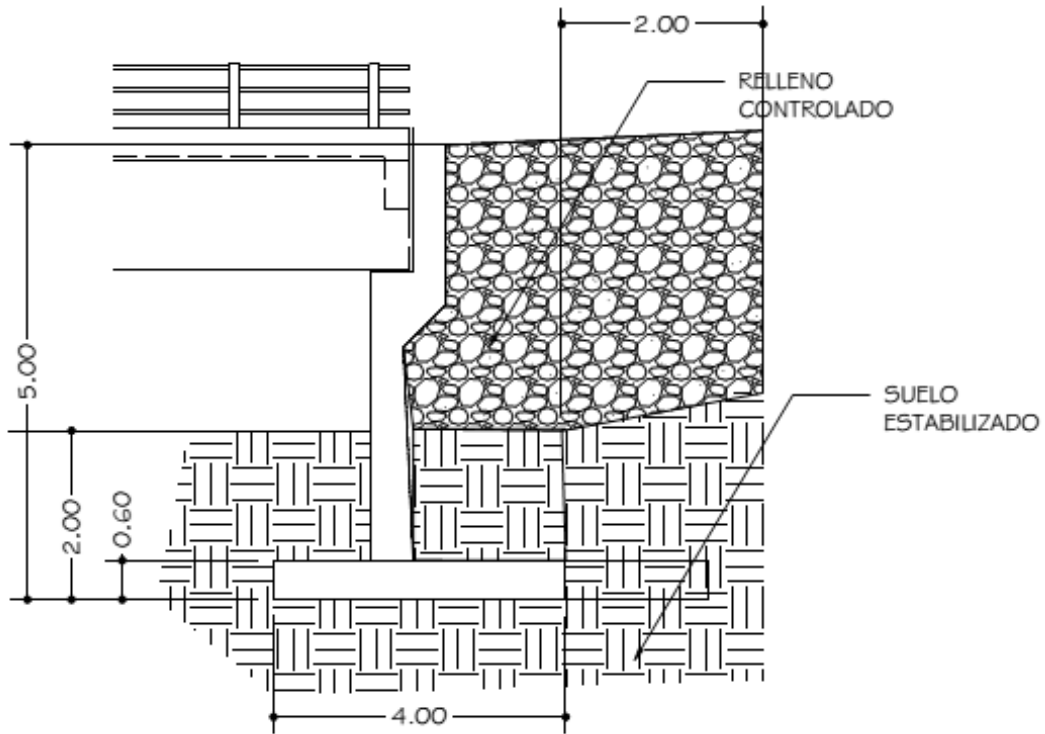
- Revisión por cortante

		$d = B - r$
		$r = 8 \text{ cm}$
$V_u = 2.8$	ton	$d = 14.2 \text{ cm}$
$V_{cr} = 12598.4$	kg =	12.6 ton
$V_{cr} > V_u$	SI CUMPLE	

- Armado en el respaldo exterior

$A_s = 9.4$	cm ²	
se colocarán varillas #	8c	@ 28.0 cm
$A_{s \text{ temp}} = 9.4$	cm ²	
se colocarán varillas #	6c	@ 15.0 cm

Figura 35. **Propuesta de diseño de estribo de concreto reforzado para puente**



Fuente: elaboración propia, empleando programa AutoCAD 2013.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS ENTRE UN MSME PARA ESTRIBO VERDADERO DE PUENTE Y ESTRIBO DE CONCRETO REFORZADO PARA PUENTE

5.1. Diseño de estribo verdadero para puente utilizando un MSME, mediante normativa de FHWA

La metodología de diseño utilizada para analizar la estabilidad de un muro mecánicamente estabilizado, para este caso de investigación se basó en la normativa FHWA, en su publicación FHWA-NHI-00-043, mediante el método de equilibrio límite, permitiendo diseñar como una alternativa a otros métodos de diseño.

Y tomando en consideración que sus factores de seguridad para el análisis del deslizamiento 1.5, volcamiento 1.5, capacidad portante 2.5 y la estabilidad global 1.5, son conservadores y similares a los métodos tradicionales.

Lo que permite emplear un programa de computación para el análisis de la estabilidad global del MSME para estribo de puentes y para este trabajo de investigación se utilizó el software llamado MacStARS W – Rel. 4. (MACCAFERRI, 2020)

5.2. Análisis de ventajas y desventajas del uso de MSME, como estribo verdadero de puentes

A continuación, se muestran las ventajas y desventajas que puede presentar el uso del muro de suelo mecánicamente estabilizado como estribo verdadero de puente.

5.2.1. Ventajas en MSME

Algunas de las ventajas que se pueden mencionar para el uso del muro de suelo mecánicamente estabilizado como estribo verdadero de puente, son las siguientes:

- Los procedimientos de construcción son rápidos, simples y no requieren de gran cantidad de equipos para su realización.
- Su flexibilidad, permite su aplicación en suelos de bajas características mecánicas del suelo, por lo que no necesita una estabilización del suelo de fundación para llegar al valor ideal del valor soporte del suelo.
- Aun cuando los empujes del suelo existen, al colocar geosintéticos extensibles como las geomallas en el MSME como estribo para puente, ayuda aumentar la resistencia a la tracción del suelo.
- El suelo retenido puede ser el del lugar, siempre y cuando cumpla con las características requeridas para el diseño.

- El MSME como estribo de puentes trabaja desde el momento de su construcción, y no requiere de 28 días para alcanzar su resistencia y entrar en servicio como el estribo de concreto reforzado.

5.2.2. Desventajas en MSME

Algunas de las desventajas que se pueden mencionar para el uso del muro de suelo mecánicamente estabilizado como estribo verdadero de puente, son las siguientes:

- Es necesario que el material de relleno reforzado sea granular de muy buena calidad y no tenga ningún material orgánico, haciendo que sea una limitante para algunos proyectos, debido a que no se encuentran en el lugar, el material granular de por lo menos 4" de diámetro.
- Se requieren ensayos a las geomallas por corrosión o degradación del material de refuerzo extensible, debido a los daños que sufren por instalación, creep (elongación) y durabilidad para proyecto en específico, debido a que la condición de suelo es diferente en cada lugar.
- En algunos casos se requiere de gran espacio detrás de la fachada.

5.3. Comparación del uso del sistema MSME para estribo de puente y el estribo concreto reforzado para puente

Considerando que cada sistema tiene su propia metodología, es decir; que tiene sus parámetros establecidos, hace que no se pueda comparar porque cada uno tiene características que puede funcionar en algún lugar u otro.

De acuerdo con los resultados obtenidos, después de haber realizado los cálculos de diseño para los dos sistemas para estribo de puente, se ha podido analizar los FS para cada uno de ellos.

Tabla LXXVII. **Análisis de FS**

Análisis de Estabilidad	MSME para estribo verdadero de puente	Estribo de concreto reforzado
	FS	FS
Estabilidad Externa		
Deslizamiento	2.895	3.5
Volcamiento	1.734	4.5
Capacidad Portante	1.438	3.79
Estabilidad Global	2.51	1.76

Fuente: elaboración propia.

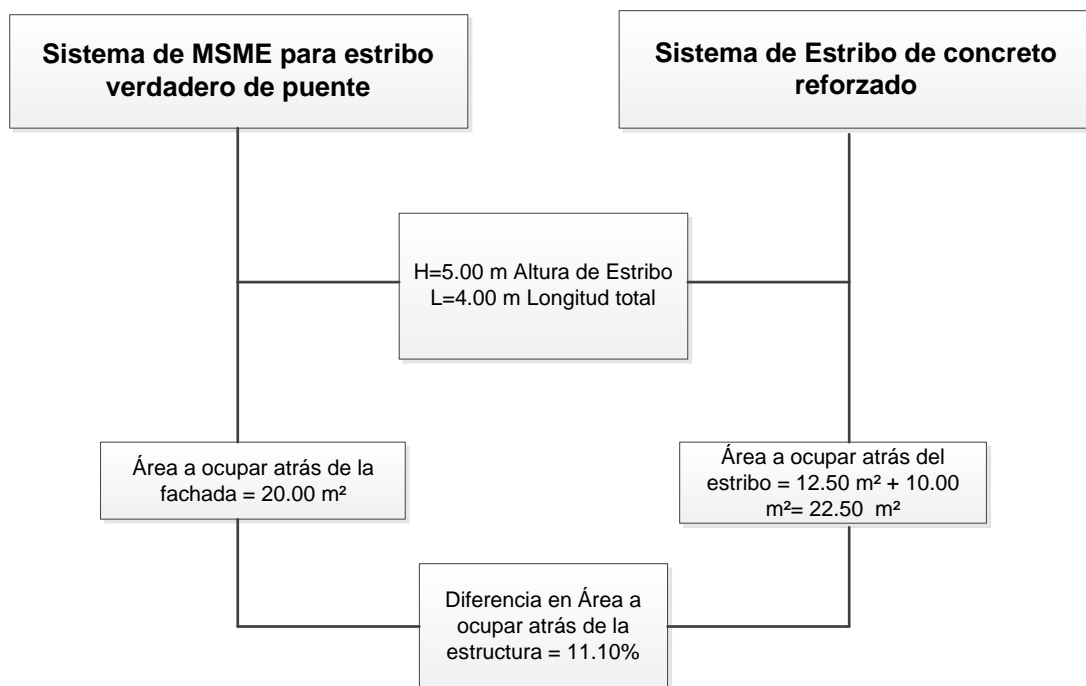
Se observa de manera general, el FS más conservador es del estribo de concreto reforzado, sin embargo, cuando se compara con los parámetros propios del MSME para estribo verdadero de puente, según tabla IV, son bastante conservadores, al igual el sistema tradicional de concreto reforzado.

Además, para este trabajo de investigación, se observó el espacio disponible que ocupan ambos sistemas, aun cuando analizaron ambos métodos, con similares dimensiones, se observó que el MSME para estribo verdadero, ocupa un espacio menor para la base, ocupando un área de 20.00 metros cuadrados, con una distancia de 4.00 metros hacia atrás, mientras que el estribo de concreto reforzado, ocupó un área de 22.50 metros cuadrados más 10.00 metros cuadrados de relleno controlado, haciendo un total de 22.50 metros cuadrados.

A partir que el MSME para estribo verdadero de puente, para este caso de investigación, utiliza un 11.10% menos de área, hace que el tiempo de construcción sea menor, por el aprovechamiento del espacio que se forma en la construcción del muro.

En el siguiente esquema se visualiza los datos obtenidos de la comparación de espacio disponible que ocupan ambos sistemas.

Figura 36. **Esquema de comparación de espacio disponible para ambos sistemas**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Visio.

CONCLUSIONES

1. Las ventajas del uso del MSME como estribo verdadero para puentes son las siguientes: la flexibilidad permite utilizarlo en suelos de muy bajas características mecánicas, por lo que no necesita una estabilización del suelo de fundación para llegar al valor ideal del valor soporte del suelo y la rapidez para construcción del muro, lo que permite que no sea tan grande el impacto de tiempo en el lugar donde se desarrolla.
2. Las desventajas del uso del MSME como estribo verdadero para puentes son las siguientes: la necesidad de tener suficiente área en la parte de atrás de la fachada, el material de relleno reforzado debe ser de buena calidad, libre de material orgánico, además al refuerzo extensible se le debe realizar los ensayos por corrosión o degradación, debido a los posibles daños que sufren por instalación, creep y durabilidad las geomallas.
3. El diseño y análisis del MSME como estribo verdadero de puente, está basado en la normativa propuesta por la Administración Federal de Carreteras (FHWA), en su publicación FHWA-NHI-00-043, propone criterios geométricos y de refuerzo para evitar fallas externas e internas del muro, aplicando el método de límite de equilibrio, el cual es más conservador y ha tenido una mayor aceptación a nivel mundial.
4. Para este estudio de investigación, la diferencia más grande entre ambos sistemas es el área que utilizan para construcción, aun cuando son de similares dimensiones, es decir; para el MSME para estribo verdadero un

área de 20 metros cuadrados, mientras que el estribo de concreto reforzado, ocupó el 22.50 metros cuadrados. Comprobando para este caso de estudio, el uso del sistema de MSME de estribo verdadero para puentes no provee ventaja en la optimización del área de construcción, basándose en que necesita el 11.10% de espacio hacia atrás comparándolo con el sistema tradicional en Guatemala.

RECOMENDACIONES

1. Para este MSME como estribo verdadero para puentes de altura 5.00 metros y una longitud de 4.00 metros, es recomendable como un método alternativo debido a que permite ocupar 11.10% menos de área, y no sea tan grande el impacto en el lugar que se desarrolla, haciendo que su construcción sea rápida.
2. Combinar la selección de la Norma FHWA-NHI-00-043, con las normas utilizadas en Guatemala, tales como: las "Normas de Seguridad Estructural" de la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica – AGIES – así como de la "Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes" de la Dirección de Caminos del Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda, para el diseño de MSME como estribo verdadero de puentes, debido a que cada vez es más común el uso de este sistema.
3. Considerar el área a ocupar para la construcción de un MSME como estribo verdadero para puentes, tanto por las propiedades del suelo, como los tiempos e impacto de construcción al momento de elegir que método es más conveniente a realizar.
4. Se recomienda para una investigación futura, el análisis del comportamiento de los asentamientos diferenciales en el sistema los MSME como estribos verdaderos de puentes, debido a la geología y características propias de Guatemala es más aceptable estos muros que el sistema tradicional.

REFERENCIAS

1. AASHTO. (1996). *Standard Specifications for Highway Bridges* (16 ed.). Washington, DC. Estados Unidos.
2. AASHTO. (2002). *Standard Specifications for Highway Bridges* (17 ed.). Washington, DC. Estados Unidos.
3. AASHTO. (2012). *LRFD Bridge Design Specifications*. Washington, DC. Estados Unidos.
4. ACE Geosynthetics. (Junio, 2020). *Geomallas*. Taiwan. Recuperado de <https://www.geoace.com/es/products/Geomallas/ACEGrid%C2%AE-GDE>
5. AGIES NSE 1. (2018). *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala NSE 1 Generalidades, Administración de las Normas y Supervisión Técnica*. Guatemala. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. Recuperado de <https://www.agies.org/bibliotecas/>
6. AGIES NSE 2. (2018). *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala NSE 2 Demandas Estructurales y Condiciones de Sitio*. Guatemala. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. Recuperado de <https://www.agies.org/bibliotecas/>

7. AGIES NSE 5.2. (2018). *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala NSE 5.2 Puentes de Tamaño y Altura Limitados*. Guatemala. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. Recuperado de <https://www.agies.org/bibliotecas/>
8. AMSE. (2005). *Reduced Zin Loss Rate to be Used for Design of MSE Structures*. Estados Unidos. McLean, VA, Estados Unidos: Asociación de Suelos Mecánicamente Estabilizados. Recuperado de https://www.amsewalls.org/wp-content/uploads/2013/06/AMSE_Metal_Loss_White_Paper.pdf
9. Anderson, P. L. (Octubre, 1991). *Subsurface Investigation and Improvements for MSE Structures Constructed on Poor Foundation Soils*. *Trigésimo cuarto Congreso de la Asociación de Ingenieros Geólogos*. Congreso llevado a cabo en Sacramento CA, Estados Unidos.
10. Anderson y Brabant. (2010). *Increased Use of MSE Abutments*. Estados Unidos. McLean, VA, Estados Unidos: Asociación de Suelos Mecánicamente Estabilizados. Recuperado de https://www.amsewalls.org/wp-content/uploads/2013/06/Increased_Use_of_MSE_Abutments.pdf
11. Anderson, Peter; Gladstone, Robert A. y Sankey, John E. (2011). *State of the Practice of MSE Wall Design for Highway Structures*. Estados Unidos. Recuperado de http://www.reinforcedearth.com/sites/default/files/01_state_of_the_practice_of_mse_wall_design_for_highway_structures.pdf

12. Bastick, M. (1985). Finite element Study of Reinforced Earth Structures – Effect of Surcharge. Francia. Terre Armee Internationale. Resumen de Investigación R33.
13. Bastick, M. (1985). *Behavior of Reinforced Earth Abutments-Summary of Research Results*. Francia. Terre Armee Internationale. Resumen de Investigación R37.
14. Bastick, M. (1985). *Reinforced Earth Abutments-Research Model and Full Scale Structures*. Francia. Terre Armee Internationale. Resumen de Investigación de R38.
15. Brabant, K. P. (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls for Support of Highway Bridges*. Estados Unidos. Reinforced Earth Company.
16. Dirección General de Caminos. (2001). *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes*. Guatemala. Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda.
17. Dirección General de Caminos. (2010). *Reglamento para el Control de Pesos y Dimensiones de Vehículos Automotores de Carga y sus Combinaciones*. Guatemala. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda.
18. FHWA HI-95-038. (1998). *Geosynthetic Design and Construction Guidelines*. Estados Unidos. Washignton, D.C., Estados Unidos: Departamento de Transporte.

19. FHWA NHI-00-043. (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls And Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines*. Estados Unidos. Washignton, D.C., Estados Unidos: Departamento de Transporte.
20. FHWA/IN/JTRP-2006/38, Zevgolis, I. y P. L. Bourdeau . (2007). *Mechanically Stabilized Earth Wall Abutments for Bridge Support*. Estados Unidos. Washignton, D.C., Estados Unidos: Departamento de Transporte.
21. FHWA NHI-10-024. (2009). *Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes - Volume I*. Estados Unidos. Washignton, D.C., Estados Unidos: Departamento de Transporte.
22. FHWA NHI-10-025. (2009). *Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume II*. Estados Unidos. Washignton, D.C., Estados Unidos: Departamento de Transporte.
23. FHWA HRT-11-027. (2011). *Geosynthetic Reinforced Soil*. Estados Unidos. Washignton, D.C., Estados Unidos: Departamento de Transporte.
24. Frankenberger, P.C. (Noviembre, 1996). Reinforced Earth Walls Withstand Northridge Earthquake. *Simposio Internacional de Earth Reinforcement*. Simposio llevado a cabo en Fukuoka, Kyushu, Japón.

25. GEOMATRIX, S.A. (2013). *Guía de Diseño de Estructuras MSE*. Colombia. Recuperado de http://gtech.geomatrix.co/uploads/1472242066_Guia_diseo_estructuras_MSE.pdf
26. Geosistemas Pavco S.A. (2012). *Manual de Diseño con Geosintéticos*. Bogotá, Colombia. Departamento de Ingeniería- Geosistemas.
27. Gifford, D. G. (1986). *Spread Footings for Highway Bridges*. Washignton, D.C. Estados Unidos. FHWA RD-86-185.
28. Herrera, J. H. (1996). *Puentes*. Colombia. Bogota: Universidad Catolica de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil.
29. IGS. (2009). *Recommended Descriptions of Geosynthetics Functions, Geosynthetics Terminology, Mathematical and Graphical Symbols*. Estados Unidos. Austin, TX, Estados Unidos: Sociedad Internacional de Geosintéticos.
30. IGS. (2011). *Folletos Educativos sobre Geosintéticos y sus Aplicaciones*. Estados Unidos. Austin, TX, Estados Unidos: Sociedad Internacional de Geosintéticos.
31. Karasopulos, T. H. (Enero, 1984). Bridge Foundations Without Piles. *Sexagesimo tercer Congreso de la Junta de Investigación del Transporte*. Congreso llevado a cabo en ciudad Washington, D.C., Estados Unidos.

32. Koerner, R. (2005). *Designing with Geosynthetics*. Estados Unidos. Recuperado de <http://www.slideshare.net/garapatiavinash/robert-m-koerner-designing-with-geosynthetics-5th-editionprentice-hall-2005>.
33. MACCAFERRI. (2017). *Refuerzo y estabilización de suelos*. Italia. Recuperado de <https://www.maccaferri.com/br/es/download/brochure-br-refuerzo-y-estabilizacion-de-suelos-sp-feb21/?wpdmdl=7136>
34. MACCAFERRI. (2018). *Terramesh®*. Italia. Recuperado de <https://www.maccaferri.com/br/es/tag/muros-de-contencion-y-refuerzo-del-suelo/>
35. MACAFFERI. (2020). *Software MacStARS W – Rel. 4.0*. Italia.
36. McGown, A., Andrawes, K., y Al-Hasani, M. (1978). *Effect of inclusion properties on the behavior of sand*. Géotechnique. doi:10.1680/geot.1978.28.3.327
37. McKittrick, D. P. (Octubre, 1978). Reinforced Earth: Application of Theory and Research to Practice. *Simposio de Suelo Reforzado y Técnicas de Estabilización*. Simposio llevado a cabo en Sydney, Australia.
38. MESA®. (2002). *Mequon Bike Trail*. Estados Unidos. Tensar®
39. MESA®. (2005). *Design Guidelness for Mesa Retaining Wall Systems*. Estados Unidos. Tensar®.

40. MESA®. (2011). *Installation and Special Considerations Manual*. Estados Unidos. Tensar®
41. MESA®. (2011). *Installation and Special Considerations Manual*. Estados Unidos. Recuperado de https://info.tensarcorp.com/hubfs/WH_Files/WH_Marketing%20Operations_Sales%20Tools/Marketing%20Support%20Files/Brochures/Spanish/ISPN_GSS_BRO.pdf
42. MESA®. (2012). *Sistemas de Muros de Retención*. Estados Unidos. Tensar®
43. Sargand, S. M. (Mayo, 1999). Spread Footing Foundation For Highway Bridge Applications. *Revista de Ingeniería Geotécnica y Geoambiental*, 125(5), 373-382.
44. Simac, M. R., y Elton, D. J. (2011). *Geosynthetic reinforced soil walls as integral bridge abutments*. Estados Unidos. Recuperado de http://geosyntheticismagazine.com/articles/0411_f4_reinforced_walls.html
45. Suárez Díaz. (2009). *Deslizamientos. Tomo II: Técnicas de Remediación*. Colombia: Industrial de Santander. Recuperado de <http://erosion.com.co/presentaciones/category/20-diseno-de-muros-de-suelos-reforzados-con-geosinteticos.html?download=228:118-disenomuros>.
46. Tensar®. (2012). *System Overview*. Estados Unidos.

47. Tensar®. (2012). *Uniaxial Geogrids for Soil Reinforcement*. Estados Unidos. Recuperado de <https://www.tensarcorp.com/Sistemas-y-productos/Tensar-Uniaxial-UX-geogrids#>
48. Terre Armee Internationale. (1989). *Reinforced Earth® Bridge Abutments*. Francia.
49. The Reinforced Earth®. (1975). *Progress Report – Lovelock, Nevada*. Estados Unidos.
50. The Reinforced Earth®. (1984). *Joseph C. McNeil Generating Station – Reinforced Earth Project Report*. Estados Unidos.
51. Vankavelarr, D. P., y Leshchinsky, D. (2002). *Inspection Guidelines for Construction and Post-Construction of Mechanically Stabilized Earth Wall*. Estados Unidos. Centro de Transporte. Washington, D.C.:Universidad de Delaware.
52. Vidal, H. (Abril, 1978). The Development and Future of Reinforced Earth. *Convención anual ASCE*. Simposio llevado a cabo en Pittsburgh, PA, Estados Unidos.
53. Walkinshaw, J. (1975). *Region 15 Demonstration Project No. 18, Reinforced Earth Construction*. Estados Unidos. FHWA Reporte final.
54. Zornberg, Abu-Hejleh y Wang. (2001). *Geosynthetic-reinforced soil bridge abutments*. Estados Unidos.

55. Zornberg y Christopher. (2006). *Geosynthetics*. Estados Unidos.