

COMPORTAMIENTO DE MUROS EN SUELO REFORZADO

**JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ ABREO
SERGIO ANDRÉS FRANCO MATEUS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2013

COMPORTAMIENTO DE MUROS EN SUELO REFORZADO

JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ ABREO

SERGIO ANDRÉS FRANCO MATEUS

Trabajo de grado modalidad Investigación para optar al título de:

Ingeniero Civil

Director:

VLADIMIR ERNESTO MERCHÁN JAIMES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

En primer lugar dedico este logro a Dios, doy gracias por darme fuerza, por guiarme y cuidarme en cada momento de mi vida.

A José Nelson Franco León, mi papá, mi mentor y, ante todo, mi más leal amigo. Quien de forma noble me ha enseñado a nunca desfallecer en salir adelante, en ser constante y paciente en los momentos más difíciles de mi vida. De corazón, gracias papá.

A Ligia Enith Mateus, mi madre, por ser la mujer más amorosa y tierna que pueda pedir en mi vida. A ella dedico lo soy y lo que quiero hacer con mi vida. Gracias mamá.

A mis hermanas, Mónica y Beatriz, quienes son mi motivación más grande para asumir retos y superar dificultades. El legado más bonito que tiene mi familia y para siempre las niñas de mi vida.

A mi amigo y compañero de proyecto Juan Sebastián Gómez Abreo, a quien admiro por su lealtad y a quien debo agradecer por su forma incondicional de acompañarme y apoyarme en todo momento.

A mis amigas Ángela, Melissa y Silvia, a mis amigos Jhon, Carlos J, Sergio y Diego por su colaboración, solidaridad y cariño. Gracias de corazón por tantos momentos felices que vivimos.

A mis demás familiares, amigos y compañeros que me acompañaron a lo largo de mi carrera y de mi vida.

SERGIO ANDRES FRANCO MATEUS

DEDICATORIA

Principalmente dedicado a Dios por ser mi guía y aliento, llenándome de la fuerza necesaria para recorrer mi camino, ayudándome a sortear todas las dificultades, rodeándome de personas maravillosas que aportan inmensamente en mi vida.

A mis padres Gerardo Gómez Mantilla y Martha Abreo Piña por ofrecerme su gran amor, ser mi fuente de motivación, darme el apoyo y comprensión incondicional para lograr ser lo que soy.

A mi Tía Nohemí Piña y demás familiares, por su atención, comprensión y apoyo en todos los momentos de mi vida.

A mi amigo y compañero de proyecto Sergio Andrés Franco Mateus por la colaboración, motivación, comprensión, solidaridad, compañerismo y entusiasmo que siempre lo acompaña.

A todos mis amigos y compañeros por hacer de esta experiencia mucho mejor, en donde quedan recuerdos y momentos felices.

JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ ABREO

AGRADECIMIENTOS

Los autores de esta tesis de grado expresamos muy cordialmente nuestro agradecimiento a:

La Universidad Industrial de Santander por abrirnos las puertas hacia una de las experiencias más valiosas hasta el momento de nuestras vidas, en donde se nos brindó diferentes posibilidades para formarnos como personas, como ciudadanos y fortalecernos intelectualmente. En aras de lograr ser profesionales integrales.

La escuela de Ingeniería Civil y a todo el personal administrativo, planta física y docente por brindar el ejemplo, la guía, la comprensión y, en general, por contribuir a una formación profesional integral y exitosa.

Ing. MSc. PhD. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, director de proyecto de grado, a quien agradecemos por el tiempo brindado para la enseñanza, colaboración, motivación, disposición y asesoría brindada en todo momento.

Ing. Msc. Mario Wilfredo del Toro por vincularse en este proyecto, quien de manera oportuna orientó el trabajo de estos meses para estructurar y dar orden a un tema tan amplio como el desarrollado en esta tesis.

Ing. Héctor Torres por todo el tiempo dedicado a atender y ayudar a solucionar diversos inconvenientes que se presentaron en este proceso y que al final nos dejaron grandes enseñanzas.

Ing. Msc. Mario Ramírez por contagiarnos de su interés y motivarnos a seguir trabajando en esta área de investigación.

A todas las personas que participaron directa o indirectamente en el desarrollo del proyecto, leyendo, opinando, corrigiendo, dando ánimo y acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad.

A todos los compañeros y familiares que con su presencia brindaron alegría, cariño, comprensión y sobretodo gran motivación.

Gracias a todos.

CONTENIDO

1	Introducción	21
2	Objetivos.....	22
2.1	Objetivo general	22
2.2	Objetivos específicos.....	22
3	Marco teórico	23
3.1	Reseña histórica y generalidades	23
3.2	Consideraciones especiales de diseño para la metodología convencional 25	
3.3	Procedimiento de diseño para la metodología convencional	28
3.4	Recomendaciones técnicas para el diseño y construcción de muros en suelo reforzado	33
4	Aplicación de diseño	37
4.1	Planteamiento	37
4.2	Solución empleando la metodología convencional	37
4.3	Solución empleando el software geosoft.....	41
5	Modelamiento en software.....	42
5.1	Modelo I	42
5.2	Modelo II	43

5.3	Modelo III	44
5.4	Modelo IV	45
5.5	Modelo V	46
5.6	Modelo VI	47
5.7	Modelo VII	48
6	Análisis de sensibilidad.....	50
6.1	Análisis del parametro ángulo de fricción bajo lametologia convencional	50
6.2	Análisis del parametro altura del muro bajo lametologia convencional	57
6.3	Análisis del parametro ángulo de fricción en el programa geosoft	65
6.1	Análisis del parametro altura del muro en el programa geosoft	70
7	Análisis comparativo	78
7.1	Factores de seguridad.....	78
7.2	Separación vertical de las capas de geotextil	82
7.2.1	COMPARACIÓN GRÁFICA GRUPO DE MUROS CON DIFERENTES ÁNGULOS DE FRICCIÓN:	82
7.2.2	COMPARACIÓN GRAFICA PARA GRUPO DE MUROS CON DIFERENTES ALTURAS:.....	89
7.3	Longitud de geotextil	98
7.3.1	COMPARACIÓN GRÁFICA PARA GRUPO DE MUROS CON DIFERENTES ÁNGULOS DE FRICCIÓN:.....	98

7.3.2	COMPARACIÓN GRÁFICA PARA GRUPO DE MUROS CON DIFERENTES ALTURAS:.....	101
7.4	Sobrecarga.....	105
8	Conclusiones.....	112
9	Bibliografía	115

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Especificaciones generales del material para construcción de terraplenes según INVIAS Art. 220-07	34
Tabla 2 Especificaciones suelos de relleno, según la FHWA1:.....	34
Tabla 3 Factores de seguridad estabilidad interna.....	35
Tabla 4	35
Tabla 5 Resultados de diseño Ejercicio de aplicación.....	40
Tabla 6 Análisis de sensibilidad - Resultados de diseño ángulo de fricción 31° 36° y 41°	51
Tabla 7 Tabla 6 Análisis de sensibilidad - Resultados de diseño altura de muro 4m, 6 m, 8 m y 10 m.....	57
Tabla 8 Tabla 6 Análisis de sensibilidad - Resultados de diseño ángulo de fricción 31°, 36° y 41° - Geosoft.....	65
Tabla 9 Tabla 6 Análisis de sensibilidad - Altura de muro 4 m, 6 m, 8 m y 10 m - Geosoft.....	71
Tabla 10 Análisis comparativo Factores de seguridad	78
Tabla 11 Resultados de diseño - Sobrecarga total.....	105
Tabla 12 Resultados de diseño - Sobrecarga 1 m libre.....	106
Tabla 13 Resultados de diseño - Sobrecarga total - Geosoft.....	107

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Muro en Suelo Reforzado	29
Ilustración 2 Modelo 1 – Slide	43
Ilustración 3 modelo II - Slide	44
Ilustración 4 Modelo III – Slide	45
Ilustración 5 Modelo IV - Slide.....	46
Ilustración 6 Modelo V - Slide.....	47
Ilustración 7 Modelo VI - Slide.....	48
Ilustración 8 Modelo VII - Slide.....	49
Ilustración 9 Análisis de Sensibilidad – Ángulos de fricción - Separación vertical de diseño.....	53
Ilustración 10 Análisis de Sensibilidad – Ángulos de fricción - Separación vertical calculado	54
Ilustración 11 Análisis de Sensibilidad – Ángulos de fricción - Longitud de geotextil de diseño.....	55
Ilustración 12 Análisis de Sensibilidad – Ángulos de fricción - Longitud de geotextil calculado	56
Ilustración 13 Análisis de Sensibilidad – Altura de Muro – Separación vertical de diseño.....	61

Ilustración 14 Análisis de Sensibilidad – Altura de Muro – Separación vertical calculada	62
Ilustración 15 Análisis de Sensibilidad – Altura de Muro – Longitud del geotextil calculada	63
Ilustración 16 Análisis de Sensibilidad – Altura de Muro – Longitud del geotextil de diseño.....	64
Ilustración 17 Análisis de Sensibilidad – Paquete comercial Ángulo de fricción – Separación vertical de diseño	68
Ilustración 18 Análisis de Sensibilidad – Paquete comercial Ángulo de fricción – Longitud de geotextil de diseño.....	69
Ilustración 19 Análisis de Sensibilidad – Paquete comercial Altura del muro – Separación vertical de diseño	75
Ilustración 20 Análisis de Sensibilidad – Paquete comercial Altura del muro – Longitud del geotextil de diseño	76
Ilustración 21 Análisis Comparativo - Factores de seguridad - Sin sobrecarga	79
Ilustración 22 Análisis Comparativo - Factores de seguridad - Sobrecarga 1 metro libre	80
Ilustración 23 Análisis Comparativo - Factores de seguridad - Sobrecarga total ..	81
Ilustración 24 Análisis Comparativo - Separación vertical de diseño - Ángulo de fricción 31	83
Ilustración 25 Análisis Comparativo - Separación vertical de diseño - Ángulo de fricción 36°	84

Ilustración 26 Análisis Comparativo - Separación vertical de diseño - Ángulo de fricción 41°	85
Ilustración 27 Análisis Comparativo - Separación vertical calculado - Ángulo de fricción 31°	86
Ilustración 28 Análisis Comparativo - Separación vertical calculado - Ángulo de fricción 36°	87
Ilustración 29 Análisis Comparativo - Separación vertical calculado - Ángulo de fricción 41°	88
Ilustración 30 Análisis Comparativo - Separación vertical de diseño - Altura muro 4 metros	89
Ilustración 31 Análisis Comparativo - Separación vertical de diseño - Altura muro 6 metros	90
Ilustración 32 Análisis Comparativo - Separación vertical de diseño - Altura muro 8 metros	91
Ilustración 33 Análisis Comparativo - Separación vertical de diseño - Altura muro 10 metros	92
Ilustración 34 Análisis Comparativo - Separación vertical calculada - Altura muro 4 metros	94
Ilustración 35 Análisis Comparativo - Separación vertical calculada - Altura muro 6 metros	95
Ilustración 36 Análisis Comparativo - Separación vertical calculada - Altura muro 8 metros	96

Ilustración 37 Análisis Comparativo - Separación vertical calculada - Altura muro 8 metros	97
Ilustración 38 Análisis Comparativo - Longitud de geotextil - Ángulo de fricción 31°	98
Ilustración 39 Análisis Comparativo - Longitud de geotextil - Angulo de fricción 36°	99
Ilustración 40 Análisis Comparativo - Longitud de geotextil - Angulo de fricción 41°	100
Ilustración 41 Análisis Comparativo - Longitud de geotextil - Altura del muro 4 metros	101
Ilustración 42 Análisis Comparativo - Longitud de geotextil - Altura del muro 6 metros	102
Ilustración 43 Análisis Comparativo - Longitud de geotextil - Altura del muro 8 metros	103
Ilustración 44 Análisis Comparativo - Longitud de geotextil - Altura del muro 10 metros	104
Ilustración 45 Análisis Comparativo – Sobrecarga - Separación vertical de diseño	108
Ilustración 46 Análisis Comparativo - Sobrecarga - Separación vertical calculado	109
Ilustración 47 Análisis Comparativo – Sobrecarga total - Longitud total de geotextil	110

Ilustración 48 Análisis Comparativo – Sobrecarga total - Longitud total de geotextil de diseño..... 111

RESUMEN

TÍTULO: COMPORTAMIENTO DE MUROS EN SUELO REFORZADO*

AUTORES:

JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ ABREO

SERGIO ANDRÉS FRANCO MATEUS

PALABRAS CLAVE:

Muro en suelo reforzado, geotextiles, suelo granular, ángulo de fricción, presiones laterales de tierra, plano de falla, rankine. Factor de seguridad.

DESCRIPCIÓN:

El análisis del comportamiento y diseño de muros en suelo reforzado se basó en la revisión de metodologías convencionales expuestas en el libro *"Principios de ingeniería de Cimentaciones"* del autor [1] Braja M. Das de California State University, en Sacramento. El cual recopila la formulación y se establecen los conceptos de esta técnica, según el estudio y recomendaciones de Henry Vidal (1966), Bell (1975) y Koerner (1990).

Para el desarrollo de la tesis planteada, se optó por dar solución a un problema geotécnico que requiere la estabilización mecánica de un muro. La respuesta se basó en los criterios planteados en el libro del profesor Braja M. Das, realizando el diseño para alcanzar la estabilidad interna del muro de forma manual. Ulteriormente, se realizó un modelo para simular el mismo problema geotécnico haciendo uso de las tecnologías de investigación computacional disponibles en geotecnia.

Se analizó la utilidad y la congruencia de los métodos para el diseño y análisis de muros de contención estabilizados mecánicamente, mediante una comparación de los resultados obtenidos del diseño manual y los resultados de la simulación computacional. También se realizó un análisis de sensibilidad, con el fin de observar la influencia de ciertos parámetros ingenieriles, en los resultados del diseño.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Ing. MSc. PhD. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

SUMMARY

TITLE: COMPORTAMIENTO DE MUROS EN SUELO REFORZADO

AUTHORS:

JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ ABREO

SERGIO ANDRÉS FRANCO MATEUS

KEY WORDS:

Mechanically Stabilized Earth Wall, geotextiles, Frictional soil, angle of internal friction, lateral earth pressure, fault plane, rankine, security factor.

DESCRIPTION:

The analysis in the behavior and design of reinforced soil walls was based on the review of conventional methodologies, outlined in the book "Principles of Foundation Engineering" of the author Braja M. Das of California State University, in Sacramento. This book collects the formulation and establishes the concepts of this technique by the study and recommendations of Henry Vidal (1966), Bell (1975) y Koerner (1990).

For the development of the thesis, we opted for a solution of geotechnical problem that requires a mechanical stabilization of a wall. The answer was based on the criteria outlined in the book by Professor Braja M. Das, performing the wall design in a manually way. Model was performed to simulate the same geotechnical problem using available technology in computational research.

The usefulness and consistency of the methods for the design and analysis of mechanically stabilized contention walls were analyzed, by comparing the results of manual design and results of the computer simulation. Also a sensitivity analysis was performed in order to observe the influence of certain engineering parameters in the design results.

***Trabajo de Grado**

****Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director Ing. MSc. PhD. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes**

1 INTRODUCCIÓN

El estudio realizado en este proyecto consta de una comparación entre las metodologías convencionales de diseño y programas computacionales de geotecnia. Estos son usados para el diseño de la estructura y el análisis de estabilidad interna del muro.

Para el desarrollo de la tesis planteada, se optó por dar solución a un problema geotécnico que requiere la estabilización interna de forma mecánica de un muro, haciendo uso de geotextiles. La respuesta se basó en los criterios planteados en el libro del profesor Braja M. Das, realizando el diseño del muro de forma manual. En la sección 3.3 se encuentra la formulación que permite hacer el desarrollo del problema planteado y en la sección 4.2 se muestra paso a paso el procedimiento de diseño. Posteriormente en el capítulo 5 se realizaron modelos que simulan el mismo problema geotécnico haciendo uso de las tecnologías de investigación computacional disponibles en geotecnia, en este caso Slide del paquete comercial de Rocscience.

En el capítulo 6, se realizaron análisis de sensibilidad para los parámetros: ángulo de fricción interna del suelo de relleno y altura del muro, con la intención de estudiar la influencia en el diseño de estos tipos de estructuras.

Con base en los resultados del capítulo 6, se hace un análisis comparativo de las características: separación vertical, longitud horizontal de geotextil, factores de seguridad y casos de sobrecarga. Esta información se encuentra en el capítulo 7.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Realizar un estudio comparativo entre las metodologías convencionales de diseño de Muros en Suelo Reforzado y la simulación numérica de este tipo de muros.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Estudiar la influencia de los diferentes parámetros de diseño que se tienen en cuenta para este tipo de muros.
- Evaluar la metodología de diseño convencional.
- Establecer un grado de divergencia entre las dos metodologías de diseño de muros de este tipo.
- Valorar la viabilidad del uso de las metodologías de diseño para muros de este tipo.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 RESEÑA HISTÓRICA Y GENERALIDADES

¹El uso de muros en suelo reforzado es un sistema de contención que se ha venido implementando con relativo éxito en la actualidad. La idea fundamental de reforzar el suelo no es nueva. El concepto actual de análisis y diseño sistemático fue desarrollado por el ingeniero francés Henry Vidal en 1966. El 14 de marzo de 1965, Vidal imparte por primera vez una conferencia sobre esta tecnología. Para esta fecha solo existía una estructura hecha con tal sistema de contención. A partir de este punto se despertó el interés por investigar sobre el diseño y la construcción de cimentaciones y estructuras para la contención de suelos haciendo uso de celdas galvanizadas, geotextiles y geocompuestos. El laboratorio Francés de Investigación de Caminos, teniendo como principal propósito realizar investigaciones sobre la aplicación y efectos benéficos del uso de tierra reforzada como material de construcción, verifica los métodos que se empleaban hasta entonces, haciendo uso de modelos bidimensionales con cilindros de acero hechas con muestras del suelo.

Gracias al resultado de las investigaciones del laboratorio en aquella época (laboratoire central des Ponts et Chaussées), se empieza a reconocer el uso de reforzamiento de tierra con celdas metálicas como recurso en la adecuación de vías con especificaciones de terraplenes altos debido a la particular flexibilidad que presentan estos muros y a la posibilidad de acceder al material de la zona

¹ Rubén Ostro R, "Construcción de un Muro Mecánicamente Estabilizado con el proceso de Tierra Armada", Instituto Tecnológico de la Construcción, 1995.

para ser construidos de forma fácil y económica. Como caso pionero está documentado la construcción de una carretera al sur de Francia, en la población de Niza, que pasaría por una zona montañosa y donde existía la inseguridad de construir terraplenes demasiados altos e inestables.

²A los tejidos no biodegradables se les denomina geotextiles. Desde 1970 su uso como material de construcción aumentó globalmente. Los tejidos tienen como principales materias primas derivados del petróleo, tales como el poliéster, polietileno y polipropileno, característicos por su lenta degradación, lo opuesto de los tejidos naturales. Los geotextiles pueden ser armados de forma trenzada y sin trenzar, según la función en la que se vayan a emplear, ya sea con fines estructurales o de impermeabilización.

Los geotextiles tejidos se forman entrelazando una serie de lazos de uno o más filamentos para formar una estructura plana. Los geotextiles no trenzados se forman con fibras cortas dispuestas de forma plana y selladas por procesos de unión química, empleando pegamentos. También es común emplear procesos térmicos para la fusión parcial de los filamentos.

La estabilización mecánica con tejidos no biodegradables permite canalizar rápidamente el agua del suelo hacia varias salidas, proporcionando una mayor resistencia al corte del suelo y por consiguiente una mayor estabilidad. Los geotextiles permiten la filtración del agua mediante la instalación de dos capas de suelo, una con componentes de agregado grueso y la otra de fino. Los tejidos permiten mantener separadas las diversas capas de suelo después de la construcción y durante el periodo de servicio del proyecto.

Los efectos benéficos del refuerzo del suelo se derivan de una mayor resistencia a tensión del suelo y la resistencia al corte desarrollada por la fricción en la interface

² <http://www.ingenieriaciviltips.com/2011/05/consideraciones-para-el-refuerzo-del.html>

suelo – refuerzo. La mayoría del diseño de tierra armada se hace únicamente con suelo granular con drenado libre, evitando así el desarrollo de la presión hidráulica de poro en los suelos cohesivos, lo que a su vez reduce la resistencia al corte del suelo.

El procedimiento general de diseño para muros de suelo reforzado con geotextiles se divide en dos partes: una que analiza la estabilidad interna de la estructura y otra que verifica la estabilidad externa del muro. La estabilidad interna implica determinar la resistencia a la tensión y la resistencia a la zafadura en los elementos de refuerzo así como la integridad de los elementos frontales. Las revisiones por estabilidad externa incluyen las de volteo, deslizamiento y falla por capacidad de carga.

3.2 CONSIDERACIONES ESPECIALES DE DISEÑO PARA LA METODOLOGÍA CONVENCIONAL

La metodología convencional establece dos condiciones fundamentales para el correcto desarrollo del procedimiento de diseño: asumir que en la estructura no se presentan presiones hidrostáticas y que la superficie de falla activa es plana.

³La primera consideración asume que el suelo de relleno está libre de la acción del agua y todos los esfuerzos son asumidos directamente por los granos del material de relleno. Al establecer la ausencia de presión de poros, se pretende anular la disminución de los esfuerzos normales efectivos entre las partículas y que tampoco se afecte la resistencia por la pérdida de fricción, manteniendo intacta la

³ SUAREZ, Jaime. *Resistencia al Cortante*. En: Deslizamientos: Análisis Geotécnico.

resistencia al corte. Por lo que es posible afirmar que el esfuerzo efectivo vertical es igual al esfuerzo vertical total soportado por las partículas granulares del material de relleno. El esfuerzo efectivo se expresa de la siguiente forma:

$$\sigma' = \sigma - u$$

$$\sigma = H * (\gamma_{\text{suelo}})$$

$$u = \gamma_{\text{agua}} * 0 = 0$$

$$\sigma' = \sigma = H * (\gamma_{\text{suelo}})$$

En donde:

u = presión de poros

σ = esfuerzo vertical

σ' = esfuerzo efectivo vertical

En conclusión el material de relleno se debe considerar como un suelo totalmente seco, en el cual no hay presencia del nivel freático.

⁴La segunda consideración asume la superficie de falla activa como la propuesta por Rankine, en donde asume una superficie de falla plana, con una inclinación respecto a la horizontal, la cual describe perfectamente el comportamiento de la presión del suelo, en la que ha cualquier profundidad decrecerá. La magnitud del ángulo del plano de falla con respecto a la horizontal, se expresa como:

$$45 + \frac{\phi'1}{2}$$

En donde:

$\phi'1$ = Ángulo de fricción del suelo de relleno del muro

⁴ Braja M. Das, "Principios de Ingeniería de cimentaciones" (Cuarta ed., Vol. I). (I. T. Editores, Ed., & U. A. José de la Cera Alonso, Trad.) Sacramento, California State, USA: THOMSON LEARNING.(1999).

De acuerdo con la teoría de la presión activa de Rankine, el esfuerzo efectivo horizontal $\sigma'a$ se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma'a = \sigma'o * Ka - 2c' * \sqrt{Ka}$$

Pero para suelos granulares secos, en donde no hay presencia de fuerzas de cohesión, la expresión c' se hace cero ($c' = 0$), por lo que la expresión, de la presión activa de Rankine $\sigma'a$ se simplifica de la siguiente manera:

$$\sigma'a = \sigma'o * Ka$$

El parámetro Ka esta dado de la siguiente forma:

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

Y el esfuerzo efectivo $\sigma'o$ se define como:

$$\sigma'o = \gamma_1 * z$$

En donde:

$z =$ Profundidad en donde se calcula el esfuerzo.

Para el caso en el que el muro es solicitado por una sobrecarga, la magnitud de las presiones de tierra, según la propuesta de Laba y Kennedy, quedan expresadas de la siguiente forma:

Esfuerzo vertical: $\sigma'o = \sigma'o1 + \sigma'o2$

En donde:

$$\sigma'o1 = \gamma_1 * z \text{ (Esfuerzo debido únicamente al suelo)}$$

$$\sigma'o2 = \frac{q*a'}{a'+z} \text{ (Para } z \leq 2b') \text{ (Esfuerzo debido a la sobrecarga)}$$

$$\sigma'o2 = \frac{q*a'}{a'+\frac{z}{2}+b'} \text{ (Para } z > 2b') \text{ (Esfuerzo debido a la sobrecarga)}$$

Siendo:

q = la magnitud de la sobrecarga.

a' = longitud de acción de la sobrecarga.

b' = distancia entre el borde del muro y la línea de acción de la sobrecarga.

Esfuerzo horizontal: $\sigma'a = \sigma'a1 + \sigma'a2$ (Presión Lateral)

En donde:

$\sigma'a1 = \gamma1 * z * Ka$ (Esfuerzo debido únicamente al suelo)

$\sigma'a2 = M * \left[\frac{2q}{\pi} * (\beta - \text{sen}(\beta) * \text{cos}(2\alpha)) \right]$ (Esfuerzo debido a la sobrecarga)

Siendo:

$$M = 1,4 - \frac{0,4 * b'}{0,14 * H} \geq 1$$

H = Altura total del muro.

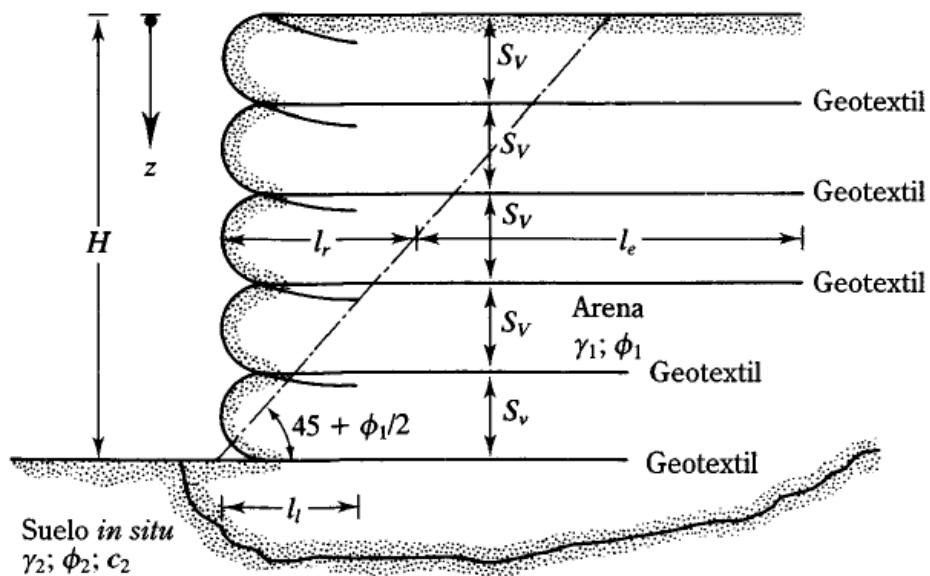
3.3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PARA LA METODOLOGÍA CONVENCIONAL

Para realizar el diseño de un muro de suelo reforzado con geotextiles, es necesario determinar la separación vertical entre capas (S_v) y las longitudes de geotextil L_r , longitud medida desde la cara del muro hasta el plano de falla de Rankine, y L_e , una longitud efectiva relacionada con la prolongación para el correcto anclaje las capas de refuerzo. Los parámetros S_v , L_r y L_e se muestran en la ilustración 1 de la siguiente página.

Para determinar los parámetros que rigen el diseño de estos muros, se recomienda tener en cuenta el siguiente proceso, basado principalmente en el

libro "Principios de ingeniería de Cimentaciones" del autor Braja M. Das y manuales de diseño:

Ilustración 1 Muro en Suelo Reforzado



Fuente: Braja M Das

1. Propiedades geométricas del muro: Se debe empezar por establecer características como: altura máxima, longitud de la base e inclinación de la cara del muro.

2. Evaluación de sobrecarga y ubicación:

Para establecer las cargas tanto en magnitud como en localización, determinamos:

Magnitud	Símbolo
Presión lateral de tierra.	σ_a
Sobrecarga uniforme.	$q = \gamma * d$
Longitud de acción de la sobrecarga.	a'
Distancia entre el borde del muro y la línea de acción de la sobrecarga.	b'

3. Materiales que componen el muro en suelo reforzado:

a) Propiedades ingenieriles del suelo:

En las propiedades de suelo granular de relleno definimos el ángulo de fricción Φ' y el peso específico seco γ' .

b) Definir el tipo de material de refuerzo:

Se define geotextiles como materiales de refuerzo.

4. ⁵Factores de seguridad:

a) Se establece primero factor de seguridad de ruptura del material de refuerzo

F.S. (B), definido como:

$$F.S. (B) = \frac{\text{Resistencia por fluencia o ruptura del material}}{\text{Fuerza máxima en cualquier elemento de refuerzo}}$$

$$F.S. (B) = \frac{\sigma G}{\sigma' a * Sv}$$

⁵ Braja M. Das, "Principios de Ingeniería de cimentaciones" (Cuarta ed., Vol. I). (I. T. Editores, Ed., & U. A. José de la Cera Alonso, Trad.) Sacramento, California State, USA: THOMSON LEARNING.(1999).

En donde:

σG = Resistencia admisible del material de refuerzo

Sv = Espaciamiento vertical de las capas

$\sigma' a$ = Presión lateral de tierra

b) El segundo factor de seguridad que se establece es contra zafadura del material de refuerzo **F.S (P)**, definido como:

$$F.S.(P) = \frac{\text{Fuerza máxima de fricción que desarrolla el refuerzo}}{\text{Fuerza del refuerzo por unidad longitud unitaria del muro}}$$

$$F.S.(P) = \frac{le * 2 * \sigma' o * \tan(\Phi' F)}{\sigma' a * Sv}$$

En donde:

le = Longitud efectiva del refuerzo

$\sigma' o$ = Esfuerzo efectivo horizontal

$\Phi' F$ = Ángulo de fricción entre el material de refuerzo y el relleno

5. Diseño del muro por Estabilidad Interna:

a) Determinar el espaciamiento vertical **Sv** de las capas para cualquier profundidad z, utilizando la siguiente expresión:

$$Sv = \frac{\sigma G}{\sigma' a * F.S.(B)} = \frac{\sigma G}{(\gamma 1 * z * Ka) * F.S.(B)}$$

En donde:

σG = Resistencia admisible del material de refuerzo

$F.S.(B)$ = Factor de seguridad ruptura del material de refuerzo

b) Determinar la longitud de cada capa del geo textil **L**, utilizando la siguiente expresión:

$$L = lr + le$$

$$L = \frac{H - z}{\tan\left(45 + \frac{\Phi'1}{2}\right)} + \frac{\sigma'a * Sv * F.S.(P)}{2 * \sigma'o * \tan(\Phi'F)}$$

En donde:

lr = Longitud dentro de la zona de falla de Rankine

le = Longitud efectiva

H = Altura total del muro

Z = Profundidad en donde se analiza la longitud del material de refuerzo

F.S.(P) = Factor de seguridad contra zafadura del material de refuerzo

$\sigma'o$ = Esfuerzo horizontal efectivo

$\Phi'1$ = Ángulo de fricción del suelo de relleno

$\Phi'F$ = Ángulo de fricción entre el material de refuerzo y el relleno = $\frac{2}{3} * \Phi'1$

c) Determinar la longitud de traslape **li**, utilizando la siguiente expresión::

$$li = \frac{Sv * \sigma'a * F.S.(P)}{4 * \sigma'o * \tan(\Phi'F)}$$

En donde:

F.S.(P) = Factor de seguridad contra zafadura del material de refuerzo.

6. **Resultados finales:** Se debe ajustar los resultados de **Sv, le, lr** y **li** a medidas constructivas.

3.4 RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MUROS EN SUELO REFORZADO

1. Altura del muro:

⁶La altura máxima recomendada a emplear es de 40 metros; sin embargo, las alturas frecuentes se encuentran de 15 a 25 metros y alturas cotidianas alrededor de 4 a 15 metros.

2. Base del Muro:

⁷Se recomienda establecer como dimensión de la base del muro, una longitud que sea igual al 70% o mayor que la altura del mismo.

3. Inclinación del Muro:

Se define 70° como la inclinación mínima respecto a la horizontal para los muros de contención, de lo contrario el análisis sería el de un terraplén o un talud, donde la superficie de falla es curva y los métodos a utilizar para determinarla no se ajustan al modelo de falla de Rankine.

4. Propiedades ingenieriles del suelo granular de relleno:

Es recomendable en lo posible usar material granular con ángulos de rozamiento que oscilen entre 25° y 36° , de tal forma que la resistencia entre la interface

⁶ Faustino Valero R, "Criterios para el proyecto de estructuras de suelo reforzado", (del Polo Ibero-Americano del Grupo Freyssinet-Tierra Arnada-Menard)

⁷ Mexichem, s. i. (2011). Mexichem PAVCO. Recuperado el 10 de Mayo de 2012, de Mexichem Colombia S.A.S.: <http://pavco.com.co/index.php?view=page&id=4>.

suelo-refuerzo alcance una magnitud adecuada, determinada como un 65% del ángulo de fricción interna del suelo de relleno.

Se recomienda que para el material de conformación del muro se emplee un material que posea un índice de plasticidad máximo de 20 y un contenido de finos < 50%.

Tabla 1 Especificaciones generales del material para construcción de terraplenes.

Suelos	Seleccionados	Adecuados	Tolerables
Aplicación	Corona, Núcleo, Cimiento	Corona, Núcleo, Cimiento	Núcleo, Cimiento
Tamaño Máximo	75mm	100mm	150mm
Pasa Tamiz No. 200	≤ 25% en peso	≤ 35% en peso	≤ 35% en peso
CBR de laboratorio	≥ 10.0%	≥ 5.0%	≥ 3.0%
Expansión de prueba CBR	0%	< 2.0%	< 2.0%
Contenido de materia orgánica	0%	< 1.0%	< 2.0%
Límite líquido	< 30	< 40	< 40
Índice de plasticidad	< 10	< 15	-

Fuente: INVIAS Art. 220-07

Tabla 2 Especificaciones suelos de relleno.

Tamaño Del Tamiz	% Pasa
4"	100%
No. 4	0 a 60%
No. 200	0 a 15%

Fuente FHWA1.

Se recomienda que el material a usar en la construcción del muro se compacte al 95% del Proctor modificado.

5. Factores de seguridad:⁸

A continuación se presenta el intervalo sugerido, para definir los factores de seguridad de estabilidad interna de los muros en suelo reforzado.

Tabla 3 Factores de seguridad estabilidad interna.

Factores de Seguridad: Estabilidad Interna	
FS (B) Ruptura material de refuerzo	1,3 a 1,5
FS (P) Zafadura del material de refuerzo	1,3 a 1,6

Fuente: Manual de diseño PAVCO.

6. Separación de Capas Sv:

⁹En la mayoría de los casos una capa de 30 cm a 40 cm, es lo más sencillo para un efectivo relleno de compactación para suelo granular de relleno.

Para suelos cohesivos de poca capacidad de drenaje se recomienda entre 20 cm y 30 cm.

Por razones constructivas y para evitar el embombamiento en la cara externa en cada una de las capas se recomienda que la altura de las mismas no exceda los 50 cm, aunque el resultado obtenido en los cálculos haya arrojado valores mayores.

⁸ Braja M. Das, "Principios de Ingeniería de cimentaciones" (Cuarta ed., Vol. I). (I. T. Editores, Ed., & U. A. José de la Cera Alonso, Trad.) Sacramento, California State, USA: THOMSON LEARNING.(1999).

⁹ Silvio Rojas, "Geotextiles", Universidad de Los Andes, Merida, Venezuela, Facultad de Ingeniería, Departamento de Vías, Fundaciones. 2009.

7. Longitud del Geotextil:

Si se usan rellenos con ángulos de rozamiento entre 25° y 30° , el valor de la longitud L de anclaje del Geotextil debería estar entre 80% y 100% de la altura, suponiendo que la cimentación es totalmente competente. La longitud de traslapeo Lo no debe ser menor que 1 metro.

4 APLICACIÓN DE DISEÑO

4.1 PLANTEAMIENTO

Para el desarrollo de éste proyecto de grado se planteó un problema geotécnico, en el cual es necesario estabilizar un muro mecánicamente. El muro tiene una altura de 4,88 m y es reforzado con geotextiles. Está compuesto por un relleno de suelo granular de propiedades $\gamma_1 = 110 \left[\frac{lb}{pie^3} \right] = 17,628 \left[\frac{KN}{m^3} \right]$ y $\phi_1' = 36^\circ$. El material de refuerzo empleado tiene las siguientes propiedades: $\sigma_G = 80 \left[\frac{lb}{pulg} \right] = 14,7 \left[\frac{KN}{m} \right]$.

Para la estabilización intern del muro se propusieron dos diseños diferentes, el primero basándose en la metodología convencional y el segundo empleando el programa computacional Geosoft, el cual es un software libre ofrecido por la compañía Pavco. Para cada uno de los diseños se determinó los parametros: Sv, L, Li.

4.2 SOLUCIÓN EMPLEANDO LA METODOLOGÍA CONVENCIONAL

A continuación se presenta el procedimiento y resultado del diseño del muro en suelo reforzado, para lograr su estabilidad interna.

$$k_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi_1}{2} \right)$$

$$k_a = \tan^2 \left(45 - \frac{36}{2} \right) = 0,2596 \approx 0,26$$

Determinación de Sv:

Para encontrar la separación Sv se realizan los siguientes tanteos, empleando la siguiente formula:

$$S_v = \frac{\sigma_G}{(\gamma_1 \cdot z \cdot k_a)[FS_{(B)}]}$$

Con $FS_{(B)} = 1,5$ en $z = 2,44[m]$

$$S_v = \frac{14,7}{(17,628 \cdot 2,44 \cdot 0,26)[1,5]} = 0,878185622 \approx 0,878$$

Con $FS_{(B)} = 1,5$ en $z = 3,65[m]$

$$S_v = \frac{14,7}{(17,628 \cdot 3,65 \cdot 0,26)[1,5]} = 0,585457082 \approx 0,585$$

Con $FS_{(B)} = 1,5$ en $z = 4,87[m]$

$$S_v = \frac{14,7}{(17,628 \cdot 4,87 \cdot 0,26)[1,5]} = 0,4390928 \approx 0,439$$

Entonces, se definen dos longitudes adecuadas constructivamente para la separación entre de capas de Geotextil, $S_v = 0,5$ metros para $z = 0$ a $z = 2,44$ y $S_v = 0,4$ metros para $z > 2,44$.

Determinación de L

$$L = L_r + L_e$$

$$l_r = \frac{H - z}{\tan\left(45 + \frac{\phi_1'}{2}\right)}$$

$$l_r = \frac{4,88 - 0,47}{\tan\left(45 + \frac{36}{2}\right)}$$

$$l_r = 2,242[m]$$

$$l_e = \frac{S_v \sigma_a' [FS_{(p)}]}{2\sigma_0' \tan(\phi_F')} = \frac{S_v \cdot k_a [FS_{(p)}]}{2 \tan(\phi_F')}$$

$$l_e = \frac{0,5 \cdot 0,26 \cdot [1,5]}{2 \cdot \tan\left(\frac{2}{3} \cdot 36\right)}$$

$$l_e = 0,218[m]$$

Ahora puede presentarse la siguiente tabla, basadas en las formulaciones anteriores, hasta completar la altura total del muro:

Tabla 4 Resultados de diseño Ejercicio de aplicación

z (m)	Sv Diseño (m)	Lr	Le	L = lr+le(m)	Ll (m)
		$(1/\tan(45+(\Phi/2)) \cdot (H - z))$	$Sv \cdot ((K_a \cdot F_{Sp}) / (2 \cdot \tan(\Phi)))$		
0,48	0,5	2,241911978	0,218665311	2,461	1
0,98	0,5	1,987149253	0,218665311	2,206	1
1,48	0,5	1,732386528	0,218665311	1,951	1
1,98	0,5	1,477623804	0,218665311	1,696	1
2,48	0,4	1,222861079	0,174932249	1,398	1
2,88	0,4	1,019050899	0,174932249	1,194	1
3,28	0,4	0,815240719	0,174932249	0,990	1
3,68	0,4	0,611430539	0,174932249	0,786	1
4,08	0,4	0,40762036	0,174932249	0,583	1
4,48	0,4	0,20381018	0,174932249	0,379	1
4,88	0,4	0	0,174932249	0,175	1

Con base en los cálculos precedentes, se define L = 2,5[m] para $z \leq 2,43$ [m] y L = 1,5[m] para $z > 2,43$ [m].

Determinación de l_l :

$$l_l = \frac{S_v \cdot k_a [FS_{(p)}]}{4 \cdot \tan(\phi_F')}$$

$$l_l = \frac{0,5 \cdot 0,26 \cdot [1,5]}{2 \cdot \tan\left(\frac{2}{3} \cdot 36\right)}$$

$$l_l = 0,471 [m]$$

Se define: $l_1 = 1[m]$ ya que esta distancia no debe ser menor que 1 metro, para garantizar el funcionamiento del traslapo.

4.3 SOLUCIÓN EMPLEANDO EL SOFTWARE GEOSOFT

El resultado del diseño para lograr la estabilidad interna del muro, empleando el software Geosoft, se presenta en la siguiente tabla:

Nota: El resultado final de diseño lo establece el parámetro “Sv Diseño” y “L a Usar”.

Z [m]	Geosintético	Sv Diseño [m]	Sv Calculado [m]	Le mínimo [m]	Lr [m]	L [m]	Lo [m]	L a Usar [m]	Lt [m]
0,18	T2100	0,177	12,073	0,305	2,395	2,7	0,914	3,901	4,99
0,68	T2100	0,5	3,157	0,305	2,14	2,45	0,914	3,901	5,32
1,18	T2100	0,5	1,816	0,305	1,885	2,19	0,914	3,901	5,32
1,58	T2100	0,4	1,355	0,305	1,681	1,99	0,914	3,901	5,22
1,98	T2100	0,4	1,081	0,305	1,478	1,78	0,914	3,901	5,22
2,38	T2100	0,4	0,899	0,305	1,274	1,58	0,914	3,901	5,22
2,78	T2100	0,4	0,77	0,305	1,07	1,38	0,914	3,901	5,22
3,08	T2100	0,3	0,695	0,305	0,917	1,22	0,914	3,901	5,12
3,38	T2100	0,3	0,633	0,305	0,764	1,07	0,914	3,901	5,12
3,68	T2100	0,3	0,581	0,305	0,611	0,92	0,914	3,901	5,12
3,98	T2100	0,3	0,537	0,305	0,458	0,76	0,914	3,901	5,12
4,28	T2100	0,3	0,5	0,305	0,306	0,61	0,914	3,901	5,12
4,58	T2100	0,3	0,467	0,305	0,153	0,46	0,914	3,901	5,12
4,88	T2100	0,3	0,438	0,305	0	0,31	0,914	3,901	5,12

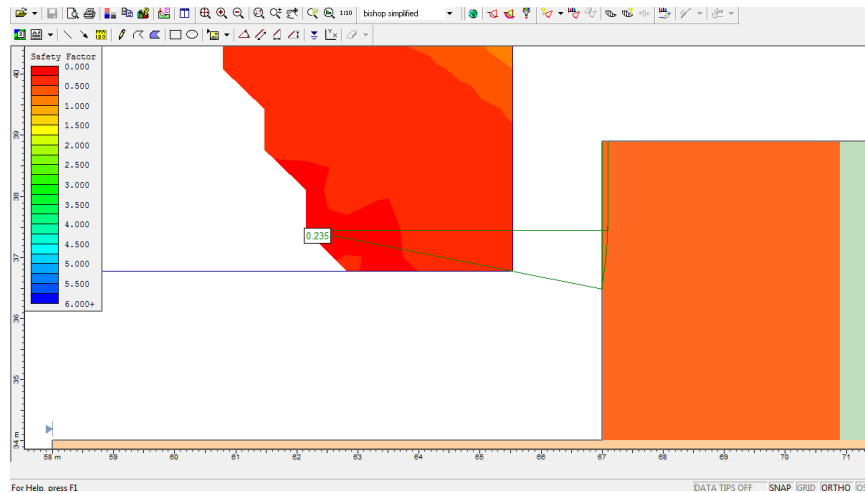
5 MODELAMIENTO EN SOFTWARE

Con el objetivo de poner a prueba el diseño realizado bajo la metodología convencional y empleando el software Geosoft, se genera un modelo en el que se simulan las propiedades ingenieriles, la composición de materiales y las características geométricas del muro. El programa elegido para este fin es Slide que pertenece al paquete comercial Rocscience.

5.1 MODELO I

La primera simulación se ejecuta sin emplear el material de refuerzo, en donde las fuerzas internas que actúan son generadas exclusivamente por la fricción generada entre las partículas del suelo. Como resultado se obtuvo un factor de seguridad de estabilidad interna del muro de 0,24 ($f_s=0,24$), del cual se puede interpretar la carencia de seguridad en la capacidad de servicio del muro. Se presenta una falla de tipo cuña ubicada en el extremo superior del muro, propia de este suelo granular de relleno.

Ilustración 2 Modelo 1 – Slide



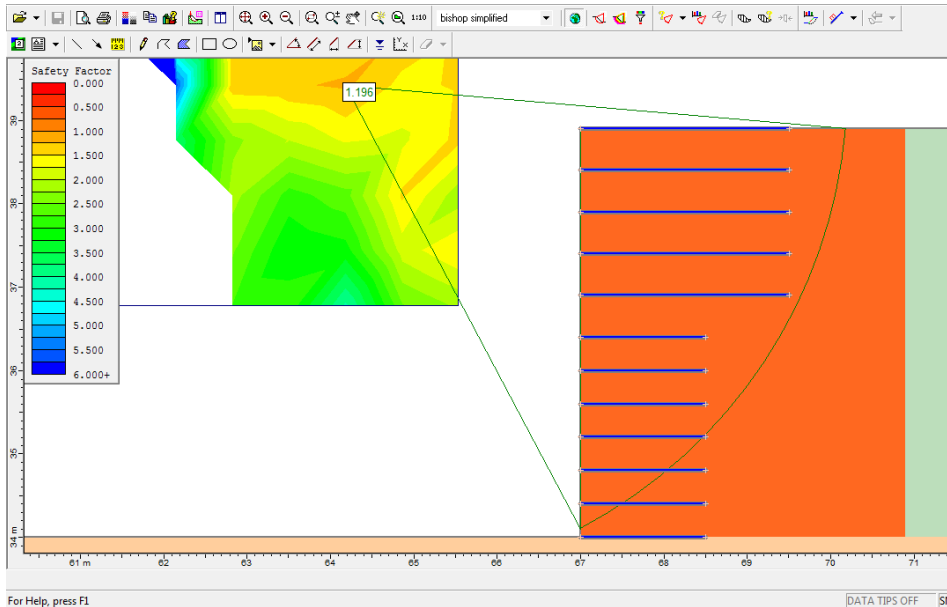
Fuente: El autor

5.2 MODELO II

Para el segundo modelo se mantiene las condiciones anteriores y se simula la construcción del muro haciendo la inclusión de un material de refuerzo para el suelo, en este caso un geotextil con resistencia admisible a la tensión de 14,7 [KN/m], y acción fricciónarte paralela al refuerzo. La distribución de refuerzo implementada es acorde a la establecida bajo la metodología convencional.

Esta condición del refuerzo incluido al suelo, permitió aumentar la capacidad friccionar de las partículas, como consecuencia del rozamiento generado entre el geotextil y los granos del suelo. De igual forma se agregó la capacidad de resistencia a la tensión al suelo y se mejoró la reacción bajo la solicitud de esfuerzos de cortante. Aumentando la capacidad de trabajo del muro, se pudo obtener un factor de seguridad en estabilidad interna de la estructura igual a 1,196 ($f_s=1,196$), siendo este tres veces mayor al anteriormente calculado

Ilustración 3 modelo II - Slide



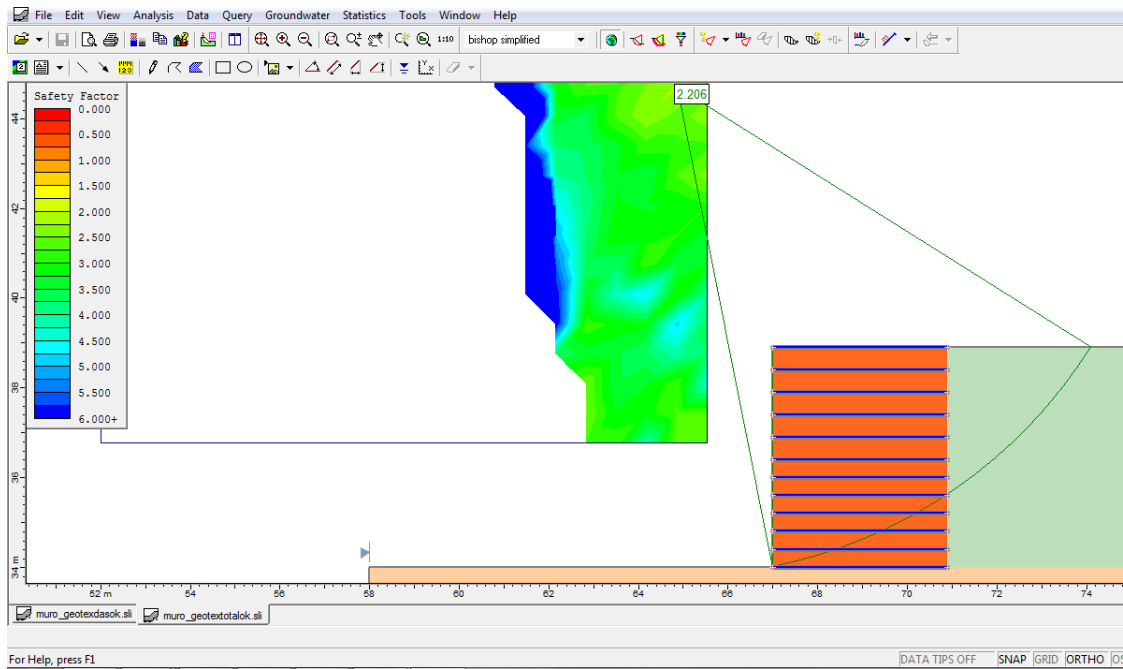
Fuente: El autor

5.3 MODELO III

Sin embargo un factor de seguridad interna de 1,196 no es suficiente para garantizar de forma adecuada la capacidad de servicio del muro, por lo que a falta de confiabilidad en la seguridad del muro se aumenta la cantidad de refuerzo de geotextil presente en el suelo. La solución de diseño consiste en simular la distribución de refuerzo generada por el software Geosoft, que se caracteriza por extender el geotextil en cada una de sus capas hasta alcanzar una longitud igual a la base del muro,

Efectuadas las mejoras de diseño en el modelo, se logra alcanzar un factor de seguridad de estabilidad interna de 2,206, suficiente para garantizar la integridad del muro.

Ilustración 4 Modelo III – Slide

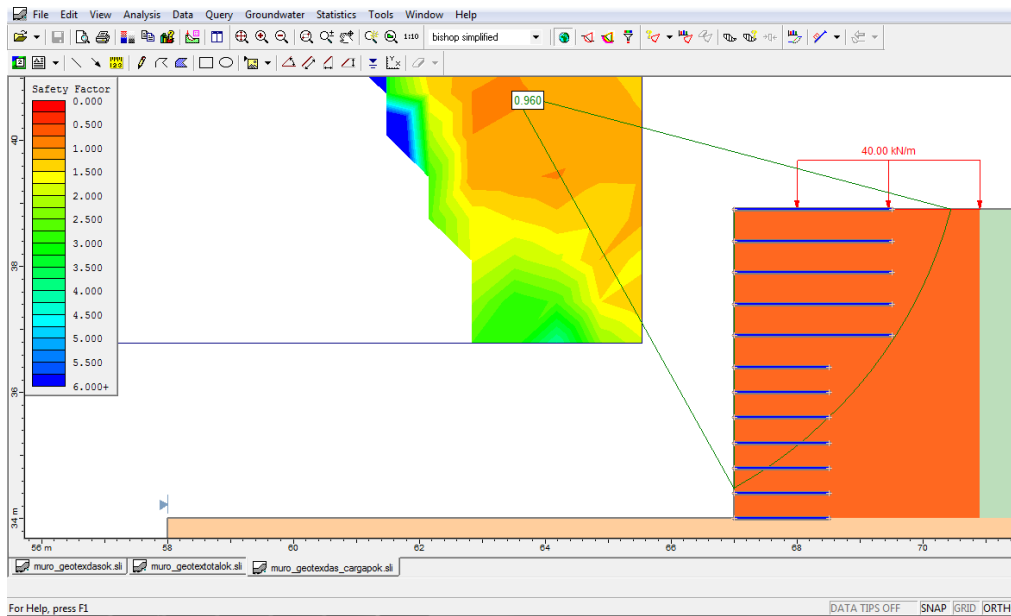


Fuente: El autor

5.4 MODELO IV

Para analizar un muro que soporta sobrecarga, el mismo modelo, fue puesto a prueba con una carga distribuida de 40 [KN/m], con borde libre de 1 [m] y refuerzo con características idénticas a las del modelo II, regido según los resultados de la metodología convencional según el autor Braja M. Das.

Ilustración 5 Modelo IV - Slide



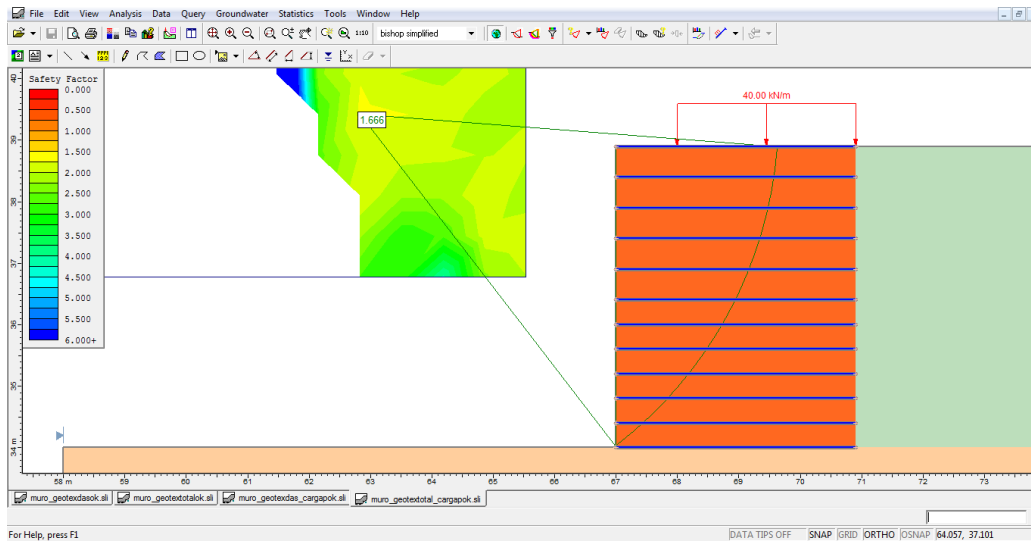
Fuente: El autor

Con las características de este modelo se obtuvo un factor de estabilidad interna de 0,96, el cual no es suficiente para garantizar la seguridad y el adecuado servicio del muro.

5.5 MODELO V

Para aumentar la magnitud del factor de seguridad, fue necesario recurrir nuevamente a alargar las longitudes horizontales del geotextil, hasta alcanzar una longitud igual al total de la base del muro, tal como lo sugiere el diseño obtenido con el software Geosoft.

Ilustración 6 Modelo V - Slide



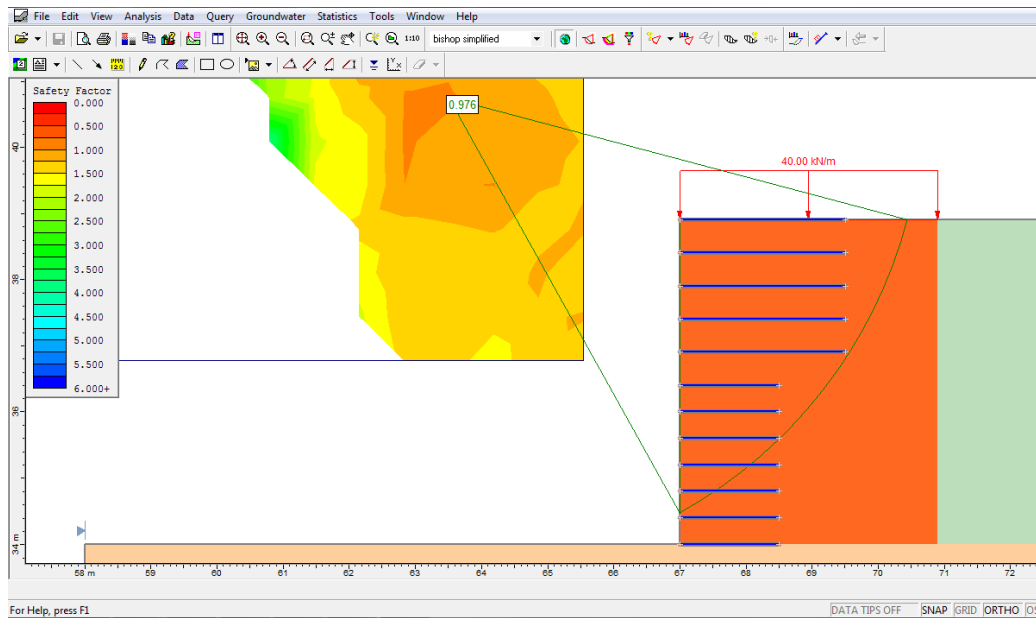
Fuente: El autor

Con esta solución de diseño se obtuvo un factor de estabilidad interna de 1,66 (F.S=1,66). Un factor de seguridad con esta magnitud, es un parámetro que nos indica que el muro puede soportar las solicitudes de carga a la que se puso a prueba.

5.6 MODELO VI

Para analizar un muro que soporta sobrecarga más crítica, el mismo modelo, fue puesto a prueba con una carga distribuida de 40 [KN/m], sin borde libre y refuerzo con características geométricas del modelo II, regido según los resultados de la metodología convencional según el autor Braja M. Das.

Ilustración 7 Modelo VI - Slide



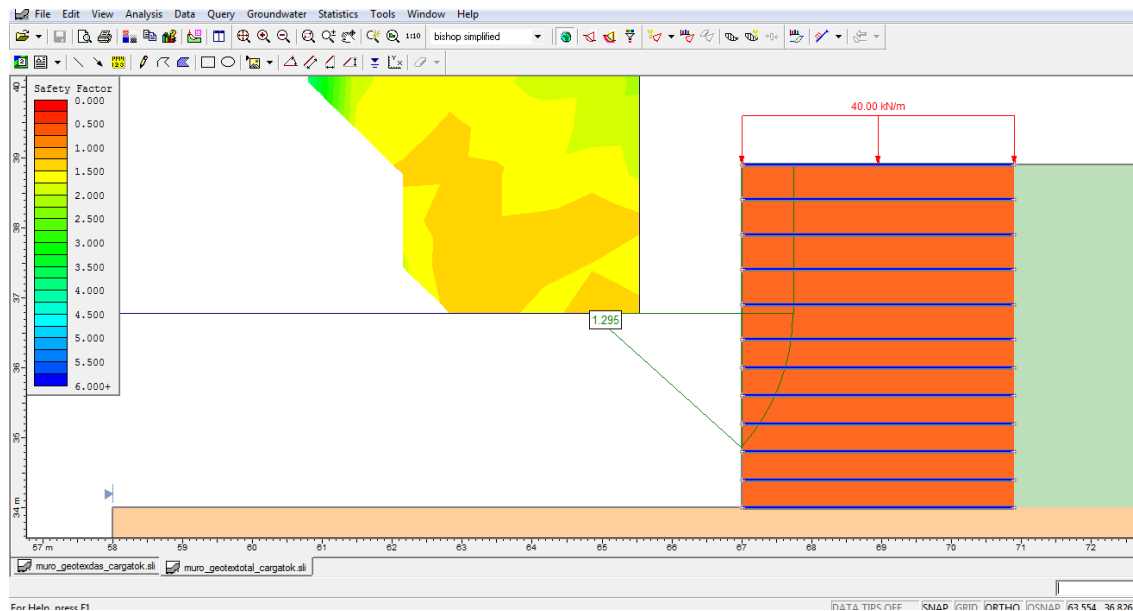
Fuente: El autor

El factor de seguridad resultante es de 0,967 (F.S = 0,967), insuficiente para garantizar la estabilidad interna del muro.

5.7 MODELO VII

Para aumentar la magnitud del factor de seguridad, fue necesario recurrir nuevamente a alargar las longitudes horizontales del geotextil, hasta alcanzar una longitud igual al total de la base del muro, tal como lo sugiere el diseño obtenido con el software Geosoft.

Ilustración 8 Modelo VII - Slide



Fuente: El autor

Con esta solución de diseño se obtuvo un factor de estabilidad interna de 1,295 (F.S=1,295). Aunque se generó un incremento en la magnitud, este parámetro no supera el 1,5. Para este caso crítico, la situación más desfavorable de servicio, este factor de seguridad no es despreciable a la hora de elegir esta solución geotécnica.

6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Los análisis de sensibilidad permiten medir fácilmente de forma cualitativa la influencia de ciertos parámetros ingenieriles en el resultado final de un diseño.

Para realizar el análisis de sensibilidad sobre la solución al problema geotécnico de estabilización mecánica mediante el diseño de un muro con suelo reforzado, se decidió realizar una variación de parámetros ligados a la geometría de la estructura y variaciones de las propiedades del material en la que se construye el muro, con el fin de captar la influencia que generan, en la separación vertical de las capas de geotextil (Sv) y la longitud de los tirantes (L) a lo largo de las capas.

El análisis se aplicará para muros diseñados bajo la metodología convencional y empleando un software Gesoft, de un paquete comercial.

6.1 ANÁLISIS DEL PARAMETRO ÁNGULO DE FRICCIÓN BAJO LAMETOLOGIA CONVENCIONAL

A continuación se muestran las tablas con el diseño de muros con suelo reforzado bajo la **Metodología Convencional**, con materiales de relleno con ángulos de fricción (ϕ) de magnitudes 31, 36 y 41 grados. (NOTA: Sv: separación vertical, Lr: Longitud del geotextil hasta el plano de falla de Rankine, Le: Longitud de anclaje después de la falla de Rankine, $L = Le + Lr$.)

Tabla 5 Análisis de sensibilidad - Resultados de diseño ángulo de fricción 31° 36° y 41°

Condición ángulo de fricción = 31°						
CAPA	z [m]	Sv Diseño [m]	Sv Calculado [m]	lr [m]	le [m]	L [m]
1	0,0768	0,4	22,614	2,716	0,255	2,970
2	0,4768	0,4	3,643	2,489	0,255	2,744
3	0,8768	0,4	1,981	2,263	0,255	2,518
4	1,2768	0,4	1,360	2,037	0,255	2,291
5	1,6768	0,4	1,036	1,81	0,255	2,065
6	2,0768	0,4	0,836	1,584	0,255	1,839
7	2,4768	0,3	0,701	1,358	0,191	1,549
8	2,7768	0,3	0,625	1,188	0,191	1,379
9	3,0768	0,3	0,564	1,018	0,191	1,209
10	3,3768	0,3	0,514	0,849	0,191	1,040
11	3,6768	0,3	0,472	0,679	0,191	0,870
12	3,9768	0,3	0,437	0,509	0,191	0,700
13	4,2768	0,3	0,406	0,339	0,191	0,530
14	4,5768	0,3	0,379	0,17	0,191	0,361
15	4,8768	0,3	0,356	0	0,191	0,191

Condición ángulo de fricción = 36°						
CAPA	z [m]	Sv Diseño [m]	Sv Calculado [m]	lr [m]	le [m]	L [m]
1	0,4768	0,5	4,491	2,242	0,219	2,461

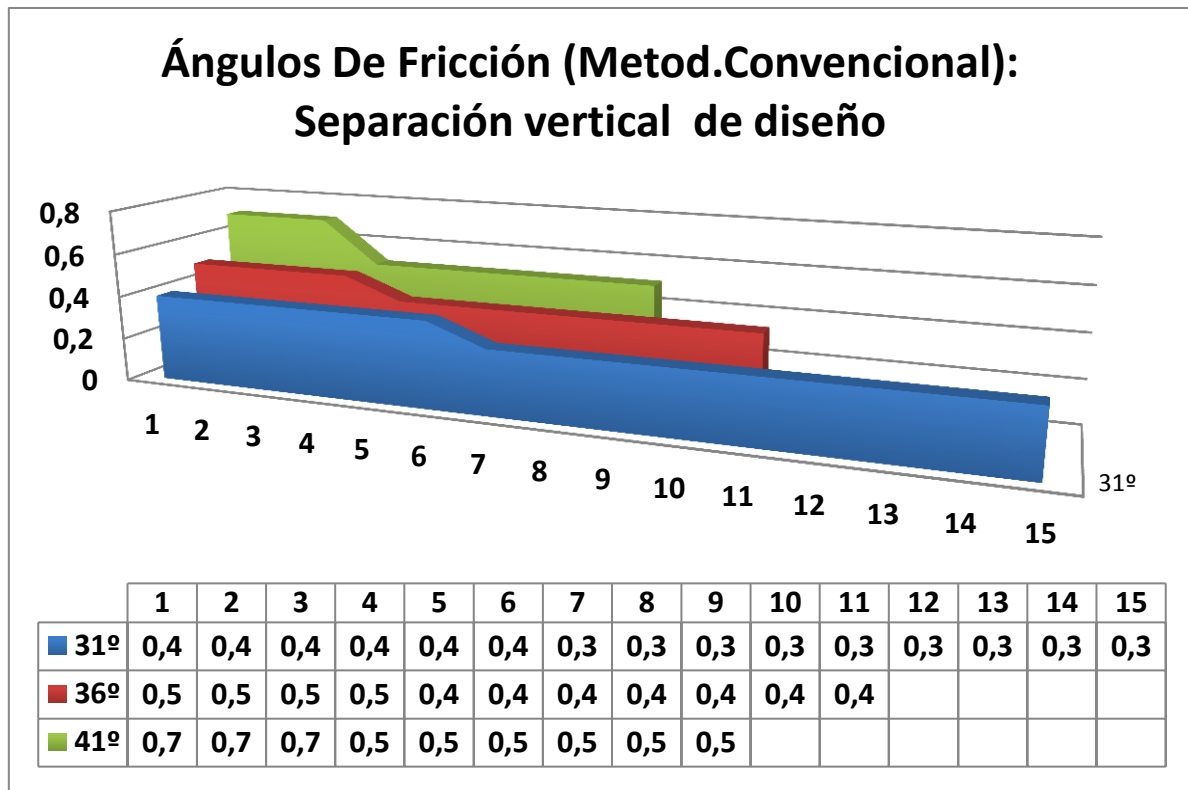
2	0,9768	0,5	2,192	1,987	0,219	2,206
3	1,4768	0,5	1,450	1,732	0,219	1,951
4	1,9768	0,5	1,083	1,478	0,219	1,696
5	2,4768	0,4	0,865	1,223	0,175	1,398
6	2,8768	0,4	0,744	1,019	0,175	1,194
7	3,2768	0,4	0,653	0,815	0,175	0,990
8	3,6768	0,4	0,582	0,611	0,175	0,786
9	4,0768	0,4	0,525	0,408	0,175	0,583
10	4,4768	0,4	0,478	0,204	0,175	0,379
11	4,8768	0,4	0,439	0	0,175	0,175

Condición ángulo de fricción = 41°						
CAPA	z [m]	Sv Diseño [m]	Sv Calculado [m]	lr [m]	le [m]	L [m]
1	0,2768	0,7	9,670	2,096	0,211	2,307
2	0,9768	0,7	2,740	1,777	0,211	1,988
3	1,6768	0,7	1,596	1,458	0,211	1,669
4	2,3768	0,5	1,126	1,139	0,151	1,290
5	2,8768	0,5	0,930	0,911	0,151	1,062
6	3,3768	0,5	0,793	0,684	0,151	0,834
7	3,8768	0,5	0,690	0,456	0,151	0,606
8	4,3768	0,5	0,612	0,228	0,151	0,379
9	4,8768	0,5	0,549	0	0,151	0,151

COMPARACIÓN GRAFICA:

Establecidos ya los resultados de diseño, se procede a realizar una comparación grafica de cada uno de estos:

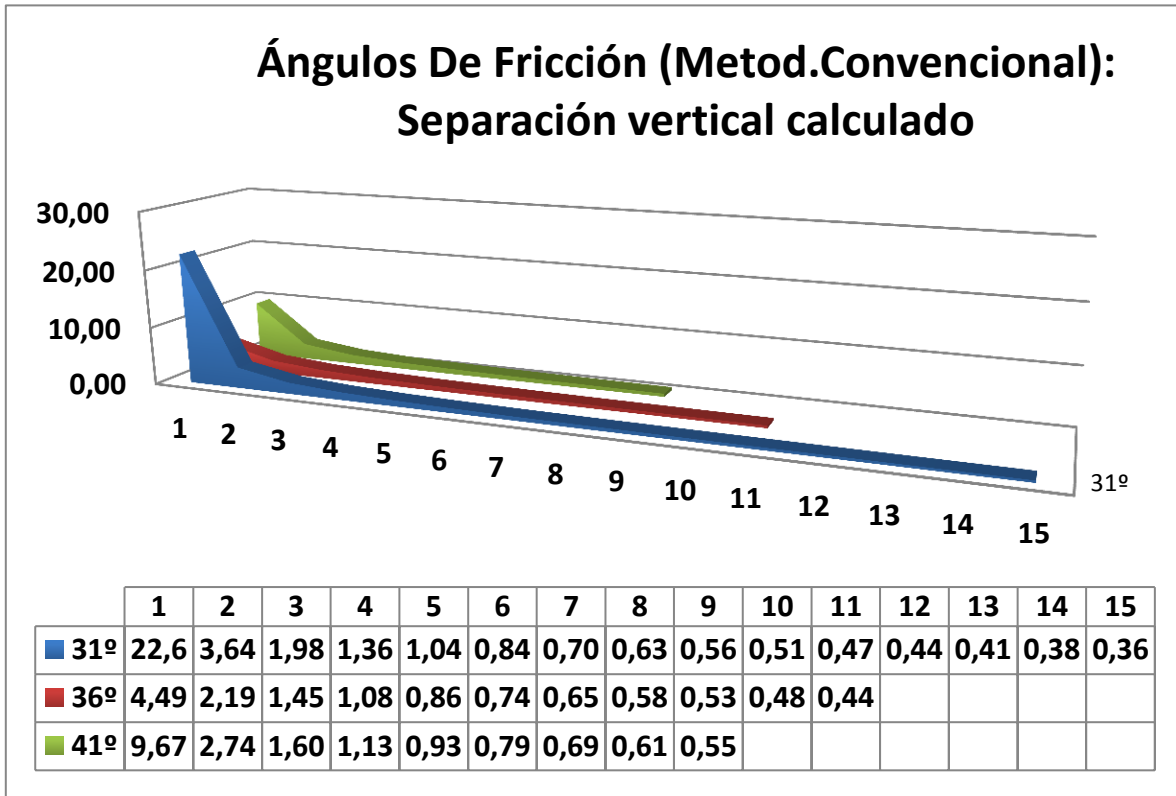
Ilustración 9 Análisis de Sensibilidad – Ángulos de fricción - Separación vertical de diseño



Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Ilustración 10 Análisis de Sensibilidad – Ángulos de fricción - Separación vertical calculado



Fuente: El autor

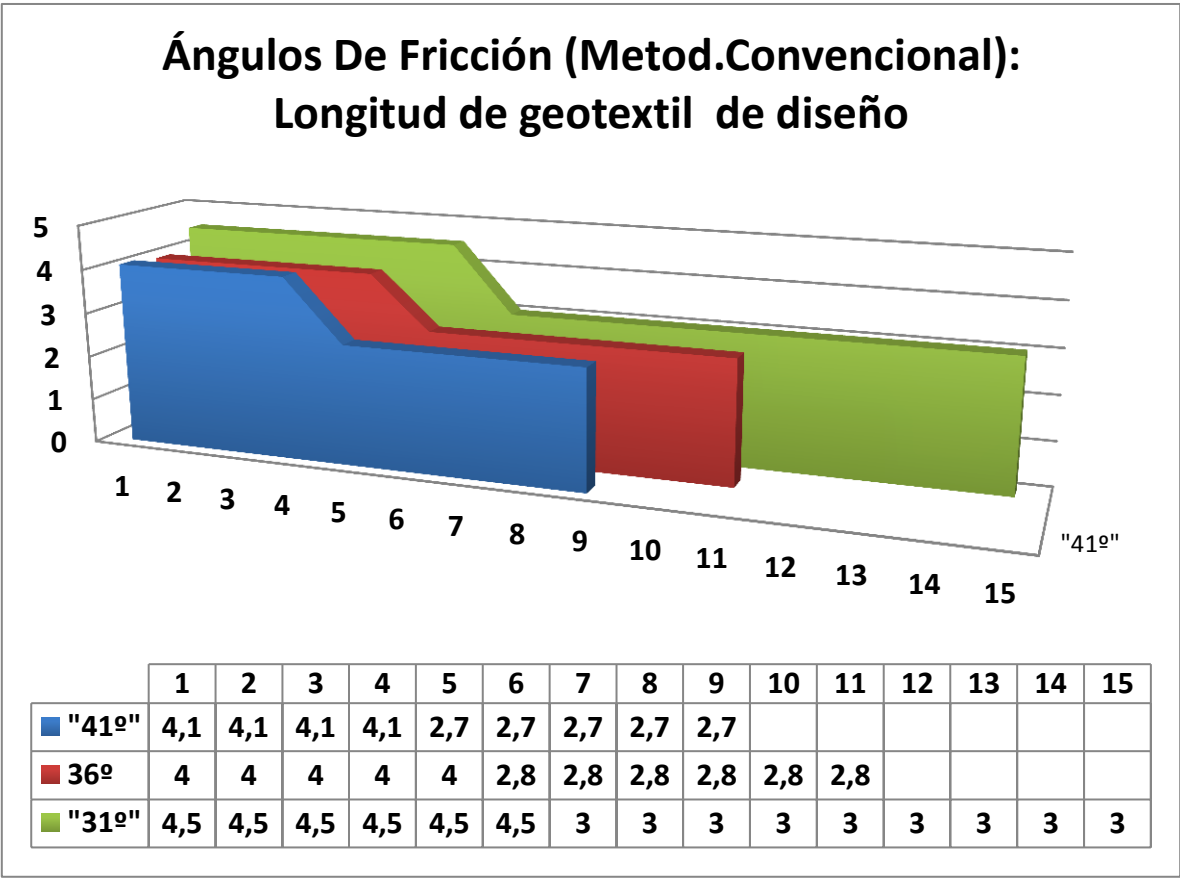
Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Centímetros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

ANÁLISIS DE LA SEPARACIÓN ENTRE TIRAS DE GEOTEXTIL (Sv):

Se presenta un incremento directamente proporcional entre el ángulo de fricción del suelo granular de relleno y la distancia de separación sv de las capas de refuerzo. Esto se debe a que entre mayor sea la capacidad de fricción del suelo, se necesitara menos aporte de capacidad para friccionar por parte del geotextil,

permitiendo mayor separación entre las capas verticales de refuerzo. Como consecuencia el número de capas que divide el muro disminuye a medida que aumenta el ángulo de fricción y aumenta el espesor de cada una de éstas.

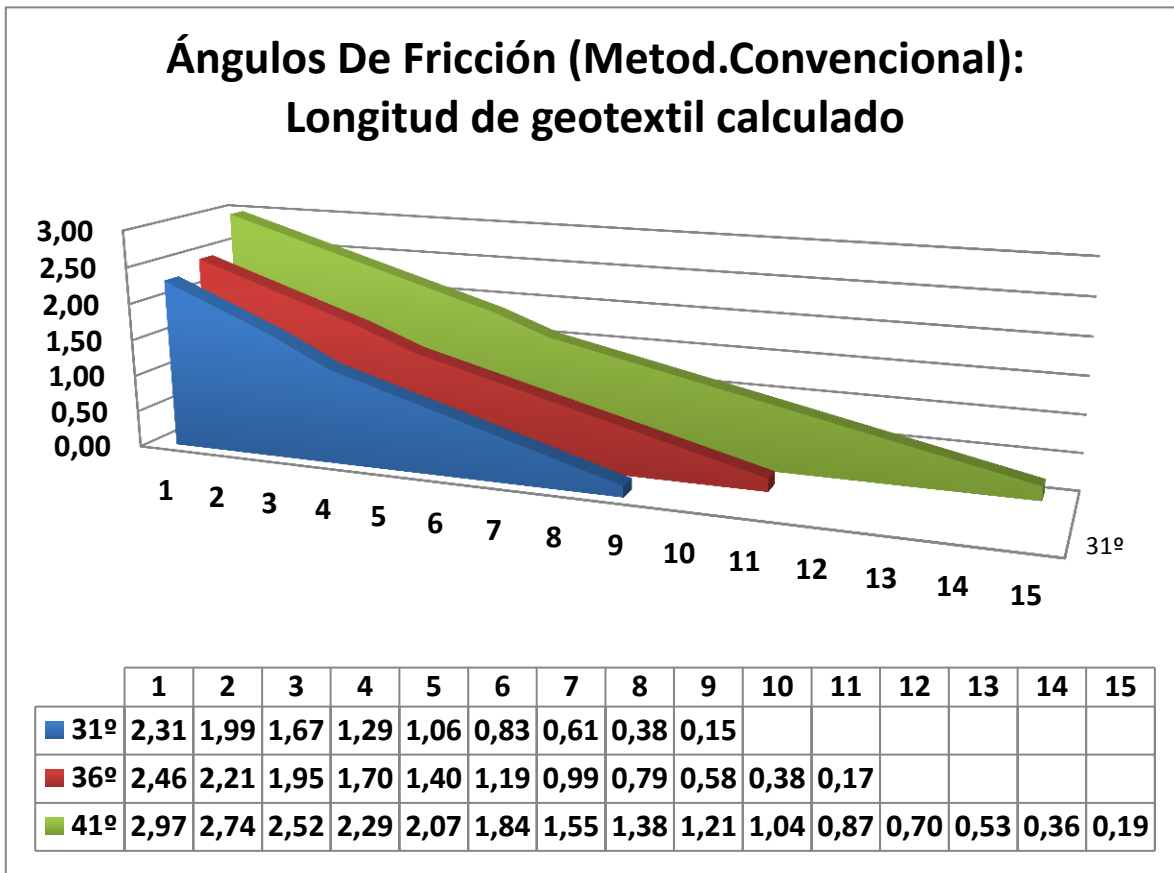
Ilustración 11 Análisis de Sensibilidad – Ángulos de fricción - Longitud de geotextil de diseño



Fuente: El autor

Longitud de geotextil (L): (Eje Y: Longitud de geotextil (L) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Ilustración 12 Análisis de Sensibilidad – Ángulos de fricción - Longitud de geotextil calculado



Fuente: El autor

Longitud de geotextil (L): (Eje Y: Longitud de geotextil (L) [metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

LONGITUD DE LOS GEOTEXTILES (L):

Se presenta un comportamiento inversamente proporcional entre la magnitud del ángulo de fricción del material granular de relleno y la longitud del material de refuerzo. A medida que se incrementa el ángulo de fricción del suelo, se disminuye la longitud del geotextil. Esto se debe a que una mayor capacidad de fricción entre

el geotextil y el suelo, termina generando mayor resistencia en menor área de contacto.

Entre mayor sea la magnitud del ángulo de fricción, menor será la longitud de anclaje necesaria para alcanzar el plano de falla descrito por Rankine, en donde el ángulo de la línea de falla con respecto a la horizontal, descrita por $45+(\Phi'/2)$ aumentará, disminuyendo el tamaño de la cuña de falla, por lo que la resistencia adecuada en la interfaz suelo-geotextil se lograra empleando menor cantidad de material.

6.2 ANÁLISIS DEL PARAMETRO ALTURA DEL MURO BAJO LAMETOLOGIA CONVENCIONAL

A continuación se muestran las tablas con el diseño de muros con suelo reforzado de alturas $H = 4, 6, 8$ y 10 metros, bajo la metodología convencional, con material de relleno con ángulo de fricción $(\phi) 31^\circ$

Tabla 6 Tabla 6 Análisis de sensibilidad - Resultados de diseño altura de muro 4 m, 6 m, 8 m y 10 m

Atura: Muro de 4[m]						
capa	z [m]	Sv [m]	sv [m]	lr [m]	le [m]	L [m]
1	0,6	0,6	3,57	1,732	0,262	1,99
2	1,3	0,7	1,65	1,376	0,306	1,68
3	2	0,7	1,07	1,019	0,306	1,33
4	2,5	0,5	0,86	0,764	0,219	0,98
5	3	0,5	0,71	0,51	0,219	0,73
6	3,5	0,5	0,61	0,255	0,219	0,47
7	4	0,5	0,54	0	0,219	0,22

Atura: Muro de 6[m]						
capa	z [m]	Sv [m]	sv [m]	lr [m]	lr m[]	L [m]
1	0,2	0,4	10,71	2,955	0,175	3,13
2	0,7	0,5	3,06	2,7	0,219	2,92
3	1,2	0,5	1,78	2,446	0,219	2,66
4	1,6	0,4	1,34	2,242	0,175	2,42
5	2	0,4	1,07	2,038	0,175	2,21
6	2,4	0,4	0,89	1,834	0,175	2,01
7	2,8	0,4	0,76	1,63	0,175	1,81
8	3,2	0,4	0,67	1,427	0,175	1,60
9	3,6	0,4	0,59	1,223	0,175	1,40
10	3,9	0,3	0,55	1,07	0,131	1,20
11	4,2	0,3	0,51	0,917	0,131	1,05
12	4,5	0,3	0,48	0,764	0,131	0,90
13	4,8	0,3	0,45	0,611	0,131	0,74
14	5,1	0,3	0,42	0,459	0,131	0,59
15	5,4	0,3	0,40	0,306	0,131	0,44
16	5,7	0,3	0,38	0,153	0,131	0,28
17	6	0,3	0,36	0	0,131	0,13

Atura: Muro de 8[m]						
capa	z [m]	Sv [m]	sv [m]	lr [m]	le [m]	L [m]
1	0,5	0,5	4,28	3,821	0,219	4,04
2	1	0,5	2,14	3,567	0,219	3,79
3	1,5	0,5	1,43	3,312	0,219	3,53
4	2	0,5	1,07	3,057	0,219	3,28
5	2,4	0,4	0,89	2,853	0,175	3,03
6	2,8	0,4	0,76	2,65	0,175	2,82
7	3,2	0,4	0,67	2,446	0,175	2,62
8	3,6	0,4	0,59	2,242	0,175	2,42
9	4	0,4	0,54	2,038	0,175	2,21
10	4,4	0,4	0,49	1,834	0,175	2,01
11	4,7	0,3	0,46	1,681	0,131	1,81
12	5	0,3	0,43	1,529	0,131	1,66
13	5,3	0,3	0,40	1,376	0,131	1,51
14	5,6	0,3	0,38	1,223	0,131	1,35
15	5,9	0,3	0,36	1,07	0,131	1,20
16	6,2	0,3	0,35	0,917	0,131	1,05
17	6,5	0,3	0,33	0,764	0,131	0,90
18	6,8	0,3	0,31	0,611	0,131	0,74
19	7,1	0,3	0,30	0,459	0,131	0,59
20	7,4	0,3	0,29	0,306	0,131	0,44
21	7,7	0,3	0,28	0,153	0,131	0,28
22	8	0,3	0,27	0	0,131	0,13

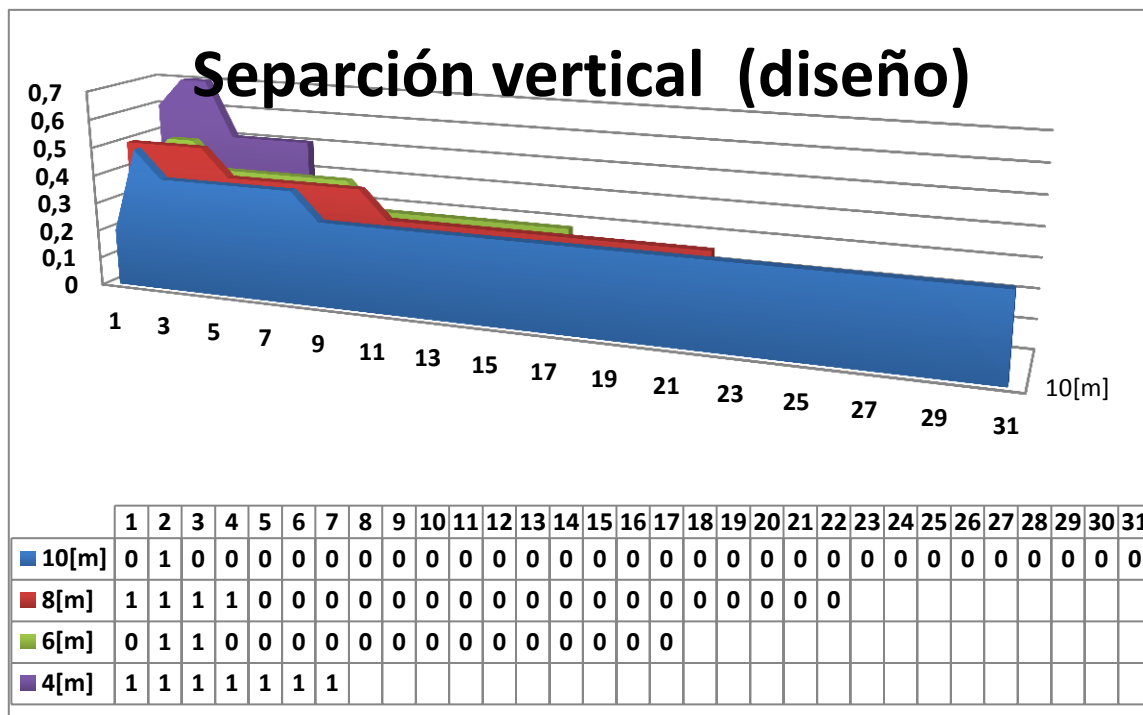
Atura: Muro de 10[m]						
Capa	z [m]	Sv [m]	sv [m]	lr [m]	le [m]	L [m]
1	0,2	0,2	10,71	4,993	0,087	5,08
2	0,7	0,5	3,06	4,739	0,219	4,96
3	1,1	0,4	1,95	4,535	0,175	4,71
4	1,5	0,4	1,43	4,331	0,175	4,51
5	1,9	0,4	1,13	4,127	0,175	4,30
6	2,3	0,4	0,93	3,923	0,175	4,10
7	2,7	0,4	0,79	3,72	0,175	3,89
8	3,1	0,4	0,69	3,516	0,175	3,69
9	3,4	0,3	0,63	3,363	0,131	3,49
10	3,7	0,3	0,58	3,21	0,131	3,34
11	4	0,3	0,54	3,057	0,131	3,19
12	4,3	0,3	0,50	2,904	0,131	3,04
13	4,6	0,3	0,47	2,751	0,131	2,88
14	4,9	0,3	0,44	2,599	0,131	2,73
15	5,2	0,3	0,41	2,446	0,131	2,58
16	5,5	0,3	0,39	2,293	0,131	2,42
17	5,8	0,3	0,37	2,14	0,131	2,27
18	6,1	0,3	0,35	1,987	0,131	2,12
19	6,4	0,3	0,33	1,834	0,131	1,97
20	6,7	0,3	0,32	1,681	0,131	1,81
21	7	0,3	0,31	1,529	0,131	1,66
22	7,3	0,3	0,29	1,376	0,131	1,51
23	7,6	0,3	0,28	1,223	0,131	1,35
24	7,9	0,3	0,27	1,07	0,131	1,20
25	8,2	0,3	0,26	0,917	0,131	1,05
26	8,5	0,3	0,25	0,764	0,131	0,90

27	8,8	0,3	0,24	0,611	0,131	0,74
28	9,1	0,3	0,24	0,459	0,131	0,59
29	9,4	0,3	0,23	0,306	0,131	0,44
30	9,7	0,3	0,22	0,153	0,131	0,28
31	10	0,3	0,21	-0	0,131	0,13

COMPARACIÓN GRAFICA:

Establecidos ya los resultados de diseño, se procede a realizar una comparación grafica de cada uno de estos:

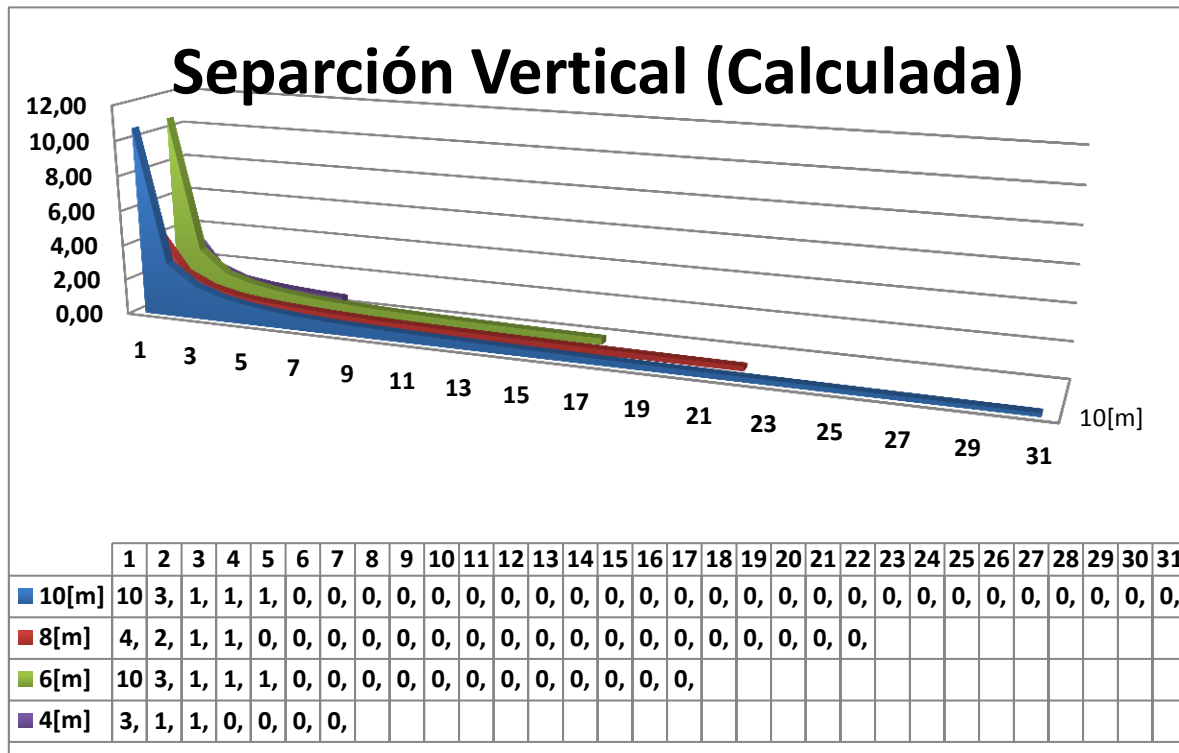
Ilustración 13 Análisis de Sensibilidad – Altura de Muro – Separación vertical de diseño



Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Ilustración 14 Análisis de Sensibilidad – Altura de Muro – Separación vertical calculada



Fuente: El autor

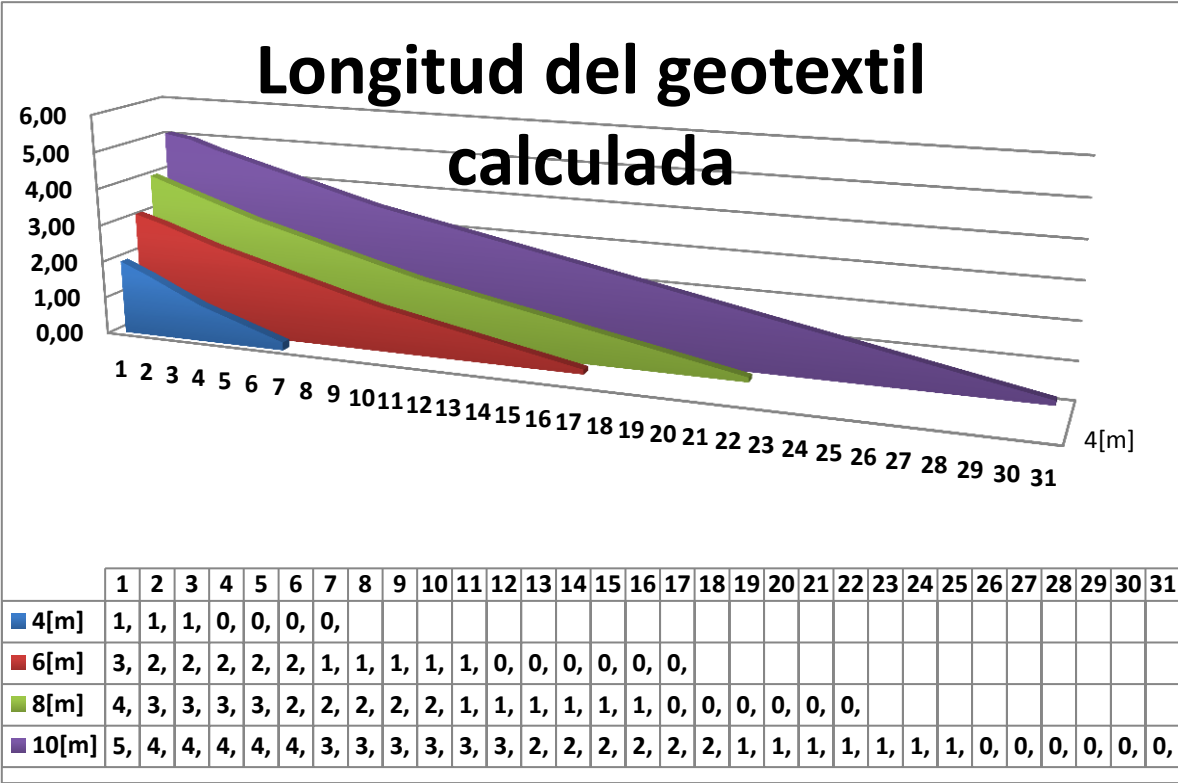
Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

ANÁLISIS DE LA SEPARACIÓN ENTRE TIRAS DE GEOTEXTIL (Sv):

Considerando la teoría de empuje de suelos en muros, se establece que solo existe expansión lateral, los esfuerzos horizontales debido al peso propio lógicamente aumentarían a medida que se tenga que compactar mayor cantidad de materia de relleno. Las capas a compactar deberán ser mucho más delgadas a medida que las alturas de los muros aumentan, para generar mayor resistencia

frente a la solicitud de los esfuerzos, así lo indican las tablas mostradas anteriormente. Como consecuencia se presentan incrementos en el material de refuerzo para el diseño de las separaciones verticales (SV).

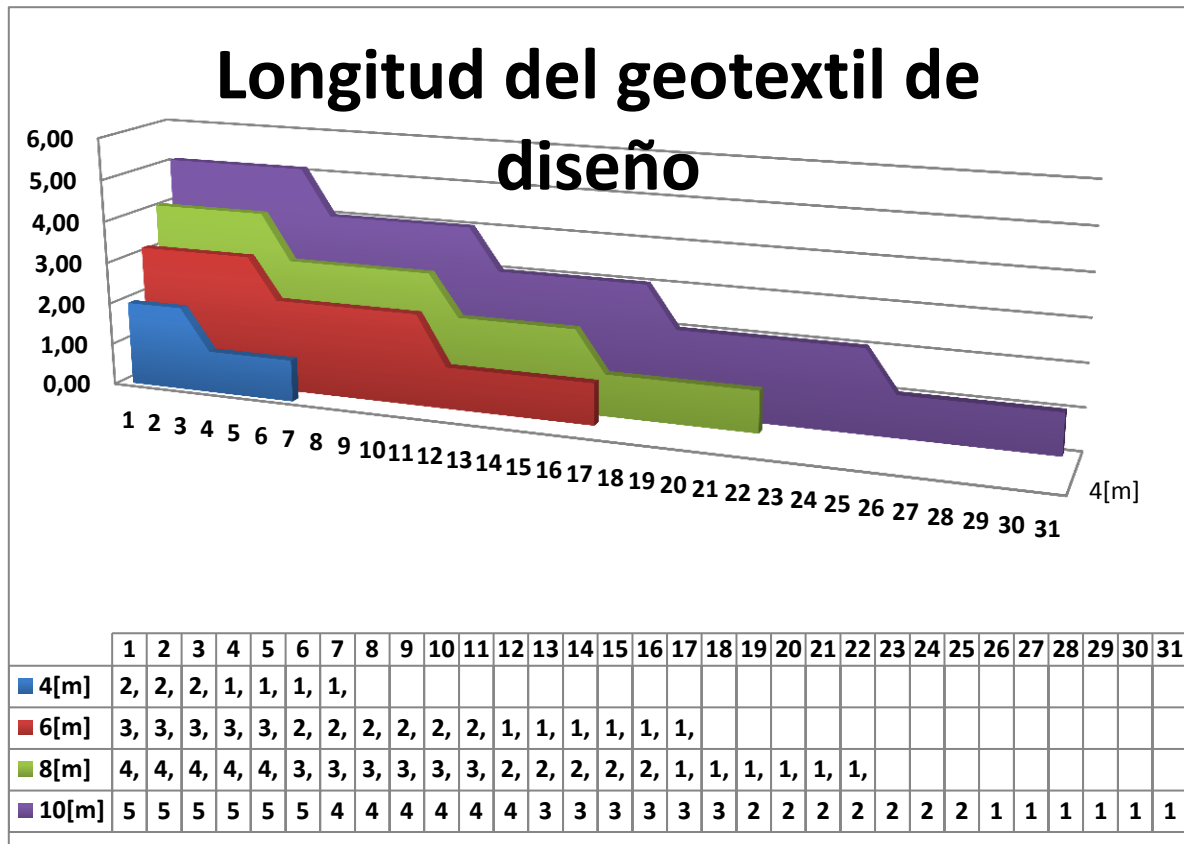
Ilustración 15 Análisis de Sensibilidad – Altura de Muro – Longitud del geotextil calculada



Fuente: El autor

Longitud de geotextil (L): (Eje Y: Longitud de geotextil (L) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Ilustración 16 Análisis de Sensibilidad – Altura de Muro – Longitud del geotextil de diseño



Fuente: El autor

Longitud de geotextil (L): (Eje Y: Longitud de geotextil (L) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

ANÁLISIS DE LA LONGITUD DE LOS GEOTEXTILES (L):

La longitud horizontal por capa del geotextil, es un parámetro que aumenta proporcionalmente a la altura de los muros mecánicamente estabilizados con suelo reforzado. En los casos de los tirantes en sentido horizontal, se hacen necesarias mayores longitudes de anclaje para alcanzar la estabilidad interna del

muro.[4] La longitud de anclaje mínima, L_e , dependerá del esfuerzo cortante requerido a desarrollarse entre el geotextil y el suelo que lo rodea.

Mayor cantidad de geotextil se hará necesaria en la región detrás de la línea de falla del suelo para lograr equilibrar la fuerza de tensión generada por los esfuerzos verticales en el relleno.

6.3 ANÁLISIS DEL PARAMETRO ÁNGULO DE FRICCIÓN EN EL PROGRAMA GEOSOFT

A continuación se muestran las tablas con el diseño de muros con suelo reforzado utilizando un software de un paquete comercial con materiales de relleno con ángulos de fricción (ϕ) de magnitudes 31, 36 y 41 grados. (NOTA: Sv: separación vertical, Lr: Longitud del geotextil hasta el plano de falla de Rankine, Le: Longitud de anclaje después de la falla de Rankine, $L = L_e + L_r$).

Tabla 7 Tabla 6 Análisis de sensibilidad - Resultados de diseño ángulo de fricción 31°, 36° y 41° - Geosoft

Z [m]	Geosin.	Sv Diseño [m]	Sv Cal [m]	Le min [m]	Lr [m]	L [m]	Lo [m]	L a Usar [m]	Lt [m]
0,177	T2100	0,177	9,792	0,305	2,659	2,964	0,914	3,901	4,99
0,677	T2100	0,5	2,560	0,305	2,376	2,681	0,914	3,901	5,32
1,177	T2100	0,5	1,473	0,305	2,093	2,398	0,914	3,901	5,32
1,577	T2100	0,4	1,099	0,305	1,867	2,172	0,914	3,901	5,22
1,977	T2100	0,4	0,877	0,305	1,641	1,945	0,914	3,901	5,22
2,377	T2100	0,4	0,729	0,305	1,414	1,719	0,914	3,901	5,22

2,777	T2100	0,4	0,624	0,305	1,188	1,493	0,914	3,901	5,22
3,077	T2100	0,3	0,563	0,305	1,018	1,323	0,914	3,901	5,12
3,377	T2100	0,3	0,513	0,305	0,849	1,153	0,914	3,901	5,12
3,677	T2100	0,3	0,471	0,305	0,679	0,984	0,914	3,901	5,12
3,977	T2100	0,3	0,436	0,305	0,509	0,814	0,914	3,901	5,12
4,277	T2100	0,3	0,405	0,305	0,339	0,644	0,914	3,901	5,12
4,577	T2100	0,3	0,379	0,305	0,170	0,474	0,914	3,901	5,12
4,877	T2100	0,3	0,355	0,305	0,000	0,305	0,914	3,901	5,12

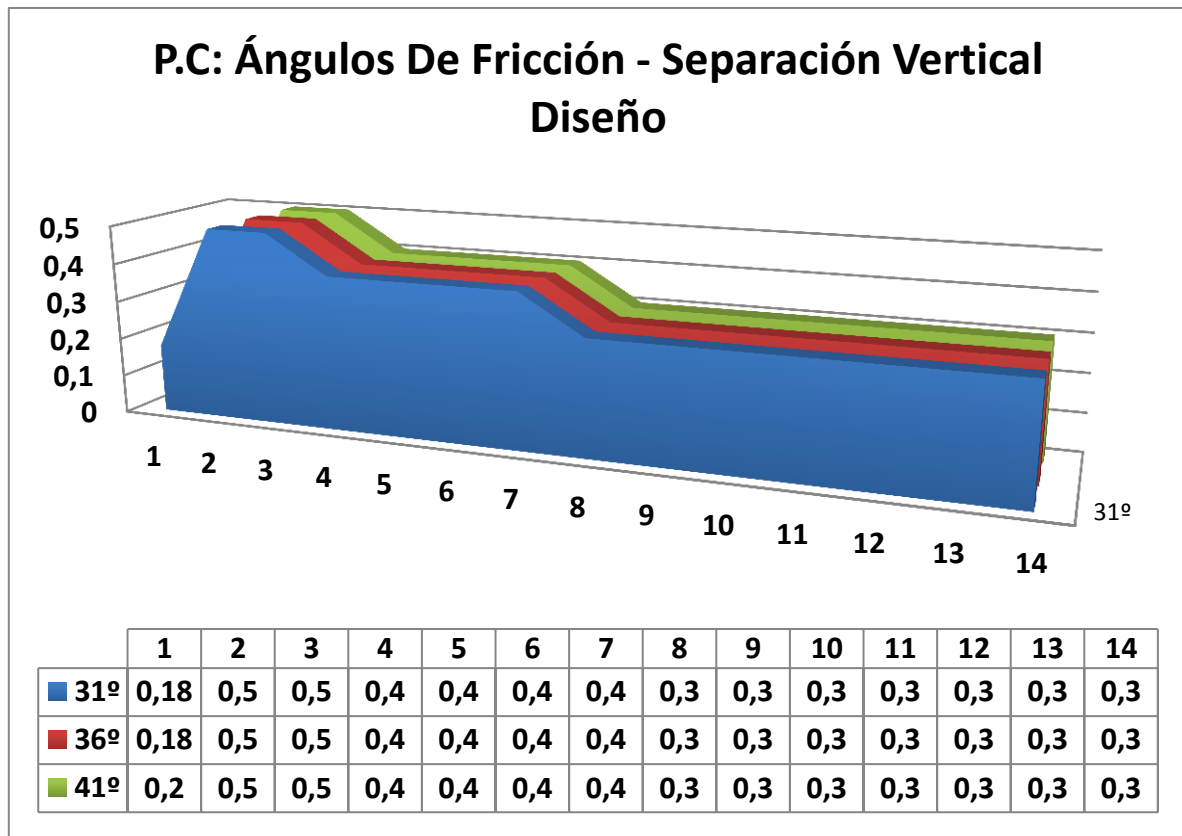
Z [m]	Geosintético	Sv Diseño [m]	Sv Calculado [m]	Le mínimo [m]	Lr [m]	L [m]	Lo [m]	L a Usar [m]	Lt [m]
0,177	T2100	0,177	12,073	0,305	2,395	2,699	0,914	3,901	4,99
0,677	T2100	0,5	3,157	0,305	2,140	2,445	0,914	3,901	5,32
1,177	T2100	0,5	1,816	0,305	1,885	2,190	0,914	3,901	5,32
1,577	T2100	0,4	1,355	0,305	1,681	1,986	0,914	3,901	5,22
1,977	T2100	0,4	1,081	0,305	1,478	1,782	0,914	3,901	5,22
2,377	T2100	0,4	0,899	0,305	1,274	1,579	0,914	3,901	5,22
2,777	T2100	0,4	0,77	0,305	1,070	1,375	0,914	3,901	5,22
3,077	T2100	0,3	0,695	0,305	0,917	1,222	0,914	3,901	5,12
3,377	T2100	0,3	0,633	0,305	0,764	1,069	0,914	3,901	5,12
3,677	T2100	0,3	0,581	0,305	0,611	0,916	0,914	3,901	5,12
3,977	T2100	0,3	0,537	0,305	0,458	0,763	0,914	3,901	5,12
4,277	T2100	0,3	0,5	0,305	0,306	0,610	0,914	3,901	5,12
4,577	T2100	0,3	0,467	0,305	0,153	0,458	0,914	3,901	5,12
4,877	T2100	0,3	0,438	0,305	0,000	0,305	0,914	3,901	5,12

Z [m]	Geosintético	Sv Diseño [m]	Sv Calculado [m]	Le mínimo [m]	Lr [m]	L [m]	Lo [m]	L a Usar [m]	Lt [m]
0,177	T2100	0,2	15,092	0,305	2,142	2,447	0,914	3,901	4,99
0,677	T2100	0,5	3,946	0,305	1,914	2,219	0,914	3,901	5,32
1,177	T2100	0,5	2,270	0,305	1,686	1,991	0,914	3,901	5,32
1,577	T2100	0,4	1,694	0,305	1,504	1,809	0,914	3,901	5,22
1,977	T2100	0,4	1,351	0,305	1,322	1,626	0,914	3,901	5,22
2,377	T2100	0,4	1,124	0,305	1,139	1,444	0,914	3,901	5,22
2,777	T2100	0,4	0,962	0,305	0,957	1,262	0,914	3,901	5,22
3,077	T2100	0,3	0,868	0,305	0,820	1,125	0,914	3,901	5,12
3,377	T2100	0,3	0,791	0,305	0,683	0,988	0,914	3,901	5,12
3,677	T2100	0,3	0,726	0,305	0,547	0,852	0,914	3,901	5,12
3,977	T2100	0,3	0,672	0,305	0,410	0,715	0,914	3,901	5,12
4,277	T2100	0,3	0,625	0,305	0,273	0,578	0,914	3,901	5,12
4,577	T2100	0,3	0,584	0,305	0,137	0,441	0,914	3,901	5,12
4,877	T2100	0,3	0,548	0,305	0,000	0,305	0,914	3,901	5,12

COMPARACIÓN GRAFICA:

Establecidos ya los resultados de diseño, se procede a realizar una comparación grafica de cada uno de estos:

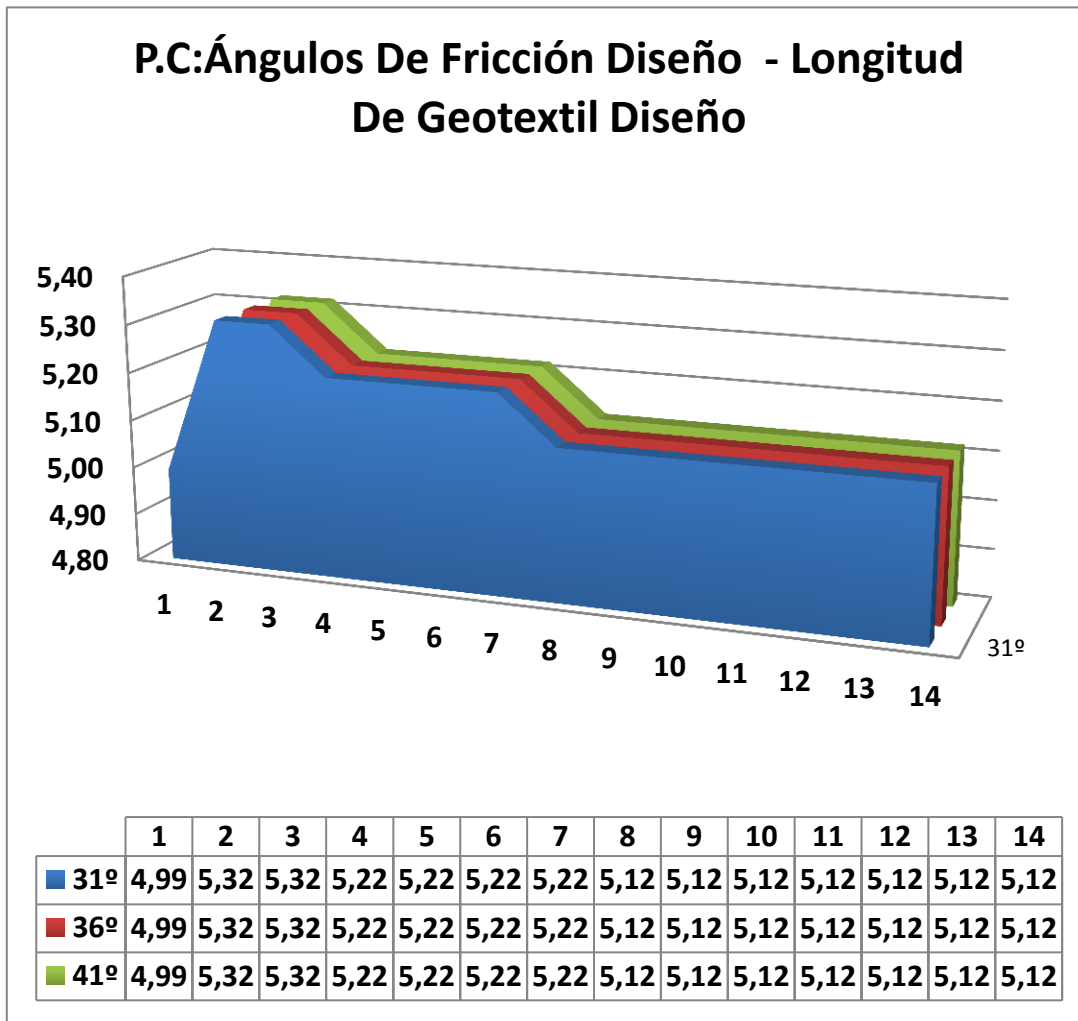
Ilustración 17 Análisis de Sensibilidad – Paquete comercial Ángulo de fricción – Separación vertical de diseño



Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Ilustración 18 Análisis de Sensibilidad – Paquete comercial Ángulo de fricción – Longitud de geotextil de diseño



Fuente: El autor

Longitud de geotextil (L): (Eje Y: Longitud de geotextil (L) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

ANÁLISIS DE LA LONGITUD DE LOS GEOTEXILES (L) y SEPARACIÓN ENTRE TIRAS DE GEOTEXTIL (Sv):

Para el paquete comercial, la variación del ángulo de fricción no es determinante tanto en el número de capas como en las longitudes de la separación vertical, ya que mantienen la misma distribución a medida que aumenta la profundidad del muro.

En cuanto a las longitudes totales de diseño (L_t), el paquete comercial mantiene el criterio de establecer este refuerzo con el 80% de la altura del muro ($0,8 \cdot H$), a esta cantidad se suman las longitudes de traslapo (L_i), separación vertical (SV), L_e y L_r . Se mantienen las mismas distribuciones de geotextiles a lo largo de los muros con diferentes ángulos de fricción en los materiales de relleno.

En este caso el ángulo de fricción debería ser determinante en la distribución de los geotextiles a lo largo del muro, ya que la capacidad de rozamiento entre las partículas del suelo y el componente del geotextil debería aportar cierta resistencia al deslizamiento entre los dos materiales

6.1 ANÁLISIS DEL PARAMETRO ALTURA DEL MURO EN EL PROGRAMA GEOSOFT

A continuación se muestran las tablas con el diseño de muros con suelo reforzado de alturas $H = 4, 6, 8$ y 10 metros, usando un software de un paquete comercial.

Tabla 8 Tabla 6 Análisis de sensibilidad - Altura de muro 4 m, 6 m, 8 m y 10 m

- Geosoft

Z [m]	Geosintético	Sv Diseño [m]	Sv Calculado [m]	Le mínimo [m]	Lr [m]	L [m]	Lo [m]	L a Usar [m]	Lt [m]
0,4	T2100	0,4	5,343	0,305	1,834	2,139	0,914	3,2	4,514
0,8	T2100	0,4	2,671	0,305	1,630	1,935	0,914	3,2	4,514
1,2	T2100	0,4	1,781	0,305	1,427	1,731	0,914	3,2	4,514
1,6	T2100	0,4	1,336	0,305	1,223	1,528	0,914	3,2	4,514
1,9	T2100	0,3	1,125	0,305	1,070	1,375	0,914	3,2	4,514
2,2	T2100	0,3	0,971	0,305	0,917	1,222	0,914	3,2	4,514
2,5	T2100	0,3	0,855	0,305	0,764	1,069	0,914	3,2	4,514
2,8	T2100	0,3	0,763	0,305	0,611	0,916	0,914	3,2	4,514
3,1	T2100	0,3	0,689	0,305	0,459	0,763	0,914	3,2	4,514
3,4	T2100	0,3	0,629	0,305	0,306	0,611	0,914	3,2	4,514
3,7	T2100	0,3	0,578	0,305	0,153	0,458	0,914	3,2	4,514
4	T2100	0,3	0,534	0,305	0,000	0,305	0,914	3,2	4,514

Z [m]	Geosintético	Sv Diseño [m]	Sv Calculado [m]	Le mínimo [m]	Lr [m]	L [m]	Lo [m]	L a Usar [m]	Lt [m]
0,2	T2100	0,2	10,685	0,305	2,955	3,260	0,914	4,8	5,914
0,7	T2100	0,5	3,053	0,305	2,700	3,005	0,914	4,8	6,214
1,2	T2100	0,5	1,781	0,305	2,446	2,751	0,914	4,8	6,214
1,6	T2100	0,4	1,336	0,305	2,242	2,547	0,914	4,8	6,114
2	T2100	0,4	1,069	0,305	2,038	2,343	0,914	4,8	6,114
2,4	T2100	0,4	0,890	0,305	1,834	2,139	0,914	4,8	6,114

2,8	T2100	0,4	0,763	0,305	1,630	1,935	0,914	4,8	6,114
3,2	T2100	0,4	0,668	0,305	1,427	1,731	0,914	4,8	6,114
3,6	T2100	0,4	0,594	0,305	1,223	1,528	0,914	4,8	6,114
3,9	T2100	0,3	0,548	0,305	1,070	1,375	0,914	4,8	6,014
4,2	T2100	0,3	0,509	0,305	0,917	1,222	0,914	4,8	6,014
4,5	T2100	0,3	0,475	0,305	0,764	1,069	0,914	4,8	6,014
4,8	T2100	0,3	0,445	0,305	0,611	0,916	0,914	4,8	6,014
5,1	T2100	0,3	0,419	0,305	0,459	0,763	0,914	4,8	6,014
5,4	T2100	0,3	0,396	0,305	0,306	0,611	0,914	4,8	6,014
5,7	T2100	0,3	0,375	0,305	0,153	0,458	0,914	4,8	6,014
6	T2100	0,3	0,356	0,305	0,000	0,305	0,914	4,8	6,014

Z [m]	Geosintético	Sv Diseño [m]	Sv Calculado [m]	Le mínimo [m]	Lr [m]	L [m]	Lo [m]	L a Usar [m]	Lt [m]
0,2	T2100	0,2	11	0,305	3,974	4,279	0,914	6,4	7,514
0,7	T2100	0,5	3	0,305	3,720	4,279	0,914	6,4	8
1,2	T2100	0,5	2	0,305	3,465	4,279	0,914	6,4	8
1,7	T2100	0,5	1	0,305	3,210	4,279	0,914	6,4	8
2,2	T2100	0,5	0,971	0,305	2,955	4,279	0,914	6,4	8
2,6	T2100	0,4	0,822	0,305	2,751	4,279	0,914	6,4	8
3	T2100	0,4	0,712	0,305	2,548	4,279	0,914	6,4	8
3,4	T2100	0,4	0,629	0,305	2,344	4,279	0,914	6,4	8
3,8	T2100	0,4	0,562	0,305	2,140	4,279	0,914	6,4	8
4,2	T2100	0,4	0,509	0,305	1,936	4,279	0,914	6,4	8
4,6	T2100	0,4	0,465	0,305	1,732	4,279	0,914	6,4	8
5	T2100	0,4	0,427	0,305	1,529	4,279	0,914	6,4	8
5,3	T2100	0,3	0,403	0,305	1,376	4,279	0,914	6,4	8

5,6	T2100	0,3	0,382	0,305	1,223	4,279	0,914	6,4	8
5,9	T2100	0,3	0,362	0,305	1,070	4,279	0,914	6,4	8
6,2	T2100	0,3	0,345	0,305	0,917	4,279	0,914	6,4	8
6,5	T2100	0,3	0,329	0,305	0,764	4,279	0,914	6,4	8
6,8	T2100	0,3	0,314	0,305	0,611	4,279	0,914	6,4	8
7,1	T2100	0,3	0,301	0,305	0,459	4,279	0,914	6,4	8
7,4	T2100	0,3	0,289	0,305	0,306	4,279	0,914	6,4	8
7,7	T2100	0,3	0,278	0,305	0,153	4,279	0,914	6,4	8
8	T2100	0,3	0,267	0,305	0,000	4,279	0,914	6,4	8

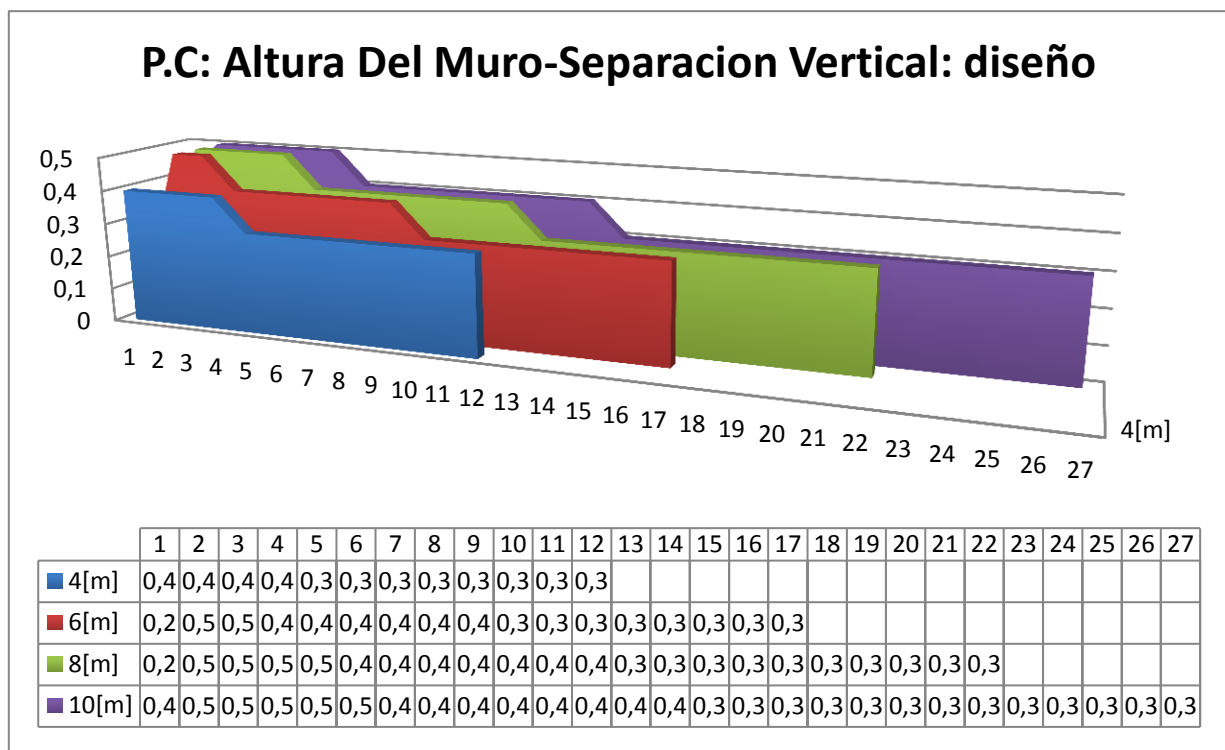
Z [m]	Geosintético	Sv Diseño [m]	Sv Calculado [m]	Le mínimo [m]	Lr [m]	L [m]	Lo [m]	L a Usar [m]	Lt [m]
0,4	T2100	0,4	5,343	0,305	4,891	5,196	0,914	8	9,314
0,9	T2100	0,5	2,374	0,305	4,637	4,941	0,914	8	9,414
1,4	T2100	0,5	1,526	0,305	4,382	4,687	0,914	8	9,414
1,9	T2100	0,5	1,125	0,305	4,127	4,432	0,914	8	9,414
2,4	T2100	0,5	0,890	0,305	3,872	4,177	0,914	8	9,414
2,9	T2100	0,5	0,737	0,305	3,618	3,922	0,914	8	9,414
3,3	T2100	0,4	0,648	0,305	3,414	3,719	0,914	8	9,314
3,7	T2100	0,4	0,578	0,305	3,210	3,515	0,914	8	9,314
4,1	T2100	0,4	0,521	0,305	3,006	3,311	0,914	8	9,314
4,5	T2100	0,4	0,475	0,305	2,802	3,107	0,914	8	9,314
4,9	T2100	0,4	0,436	0,305	2,599	2,903	0,914	8	9,314
5,3	T2100	0,4	0,403	0,305	2,395	2,700	0,914	8	9,314
5,7	T2100	0,4	0,375	0,305	2,191	2,496	0,914	8	9,314
6,1	T2100	0,4	0,350	0,305	1,987	2,292	0,914	8	9,314
6,4	T2100	0,3	0,334	0,305	1,834	2,139	0,914	8	9,214

6,7	T2100	0,3	0,319	0,305	1,681	1,986	0,914	8	9,214
7	T2100	0,3	0,305	0,305	1,529	1,833	0,914	8	9,214
7,3	T2100	0,3	0,293	0,305	1,376	1,681	0,914	8	9,214
7,6	T2100	0,3	0,281	0,305	1,223	1,528	0,914	8	9,214
7,9	T2100	0,3	0,271	0,305	1,070	1,375	0,914	8	9,214
8,2	T2100	0,3	0,261	0,305	0,917	1,222	0,914	8	9,214
8,5	T2100	0,3	0,251	0,305	0,764	1,069	0,914	8	9,214
8,8	T2100	0,3	0,243	0,305	0,611	0,916	0,914	8	9,214
9,1	T2100	0,3	0,235	0,305	0,459	0,763	0,914	8	9,214
9,4	T2100	0,3	0,227	0,305	0,306	0,611	0,914	8	9,214
9,7	T2100	0,3	0,220	0,305	0,153	0,458	0,914	8	9,214
10	T2100	0,3	0,214	0,305	0,000	0,305	0,914	8	9,214

COMPARACIÓN GRAFICA:

Establecidos ya los resultados de diseño, se procede a realizar una comparación grafica de cada uno de estos:

Ilustración 19 Análisis de Sensibilidad – Paquete comercial Altura del muro – Separación vertical de diseño



Fuente: El autor

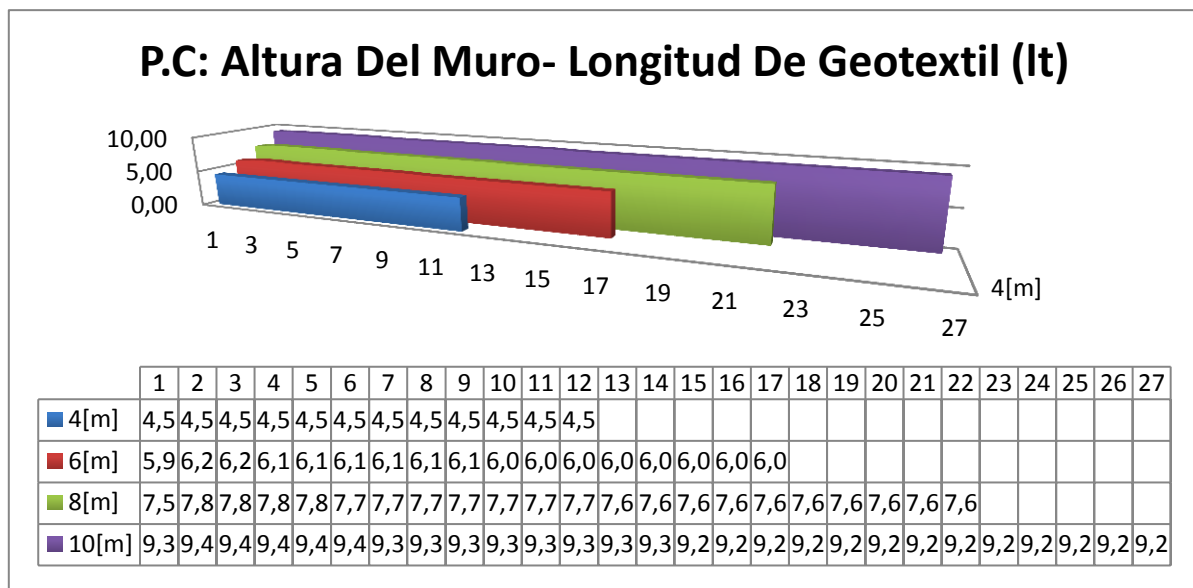
Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

ANÁLISIS GENERAL:

La altura del muro es un parámetro determinante para el resultado de diseño del número de capas y la longitud de la separación de los geotextiles en el paquete comercial. Entre mayor sea la longitud vertical de muro, se deben emplear más cantidad de capas de refuerzo para soportar el aumento de las fuerzas de empuje.

Además para favorecer la resistencia a la solicitud de presiones de tierra, el paquete comercial aumenta el número de capas de separación mínima (0,3 metros) en la parte inferior del muro, zona en la cual se presentan los mayores esfuerzos por el peso propio del material de refuerzo.

Ilustración 20 Análisis de Sensibilidad – Paquete comercial Altura del muro – Longitud del geotextil de diseño



Fuente: El autor

Longitud de geotextil (L): (Eje Y: Longitud de geotextil (L) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

ANÁLISIS GENERAL:

Para la longitud horizontal del geotextil, la altura del muro es el factor más determinante en el resultado del diseño por paquete comercial, ya que por defecto define la dimensión de la base del muro como el 80% de la longitud de la altura del mismo; y todas las capas de refuerzo quedan definidas con una longitud igual al total de la base del muro. Por lo que a medida que se incremente al altura vertical del muro, la longitud de la base aumentará y por defecto las capas de geo textil.

7 ANÁLISIS COMPARATIVO

7.1 FACTORES DE SEGURIDAD

Para la metodología convencional de diseño, se empieza por definir un valor para el factor de seguridad de estabilidad interna del muro, con un rango de variación entre 1,3 y 1,5, con lo que se pretende garantizar separaciones y longitudes de refuerzo óptimo que garanticen integridad estructural y buen servicio del muro. Sin embargo el diseño de estructuras de este tipo son puestas a prueba en simulaciones ejecutadas en software de geotecnia, con el fin de predecir la capacidad de servicio del muro representado en factores de seguridad. Para este caso "Slide", del paquete Rocíense con análisis de equilibrio limite.

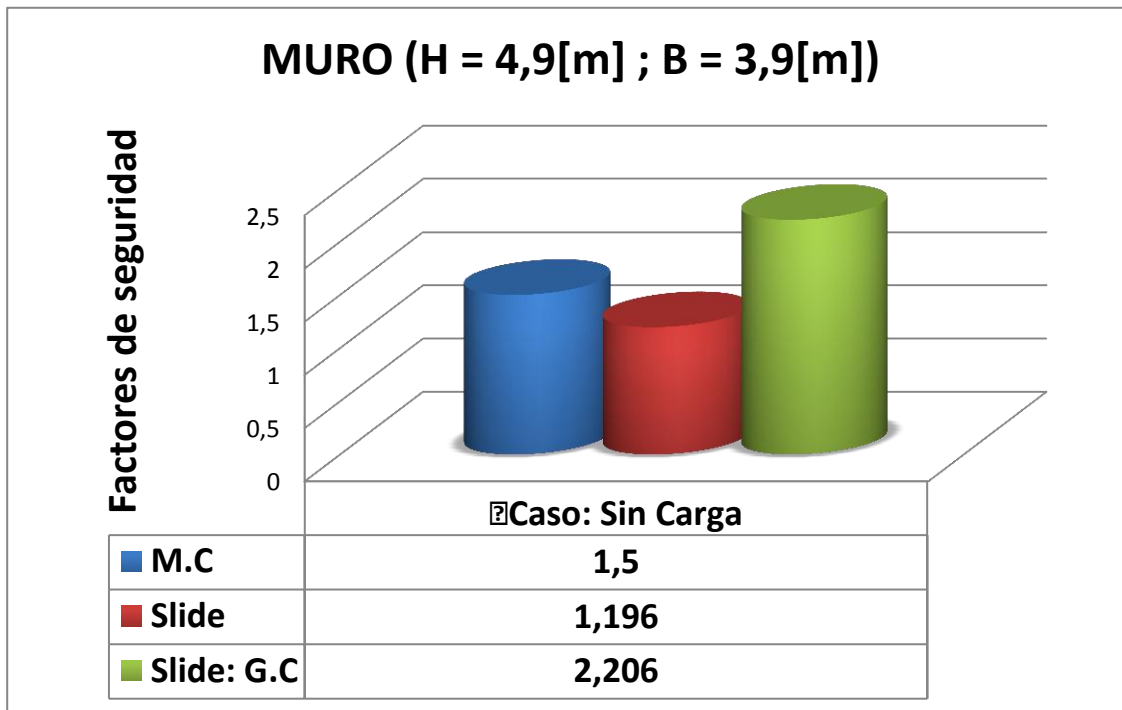
Tabla 9 Análisis comparativo Factores de seguridad

Muro (H = 4,9, B = 3,9) $\Phi=36$			
Caso	Factor de seguridad		
	Metodología Convencional	Slide = Metodología Convencional	Slide Geotextil Completo
Sin carga	1,5	1,196	2,206
Sobrecarga a 1 metro del borde	1,5	0,966	1,666
Sobrecarga en todo el muro	1,5	0,976	1,295

M.C (Método convencional) Slide: G.C (Geotextil completo, con longitud igual a la base del geotextil)

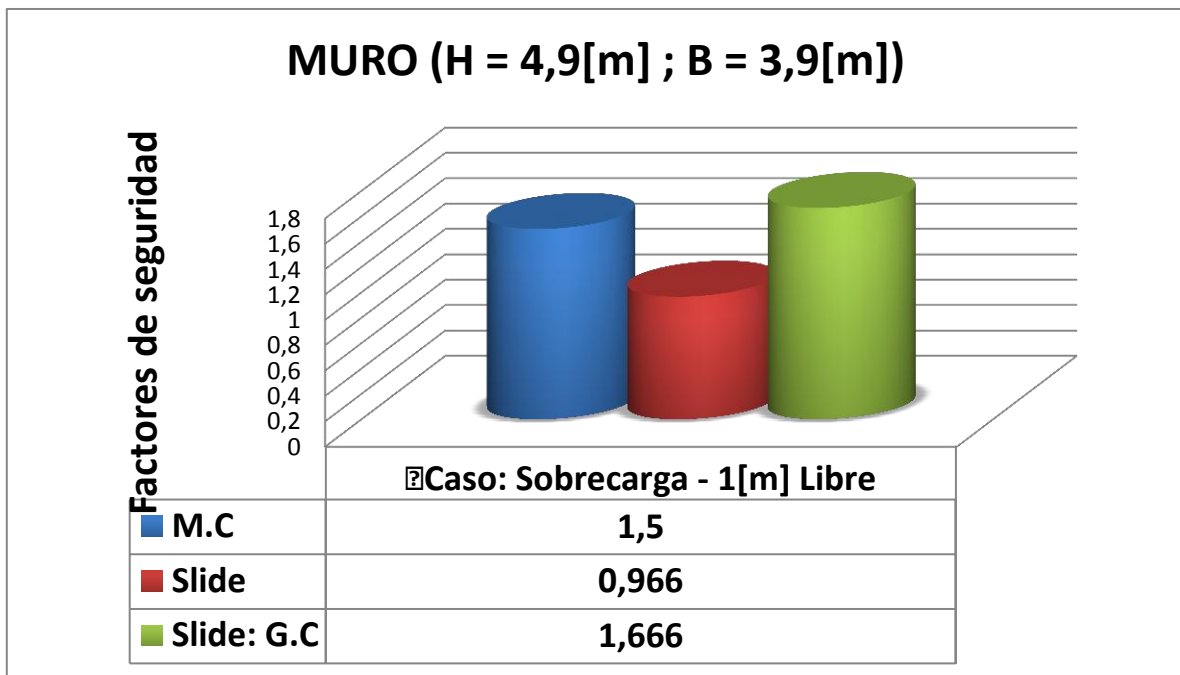
COMPARACIÓN GRÁFICA:

Ilustración 21 Análisis Comparativo - Factores de seguridad - Sin sobrecarga



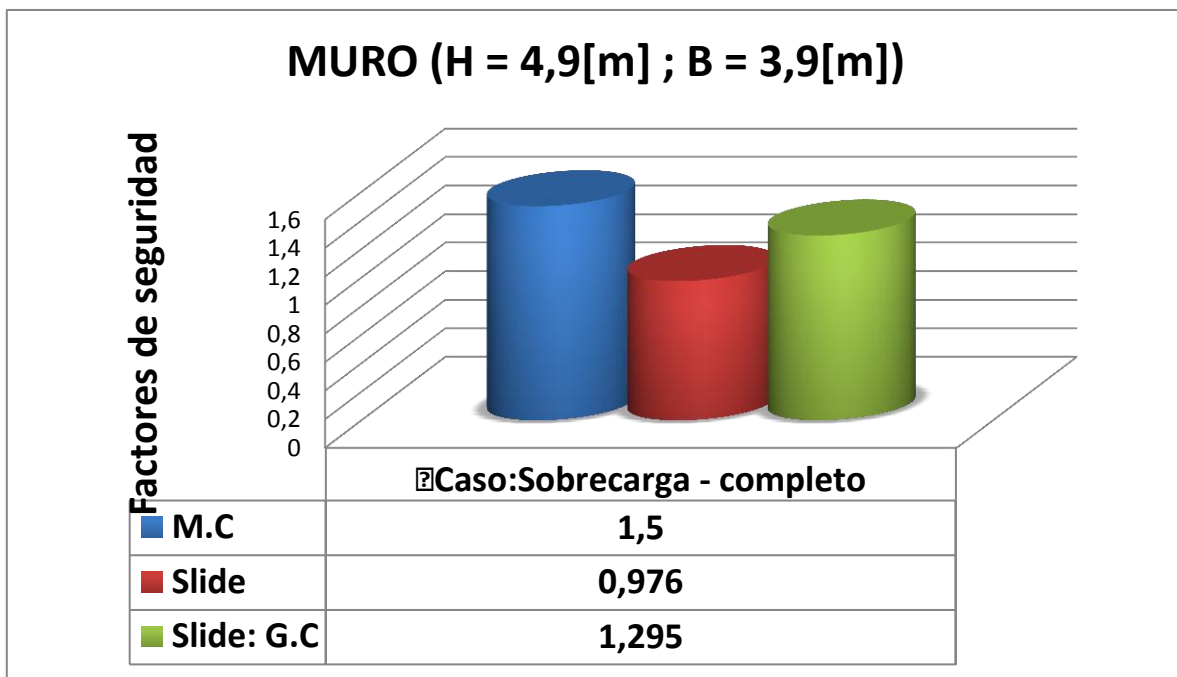
Fuente: El autor

Ilustración 22 Análisis Comparativo - Factores de seguridad - Sobrecarga 1 metro libre



Fuente: El autor

Ilustración 23 Análisis Comparativo - Factores de seguridad - Sobrecarga total



Fuente: El autor

ANÁLISIS:

En la mayoría de los casos el factor de seguridad de estabilidad interna del muro da mayor para el resultado de los diseños obtenidos implementando el programa Geosoft. El cual extiende las capas de geotextil una longitud igual a la totalidad de la base del muro. Sin embargo este parámetro resulta más conservador en el caso en el que el muro no esté solicitado bajo ninguna sobrecarga, lo que conlleva a emplear mayor cantidad de material de refuerzo. En el caso en que el muro resista una sobrecarga es necesario que el material de refuerzo se extienda a lo largo de la base del muro.

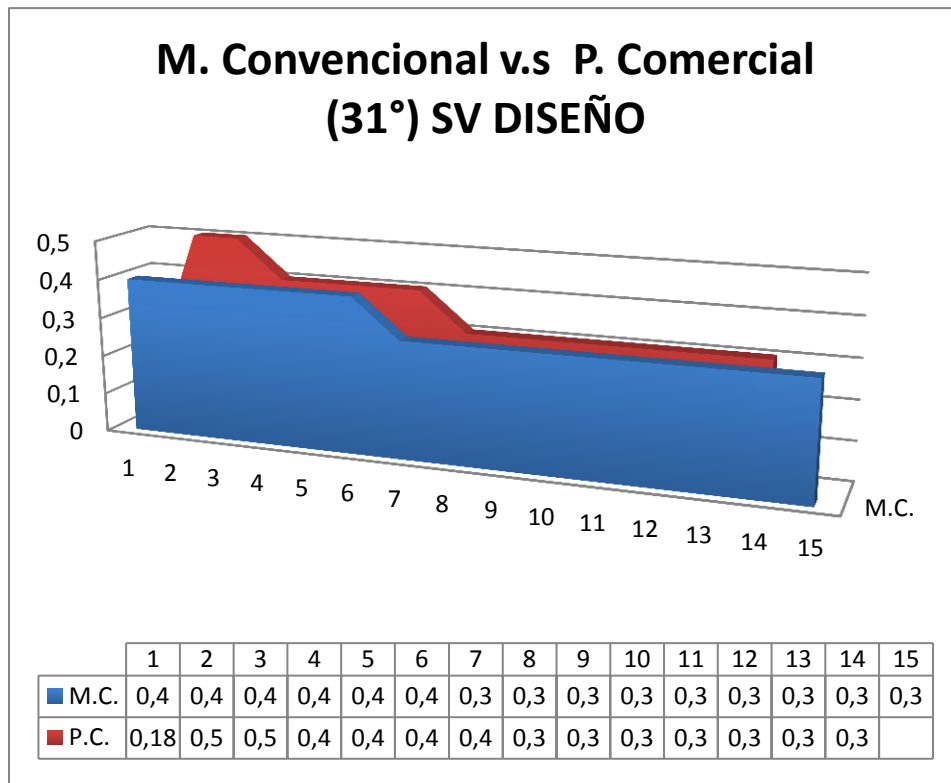
La aplicación de la sobrecarga sin un espacio libre cerca al borde del muro, es un factor que afecta desfavorablemente la estabilidad interna de éste, reduciendo el factor de seguridad considerablemente.

7.2 SEPARACIÓN VERTICAL DE LAS CAPAS DE GEOTEXTIL

7.2.1 COMPARACIÓN GRÁFICA GRUPO DE MUROS CON DIFERENTES ÁNGULOS DE FRICCIÓN:

Muro de 4,88 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 31°

Ilustración 24 Análisis Comparativo - Separación vertical de diseño - Ángulo de fricción 31

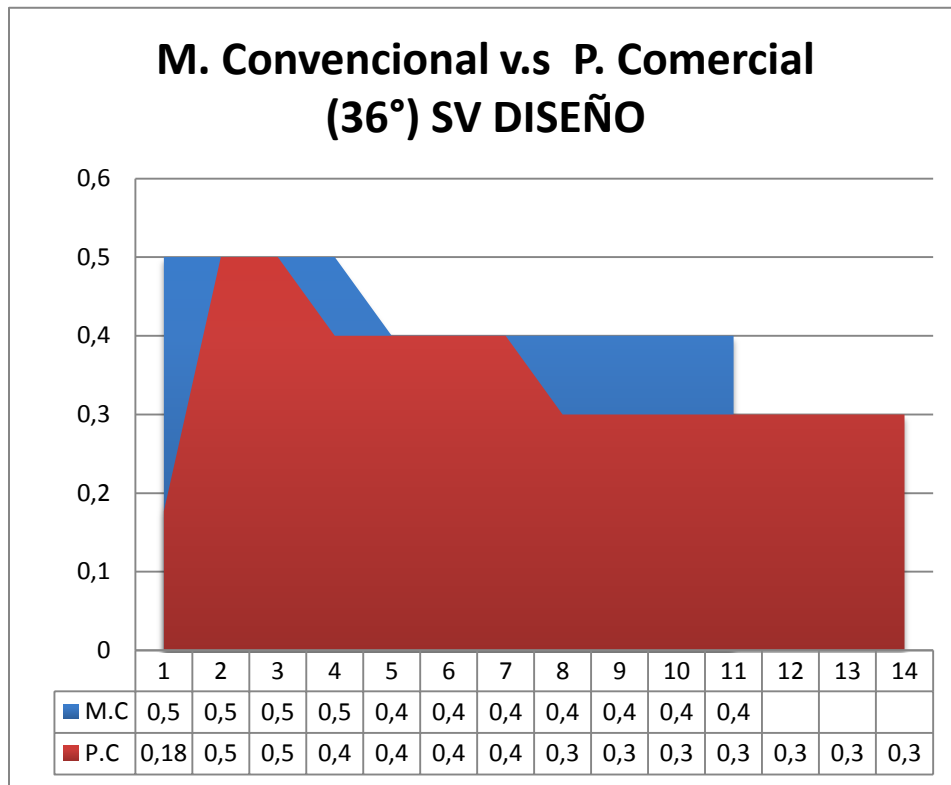


Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 4,88 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 36°

Ilustración 25 Análisis Comparativo - Separación vertical de diseño - Ángulo de fricción 36°

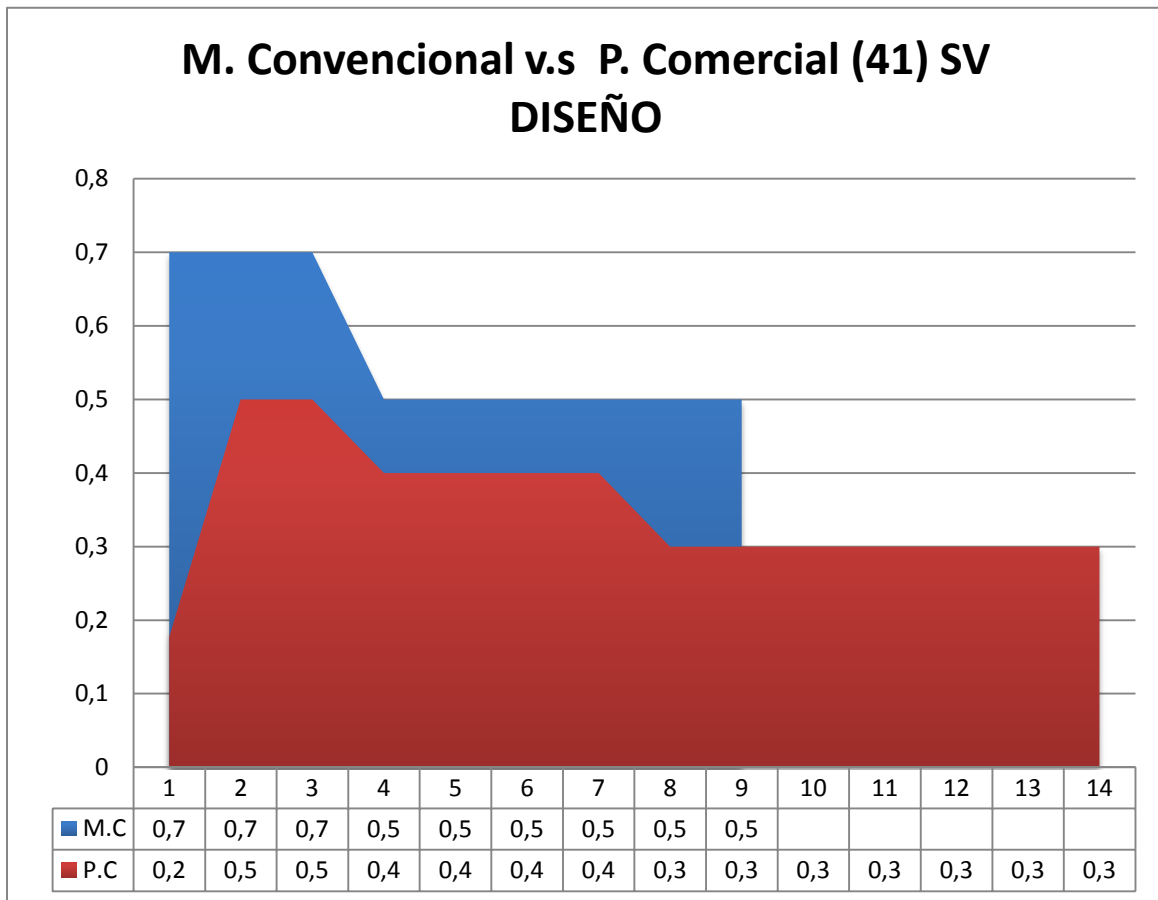


Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 4,88 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 41°

Ilustración 26 Análisis Comparativo - Separación vertical de diseño - Ángulo de fricción 41°

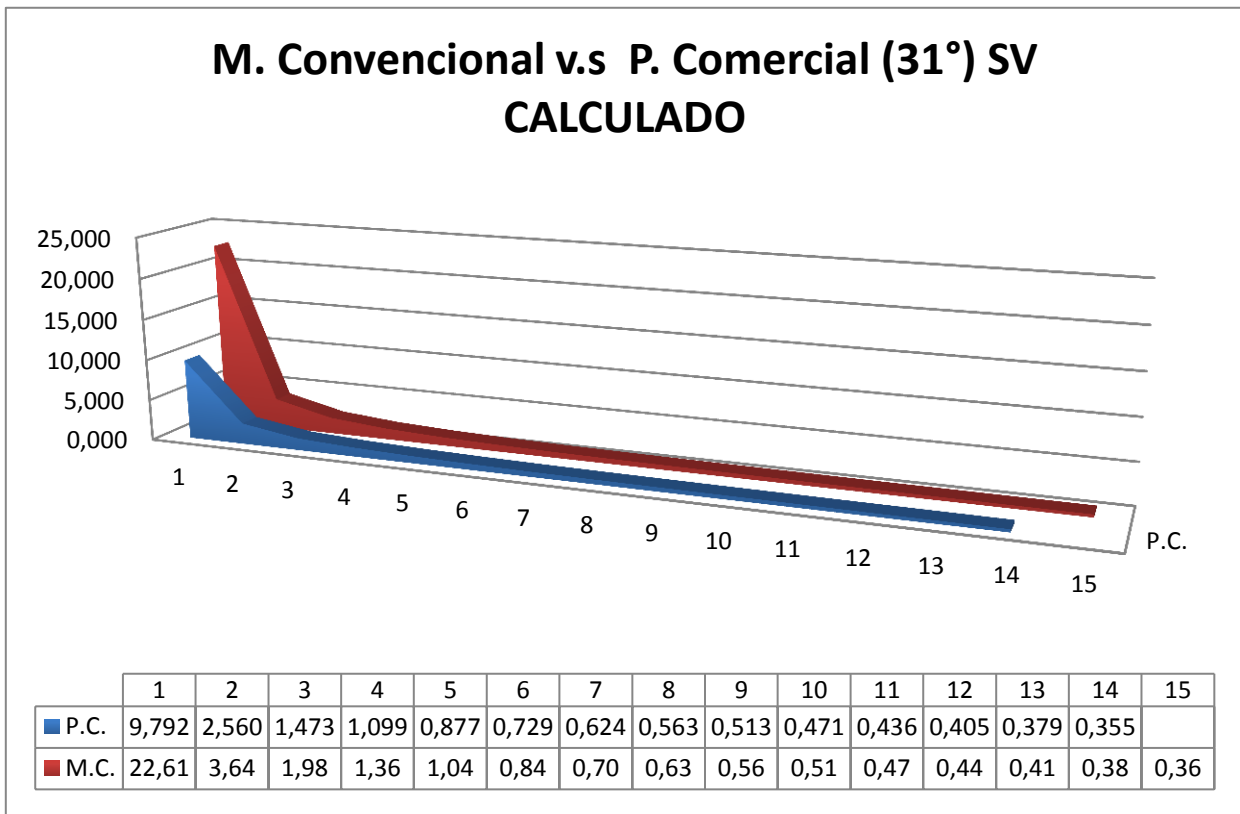


Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 4,88 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 31°

Ilustración 27 Análisis Comparativo - Separación vertical calculado - Ángulo de fricción 31°

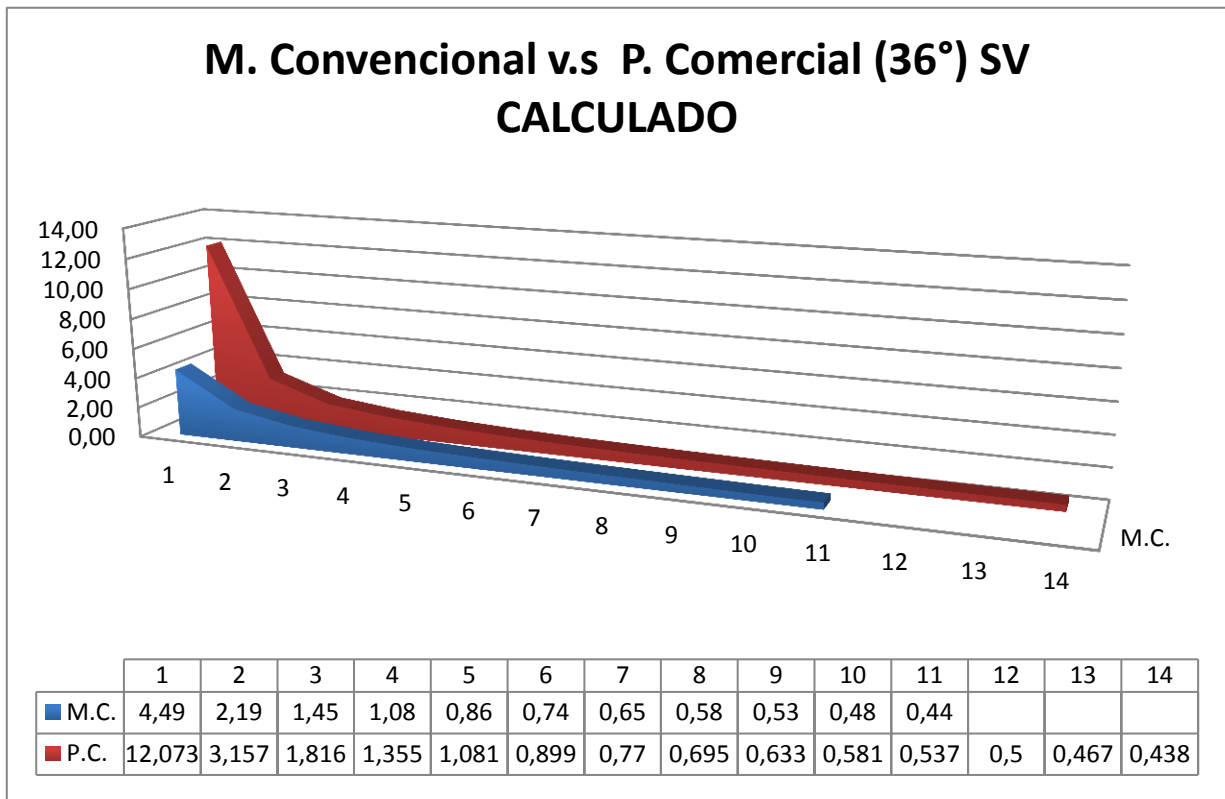


Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 4,88 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 36°

Ilustración 28 Análisis Comparativo - Separación vertical calculado - Ángulo de fricción 36°

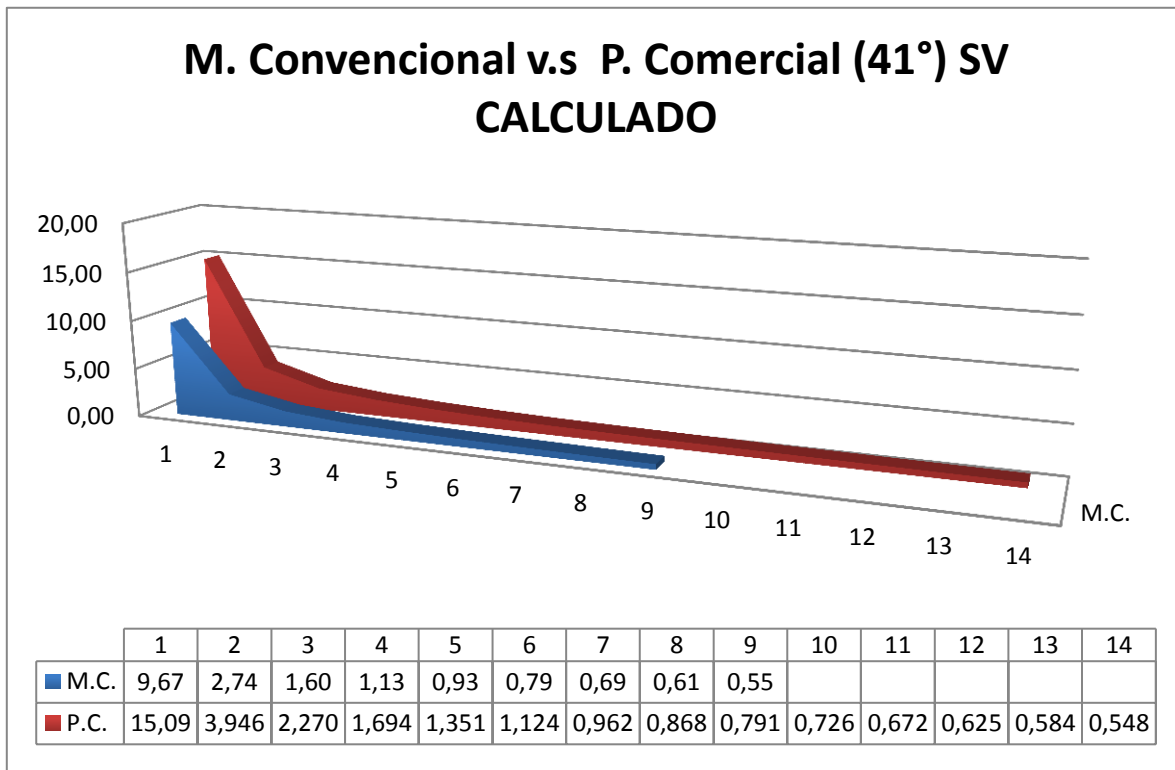


Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 4 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 41°

Ilustración 29 Análisis Comparativo - Separación vertical calculado - Ángulo de fricción 41°



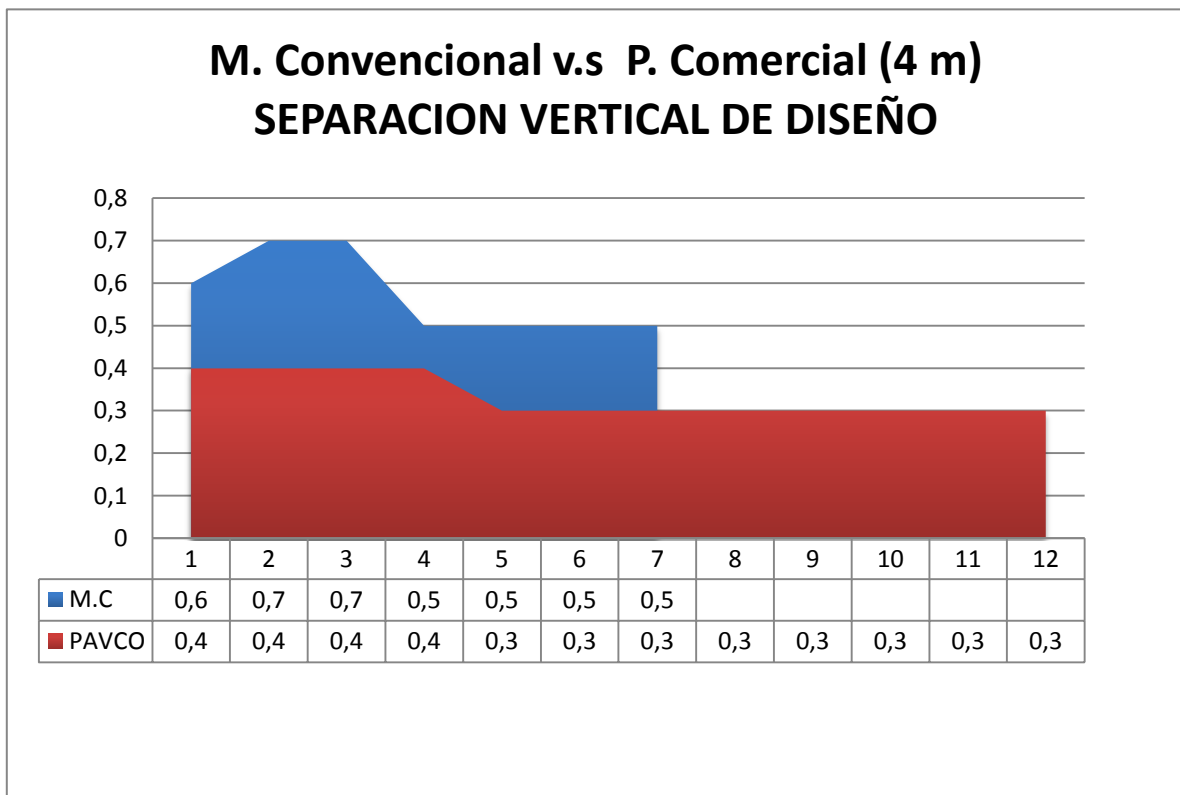
Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

7.2.2 COMPARACIÓN GRAFICA PARA GRUPO DE MUROS CON DIFERENTES ALTURAS:

Muro de 4 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 36°

Ilustración 30 Análisis Comparativo - Separación vertical de diseño - Altura muro 4 metros

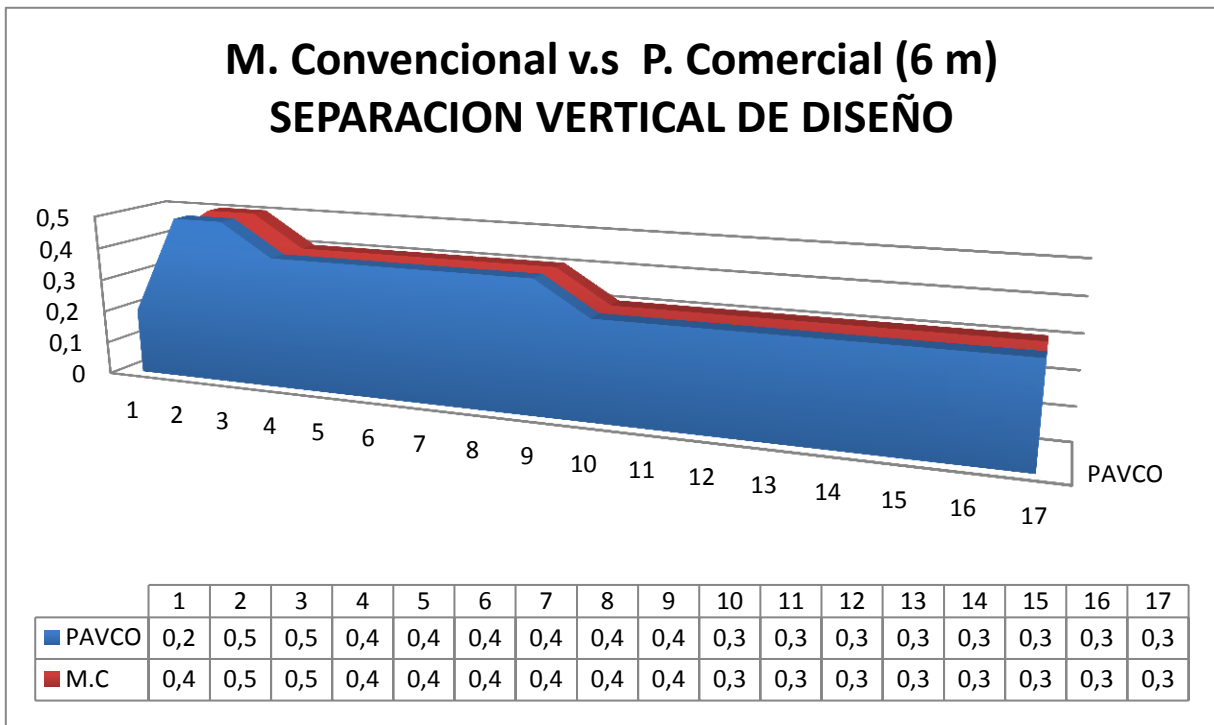


Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 6 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 36°

Ilustración 31 Análisis Comparativo - Separación vertical de diseño - Altura muro 6 metros

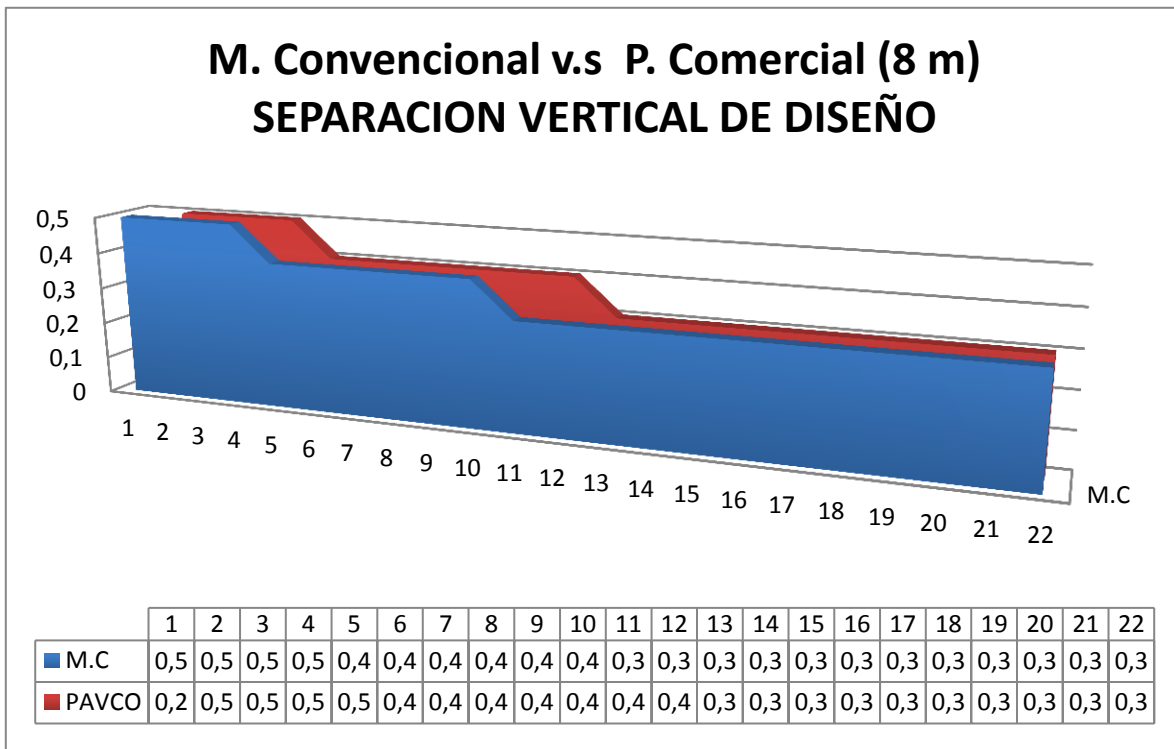


Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 8 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 36°

Ilustración 32 Análisis Comparativo - Separación vertical de diseño - Altura muro 8 metros

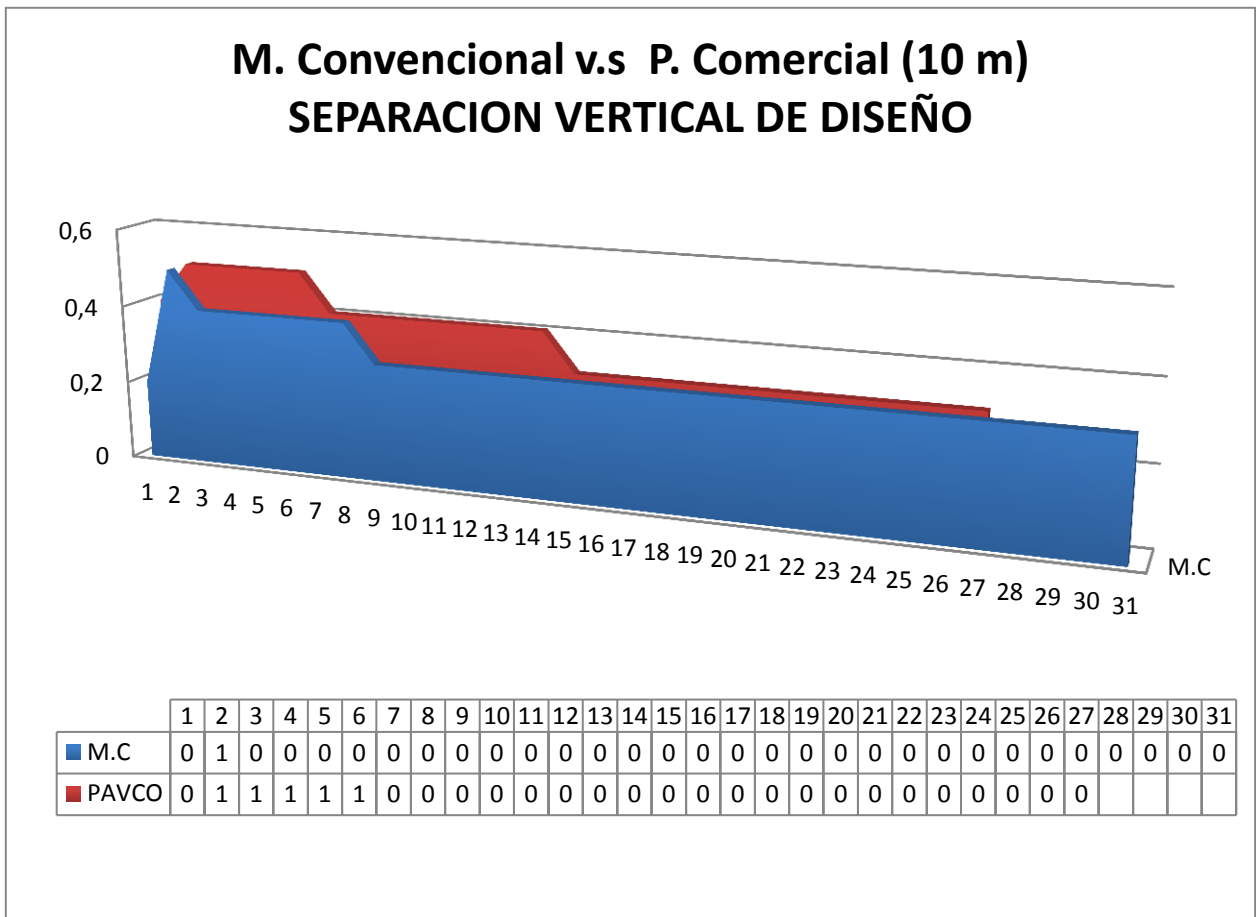


Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 10 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 36°

Ilustración 33 Análisis Comparativo - Separación vertical de diseño - Altura muro 10 metros



Fuente: El autor

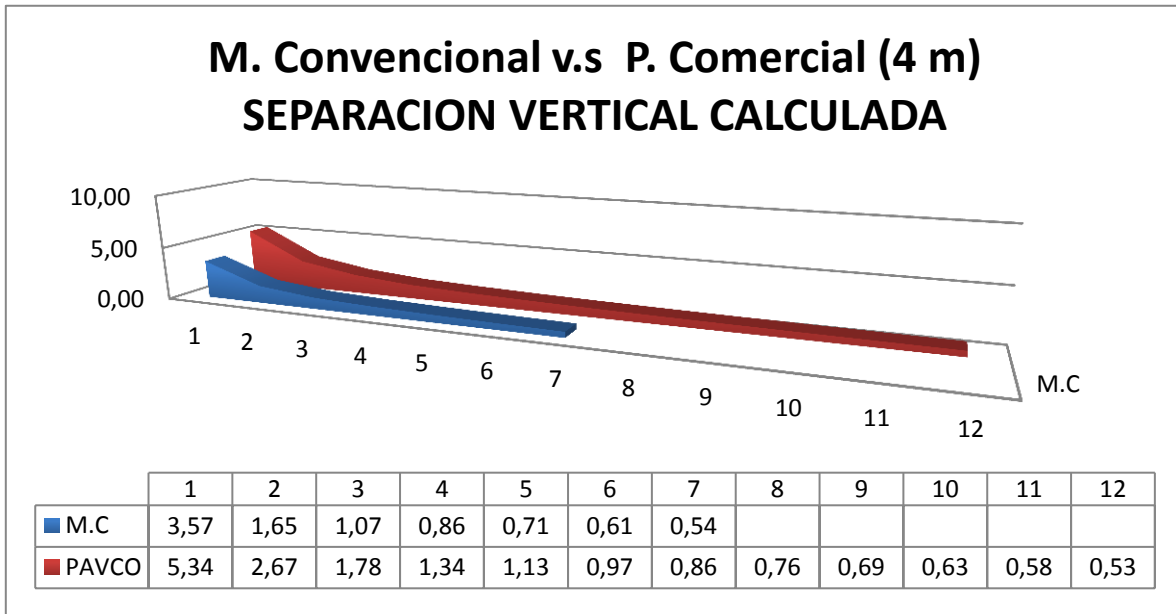
Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

ANÁLISIS GENERAL:

El resultado del diseño de la separación entre capas de geotextil obtenidas utilizando el software del paquete comercial es más conservador en comparación a los obtenidos empleando el método convencional de diseño. En la mayoría de las situaciones estudiadas, el software de diseño define mayor cantidad de capas de geotextil de menor separación, lo que representa un mayor gasto en la cantidad de material de refuerzo, caso contrario a la forma que aplican los métodos convencionales a la hora de optimizar la cantidad de material según lo soliciten la variación en los esfuerzos a medida que aumenta la profundidad del muro.

Muro de 4 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 36°

Ilustración 34 Análisis Comparativo - Separación vertical calculada - Altura muro 4 metros

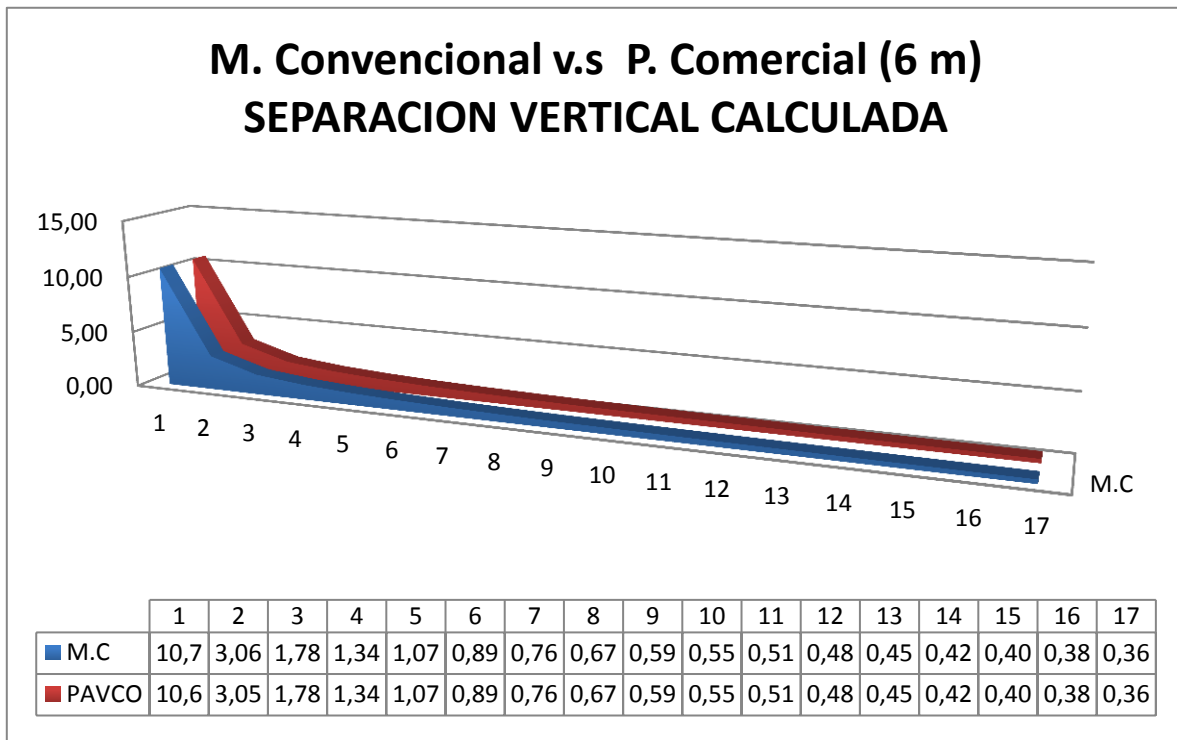


Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 6 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 36°

Ilustración 35 Análisis Comparativo - Separación vertical calculada - Altura muro 6 metros

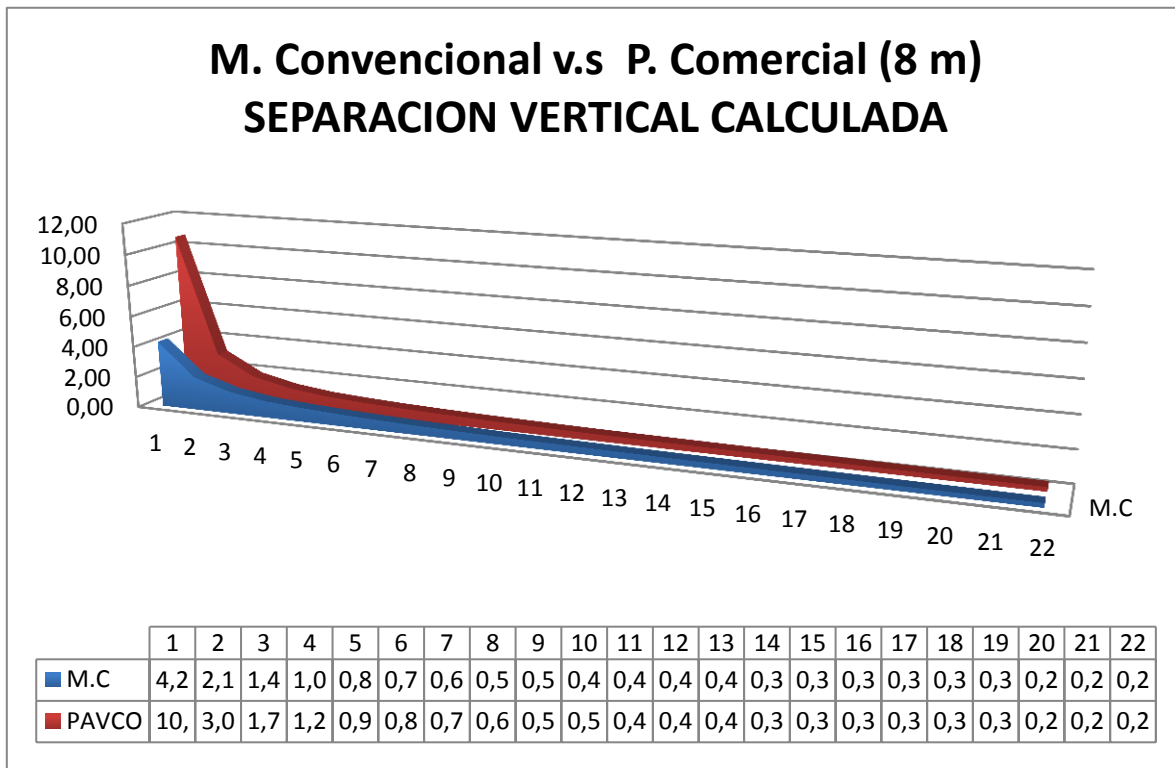


Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 8 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 36°

Ilustración 36 Análisis Comparativo - Separación vertical calculada - Altura muro 8 metros

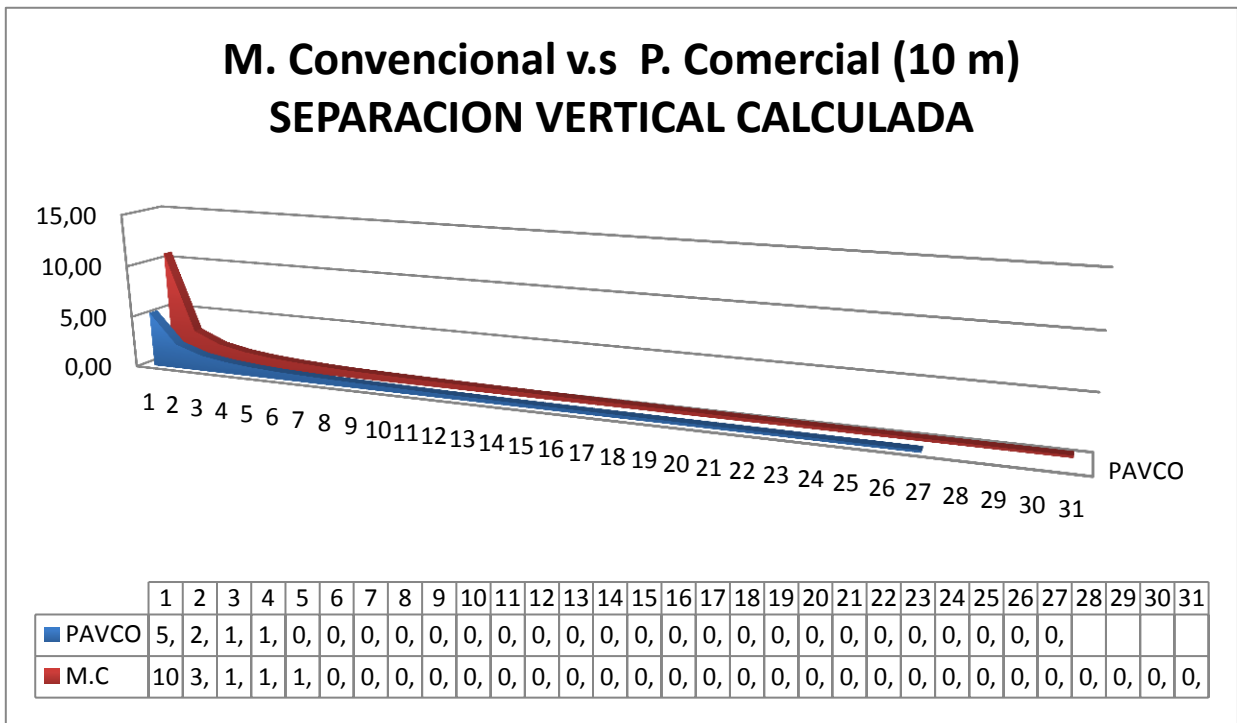


Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 10 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 36°

Ilustración 37 Análisis Comparativo - Separación vertical calculada - Altura muro 8 metros



Fuente: El autor

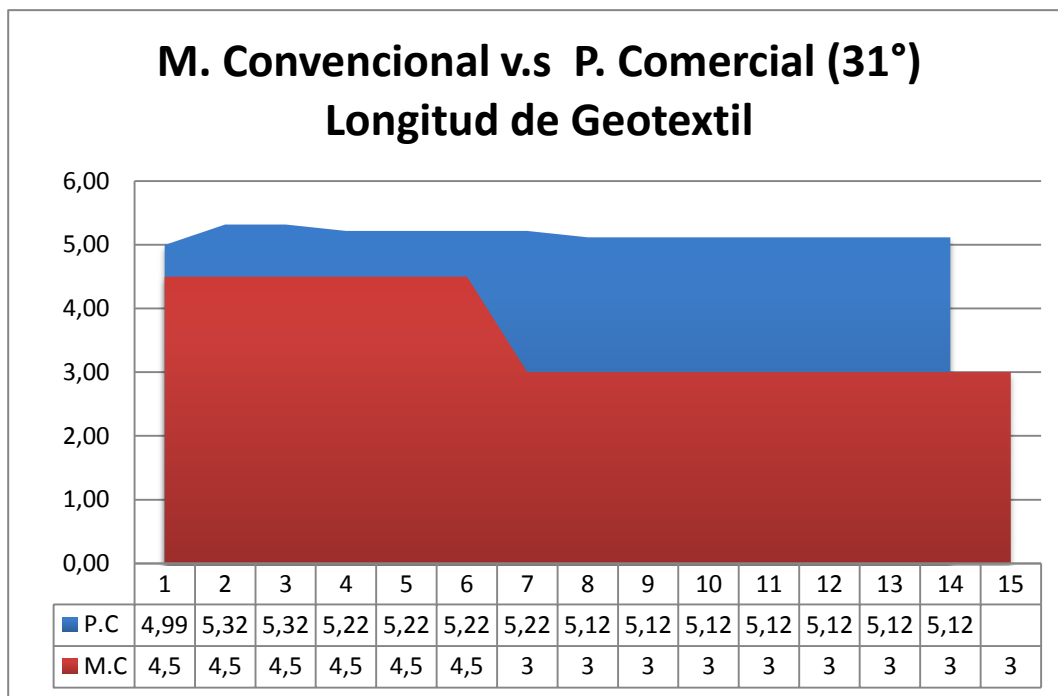
Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

7.3 LONGITUD DE GEOTEXTIL

7.3.1 COMPARACIÓN GRÁFICA PARA GRUPO DE MUROS CON DIFERENTES ÁNGULOS DE FRICCIÓN:

Muro de 4,88 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 31°

Ilustración 38 Análisis Comparativo - Longitud de geotextil - Ángulo de fricción 31°

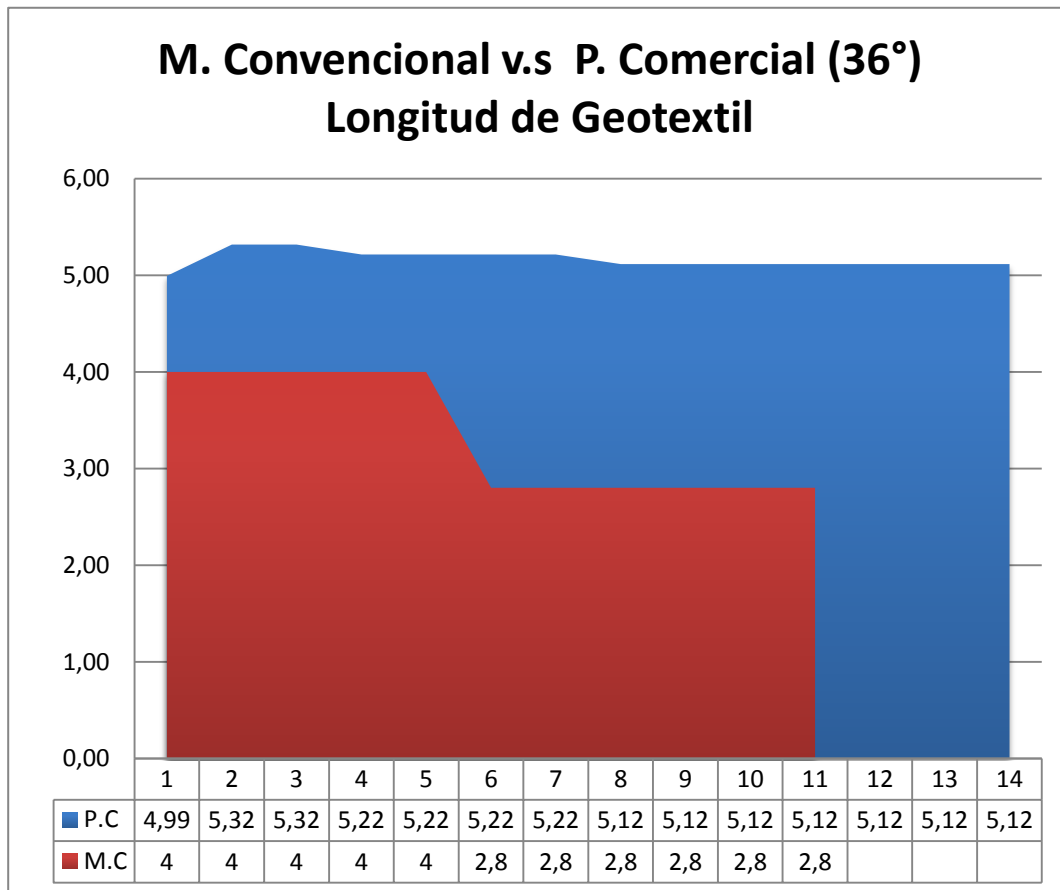


Fuente: El autor

Longitud de geotextil (L): (Eje Y: Longitud de geotextil (L) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 4,88 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 36°

Ilustración 39 Análisis Comparativo - Longitud de geotextil - Angulo de fricción 36°

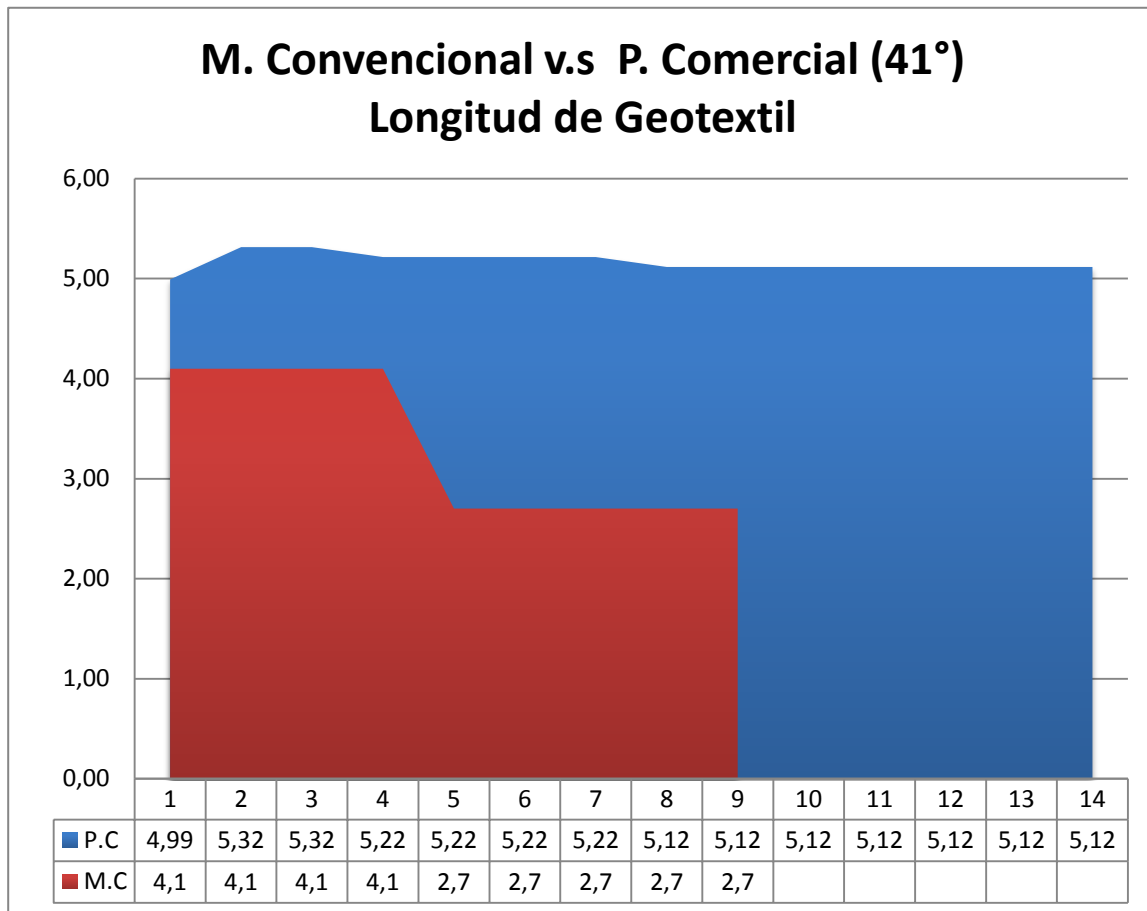


Fuente: El autor

Longitud de geotextil (L): (Eje Y: Longitud de geotextil (L) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 4,88 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 41°

Ilustración 40 Análisis Comparativo - Longitud de geotextil - Angulo de fricción 41°



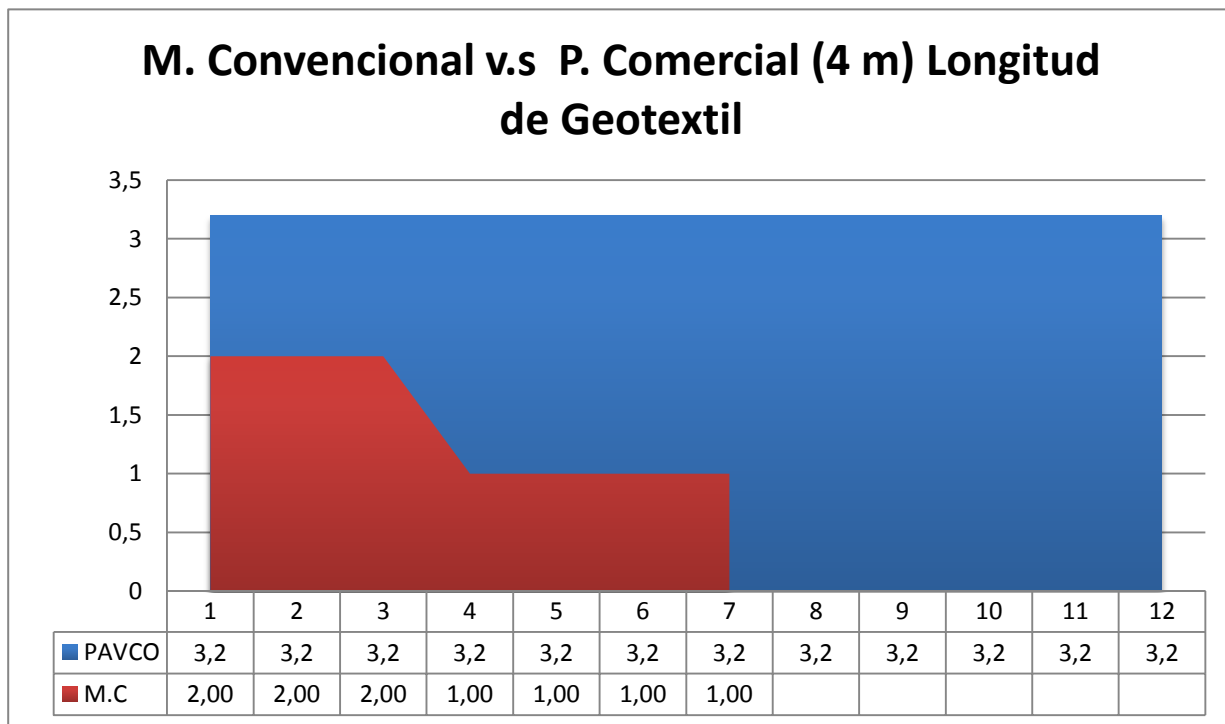
Fuente: El autor

Longitud de geotextil (L): (Eje Y: Longitud de geotextil (L) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

7.3.2 COMPARACIÓN GRÁFICA PARA GRUPO DE MUROS CON DIFERENTES ALTURAS:

Muro de 4 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 36°

Ilustración 41 Análisis Comparativo - Longitud de geotextil - Altura del muro 4 metros

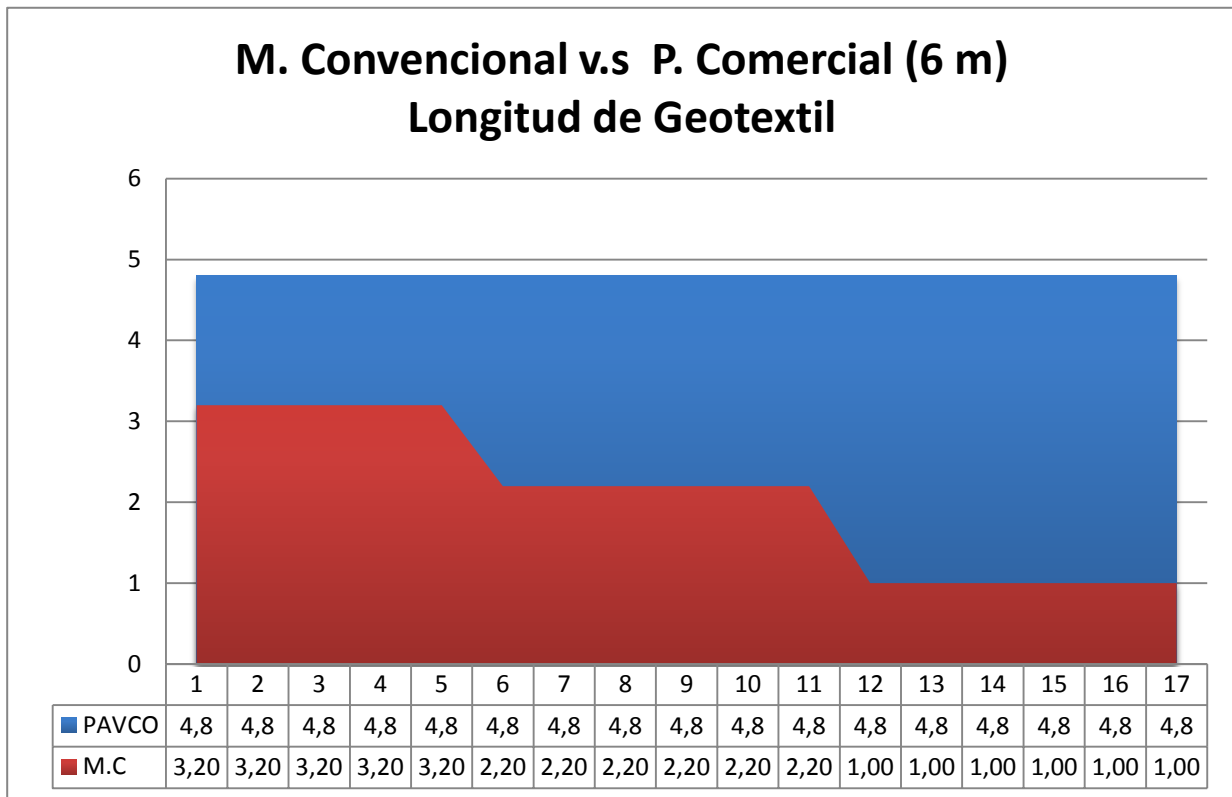


Fuente: El autor

Longitud de geotextil (L): (Eje Y: Longitud de geotextil (L) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 6 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 36°

Ilustración 42 Análisis Comparativo - Longitud de geotextil - Altura del muro 6 metros

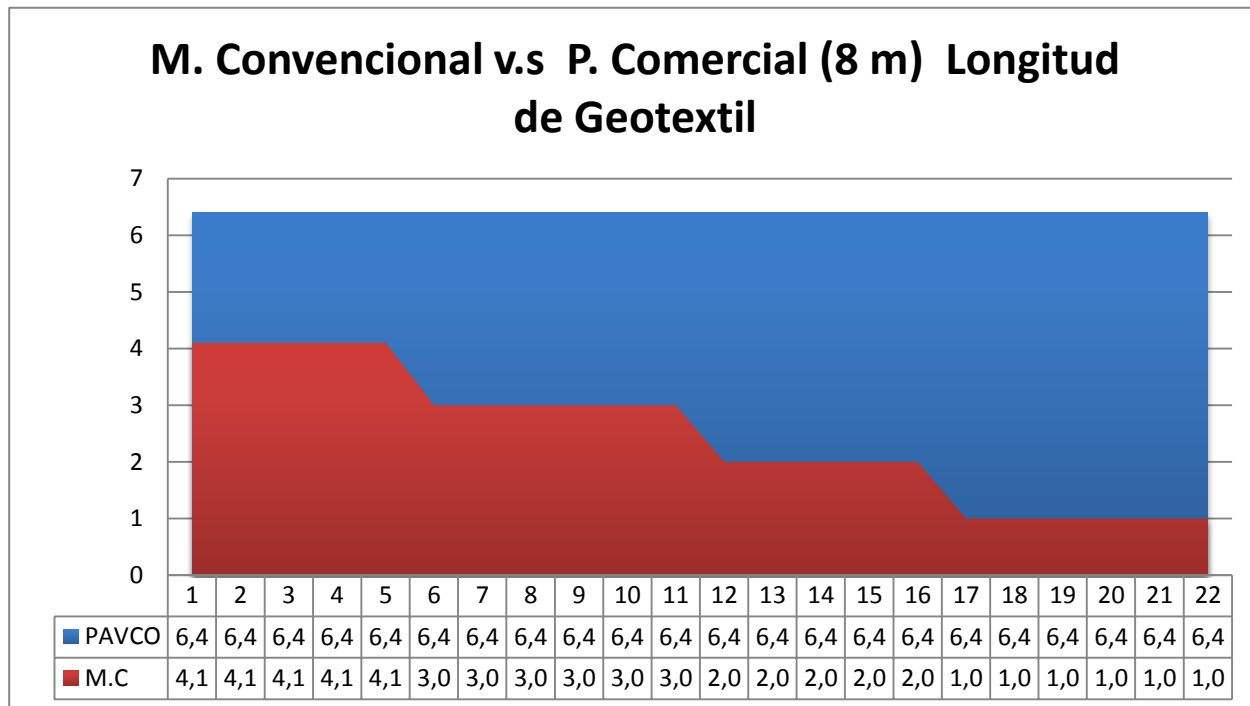


Fuente: El autor

Longitud de geotextil (L): (Eje Y: Longitud de geotextil (L) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 8 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 36°

Ilustración 43 Análisis Comparativo - Longitud de geotextil - Altura del muro 8 metros

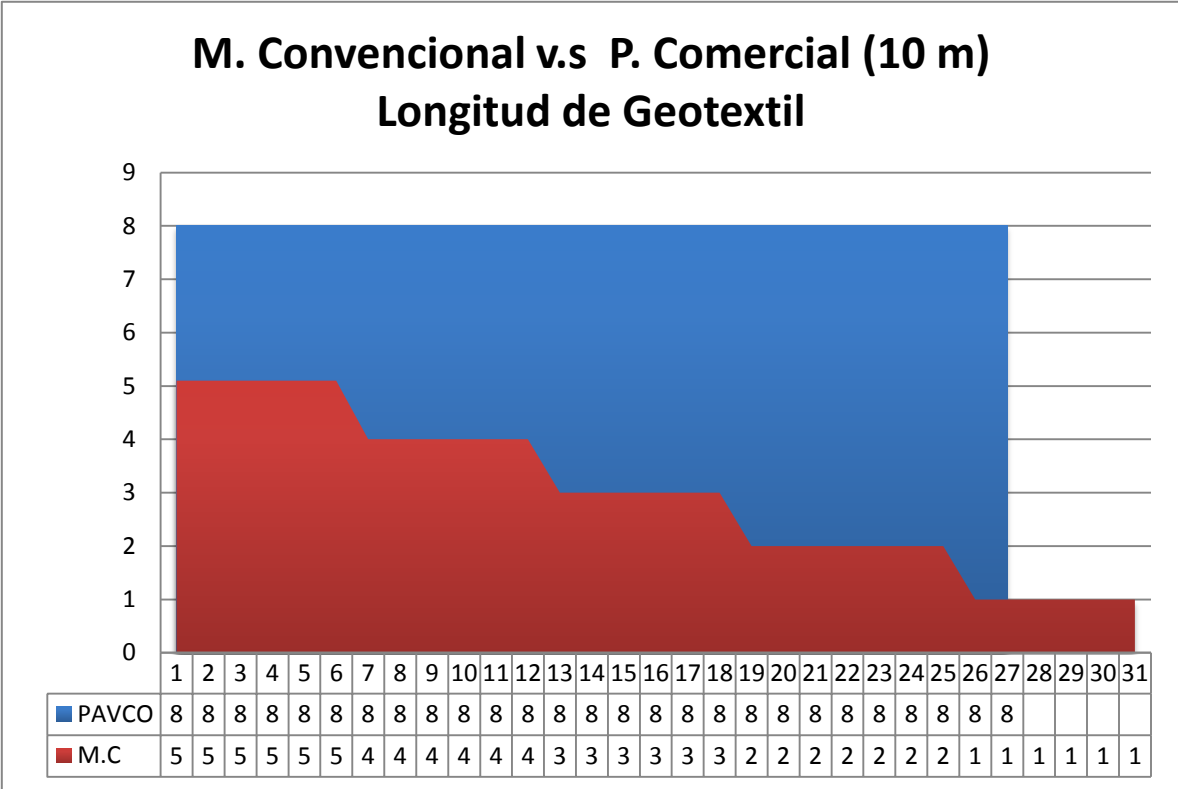


Fuente: El autor

Longitud de geotextil (L): (Eje Y: Longitud de geotextil (L) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Muro de 10 metros de altura y material de relleno con ángulo de fricción interna de 36°

Ilustración 44 Análisis Comparativo - Longitud de geotextil - Altura del muro 10 metros



Fuente: El autor

Longitud de geotextil (L): (Eje Y: Longitud de geotextil (L) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

ANÁLISIS GENERAL:

El resultado de diseño en todos los casos de análisis y comparación, el software del paquete comercial es mucho más conservador que los obtenidos empleando

una metodología convencional. Debido a que en todas las situaciones el software define la longitud, igual a la totalidad del largo de la base del muro. En cambio la metodología convencional distribuye la longitud del geotextil acorde a la solicitud de esfuerzos que se genere a cierta profundidad del muro. Lo que permite optimizar la cantidad de material de refuerzo a utilizar.

7.4 SOBRECARGA

El análisis del muro por sobrecarga, se realizó con el diseño y estudio de un muro de contención de 4,88 metros de altura, reforzado con geotextiles. Compuesto por un relleno de suelo granular de propiedades $\gamma_1 = 110 \left[\frac{lb}{pie^3} \right] = 17,628 \left[\frac{KN}{m^3} \right]$ y $\phi_1' = 36^\circ$. El material de refuerzo empleado tiene las siguientes propiedades: $\sigma_G = 80 \left[\frac{lb}{pulg} \right] = 14,7 \left[\frac{KN}{m} \right]$. El muro soporta una carga distribuida de $40 \left[\frac{KN}{m^3} \right]$, en dos situaciones diferentes, aplicando la carga sobre todo el muro y dejando 1 metro libre desde el borde del mismo.

A continuación, las tablas con las soluciones para cada caso de carga:

Tabla 10 Resultados de diseño - Sobrecarga total - Metodología Convencional.

Sobrecarga sobre todo el Muro - Metodología Convencional									
z [m]	Sv Dis. [m]	Sv Cal. [m]	lr [m]	le [m]	L [m]	LI [m]	LI [m]	Lt [m]	LT [m]
0,48	0,5	0,65	2,242	0,280	2,522	0,140	1	2,66	3,16
0,98	0,5	0,66	1,987	0,241	2,228	0,120	1	2,35	2,85
1,48	0,5	0,65	1,732	0,214	1,947	0,107	1	2,05	2,55
1,98	0,5	0,63	1,478	0,197	1,675	0,099	1	1,77	2,27

2,48	0,4	0,60	1,223	0,150	1,373	0,075	1	1,45	1,85
2,88	0,4	0,57	1,019	0,147	1,166	0,073	1	1,24	1,64
3,28	0,4	0,53	0,815	0,145	0,960	0,072	1	1,03	1,43
3,68	0,4	0,50	0,611	0,144	0,756	0,072	1	0,83	1,23
4,08	0,4	0,47	0,408	0,145	0,552	0,072	1	0,62	1,02
4,48	0,4	0,44	0,204	0,145	0,349	0,073	1	0,42	0,82
4,88	0,4	0,41	0,000	0,146	0,146	0,073	1	0,22	0,62

Tabla 11 Resultados de diseño - Sobrecarga 1 m libre - Metodología Convencional.

Sobrecarga 1 [m] del borde libre - Metodología Convencional									
z	Sv Dis.	Sv Cal.	lr	le	L [m]	LI	LI	Lt	LT
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]		[m]	[m]	[m]	[m]
0,48	0,5	0,63	2,242	0,305	2,547	0,153	1	2,70	3,20
0,98	0,5	0,54	1,987	0,326	2,313	0,163	1	2,48	2,98
1,48	0,5	0,58	1,732	0,272	2,004	0,136	1	2,14	2,64
1,98	0,5	0,60	1,478	0,233	1,711	0,117	1	1,83	2,33
2,48	0,4	0,59	1,223	0,168	1,391	0,084	1	1,47	1,87
2,88	0,4	0,57	1,019	0,160	1,179	0,080	1	1,26	1,66
3,28	0,4	0,54	0,815	0,155	0,971	0,078	1	1,05	1,45
3,68	0,4	0,51	0,611	0,153	0,765	0,077	1	0,84	1,24
4,08	0,4	0,47	0,408	0,153	0,560	0,076	1	0,64	1,04
4,48	0,4	0,44	0,204	0,153	0,356	0,076	1	0,43	0,83
4,88	0,4	0,41	0,000	0,153	0,153	0,077	1	0,23	0,63

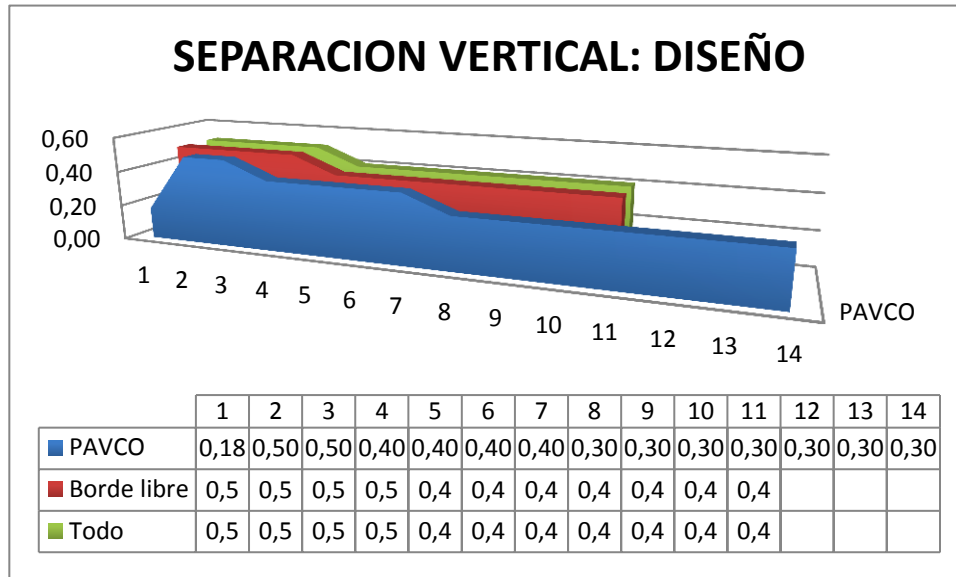
Tabla 12 Resultados de diseño - Sobrecarga total - Geosoft

Z [m]	Geosintético	Sv Diseño [m]	Sv Calculado [m]	Le minimo [m]	Lr [m]	L [m]	Lo [m]	L a Usar [m]	Lt [m]
0,177	T2100	0,18	0,89	0,751	2,395	3,146	0,914	3,901	4,99
0,677	T2100	0,50	0,74	0,697	2,140	2,837	0,914	3,901	5,32
1,177	T2100	0,50	0,63	0,472	1,885	2,358	0,914	3,901	5,32
1,577	T2100	0,40	0,56	0,316	1,681	1,997	0,914	3,901	5,22
1,977	T2100	0,40	0,51	0,305	1,478	1,782	0,914	3,901	5,22
2,377	T2100	0,40	0,47	0,305	1,274	1,579	0,914	3,901	5,22
2,777	T2100	0,40	0,43	0,305	1,070	1,375	0,914	3,901	5,22
3,077	T2100	0,30	0,40	0,305	0,917	1,222	0,914	3,901	5,12
3,377	T2100	0,30	0,38	0,305	0,764	1,069	0,914	3,901	5,12
3,677	T2100	0,30	0,36	0,305	0,611	0,916	0,914	3,901	5,12
3,977	T2100	0,30	0,35	0,305	0,458	0,763	0,914	3,901	5,12
4,277	T2100	0,30	0,33	0,305	0,306	0,610	0,914	3,901	5,12
4,577	T2100	0,30	0,31	0,305	0,153	0,458	0,914	3,901	5,12
4,877	T2100	0,30	0,30	0,305	0,000	0,305	0,914	3,901	5,12

(El software del paquete comercial no permite especificar el campo de acción de la sobrecarga que soporta el muro).

COMPARACIÓN GRAFICA:

Ilustración 45 Análisis Comparativo – Sobrecarga - Separación vertical de diseño



Fuente: El autor

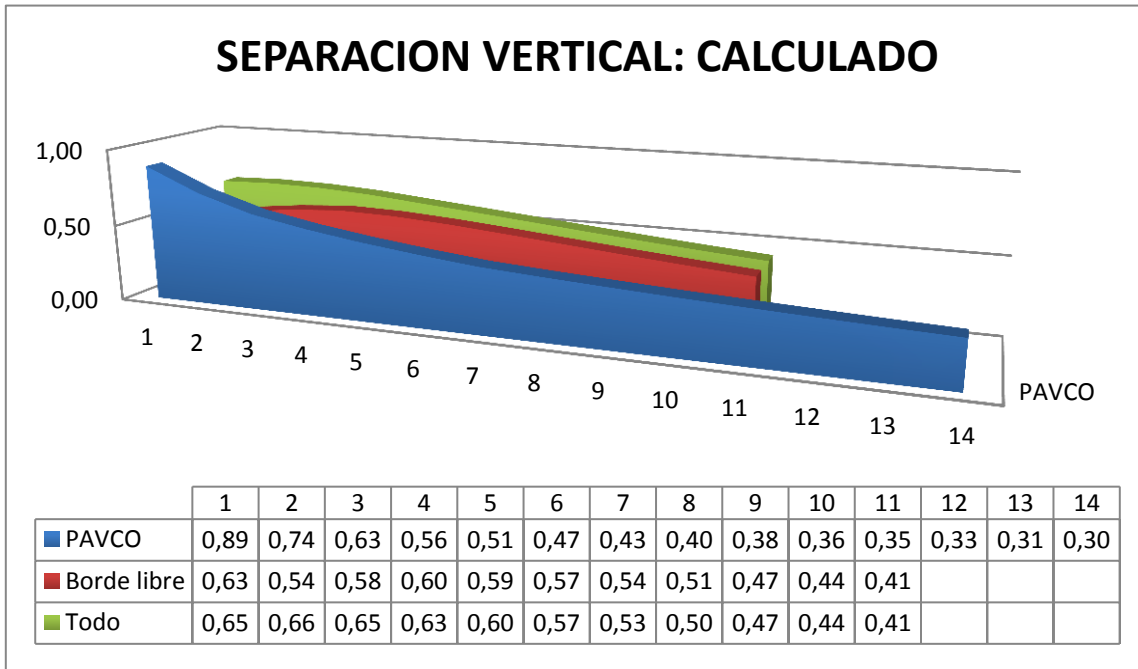
Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

ANÁLISIS GENERAL:

El diseño del muro planteado por el software del paquete comercial, teniendo en cuenta la acción de la sobrecarga sobre el muro, es mucho más conservador, comparado con los diseños bajo la metodología convencional, debido a que emplea más capas de geotextil, lo que implica un incremento en el material de refuerzo a usar.

COMPARACIÓN GRÁFICA:

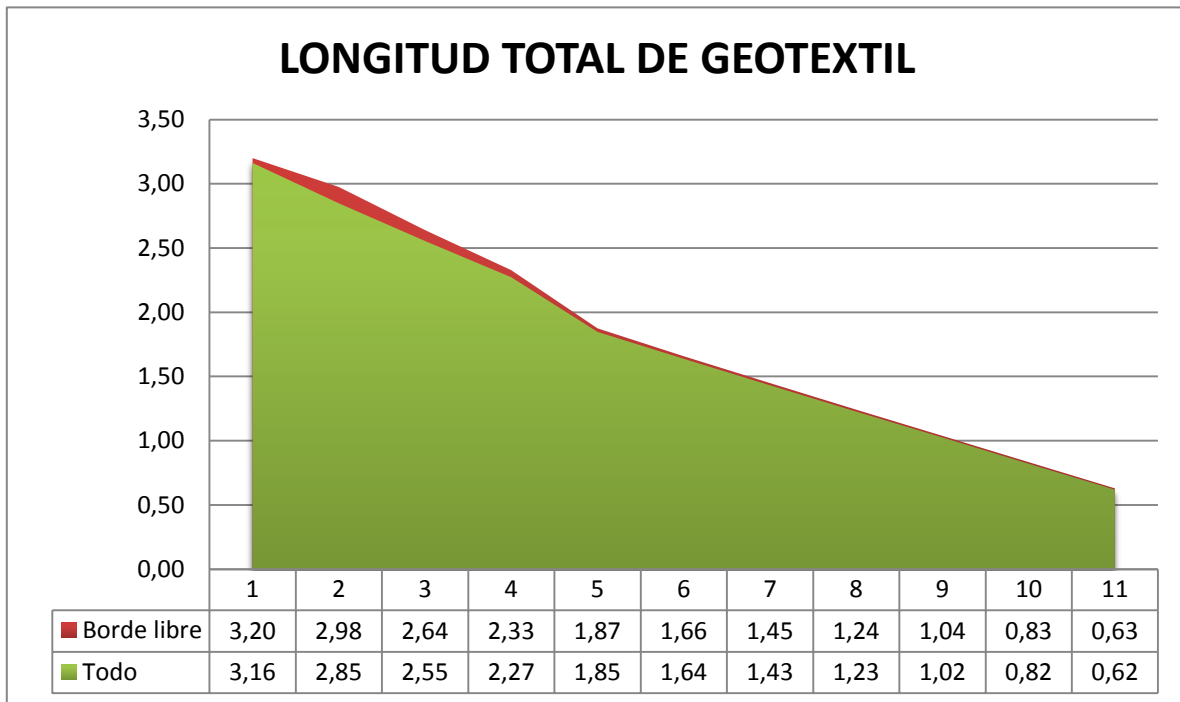
Ilustración 46 Análisis Comparativo - Sobrecarga - Separación vertical calculado



Fuente: El autor

Separación entre tiras de geotextil (Sv): (Eje Y: Longitud de separación (SV) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

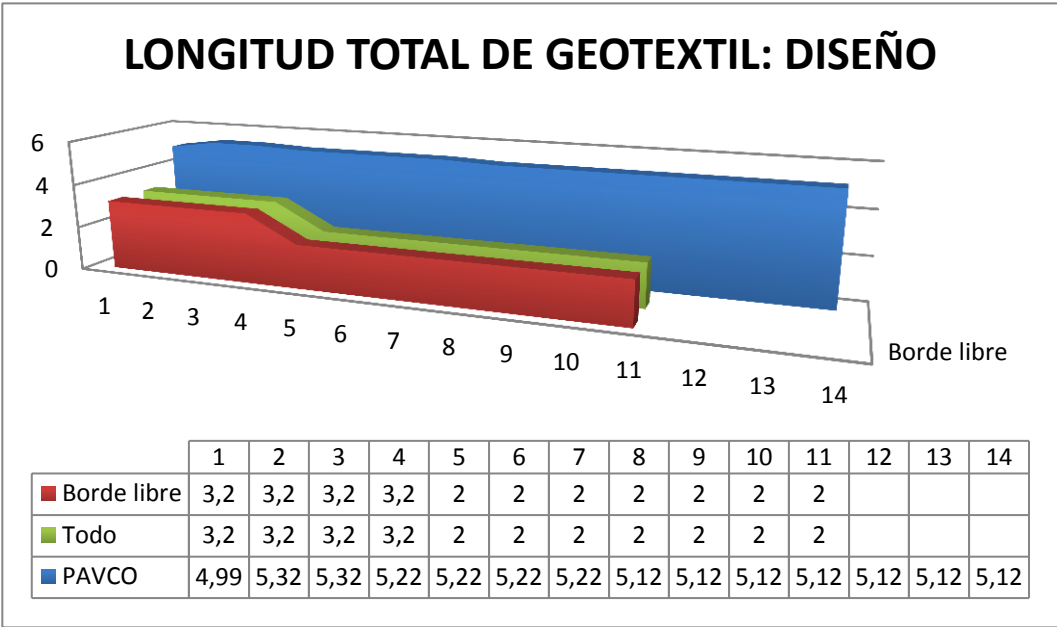
Ilustración 47 Análisis Comparativo – Sobrecarga total - Longitud total de geotextil



Fuente: El autor

Longitud de geotextil (L): (Eje Y: Longitud de geotextil (L) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

Ilustración 48 Análisis Comparativo – Sobrecarga total - Longitud total de geotextil de diseño



Fuente: El autor

Longitud de geotextil (L): (Eje Y: Longitud de geotextil (L) [Metros], Eje X: Número de capa, según las tablas anteriores).

ANÁLISIS GENERAL:

Se hace notable un caso crítico en el que las cargas sobre todo el muro obligan a tener longitudes de geotextil mucho más largas comparadas a situaciones en las que por seguridad se mantiene 1 metro libre de sobrecargas medido desde la cara del muro. La concentración de esfuerzos en el metro adyacente al límite del muro puede afectar la integridad y seguridad en los periodos de construcción y servicio de la estructura.

8 CONCLUSIONES

El uso de muros con suelo reforzado hace parte de los sistemas geotécnicos de contención mecánica para la solución diseño y construcción de estructuras para la fundación, contención de obras civiles, que han logrado ser implementados con relativo éxito en la actualidad. Los materiales usados para su construcción, tales como telas a base de polímeros, han demostrado en pruebas de laboratorio y de campo una alta resistencia y excelente durabilidad.

El diseño de este tipo de estructuras tuvo sus inicios con métodos numéricos manuales, con los que prima un análisis estático de las fuerzas que se desarrollan por el peso de los materiales que lo conforman, cargas externas asociadas al servicio de la estructura y fuerzas que se generan en los elementos que refuerzan el suelo.

1. La altura del muro (H) es el parámetro de mayor influencia en el diseño de un muro en suelo reforzado en las metodologías de diseño empleadas. Entre mayor sea la magnitud de la altura del muro, mayor serán los esfuerzos internos verticales y horizontales presentes en el suelo de relleno del muro, generando mayores empujes de tierra, lo que exige una reducción de la longitud de la separación entre capas de refuerzo S_v y un aumento en la longitud de las capas de geotextil.
2. El ángulo de fricción interna Φ del material de relleno, en un muro de suelo reforzado, es un parámetro que afecta directamente la cantidad y disposición del material de refuerzo en un diseño basado en la metodología convencional. Entre más alto sea esta magnitud, menor es la cantidad de

geotextil que se obtiene como resultado del diseño, generando un aumento en la separación de capas de refuerzo Sv.

El mismo comportamiento aplica para la longitud L en las capas del material de refuerzo. Entre mayor sea la magnitud Φ , menor será la longitud de anclaje necesaria para alcanzar el plano de falla descrito por Rankine. El ángulo de la línea de falla con respecto a la horizontal aumenta. A su vez disminuye el tamaño de la cuña de falla y como consecuencia la resistencia adecuada en la interfaz suelo-geotextil se lograra empleando menor cantidad de material.

3. En el diseño de un muro de suelo reforzado, las solicitudes por sobrecarga, son parámetros influyentes tanto en paquetes comerciales como en metodologías convencionales. A la hora de generar un modelo que simula el problema geotécnico, las dos soluciones de diseño presentaron una disminución en los factores de seguridad debido a la sobrecarga.
4. En los resultados de diseño por el método convencional es evidente la influencia de los parámetros: ángulo de fricción interna del suelo de relleno y altura del muro. Para el caso de diseños realizados con el paquete comercial empleado, solo es determinante la altura del muro.
5. Los diseños realizados haciendo uso del paquete comercial son para todos los casos analizados, más conservadores que los obtenidos empleando la metodología convencional, debido a factores constructivos y de normatividad en la construcción de este tipo de estructuras.
6. Se deja abierto el tema: “Análisis de diseño de Muros en Suelo Reforzado” y se invita a participar en la investigación de estructuras con refuerzos de

tipo sintético, empleando otros programas que se encuentran en el mercado, con el fin de fortalecer el conocimiento en el tema.

7. Hoy en día los diseños manuales son puestos a prueba en modelos computacionales que permiten simular en gran parte las características de la capacidad de servicio de la estructura que asimilan de forma eficiente las propiedades de los suelos a nivel de partículas, aceleran el cálculo matemático general para un diseño, establecen ciertas pautas para prever problemas en construcción y dificultades en el mantenimiento.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Braja M. Das, 'Principios de ingeniería de cimentaciones' (cuarta ed., Vol. I). (I. T. Editores, Ed., & U. A. José de la Cera Alonso, Trad.) Sacramento, California State, USA: THOMSON LEARNING. (1999).
- Jose D. Ale, 'Métodos de estabilización de taludes con suelos reforzados', (tesis profesional), Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Lima, Perú. (2007).
- Mexichem, s. i. (2011). Mexichem PAVCO. Recuperado el 10 de Mayo de 2012, de Mexichem Colombia S.A.S.: <http://pavco.com.co/index.php?view=page&id=4>.
- Rocscience inc. (2012). Rocscience software tools for rock and soil. Recuperado el 10 de octubre de 2012, de <http://www.rocscience.com>