

Arteaga Hernández Juan Sebastián

Estabilización de taludes con estructura compuesta de
neumáticos reutilizados

2024



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

**ESTABILIZACIÓN DE TALUDES CON
ESTRUCTURA COMPUESTA DE NEUMÁTICOS
REUTILIZADOS.**

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de

Maestro en Ciencias (Geotecnia)

Presenta

Ing. Juan Sebastián Arteaga Hernández

Dirigido por:

Dra. María de La Luz Pérez Rea

Querétaro, Qro a 30 de
mayo.

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias Línea Terminal en Geotecnia

**ESTABILIZACIÓN DE TALUDES CON ESTRUCTURA COMPUESTA DE
NEUMÁTICOS REUTILIZADOS.**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de:

Maestro en Ciencias (Geotecnia)

Presenta:

Juan Sebastián Arteaga Hernández

Dirigido por:

Dra. María de La Luz Pérez Rea

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Presidente

Firma

Dr. Eduardo Rojas González
Secretario

Firma

Dr. Omar Chávez Alegría
Vocal

Firma

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Sinodal

Firma

M. en I. Gerardo Medellín Aguilar
Sinodal

Firma

Nombre y Firma
Director de la Facultad

Nombre y Firma
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
30/05/2024
México

RESUMEN

El presente estudio está dirigido a la determinación de la viabilidad de hacer un muro de contención con neumáticos reutilizados, dónde las ventajas son la reutilización de los neumáticos basándose en los antecedentes, encontrar un material con buenas características y bajo costo argumentado en el marco teórico, por último, hacer un método constructivo que sea competitivo descrito en la metodología, en el modelo de del talud se implementarán las variables principales que se ajusten para estimar su estabilidad explicado en la elaboración del mismo, en este caso una configuración normal con neumáticos de una cara cortada y entendiendo que el tepetate y el material combinado como los materiales con mejor comportamiento en cuanto a manejo y resistencia, con esto se pudo llegar a obtener las conclusiones y sugerir las recomendaciones necesarias para el proceso constructivo.

Palabras clave: Taludes, neumáticos reutilizados, estructuras de contención, modelos de estabilización de taludes, métodos de diseño.

ABSTRACT

This study is aimed at determining the feasibility of making a retaining wall with reused tires, where the advantages are the reuse of tires based on the background, find a material with good characteristics and low cost argued in the theoretical framework, finally, make a construction method that is competitive described in the methodology, in the model of the slope the main variables will be implemented to estimate its stability explained in the elaboration of the same, in this case a normal configuration with tires of a cut face and understanding that the tepetate and the combined material as the materials with better behavior in terms of handling and resistance, with this it was possible to obtain the conclusions and suggest the necessary recommendations for the constructive process.

Key words: Slopes, reused tires, retaining structures, slope stabilization models, design methods.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primero a Dios por darme la fortaleza de seguir adelante incluso en momentos en los que todo se tornaba algo complicado, a mi familia que son mí motor y mi razón de ser, que a pesar de la distancia se encargaron de ser el gran apoyo para sobrepasar los obstáculos de este complejo camino, a los docentes que me acompañaron, me enseñaron de este gran mundo de la geotecnia y siguieron forjando lo que soy como profesional, por ultimo a mis amigos y personas que conocí en esta nueva etapa lo cuales se encargaron de darme la motivación desde mi país y a los que acá me hicieron sentir como en casa.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
AGRADECIMIENTOS.....	3
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	6
1.1 JUSTIFICACIÓN	6
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	7
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES.....	8
CAPÍTULO 3 MARCO TEORICO.....	12
3.1 Neumáticos y producción de los neumáticos.....	12
3.2 Impactos ambientales negativos por mala disposición del recurso	16
3.3 Estabilización de taludes.....	17
3.3.1 ¿Qué es un talud?	17
3.3.2 Partes de un talud.....	17
3.4 Modos de inestabilidad en el suelo.....	18
3.5 Parámetros que influyen en la estabilización de un talud en suelo	19
3.6 Pendientes en taludes	19
3.7 Sistemas de estabilización de taludes y laderas	21
3.8 Muros como método estabilizante.....	27
3.8.1 Muros de gravedad y suelo reforzado	27
3.8.2 Muros jaula.....	27
3.8.3 Muros de contención de gaviones.....	27
3.8.4 Tipos de gaviones.....	28
3.8.5 Características del muro de gaviones	29
3.9 Estructuras de contención en suelo reforzado	29
3.10 Muros anclados.....	30
3.11 Muros de contención de neumáticos para estabilización de taludes y laderas	30
3.12 Uso de las llantas recicladas como sistema de contención.	31
3.12.1 Selección de las llantas de desecho.....	33
3.12.2 Corte de las llantas reutilizadas	33
3.13 Construcción del muro de tierra reforzada con neumáticos reutilizados	34
Discusión	37

Datos del talud.....	38
Datos del Muro.....	38
3.14 Ubicación del proyecto.....	39
3.15 Aspecto Legal.....	39
3.16 Propiedades mecánicas del suelo.....	40
3.16.1 Resistencia al corte de los suelos	40
3.16.2 Ángulo de fricción	41
3.16.3 Muros en neumáticos	43
3.16.4 Dimensiones de llantas	44
3.16.5 Muros tipo de esta investigación	45
3.17 Propiedades de los tipos de suelo	45
3.18 Representación gráfica de los muros en tamaño real.....	46
CAPÍTULO 4 OBJETIVOS.....	50
General.....	50
Específicos.....	50
CAPÍTULO 5 HIPÓTESIS.....	50
CAPÍTULO 6 METODOLOGÍA.....	51
CAPÍTULO 7 SIGNIFICANCIA	57
CAPÍTULO 8 IMPACTO	58
8.1 IMPACTO SOCIAL	58
8.2 IMPACTO AMBIENTAL.....	58
8.3 IMPACTO ECONÓMICO.....	59
CAPÍTULO 9 RESULTADOS OBTENIDOS	60
9.1 Resultados obtenidos después de realizar compactación al 95 %.....	61
Arcilla Compactada	61
Tepetate compactado	61
Material Combinado Compactado	62
9.2 Factores de seguridad por volcamiento y deslizamiento de cada material.....	62
9.3 Factores de Seguridad por volcamiento.....	63
9.4 Factores de Seguridad por deslizamiento.....	64
9.5 Chequeo de la estabilidad local de la cara frontal del muro con neumáticos	65
CAPITULO 10 MODELO EN PLAXIS.....	66
10.1 Uso del PLAXIS.....	66

10.2	¿Cómo se planteó?	66
10.3	Elemento finito y propiedades.....	68
10.4	Por qué se usó y las características del elemento finito.....	69
10.5	Resultados de la aplicación del modelo en Plaxis.	70
	Tepetate como material de relleno	72
	Suelo combinado como material de relleno	75
10.6	Máxima altura permitida para este tipo de talud	77
10.7	REVISIÓN CUERPO DEL MURO CON PARÁMETROS DE LABORATORIO.	78
10.7.1	Muro de Tepetate	78
10.7.2	Material Combinado	79
10.8	Comparación usando el software SLIDE.....	80
10.8.1	Muro de Tepetate	80
10.8.2	Muro de Material Combinado	80
	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	81
	CONCLUSIONES	83
	RECOMENDACIONES	85
	RECOMENDACIONES PROCESO CONSTRUCTIVO Y CONTROL DE CALIDAD... ..	86
	CALCULOS PARA COSTOS DE ESTIMACIÓN DE CONSTRUCCIÓN.....	87
	Aporte de esta investigación.	88
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1. Montaje experimental del muro.....	9
Ilustración 2. Montaje Experimental. [7].....	11
Ilustración 3. Estructura interna de un neumático convencional. [8]	12
Ilustración 4. Estructura interna de un neumático radial. [8].....	13
Ilustración 5. Economía circular de los neumáticos renovados. [9]	15
Ilustración 6. Distintos tipos de fallas en taludes. [11]	19
Ilustración 7. Distintos tipos de fallas en taludes. [11].....	20
Ilustración 8. Diferentes disposiciones de geotextil en drenajes. [16].....	24
Ilustración 9. Distintos tipos de muros o estructuras de contención como medida estabilizante. [18]	26
Ilustración 10. Detalle de muro de gaviones con relleno granular y corte del terreno y su respectivo drenaje. [21].....	28
Ilustración 11. Vista Frontal del Talud con Neumáticos. [24].....	31
Ilustración 12. Vista general de obra desarrollada con llantas de refuerzo. [25]	32
Ilustración 13. Muro de tierra reforzado con neumáticos de desecho construido en Musicreando, sector las palmas del municipio de Medellín. [26].....	33
Ilustración 14. Recolección y selección de neumáticos de desecho.	33
Ilustración 15. Corte de Neumático.....	34
Ilustración 16. Esquema amarre entre llantas	35
Ilustración 17. Amarre entre neumáticos y tensores.....	35
Ilustración 18. Esquema amarre de tensores.....	36
Ilustración 19. Carta geológica de la república mexicana. [29].....	39
Ilustración 20. Dimensiones comerciales de los neumáticos. [37]	45
Ilustración 21. Diferencia de anchos y diámetros correspondientes del rin 14” al rin 16”. [37].....	45
Ilustración 22. Diseños de los diferentes tipos de muro con los rellenos que cumplieron el factor de seguridad por deslizamiento y volteo.	49
Ilustración 23. Prueba de carga axial o vertical sobre neumáticos rellenos.....	52
Ilustración 24. Prueba de carga lateral o tangencial en neumáticos rellenos.	53
Ilustración 25. Prueba de corte, usando tres neumáticos.	53
Ilustración 26. Proceso de corte y relleno de los neumáticos	56
Ilustración 27. Deformación general del talud de arcilla.....	70
Ilustración 28. Desplazamientos totales de talud.....	71
Ilustración 29. Desplazamiento del muro debido a la deformación del talud.....	71
Ilustración 30. Desplazamientos totales sobre el muro.....	72
Ilustración 31. Deformación general del talud.	72
Ilustración 32. Desplazamientos totales del talud.....	73
Ilustración 33. Deformación del muro debido al desplazamiento del talud.....	73
Ilustración 34. Desplazamientos totales sobre el muro.....	74
Ilustración 35. Superficie de falla del talud.....	74
Ilustración 36. Deformación total del talud.	75
Ilustración 37. Desplazamientos totales del talud.....	75
Ilustración 38. Desplazamiento del muro por deformación del talud.	76
Ilustración 39. Desplazamientos totales del muro.	76
Ilustración 40. Superficie de falla del talud.....	77
Ilustración 41. Disposición máxima altura del muro.....	77
Ilustración 42. Revisión muro de tepetate.	78
Ilustración 43. Revisión muro material Combinado.....	79
Ilustración 44. Comparación con Slide muro de Tepetate.....	80
Ilustración 45. Comparación con Slide muro de material combinado.....	80
Ilustración 46. Costos de construcción. Fuente: Autor.....	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Materiales que componen los neumáticos radiales. Guía para manejo de llantas [8].....	13
Tabla 2. Disposición del montaje o armado del Muro.....	37
Tabla 3. Valores de ángulo de fricción hallados para diferentes montajes.....	38
Tabla 4. Valores representativos para el ángulo de fricción.....	43
Tabla 5. Valores representativos de ϕ_d para Arenas y limos”.....	43
Tabla 6. Ecuaciones para el cálculo de muros de contención con neumáticos.....	44
Tabla 7. Parámetros de diseño de la arcilla compactada al 95%.....	47
Tabla 8. Parámetros de diseño del tepetate compactado al 95%.....	47
Tabla 9. Parámetros de diseño del Suelo combinado compactado al 95%.....	48
Tabla 10. Caracterización de los materiales.....	63
Tabla 11. Propiedades arcilla como material de relleno.....	64
Tabla 12. Propiedades tepetate como material de relleno.....	64
Tabla 13. Propiedades suelo combinado como material de relleno 60.....	64
Tabla 14. Alturas de los diferentes tipos de muro.....	65
Tabla 15. Longitudes de los diferentes tipos de muros.....	65
Tabla 16. Factores de seguridad por volcamiento para los tres tipos de material.....	65
Tabla 17. Factores de seguridad por deslizamiento para los tres tipos de material.....	66
Tabla 18. Estabilidad local de la cara frontal de los diferentes tipos de muros.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

- (m) Metros, unidad de medida.
- (V/H) Vertical, horizontal.
- (kg/cm²) kilogramo sobre centímetro cuadrado.
- (IRS) Inyección repetitiva selectiva.
- (cm) Centímetros, unidad de medida.
- (H/B) Altura y base.
- (BCC) Base Centrada Cúbica.
- (R12, R15) Dimensiones de Rin.
- (KN) Kilo Newton.
- (S.A.S.) Sociedades por Acciones Simplificadas
- (ASTM) American Society for Testing and Materials.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN

Se espera que la investigación traiga consigo una solución innovadora al problema determinado, esto en México, toda vez que un método nuevo en este país, es posible que se estén llevando investigaciones sobre el tema, así que también podría ser relevante aportar a dichas investigaciones. También se quiere dar respuesta a la pregunta de investigación, siguiendo los lineamientos planteados al inicio de la misma. Y poder ir resolviendo las diferentes variables que se generan en la investigación. [1]

Esta investigación se origina en el momento en el que se conoce que este método que se quiere implementar es utilizado en la república de Colombia, pero en México hasta ahora se está empezando. En cuanto a antecedentes se tienen los métodos de estabilización de taludes y suelos que se han ejecutado en el país, se tienen los diferentes modelos implementados y se conocen los usos o segunda vida que se le están a los neumáticos en el país. En cuanto a corto y mediano plazo se espera implementar un modelo de estabilización que involucre la utilización de los neumáticos a los cuales no se les ha dado un segundo uso, generar un menor impacto en cuanto al manejo de estos residuos, solucionar problemas que se hayan solucionado en otras investigaciones acerca de este tema. [2]

Es de gran importancia recalcar que lo primero es conocer las propiedades mecánicas y físicas del material, ya que ese será el punto de partida para contemplar la posibilidad de construir muros para la estabilización de taludes. Estas propiedades que se van a usar en la siguiente tesis serán una parte citadas de diversos autores que con sus investigaciones y aportes se han acercado al objetivo propuesto, y otra parte serán propiedades propuestas dependiendo la experiencia que se tenga sobre lo que se trabajará, y así implementar el método a nivel local.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El crecimiento industrial a pasos agigantados va de la mano con efectos indeseables como las afectaciones en construcciones civiles, aumento de materiales no biodegradables, que después de cumplir con su tiempo de uso, pasan a engrosar los porcentajes negativos en lo que corresponde a la disposición final de los mismos.

La inestabilidad de taludes es un problema frecuente en la infraestructura vial y en laderas de zona de vivienda, obras civiles y el sector industrial.

Aprovechando la reutilización de los neumáticos se planteará un nuevo modelo de construcción de muros con neumáticos reutilizados, y así poder dar solución a las zonas de inestabilidad en taludes y laderas de la República mexicana, siendo este fenómeno el punto de interés de la presente investigación.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

En los últimos 50 años se han implementados sistemas de estabilidad de taludes mediante estructuras compuestas por neumáticos en la República Colombiana, se espera hacer un modelo que permita una aplicación más amplia de esta técnica y que nos ayude a evaluar si es competitiva en términos de costos, tiempos de construcción y desarrollo.

A lo largo del tiempo las personas han aumentado el uso de automotores, y esto lleva al uso y desecho de neumáticos, tiempo después de cumplir su utilidad o uso óptimo.

Los neumáticos usados generan inconvenientes en el aspecto ambiental ya que se queman o las aplicaciones que existen para reciclarlos son pocas y muy limitadas.

En un futuro cercano, habrá 731,6 millones de unidades en todo el mundo [3]. Primero, Panamá ha construido un relleno de neumáticos en el Cerro Patacón, donde se descargan 1,5 toneladas de neumáticos diariamente [4].

Se descubrió que estas unidades tienen la capacidad de funcionar en estructuras para estabilizar taludes, lo que llevó a proponer la creación de un muro de 5 metros de alto y 10 metros de largo llamado Pneusol [5].

Los neumáticos se han implementado en estructuras y obras a lo largo del tiempo, se tienen registros desde el año 1976 en Francia. Ya existe un modelo llamado the Pneusol que se empezó a usar en 1990. Este modelo capta toda la información acerca de cómo interactúa el neumático con el suelo, en la estabilización y refuerzo de taludes. Esto ha permitido la implementación a lo largo del mundo con resultados muy positivos.

Los residuos de neumáticos se presentan en gran parte del planeta, y se han usado exitosamente para hacer taludes. Se depositan en las periferias urbanas, esto debido a la

ubicación de los lugares de acopio, el 90% de su estructura queda intacta, después de que se desgasta su banda externa [6].

SAYAO et al. 1997, describe el problema ambiental de la incorrecta configuración de los neumáticos en Rio de Janeiro (Brasil) se puede resolver utilizando este desecho como material usado en construcción cuando se aplican muros de contención. Es importante considerar las características físicas y mecánicas del material. Como resultado, el muro debe resistir el peso propio, el volcamiento, las presiones laterales y el deslizamiento. Los autores de la investigación propusieron la construcción de un muro de cuatro secciones con configuraciones neumáticas y amarres de dos tipos diferentes. Para confirmar su impacto en la estabilidad del muro, los neumáticos se emplearon de manera completa y con un corte en la cara lateral. Se colocaron dos metros de suelo local sobre el muro y se instalaron inclinómetros en la parte posterior y frontal para capturar mediciones de desplazamientos. En la parte posterior se colocaron celdas de presión, mostrado a continuación en la Figura 1.

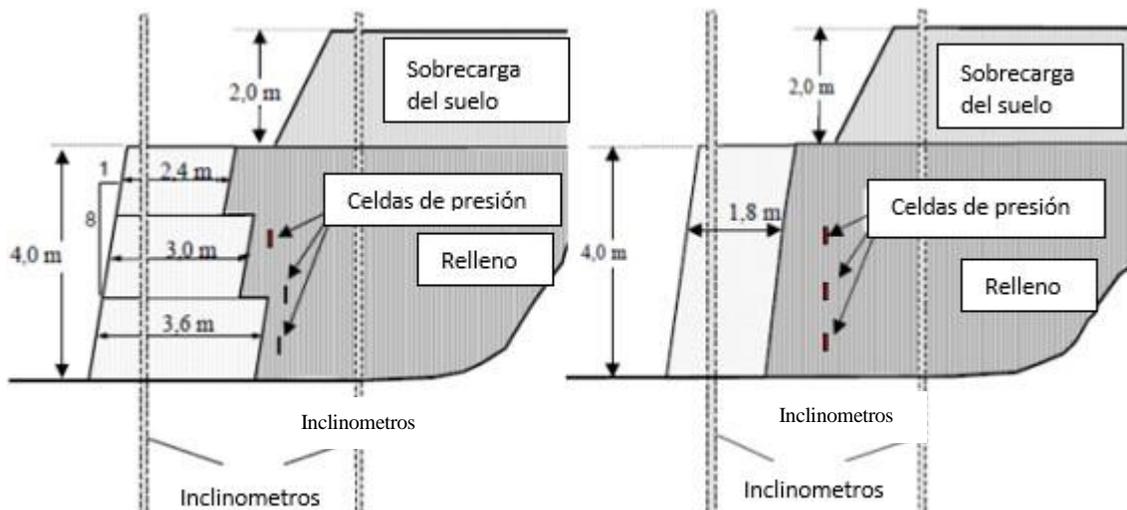


Ilustración 1. Montaje experimental del muro.

Los autores observaron que en este muro se registraron desplazamientos horizontales y verticales en rangos permitidos o significativos en cuanto a volteo y deslizamiento.

La estructura de neumáticos en comparación con un muro de concreto resultó más flexible, sin embargo, logro resistir los esfuerzos asociados con el uso del talud. Los neumáticos que se emplearon presentaron un mismo diámetro, toda vez que la homogeneidad permite mejor la transferencia de cargas, y de esta manera se aprovecha un material que es complejo y su

costo es alto al momento de reciclar de la forma adecuada.

Por otro lado, [7] emplearon una combinación de geotextil y muro conformado de neumáticos para mejorar la estabilización del talud. Se tuvo en cuenta que el método de construcción podría llegar a frenar la erosión que se produce en el talud que se encuentra cerca a alguna construcción.

Reportaron que el muro configurado con neumáticos permite una construcción fácil y bajo costo, se implementaron neumáticos para proteger la sección del geotextil de la influencia atmosférica incluyendo la degradación ultravioleta. Los resultados fueron similares a los de un muro de concreto.

Se implementaron 1400 neumáticos en la construcción del muro, los cuales tenían las mismas dimensiones tomados de un centro de acopio. Las dimensiones de los neumáticos fueron de 165 mm x 550 mm y se utilizó el geotextil UCOSG 80/80. El material arenoso fino que se compactó con el tiempo ayudó a estabilizar la base del muro. En la parte posterior del muro, el geotextil se adaptó a dos alturas diferentes. Se agregaron también dos filtros con agregados de aproximadamente 20 mm de diámetro (Fig. 2).

La obra se dividió en cinco partes. En este estudio, los autores verificaron que el muro ha producido resultados positivos en cuanto a su función y hasta el momento no ha presentado cambios significativos o evidentes. Esta estrategia se puede utilizar en lugares donde los materiales comunes son difíciles de obtener o tienen un alto costo.

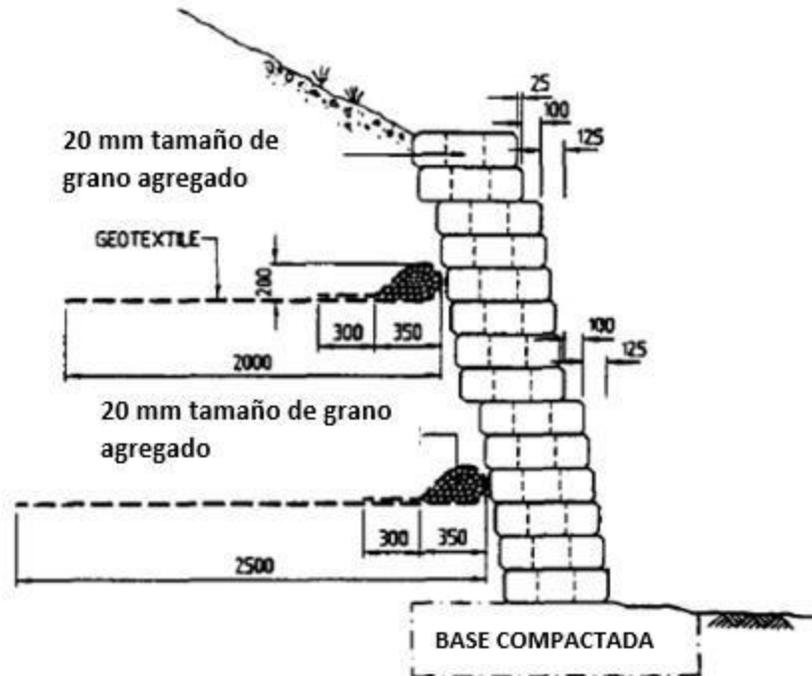


Ilustración 2. Montaje Experimental. [7]

Se señalan tres limitaciones al diseño de los autores: 1) el sistema de retención no está interconectado; 2) el sistema de drenaje está en el frente de la pared; y 3) el drenaje superficial no se desvía de la pared [7].

CAPÍTULO 3

MARCO TEORICO

3.1 Neumáticos y producción de los neumáticos

Para abordar el problema del uso incorrecto de los neumáticos, se necesita comprender su ciclo de vida completo: cómo se fabrican, cuándo terminan su vida útil y cuándo pueden ser reutilizados.

Los neumáticos se clasifican en dos tipos principales al ensamblar automóviles: radiales, diagonales o convencionales.

Los neumáticos convencionales están constituidos por varias capas que se colocan de manera diagonal en el centro. Su disposición extremadamente rígida reduce el agarre del neumático al suelo, lo que resulta en un desgaste excesivo y un consumo de combustible más alto [8]. La siguiente figura muestra la estructura.

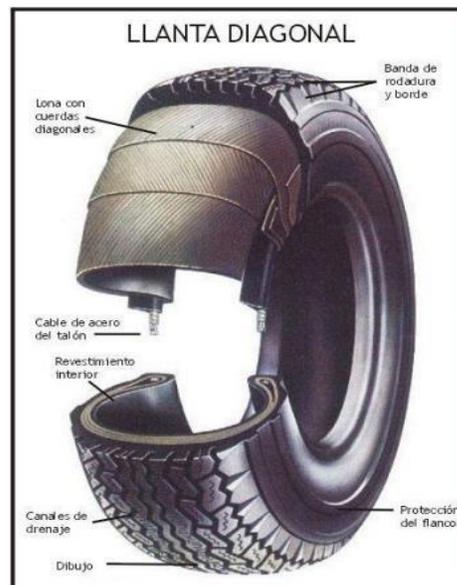


Ilustración 3. Estructura interna de un neumático convencional. [8]

La Figura 4 muestra los neumáticos radiales, que son los más comunes en la actualidad. Las fibras de la capa inicial se dirigen hacia la parte central en forma de óvalos, y otras fibras se disponen de forma diagonal después de la capa inicial. Este tipo de neumático

requiere una menor cantidad de material y puede resistir una carga similar o igual a la de los neumáticos convencionales. La Tabla 1 muestra los porcentajes de los componentes implementados en los materiales utilizados para crear un neumático radial.

Tabla 1. Materiales que componen los neumáticos radiales. Guía para manejo de llantas [8]

Material	Composición (%)	
	Automóviles	Camiones
Caucho natural	14	27
Caucho sintético	27	14
Negro de humo	28	28
Acero	14	15
Antioxidantes y rellenos	17	16

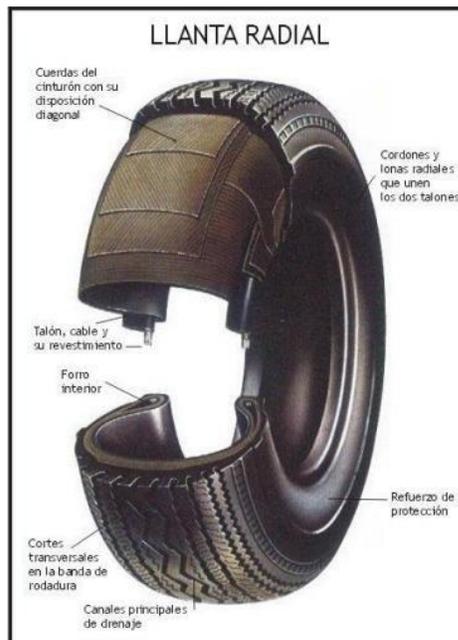


Ilustración 4. Estructura interna de un neumático radial. [8]

La fabricación de neumáticos se divide en varias etapas, que incluyen

- Formulación de compuestos de caucho: se especifican las cantidades y los componentes que

se utilizarán para garantizar que el neumático funcione con la mayor eficiencia posible en diferentes situaciones.

- Fabricación de cinturones de acero y textil: Esto se usa en neumáticos con patrón radial porque el acero o textil mejoran la resistencia al neumático.
- Calandrado: En este caso, las capas se componen de caucho y textil o caucho y acero, y las cantidades varían según el neumático.
- Fabricación de la ceja: La ceja es un anillo que ayuda a combinar perfectamente los componentes del neumático y la llanta.
- Extrusión: este paso da al neumático las características físicas finales; para ejecutarlo, es necesaria una combinación precisa de temperatura y presión.
- El montaje de la llanta: en este punto, todos los componentes del neumático se unen.
- Vulcanización: El neumático se somete a una presa vulcanizadora, lo que le da forma a la banda de rodamiento y le da su configuración redonda final.
- Inspección final: Una pieza del neumático se extrae y se toma una radiografía para determinar la precisión de que su estructura interna cumple con las normas.



Ilustración 5. Economía circular de los neumáticos renovados. [9]

El ciclo de vida de los neumáticos empieza con la adquisición de materia prima, que es el proceso de obtención y transporte de las materias primas para convertirlas en productos industriales. Luego, se fabrican los componentes que conforman los neumáticos con las materias primas procesadas y se ensamblan. Estos procedimientos generan aguas residuales [9], gases contaminantes que contaminan el aire y desechos sólidos.

La siguiente etapa del ciclo es el empaque y distribución. En este paso, se utilizan cajas y plásticos para acomodar los neumáticos para su distribución adecuada. Además, los desechos de estas etapas y los automóviles que transportan los neumáticos producen gases efecto invernadero en la atmósfera.

La operación del neumático determina la vida útil. Finalmente, como se verá más adelante, los neumáticos se pueden reutilizar de una gran variedad de maneras., reciclar para obtener los componentes del neumático y almacenar correctamente para evitar la acumulación de animales o agua.

3.2 Impactos ambientales negativos por mala disposición del recurso

El mal almacenamiento y la quema a cielo abierto son las principales prácticas perjudiciales para el medio ambiente. La mala disposición de los neumáticos desechados daña el medio ambiente.

La quema de un objeto a cielo abierto libera compuestos orgánicos volátiles y sustancias como monóxido de carbono, óxidos de azufre y nitrógeno. Si una persona está expuesta a estos contaminantes, debido a que pueden causar afecciones como irritación en la piel y los ojos, depresión del sistema nervioso central, afecciones respiratorias y algunos tipos de cáncer, su salud puede verse comprometida. [10].

Por otro lado, los efectos perjudiciales que se pueden producir si el material se almacena de manera incorrecta son:

- Se recomienda agujerear los neumáticos antes de almacenar para evitar el estancamiento del agua y la propagación de animales transmisores de enfermedades como mosquitos y roedores.
- El riesgo de incendio cuando se extrae el metal que lo compone.
- Deterioro del paisaje natural

3.3 Estabilización de taludes

3.3.1 ¿Qué es un talud?

Un talud es un área de tierra que no es plana en dirección horizontal y tiene una inclinación. Los taludes artificiales se clasifican en taludes de terraplén (rellenos) y taludes de corte, mientras que los taludes naturales son parte de la topografía natural (terreno inalterado).

3.3.2 Partes de un talud

Las partes de un talud se definen en diferentes términos. El talud consta de una pendiente, corona, pie de talud, cara, altura y terraza.

- La inclinación del talud se indica por el pendiente. H: V es el término para el porcentaje.
- El término "corona y pie de talud" se refiere a la intersección de un talud con un terreno plano.
- El término "cara del talud" se refiere al área del suelo que se encuentra entre la corona y el pie del talud.
- La altura del talud es la diferencia de elevación medida verticalmente entre el pie del talud y la corona.
- Un área horizontal que se encuentra en la parte superior del talud se denomina terraza.
- Las variaciones en la inclinación del suelo forman los escarpes. El escarpe es un escarpe superior al último cambio de inclinación en la punta del talud.

Un talud puede presentar condición estable durante mucho tiempo; la condición de inestabilidad es causada por alteraciones en la topografía, agentes sísmicos, flujos de agua subterránea, meteorización y modificaciones en las propiedades del suelo, como la presión de poros, esfuerzos internos y la resistencia al corte, entre otras cosas.

3.4 Modos de inestabilidad en el suelo.

Estos son los modos y tipos de fallas causados por la inestabilidad.

- Caídas de bloques: son causadas por la erosión, la separación de raíces, la presión del agua o los sismos en taludes con pendientes pronunciadas.
- Inclinación o giro: el giro se inicia con una cantidad o masa de roca o arcilla firme girando a partir de una fisura casi vertical, como la caída de bloques. Solo ocurre en lugares con pendientes pronunciadas.
- Deslizamientos:
 - Los materiales homogéneos, como las arcillas, tienen fallas rotacionales. El plano de falla tiene una forma circular y su tamaño se relaciona con la inclinación del talud: más grande será el plano de falla cuanto más inclinado sea el talud.
 - Fallas traslacionales: estas fallas tienen una superficie plana y suelen aparecer debido a las elevaciones de presiones de poro en el agua contenida, en estratos con resistencias bajas a poca profundidad del talud Arcillas blandas, arenas finas o limos no plásticos sueltos son candidatos para esta falla.
 - Deslizamientos compuestos: estos deslizamientos comparten características con otros mecanismos de inestabilidad.
 - Reptación: este tipo de falla refleja movimiento en una capa de suelo muy débil. Los bloques se separan al moverse, lo que los hace similares a los deslizamientos traslacionales.

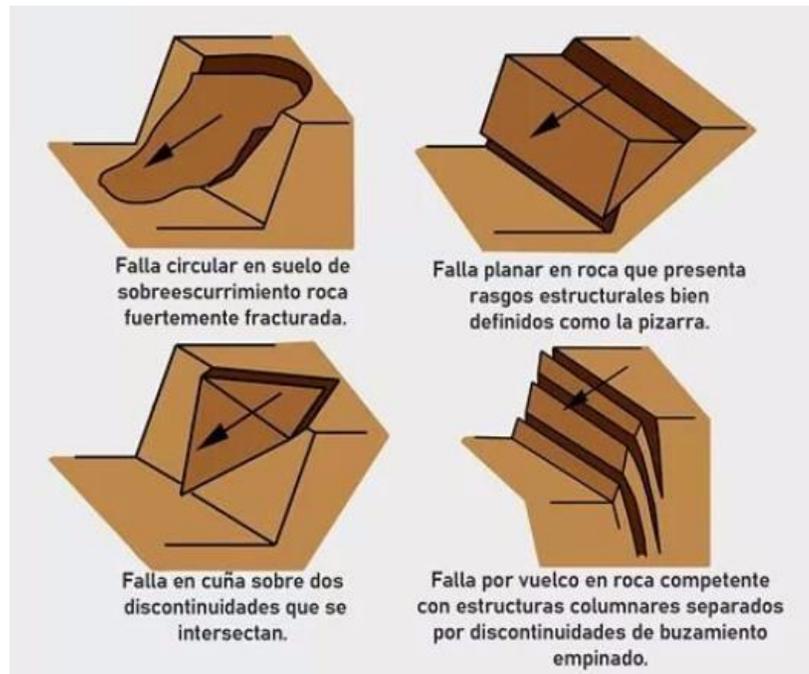


Ilustración 6. Distintos tipos de fallas en taludes. [11]

3.5 Parámetros que influyen en la estabilización de un talud en suelo

Aunque existen muchos factores que afectan la estabilidad de un talud, estos son algunos de los parámetros que se deben considerar al determinar las causas de la inestabilidad:

- El peso del suelo y la inclinación de la ladera son características de la geometría del terreno.
- La geometría del talud incluye la altura y la inclinación del talud.
- La resistencia del suelo incluye el ángulo de rozamiento y la cohesión del suelo. Además, hay una presencia de agua en el suelo.

3.6 Pendientes en taludes

La pendiente o inclinación de un talud está principalmente determinada por su estado y tipo de material utilizado. El término "ángulo" se refiere a este valor.

El Ábaco de Taylor, una de las muchas formas de calcular la pendiente máxima posible de un talud, tiene en cuenta la cohesión, el ángulo de rozamiento interno, el peso específico, el coeficiente de seguridad y la altura del talud.

La inclinación o relación (V/H) de los taludes de roca es de 1 a 5.

- Granito, Basalto y lava, utilizan inclinaciones de 2 a 5.
- Arenisca masiva y caliza de 2 a 4.
- Sedimentarias Ineterestratificada entre 1.3 a 2.
- Arcillolita y limonita entre 1 a 1.3.
- Gneis, esquistos y mármol de 2 a 4.
- Pizarra de 1.3 a 2.

El ángulo de rozamiento interno se utiliza para determinar la inclinación de los taludes no rocosos. Es común hallar taludes de una a una en obras de carreteras para suelos granulares, tres para suelos intermedios y dos para suelos arcillosos, limos o con características especiales. La siguiente imagen ilustra esto.

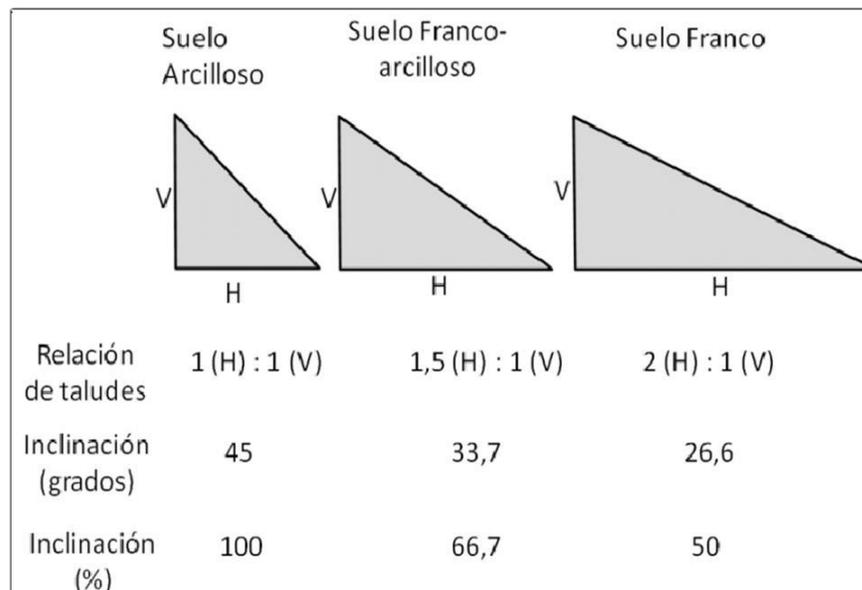


Ilustración 7. Distintos tipos de fallas en taludes. [11]

3.7 Sistemas de estabilización de taludes y laderas

Existe una amplia gama de métodos para la contención y estabilización de taludes, que se utilizan para abordar los problemas de derrumbes o desprendimientos de grandes extensiones de terreno. Algunos de estos métodos incluyen:

Para descargar el talud, se excaven tierras de la ladera, se suavizan las pendientes en las áreas más difíciles y se refuerza el pie del talud para contener y perfilar el derrame.

La sustitución es un método utilizado para rellenar taludes que tienen problemas de asentamiento o estabilidad. En esta técnica, el terreno se elimina y se reemplaza con un material con condiciones mejores que las del terreno actual. Sin embargo, debido a que se debe llevar a cabo un proceso de compactación entre capas y capas de suelo, este proceso toma más o menos tiempo en función del área a manipular.

El descabezamiento requiere extraer el material de la o corona del talud porque específicamente en esta zona es donde el peso del material potencializa el deslizamiento y menos a la resistencia porque su inclinación máxima está en la parte superior de la superficie del deslizamiento. Por lo tanto, el factor de seguridad aumenta significativamente mediante la eliminación de escasas cantidades de material. El material deslizado (ubicado en el pie del talud) no debe ser removido porque su peso aumenta la resistencia del material y aumenta las tensiones normales. Las modificaciones en la cara del talud se hacen en forma de "escalera" se conocen como bermas. Sumado a esto, es recomendable usar drenajes transversales para controlar las aguas dividiendo el talud en varios taludes con dimensiones y tamaños controlables (ver figura 8). Dos tipos de taludes básicos se producen cuando hay bermas en los taludes: el talud de banco de 75° a 90 grados y el talud general o de corta de 10° a 50 grados.

- El refuerzo semiprofundo se utiliza para coser capas de terreno inestable y evitar que se desmorone.

- Para resistir los esfuerzos transmitidos por los empujes, se construyeron muros de gravedad en la superficie para crear elementos de contención resistentes.
- El objetivo de las pantallas o cortinas de pilotes rectangulares o circulares es estabilizar el talud al alcanzar y atravesar superficies potenciales de rotura, evitando que la masa de terreno se deslice.
- Para mejorar la estabilidad general del talud, se utilizaron barreras de micropilotes o columnas de inyección para coser y rigidizar la masa de suelo inestable a través de superficies de rotura.
- Usando material geotextil para construir muros ecológicos en áreas inestables.
- La plantación de árboles o la adición de cal ayudan a estabilizar el suelo y prevenir la erosión de las capas superficiales y su posterior desprendimiento [13].

Cambios superficiales, se ejecutan en la parte superior del talud para contrarrestar la erosión y la meteorización o para evitar que los bloques caigan. El uso de mallas de alambre metálico como estabilizador evita y captura de rocas con dimensiones menores al metro que desprenden. Con frecuencia se utilizan en taludes rocosos para evitar la caída de bloques. Se colocan en el suelo, ya sea mediante postes, bulones o simplemente un peso muerto en la parte superior del talud o en las bermas intermedias.

La siembra, que consiste en una cubierta vegetal para evitar la erosión superficial, es otro método de corrección superficial. Para preservar el ecosistema, se busca reforestar con especies autóctonas de la zona, y en ocasiones se requiere un apoyo temporal como mallas geosintéticas. Las raíces de las plantas producen drenajes y aumentan la resistencia al esfuerzo cortante hasta 2,5 veces la del mismo suelo debido a la absorción de agua. La selección de plantas, ya sea hierbas, arbustos o árboles, depende del peso que aportarán al talud, las características del suelo y las condiciones ambientales como la velocidad de crecimiento, el área donde se encuentran sus raíces porque es la zona más favorecida del

talud.

Los taludes en roca son susceptibles a la caída de bloques o deslizamiento de material particulado se construyen con concreto proyectado. También se utiliza cuando la siembra no proporciona estabilidad duradera o cuando el talud no se puede plantar. Se utiliza una lechada llamada Gunita cuando la granulometría de la superficie del suelo es inferior a 2 cm.

Es importante señalar que el talud debe drenarse porque el concreto lanzado o proyectado no puede resistir las presiones del suelo. "Este método se emplea para controlar la alteración y desprendimientos en roca de pequeña magnitud, y al reforzarlo con anclajes aumenta la resistencia frente a un deslizamiento". [14]. Durante el proceso de inyección o rociado, las tensiones tangenciales deben ser superiores a 70 kg/cm², mientras que las tensiones de tracción típicas en la masa de concreto son de 45 kg/cm² y las tensiones tangenciales de 60 kg/cm². [15]

Casi todos los métodos de corrección incluyen métodos de corrección por drenaje porque permiten preservar las propiedades iniciales de diseño. Sin embargo, si no lo hacen, la presión del poro puede aumentar significativamente, lo que causa inestabilidad y hace que el método de corrección utilizado ya no sea efectivo. Las zanjas en la corona y los canales "cumplen con el objetivo de reducir las fuerzas que causan el deslizamiento e incrementar los esfuerzos normales efectivos presentes en la superficie de falla". [16]

La finalidad es disminuir las presiones intersticiales que afectan la superficie potencial de deslizamiento. Esto aumenta la resistencia de la superficie y reduce el peso total y las fuerzas desestabilizadoras. El inicio de un proyecto de talud con medidas de drenaje permite maximizar los beneficios al mantener la resistencia del terreno.

Se pueden usar drenes superficiales o profundos según la naturaleza del deslizamiento y las características del talud.

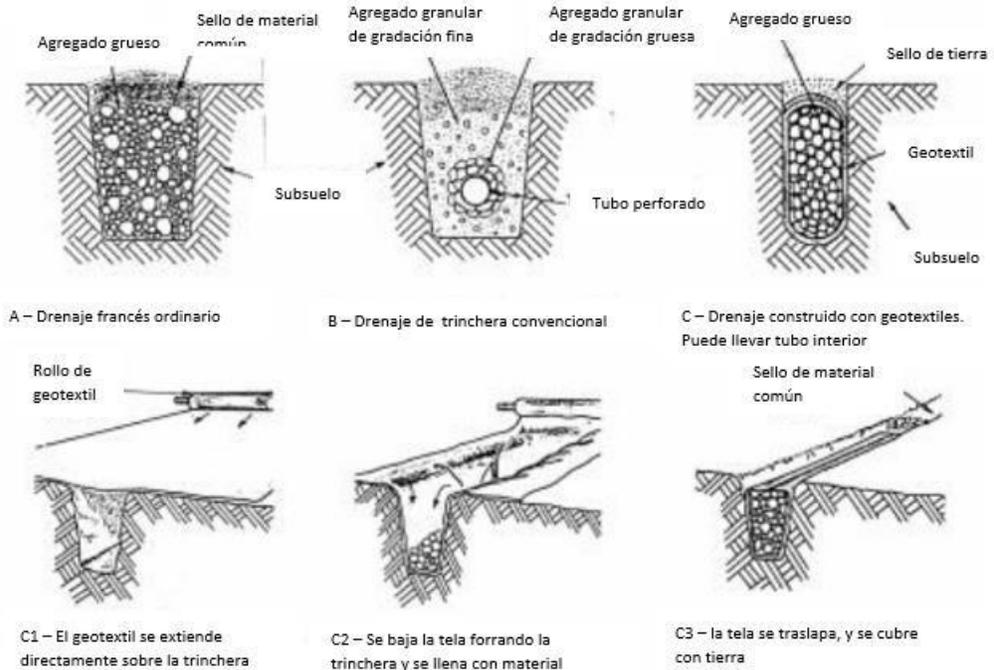


Ilustración 8. Diferentes disposiciones de geotextil en drenajes. [16]

Los drenajes superficiales, que son zanjas transversales construidas en la base del talud, se utilizan para controlar la erosión. Esto impide que el agua se infiltre o caiga por el borde del talud. Los drenajes se construyen mediante sistemas con tuberías y geotextiles o mediante excavaciones básicas. La Figura 8 muestra una amplia gama de diseños que varían según el terreno y el presupuesto.

Las grietas de tracción en la base del talud deben sellar con material impermeable. Si las grietas tienen un ancho de entre 5 y 10 cm, se debe llenar con grava u otro material permeable para que el agua filtre rápidamente. Esto se debe a que una grieta llena de agua crea grandes presiones intersticiales, lo que causa problemas de estabilidad. [17]

El drenaje profundo se basa en cavidades que penetran el terreno y recolectan el agua atrayendo líneas, y se utiliza principalmente en taludes excavados e inestables por corrientes y reducción del nivel de freático. Se dividen en zanjas de relleno drenante, galerías de drenaje, pozos verticales y drenajes horizontales.

Los anclajes se utilizan como elementos resistentes en el tipo de corrección por elementos

resistentes para generar un amarre o anclaje del terreno. Los deslizamientos traslacionales presentes en roca o áreas internas del talud de bloques en posiciones peligrosas, roca fracturada, suelos residuales o coluviones densos son aplicaciones. Se utilizan en suelos en conjunto con otras técnicas, como el sistema de contenedores. [18]

Cuando se realiza una inyección de "IRS", se presentan anclajes claros o protección doble. utilizado para proteger el efecto individual de la tensión, la rotura del tirante y la rotura de la cabeza. Contribuye al rendimiento del sistema: adhesión del cable al bombillo y desconexión del bombillo:

- Zona de bulbo
 - Zona libre
 - Cabeza
-
- Placa de reparto
 - Cuñas y porta cuña
 - Trompeta de conexión
 - Caperuza de protección

El tipo de tirante (cable o de barra), la vida útil (permanente o provisional), la probabilidad de variar la carga (retesable o no retesable) y el tipo de inyección (IU, IR o IRS) los clasifican.

Las pantallas de pilotes están compuestas por grupos de pilotes que están lo suficientemente unidos para proporcionar un sostenimiento comparativamente continuo. Previamente a la excavación, se coloca un pilote para estabilizar los deslizamientos, en este caso cerca del pie del talud. Los muros de contención tienen la ventaja de que requieren muy poca excavación y no afectan la estabilidad del talud durante la construcción.

Como componentes resistentes de los taludes, la construcción de los muros requiere excavaciones en el pie del talud, lo que puede desestabilizar el talud hasta que se instala el muro. Los muros pertenecen a tres categorías principales: muros de sustentación, que se implantan aislados del terreno y luego se rellenan; muros de contención, que se excavan para generar refuerzo al terreno inestable; y muros revestidos, que protegen el terreno de los fenómenos de alteración y proporcionan un peso para estabilizar. [18]

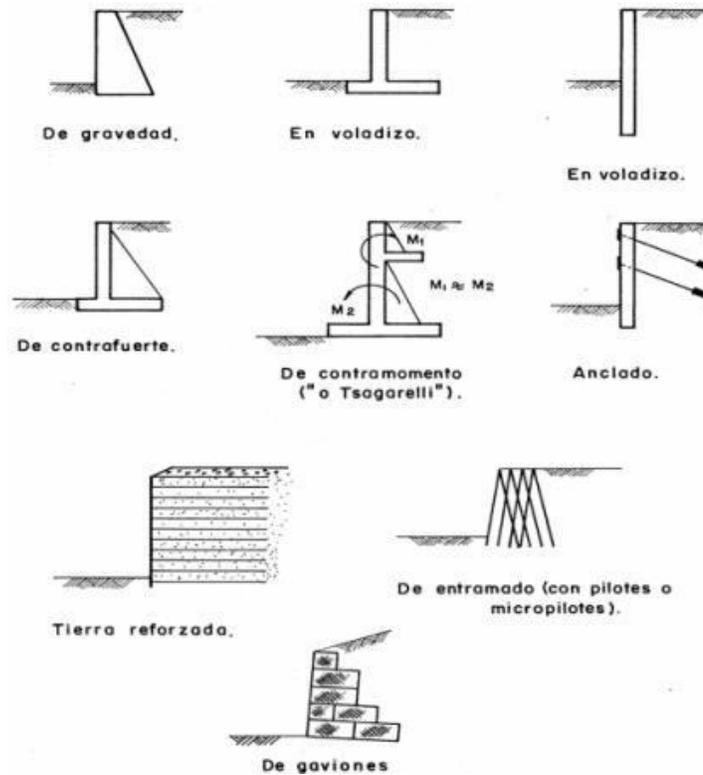


Ilustración 9. Distintos tipos de muros o estructuras de contención como medida estabilizante. [18]

3.8 Muros como método estabilizante

3.8.1 Muros de gravedad y suelo reforzado

Las estructuras de contención son diferentes. Las más comunes son la capacidad de soportar el empuje activo y la capacidad de absorber tensiones potenciales de tracción. [19] Este tipo de muros estabilizan utilizando su peso propio, reduciendo la resistencia del cimiento, aún más si se colocan en suelo arcilloso. Por lo tanto, solo se deben usar para contrarrestar o disminuir deslizamientos de pequeñas dimensiones. Estos muros suelen tener una relación H/B de 1,5 a 2 y suelen tener alturas inferiores a los 10 m, según Winterkon y Fang.

3.8.2 Muros jaula

La estructura está cubierta por un suelo granular compactado y está compuesta por vigas longitudinales o largueros y vigas transversales o traviesas. Se compone generalmente elementos de madera, bloques de concreto armado o piezas metálicas de acero o aluminio. El peso propio proporciona estabilidad para alturas inferiores a los 7 metros.

La relación H/B generalmente es de 1 a 2. Debido a su montaje rápido, se utilizan para corregir los taludes en los que se han producido movimientos significativos. Se adaptan fácilmente a los asentamientos en el terreno y comienzan a actuar tan pronto como se construyen. [21]

3.8.3 Muros de contención de gaviones

Dado que los muros de este tipo pueden deformarse en respuesta a los movimientos de la fundación, su flexibilidad es una de sus características más importantes. [21]

Para explicar la función del muro de gaviones Según Fracassi, el uso de muros de contención con rocas de gran tamaño agrega mucho peso, pero es difícil de manejar y no tiene límites para resistir cargas de tracción. Si se utilizan rocas pequeñas que proporcionen el peso adecuado, se requiere mucho mantenimiento y habilidad. Agregar lechada o mortero ayuda, pero es complejo de manejar y no tiene confinamiento para equiparar la carga de tracción. El gavión es una jaula de metal con piedras pequeñas para facilitar el manejo.

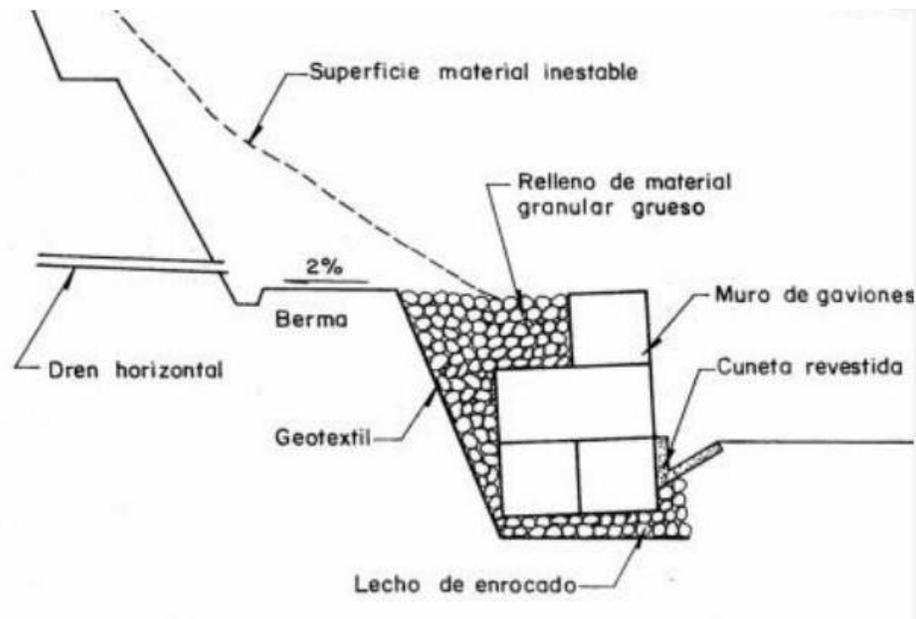


Ilustración 10. Detalle de muro de gaviones con relleno granular y corte del terreno y su respectivo drenaje. [21]

Los gaviones suelen tener una altura promedio de 5 metros, pero algunos han llegado a tener una altura de hasta 25 metros.

3.8.4 Tipos de gaviones

- Caja: jaula cúbica de metal con un ancho de un metro y una altura variable.
- Saco: una jaula metálica en forma de "costal" que se usa normalmente en las costas o en los cauces de los ríos.
- Colchón-colchón relleno.

Las mallas típicas son 6x8, 8x10 y 10x12. Cuando el material está hecho de acero con BCC y tiene una capa de liga Zn/Al-Galfan que está recubierta con plástico. Para el relleno, se puede utilizar piedra de cantera o cantos rodados de alto peso específico que no sean friables ni solubles. Para evitar la fuga de material, la piedra debe ser 1,5 a 2 veces el tamaño entre las torsiones de la malla.

3.8.5 Características del muro de gaviones

- Permeabilidad
- Integración en el medioambiente; regeneración vegetativa
- Monoliticidad
- Flexibilidad

3.9 Estructuras de contención en suelo reforzado

Los elementos que forman la cara de la estructura (gaviones, concreto lanzado, neumáticos, etc.) están sostenidos por elementos resistentes a la tracción en el relleno del suelo. Al transferir los esfuerzos a los elementos resistentes, estos elementos también aumentan la resistencia del suelo y reducen la deformación del suelo, lo que mejora el comportamiento general.

Para este tipo de estructura, generalmente se utilizan mallas "Terramesh", que tienen una forma con 5 lados. En taludes con una inclinación superior a 20° , se utiliza la malla de gavión de roca, de otra manera si el ángulo es mayor a 20° , el material que se confina suele ser geosintético. [22]

El gavión implementado mide generalmente 2 metros de largo, 1 metro de ancho y 0,5 a 1 metro de altura. La geomalla se utiliza como material que resiste la tracción. Es un geosintético plano con alta resistencia a la tracción constituido por una red o malla rectangular con componentes incorporados por entrelazamiento.

3.10 Muros anclados

Es una medida de muros con anclajes reforzados que elimina problemas de estabilidad al vuelco del muro y reduce los momentos de flectores que actúan sobre él. También reduce las tensiones en el terreno. El anclaje utilizado es de tipo pretensado. [23]

Es necesario llevar a cabo un estudio geológico-geotécnico previo junto con todos estos sistemas de estabilización y refuerzo de taludes para determinar la mejor opción a utilizar. Este estudio debe proporcionar información sobre el suelo existente en cada situación y las causas potenciales de su inestabilidad.

Sin embargo, existe otra opción: el sistema de estabilización de taludes utiliza llantas. Luego se explica el sistema.

3.11 Muros de contención de neumáticos para estabilización de taludes y laderas

El muro con neumáticos funciona debido a que ofrece equilibrio por su propio peso de gravedad. Su forma geométrica circular también permite la creación de una variedad de diseños que varían según la configuración y el tamaño del área a intervenir. Los muros son duraderos y resistentes a los agentes naturales como el agua y el suelo mismo; además, son fáciles de construir y comunes en las comunidades.

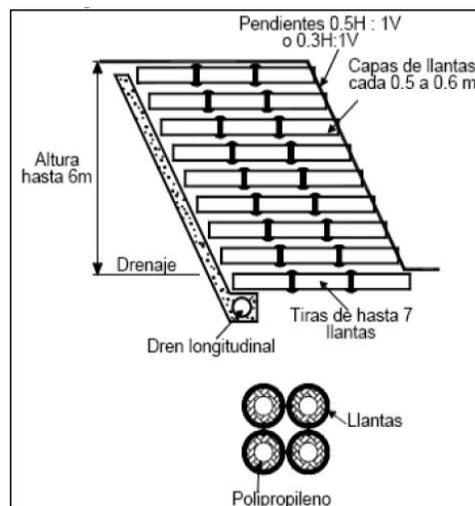


Ilustración 11. Vista Frontal del Talud con Neumáticos. [24]

Las siguientes son algunas de las ventajas y ventajas de este sistema constructivo en comparación con otros sistemas constructivos de taludes en el país:

- El muro es resistente a la lluvia, el sol y el viento, lo que lo hace duradero y útil.
- Es económico y flexible en comparación con otros sistemas constructivos como gaviones o muros de contención, permitiendo el flujo de agua y la revegetación.
- Contrarresta la contaminación y la enfermedad.
- Es posible que en el sector sea fácil obtener llantas, construirlas y manejarlas por la comunidad, y que el muro se mantenga fácilmente.

3.12 Uso de las llantas recicladas como sistema de contención.

En Francia, se llevó a cabo la investigación inicial sobre el uso de refuerzo en suelos con neumáticos anticuados en 1976. Teniendo en cuenta el refuerzo con neumáticos de paredes verticales en el suelo o en laderas, los análisis mostraron buenos resultados. [24]

La construcción de un muro experimental de gravedad en West Yorkshire fue el primer proyecto en Inglaterra que utilizó llantas recicladas [25]. Los ensayos de tracción se realizaron con llantas R12 y R15.

La primera prueba consistió en aplicar una tensión de manera constante de 50 mm/min a la llanta alargada hasta que se rompió, registrando la fuerza. Una resistencia a la tracción de 55,81 kN y una desviación de 15,19 kN se registraron. Después, se ejecutaron pruebas de tracción en tiras de neumáticos, pero la prueba en campo a gran escala fue la más representativa para evaluar un muro de tierra armada hecho de llantas recicladas.



Ilustración 12. Vista general de obra desarrollada con llantas de refuerzo. [25]

En Colombia, los muros de neumáticos como sistemas de contención para mantener la estabilidad de los taludes se han utilizado con éxito. En el barrio Fuente Clara, sector La Iguaná de Medellín, se ha edificado un muro con llantas en tierra armada. La comunidad participó activamente en la construcción de esta obra de mitigación y recibió el aporte de ingenieros que se desenvuelven en el sector privado que se presentaron con una amplia gama de materiales. [26]

Se necesitó un sistema de contención para proteger la zona afectada por las filtraciones de agua y las lluvias constantes. Para que la comunidad pudiera participar en la construcción, la Secretaría de Desarrollo Social, a través del equipo técnico de la Gerencia de La Iguaná, brindó orientación y capacitación a la comunidad sobre cómo elegir, cortar y amarrar las llantas. El paso peatonal de los barrios Blanquizal y Olaya Herrera, que es utilizado diariamente por más de 500 personas, fue el primer muro de este tipo construido.



Ilustración 13. Muro de tierra reforzado con neumáticos de desecho construido en Musicreando, sector las palmas del municipio de Medellín. [26]

3.12.1 Selección de las llantas de desecho

No se deben usar llantas reventadas o con la estructura interna de la llanta expuesta, como alambre o tejido de nylon; se deben usar llantas de desecho en buen estado.



Ilustración 14. Recolección y selección de neumáticos de desecho.

3.12.2 Corte de las llantas reutilizadas

Se debe retirar una de las caras de la llanta con objeto de fácil manejo como un cuchillo o cortadora automática, dejando un recipiente con disposición circular que se puede llenar

con el material que se haya elegido.



Ilustración 15. Corte de Neumático

Después de cortar las llantas, se deben llenar con un material seleccionado de alta calidad que se haya obtenido de una excavación o de un sitio de adquisición. El material debe clasificarse de acuerdo con la norma actual y asegurarse de que se compacte en laboratorio al 95% de la densidad máxima del ensayo modificado de Proctor. Los materiales que presentan baja calidad que se utilizarán para apoyar el muro, como escombros, lodo y material orgánico, deben retirarse porque no proporcionarán una base sólida para la estructura.

El muro de tierra reforzado con llantas de desecho no se puede rellenar con estos materiales de baja calidad; si se encuentran, se debe asegurarse de que su disposición final no afecte la estabilidad de la estructura.

3.13 Construcción del muro de tierra reforzada con neumáticos reutilizados

Es necesario realizar un estudio geotécnico para determinar las propiedades mecánicas de los materiales y las solicitaciones de carga a las que se enfrentará la estructura al construir muros de tierra reforzados con llantas de desecho.

Las manillas de polipropileno se unen a las llantas y se sujetan al paramento del muro con manillas de 3/8" de diámetro. No se han realizado pruebas de laboratorio confiables, por lo

que no se puede afirmar que estos conectores son suficientes para las solicitudes de cortante. El diseño se basa en la experiencia de la Compañía de Suelos Constructores y Consultores S.A.S. en la construcción de este sistema, por lo que no se han realizado pruebas de laboratorio confiables.

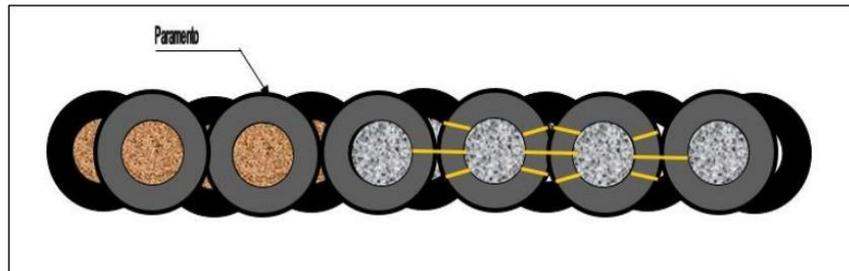


Ilustración 16. Esquema amarre entre llantas.

Después de que la primera fila esté completamente amarrada con una manila de polipropileno de 3/8" de diámetro, los tensores deben amarrarse. Los tensores deben agrupar un grupo de llantas del paramento antes de llegar a otra llanta en la parte trasera de la estructura. El diámetro de las manillas generalmente es de 1/2" o 5/8", dependiendo de la altura del muro y las cargas a las que se expondrá la estructura.



Ilustración 17. Amarre entre neumáticos y tensores.

La longitud de cada tensor depende del 70% de la altura del muro. No se han realizado ensayos de laboratorio para determinar si esta longitud de los tensores cumple con los

requerimientos de carga.

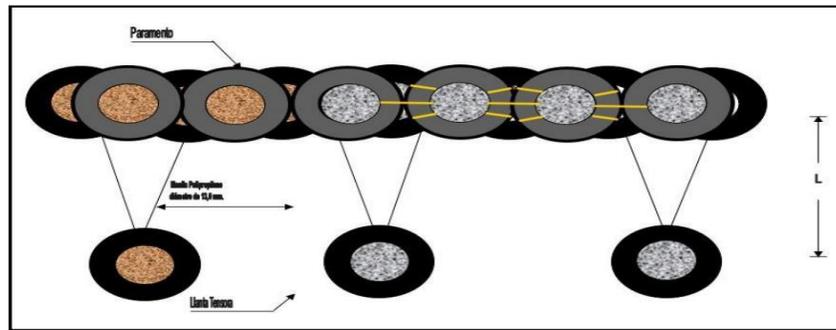


Ilustración 18. Esquema amarre de tensores.

Tabla 2. Disposición del montaje o armado del Muro.

Arreglo	Descripción	Arreglo	Descripción
	1 Neumático		4X3 Neumáticos
	2 Neumáticos		4x3x4 Neumáticos
	4 Neumáticos		4x3x4x3 Neumáticos
	2x3 Neumáticos		4x5x4x5 Neumáticos

Fuente: Alternativas para la estabilización de taludes en el cantón de León Cortés. [27]

Las gráficas anteriores muestran las cuatro disposiciones que deben tener los neumáticos en cada sección, con los niveles, el número de neumáticos y la organización de cada estructura.

Tabla 3. Valores de ángulo de fricción hallados para diferentes montajes.

Montaje	Angulo de fricción (°)
1 cara cortada	54,46
4x3 con cara cortada	24,22
4x3x4 neumático entero	74,47

Fuente: Alternativas para la estabilización de taludes en el cantón de León Cortés [27]

Se tiene que para cada montaje el ángulo de fricción varia, lo cual también se deberá tener en cuenta para determinar qué modelo y que montaje será el mejor a implementar.

Discusión

La combinación suelo-neumático genera un valor específico menor al del suelo local también en la combinación donde se tiene una estructura de una cara cortada, esto debido a que aún sin una cara los neumáticos se disponen de tal manera que permiten la creación de vacíos en el muro.

El vuelco, deslizamiento y capacidad portante presentaron factores de seguridad adecuados en todas las aplicaciones, adicional a esto se trabajó en el programa SLIDE el cual arrojó resultados muy positivos y permitió determinar que el modelo cumple con lo establecido en la norma NSR-10.

El modelo de neumáticos de dos caras no funcionó bien en comparación con los neumáticos de una sola cara. Esto se debe a la capacidad de los neumáticos de una sola cara para compactar el material agregado sin producir vacíos. [28]

A) La perspectiva desde donde se desarrollará el estudio desde un modelo ejecutado mediante software, y con esto llegar a contemplar la posibilidad de reproducirlo de manera experimental en físico.

B) Las variables más significativas con las que se va a interactuar en el desarrollo de esta tesis serán:

Datos del talud

H: Altura

Y: Peso específico

φ : Angulo de fricción

β : inclinación del terreno.

Datos del Muro

H: Altura

Y: Peso específico

δ : Angulo de fricción entre suelo y muro

α : Angulo del paramento del muro con la horizontal

Con las variables anteriormente mencionadas se esperan encontrar los empujes activos, el estado ultimo de deslizamiento, el estado ultimo de volteo, entender como interactúa el modelo con el terreno propuesto y con esto llegar a los factores de seguridad que puede brindar el muro sobre el terreno.

C) Después de tener estos resultados, se implementará la teoría y los conceptos brindados por parte de los docentes de la maestría y se espera dar un correcto análisis de dichos resultados.

Para llevar a cabo un análisis de muros de retención, es fundamental comprender las teorías del empuje de tierras, las cuales son cruciales para su diseño. Entre ellas se encuentran las siguientes: Las teorías más frecuentes para suelos de comportamiento cohesivo y friccionante, así como combinadas, son las de Rankine, Coulomb, Cullman y Terzaghi.

3.14 Ubicación del proyecto

Como se ha mencionado anteriormente se han tomado 3 tipos de material, del cual se han tomado 3 muestras de cada material por prueba ejecutada, queriendo involucrar los dos tipos de suelo más “problemáticos” de la república mexicana, en la figura 19 se muestran los diferentes tipos de litologías o formaciones geológicas describiendo a gran escala la disposición de los mismos en la República Mexicana.



Ilustración 19. Carta geológica de la república mexicana. [29]

3.15 Aspecto Legal

Desde el 2002, en naciones como Brasil, se ha aplicado la resolución 258/99 de Conama, la cual fue modificada en el año 2005 para establecer que al menos una de cada cuatro llantas, ya sean fabricadas o importadas, debe ser utilizada después de desecharse.

En Perú, se emitió el decreto supremo N° 003-97-SA para detener la importación de llantas usadas por motivos de salud, seguridad vial y protección del medio ambiente. Este artículo fue aclarado en el año 2001. La legislación en México ha fomentado la investigación, el reuso y el reciclaje de vehículos usados, lo que ha permitido avanzar en el estudio y la relación entre las llantas y el suelo en ingeniería. [30]

En Colombia, La resolución N° 1326 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible fue emitida en julio de 2017 con el fin de mejorar la gestión ambiental y la recolección selectiva de llantas. El artículo 13.1 de la resolución mencionada establece "las metas de recolección selectiva y gestión ambiental para llantas usadas de rin 13" a 22.5, y la Tabla 3 establece como objetivo que en el año 2023 "la meta de recolección selectiva y gestión ambiental mínima sea del 80% para llantas de automóviles, camionetas, buses, busetas y tractomulas".

La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) supervisa las regulaciones del país. Su objetivo es reducir la incineración, la acumulación de desechos y la contaminación visual mediante el uso de procesos amigables con el medio ambiente y la mejora de las políticas de recolección y disposición final. Según el artículo 12 de la resolución N° 1326 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se debe fomentar la reutilización, reciclaje y valorización de las llantas usadas, así como su uso en mobiliario urbano, construcción de taludes, jarillones y tuberías, canchas sintéticas, construcción de vías urbanas con asfalto modificado con GCR, y la valorización de los componentes energéticos. [31]

3.16 Propiedades mecánicas del suelo

3.16.1 Resistencia al corte de los suelos

Terzaghi, K. y Peck afirman que los esfuerzos cortantes son la causa de la mayor cantidad de los problemas presentes en ingeniería. El suelo y otros materiales también están expuestos a esfuerzos de tensión, lo que a veces puede causar grietas que requieren reparación. El

diagrama de esfuerzos del círculo de Mohr permite calcular los esfuerzos principales correspondientes al estado de falla del espécimen, así como la inclinación del plano en el que ocurre la falla. Después de esto, se puede encontrar la línea interna de rotura o envolvente de falla, que generalmente es curva y se simplifica a una línea recta como se evidencia en la ecuación de Coulomb, donde la tensión al corte (τ) se r. [32]

$$s = c + \sigma * tg(\varphi)$$

Los parámetros de resistencia al corte del ángulo de fricción (φ) y la cohesión (c) se pueden medir por medio de dos pruebas estándar comunes: el ensayo de corte directo y el ensayo triaxial. El método más popular para medir estos parámetros en ingeniería local es el ensayo de corte directo. Él afirma que primero se aplica una fuerza normal a la muestra y luego se aplica un esfuerzo de corte hasta que se produce una falla en el suelo. Esto se logra utilizando la envolvente de falla para estimar los parámetros utilizando la relación con el área de la sección transversal de la caja de corte. [33]

3.16.2 Ángulo de fricción

La capacidad relativa, la distribución de los granos y la disposición del grano son los principales determinantes del valor de φ_d en gravas, arenas, arenas limosas y limos inorgánicos sin cohesión. En un suelo isotrópico, cuando el aire ocupa los vacíos, φ_d no cambia significativamente. Sin embargo, los esfuerzos efectivos pueden cambiar en presencia de agua, lo que puede afectar la resistencia al esfuerzo cortante y las relaciones de esfuerzo deformación. La parte líquida, que tiene $tg(\varphi) = 0$, está soportada por la presión de poros ($u = \sigma' - \sigma$) en este caso. [34]

Tabla 4. Valores representativos para el ángulo de fricción.

Tipo de suelo	ϕ° (grados)
Arena: granos redondeados	
Suelta	27 - 30
Media	30 - 35
Densa	35 - 38
Arena: granos angulares	
Suelta	30 - 35
Media	35 - 40
Densa	40 - 45
Grava con algo de arena	34 - 48
Arcillas consolidadas	20 - 30
Limos	26 - 35

Tabla 5. Valores representativos de ϕ_d para Arenas y limos".

Tipo de suelo	ϕ° (grados)	
	Suelto	Denso
Arena, de grano redondo uniforme	27.5	34
Arena, de granos angulosos, bien graduada	33	45
Grava arenosa	35	50
Arena Limosa	27 - 33	30 - 35
Limo inorgánico	27 - 30	30 - 34

Cohesión

Terzaghi, K. y Peck sostienen que la cohesión en algunos tipos de suelos no cohesivos explica los aspectos engañosos de la aparente estabilidad de los taludes en los que ya se han producido deslizamientos. La abreviatura (c), que es igual a la resistencia al corte por unidad de área, si $\sigma = 0$. [34]

3.16.3 Muros en neumáticos

Sims & Gaffney afirman que existen muchas formas diferentes de calcular los muros de llantas. La estabilidad general se debe verificar para asegurarse de que cumpla con el factor de seguridad al volcamiento, deslizamiento y círculos de falla en el talud; La estabilidad interna se calcula utilizando la presión efectiva del fluido que actúa sobre el relleno del muro; también se debe verificar la estabilidad de la cara del muro asegurando que las presiones se transmitan. [35].

La Tabla 6 muestra las ecuaciones para el cálculo de muros de contención según las metodologías de Sims & Gaffney [35] y "The Pneusol" de Long et al. [36]. Se utilizarán parámetros de resistencia al corte para arcilla, tepetate y combinación para calcular muros con llantas tipo.

Tabla 6. Ecuaciones para el cálculo de muros de contención con neumáticos.

ECUACIONES DE CÁLCULO DE MUROS DE CONTENCIÓN EN LLANTAS	
$Ka = 1 - \frac{\text{sen } \phi}{1 + \text{sen } \phi}$	Presión activa de tierras
$Kp = 1 + \frac{\text{sen } \phi}{1 - \text{sen } \phi}$	Presión pasiva de tierras
FACTOR DE SEGURIDAD AL VOLCAMIENTO	
$M = \frac{1}{2} * Ka * g * \gamma * h^3 / 3$	Momento de volcamiento/m del muro
$\gamma * g * h - (M * 6 / l^2)$	Presión en el talón del muro
FACTOR DE SEGURIDAD AL DESLIZAMIENTO	
$\frac{1}{2} * Ka * \gamma * g * h^2$	Fuerza horizontal del relleno/m del muro
$\gamma * g * h * \text{tan } \phi * l$	Resistencia a la fricción
$FS = \frac{\text{Resistencia a la fricción}}{\text{Fuerza horizontal del relleno}}$	Factor de seguridad de deslizamiento
CHEQUEO DE LA ESTABILIDAD LOCAL DE LA CARA FRONTAL DEL MURO CON NEUMÁTICOS	

$$PV = \gamma * g * h$$

PV= Presión vertical en la cara del muro

Presión vertical en la cara del muro con llantas

$$PH = Ka * \gamma * g * h$$

PH= Presión horizontal en la parte posterior del muro

Presión horizontal en la parte posterior del muro con neumáticos

$$BM = WL / 12 = Ka * \gamma * g * h / 12 * x^2$$

Consideración del sistema como viga.

$$\therefore x^2 = 2w^2 / ka$$

x= Distancia de presión vertical del muro con neumáticos

Distancia de presión vertical del muro con neumáticos

w= Ancho efectivo de las llantas

Fuente: Muros mecánicamente estabilizados según la metodología de Sims & Gaffney. [35]

3.16.4 Dimensiones de llantas

Previamente a la construcción de muros con ruedas, se debe tener en cuenta la variabilidad en los tamaños de acuerdo con los rines de los diferentes medios de transporte. Las dimensiones de las camionetas y vehículos se muestran en la Figura 20.

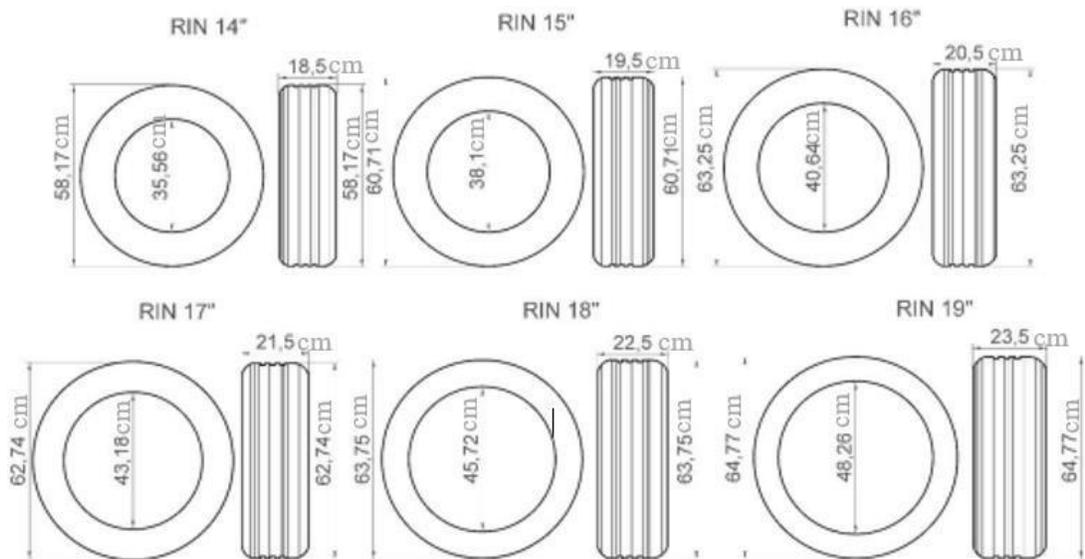


Ilustración 20. Dimensiones comerciales de los neumáticos. [37]



Ilustración 21. Diferencia de anchos y diámetros correspondientes del rin 14" al rin 16". [37]

3.16.5 Muros tipo de esta investigación

Los muros de contención con neumáticos funcionan de la misma manera que los muros de gravedad, dependiendo de su propio peso y las características del suelo que los rodea. Las características que se tienen presentes son el peso unitario, la cohesión y el ángulo de fricción. Los muros con neumáticos se presentan de esta manera siguiendo los criterios de resistencia al corte de la arcilla, el tepetate y la combinación de ambos, materiales provenientes de la ciudad de Querétaro, con alturas de 0,6, 1,2, 1,8, 2,4 y 3 metros. Los cálculos se realizaron en muros de gravedad sin enlaces neumáticos, utilizando los diferentes factores de rozamiento entre materiales.

3.17 Propiedades de los tipos de suelo

Después de las pruebas a los tres tipos de materiales, se tomaron los siguientes parámetros para el diseño de los muros: el peso unitario húmedo promedio de tres repeticiones por prueba; de igual manera, se tomaron los ángulos de fricción y las cohesiones de las pruebas triaxiales con cargas de 50, 100 y 150 kpa, tomando 3 muestras de cada material por carga. Se realizaron 18 repeticiones en total para cada material.

Tabla 7. Parámetros de diseño de la arcilla compactada al 95%.

MATERIAL DE RELLENO: ARCILLA		
Peso unitario húmedo (γ)	1,17	Ton/M ³
Ángulo de fricción (ϕ)	25,8	°
Cohesión (c)	0,55	KN/m ²
Longitud muro llantas (l)	0,56 – 1,12 – 1,68 – 2,24 – 2,8	m
Gravedad (g)	9,81	m/s ²
Altura del muro (h)	0,6 – 1,2 – 1,8 – 2,4 – 3	m

Tabla 8. Parámetros de diseño del tepetate compactado al 95%.

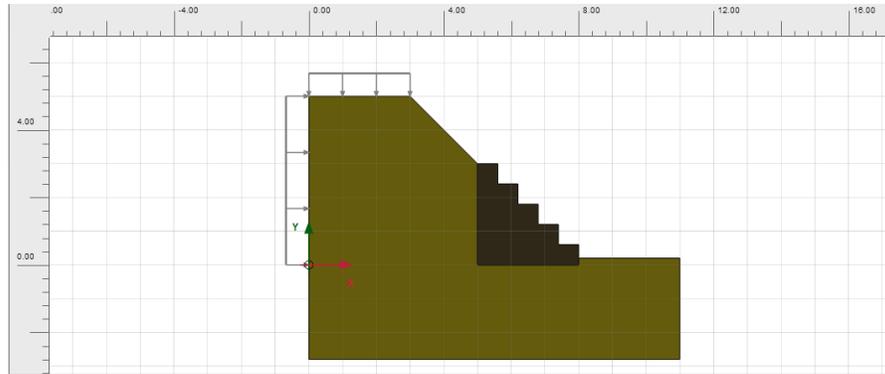
MATERIAL DE RELLENO: ARCILLA		
Peso unitario húmedo (γ)	1,16	Ton/M ³
Ángulo de fricción (ϕ)	29,5	°
Cohesión (c)	1,2	KN/m ²
Longitud muro llantas (l)	0,54 – 1,08 – 1,62 – 2,16 – 2,7	m
Gravedad (g)	9,81	m/s ²
Altura del muro (h)	0,54 – 1,08 – 1,62 – 2,16 – 2,7	m

Tabla 9. Parámetros de diseño del Suelo combinado compactado al 95%.

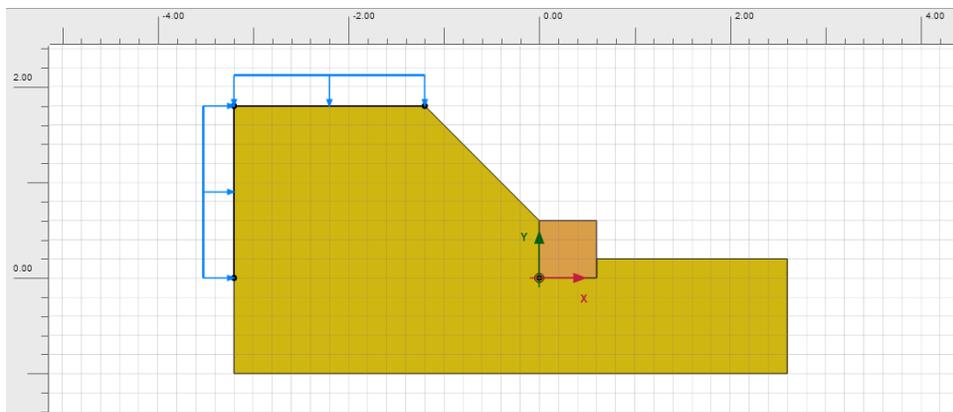
MATERIAL DE RELLENO: ARCILLA		
Peso unitario húmedo (γ)	1,22	Ton/M ³
Ángulo de fricción (ϕ)	27,7	°
Cohesión (c)	0,8	KN/m ²
Longitud muro llantas (l)	0,58 – 1,16 – 1,74 – 2,32 – 2,9	m
Gravedad (g)	9,81	m/s ²
Altura del muro (h)	0,6 – 1,2 – 1,8 – 2,4 – 3	m

3.18 Representación gráfica de los muros en tamaño real

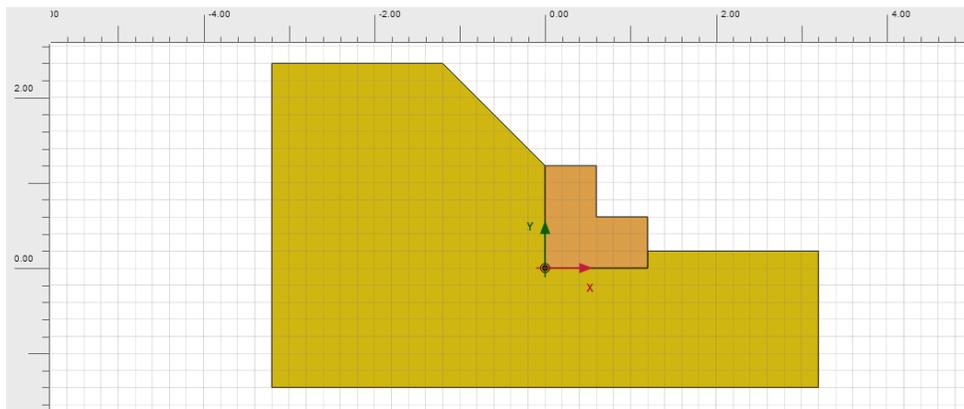
En la figura 22, se pueden observar los diseños de los diferentes tipos de muros con neumáticos dispuestos en 5 alturas diferentes, representando los tipos de diseños que cumplen con el factor de seguridad y descartando los que no cumplen este parámetro.



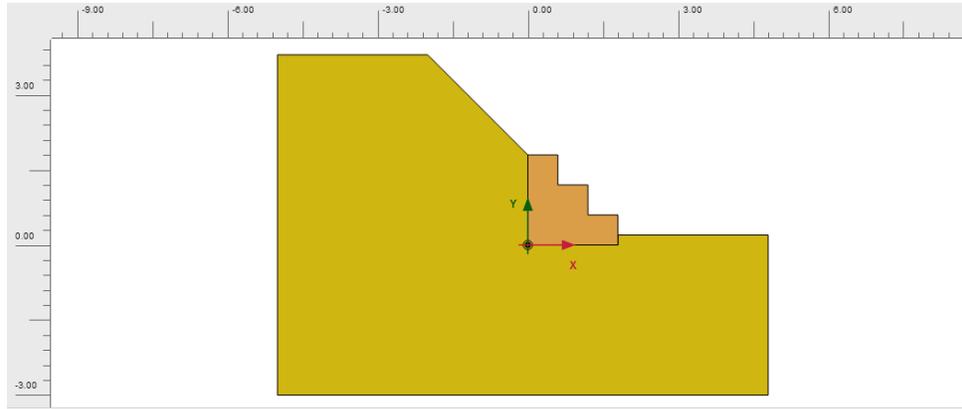
Muro con relleno de arcilla de 3 m.



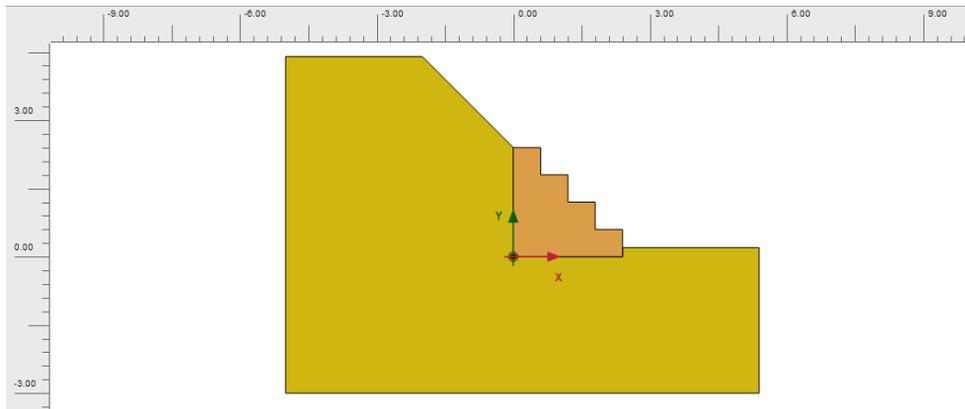
Muro con relleno de tepetate de 0,54 m.



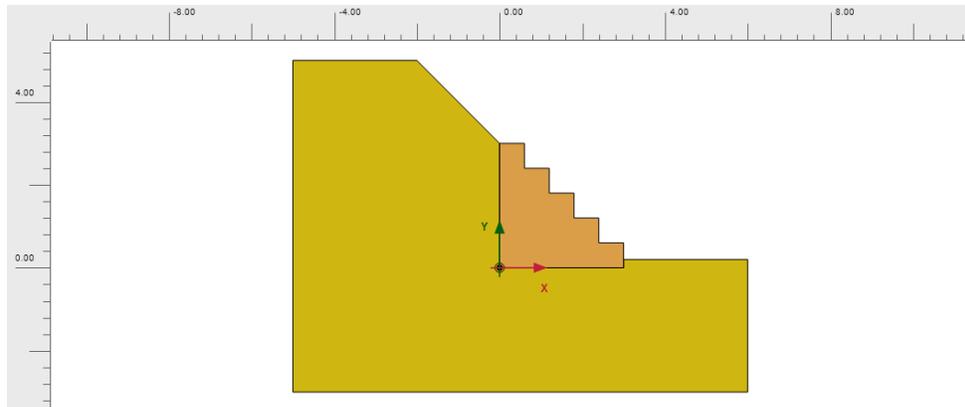
Muro con relleno de tepetate de 1,08 m.



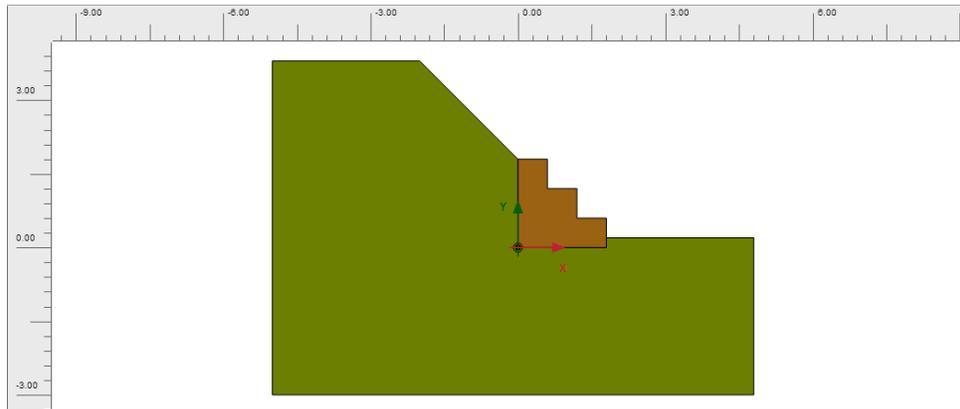
Muro con relleno de tepetate 1.62 m.



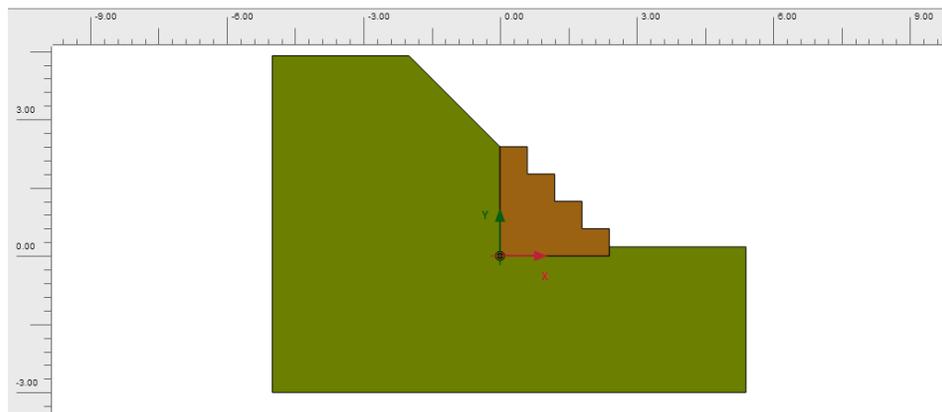
Muro con relleno de tepetate de 2,16 m.



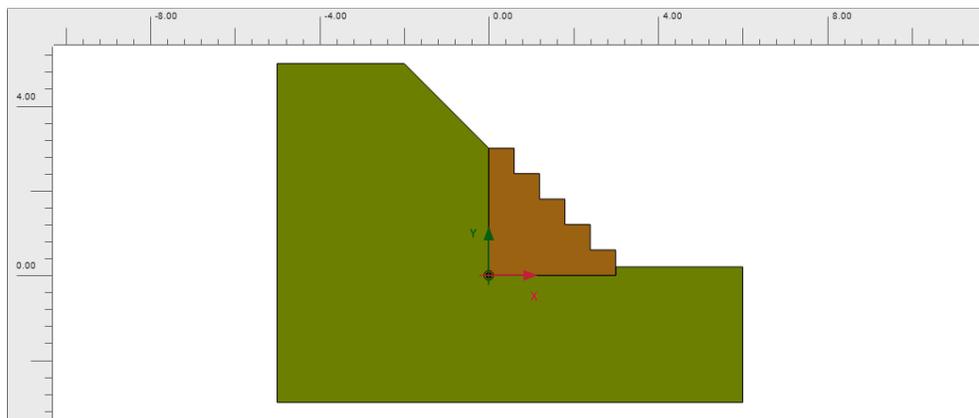
Muro con relleno de tepetate de 2,7 m.



Muro con relleno de material combinado de 1,8 m.



Muro con relleno de material combinado de 2,4 m.



Muro con relleno de material combinado de 3 m.

Ilustración 22. Diseños de los diferentes tipos de muro con los rellenos que cumplieron el factor de seguridad por deslizamiento y volteo.

CAPÍTULO 4

OBJETIVOS

General

Encontrar la combinación más adecuada entre el acomodamiento normal de los neumáticos y los tres tipos de suelo, para generar mayor sostenimiento al talud, así mismo incrementar su factor de seguridad y definir si la mejor opción es usar el neumático completo o con una cara cortada.

Específicos

- Determinar las diferentes técnicas de construcción y diseño de muros de tierra reforzada con neumáticos reutilizados, y así poder generar una estandarización.
- Encontrar cuales serían las mejores adaptaciones de este tipo de muros en el campo ingenieril.
- Establecer una metodología de análisis y diseño de estructuras de retención construidas con neumáticos reutilizados.
- Proporcionar las consideraciones óptimas para continuar con futuras investigaciones, evitando cometer los posibles errores encontrados en la actual investigación.

CAPÍTULO 5

HIPÓTESIS

Esta técnica de construcción y diseño de muros de tierra reforzada con neumáticos reutilizados, cumple con el factor de seguridad, capacidad resistente ante deslizamiento y volteo, enfocado a los colapsos en taludes.

CAPÍTULO 6

METODOLOGÍA

- Se realizó la búsqueda enfocada y centrada en bases de datos que brindaron la información más acertada sobre el tema en tratamiento.
- Se filtró la información encontrada y se dejaron las fuentes que proporcionaron la información más concreta y valiosa para la investigación.
- Se contactó a la mayor cantidad de entidades que podían proporcionar los neumáticos utilizados, buscando que estos se encuentren en las condiciones óptimas para llevar las pruebas a cabo.
- Se buscó dar el mejor manejo a los materiales en las instalaciones predispuestas por la UAQ, sin intervenir en espacios no permitidos.
- Se llevaron los neumáticos a laboratorio, lugar donde se ejecutaron las pruebas de caracterización de materiales de relleno, pruebas de resistencia mediante corte directo, pertinentes para encontrar las variables de esfuerzos internos esperadas en este estudio en particular. (mencionar normas de las pruebas)
- Se conocieron las propiedades físicas y mecánicas de los neumáticos. Pruebas que se pueden evidenciar en la figura 23, figura 24 y figura 25. Para la caracterización de los tipos de suelo se aplicaron las siguientes pruebas:
 - Norma ASTM D420 – Guía para la investigación y muestreo de suelos y rocas.
 - Norma ASTM D422 – Método de análisis granulométrico de suelos.
 - Norma ASTM D698 – Método estándar de ensayo para la determinación de las características de compactación del suelo en laboratorio.
 - Norma ASTM D854 – Método de ensayo para la determinación de la gravedad específica de los sólidos del suelo.
 - Norma ASTM D1140 – Método de ensayo para la determinación de la fracción fina del suelo (menor de 75 μ).
 - Norma ASTM D2216 – Método de ensayo para la determinación de contenido de agua (humedad) de suelos y rocas.
 - Norma ASTM D2434 – Método de ensayo para la determinación de la permeabilidad de suelos (cabeza constante).

- Norma ASTM D2435 – Método de ensayo para la determinación de las propiedades de consolidación unidimensional de los suelos.
- Norma ASTM D4318 – Método de ensayo para la determinación de los límites líquido y plástico; y del índice de plasticidad de los suelos.
- Norma ASTM D4767 – Método de ensayo de compresión triaxial de suelos cohesivos con consolidación previa y sin drenaje (CU).
- Norma ASTM D4829 – Método de ensayo para la determinación del índice de expansión de los suelos. [38]



Ilustración 23. Prueba de carga axial o vertical sobre neumáticos rellenos.

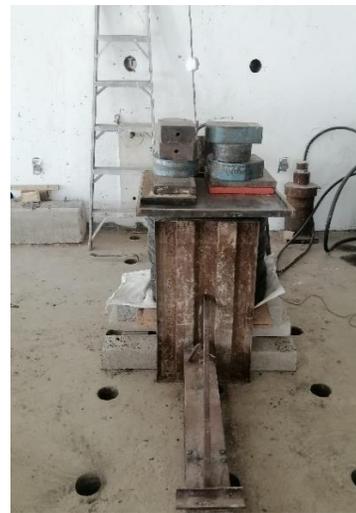


Ilustración 24. Prueba de carga lateral o tangencial en neumáticos rellenos.



Ilustración 25. Prueba de corte, usando tres neumáticos.

Proceso Constructivo: Se considera esta alternativa como la solución adecuada para el problema de estabilidad que se presenta debido a la pendiente y el nivel de erosión después de evaluar que el diseño de muro de contención con llantas tiene estabilidad interna y externa y soporta las presiones laterales del terreno:

- Para cumplir con las dimensiones del diseño y la conformación del terreno, se realiza una excavación y nivelación del terreno.

La Figura 30 muestra los pasos utilizados en las llantas:

- Para facilitar la compactación del suelo con pisón, La línea punteada muestra cómo se extrae la parte superior de la llanta al cortar las llantas. Los neumáticos están llenos en tres capas y los tipos de enlaces se eligen según las especificaciones del diseñador.
- Se pueden usar varios tipos de elemento de refuerzo al mismo tiempo. (En esta investigación no se utilizaron materiales de refuerzo)
- El muro puede tener la forma de un escalón.

La Figura 26 también muestra la distribución de los neumáticos en corte. Se recomienda que las llantas se llenen manualmente mientras se compacta el suelo con un pisón.

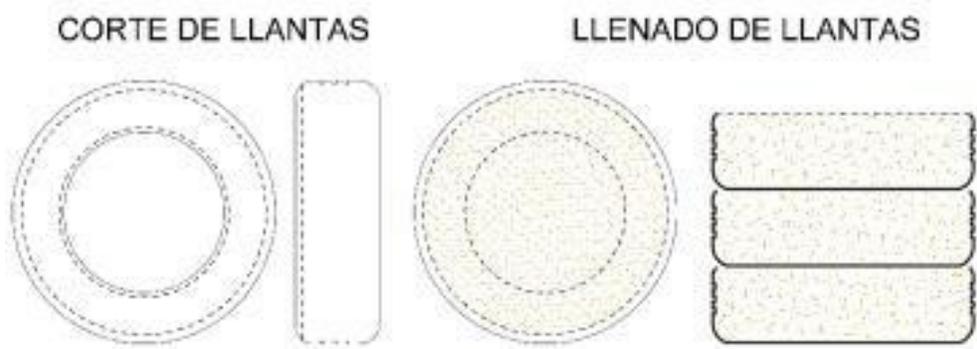






Ilustración 26. Proceso de corte y relleno de los neumáticos.

- Después de tener estos resultados se usó el software PLAXIS para simular los posibles escenarios dependiendo las alturas que se tenían en los muros.
- Se generaron resultados de los diferentes cálculos y simulaciones, los cuales se filtrarán de modo que los más relevantes fueron objeto de análisis.
- Se analizaron los resultados y se generaron las conclusiones más relevantes para el estudio.
- Se discutió la hipótesis planteada y así poder llegar a confirmarla y refutarla, generando así las bases para poder continuar con investigaciones futuras.

CAPÍTULO 7

SIGNIFICANCIA

Se espera conocer si será viable o no la implementación de este tipo de estructura de contención, teniendo un impacto muy positivo en los campos de la ingeniería, en el campo económico y social, toda vez que se espera que en dado caso de que se pueda implementar, permita darle una segunda vida a los neumáticos que sólo se consideran como residuos sólidos en la república mexicana, también es posible que el resultado también sea negativo, esto debido a que se llegase a presentar alguna situación que no se contemplara con anticipación, sin embargo seguiría siendo de gran aporte para posteriores investigaciones, toda vez que se dejará estipulado donde estuvo el posible fallo de la investigación, el cual podrá ser corregido y reestructurado en investigaciones a futuro.

CAPÍTULO 8

IMPACTO

8.1 IMPACTO SOCIAL

Se espera que con esta propuesta los beneficios hacia la comunidad incrementen, de tal manera que por un lado puede aportar a las zonas de inestabilidad de taludes y laderas en comunidades donde quizá el apoyo del gobierno no llegue de manera directa o que pueda que llegue pero sea en un tiempo lento, ya que al ser una propuesta que puede involucrar a la comunidad como parte del proceso de construcción, esto podría generar una mayor vinculación y sentido de pertenencia por parte de la sociedad, generando así soluciones un poco más viables para la misma comunidad.

8.2 IMPACTO AMBIENTAL

Por una parte, se está aportando a la reutilización de los neumáticos, y generando esta segunda vida se está impactando de manera positiva en todo lo que conlleva el manejo de residuos y el factor contaminante que puede tener ese sobre diferentes puntos de la República Mexicana a nivel local y ya en conjunto un impacto negativo en lo que tiene que ver con la contaminación del planeta Tierra.

Seguido a esto, en comparación a los muros en concreto o de roca, esta propuesta de muros tiene un aspecto positivo y es que puede presentar una revegetalización natural, toda vez que los neumáticos con el material pueden funcionar como cuerpos dentro de los que puede crecer cierto tipo de cobertura vegetal, que al estar expuesto al agua y la luz del sol cumple con proceso de crecimiento de flora en su interior, cabe mencionar que estas raíces pueden también incrementar el nivel de resistencia interna del muro.

8.3 IMPACTO ECONÓMICO

El factor económico cumple un papel importante en este tipo de propuesta ya que, al ser un muro con neumáticos reutilizados y material propio de los taludes, su costo de elaboración o construcción es considerablemente más económico, en comparación a lo que puede ser la implementación de un muro de concreto o un muro en gavión.

Toda vez que en los muros con neumáticos los costos tienen que ver más que todo con el transporte y la mano de obra, la cual también podría presentarse de manera económica en el momento en el que la comunidad afectada también quiera hacer parte de la elaboración.

De esta manera se presenta como una propuesta con una gran disminución en cuanto a costos de materiales, transporte y mano de obra.

CAPÍTULO 9

RESULTADOS OBTENIDOS

Se busca llegar a encontrar la mejor disposición u organización de los neumáticos en la estructura del muro, para generar un mayor factor de resistencia al muro, esto en primera medida se busca lograrlo en lo que corresponde a la parte del modelamiento mediante software y ya dependiendo de los resultados que se arrojan en este proceso, se determinará si es posible y viable llevarlo a un modelo experimental en laboratorio, donde ya se vea la interacción de los neumáticos con las diferentes combinaciones de suelo que se propongan, y así llegar a representarlo de manera física, es posible que no se pueda llegar a la fase experimental debido al tiempo y disposición de los material, sin embargo teniendo el modelamiento en software ya se puede plantear un diseño del modelo final y de esta manera generar las bases para posteriores investigaciones que se quieran ejecutar a futuro.

Tabla 10. Caracterización de los materiales.

Arcilla

Tipo de Suelo	CH – Arcilla de alta compresibilidad	Unidades
Peso relativo (Ss)	2,58	N/m ³
Peso Volumétrico Seco (Yd)	1,62	Kg/m ³
Contenido de Humedad (ω)	20,72	%
Grado de saturación (S)	59,73	%
Relación de vacíos (e)	0,92	
Porosidad (η)	48	%

Tepetate

Tipo de Suelo	ML-OL, Limo arenoso de baja plasticidad	Unidades
Peso relativo (Ss)	2,38	N/m ³
Peso Volumétrico Seco (Yd)	1,42	Kg/m ³
Contenido de Humedad (ω)	13,69	%
Grado de saturación (S)	39,46	%
Relación de vacíos (e)	0,76	
Porosidad (η)	40,26 %	%

Material Combinado

Tipo de Suelo	Combinación arcilla y tepetate al 50%	Unidades
Peso relativo (Ss)	2,55	N/m ³
Peso Volumétrico Seco (Yd)	1,52	Kg/m ³
Contenido de Humedad (ω)	17,20	%
Grado de saturación (S)	49,59	%
Relación de vacíos (e)	0,84	
Porosidad (η)	44,13 %	%

9.1 Resultados obtenidos después de realizar compactación al 95 %

Tabla 11. Propiedades arcilla como material de relleno.

Arcilla Compactada

Tipo de Suelo	CH – Arcilla de alta compresibilidad	Unidades
Peso Volumétrico Seco (Yd)	1,17	Kg/m ³
Contenido de Humedad Óptima (ω)	37,2	%
Relación de vacíos (e)	0,45	
Grado de consolidación (U)	80	%
Angulo de fricción	25,8	°
Cohesión	0,55	N/m ²

Tabla 12. Propiedades tepetate como material de relleno.

Tepetate compactado

Tipo de Suelo	ML-OL, Limo arenoso de baja plasticidad	Unidades
Peso Volumétrico Seco (Yd)	1,16	Kg/m ³
Contenido de Humedad Óptima (ω)	27,10	%
Relación de vacíos (e)	0,33	
Grado de consolidación (U)	60	%
Angulo de fricción	29,5	°
Cohesión	1,2	N/m ²

Tabla 13. Propiedades suelo combinado como material de relleno 60.

Material Combinado Compactado

Tipo de Suelo	Combinación de arcilla y tepetate al 50%	Unidades
Peso Volumétrico Seco (Yd)	1,22	Kg/m ³
Contenido de Humedad Óptima (ω)	26,3	%
Relación de vacíos (e)	0,38	
Grado de consolidación (U)	72	%
Angulo de fricción	27,7	°
Cohesión	0,8	N/m ²

9.2 Factores de seguridad por volcamiento y deslizamiento de cada material

Tabla 14. Alturas de los diferentes tipos de muro.

Alatura del muro	Arcilla (m)	Tepetate (m)	Combinado (m)
Altura del Muro (h) - 1	0.6	0.54	0.6
Altura del Muro (h) - 2	1.2	1.08	1.2
Altura del Muro (h) - 3	1.8	1.62	1.8
Altura del Muro (h) - 4	2.4	2.16	2.4
Altura del Muro (h) - 5	3	2.7	3

Tabla 15. Longitudes de los diferentes tipos de muros.

Longitud del muro	Arcilla (m)	Tepetate (m)	Combinado (m)
Longitud Muro de Neumáticos (l) - 1	0.56	0.54	0.58
Longitud Muro de Neumáticos (l) - 2	1.12	1.08	1.16
Longitud Muro de Neumáticos (l) - 3	1.68	1.62	1.74
Longitud Muro de Neumáticos (l) - 4	2.24	2.16	2.32
Longitud Muro de Neumáticos (l) - 5	2.8	2.7	2.9

9.3 Factores de Seguridad por volcamiento

Tabla 16. Factores de seguridad por volcamiento para los tres tipos de material.

FS - VOLCAMIENTO	
ARCILLA - H1	2.838973959
ARCILLA - H2	5.677947918
ARCILLA - H3	8.516921878
ARCILLA - H4	11.35589584
ARCILLA - H5	14.1948698
TEPETATE - H1	3.373596216
TEPETATE - H2	6.747192432
TEPETATE - H3	10.12078865
TEPETATE - H4	13.49438486
TEPETATE - H5	16.86798108
COMBINADO - H1	3.59764092
COMBINADO - H2	7.19528184
COMBINADO - H3	10.79292276
COMBINADO - H4	14.39056368
COMBINADO - H5	17.9882046

9.4 Factores de Seguridad por deslizamiento

Tabla 17. Factores de seguridad por deslizamiento para los tres tipos de material.

	FS - DESLIZAMIENTO	
ARCILLA - H1	0.440426562	NO CUMPLE
ARCILLA - H2	0.471742371	NO CUMPLE
ARCILLA - H3	0.537779647	NO CUMPLE
ARCILLA - H4	0.678410874	NO CUMPLE
ARCILLA - H5	1.06739223	NO CUMPLE
TEPETATE - H1	2.34395716	CUMPLE
TEPETATE - H2	2.551847688	CUMPLE
TEPETATE - H3	3.017874152	CUMPLE
TEPETATE - H4	4.157685841	CUMPLE
TEPETATE - H5	8.993149132	CUMPLE
COMBINADO - H1	1.923797124	CUMPLE
COMBINADO - H2	2.097786806	CUMPLE
COMBINADO - H3	2.490226157	CUMPLE
COMBINADO - H4	3.464445273	CUMPLE
COMBINADO - H5	7.840670091	CUMPLE

9.5 Chequeo de la estabilidad local de la cara frontal del muro con neumáticos

Tabla 18. Estabilidad local de la cara frontal de los diferentes tipos de muros.

	BM
ARCILLA - H1	40.3512891
ARCILLA - H2	80.7025781
ARCILLA - H3	121.053867
ARCILLA - H4	161.405156
ARCILLA - H5	201.756445
TEPETATE - H1	40.8757251
TEPETATE - H2	81.7514501
TEPETATE - H3	122.627175
TEPETATE - H4	163.5029
TEPETATE - H5	204.378625
COMBINADO - H1	43.1718637
COMBINADO - H2	86.3437275
COMBINADO - H3	129.515591
COMBINADO - H4	172.687455
COMBINADO - H5	<u>215.859319</u>

NOTA: Se considera el momento como si se trabajara en una viga.

CAPITULO 10

MODELO EN PLAXIS

10.1 Uso del PLAXIS

Se decide implementar el software PLAXIS 2D toda vez que este permite un buen manejo e interpretación de las variables obtenidas en las pruebas de laboratorio, para esto se realizó el siguiente procedimiento.

Después de tener los resultados de laboratorio se empiezan a crear los diferentes tipos de suelo, designando así 6 tipos de suelo:

- Arcilla
- Tepetate
- Combinado
- Talud de arcilla
- Talud de Tepetate
- Talud de Combinado

10.2 ¿Cómo se planteó?

Ya con los materiales designados se empieza a dar valores a los diferentes parámetros que permite el modelo seleccionado, en este caso se usó el de Mohr – Coulomb, ya que es el que permite trabajar con ángulos de fricción y valores de cohesión, también da ingreso a valores de módulos de elasticidad, factores de rigidez y rozamiento, y asigna valores complementarios producto de los que ya se ingresaron anteriormente para así tener un material configurado casi por completo, esto porque todavía falta elegir la permeabilidad y los tamaños de grano que se utilizarán en cada material, variables obtenidas en interacción con el neumático, y así poder interpretarlo como un cuerpo unificado.

Teniendo los materiales cargados, se continúa con la geometría (proceso que se debe repetir cada vez que se quiere alterar la geometría del talud, para esto se tienen las medidas a evaluar y se utiliza el comando de polígonos, uno para describir la geometría del talud y otro para la geometría del muro.

Con la geometría configurada se procede a la asignación de materiales para cada polígono, en este caso la relación se hace así; Arcilla con Talud Arcilla, Tepetate con Talud Tepetate y Combinado con Talud Combinado, para este caso de estudio se evaluaron los muros de mayor dimensión, toda vez que eran los más críticos en cuanto a al factor de seguridad por deslizamiento y volteo.

Se procede al enmallado de los polígonos para llegar al número de elementos finitos y nodos, en este caso en particular se eligió una malla fina, que da como resultado de 4000 a 4500 nodos, esta se implementa toda vez que una malla media podría presentar menor detalle de procesamiento y una malla muy fina podría extender los tiempos de procesamiento y los resultados no presentan un desarrollo relevante en cuanto a la malla fina.

Por último, se asigna o no el nivel freático al talud, y así poder evaluarlo en condición seca y saturada, en este caso los resultados que se mostraron fue de la fase saturada, toda vez que en condición seca el talud mantiene su forma y no presenta desplazamientos o deformaciones considerables, entonces no se justifica implementar un muro, toda vez que

presenta sostenimiento natural, también cabe resaltar que la evaluación de las fases de construcción se hace con la carga por gravedad esto porque al ser un muro de gravedad se debe evaluar por su propio peso y así interpretar los resultados del muro contemplando el peso que se tiene según las dimensiones del muro y para la última fase se selecciona la opción de factor de seguridad para evaluarlo bajo los parámetros de seguridad.

10.3 Elemento finito y propiedades

El software tiene cinco modos que funcionan juntos y cada uno contiene diferentes herramientas de modelado. Estos modos se denominan "modos de geometría" y "modos de cálculo". Estos incluyen:

- Diferente estilo de geometría:
- La litología del suelo es clara.
- Se definen los componentes estructurales del modelo.
- "Mesh", también conocido como malla: las características del mallado se definen y la disposición geométrica del modelo se reduce y se transforma en un modelo constituido por elementos finitos

Modos de cálculo:

- "Condiciones de flujo": hay niveles de agua específicos.
- "Etapas constructivas": se establece la configuración de cálculo y se calcula el proyecto.

PLAXIS 2D input puede analizar problemas geotécnicos como deformación estática elastoplástica, modelos de sólidos avanzados, análisis de estabilidad, análisis de seguridad, consolidación y cálculos de flujo.

Este modelo elastoplástico perfecto (isotrópico) desarrollado a partir de la ley de Hooke se conoce como comportamiento no lineal del suelo. Esta forma generaliza la falla de Mohr-Coulomb. Este modelo tiene la capacidad de modelar el comportamiento de varios tipos de suelos, incluidos suelos granulares sueltos, suelos finos normalmente consolidados y suelos finos normalmente consolidados. Es fácil de implementar debido a la poca cantidad de parámetros requeridos y proporciona predicciones conservadoras de la resistencia cortante del suelo. Es recomendado para aplicaciones bidimensionales, ya que en aplicaciones tridimensionales no se puede aplicar correctamente debido a la afectación por convergencia presente en las esquinas.

10.4 Por qué se usó y las características del elemento finito.

Principalmente el uso de este software se vio implementado en el presente trabajo de investigación toda vez que su paquete de elementos finitos presenta una gran respuesta cuando se busca dar respuesta a la deformación bidimensional y estabilidad de estructuras con una geometría personalizada propuesta.

Este software permitió plantear una geometría flexible para la configuración de las diferentes alturas del muro, seguido de una simulación realista en lo que corresponde a las etapas de construcción planteadas en el modelo, generando por último un procesamiento detallado de los resultados y deformaciones obtenidas.

Por otro lado, cabe mencionar que su fácil accesibilidad en cuanto al ingreso de parámetros y propiedades permite tener una mejor interpretación del comportamiento de las estructuras propuestas, toda vez que la caracterización de cada material se puede hacer de manera detallada y planteando los rangos de ejecución.

10.5 Resultados de la aplicación del modelo en Plaxis.

Arcilla como material de relleno

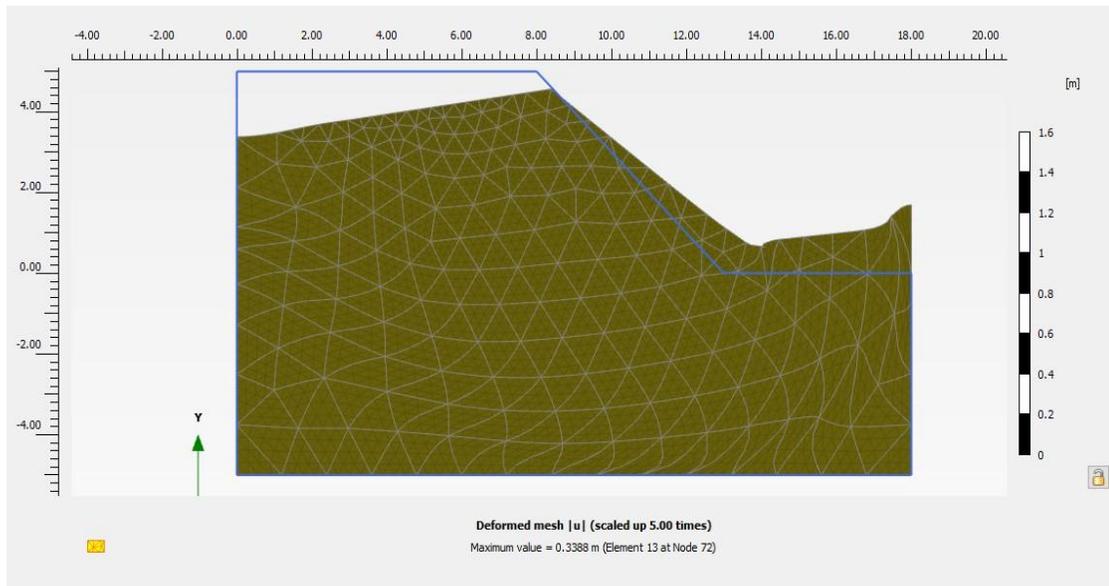


Ilustración 27. Deformación general del talud de arcilla.

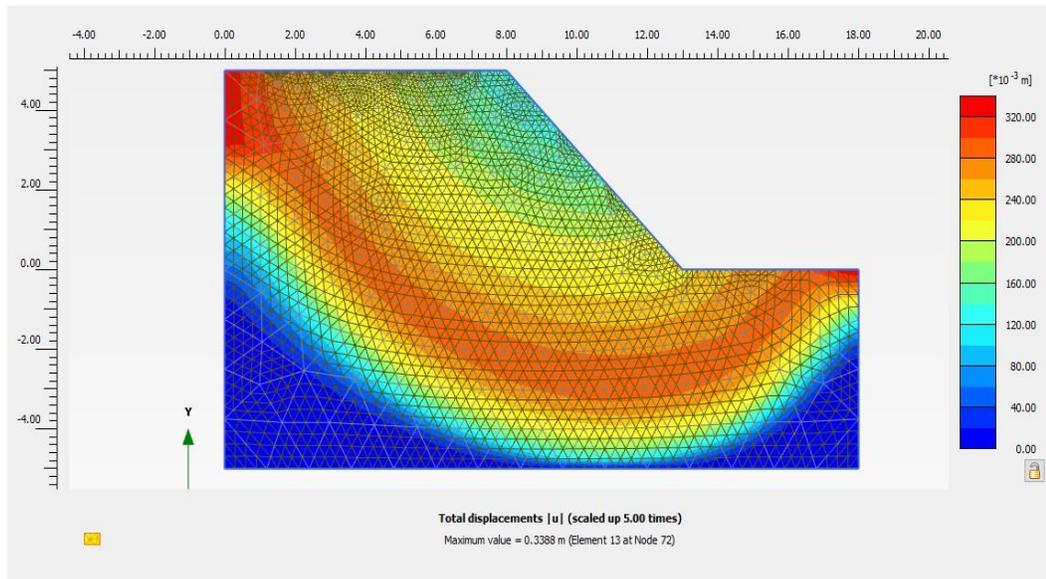


Ilustración 28. Desplazamientos totales de talud.

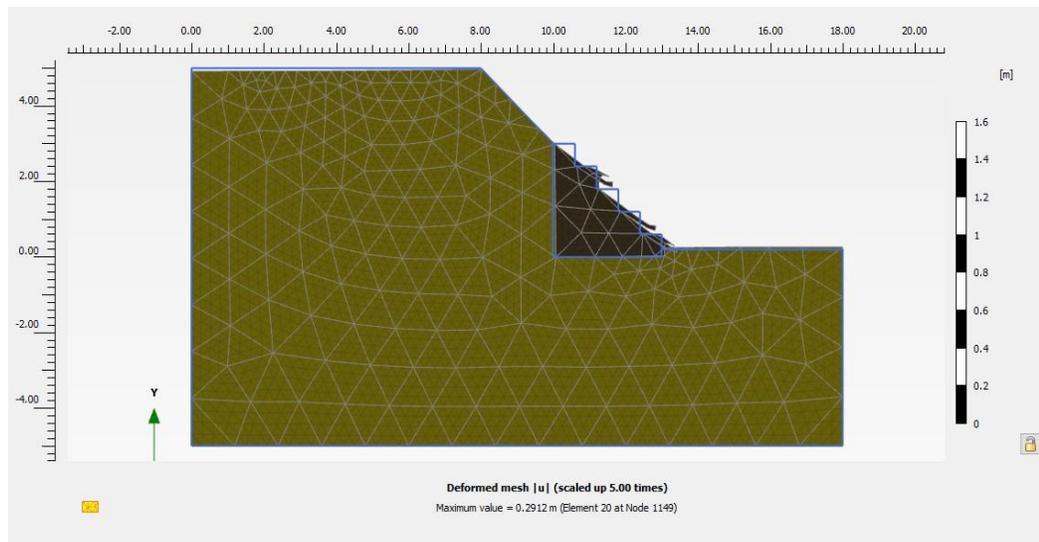


Ilustración 29. Desplazamiento del muro debido a la deformación del talud.

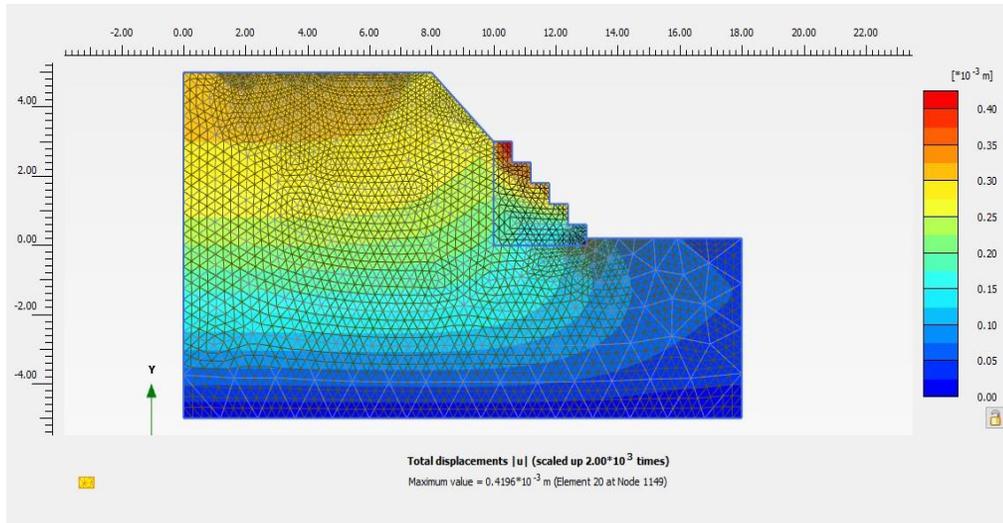


Ilustración 30. Desplazamientos totales sobre el muro.

Tepetate como material de relleno

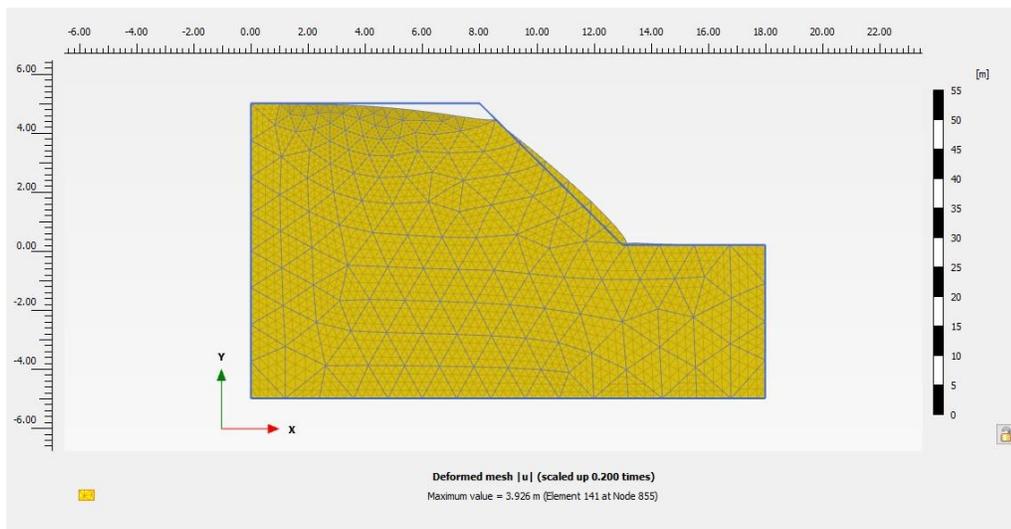


Ilustración 31. Deformación general del talud.

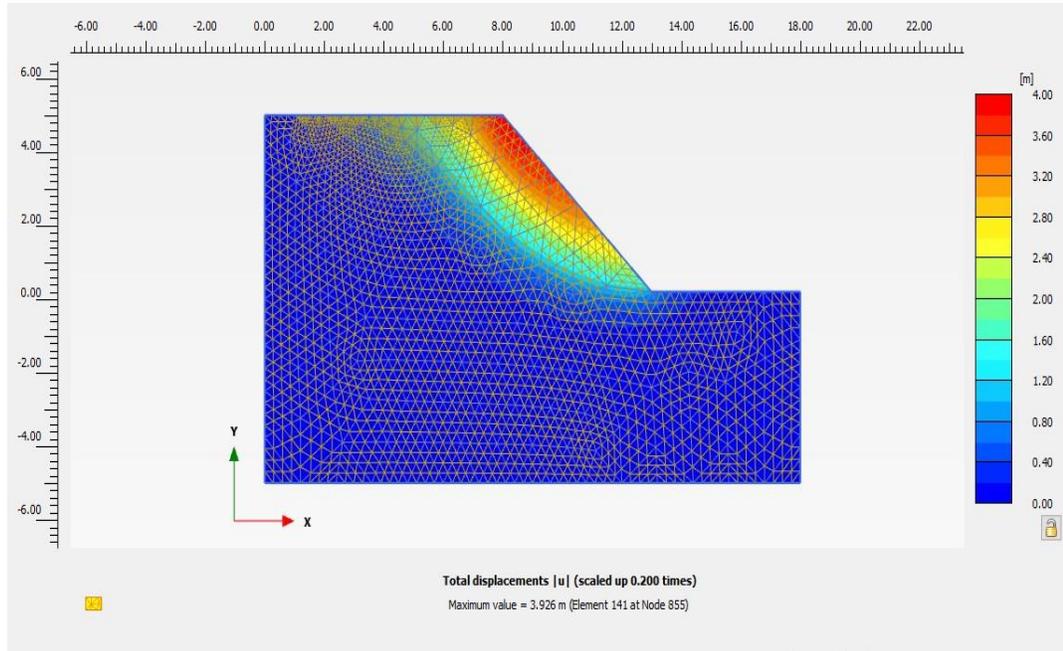


Ilustración 32. Desplazamientos totales del talud.

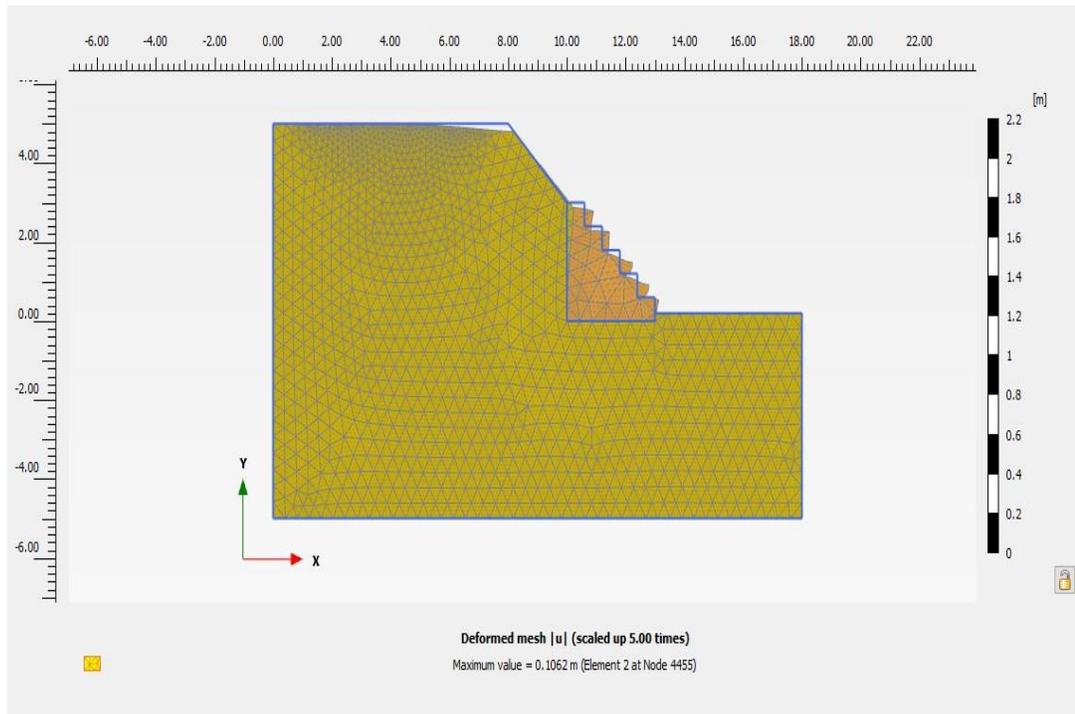


Ilustración 33. Deformación del muro debido al desplazamiento del talud.

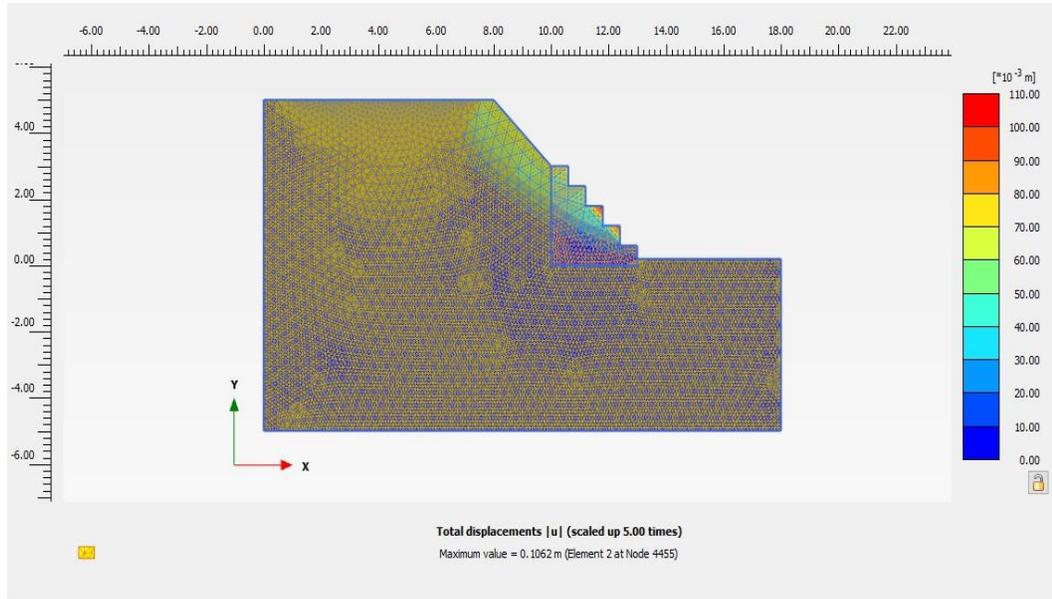


Ilustración 34. Desplazamientos totales sobre el muro.

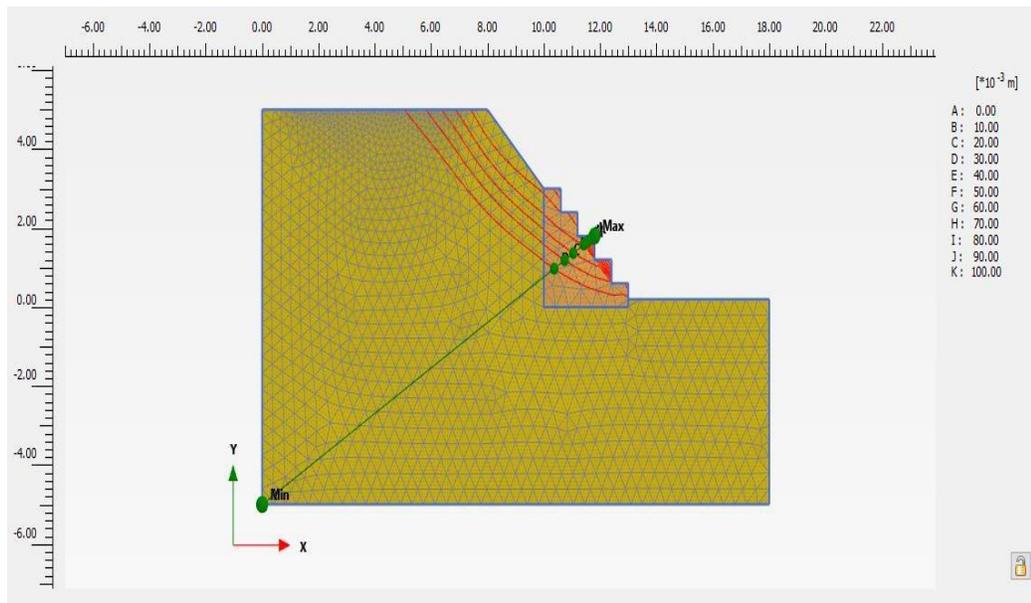


Ilustración 35. Superficie de falla del talud.

Suelo combinado como material de relleno

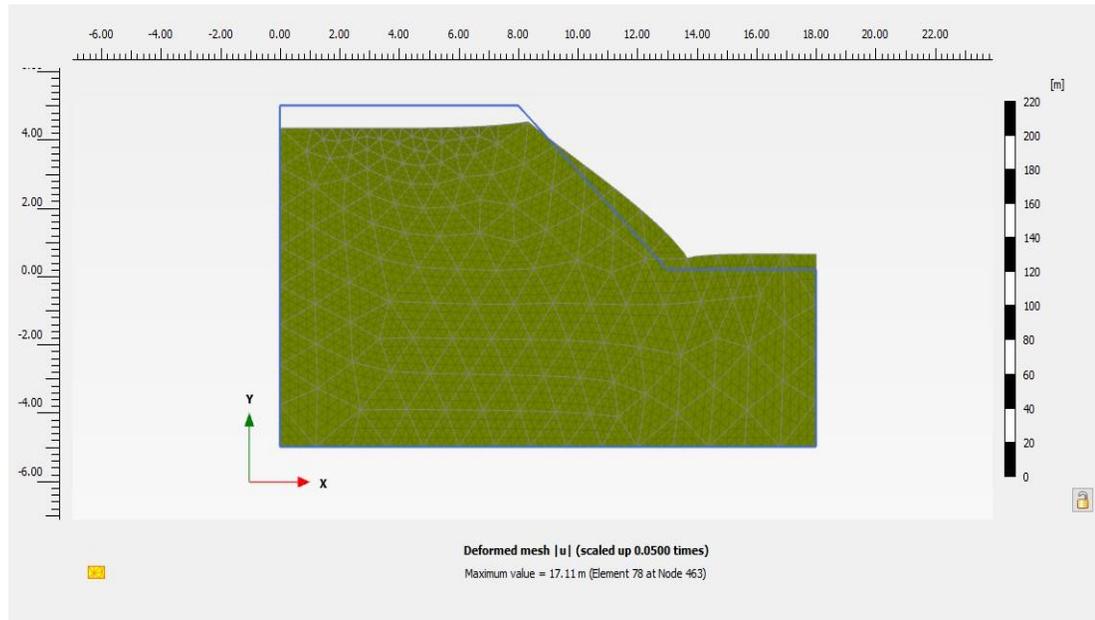


Ilustración 36. Deformación total del talud.

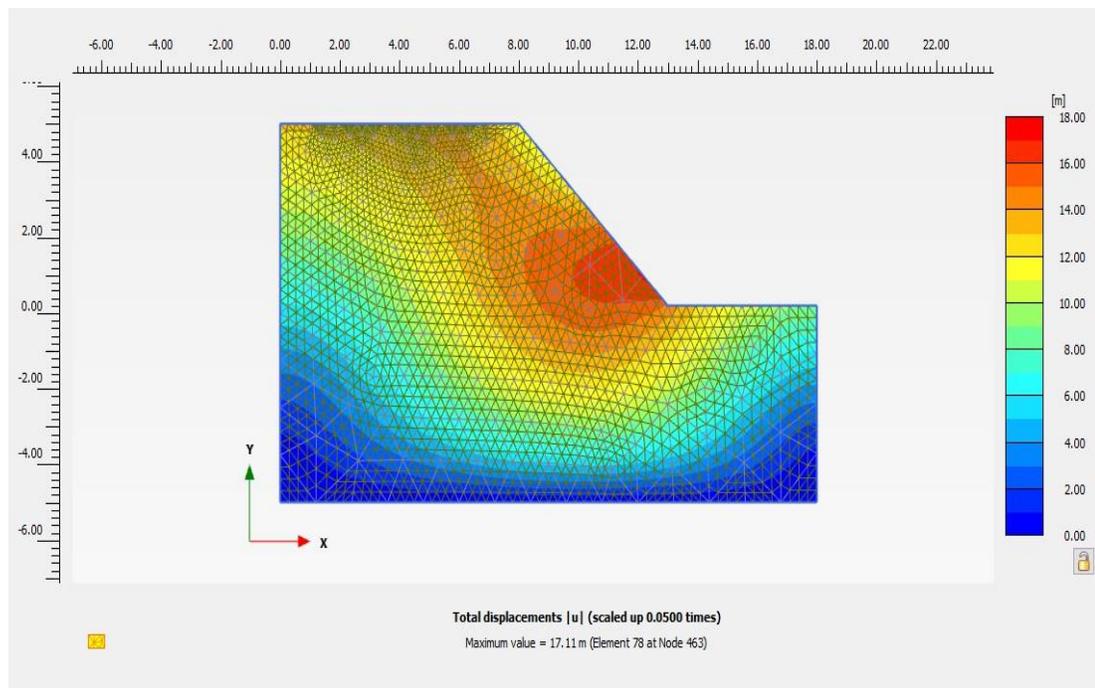


Ilustración 37. Desplazamientos totales del talud.

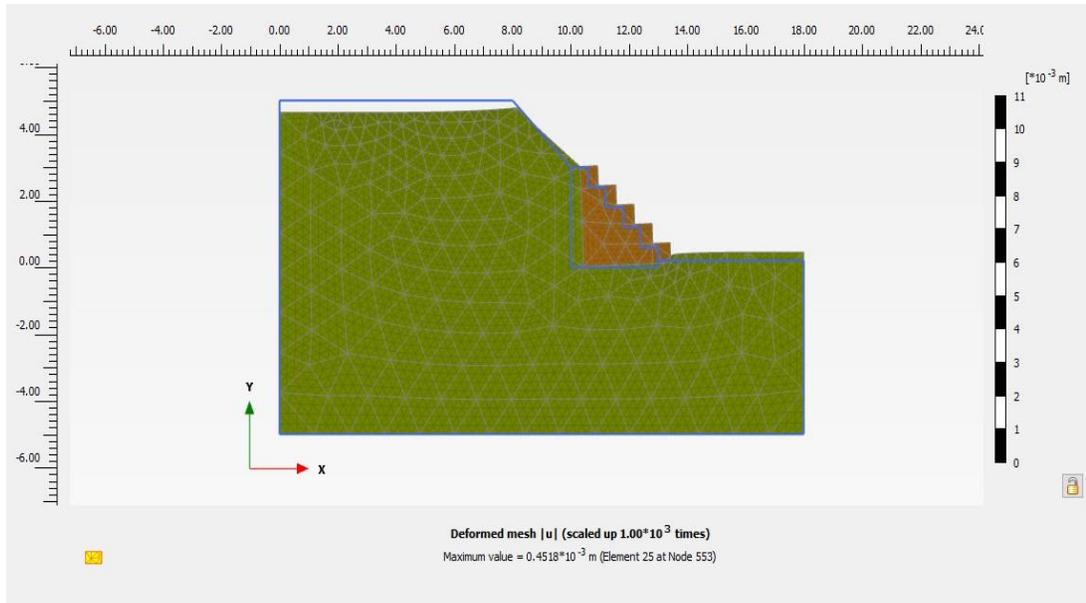


Ilustración 38. Desplazamiento del muro por deformación del talud.

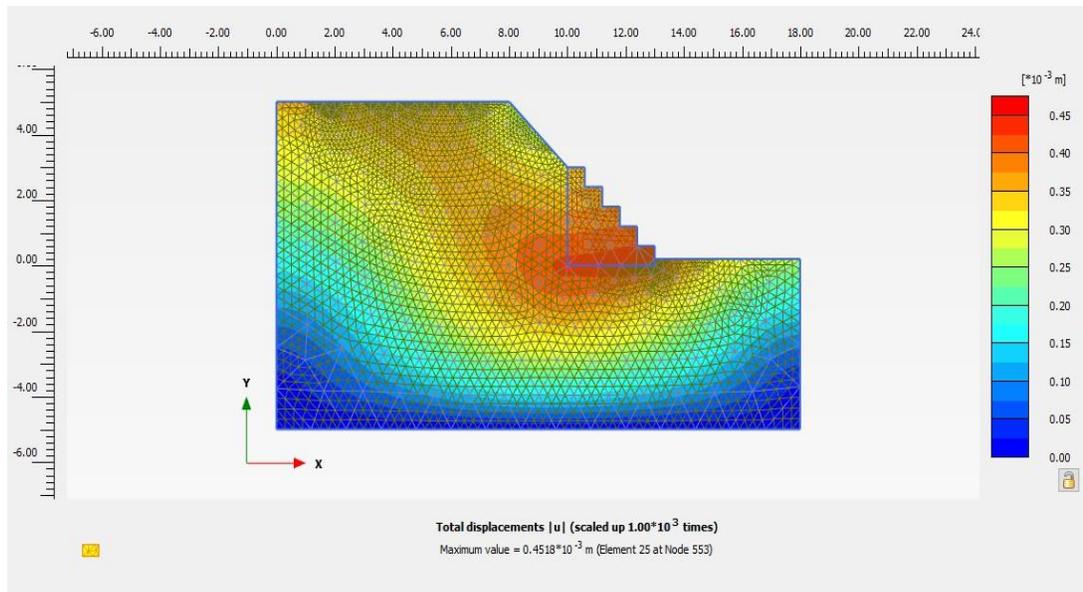


Ilustración 39. Desplazamientos totales del muro.

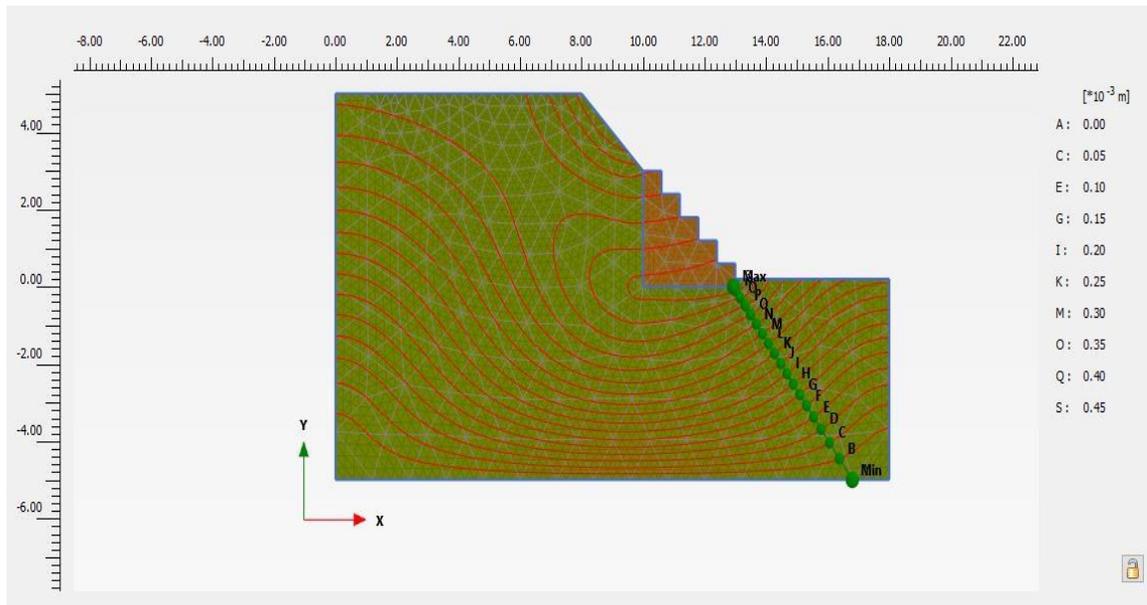


Ilustración 40. Superficie de falla del talud.

10.6 Máxima altura permitida para este tipo de talud

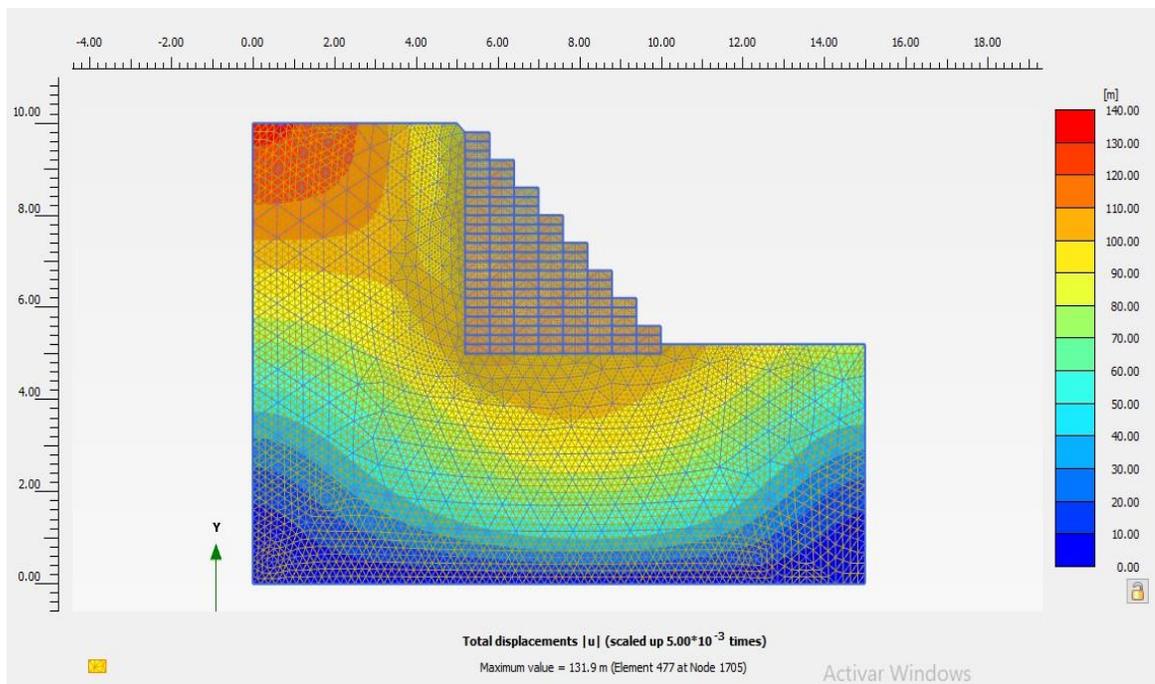


Ilustración 41. Disposición máxima altura del muro.

Para este talud de 5m de altura con una carga de una casa de 3 plantas la altura máxima que se puede considerar es de 4.8 m toda vez que se le debe dejar una cresta al talud donde se debe situar un drenaje, siendo así un diseño de 4.8 metros de alto, 4.8 metros de ancho y 10 metros de largo. En la imagen se puede evidenciar que la mayor cantidad de esfuerzos quedaran aplicados a la parte posterior del talud, pero en lo que corresponde a la superficie del talud sostenida por el muro está no presenta alteraciones, si su puede generar un leve asentamiento del orden de los 8 a 10 cm esto porque se ha incrementad el peso del muro.

10.7 REVISIÓN CUERPO DEL MURO CON PARÁMETROS DE LABORATORIO

10.7.1 Muro de Tepetate

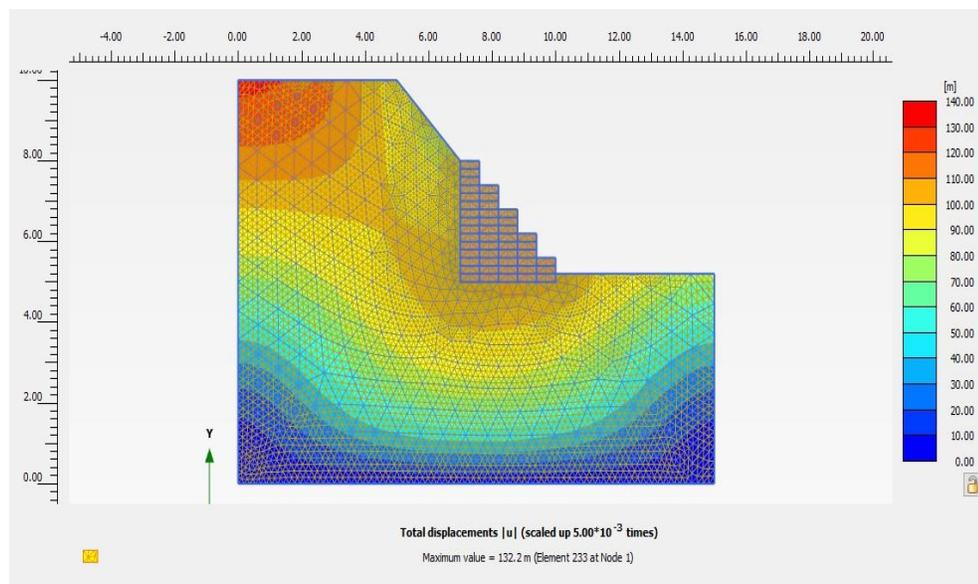


Ilustración 42. Revisión muro de tepetate.

Se presenta desplazamiento total de 0.132 m encontrándose que el comportamiento interno de la estructura no se ve afectado de manera relativa, conservando la estructura prácticamente intacta.

10.7.2 Material Combinado

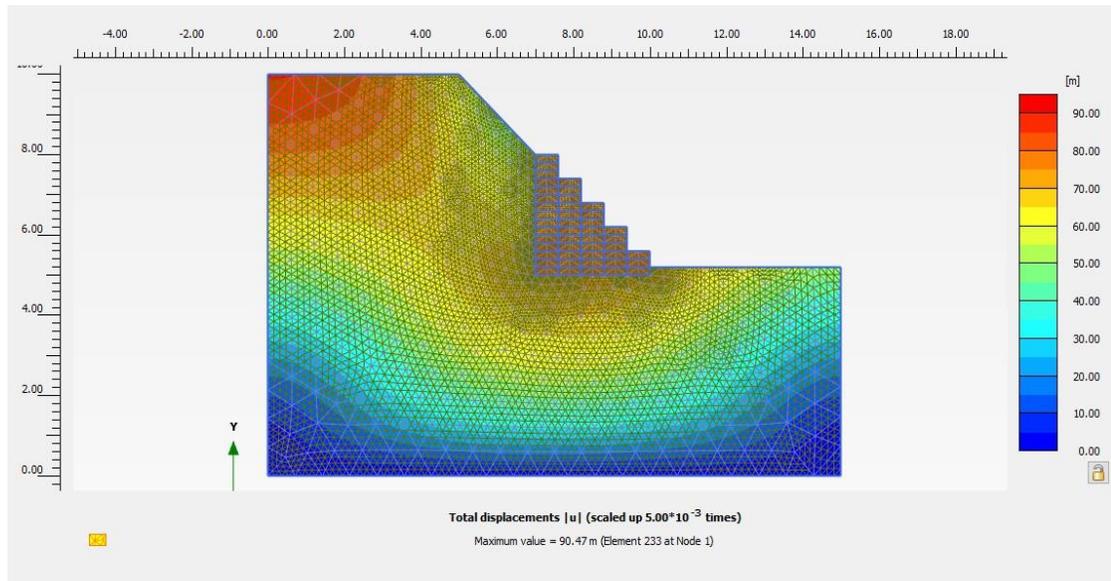


Ilustración 43. Revisión muro material Combinado.

Se presenta desplazamiento total de 0.0904 m encontrándose que el comportamiento interno de la estructura no se ve afectado de manera relativa, conservando la estructura prácticamente intacta.

Comparando los esfuerzos internos del muro en el modelo, con los esfuerzos resistentes medidos en laboratorio, se puede entender que los parámetros del modelo presentan mejores resultados en cuánto a la implementación toda vez que se hacen en un ambiente controlado bajo parámetros definidos, por otro lado los esfuerzos resistentes de laboratorio, denotan de gran manera el comportamiento de la estructura sin embargo estos valores contemplan un porcentaje de error, toda vez que en laboratorio algunos parámetros se ven afectados.

10.8 Comparación usando el software SLIDE

10.8.1 Muro de Tepetate

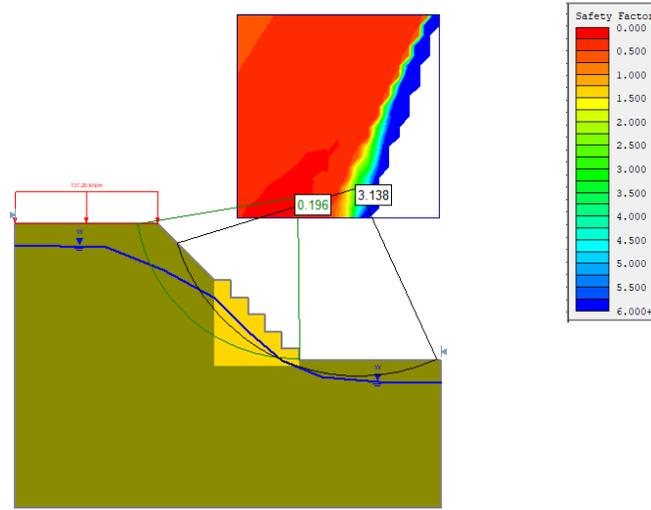


Ilustración 44. Comparación con Slide muro de Tepetate.

El factor de seguridad del talud sin estructura de contención es de 0.196 esto con los parámetros del material y un nivel freático dispuesto a conveniencia, luego se muestra el factor de seguridad con la estructura de contención y la nueva superficie de falla, el cuál incrementa a 3.138 que se acerca mucho al dispuesto en el software plaxis.

10.8.2 Muro de Material Combinado

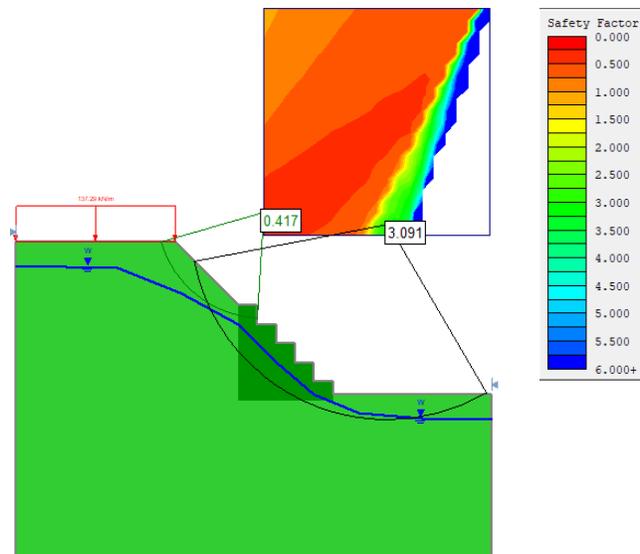


Ilustración 45. Comparación con Slide muro de material combinado.

El factor de seguridad del talud sin estructura de contención es de 0.417 esto con los parámetros del material y un nivel freático dispuesto a conveniencia, luego se muestra el factor de seguridad con la estructura de contención y la nueva superficie de falla, el cuál incrementa a 3.091 que se acerca mucho al dispuesto en el software plaxis.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

– Se observa que la arcilla en condición compactada presenta resultados más favorables para la implementación del relleno del neumático, toda vez que presenta un ángulo de fricción relativamente bajo en comparación con el tepetate y la combinación.

– El tepetate presenta un ángulo de fricción un poco mayor al de la arcilla, sin embargo, presenta un grado mayor de cohesión, lo cual podría incrementar su capacidad de resistencia, con respecto a la arcilla.

– Por último, está la combinación de materiales que presenta un mayor ángulo de fricción y una cohesión baja, siendo el último de los materiales a tener en consideración en cuanto a capacidad de resistencia.

– En cuanto a los tres primeros incisos, los cuales se obtuvieron de la primera parte de la investigación, se puede refutar el primero y afirmar los siguientes 2, toda vez que de los tres tipos de material los que mejor respuesta a la resistencia presenta son el tepetate, y el material combinado, ya que cumplen con los 5 tipos de muro, por otro lado, la arcilla, que

en un inicio presentaba resultados más favorables, cuando se hizo la evaluación no cumplió con ninguno de los 5 tipos de muro.

- Después de llevar los resultados al PLAXIS, se simularon los escenarios de cada tipo de muro, presentando los de mayores alturas en cada uno, siendo de 3m para la arcilla, 2.7m para el tepetate y 3m para el suelo combinado, de los cuales se comprobó que el muro de arcilla se desplazó 0.4 m, el de tepetate 0.1 m y el del suelo combinado 0.0045 m, siendo este último el más factible de emplear y concuerda así con los valores dados en el factor de seguridad por volteo y deslizamiento.

CONCLUSIONES

1 - De los 3 materiales la arcilla y el tepetate presentaron los resultados más positivos como material de relleno, sin embargo, en interacción con los neumáticos la respuesta a la resistencia cambió.

2 - Los 2 materiales que mejor manejo presentan para la elaboración de las pruebas son la arcilla y la combinación, toda vez que el tepetate por su tamaño de grano, presentaba cierta dificultad a la hora de su manejo.

3 - La decisión de tomar los neumáticos con una cara cortada se da, debido a que al momento de compactar los materiales su manejo es adecuado y óptimo, ya que no existe en laboratorio el equipo que permita compactar en los neumáticos completos, generando de esta manera que el material que queda contra las paredes del neumático, no se compacte en el rango requerido.

4 – De los tres materiales el tepetate es el que mejor respuesta presenta como material de relleno, toda vez que cumple con el factor de seguridad ante volteo y deslizamiento, en los 5 tipos de muro propuestos, seguido por el material combinado que cumple en tres tipos de muros, y por último el que peor resultados presentó fue la arcilla, toda vez que sólo cumplió con un tipo de muro.

5 – En las pruebas mecánicas se pudo obtener el factor de rozamiento entre materiales, es posible que estos resultados tengan un porcentaje de error, debido a que la propuesta

ejecutada en laboratorio en cuanto a la caja elaborada para las pruebas de carga lateral, podía presentar alteraciones, sin embargo, se trató de controlar en gran manera y así poder llegar a la obtención de resultados significativos para la investigación.

6 – Después de obtener los resultados de las pruebas mecánicas, los factores de seguridad y la simulación en PLAXIS, se concluye que la mejor interacción entre suelo y neumáticos es el del material combinado, cumpliendo con los factores de seguridad y la simulación en los 5 tipos de muro, seguido por el tepetate que también cumple con estos aspectos, con la diferencia de que presenta valores más bajos con respecto al anterior en lo que compete a los factores de seguridad, y por último se encuentra la arcilla que no cumple con el actor de seguridad en ninguno de los 5 tipos de muro, complementado con esto en la simulación su deformación que aunque es exagerada, evidencia y refleja lo que puede pasar al llevarlo a un modelo real.

7 – Por otra parte, la arcilla al ser expansiva, demostró que debía mantenerse constantemente hidratada, para mantener su humedad óptima toda vez que al secarse, el material de relleno se contrae en el orden de 4 a 5 cm con respecto a las paredes internas, lo cual potencializa la deformación del muro.

RECOMENDACIONES

- Para la implementación de este tipo de muro es necesario tener un control o mantenimiento del mismo, por parte de los expertos que lo implementaron y también por parte de la comunidad donde se implementó.
- Para una próxima investigación se recomienda probar la intercalación del material del muro con el material del talud, y así encontrar una solución al problema, pero teniendo en cuenta los costos de transporte del material de cierta zona a otra.
- Para el corte de los neumáticos se recomienda implementar un mecanismo que permita obtener un corte preciso y rápido de los neumáticos, toda vez que se puede hacer de manera manual, pero esto incrementaría los tiempos de construcción.
- Se recomienda este tipo de muro toda vez que en cuestiones económicas el muro con neumáticos reutilizados es una solución con un 53% más económica con respecto a un muro de concreto reforzado y un 24 % más económica a comparación de un muro armado con geotextil, considerando acá que los únicos costos que se deben tener en cuenta en los muros de neumáticos son el transporte del material, hablando del neumático únicamente, ya que el material se puede encontrar in situ y el otro aspecto es la mano de obra. (Se anexa cálculo de costos en la pág. 89)

RECOMENDACIONES PROCESO CONSTRUCTIVO Y CONTROL DE CALIDAD

Después de haber explicado el proceso constructivo como tal, se adjuntará a esto unas recomendaciones en cuanto al acompañamiento y seguimiento profesional que se debe tener en el ya mencionado y en el control de calidad, a continuación, se tiene que:

- Se debe hacer un desplante de 20 cm de profundidad donde se situará la base del muro, las dimensiones de largo y ancho ya dependerán de la altura del muro.
- El acomodo de los neumáticos se debe hacer de manera simétrica y recta, para así ejecutar la configuración normal de los neumáticos.
- El material se debe encontrar completamente homogeneizado y con la humedad óptima de compactación, esto dependerá de cada tipo de material.
- Se debe aplicar la energía de compactación estipulada para cada material.
- Por cada escalón de muro se debe implementar un paquete de tres neumáticos y así es posible pasar al siguiente escalón del muro.
- Se deben dejar instalados puntos de control, para que posteriormente en visitas periódicas de 3 meses se pueda verificar si el muro ha presentado desplazamientos o deformaciones.
- Se debe mantener la humedad óptima del material de relleno para que este no presente agrietamientos o desprendimiento de material.
- El proceso de construcción y mantenimiento del muro puede ser llevado a cabo por la comunidad donde se esté empleando siempre y cuando este se haga guiado por un profesional especializado en la construcción de muros, preferiblemente el profesional que lleve el proceso desde el inicio.

CALCULOS PARA COSTOS DE ESTIMACIÓN DE CONSTRUCCIÓN

LOCALIZACIÓN Y REPLANTEO				UNIDADES	CANTIDAD	VALOR C/U	PRECIO FINA
LOCALIZACIÓN				m2	28.22	\$ 3,000	84660
DESCAPOTE DEL TERRENO				m2	28.22	\$ 5,000	141100
EXCAVACIÓN Y PERFILADO				m3	5.64	\$ 15,000	84600
CIMENTACIÓN							0
SOLADO DE LIMPIEZA				m2	28.22	\$ 53,000	1495660
ESTRUCTURA							0
CONFORMACIÓN Y DOSTRIBICIÓN DE NEUMÁTICOS				Unidad	810	\$ 4,000	3240000
LLENADO Y COMPACTADO DE ESTRUCTURA				m3	39.9	\$ 12,500	498750
SUMINISTRO DE NEUMÁTICOS CON TRANSPORTE				Unidad	810	\$ 5,000	4050000
ASEO							0
ASEO FINAL Y RECOLECCION DE RESIDUOS				Personas	5	\$ 30,000	150000
HERRAMIENTAS Y EQUIPOS							0
HERRAMIENTAS DE EXCAVACIÓN (PICO Y PALA)				Unidad	10	\$ 33,500	335000
HERRAMIENTAS DE TRANSPORTE DE MATERIAL (CARRETILLA)				Unidad	2	\$ 170,000	340000
HERRAMIENTAS DE COMPACTACIÓN (PISON)				Unidad	2	\$ 20,000	40000
HERRAMIENTAS DE REPLANTEO O LOCALIZACIÓN (SIMBRA Y ESTA				Unidad	1	\$ 15,000	15000
HIDRATACIÓN Y ALIMENTACIÓN PARA TRABAJADORES				Personas	5	\$ 20,000	100000
						TOTAL	10574770
Neumáticos	Cantidad	Ancho	Altura	Total			
Escalon 1	18	5	3	270			
Escalon 2	18	4	3	216			
Escalon 3	18	3	3	162			
Escalon 4	18	2	3	108			
Escalon 5	18	1	3	54			
				Total	810		

Ilustración 46. Costos de construcción. Fuente: Autor

El precio de construcción de un muro con 5 m de altura, 2.8 m de ancho y 10 m de largo es de 10'574.770 pesos colombianos y llevado a una estimación mexicana sería un valor de 46,300 pesos mexicanos.

Aporte de esta investigación.

El aporte de esta investigación se divide en dos enfoques, por un lado de quiere contribuir a todo lo que respecta al impacto ambiental, toda vez que se busca reutilizar o dar un segundo uso a un material de desecho, en este caso los neumáticos, dándoles un correcto manejo y una segunda finalidad.

Por otra parte el enfoque tiene que ver con el campo ingenieril, toda vez que lo que se busca es construir una estructura de contención que pueda reemplazar o presentar una respuesta similar a una estructura de concreto o roca, aunque es un tema que se ha venido trabajando en varios países de América, acá como factor diferenciador o relevancia de la investigación lo que se busca es encontrar la mejor combinación entre el material de relleno, los neumáticos y el acomodo de los mismos, toda vez que aunque se presenta de manera escalonada, no se ha encontrado en la bibliografía que cada escalón del muro esté constituido por un paquete de tres neumáticos, sin ningún tipo de refuerzo y que funcione por peso propio, no quiere decir que no se pueda agregar algún tipo de amarre o refuerzo, sin embargo, lo que se buscó en esta investigación es que el cuerpo del muro pudiera actuar de manera independiente, de esta manera es un método que se puede llegar a aplicar en un tiempo menor y con menores costos de construcción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. A. Ramirez Castillo, “Planeación estratégica para la estabilidad de taludes en cortes de carreteras, fundamentada en el análisis de riesgos”, Tesis de Grado, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, (2015), [En línea] Disponible en: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/8509/537715T.pdf?sequence=1>
- [2] P. Garnica Anguas, C. Pérez García. Metodología para la gestión de Cortes Carreteros, Instituto Mexicano de Transporte, Publicación Técnica No. 370, Sanfandila, Qro, 2012.
- [3] GlobeNewswire. (2020) Growth Opportunities in the Tires Industry, 2020-2025 - Radialization Continues to Bulldoze Growth in Tire Markets of Emerging Countries. [En línea]. Disponible en: <https://www.globenewswire.com/newsrelease/2020/04/03/2011287/0/en/Growth-Opportunities-in-the-Tires-Industry-2020-2025-Radialization-Continues-to-BulldozeGrowth-in-Tire-Markets-of-Emerging-Countries.html>
- [4] Pérez K. (2019) Montaña de llantas en Cerro Patacón genera preocupación. TVN Noticias. [En línea]. Disponible en: https://www.tvn-2.com/nacionales/Montana-llantas-CerroPatacon-preocupacion_0_5238226208.html
- [5] Long N., Pierre L. (1993). "Le Pneusol: Recherches – Réalisations - Perspectives". Devant l'institut national des sciences appliquees de Lion. París, France.
- [6] P. Barros, G. Sarabia, F. Valdés, P. Serrano, I. Gaytan. “Muro de contención construido con neumáticos estabilizados mecánicamente” Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso – Chile. Rev. Ing. Constr. Vol. 34, No 3. (2019)
- [7] P. A. Torres Latorre, “Estabilización de taludes con neumáticos usados”, proyecto de tesis, Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia, (2016)
- [8] PEREZ, Carlos. ¿Qué son las llantas radiales? [en línea] [citado 07 de agosto 2015].

[9] Tuncer 2008.

[10] ZIADAT, An enviromental impact assessment of the open burning of scrap tires. Jounal of applied sciences, 2014

[11] The most common slope failure types (Hoek & Bray 1977)

[12] K. F. Ugalde Madrigal, “Alternativas para la estabilización de taludes en el cantón León Cortés”, proyecto de tesis, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de ingeniería de construcción, (2015)

[13] Candela González, J. Sistemas de estabilización de taludes y laderas- casos prácticos □en línea □. Madrid: Grupo Terratest. Disponible en Internet: <URL: <http://www.terratest.es/docs/simposiotaludespt.pdf>

[14] Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1987. MANUAL DE TALUDES. 1° Ed. España: Editorial. No. 291, pag 335.

[15] Catalogue of Canmet Publications, Canmet Report 79-41, pag 336 (1977).

[16] García, E. SEMINARIO DE REPARACIÓN Y RESTAURACIÓN DE TALUDES. Pantallas Pilotadas y Muros Anclados. San José, Costa Rica. (2014)

[17] Hoek, E. and Bray, J.W., 1981. Rock slope engineering. Institution of Mining and Metallurgy, London. (1977)

[18] Instituto Geológico y Minero de España (IGME).. MANUAL DE TALUDES. 1° Ed. España: Editorial. No. 291-328p. (1987)

[19] Fracassi, G. SEMINARIO DE REPARACIÓN Y RESTAURACIÓN DE TALUDES. Muros de Gravedad y Suelo Reforzado. San José , Costa Rica, pag 19, (2014)

[20] H.F. Winterkon, H. Y. Fang, “Foundation Engineerinf Handbook, (1975)

[21] Instituto Geológico y Minero de España (IGME).. MANUAL DE TALUDES. 1° Ed. España: Editorial. No. 291-328p. (1987)

- [22] Fracassi, G. SEMINARIO DE REPARACIÓN Y RESTAURACIÓN DE TALUDES. Muros de Gravedad y Suelo Reforzado. San José , Costa Rica, pag 19, (2014)
- [23] Instituto Geológico y Minero de España (IGME).. MANUAL DE TALUDES. 1° Ed. España: Editorial. No. 291-328p, pag. 327. (1987)
- [24] N. T. Long. Le Pneusol : Recherches – Réalisations - Perspectives. Institut National des Sciences Appliquees., p.42.(1993)
- [25] B.B.K. Huat, A.A. Aziz & L.W Chuan. Application of Scrap Tires as Earth Reinforcement for Repair of Tropical Residual Soil Slope. Ejge, Vol.13, Bu, pp.1–9. (2008)
- [26] G. C. Carmona. Con Innovador muro hecho de llantas, Alcaldía de Medellín recupera paso peatonal en el barrio Fuente Clara, sector La Iguaná. Portal Alcaldía de Medellín, (<https://www.medellin.gov.co/itj/portal/ciudadanos?NavigationTarget=navurl://c13643354a4b625e2000e7c1be8e4ed>), p.1. (2014)
- [27] K. F. Ugalde Madrigal, “Alternativas para la estabilización de taludes en el cantón León Cortés”, proyecto de tesis, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de ingeniería de construcción, (2015)
- [28] P. A. Torres Latorre, “Estabilización de taludes con neumáticos usados”, proyecto de tesis, Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia, (2016)
- [29] Instituto de Geología de la UNAM, Carta geológica de México, Disponible en línea: <https://www.geologia.unam.mx/contenido/carta-geologica-mexicana>, última visita: 25/10/2023.
- [30] Cantanhede, A., & Monge, G. (2002). Estado del arte del manejo de llantas usadas en las américas. Division de Salud y Aambiente, 41.
- [31] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2017). Resolución 1326 de 2017 (pp. 1–22).
- [32] Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1978). Mecánica de suelos en la ingeniería práctica ((No. 624.1).

[33] Das, B. M. (2001). Principios de Ingeniería de Cimentaciones.

[34] Peck, R., Hanson, W., & Thornburn, T. (1974). Ingeniería de Cimentaciones. Wiley

[35] Sims, F. A., & Gaffney, J. A. (1976). Re-use of worn tyres in civil engineering construction (Interim report updated april 1977). West Yorkshire Metropolitan County Council.

[36] Long, N. T., AUDEOUD, B., BAILLY, J., JEAN, P., LAREAL, P., URSAT, P., & VALEUX, J. (1990). The Pneusol. ETUDES ET RECHERCHES DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES-SERIE GEOTECHNIQUE, (GT 44).

[37] Linares Serna N, Propuesta teórica de muros con llantas de acuerdo con las características de los suelos de la región. Caso de estudio: Departamento de caldas. Universidad Nacional de Colombia, facultad de ingeniería y arquitectura, Colombia, 2020.

[38] Normas ASTM más utilizadas en la ingeniería de suelos, ASTM INTERNATIONAL, Disponible en línea: <https://geologiaymapas.com/2020/07/normas-astm-mas-utilizadas-en-la-ingenieria-de-suelos/>, 6/11/2023.

