

ANÁLISIS DEL SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN IMPLEMENTANDO EL USO DE NEUMÁTICOS
COMO MURO DE CONTENCIÓN DE VIVIENDAS, CASO DE ESTUDIO VEREDA OSPINA PÉREZ
MUNICIPIO DE PALERMO – HUILA.

MABEL ZAHIRA SALCEDO RODRÍGUEZ

DIRECTOR: HAROL LEÓN ZAMBRANO URBANO



UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE OBRAS DE
INFRAESTRUCTURA Y EDIFICACIONES
BOGOTÁ, 2024

ANÁLISIS DEL SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN IMPLEMENTANDO EL USO DE NEUMÁTICOS
COMO MURO DE CONTENCIÓN DE VIVIENDAS, CASO DE ESTUDIO VEREDA OSPINA PÉREZ
MUNICIPIO DE PALERMO – HUILA.

Mabel Zahira Salcedo Rodríguez

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el título de Especialista



UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE OBRAS DE
INFRAESTRUCTURA Y EDIFICACIONES
BOGOTÁ, 2024

Tabla de Contenido

RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN	13
CAPITULO I.....	15
1.PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	15
<i>1.1 Planteamiento del problema.....</i>	<i>15</i>
<i>1.2 Descripción del problema.....</i>	<i>16</i>
<i>1.3 Formulación del problema</i>	<i>17</i>
CAPITULO II	17
2.1 JUSTIFICACIÓN	17
2.2 OBJETIVOS	19
<i>2.2.1 Objetivo general.....</i>	<i>19</i>
<i>2.2.2 Objetivos específicos.....</i>	<i>19</i>
CAPITULO III: MARCO DE REFERENCIA	20
3.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	20
3.2 MARCO TEÓRICO	31
<i>3.2.1 Definición muros de gravedad.....</i>	<i>31</i>
<i>3.2.2 Neumáticos.....</i>	<i>33</i>
3.2.2.1 Uso de los neumáticos de desuso en la industria de la construcción	34
3.2.2.2 Ciclo de vida de los neumáticos.....	36
<i>3.2.3 Caracterización del suelo</i>	<i>37</i>
3.2.3.1 Parámetros Físicos	37

3.2.3.1.1 Contenido de Humedad.....	37
3.2.3.1.2 Gravedad Específica	37
3.2.3.1.3 Análisis granulométrico	38
3.2.3.1.4 Límites de Atterberg	38
3.2.3.2 Parámetros de Resistencia.....	39
3.2.3.2.1 Prueba de corte directo.....	40
3.2.3.3 Medición de resistencia in situ.....	40
<i>3.2.4 Aplicación de las teorías de presión lateral del suelo.....</i>	<i>41</i>
3.2.4.1 Presión Activa.....	41
3.2.4.2 Presión Pasiva	43
<i>3.2.5 Estabilidad de muros</i>	<i>44</i>
(a) Revisión por volcamiento:.....	45
(b) Revisión por deslizamiento a lo largo de la base:	46
(c) Revisión por capacidad de carga	47
(d) Revisión por asentamiento profundo de un suelo débil	47
CAPITULO IV: METODOLOGÍA	48
4.1 FASE I: RECOPIACIÓN DE DATOS	50
4.2 FASE II: MODELACIÓN.....	51
4.3 FASE III: ANÁLISIS	52
4.4 FASE IV: PROPOSICIÓN	53
CAPÍTULO V: CARACTERIZACIÓN DEL SUELO	53
5.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	53
<i>5.1.1 Muro de estudio</i>	<i>55</i>

5.2 PARÁMETROS FÍSICOS	57
5.2.1 <i>Contenido de Humedad</i>	58
5.2.2 <i>Gravedad Específica</i>	58
5.2.3 <i>Granulometría por tamizado</i>	61
5.2.4 <i>Granulometría por hidrómetro</i>	63
5.2.5 <i>Límite líquido</i>	65
5.2.6 <i>Límite Plástico</i>	66
5.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA.....	68
5.3.1 CORTE DIRECTO CONDICIÓN CONSOLIDADA DRENADA (CD)	68
5.4 ENSAYOS DE CAMPO.....	70
5.4.1 <i>Veleta de campo</i>	70
5.4.2 <i>Penetrómetro de bolsillo</i>	71
CAPÍTULO VI: MODELACIÓN SUELO- NEUMÁTICO.....	71
6.1 MODELO DE CALIBRACIÓN	71
6.1.1 <i>Consideraciones generales</i>	71
6.1.2 <i>Definición parámetros mecánicos de los materiales para la modelación de calibración</i> ..	72
6.1.3 <i>Aplicación de cargas</i>	74
6.1.4 <i>Resultados y calibración del sistema</i>	76
6.2 MODELO DE INVESTIGACIÓN.....	80
6.2.1 <i>Consideraciones generales</i>	80
6.2.2 <i>Definición de parámetros mecánicos de los materiales para el modelo de investigación</i> ..	80
6.2.3 <i>Aplicación de cargas</i>	82
6.2.4 <i>Resultados</i>	83
6.2.5 <i>Análisis</i>	86

CAPÍTULO VII: MODELACIÓN SISTEMA ACTUAL DE ESTABILIZACIÓN DE MURO CONSTRUIDO CON NEUMÁTICOS	88
7.1 CONSIDERACIONES GENERALES	88
7.2 DEFINICIÓN PARÁMETROS MECÁNICOS DE LOS MATERIALES PARA LA MODELACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL.....	89
7.3 APLICACIÓN DE CARGAS	89
7.3.1 <i>Carga muerta</i>	89
7.3.2 <i>Carga viva</i>	92
7.4 RESULTADOS.....	92
7.4.1 <i>Esfuerzo cortante máximo</i>	94
Análisis:	95
7.4.2 <i>Desplazamiento máximo</i>	96
Análisis:	98
CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL SISTEMA CON LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD DEL SITIO.....	98
8.1 <i>Fuerzas desestabilizadoras</i>	99
8.2 <i>Fuerzas estabilizadoras</i>	102
8.3 <i>Fuerzas y momentos resultantes</i>	103
8.4 <i>Chequeo por deslizamiento</i>	104
8.5 <i>Chequeo por volcamiento</i>	104
CAPÍTULO IX: ALTERNATIVAS DE OPTIMIZACIÓN	105
CAPÍTULO X: CONCLUSIONES	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112

Índice de figuras

Figura 1 Propuesta desarrollada para muro de contención con neumáticos para sotener pendiente natural.	21
Figura 2 Prueba de Campo muro de llantas.	22
Figura 3 Prueba de corte directo a escala real para evaluar el sistema suelo- neumático.....	23
Figura 4 Prueba de corte directo a escala real para evaluar el sistema suelo- neumático.....	24
Figura 5 Esquematización uso de conectores de concreto y acero.	25
Figura 6 Probetas cilíndricas para determinar la resistencia a cortante del material neumático-suelo.	27
Figura 7 Esquema propuesto en modelación por Slide del talud de diseño.....	30
Figura 8 Propuesta de mitigación de inestabilidad de ladera del municipio de La Mesa-Cundinamarca.	31
Figura 9 Clasificación muros de gravedad.....	32
Figura 10 Estructura llanta típica.	34
Figura 11 Tipos de fallas de muros de contención.	45
Figura 12 Metodología de investigación.....	50
Figura 13 Muros con llantas identificados en la zona de estudio	53
Figura 14 Detalles muro construido con neumáticos de estudio	56
Figura 15 Dimensiones del muro de estudio.....	57
Figura 16 Calibración Picnómetro 500 ml.....	59
Figura 17 Gráfica ensayo de granulometría por tamizado.....	62
Figura 18 Gráfica (D vs % que pasan), ensayo de hidrómetro.	64
Figura 19 Gráfica ensayo límite líquido	65
Figura 20 Carta de plasticidad Casagrande.....	67

Figura 21 Esfuerzo cortante, ensayo de Corte Directo.	69
Figura 22 Envolvente de falla Mohr - Coulomb.	69
Figura 23 Comparación neumático y modelo de calibración	74
Figura 24 Aplicación de esfuerzos normales y tangenciales modelo de calibración.....	75
Figura 25 Esfuerzo cortante máximo - modelo de calibración	76
Figura 26 Desplazamiento máximo- modelo de calibración	78
Figura 27 Comparación Esfuerzo Cortante.....	79
Figura 28 Esquema dimensiones neumático de investigación.....	82
Figura 29 Aplicación de cargas modelo de investigación	83
Figura 30 Esfuerzo Cortante máximo modelo de investigación	84
Figura 31 Desplazamiento máximo alcanzado en la modelación	85
Figura 32 Modelo de investigación sin la banda superior del neumático.....	86
Figura 33 Esquema modelación del sistema de estabilización del muro de contención construido con neumáticos.....	93
Figura 34 Esfuerzo máximo a cortante modelo muro.....	94
Figura 35 Desplazamientos máximos alcanzados.....	96
Figura 36 Comparación desplazamiento máximo con estado actual del muro.....	97
Figura 37 Diagrama fuerzas que desestabilizan.....	99
Figura 38 Fuerza que estabiliza	102
Figura 39 Alternativas de optimización: posición	105
Figura 40 Alternativas de optimización: datos de contrapeso	106
Figura 41 Alternativas de optimización: instalación filtros horizontales	107
Figura 42 Alternativas de optimización: conexión neumáticos adyacentes.	108

Índice de tablas

Tabla 1 Resultados parámetros de resistencia para el sistema neumático- suelo y conectores	26
Tabla 2 Resultados de esfuerzo de cortante máximo para probetas de neumático.	28
Tabla 3 Ventajas y desventajas de muros tipo flexibles.	32
Tabla 4 Composición típica de neumáticos.	35
Tabla 5 Operacionalización de variables.	48
Tabla 6 Información recolectada en campo.	55
Tabla 7 Ensayos realizados del suelo de cimentación.	58
Tabla 8 Datos ensayo contenido de humedad.....	58
Tabla 9 Peso picnómetro, proceso de calibración.....	58
Tabla 10 Valores calibrados en función de la temperatura, ensayo de gravedad específica	59
Tabla 11 Datos iniciales, ensayo de gravedad específica.	60
Tabla 12 Resultados granulometría por tamizado.	61
Tabla 13 Deciles y datos porcentaje que pasa, ensayo de granulometría.	62
Tabla 14 Datos iniciales, ensayo de granulometría por hidrómetro.	63
Tabla 15 Resultados granulometría por hidrómetro	64
Tabla 16 Datos iniciales, ensayo de límite líquido.	65
Tabla 17 Datos iniciales, ensayo de límite plástico	66
Tabla 18 Rangos de IP según característica del suelo.	66
Tabla 19 Resultados ensayo de límite líquido e índice de plasticidad.....	67
Tabla 20 Cuadro de cargas ensayo de corte directo.....	68
Tabla 21 Datos ensayo CD.	68
Tabla 22 Resultados caracterización suelo de cimentación.....	70
Tabla 23 Datos tomados en campo: veleta de campo.....	70

Tabla 24 Datos tomados en campo: penetrómetro de bolsillo.....	71
Tabla 25 Datos de entrada modelo de calibración.....	73
Tabla 26 Comparación resultados obtenidos en el modelo de calibración.....	80
Tabla 27 Datos de entrada muro de investigación.....	80
Tabla 28 Carga muerta generada por losa de contrapiso.....	90
Tabla 29 Carga muerta generada por muros.....	90
Tabla 30 Carga muerta generada por cubierta de zinc.....	90
Tabla 31 Carga muerta generada por columnas.....	91
Tabla 32 Carga muerta generada por vigas de amarre.....	91
Tabla 33 Carga muerta generada por perfil rectangular cuadrado.....	91
Tabla 34 Total carga muerta vivienda.....	92
Tabla 35 Total carga viva.....	92
Tabla 36 Etapas consideradas en la modelación.....	93
Tabla 37 Datos para realizar análisis de estabilidad.....	99
Tabla 38 Determinación del peso propio generado por el muro.....	103
Tabla 39 Fuerzas y momentos resultantes.....	103

Resumen

Cada vez es mayor el uso de materiales alternativos en construcciones de obras civiles, debido al gran reto que tiene Colombia en reducir la contaminación generada por la mala disposición de residuos sólidos, como los neumáticos. Estos están siendo empleados como alternativas para mejorar propiedades de resistencia y durabilidad de materiales, por sus múltiples ventajas en mejorar propiedades físicas como impermeabilidad, amortiguación, aumento de fricción, aislamiento acústico, anti-vibratorio, resistentes a sismos de gran magnitud al absorber la energía de las vibraciones, entre otras. El uso de neumáticos reciclados para muros de contención cada vez es más frecuente en zonas de altas pendientes. Estos muros, son construidos usualmente por personas con conocimientos empíricos, sin tener en cuenta en su proceso constructivo un análisis previo de cargas. En Colombia, este tipo de construcciones no se evidencia en ninguna normativa técnica. Esta investigación, busca analizar el comportamiento geotécnico de los muros de contención para vivienda construidos con neumáticos en la vereda Ospina Pérez del municipio de Palermo del departamento del Huila. Los resultados de estabilidad para el caso de estudio, se realizan haciendo uso de un análisis estático, sin considerar el empuje pasivo del suelo y las generadas por el empuje del agua. Se obtuvo un factor de seguridad al deslizamiento de 1.26 y al volcamiento de 1.51. Por medio de la modelación de elementos finitos, usando el software de análisis geotécnico Midas GTS NX, se determina que el comportamiento del neumático interactúa como una membrana que distribuye uniformemente los esfuerzos aplicados sobre su superficie al sistema conformado por neumático- suelo. En la modelación del sistema actual del caso de estudio, los desplazamientos y esfuerzos a cortante máximo se desarrollan en la base del muro, por lo que se proponen algunas alternativas para aumentar su estabilidad.

Abstract

The use of alternative materials in civil construction is increasing, due to the great challenge that Colombia has in reducing pollution generated by the poor disposal of solid waste, such as tires. These are being used as alternatives to improve resistance and durability properties of materials, due to their multiple advantages in improving physical properties such as impermeability, cushioning, increased friction, acoustic insulation, anti-vibration, resistance to large earthquakes by absorbing energy. of vibrations, among others. The use of recycled tires for retaining walls is increasingly common in areas with high slopes. These walls are usually built by people with empirical knowledge, without taking into account a prior load analysis in their construction process. In Colombia, this type of construction is not evident in any technical regulations. This research seeks to analyze the geotechnical behavior of the retaining walls for housing built with tires in the Ospina Pérez village of the municipality of Palermo, department of Huila. The stability results for the case study are carried out using a static analysis, without considering the passive pressure of the soil and those generated by the pressure of water. A safety factor was obtained for sliding of 1.26 and for overturning of 1.51. Through finite element modeling, using the Midas GTS NX, geotechnical analysis software, it is determined that the behavior of the tire interacts as a membrane that uniformly distributes the forces applied on its surface to the tire-soil system. In the modeling of the current system of the case study, the displacements and maximum shear forces develop at the base of the wall, so some alternatives are proposed to increase its stability.

Introducción

Los muros de contención construidos con neumáticos de desecho son empleados como sistemas de contención para la mitigación de procesos de inestabilidad en laderas. Las características de este tipo de muros comprenden una construcción sencilla, económica, utiliza el suelo del mismo sitio como relleno. (Baroni y otros, 2012) indican que estos tipos de muros son una solución ecológica a la disposición final de neumáticos de desuso que se acumulan en rellenos sanitarios. A su vez, (Ospina y otros, 2019) infieren que al ser muros flexibles, se acomodan con facilidad ante la ocurrencia de asentamientos.

La presente investigación, tiene lugar en la vereda de Ospina Pérez del municipio de Palermo – Huila, como lugar de estudio. Las condiciones topográficas corresponden a terrenos montañosos y escarpados, donde la ocurrencia a presentarse amenazas de índole natural o antrópicas, crean escenarios de inestabilidad ante la ocurrencia de procesos de remoción en masa que afectan al sector (Acuerdo No.031, 2007). En consecuencia, la Alcaldía de Palermo decretó calamidad pública por ola invernal en el año 2021 por afectaciones a varias veredas de la zona rural, entre ellas Ospina Pérez (Alcaldía de Palermo, 2021). De igual manera, se han reportado emergencias invernales y afectaciones por deslizamientos, tal y como se reportan en (Diario del Huila, 2023; El Tiempo, 2021; La Voz de la Región, 2022).

Según (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [AIS], 2010, título A) relaciona las zonas de amenaza sísmicas y movimientos sísmicos de diseño y detalla que el sector donde se realiza la presente investigación, está ubicado en zona de amenaza sísmica alta. El tipo de suelo característico es de tipo denudacional, originada principalmente por procesos de erosión y unidades de origen estructural (Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear [Ingeominas], 2002) lo que aumenta el riesgo a deformaciones o fallas debido a problemas de inestabilidad de laderas en este tipo de construcciones.

Durante las visitas realizadas en el sector, se identificó que el uso de estos sistemas de contención a partir de neumáticos es frecuente, su construcción es empírica y no cuentan con ninguna supervisión ni recomendación técnica. Ante esto, este proyecto llevó a cabo la caracterización de parámetros físicos y de resistencia del material de la zona de estudio mediante ensayos de laboratorio. Por otra parte, se realizó el análisis de la influencia que tiene los neumáticos en el terreno mediante un modelo de elementos finitos, que permitió detallar la manera como interactúa este sistema (neumático-suelo). Asimismo, se construye un modelo de análisis geotécnico con la configuración in situ, para determinar su comportamiento y estabilidad. Para finalizar, se propone algunas alternativas de de optimización para el mejoramiento de las técnicas de construcción, que son viables económica y funcionalmente desde el punto de vista técnico.

CAPITULO I

1. Problema de Investigación

1.1 Planteamiento del problema

Como se menciona en (Argos, 2015, citado por Vega, 2020) “en Colombia se generaban entre 110.000 y 130.000 toneladas de neumáticos al año, es decir 7 millones de llantas, la mayoría de estas se llevan a procesos de incineración que es la forma más común y sencilla de deshacerse de ellas” (p. 35). Gran parte de estos residuos no se les da la disposición final adecuada, terminando en vertederos y espacios públicos que impactan negativamente en términos ambientales, económicos y sanitarios. La legislación colombiana, mediante resolución 1457 de 2010 por el cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de llantas usadas y se adoptan otras disposiciones, decreta que los productores de llantas del país están en la obligación de gestionar sistemas con el propósito de prevenir y controlar la degradación del ambiente (Resolución 1457, 2010).

Según Datos Mundial (2024) “entre 1960 y 2022, la población de Colombia aumentó de 16,06 millones a 51,87 millones. Esto representa un aumento del 223,0 por ciento en 62 años” (párr.1). El acelerado crecimiento demográfico ha generado asentamientos en zonas de alta pendiente potencialmente inestables, generando una situación socio- económica de alto riesgo. Por lo anteriormente expuesto, se debe contar con la información de las zonas de alto riesgo y la ubicación de los asentamientos para que a nivel municipal y distrital se puedan implementar programas y proyectos orientados a la prevención y mitigación del riesgo asociado a esta problemática (GFDRR y otros, 2014).

Como manera de reutilización a estos residuos sólidos, los neumáticos están siendo empleados en proyectos novedosos de mejoramientos en propiedades de dureza y viscoelasticidad del asfalto modificado (Chen y otros, 2023); por otro lado, investigadores de China, proponen el uso de neumáticos como material de refuerzo para la cimentación de pilotes contra la licuefacción del suelo (Zhang, 2023). Asimismo, se evidencia el uso de estos neumáticos de desechos en la construcción de muros de contención en terrenos de alta pendiente no apropiados para su ocupación y urbanización.

En Colombia, este tipo de construcciones no se regula en ninguna normativa técnica, ni en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistentes (NSR-10). Estos sistemas de contención son construidos usualmente por mano de obra con conocimientos empíricos, sin tener en cuenta en su proceso constructivo un análisis previo de cargas y de estabilidad del terreno.

1.2 Descripción del problema

El caso de estudio de la presente investigación se plantea en la vereda Ospina Pérez del municipio de Palermo del departamento del Huila, donde por su posición geográfica y geológica, presenta una amenaza alta a eventos sísmicos por la presencia de dos sistemas de fallas, la Plata - Chusma a 10 Km al occidente del casco urbano de Palermo y la falla Suaza-Garzón-Algeciras, ubicado a 30 Km. (Acuerdo No.031, 2007)

El municipio de Palermo - Huila, cuenta con el 85% de su área total en zona rural (Alcaldía de Palermo, 2024). Estas zonas se caracterizan por tener una topografía montañosa y de alta pendiente, donde es común el desarrollo de comunidades sobre laderas que se requieren estabilizar.

Durante el desarrollo de la investigación, se identificó en el sector el uso de neumáticos de desecho como sistemas de estabilización de masas de suelos aplicados a muros de contención.

Estas construcciones se realizan con fundamentos empíricos y ante la susceptibilidad a presentarse eventos de movimientos en masas por sus condiciones geomorfológicas, se requiere que sus construcciones cuenten con diseños que cumplan con criterios de seguridad, resistencia y estabilidad. En consecuencia de lo anterior, se requiere un análisis geotécnico a estos sistemas de estabilización de muros de contención con neumáticos, para validar que cumplan con las exigencias mínimas de seguridad.

1.3 Formulación del problema

¿Cuál es el comportamiento geotécnico de un muro de contención para vivienda construido con neumáticos, de la vereda Ospina Pérez en del municipio de Palermo- Huila?

CAPITULO II

2.1 Justificación

Actualmente el estado Colombiano no cuenta con normativa técnica aplicada al uso de neumáticos como sistema de estabilización de muros de contención para la estabilización de laderas, ni con ningún tipo de documento técnico que regule su proceso constructivo. Sin embargo, este tipo de construcciones se están realizando en poblaciones vulnerables ubicados en zonas de difícil acceso y de rápido crecimiento poblacional. Al respecto se indica:

Adicionalmente los procesos de urbanización acelerada han llevado a un crecimiento no planificado de las ciudades y al aumento de asentamientos que son considerados ilegales . . . El uso y la ocupación del territorio refleja el modelo de desarrollo que ha imperado en los municipios del país; el riesgo de desastre es, por lo tanto, un resultado acumulado de formas y procesos históricos de desarrollo, lo que lleva a que éste se distribuya

diferencialmente en el territorio y a que una porción de la población tenga mayor exposición al mismo, por lo general, aquella de bajos ingresos. (GFDRR y otros, 2014, p. 21)

El coste de materiales convencionales (acero, concreto) en estas zonas remotas no es viable, por lo que las comunidades tienden a optar en sus construcciones por materiales que tienen a la mano y de fácil obtención, como lo son los neumáticos de desuso. Según (Rodríguez, 2016) realiza la evaluación económica y compara tres sistemas de contención y concluye que “ la solución en llantas de desecho es la más económica, es un 67% más económico que el muro en concreto reforzado y un 24% más económico comparado con el muro armado con geotextil” (p. 97).

Por otra parte, el aumento de parque automotor genera una mayor cantidad de residuos que se deben gestionar y se deban implementar nuevas estrategias de reutilización y disposición final. Algunas alternativas implementadas en Colombia para la gestión de llantas son el reencauche, el reciclaje en actividades de uso energético, artesanal, regrabado, y finalmente la disposición final de rellenos sanitarios (Vega, 2020).

Por tanto, se requiere que se lleven a cabo investigaciones orientadas a la reutilización y reciclaje de este tipo de pasivos ambientales en tecnologías de sistemas de contención.

Esta investigación llevó a cabo el análisis del comportamiento geotécnico al sistema de estabilización de un muro de contención construido con neumáticos mediante modelación con software geotécnico para proponer algunas alternativas de optimización en futuras construcciones de este tipo, de manera que se logre un sistema seguro, confiable y estable.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

Estudiar el sistema de estabilización de un muro de contención construido con neumáticos en el municipio de Palermo - Huila mediante un modelo apoyado con software de análisis geotécnico.

2.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el suelo de cimentación existente a partir de ensayos de laboratorio mediante muestras de suelo de la zona.
- Establecer la interacción suelo-neumático del sistema de estabilización en el muro de contención, mediante un modelo aproximado de elementos finitos.
- Modelar la situación actual del sistema de estabilización del muro construido con neumáticos, mediante un software de análisis geotécnico.
- Analizar el comportamiento geotécnico del sistema con las condiciones de estabilidad requeridas del sitio.
- Proponer alternativas de optimización para la construcción de los sistemas de estabilización con muros de neumáticos del caso de estudio.

CAPITULO III: MARCO DE REFERENCIA

En este capítulo se realizará una revisión bibliográfica del tema de investigación desde una perspectiva de antecedentes de investigaciones realizadas sobre muros construidos con neumáticos; de esta manera, se aludirá un marco teórico donde se recopilarán conceptos referentes con la presente investigación.

3.1 Antecedentes Investigativos

Una de las investigaciones pioneras del sistema compuesto por neumático y suelo (Pneusol), tiene lugar por el ingeniero Nguyen Than Long en 1993, donde lleva a cabo una investigación detallada sobre el sistema Pneusol, presentando buenos resultados en su tecnología y comportamiento. Este tipo de sistemas se han construido desde hace décadas. A finales de 1993 se habían construido más de doscientas cincuenta estructuras en países como Francia, Argelia, Estados Unidos, Suiza, Alemania, Rumania, Jordania, Brasil, Ruanda y en diferentes áreas de la Ingeniería Civil como en muros de contención, material de relleno ligero, absorbente de energía, distribuidor de tensiones, protección de taludes (Long, 1993)

Se han registrado construcciones de muros en diferentes lugares: en 1984 en Francia se llevó a cabo la construcción de un muro de 54 m de largo por 5 metros de alto; por otra parte, el muro en Bussang – Francia con una dimensión de 650 m de longitud y 7 m de altura (Long, 1993).

Según (Sieira y otros, 2001) realizaron una investigación con la colaboración de la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro, la Universidad de Ottawa y la Fundación Geo-Rio, en 1995. Construyeron un muro experimental de neumáticos compuesto por 4 secciones transversales independientes con diferentes configuraciones para sostener pendiente natural que presentaba signos de inestabilidad. Cada sección transversal tenía una longitud de 15 metros, totalizando unos 70 metros incluyendo las rampas de acceso y una altura máxima de 4 metros. Se

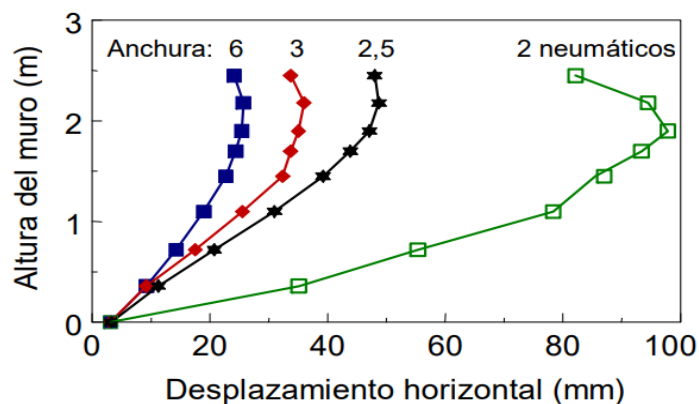
concluye en la investigación que los desplazamientos horizontales para los neumáticos enteros fueron un 30% superiores a las secciones con neumáticos sin la banda frontal, ya que, de esta manera facilita su compactación, logrando un material más rígido, homogéneo y menos deformable. Con respecto al material para atar dos neumáticos, se llega a la conclusión que aquellos sujetos con alambre tenían mejor comportamiento y proporcionaban un aumento de rigidez al material suelo -neumático. En cuanto al ancho del muro, se determina que, para una altura de 4 metros, lo mínimo en su base son 3 neumáticos para evitar el desplazamiento excesivo.

Figura 1

Propuesta desarrollada para muro de contención con neumáticos para sostener pendiente natural.



(a)



(b)

Nota. (a) Configuración neumáticos cortados- entero (b) Gráfica variación de ancho de muro vs, desplazamientos. Tomada de (Sieira y otros, 2001).

En la investigación realizada por (Huat y otros, 2008), proponen un sistema de muro de contención con llantas de desecho, además, determinan la resistencia a tracción del neumático y

precisan que tipo de material es mejor para el sistema de sujeción del amarre de los neumáticos. Los resultados que se obtienen para la resistencia a tracción del neumático arrojan un valor de 55.81 kN. Asimismo, comparan la fuerza máxima a tracción para el sistema de sujeción de las llantas para el material de cable de acero y cable de polímero, obteniendo una resistencia de 25 kN y 52 kN respectivamente. La prueba de campo que se expone consiste en una pendiente que había fallado por inestabilidad de 5 m de alto por 7 m de ancho, usando un total de 2100 neumáticos. Para esta propuesta de muro con neumáticos, retiran la banda superior para aumentar la compactación del sistema e instalan placas de asentamiento y celdas de presión para monitorear el desempeño del muro. El asentamiento vertical máximo registrado fue de 59 mm.

Figura 2

Prueba de Campo muro de llantas.



Nota. La figura detalla la manera en que se sujetan los neumáticos y la disposición final del muro para sostener un talud con problemas de inestabilidad. Tomado de (Huat y otros, 2008).

En la tesis realizada por (Rodríguez, 2016) se llevó a cabo la construcción de un equipo de corte directo a gran escala para calcular las propiedades de resistencia a cortante entre las llantas de desecho y material de lleno. Se realiza para determinar de manera experimental los esfuerzos internos de la estructura y conocer la interacción entre el suelo de lleno y las llantas de desecho. Para ello, empleó el uso de dos sistemas hidráulicos, uno aplica la carga en el sentido tangencial con una capacidad de 1500 kN, y el segundo con una capacidad de 434.5 kN en sentido axial, tal como se detalla en la figura 3.

Figura 3

Prueba de corte directo a escala real para evaluar el sistema suelo- neumático.



(a)

(b)

Nota. La figura representa (a) aplicación de carga sentido tangencial, (b) aplicación de carga plano axial. Tomada de (Rodríguez, 2016).

En la investigación se realizan tres tipos de pruebas y para cada una se determina el esfuerzo a cortante máximo y parámetros de resistencia (cohesión, ángulo de fricción) para cada alternativa planteada, las cuales fueron:

1. Conjunto llanta de desecho vs. material de lleno (sin conectores)

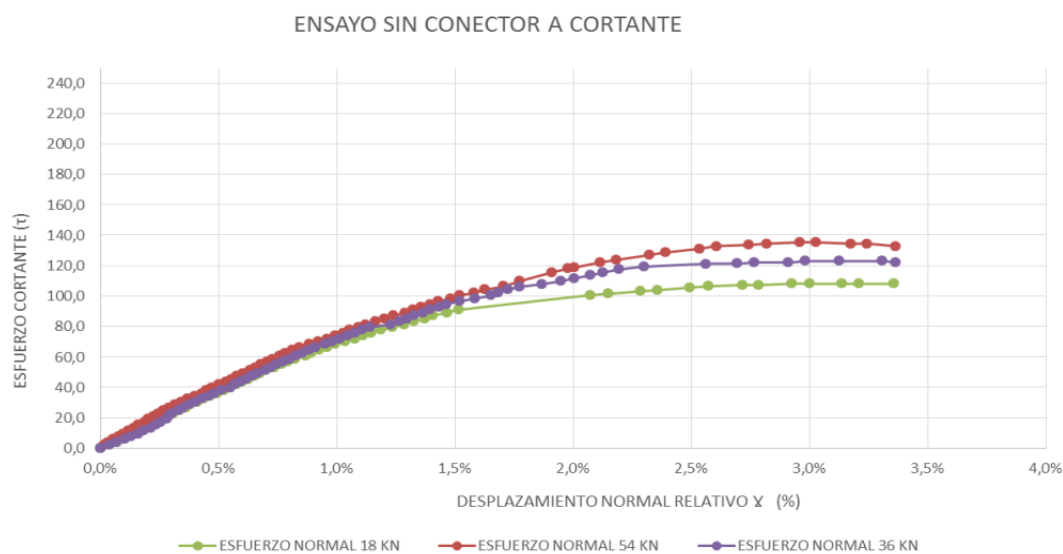
2. Incorporación de conectores de concreto en el sistema (1,2 y 3)
3. Incorporación de 3 conectores en varilla de acero de 1”

Para determinar la envolvente de falla se supone distintos niveles de esfuerzos, de modo que representen las condiciones reales del sitio que se desea investigar. Se considera para esta investigación, las presiones ejercidas para un muro de altura de 4 m con el fin de determinar la variación de la resistencia al cortante. Los esfuerzos que se consideraron para determinar el envolvente de falla para cada alternativa planteada fueron: 72.2 kPa, 140.1 kPa y 208.9 kPa.

Los resultados obtenidos para la primera alternativa del conjunto llanta de desecho vs. material de lleno (sin conectores) se detallan en la figura 4:

Figura 4

Prueba de corte directo a escala real para evaluar el sistema suelo- neumático.



Nota. Gráfica esfuerzo cortante vs desplazamiento para las diferentes cargas aplicadas. Tomada de (Rodríguez, 2016).

En la investigación no se encontró relación de que los parámetros del suelo se consideraran en condición saturada, por lo que, los parámetros y resultados alcanzados, se interpretan como parámetros drenados (efectivos).

Para aumentar la resistencia a cortante del sistema llanta-suelo, propone el uso de conectores de concreto y varillas de acero. Los conectores verticales de concreto tienen las siguientes propiedades:

- Dimensiones: 7.62 cm de diámetro y 20 cm de longitud,
- Resistencia a la compresión: 184.71 Kg/cm².
- Distribución: realiza con uno, dos y tres conectores de concretos cambiando su distribución en el sistema.

Y para los conectores con varilla de acero

- Diámetro varilla: 1 pulg
- Resistencia a cortante: 420 MPa

Figura 5

Esquemización uso de conectores de concreto y acero.



Nota. Tomado de la investigación realizada por (Rodríguez, 2016).

Los resultados obtenidos, muestran un mejor comportamiento a cortante a medida que aumentan el número de elementos de conectores de concreto, lo anterior se debe a que aumenta el confinamiento del material de lleno en la llanta de desecho, teniendo incidencia en el valor de su cohesión, tal y como se detalla en la tabla 1.

Tabla 1

Resultados parámetros de resistencia para el sistema neumático- suelo y conectores.

SISTEMA	ϕ'	c'
Sistema llanta con relleno de suelo	10,3°	95,5 kPa
Sistema llanta – suelo con un conector a cortante de concreto	19,36°	89,9 kPa
Sistema llanta – suelo con dos conectores a cortante de concreto	28,55°	91,95 kPa
Sistema llanta – suelo con tres conectores a cortante de concreto	35,7°	94,0 kPa
Sistema llanta – suelo con tres conectores a cortante en acero de 1”	34°	92,8 kPa

Nota. Los parámetros (ϕ' , C') se consideran efectivos de acuerdo con los resultados de (Rodríguez, 2016).

Por otra parte, realiza la propuesta metodológica para el diseño del muro de tierra armada reforzada con llantas de longitud 10 m, alto de 6 m y base del muro de 4m. Realiza la evaluación de sus cargas y chequea su estabilidad interna y externa, cumpliendo con los factores mínimo de seguridad establecidos. Sugiere utilizar un amarre de manila de polipropileno entre las llantas adyacentes, para garantizar que todas las llantas trabajen como un solo elemento. Se concluye finalmente, que la solución en llantas de desecho es un 67% más económica que el muro de concreto reforzado y un 24% comparado con un muro armado con geotextil.

A su vez (Peña, 2018) realiza una investigación para definir la interacción suelo-neumático como unidad base en la construcción de muros de contención. Propuso en su investigación la manera para determinar las propiedades de resistencia al corte en condición consolidada drenada de un suelo, mediante el uso de probetas cilíndricas de neumático y agregando arena fina entre estas; lo anterior, para evaluar la resistencia a cortante del sistema suelo-neumático bajo las cargas normales existentes, siempre que exista la interfaz neumático-neumático, es decir, sin que se extraiga la banda superior de este. Adicionalmente, realiza el diseño de un muro de neumático con una altura máxima de 5 metros y ancho de 3 metros que sostiene un suelo arenoso no cohesivo.

Figura 6

Probetas cilíndricas para determinar la resistencia a cortante del material neumático- suelo.



Nota. La figura representa la manera como se adaptó la caja de corte para implementar las caras de caucho en el ensayo de corte directo y determinar las propiedades de resistencia la corte en condición consolidada drenada de un suelo. Tomado de (Peña, 2018).

Para determinar la resistencia al cortante máximo, se ensayaron 6 probetas de neumático; las primeras 3, evalúa el esfuerzo de corte para las superficies de neumático-neumático, y las otras

3, las ensaya con infiltraciones de arena fina entre ellas aplicando diferentes tipos de tensiones normales 0.03 MPa, 0.05 MPa y 0.1 MPa.

Los resultados obtenidos, se detallan en la tabla 2.

Tabla 2

Resultados de esfuerzo de cortante máximo para probetas de neumático.

Sistema	Esfuerzo Cortante Máximo	Ángulo de fricción ϕ
Probetas neumático –neumático	0.714 Kgf/cm ²	36.5°
Probetas neumático- arena- neumático	0.494 Kgf/cm ²	24.6°

Nota. Adaptado de (Peña, 2018).

Se puede concluir a partir de los resultados de la tabla 2, que la resistencia al corte va a ser mayor en sistemas donde se garantice la interacción neumático- neumático y esta a su vez, guarda relación con el valor del ángulo de fricción. Se infiere que, para las mismas sollicitaciones de carga, la resistencia a corte del sistema disminuye con la presencia de arena en la interfaz. Con respecto a los muros de contención en la vida real corresponde al segundo sistema (neumático-suelo-neumático), por lo que se requiere plantear en su diseño un mecanismo que refuerce la resistencia al corte de estas estructuras.

Con relación al diseño de un muro de neumáticos como sistemas de estabilización, realiza las siguientes recomendaciones:

- La altura del muro debe ser 1.25 veces su base como máximo.
- Su base mínimo es de 0.6 veces la altura.

- Máximo ángulo de abatimiento: 70° .
- Se debe evitar ángulos de 90° .
- Manejar una pendiente externa de 0.2 H: 1.0 V.
- Debe tener una distancia mínima entre el muro y una estructura sobre el terreno contenido.

Realiza el análisis de cálculo estático y dinámico, por medio de teorías de análisis para determinar la estabilidad del muro. Para el caso dinámico, mediante la teoría clásica de Mononobe & Okabe, determina que el muro no soportaría un sismo horizontalmente, debido a que las fuerzas actuantes son mayores a las fuerzas resistentes. Propone como alternativa para aumentar la resistencia al cortante del sistema, incluir una barra de acero cada 60 a 75 centímetros a lo largo del muro y 1 metro al interior del suelo que lo soporta; por otra parte, recomienda el amarre vertical como horizontal de los neumáticos, mediante cuerdas de polipropileno.

Como conclusión, presenta que los muros de contención con neumáticos de desecho armados al corte es 25% más económico que el muro sin refuerzo de cortante, y determina que la opción de los muros de contención usando neumáticos desechados, permite crear estructuras mecánicamente confiables, tecnológicamente simples y con un bajo costo económico y ambiental, para ser implementadas como obras de mitigación de riesgos en zonas de inestabilidad de tierras.

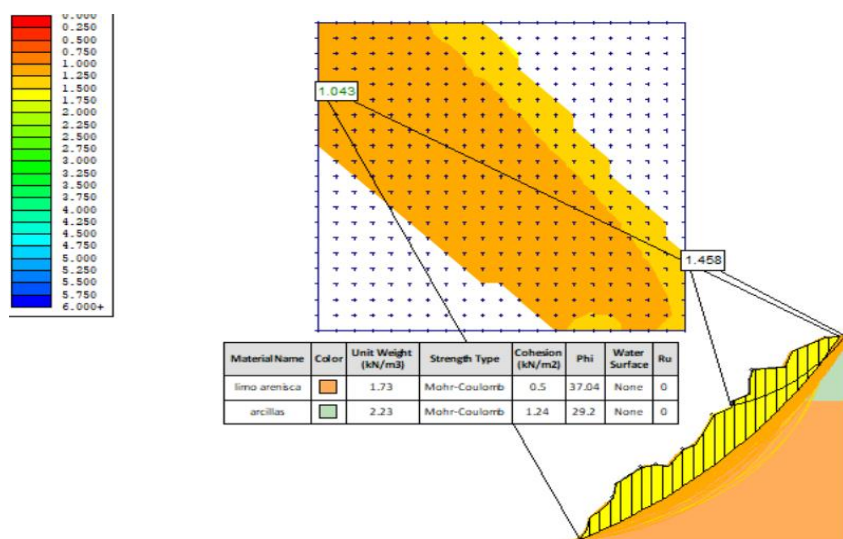
(Ospina y otros, 2019) proponen la implementación de un muro de llantas con neumáticos, como manera de mitigación a la inestabilidad de una ladera del municipio de La Mesa – Cundinamarca.

En primer lugar, realizan la caracterización de parámetros físicos y de resistencia del suelo de investigación. Con los datos obtenidos, realizan una modelación del talud en el programa SLIDE para evaluar la estabilidad del terreno donde se va a implantar el muro propuesto construido

a partir de neumáticos usados y obtiene el factor de seguridad del diseño del talud mediante el método de Spencer y Bishop Simplified. Los resultados obtenidos muestran un factor de seguridad de FS: 1.458 para el método de Spencer y FS: 1.043 para el método de Bishop, lo que indica que las fuerzas resistentes del terreno soportan las generadas por la acción del muro.

Figura 7

Esquema propuesto en modelación por Slide del talud de diseño.



Nota. Se representa el factor de seguridad obtenido mediante el método de Bishop Simplified de 1.043. Tomado de (Ospina y otros, 2019)

Se concluye que el sistema compuesto por suelo-neumático, es un método seguro, no requiere mano de obra especializada, por otro lado, presenta una ventaja económica y ambiental en comparación con muros convencionales construidos en concreto reforzado.

Figura 8

Propuesta de mitigación de inestabilidad de ladera del municipio de La Mesa- Cundinamarca.



Nota. Se ilustra la ladera a intervenir y luego de construido el muro a base de llantas. Tomado de (Ospina y otros, 2019)

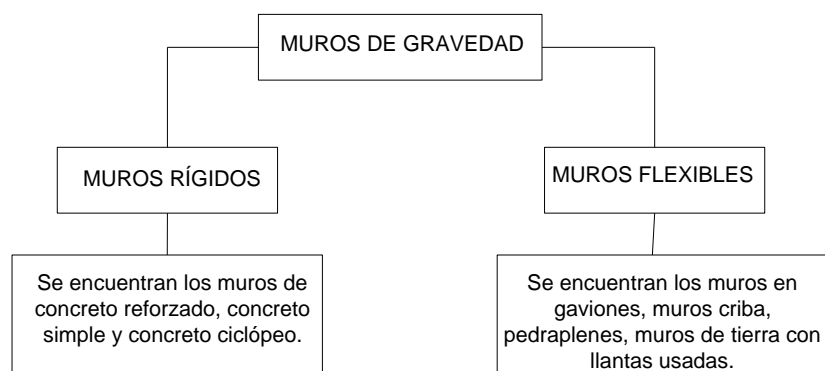
3.2 Marco teórico

3.2.1 Definición muros de gravedad

Los muros de contención sirven para incrementar la resistencia a esfuerzos de corte tanto en las medidas de prevención como en la de corrección, y principalmente en movimientos superficiales del terreno. Hay varios tipos de estructuras de muros de contención para soportar las presiones laterales, entre ellos tenemos la clasificación dada por (Suarez, 2021) para muros de contención de gravedad, que son sistemas que dependen de su propio peso para lograr una adecuada estabilidad del terreno:

Figura 9

Clasificación muros de gravedad.



Nota. Se realiza una breve descripción de los tipos de muros de gravedad. Basado en (Suarez, 2021).

En la siguiente tabla se exponen las ventajas y desventajas para los diferentes tipos de muros flexibles:

Tabla 3

Ventajas y desventajas de muros tipo flexibles.

Muro	Ventajas	Desventajas
Gaviones	Fácil alivio de presión de agua. Soportan movimientos sin pérdida de eficiencia. Es de construcción sencilla y económica.	Las mallas de acero galvanizado se corroen fácilmente. El amarre de la malla y la unidad no se hace un buen control de calidad.

Criba	Simple de construir y mantener. Utiliza el suelo en la mayor parte de su volumen. Utiliza elementos prefabricados.	Se requiere material granular, auto drenante. Generalmente, no funciona en alturas superiores de 7 metros.
Llantas	Fáciles de construir. Ayudan con el reciclaje de elementos.	No existen procedimientos confiables en su diseño y su vida útil no es conocida.
Enrocado o pedraplén	Son fáciles de construir y económicos.	Requiere la utilización de cantos de tamaño relativamente grandes.
Bolsacreto	Fáciles de construir en contacto con cuerpos de agua.	Son relativamente costosos.

Nota. Se describen las principales características para los muros flexibles, entre estos, los muros con llantas. Tomado de (Suarez, 2021).

Es importante conocer los parámetros físicos y de resistencia del suelo que constituyen el relleno del muro como *el peso específico (γ)*, *ángulo de fricción (Φ)* y *la cohesión (C)*.

Para determinar estos parámetros se realizan ensayos de laboratorios, los cuales deben ser analizados cuidadosamente, de modo tal, que represente su comportamiento durante su construcción y en su vida útil.

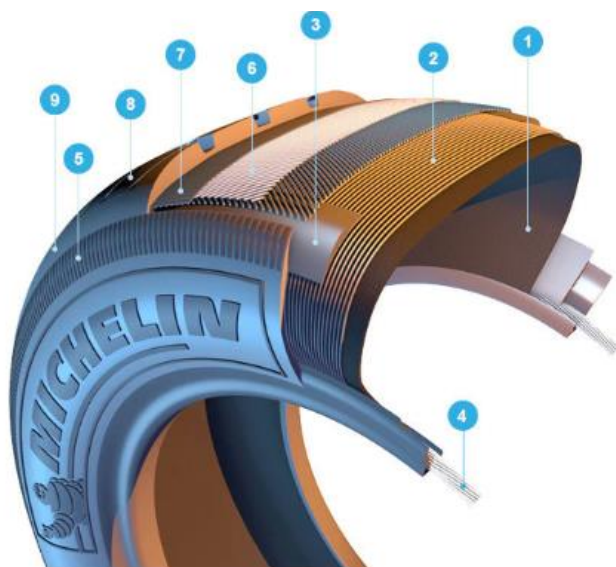
3.2.2 Neumáticos

El neumático es una pieza compuesta generalmente por caucho, y según su construcción pueden ser de tres tipos: diagonales, radiales y autoportantes. El primer tipo, los diagonales, presenta varias capas organizadas de forma diagonal, es decir, formando un ángulo de 45° . Su

composición lo hace rígido, aunque inestable en sus costados. El segundo tipo, los radiales, sus capas se organizan de forma recta, por lo que genera mayor estabilidad y rigidez. Por último, los tipos autoportantes, sus capas se colocan en línea recta y sin inclinación, aportando más rigidez a su cubierta. La estructura típica de un neumático consiste se detalla en la figura 7.

Figura 10

Estructura llanta típica.



- 1 Revestimiento interno
- 2 Capa de la carcasa
- 3 Zona del talón inferior
- 4 Talones
- 5 Costado
- 6 Capa de la carcasa
- 7 Cap Ply (cinturón de grado cero)
- 8 Capas superiores de la corona
- 9 Banda de rodamiento

Nota. Se detalla las diferentes partes que componen una llanta típica. Tomado de (Michelin, 2024)

3.2.2.1 Uso de los neumáticos de desuso en la industria de la construcción

Los neumáticos se caracterizan por tener buenas propiedades mecánicas que lo convierten en un material de desuso de gran valor. Según (Pérez & Saiz, 2018), los neumáticos tienen excelentes propiedades mecánicas, tales como: elasticidad, absorción de vibraciones, agarre, resistencia a la abrasión, durabilidad, termoestabilidad, buen comportamiento visco-elástico (mayor tensión y alargamiento a la rotura), resistencia al desgarrar y la abrasión, resistencia a la fisuración y el agrietamiento, elevada durabilidad, resistencia a las condiciones climáticas (rayos

UV, ozono, cambios de temperatura y humedad), absorción de impactos, atenuación de ruidos y vibraciones, aislante térmico y eléctrico, etc.

Estas propiedades mecánicas, hacen que sea una buena opción para ser empleado como material en el uso de la ingeniería, al tener una viabilidad tanto técnica como económica frente a los materiales convencionales. Algunas de las aplicaciones más destacables del neumático en el sector de la construcción se han implementado en el uso de asfalto modificado, como relleno de capa asfáltica, isonorizante en autopista, muros de contención, entre otras.

Según la Guía para el manejo de llantas usadas (Cámara de Comercio de Bogotá [CCB], 2006), los neumáticos están compuestos de los siguientes materiales descritos en la tabla 4.

Tabla 4

Composición típica de neumáticos.

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

Nota. Tomado de (CCB, 2006).

Se puede concluir que el material de mayor proporción es el caucho, seguido del negro de humo que es un ligante que aumenta la capacidad cohesiva en el tiempo, y posteriormente, el acero y antioxidantes.

3.2.2.2 Ciclo de vida de los neumáticos

En Colombia, gran parte de los neumáticos luego de su uso son almacenadas en depósitos clandestinos, techos o patios de casas de vivienda y en espacios públicos (lagos, ríos, calles y parques) con graves consecuencias en términos ambientales, económicos y sanitarios. Según la Resolución 1457 de 2010 establece en su artículo primero:

La presente resolución tiene por objeto establecer a cargo de los productores de llantas que se comercializan en el país, la obligación de formular, presentar e implementar los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, con el propósito de prevenir y controlar la degradación del ambiente (Resolución 1457, 2010).

Asimismo, se evidencia la necesidad de fortalecer los sistemas de recolección selectiva para este tipo de residuos, al considerar el aumento anual en la generación de neumáticos usados debido al crecimiento del parque automotor. Teniendo en cuenta lo anterior, se crea la resolución 1326 de 2017, que establece que por encima de cualquier otra estrategia se priorizará la actividad de reencauche, y como segunda prioridad, se fomentará el aprovechamiento. En el párrafo 1 del artículo 12 - Del aprovechamiento de llantas usadas, podrá realizarse mediante actividades como: mobiliarios urbanos, construcción de taludes, construcción de vías urbanas con asfalto modificado, entre otras disposiciones (Resolución 1326, 2017).

Según el informe de Estrategia Nacional de Economía Circular (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2019) para el año 2018, el consumo de llantas en Colombia fue de 17.924.194 unidades (14.732 toneladas), correspondiente a un 30.88% de automóviles y camionetas, 8.90% de camiones, 29.90% de motocicletas, 0.73% de vehículos fuera de carretera, 29.32% de bicicletas y 0.27% de vehículos agrícolas.

Respecto a los neumáticos usados gestionadas (reencauche y aprovechamiento) para el año 2018, se reportan un total de 3.959.681 unidades, es decir, un 4.53% y para el año 2021, el valor

asciende a 8.424.540 unidades de llantas gestionadas, con un incremento del 12% (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [ANLA], 2022).

3.2.3 Caracterización del suelo

3.2.3.1 Parámetros Físicos

La caracterización física del suelo permite determinar mediante métodos relativamente sencillos la distribución de las partículas que lo conforman, ya sea grava, arena, limo y arcilla. Existen diversos métodos de clasificación: el sistema unificado de clasificación del suelo (SUCS o USCS) y el sistema de clasificación de AASHTO. Ambos métodos toman como base los resultados del análisis granulométrico y los límites de Atterberg.

3.2.3.1.1 Contenido de Humedad

Procedimiento descrito en el Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del Instituto Nacional de Vías [INV] (2013), en su sección 100- Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo- agregado (INV, 2013, sección 122). Este ensayo, permite determinar el contenido de humedad en una muestra de suelo, relacionando la masa de agua en la muestra húmeda con la masa de la muestra seca.

3.2.3.1.2 Gravedad Específica

Referido de (INV, 2013, sección 128) Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua. Determina la gravedad específica de un suelo o peso específico, de los suelos que pasan el tamiz No. 4.

3.2.3.1.3 Análisis granulométrico

Determina cuantitativamente la distribución de los tamaños de partículas de un suelo, mediante tamizado (partículas retenidas en el tamiz No. 200) y por medio de un proceso de sedimentación empleando un hidrómetro (partículas pasantes del tamiz No. 200), según (INV, 2013, sección 123)

Para clasificar adecuadamente el suelo, se debe conocer su distribución granulométrica. La granulometría por tamizado consiste en realizar la curva granulométrica de una muestra de suelo seco, y se hace pasar por tamices con diferentes aberturas dispuestos de mayor a menor abertura mediante agitación: de 125 mm hasta aberturas de 0.075 mm (tamiz n°200). Donde se mide la cantidad de suelo retenido en cada tamiz.

La granulometría por hidrómetro. Se determina los tamaños de partícula finas (arcillas y limos) que es el porcentaje que pasa por el tamiz n°200.

3.2.3.1.4 Límites de Atterberg

Los procedimientos se describen en (INV, 2013, sección 125) para determinar el límite líquido, y (INV, 2013, sección 126) para establecer el límite plástico e índice de plasticidad.

Debido a las limitaciones de los sistemas de clasificación, basado en el tamaño de partículas, surgieron sistemas de clasificación basados en la plasticidad del suelo, es decir, los Límites de Atterberg (Moreno & Alonso, 2022).

Determinar los límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico) es de crucial importancia en la ingeniería civil, ya que cuantifica el potencial de expansión y contracción de los materiales de ingeniería (Arthur y otros, 2021)

(Das B. M., 2012), refiere al Límite líquido (LL) como el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo cambia de un estado líquido a uno plástico. Se determina usando la

copa de Casagrande, y se define como el contenido de humedad en el que se cierra una ranura de 12.7 mm mediante 25 golpes.

El límite plástico (LP) es el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo cambia de un estado plástico a uno semisólido y de un estado semisólido a sólido. Es el contenido de humedad en el que el suelo se agrieta al formar un rollito de 31.8 mm de diámetro.

Según (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], s.f.) establece las siguientes consideraciones sobre los límites líquidos y plásticos y la cantidad de arcilla presentes en el suelo:

- Un suelo con un alto contenido de arcilla generalmente posee altos LL y LP.
- Las arcillas coloidales poseen un LL y un LP superiores a los de las arcillas no coloidales.
- La arena, la grava, no tienen plasticidad LP=0
- Los limos presentan plasticidad sólo ocasionalmente, su LP es igual o ligeramente superior a 0. (FAO, s.f., cap 8.4)

3.2.3.2 Parámetros de Resistencia

Para predecir el comportamiento del suelo y sacar los parámetros de resistencia, se puede determinar mediante la prueba de corte directo, este ensayo se puede realizar sobre cualquier tipo de suelo, inalterado, remoldeado o compactado, descrito en (INV, 2013, sección 154).

3.2.3.2.1 Prueba de corte directo

En el Manual de Estabilidad de Taludes Geotecnia Vial (INVIAS, 1998) establece que “este ensayo obtiene de forma directa el valor de la resistencia al corte para un esfuerzo efectivo normal determinado, en condición consolidada y drenada” (p. 102).

El procedimiento consiste en confinar la muestra de suelo entre dos anillos de acero sobre un plano de corte. El drenaje durante el ensayo se obtiene por medio de piedras porosas que se sitúan encima y debajo de la muestra. La carga lateral se aplica en forma lenta, para así de esta forma garantizar que no se generen presiones de poros. Se induce la falla en un determinado plano donde actúan esfuerzos normales y cortante. La finalidad es simular las deformaciones que existen en el terreno que se está analizando.

3.2.3.3 Medición de resistencia in situ

1. Veleta de campo

Aparatos de inspección de la superficie del terreno. Determina la resistencia al corte de suelos cohesivos. Sus resultados se relacionan a la movilización del suelo con la relación a la velocidad de rotación.

2. Penetrómetro de bolsillo

Son dispositivos diseñados para inspección en campo y determinar la fuerza al corte en excavaciones superficiales de pequeño volumen. El instrumento se instala dentro de la excavación quedando en contacto directo con sus paredes. Luego se aplica presión dentro de la cámara y se mide la fuerza que se opone al movimiento.

3.2.4 Aplicación de las teorías de presión lateral del suelo

Para el cálculo de muros de contención se hace necesario el análisis de teorías de presión lateral del suelo. Entre ellas tenemos a las teorías de Coulomb y Rankine.

3.2.4.1 Presión Activa

Según Jaime Suarez (2021) en su libro Deslizamientos: Técnicas de Remediación, define la presión activa como “la presión lateral ejercida por el suelo detrás de la estructura cuando la pared se mueve suficientemente hacia afuera para alcanzar un valor mínimo” (p.123).

Con respecto, (Suarez, 2021) define los siguientes conceptos:

Teoría Rankine

Según Rankine el valor de la presión activa en un suelo granular seco está dada por la expresión:

$$P_a = \gamma * h * K_a - 2c\sqrt{K_a}$$

$$K_a = \cos \beta * \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}$$

Donde;

φ =ángulo de fricción

c =cohesión

β =ángulo de la pendiente del terreno arriba del muro.

Para $\beta = 0$

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

Para suelos cohesivos aparentemente hay una presión negativa (tensión) en la parte alta del muro. Esta presión negativa debe despreciarse, porque con el tiempo debe despreciarse, porque con el tiempo se desarrollan grietas de tensión en la interface muro – suelo hasta una profundidad Z_0 .

La teoría de Rankine asume que ha ocurrido un movimiento suficiente para que el suelo alcance un estado de equilibrio plástico. . . Dependiendo de la cantidad de fricción movilizada, la línea real de localización de la fuerza puede no coincidir con la dirección de la fuerza dada por la teoría de Rankine.

La teoría de Rankine no debe aplicarse cuando el ángulo β , que forma la fuerza activa con la normal en la espalda del muro de contención, excede el valor de δ (fricción suelo-muro).

Teoría de Coulomb

En la teoría de Coulomb la fuerza que actúa sobre el muro se determina considerando el equilibrio límite de una tajada de suelo limitada por la espalda de la pared, la superficie del terreno y una superficie del terreno y una superficie plana de falla. . . Según Coulomb, el coeficiente de presión activa está dado por la siguiente expresión:

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \theta)}{\cos^2\theta * \cos(\delta + \theta) * \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) * \sin(\varphi - \alpha)}{\cos(\delta - \theta) * \cos(\theta - \alpha)}} \right]}$$

Donde:

θ : ángulo entre la pared del muro y el suelo.

δ : fricción suelo- muro. (p. 125-126)

3.2.4.2 Presión Pasiva

Conforme con (Suarez, 2021) define la presión pasiva de la siguiente manera:

La presión pasiva es la presión lateral ejercida sobre la pared cuando el muro se mueve suficientemente hacia el suelo hasta que la presión alcanza un valor máximo. . . La presión pasiva está dada por la relación:

$$P_p = \gamma * h * K_p + 2C\sqrt{K_p}$$

Donde según Rankine:

$$K_p = \cos\beta * \left[\cos\beta + \frac{\sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}}{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}} \right]$$

Y según Coulomb:

$$K_p = \frac{\cos^2(\varphi + \theta)}{\cos^2\theta * \cos(\delta - \theta) * \left[1 - \sqrt{\frac{\text{Sen}(\theta + \delta) * \text{Sen}(\varphi + \alpha)}{\cos(\delta - \theta) * \cos(\alpha - \theta)}} \right]^2}$$

Como la superficie supuesta de rotura de suelo no es recta sino curva, el valor real de la presión pasiva según Coulomb es mayor que la real, especialmente para valores altos de β , y para que la presión pasiva actúe totalmente se requieren movimientos importantes del muro. . . El factor cohesión no sea tenido en cuenta para determinar las presiones de tierra. (p. 123, 126-127)

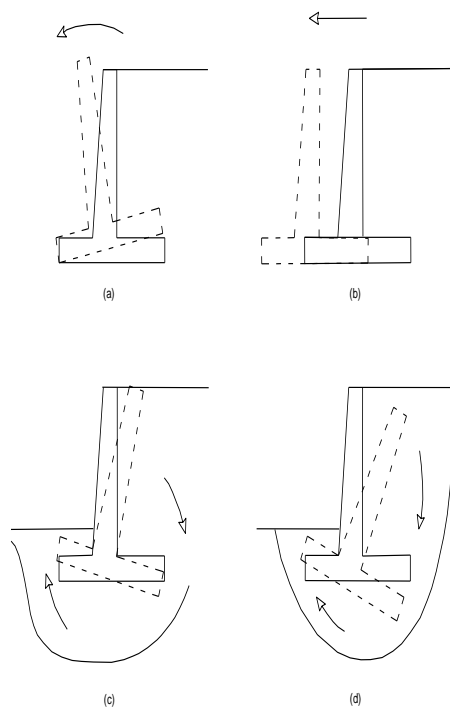
3.2.5 Estabilidad de muros

Tal y como detalla (Das B. M., 2012) se debe analizar la estabilidad del muro de las siguientes formas:

- (a) Volcamiento respecto a su puntera.
- (b) Deslizarse a lo largo de su base.
- (c) Fallar debido a la pérdida de capacidad de carga.
- (d) Sufrir una falla cortante por asentamiento profundo de un suelo débil.

Figura 11

Tipos de fallas de muros de contención.



Nota. Esquematación de fallas en muros de contención. Basado en (Das B. M., 2012).

(a) Revisión por volcamiento:

El factor de seguridad por volcamiento respecto a la puntera está dado por:

$$FS_{(\text{volcamiento})} = \frac{\sum M_R}{\sum M_O}$$

Donde;

$\sum M_R$ = suma de los momentos de las fuerzas que tienden a resistir el volcamiento del muro.

$\sum M_O$ = suma de los momentos de las fuerzas que tienden a vocar el muro.

Según la tabla H.6.9-1 de (AIS, 2010, título H) el valor mínimo deseable del factor de seguridad respecto a la falla por volcamiento es de 3.

(b) Revisión por deslizamiento a lo largo de la base:

El factor de seguridad contra el deslizamiento se puede expresar mediante la ecuación:

$$FS_{(deslizamiento)} = \frac{\sum F_R}{\sum F_d}$$

Donde;

$\sum F_R$ = suma de las fuerzas horizontales resistentes.

$\sum M_o$ = suma de las fuerzas horizontales de empuje.

Se requiere un factor de seguridad mínimo de 1.6 contra el deslizamiento, según establece (AIS, 2010, título H). Si el valor deseado no se obtiene, (Das B. M., 2012) propone las siguientes alternativas:

- Aumentar el ancho de la base.
- Utilizar un dentellón.
- Uso de un anclaje muerto.

(c) Revisión por capacidad de carga

La presión vertical transmitida al suelo debe ser revisada contra la capacidad de carga última del suelo.

$$FS_{(capacidad\ de\ carga)} = \frac{q_u}{q_{max}}$$

Donde;

q_u = capacidad de carga de una cimentación superficial

$$q_u = c'_2 * N_C * F_{cd} * F_{ci} + q * N_q * F_{qd} * F_{qi} + \frac{1}{2} * r_2 * B' * N_r * F_{rd} * F_{ri}$$

De manera similar,

$$q_{max} = q_{puntera} = \frac{\sum V}{B} \left(1 + \frac{6e}{B} \right)$$

$$q_{min} = q_{talon} = \frac{\sum V}{B} \left(1 - \frac{6e}{B} \right)$$

(d) Revisión por asentamiento profundo de un suelo débil

Cuando un estrato de suelo débil se ubica a poca profundidad, es decir, dentro de una profundidad de 1.5 veces el ancho de la losa de base del muro de retención, se debe considerar la posibilidad de tener un asentamiento excesivo.

En algunos casos, el uso de un material de relleno de peso ligero detrás del muro de retención puede resolver el problema.

CAPITULO IV: METODOLOGÍA

La investigación es un estudio de caso mixto de tipo cuantitativa y cualitativa. Se analiza como fundamento la estructura, característica e interacción, definida para el sistema de estabilización construido con neumáticos como muro de contención. Se obtiene información relevante a partir de la observación y trabajo realizado en campo, representadas en variables que se analizan a lo largo del proceso de investigación. Estas variables se describen en la tabla 5.

En el marco cualitativo, se consideran la información tomada en campo mediante la observación y determinación de antecedentes de construcción por medio de entrevistas e inspección visual. Por otra parte, la dimensión cuantitativa, se contemplan los datos obtenidos por medio de la simulación en un software de análisis geotécnico, que induzca los principios de aplicación de esfuerzos cortantes y desplazamientos máximos para el muro construido a partir de neumáticos.

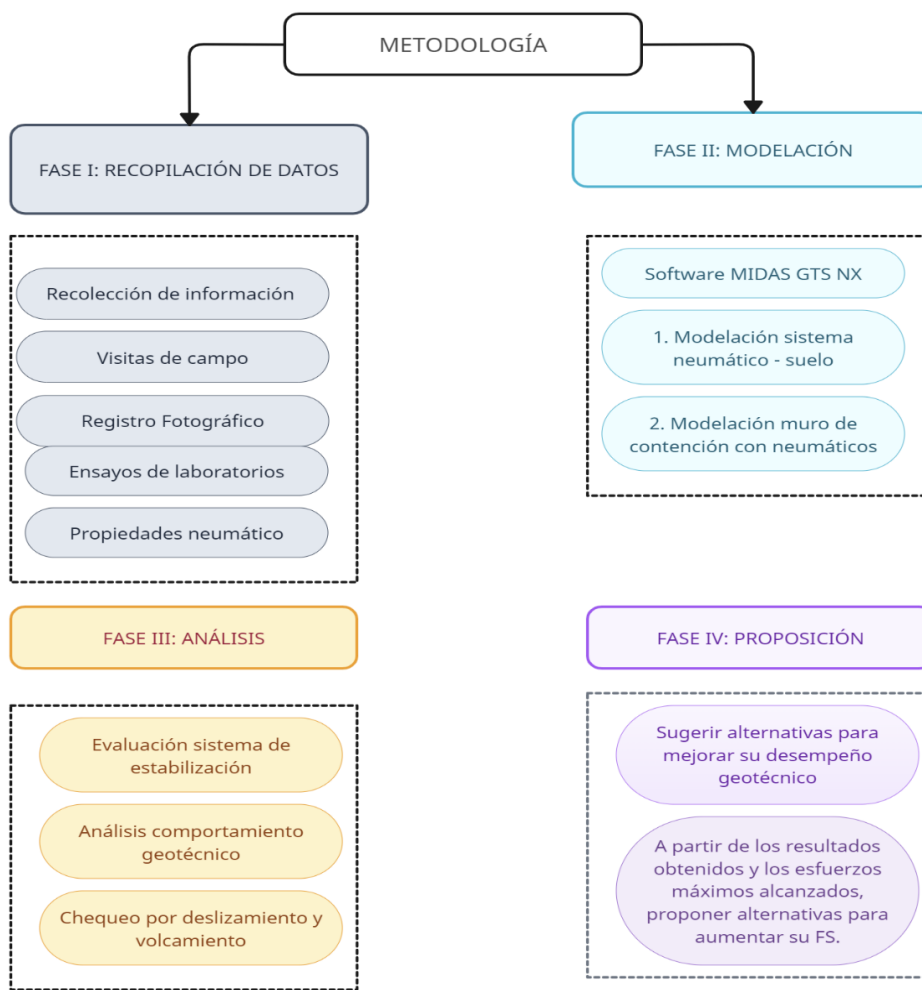
Tabla 5

Operacionalización de variables.

Variables o categorías	Tipo de variable	Definición	Dimensión	Indicador	Dimensiones
Comportamiento geotécnico del sistema de estabilización de muros con neumáticos.	Dependiente	El comportamiento geotécnico de los muros de contención construidos con neumáticos depende de varios factores (internos y externos) que afectan su estabilidad.	Comportamiento Interno	Toma de datos y entrevista propietario.	Cualitativa
				Modelación: Determinación desplazamientos y cortante máximo	Cuantitativa

Comportamiento Externo	Solicitaciones cargas generadas por la vivienda al terreno	Cuantitativa
	Levantamiento arquitectónico y vistas de detalle	Cuantitativa
	Modelación situación actual.	Cuantitativa

Variables o categorías	Tipo de variable	Definición	Indicador	Dimensiones
Neumático como elemento principal de interacción.	Independiente	Las dimensiones del neumático (diámetro exterior, interior y alto) es una determinante invariable a lo largo de la investigación.	Toma de datos	Cualitativa
			Modelación sistema neumático-suelo	Cuantitativa
			Evaluación cortante máximo y desplazamientos desarrollados	Cuantitativa

Figura 12*Metodología de investigación.**Nota.* Elaboración propia.

4.1 FASE I: RECOPIACIÓN DE DATOS

En esta fase se reunió información acerca de la geología del lugar, tipo de suelo característico del sector, parámetros físicos y de resistencia, de manera que se logró identificar y conocer las propiedades que presenta el suelo donde está cimentada la estructura del muro de contención con neumáticos.

Se llevó a cabo una serie de laboratorios para una muestra representativa de suelo del sector. Lo anterior, permitió conocer información detallada del material. Los ensayos se realizaron en el Laboratorios de Suelos de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad La Gran Colombia y apoyo de laboratorios externos.

Los laboratorios de caracterización física realizados fueron:

- Granulometrías.
- Contenido de humedad.
- Límites de Atterberg.
- Gravedad específica.

Y para obtener los parámetros de resistencia:

- Corte Directo CD

Además, se realizó visitas en campo para reunir la mayor información acerca del proceso constructivo del muro, sus dimensiones (longitud, altura, número de hiladas de llantas), inspección visual y registro fotográfico, llevando a cabo un análisis técnico para obtener datos reales de su estado actual.

Por otra parte, es necesario la identificación del tipo de neumático que conforma la estructura de los muros de contención, sus dimensiones (diámetro, altura, espesor) y propiedades del material (módulo de elasticidad) necesario para la fase II de modelación. Estos datos se obtuvieron teóricamente.

4.2 FASE II: MODELACIÓN

El software que se utilizó para la fase II de modelación fue Midas GTS NX versión 2023 v1.1. Es el método de análisis por medio de elementos finitos 2D y 3D, que permite detallar el

comportamiento real de los proyecto que son simulados para el análisis de diferentes problemas geotécnicos (Midas, s.f.). Se adquirió una licencia de tesis para plantear métodos de análisis, casos de cargas, condiciones de contorno, parámetros de cálculo y herramientas para el análisis de resultados en el desarrollo de esta investigación.

Se realizaron dos tipos de modelaciones para esta investigación. La primera, consistió en la simulación de un modelo de elementos finitos con la interacción suelo-neumático para determinar los esfuerzos de corte y desplazamientos que se desarrollan en el sistema evaluado y que se obtienen con la aplicación de cargas. Se desarrolla un modelo inicial *de calibración* en Midas GTS NX con los resultados de la investigación llevada a cabo por (Rodríguez, 2016) quien construye un equipo de corte directo a escala real para evaluar el sistema suelo- neumático. Se pretende con esta primera modelación de calibración, comparar los resultados obtenidos en el software geotécnico Midas GTS NX con los datos de los resultados de la investigación, de manera que, permita tener seguridad en los datos de salida.

Una vez se cuente con un modelo confiable, se desarrollará el sistema suelo- neumático con los datos propios obtenidos en la fase I de esta investigación.

La segunda simulación, se orientó el modelo de análisis geotécnico 3D que recreara la complejidad del estudio actual de muro de contención con neumáticos como un sistema global. Se introdujo a la modelación, los datos de caracterización de parámetros físicos y de resistencia del suelo previamente obtenidos en la fase I.

4.3 FASE III: ANÁLISIS

Se llevó a cabo el análisis de los resultados obtenidos en las modelaciones del software para las simulaciones realizadas en la fase II, y se evaluó el sistema de estabilización implementando el uso de neumáticos en muros de contención.

Se evalúa el sistema formado por neumático-suelo determinado la interacción con las cargas aplicadas y la manera como se desarrollan los esfuerzos cortantes y desplazamientos máximos. Asimismo, se determinan las solicitaciones generadas por las cargas vivas y muertas de la vivienda hacia el terreno y se realiza el chequeo por deslizamiento y volcamiento comparándolo con los factores de seguridad establecidos en la normativa vigente.

4.4 FASE IV: PROPOSICIÓN

Por último, se dan unos conceptos técnicos e ingenieriles, de modo tal, que estos tipos de construcciones se puedan realizar de forma más técnica para lograr una estructura más estable, sin tener un impacto fuerte ante los procesos constructivos que usan actualmente en la zona de estudio.

CAPÍTULO V: CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

5.1 Recopilación de información

Para el desarrollo de la investigación se realizó visitas de campo en la vereda Ospina Pérez del municipio de Palermo- Huila para identificar y registrar los muros construidos con neumáticos presentes en la zona.

Figura 13

Muros con llantas identificados en la zona de estudio.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Nota. (a) Llantas organizadas de forma vertical, no presenta elementos de amarre. (b) Llantas organizadas de forma escalonada, recibe esfuerzos de placa de concreto. (c) Llantas organizadas en fila de forma escalonada, recibe esfuerzos de vivienda ubicada sobre el muro y ladera natural. (d) Neumáticos organizados de forma vertical, usados como elementos de soporte de placa de concreto. (e) Neumáticos en forma escalonada, soportan rampa de acceso a vivienda. (f) Neumáticos que no presenta una organización aparente en su estructura. Recibe esfuerzos por ladera natural y vivienda aledaña.

5.1.1 Muro de estudio

Para el desarrollo de la siguiente investigación, se toma como caso de estudio el muro construido con neumático que se detalla en la figura 13 (a).

Se realizó la inspección visual del estado del muro y por medio de entrevista con el propietario de la vivienda, se determinan datos de interés para tener un panorama global de su construcción y puesta en servicio.

Tabla 6

Información recolectada en campo.

DATOS	
Tiempo Construido:	4 años
Método constructivo:	Pisado en tierra y piedra. Se construyó para sostener ladera natural.
Llanta:	12 R 22.5
Diámetro exterior:	1,00 m
Diámetro interior:	0,67 m
Alto:	0,27 m

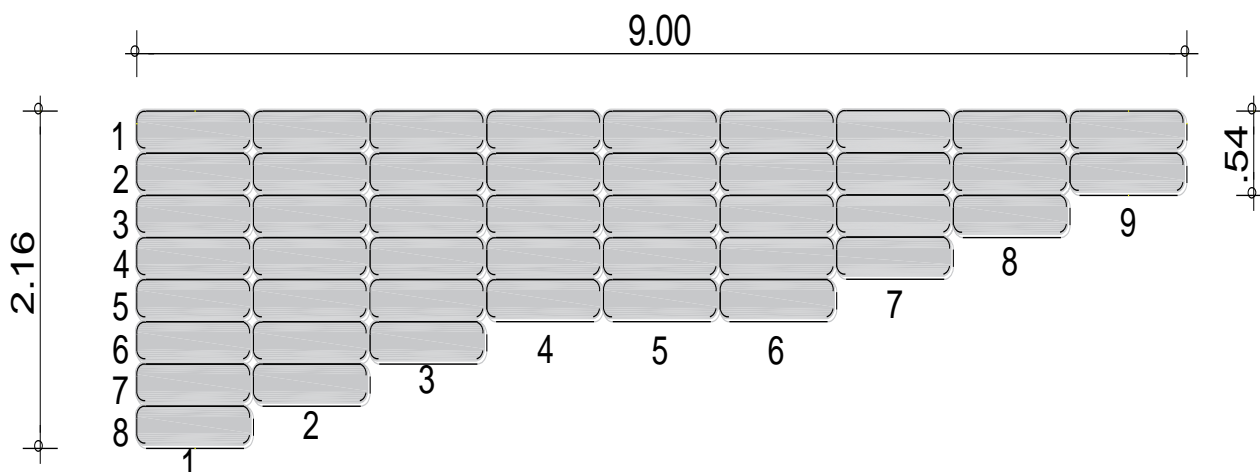
Figura 14

Detalles muro construido con neumáticos de estudio.



Figura 15

Dimensiones del muro de estudio.



5.2 Parámetros físicos

Para caracterizar el suelo de cimentación presente en los muros de contención con neumáticos en la zona de estudio, se llevó a cabo una serie de laboratorios de caracterización física y de resistencia. Lo anterior, permite determinar ciertas características como su distribución granulométrica, clasificación, estructura, plasticidad, resistencia al cortante y prevé su comportamiento mecánico ante cargas impuestas al terreno.

La caracterización física se realizó en el laboratorio de suelos de la Universidad La Gran Colombia y para el ensayo del Corte Directo CD se contó con el apoyo de laboratorios externos. Los ensayos realizados se exponen en la siguiente tabla.

Tabla 7

Ensayos realizados del suelo de cimentación.

Ensayo	Norma Aplicada
Contenido de Humedad	INV E 122 -13
Gravedad Específica	INV E 128 -13
Granulometría por tamizado	INV E 123 -13
Granulometría por hidrómetro	INV E 123 -13
Límite líquido	INV E 125 -13
Límite plástico	INV E 126 -13
Corte Directo	INV E 154 -13

Los resultados de los ensayos realizados se presentan a continuación y se anexa su registro fotográfico y procedimiento realizado para cada uno de ellos.

5.2.1 Contenido de Humedad

Tabla 8

Datos ensayo contenido de humedad.

DATOS		
PESO TAZA	38,8	g
PESO SUELO + TAZA	253,6	g
PESO SUELO 24 H EN EL HORNO	227,9	g
CONTENIDO DE AGUA	14	%

5.2.2 Gravedad Específica

En primer lugar, se realiza la calibración del picnómetro.

Tabla 9

Peso picnómetro, proceso de calibración.

PESO PICNÓMETRO VACÍO (Mp)	144,2	g
PESO PICNÓMETRO + 500 ml	641,4	g

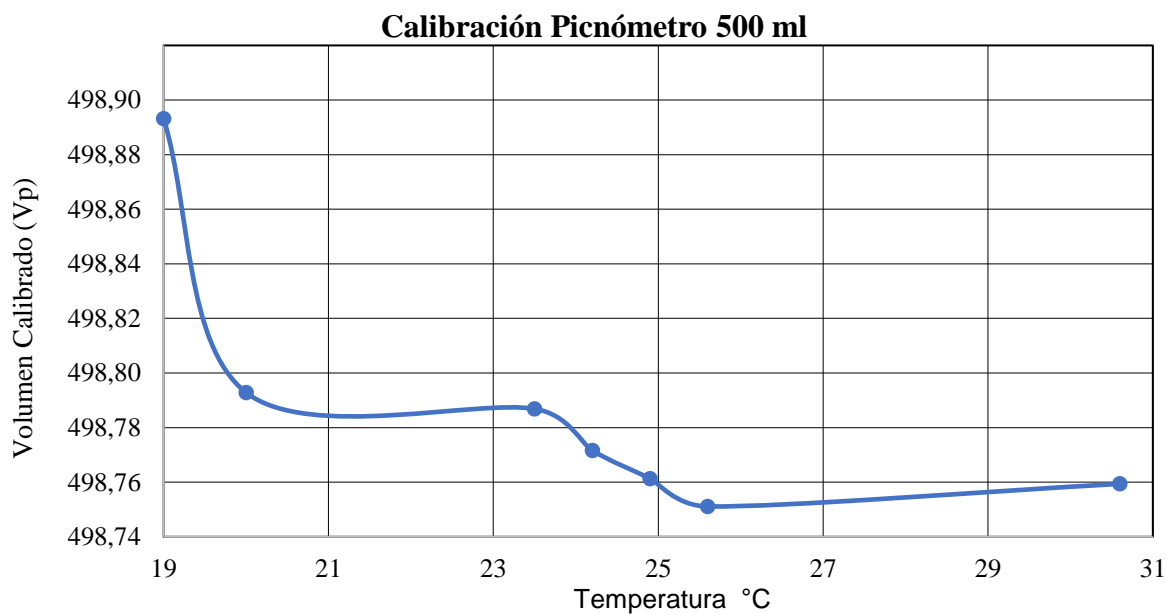
Tabla 10

Valores calibrados en función de la temperatura, ensayo de gravedad específica.

T°	Peso (g)	Densidad (tabla 128-2)	Coefficiente (K)	Volumen Calibrado (Vp)
30,6	640,7	0,99547	0,99726	498,76
25,6	641,4	0,99689	0,99868	498,75
24,9	641,5	0,99707	0,99887	498,76
24,2	641,6	0,99725	0,99904	498,77
23,5	641,7	0,99742	0,99921	498,79
20	642,1	0,99821	1	498,79
19	642,3	0,99841	1,0002	498,89
			PROMEDIO	498,79
			DESV. EST	0,05

Figura 16

Calibración Picnómetro 500 ml.



Procedimiento Ensayo de Gravedad Específica:

Tabla 11*Datos iniciales, ensayo de gravedad específica.*

T° inicial	19,5
Densidad T ensayo	0,99831
Masa Picnómetro + agua + suelo a T° ensayo (Mpws)	694,3
Secado:	
Peso suelo (g)	50
Peso recipiente(g)	114,3
Peso recipiente + suelo + secado	162,23
Masa suelo seco (Ms)	47,93
Resultados:	
Masa picnómetro (Mpwt)	642,15
Gravedad específica	2,727

- Gravedad específica 20°C

$$G_{20^{\circ}\text{C}} = K \times G_t$$

K	1
G 20°C	2,727

5.2.3 Granulometría por tamizado

Tabla 12

Resultados granulometría por tamizado.

TAMIZ	Diámetro (mm)	PESO RETENIDO		Acumulado %	Porcentaje Pasante %
		PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO		
1 1/2	37,50	0	0,00	0,00	100,00
1 PULG	25,00	0	0,00	0,00	100,00
3/4 PULG	19,00	0	0,00	0,00	100,00
1/2 PULG	12,50	18,80	5,51	5,51	94,49
3/8 PULG	9,50	11,1	3,25	8,76	91,24
N°4	4,75	32,5	9,52	18,28	81,72
N°10	2,00	44,5	13,04	31,32	68,68
N°40	0,425	161,1	47,20	78,52	21,48
N°60	0,250	35,6	10,43	88,95	11,05
N°100	0,150	23,4	6,86	95,81	4,19
N°200	0,075	14,3	4,19	100,00	0,00
FONDO		0	0,00	100,00	0,00
Total		341,3	100,00		

GRAVA

ARENA

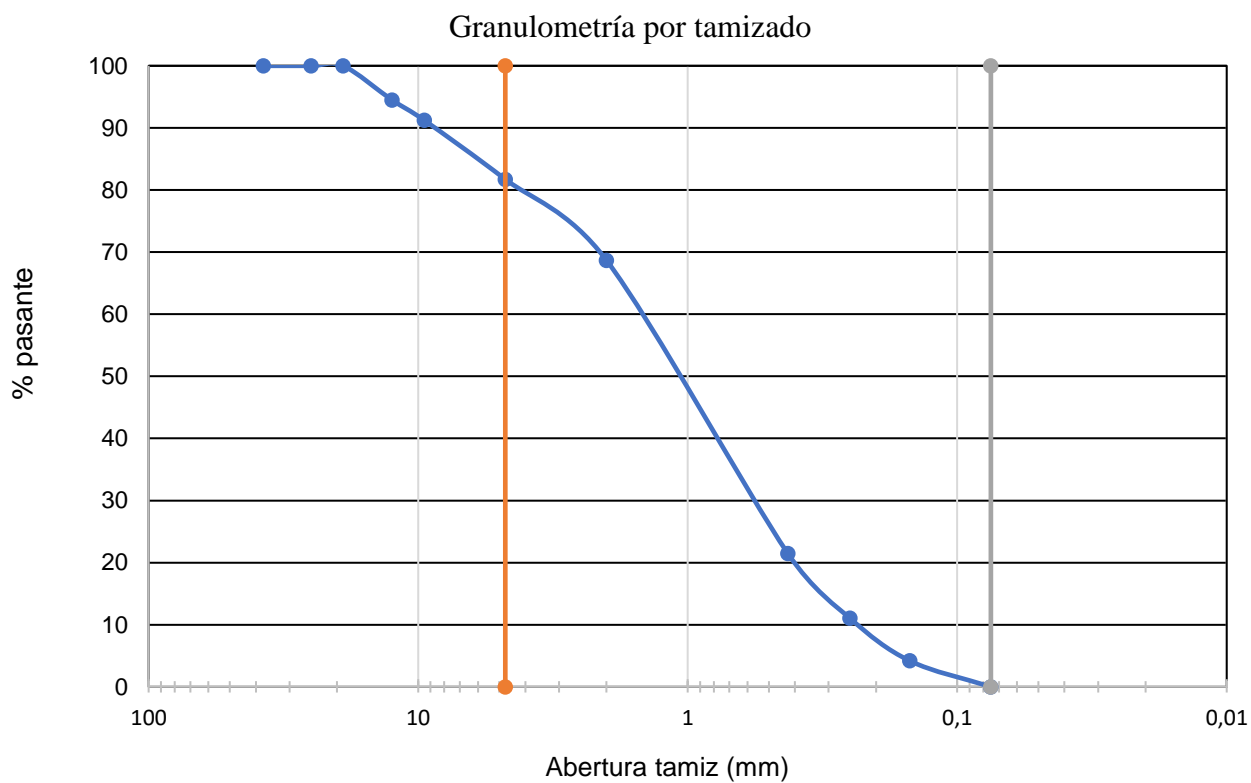
Tabla 13

Deciles y datos porcentaje que pasa, ensayo de granulometría.

D60	1,82
D30	0,88
D10	0,24
CU	7,58
CC	1,77
% retenido tamiz #4	18,28
% que pasa tamiz #4	81,72

Figura 17

Gráfica ensayo de granulometría por tamizado.



ARENA BIEN GRADADA SW

5.2.4 Granulometría por hidrómetro

Tabla 14

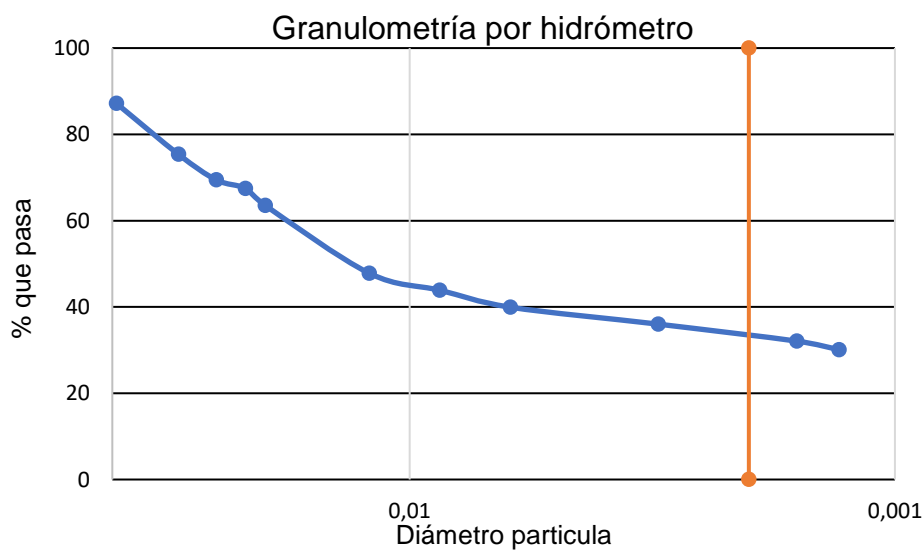
Datos iniciales, ensayo de granulometría por hidrómetro.

MURO 1		
DATOS	Masa pasante tamiz 200	
MUESTRA SUELO	50,01	g
T°	20	°
Gravedad Especifica	2,727	
K (tabla 123-3)	0,013326	
Factor corrección Gravedad Especifica (tabla 123-1)	0,984	
FACTORES DE CORRECCIÓN		
Corrección por menisco	Cm	0,3
Corrección por temperatura	Ct	0
Corrección por agente defloculante	Cd	4

Tabla 15*Resultados granulometría por hidrómetro.*

LECTURAS - MURO 1						
Tiempo (min)	Lectura del Hidrómetro	Lectura Corregida	Porcentaje Suelo en suspensión (P)	Profundidad efectiva (cm)	Diámetro de partículas (D) mm	% que pasan
1	44	44,30	87,16	9,1	0,0402	87,16
2	38	38,30	75,36	10,1	0,0299	75,36
3	35	35,30	69,46	10,6	0,0250	69,46
4	34	34,30	67,49	10,7	0,0218	67,49
5	32	32,30	63,55	11,1	0,0199	63,55
15	24	24,30	47,81	12,4	0,0121	47,81
30	22	22,30	43,88	12,7	0,0087	43,88
60	20	20,30	39,94	13	0,0062	39,94
250	18	18,30	36,01	13,3	0,0031	36,01
960	16	16,30	32,07	13,7	0,0016	32,07
1440	15	15,30	30,10	13,8	0,0013	30,10

LIMOS
 0.075-0.002
 ARCILLAS
 <0.002

Figura 18*Gráfica (D vs % que pasan), ensayo de hidrómetro.*

Suelo de grano fino (limo y arcilla): MAYOR PRESENCIA DE
LIMOS
 Clasificación: M

5.2.5 Límite líquido

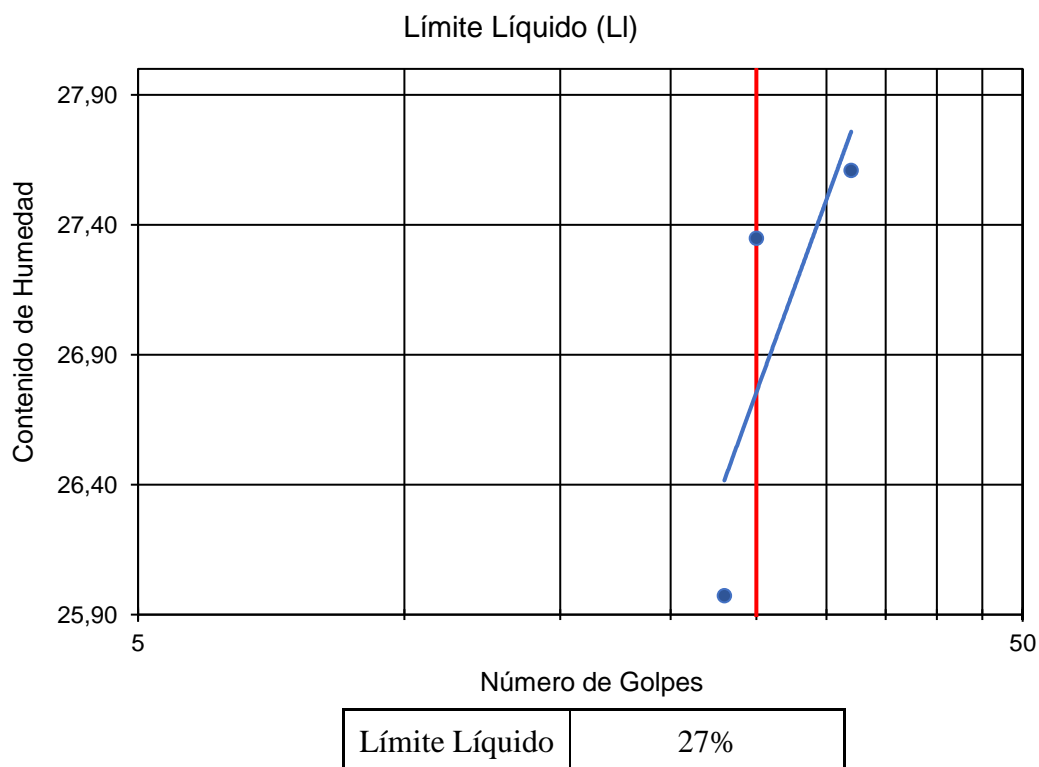
Tabla 16

Datos iniciales, ensayo de límite líquido.

	golpes	Peso tara	Peso tara+ suelo húmedo	Peso tara + suelo seco	Contenido de agua
#3	23	6,0	20,89	17,82	25,97
#4	25	6,57	17,28	14,98	27,35
#6	32	7,6	19,34	16,8	27,61

Figura 19

Gráfica ensayo límite líquido.



5.2.6 Límite Plástico

Tabla 17

Datos iniciales, ensayo de límite plástico.

	Peso tara	Peso tara+ rollitos húmedos	Peso tara + rollitos secos	Contenido de humedad %	Promedio Humedad %
#1	7,89	13,32	12,49	18,04	
#2	6,3	12,42	11,45	18,83	20
#5	5,88	13,52	12,06	23,62	

LP	20%
IP	LL - LP
IP	27% - 20%
IP	7,00%

Tabla 18

Rangos de IP según característica del suelo.

IP	PLASTICIDAD	CARACTERÍSTICA
IP>20	ALTA	S. muy arcilloso
7< IP <=20	MEDIA	S. arcilloso
IP <=7	BAJA	S. poco arcilloso
IP=0	NO PLÁSTICO	S. exentos de arcillas

Nota. Clasificación según índice de plasticidad tomado de (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2014)

Según la clasificación anteriormente dada de acuerdo con el índice de plasticidad, se tiene que:

Tabla 19

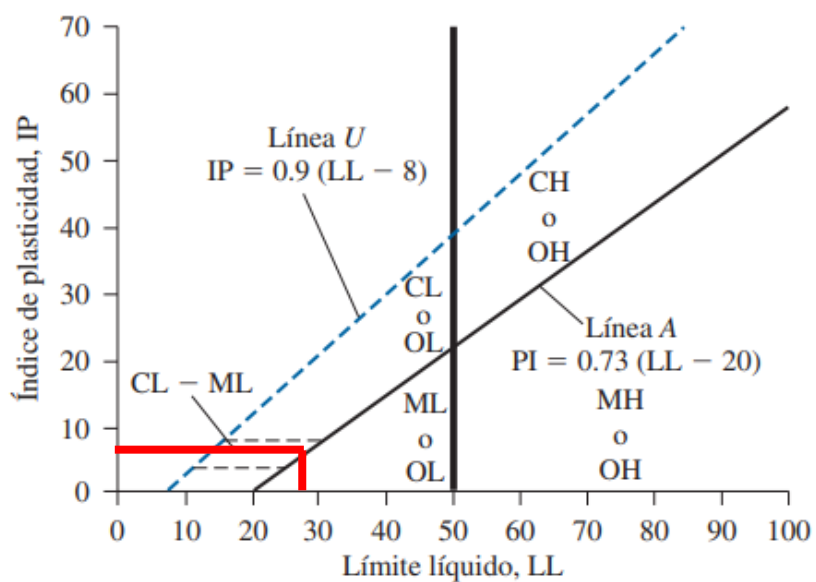
Resultados ensayo de límite líquido e índice de plasticidad.

LL	27%
IP	7,00%
SUELO DE BAJA PLASTICIDAD POCO ARCILLOSO	

Se emplea la carta de plasticidad de Casagrande (Das B. M., 2012), con los datos obtenidos en los laboratorios.

Figura 20

Carta de plasticidad Casagrande.



Nota. Tomado de (Das B. M., 2012).

Se toma como referencia el criterio de clasificación de (Lambe & Whitman, 2012) que establece que el parámetro CL-ML se infiere “por encima de la línea “A” con I_p entre 4 y 7 casos límite que requieren el uso de símbolos dobles” (p. 47).

Con los datos obtenidos del Límite Líquido e Índice de Plasticidad, se ingresa a los rangos establecidos en la carta de plasticidad de Casagrande. Se observa en la figura 20, que la clasificación corresponde a una zona de frontera que corresponde al grupo de limo-arcilloso de baja plasticidad (CL – ML).

5.3 Parámetros de resistencia

5.3.1 Corte Directo condición consolidada drenada (CD)

Tabla 20

Cuadro de cargas ensayo de corte directo.

Cuadro de cargas			
Punto (Kg)	Carga Normal (N)	Carga Máxima Horizontal (N)	Carga Final Horizontal (N)
1	98,1	103,506	87,646
2	196,2	187,813	161,953
4	392,4	318,030	308,013

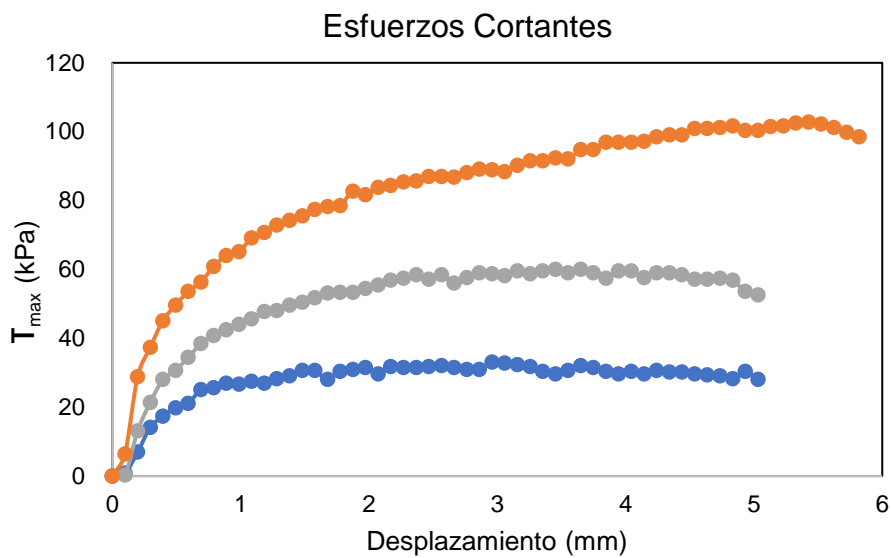
Tabla 21

Datos ensayo CD.

Desplazamiento Horizontal (mm)	Esfuerzo Normal (kPa)	Esfuerzo Cortante (kPa)	ϕ	C	
2,959	31,370	33,099	Arena suelta y grava (30° a 40°)	12,279	
3,354	62,741	60,059			36,089
5,228	125,482	101,700			

Figura 21

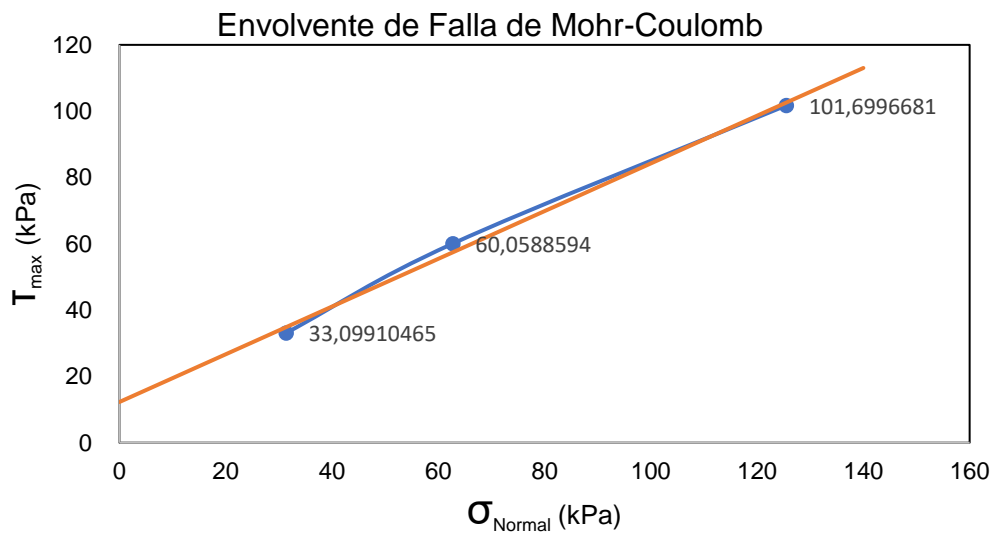
Esfuerzo cortante, ensayo de Corte Directo.



Nota. Se representa el esfuerzo cortante para cada uno de los esfuerzos normales aplicados.

Figura 22

Envolvente de falla Mohr - Coulomb.



Resumen datos de laboratorio:

Tabla 22*Resultados caracterización suelo de cimentación.*

Laboratorio	Resultado
Contenido de Humedad	14 %
Gravedad Específica	2,727
Límite líquido	27%
Límite plástico	20%
Índice de plasticidad	7%
Clasificación Unificada (SUCS)	Arena bien gradada (SW) con partículas limo-arcilloso de baja plasticidad (CL-ML)
Corte Directo (CD)	Ø 36,09°
	C 12,28 kPa

Asimismo, se determinó in situ la resistencia al corte, empleando para esto instrumentos de inspección de campo como veleta de campo y el penetrómetro. De esta manera, se obtiene un valor de resistencia al corte conservando las condiciones reales del sitio y evitando cualquier tipo de alteración a las muestras obtenidas de las visitas en campo.

5.4 Ensayos de campo

5.4.1 Veleta de campo

Tabla 23*Datos tomados en campo: veleta de campo.*

VELETA	
No. MEDICIÓN	Resist. Corte (Kg/cm ²)
1	2,1
2	2,6
3	2,1
4	2,0
5	2,5
Promedio	2,26

5.4.2 Penetrómetro de bolsillo

Tabla 24

Datos tomados en campo: penetrómetro de bolsillo.

PENETRÓMETRO	
No. MEDICIÓN	Resist. Corte (Kg/cm ²)
1	2,5
2	2,4
3	2,4
4	2,6
5	2,5
Promedio	2,48

CAPÍTULO VI: MODELACIÓN SUELO- NEUMÁTICO

6.1 Modelo de calibración

6.1.1 Consideraciones generales

Para modelar el sistema suelo- neumático se realizan las siguientes suposiciones:

- Los materiales se definieron bajo el supuesto de isotrópico, es decir, presenta las mismas características en cada una de sus direcciones. Esta característica se suele usar para modelar materiales estructurales que tengan comportamiento lineal elástico o elastoplásticos.
- El material neumático tiene comportamiento elástico, esto refiere a que el material tiene una deformación proporcional al esfuerzo aplicado. Las constantes de proporcionalidad son el módulo de elasticidad (E) y la relación de Poisson (ν). Este modelo constitutivo es propio de materiales estructurales, y supone que la resistencia a la deformación del material es mucho mayor que la del suelo.

- El material definido como suelo, se representa bajo el modelo de Mohr- Coulomb. Se define como un modelo que representa con bastante precisión el comportamiento de los suelos. La suposición base del programa, consiste en considerar el suelo como un modelo elástico perfecto, el esfuerzo fuerza- desplazamiento es lineal y se definen con los parámetros de la Ley de Hooke.
- El material definido como caja, se considera con un comportamiento elástico de tipo estructural y su comportamiento se define como Linear Elastic. Sus parámetros se definen con valores altos, dado que se estima que su falla está lejos de presentarse. Lo anterior, es una suposición tomada en esta investigación, ya que, se desea estimar los esfuerzos y desplazamientos del neumático, más no, de los elementos que son de soporte, al no poderse garantizar este elemento base, durante su vida útil.
- La conexión entre la interfaz marco y suelo es perfecta.
- Se considera un método de homogeneización para determinar un comportamiento equivalente del material.
- Se consideran parámetros del suelo drenados.

6.1.2 Definición parámetros mecánicos de los materiales para la modelación de calibración

Los datos de la geometría del neumático, los parámetros del suelo y la caja fueron tomados de la investigación realizada por (Rodríguez, 2016). Otros, fueron tomados para el desarrollo de esta investigación con base en datos teóricos.

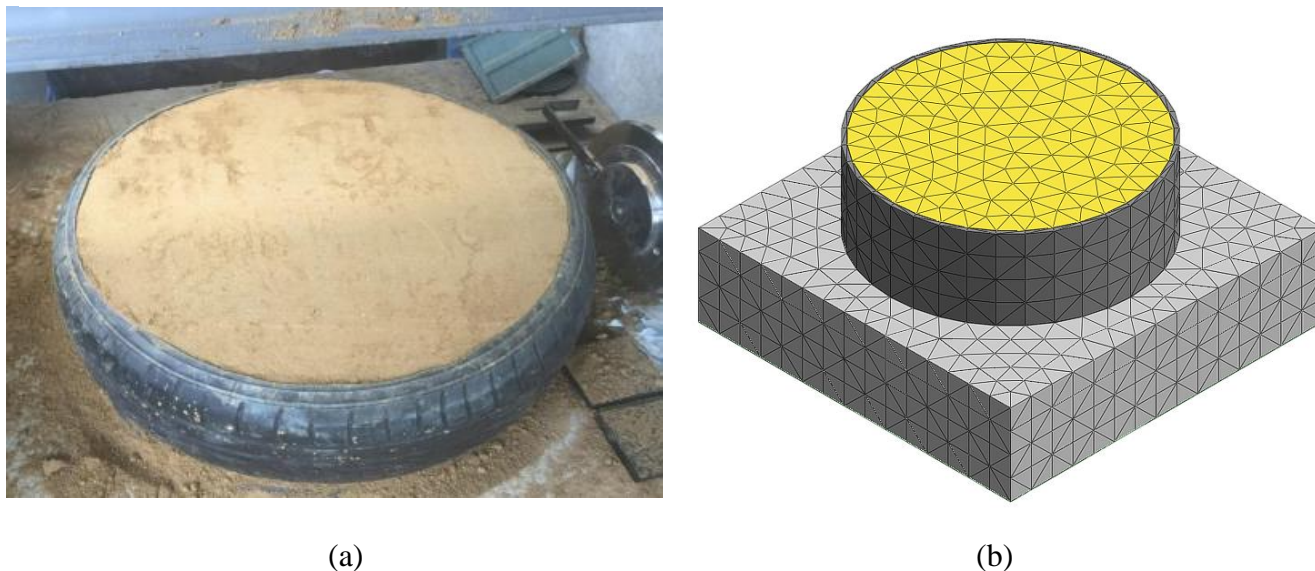
Tabla 25*Datos de entrada modelo de calibración.*

	Neumático		Referencia
Diámetro exterior	0.61	m	(Rodríguez, 2016)
Alto	0.195	m	(Rodríguez, 2016)
Tipo de material	Isotrópico - Elástico		
Módulo de Elasticidad (E)	4000	kN /m ²	(Bahena & Rivera, 2022)
Poisson Ratio (ν)	0,3		(Bahena & Rivera, 2022)
Suelo			
Tipo de material	Isotrópico- Mohr Coulomb		
Módulo de Elasticidad (E)	6000	kN/m ²	(Das B. M., 2001)
Poisson Ratio (ν)	0,35		(Das B. M., 2001)
Unit Weight (γ)	19,4	kN/m ³	(Rodríguez, 2016)
Initial Void Ratio (e _o)	0,5		(Casagrande, 1948)
Cohesion (C)	95.5	kN /m ²	(Rodríguez, 2016)
Frictional Angle (Ø)	10,3	°	(Rodríguez, 2016)
Caja			
Tipo de material	Isotrópico- Elástico tipo estructural		
Dimensiones	0.7 x 0.7 x 0.2 m		
Módulo de Elasticidad (E)	2e+009	kN /m ²	Consideración propia de módulo alto
Poisson Ratio (ν)	0,3		(Torrent, s.f.)

La configuración de la geometría en el modelo se realizó mediante el enmallado de Tetra Mesh, 3D Solid, tamaño 0.05 metros. La cantidad de nodos y elementos generados en el enmallado del modelo fueron: 148 nodos y 885 elementos para el neumático, para la malla del suelo de relleno: 399 nodos y 2.277 elementos y para la caja: 507 nodos y 5167 elementos.

Figura 23

Comparación neumático y modelo de calibración.



Nota. En la figura se pretende realizar la comparación entre (a) Conjunto suelo- neumático investigación (Rodríguez,2016) y (b) modelación suelo- neumático Midas GTS NX.

6.1.3 Aplicación de cargas

Las cargas aplicadas en el modelo fueron de tipo axial y tangencial para determinar la interacción entre el suelo y el neumático. La variación de cargas aplicadas en (Rodríguez, 2016) para el ensayo de corte directo a escala real, se considera con base a la variación de esfuerzos que se dan para un muro de tierra reforzada de altura aproximada de 4.0 metros, las cargas que se consideraron fueron de 72.2 kPa, 140.1 kPa y 208.9 kPa. Los resultados que se obtuvieron de esfuerzo cortante (T) para el sistema suelo- neumático sin considerar ningún conector a cortante, fueron de 110 kPa, 122 kPa y 135 kPa, respectivamente.

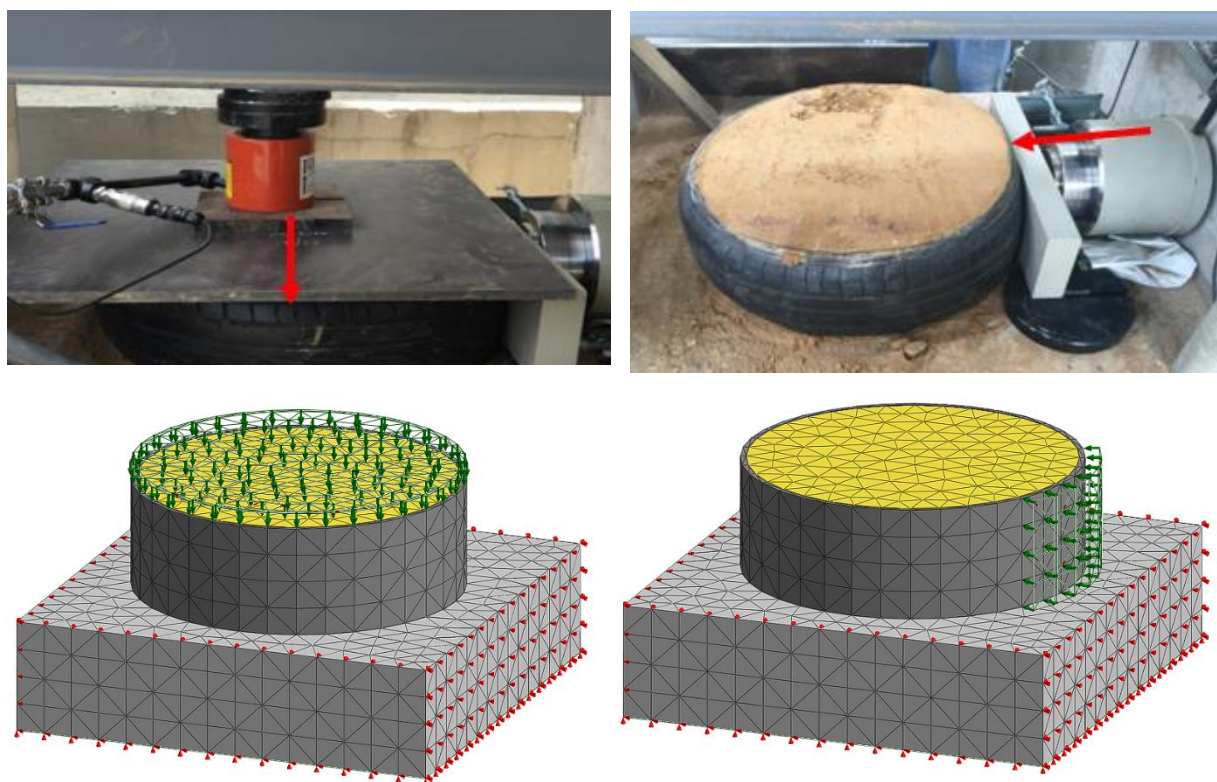
En el modelo se consideran las fuerza asignadas tipo Pressure aplicadas sobre la cara de los elementos (axial y tangencial) , tipo 3D Element Face, dirección normal y magnitud Uniformly Distributed Load. Para el desarrollo de esta investigación, se aplica una carga axial en

la parte superior de 72.2 kPa (sobre el eje Z) y otra carga tangencial de 72.2 kPa (sobre el eje X), tal y como se aprecia en la figura 24.

Por otra parte, se considera las condiciones de frontera, entendiéndose como las condiciones iniciales en los análisis de elementos finitos para establecer las variables de interés, definidas mediante las restricciones de grados de libertad en los nodos. Se establecen las condiciones de frontera para la caja con el comando Constraint, opción Auto, que define de forma automática las restricciones para realizar los análisis de esfuerzos. Se representan mediante triángulo de color rojo en la figura 24.

Figura 24

Aplicación de esfuerzos normales y tangenciales modelo de calibración.



Nota. Se realiza la comparación entre los tipos de cargas aplicadas en el modelo a escala real y el propuesto en Midas GTS NX.

El caso de análisis que se usó en la modelación fue de tipo directo Linear “Static Analysis”, considera que todos los materiales tienen un comportamiento elástico lineal, en el cual se determinan las características del comportamiento cuando las cargas son generadas. Este tipo de análisis es útil cuando se quiere observar el comportamiento aproximado del suelo.

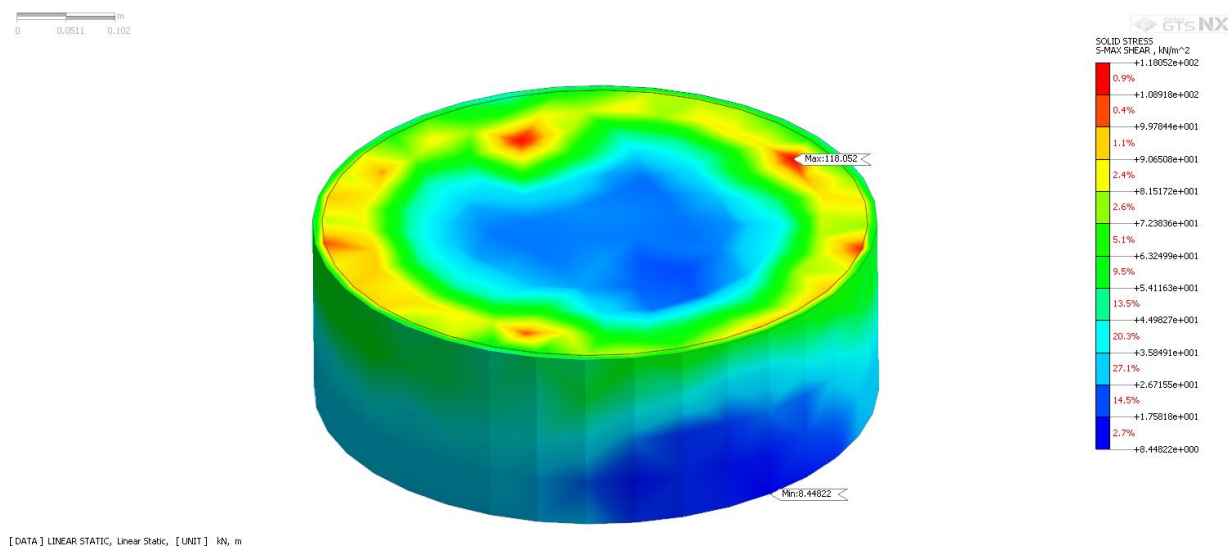
6.1.4 Resultados y calibración del sistema.

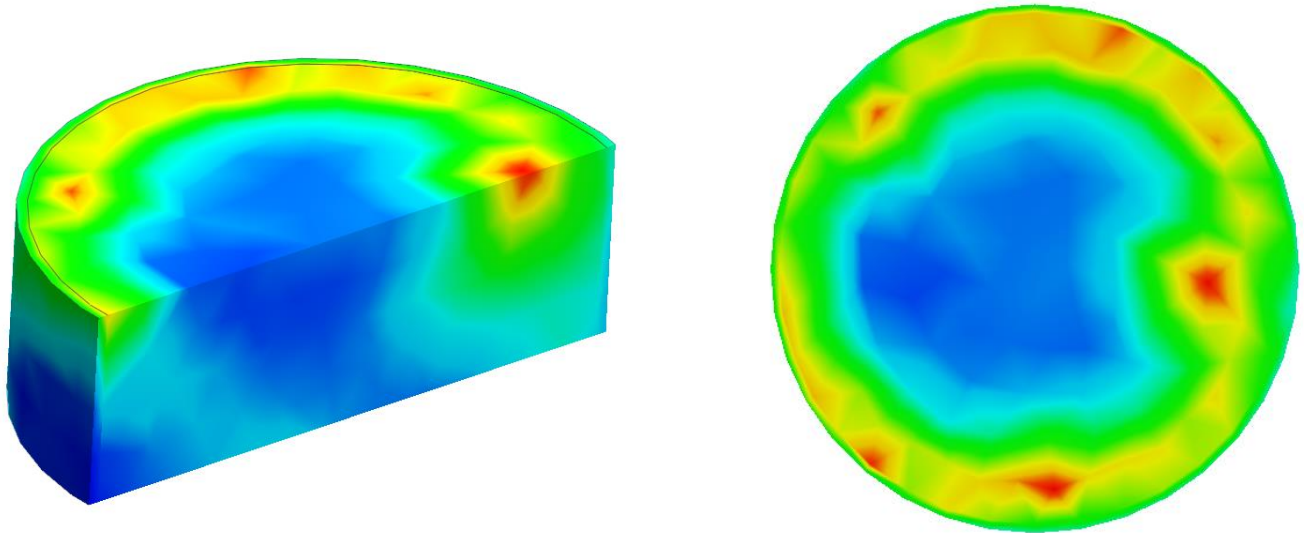
Para la primera modelación, se toman como datos de calibración los resultados obtenidos de la investigación de (Rodríguez, 2016) para la carga de confinamiento aplicada de 72.2 kPa en dirección axial y tangencial.

En la figura 25, se detalla el esfuerzo cortante máximo obtenido de 118.052 kPa.

Figura 25

Esfuerzo cortante máximo - modelo de calibración.



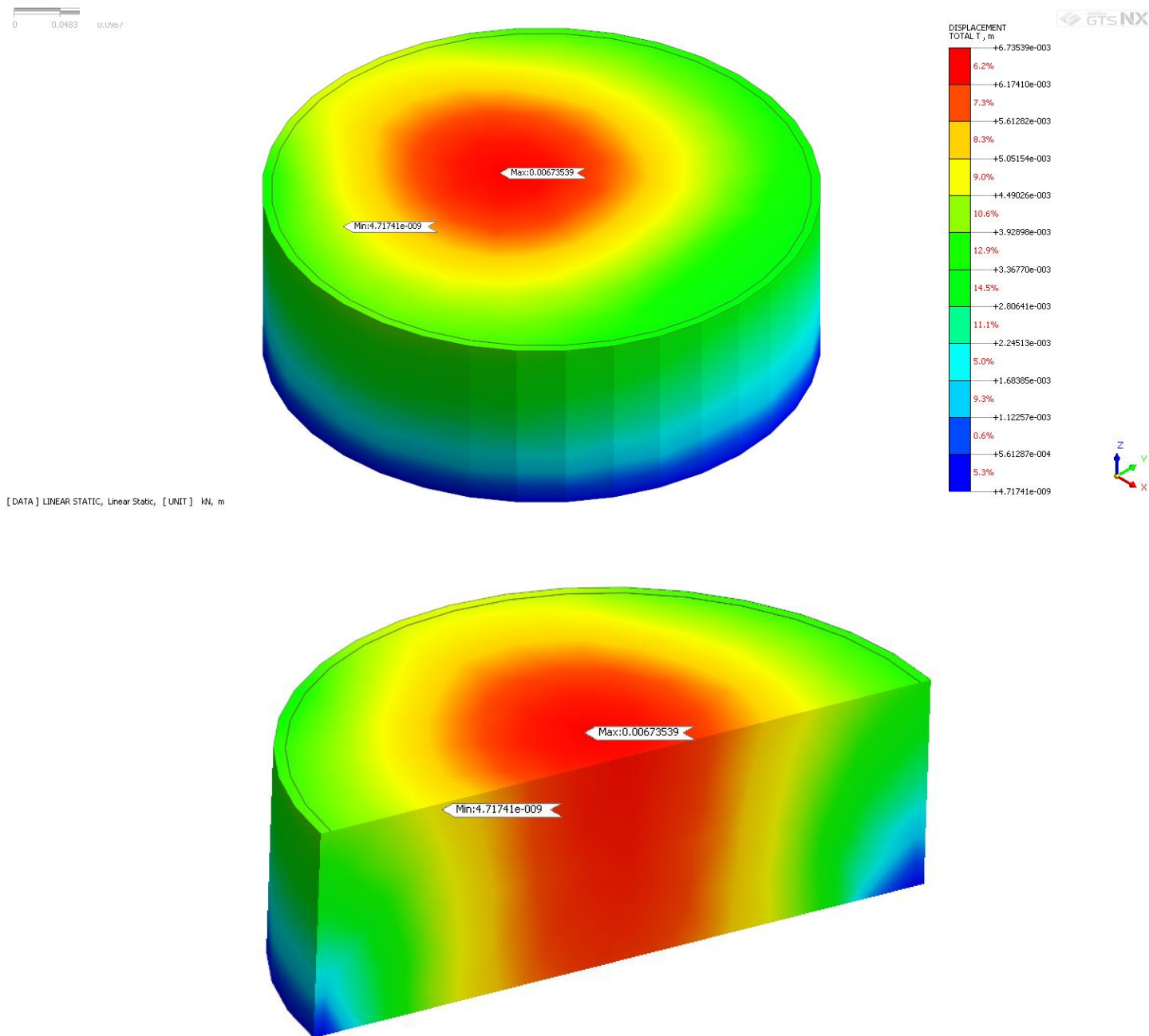


De la figura 25, se puede detallar la manera como el esfuerzo cortante se desarrolla en la interfaz neumático- suelo. Se obtiene el mayor valor de esfuerzo cortante alrededor del neumático que actúa como un envolvente. Se presenta el detalle del corte transversal, y se aprecia la manera como se aumentan las tensiones internas debido a las cargas aplicadas (normal y tangencial); se infiere que estos esfuerzos se distribuyen uniformemente dentro del conjunto neumático-suelo.

Según la figura 23 (a) el neumático del modelo de calibración no cuenta con la banda superior, por lo que el suelo es quien ejerce la distribución de las cargas recibidas y las transfiere hacia el neumático.

Figura 26

Desplazamiento máximo- modelo de calibración.



El desplazamiento máximo para el sistema suelo- neumático alcanzado fue de 0.006 m.

En la figura 26, se precisa el lugar donde se desarrolla el mayor desplazamiento del sistema es en su centro, asemejándose al desplazamiento inducido de falla en el ensayo de corte directo.

Se realiza la comparación en la figura 27 de la gráfica de esfuerzo cortante máximo dado en la investigación de (Rodríguez, 2016) y el obtenido en el software de Midas GTS NX. En la investigación concluyen que para un esfuerzo de confinamiento de 72.2 kPa se obtiene un esfuerzo cortante de 110 kPa. Por otro lado, el software Midas GTS NX para el mismo esfuerzo aplicado, se obtiene un esfuerzo cortante máximo de 118,052 kPa.

Figura 27

Comparación Esfuerzo Cortante.

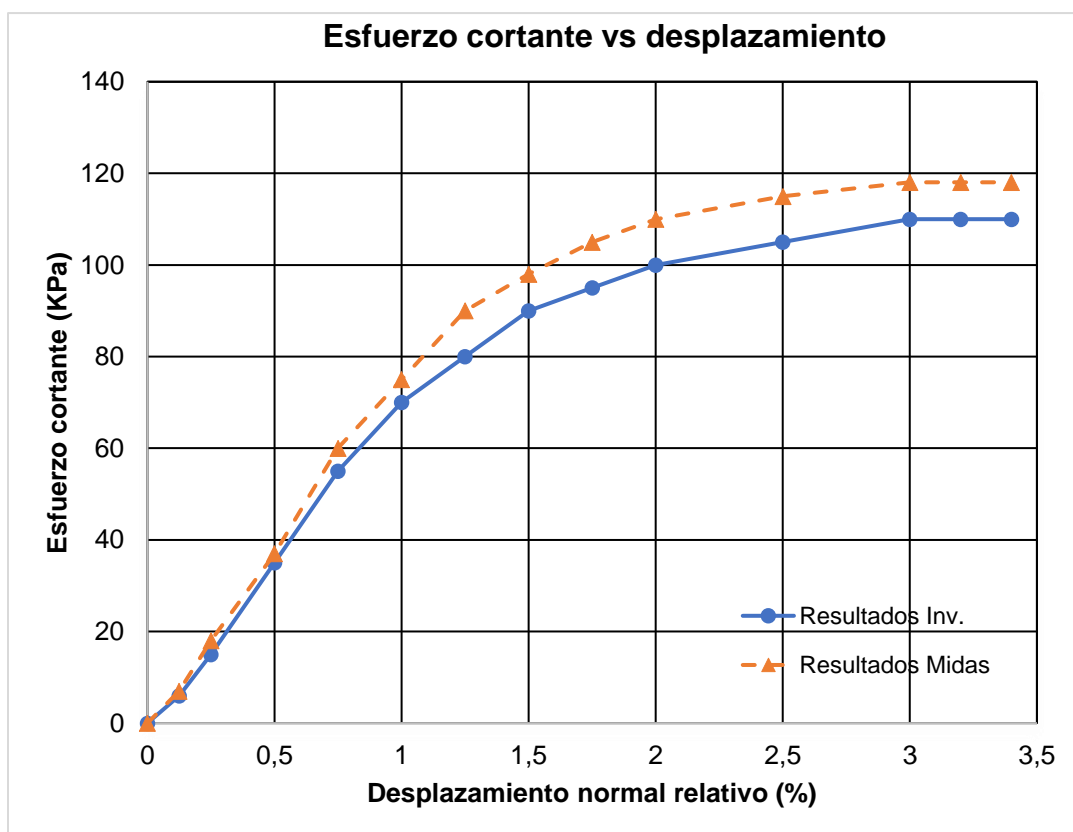


Tabla 26

Comparación resultados obtenidos en el modelo de calibración.

Resultados esfuerzo cortante obtenido	
Investigación (Rodríguez, 2016)	Modelación Midas GTS NX
110 kPa	118.52 kPa
Desviación Estándar:	4,26

6.2 Modelo de investigación

6.2.1 Consideraciones generales

Se asumen las consideraciones generales expuestas en 6.1.1. El muro de contención construido con neumáticos tomado como modelo de investigación es el que se ilustra en la figura 13 (a).

6.2.2 Definición de parámetros mecánicos de los materiales para el modelo de investigación.

Las dimensiones del neumático y la configuración del muro se toman a partir de los datos recolectados en campo. En cuanto a los parámetros físicos y de resistencia del suelo, son los resultados obtenidos en el capítulo V. Los datos de entrada para la modelación se exponen en la tabla 27.

Tabla 27

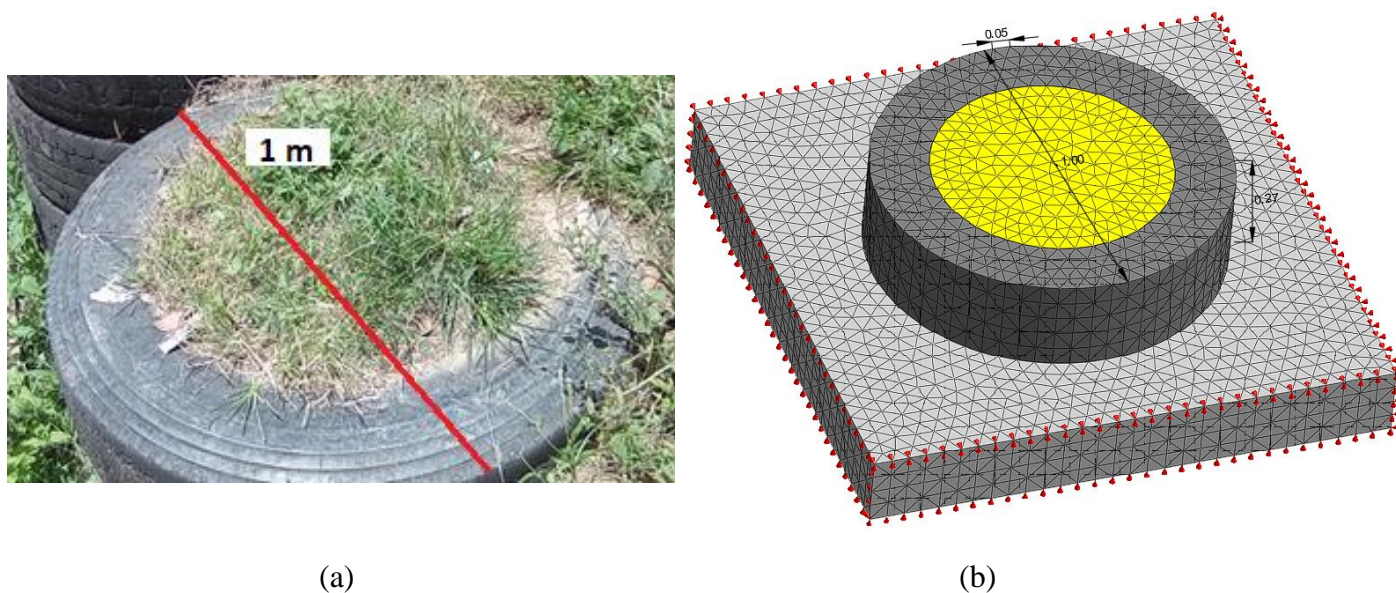
Datos de entrada muro de investigación.

Dimensiones neumático		
Diámetro externo	1.00	m
Diámetro interno	0.67	m
Alto	0.27	m
Referencia	12 R 22.5	
Neumático		
Tipo de material	Isotrópico - Elástico	
Módulo de Elasticidad (E)	4000	kN /m ²
Poisson Ratio (ν)	0,3	
Suelo		
Tipo de material	Isotrópico- Mohr Coulomb	
Módulo de Elasticidad (E)	6000	kN /m ²
Poisson Ratio (ν)	0,35	
Unit Weight (γ)	19.35	kN /m ³
Cohesion (C)	12.28	kN /m ²
Frictional Angle (Ø)	36.1	°
Caja		
Tipo de material	Isotrópico- Elástico tipo estructural	
Dimensiones	1.5 x 1.5 x 0.2 m	
Módulo de Elasticidad	2e+009	kN /m ²
Poisson Ratio (ν)	0,2	

Para el modelo de investigación se utilizó el enmallado de Tetra Mesher, 3D Solid, de tamaño 0.05 metros. Para la malla del neumático se generaron 1.640 nodos y 4.717 elementos, para la malla del suelo 2.320 nodos y 11.541 elementos y para la caja 2.652 nodos y 24.297 elementos generados.

Figura 28

Esquema dimensiones neumático de investigación.



Nota. Se describe en (a) medida tomada en campo del neumático para el muro de investigación (b) representación modelo de investigación.

6.2.3 Aplicación de cargas

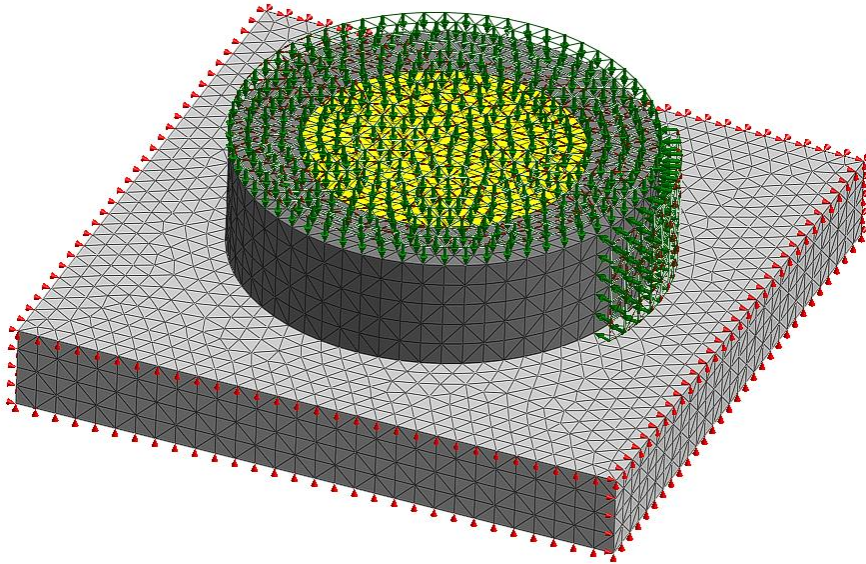
Se presenta la misma condición indicada respecto al análisis de (Rodríguez, 2016).

Se aplica una carga de tipo axial y tangencial distribuida uniformemente de 72.2 kPa, para representar la aplicación de esfuerzos realizado en (Rodríguez, 2016) y la aplicada en la sección 6.1 de la presente investigación.

El tipo de carga aplicada en el modelo fue de tipo Pressure, 3D Element Face, dirección normal y magnitud Uniformly Distributed Load.

Figura 29

Aplicación de cargas modelo de investigación.



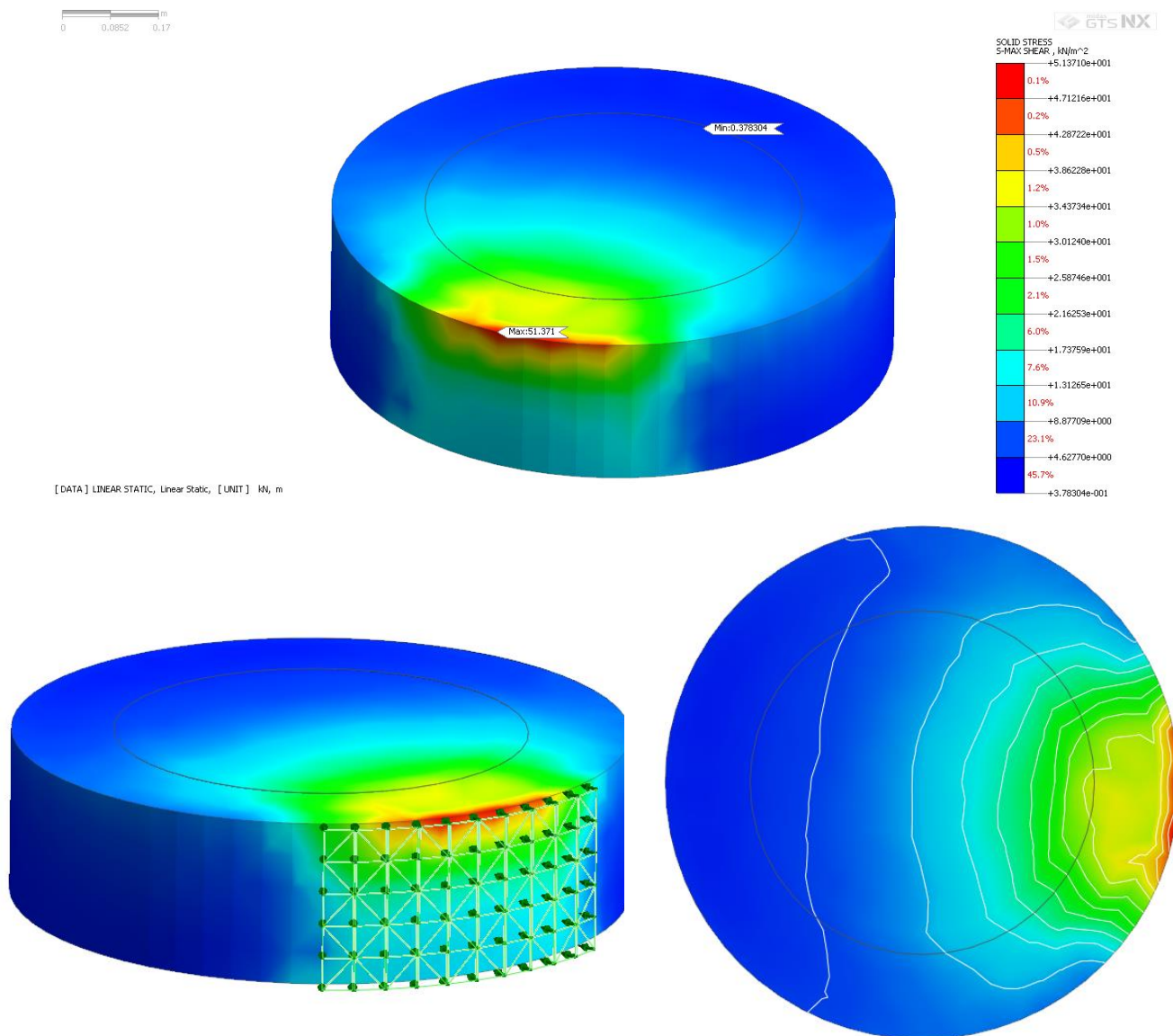
Nota. Aplicación de la carga dirección normal, tangencial y condiciones de frontera.

6.2.4 Resultados

En la figura 30, se detalla los resultados obtenidos del esfuerzo cortante para el modelo de investigación.

Figura 30

Esfuerzo Cortante máximo modelo de investigación.



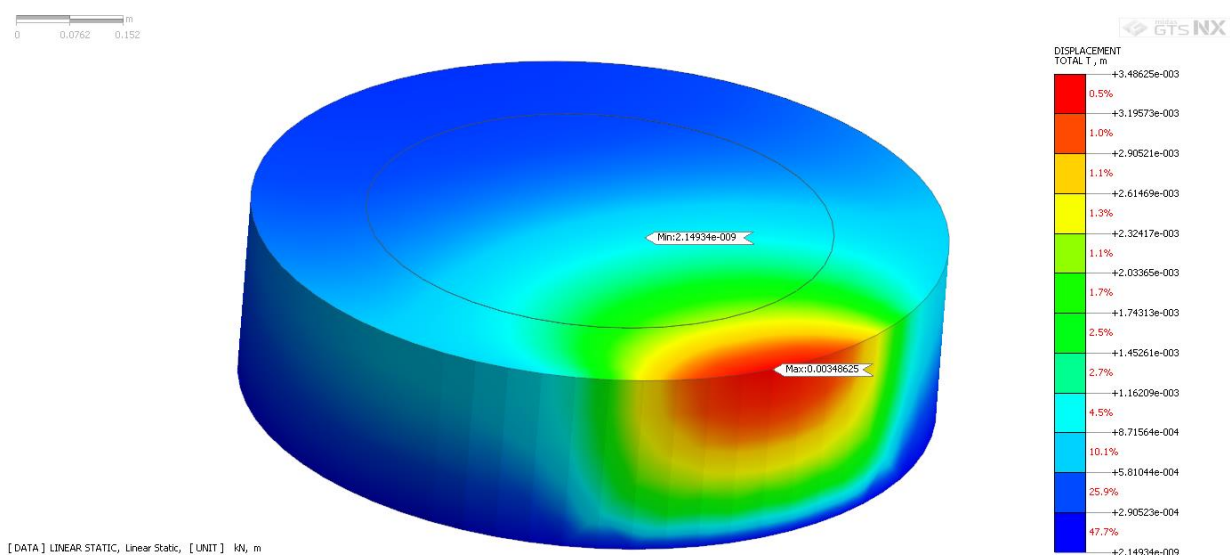
El esfuerzo cortante máximo para el sistema suelo- neumático alcanzado para el modelo de investigación fue de 51.37 kPa.

Al evaluar el neumático entero (sin retirar la banda superior) la forma como se desarrolla el esfuerzo máximo alcanzado difiere al evaluado en el modelo de calibración. Se puede detallar que se obtiene un esfuerzo máximo de cortante en el lugar donde se aplica la carga tangencial.

Al considerarse el neumático entero, el suelo tiende a transferir el esfuerzo cortante al neumático y redistribuir las tensiones desarrolladas para las cargas que soporta, por lo que se considera que su comportamiento actúa como envolvente del sistema.

Figura 31

Desplazamiento máximo alcanzado en la modelación.

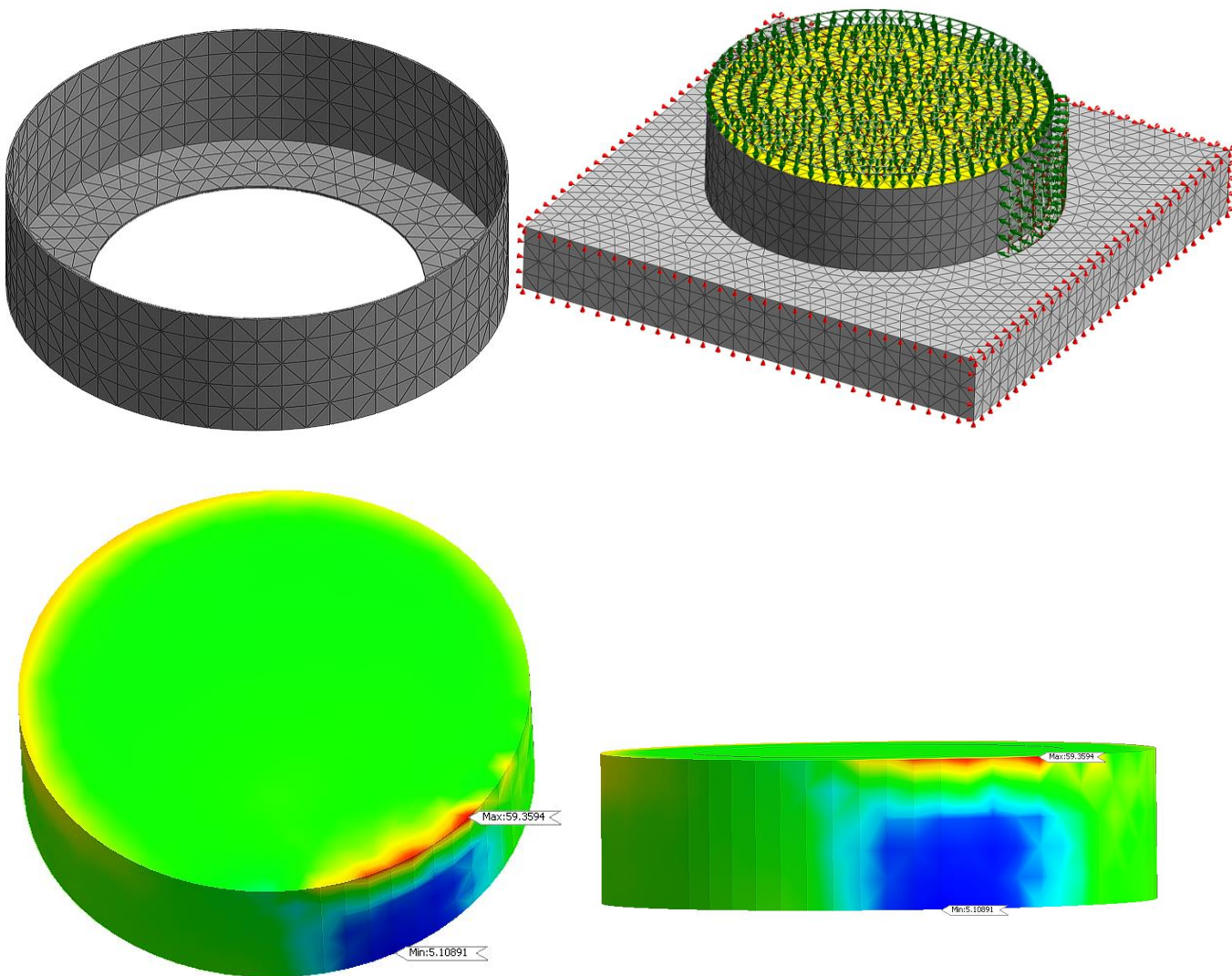


El desplazamiento máximo para el sistema suelo- neumático alcanzado para el modelo de investigación fue de 0.00348 m.

Para determinar la variación de los esfuerzos cortantes máximos del sistema neumático-suelo retirando la banda superior de este (figura 32), se realizó una modelación conservando las mismas características del modelo inicial de investigación.

Figura 32

Modelo de investigación sin la banda superior del neumático.



Se obtiene un esfuerzo cortante máximo de 59.36 kPa.

6.2.5 Análisis

Los resultados obtenidos en el numeral 6.1 Modelo de calibración son similares al realizar la comparación de los resultados obtenidos. Partiendo de la investigación desarrollada

por (Rodríguez, 2016) donde obtiene el esfuerzo máximo a cortante del sistema neumático- suelo para un equipo de corte directo construido a escala real, se realizó la modelación con las mismas dimensiones, características y carga aplicada al neumático evaluado. Los resultados difieren un 8.52% con una desviación estándar de 4.26, de los resultados obtenidos en el equipo a escala real y el simulado para esta investigación.

Tomando como premisa, que mediante la modelación efectuada en el software geotécnico Midas GTS NX se obtiene el esfuerzo cortante máximo alcanzado para el sistema neumático-suelo, se realiza la modelación con los datos del neumático para las características propias del modelo de investigación.

La segunda modelación realizada para el modelo de investigación, se logró obtener los esfuerzos a cortante y desplazamientos máximos alcanzado al sistema evaluado de 51.37 kPa y 0.00348 m. respectivamente.

En las figuras 30 y 32, se detalla la manera como los esfuerzos tienden a desarrollarse y varían según la disposición del neumático. Para el neumático entero se alcanzó una resistencia de 51.37 kPa, mientras que para el que se retira la banda superior se obtiene un incremento de resistencia cortante de 59.36 kPa.

El neumático sin la banda superior mostró mejores resultados de resistencia al cortante que el neumático entero, apoyando los resultados obtenidos en la investigación de (Sieira y otros, 2001) donde refiere que retirando la banda superior se obtiene facilidad a la compactación del sistema, logrando un material más rígido, homogéneo y menos deformable.

CAPÍTULO VII: MODELACIÓN SISTEMA ACTUAL DE ESTABILIZACIÓN DE MURO CONSTRUIDO CON NEUMÁTICOS

7.1 Consideraciones generales

El sistema se modela con las siguientes hipótesis:

- Todos los materiales se definieron bajo el supuesto de isotrópico. Para el neumático, su comportamiento se asume como elástico, y para el suelo se representa bajo el modelo de Mohr- Coulomb.
- Todos los sólidos del modelo se consideran parámetros del suelo drenados.
- No se considera su comportamiento por cargas sísmicas y las generadas por el empuje del agua.
- No se considera las cargas por empuje pasivo del suelo.
- Se realiza el chequeo por deslizamiento y volcamiento.
- Se definen las condiciones de fronteras aplicadas al modelo en los bordes laterales para restringir el desplazamiento lateral y en el borde inferior que restringe el desplazamiento en las tres direcciones.
- Se considera un *size control* en los bordes cercanos a los neumáticos para que el cambio de tamaño sea gradual y no se generen elementos alargados.
- La sobrecarga generada por la sollicitación de la vivienda hacia el terreno se considera como una carga tipo Press 3D Element Face distribuida uniformemente en el área definida.

7.2 Definición parámetros mecánicos de los materiales para la modelación del sistema actual

Las dimensiones del muro construido con neumáticos, se toma a partir de los datos recolectados en campo. Se consideran los datos de entrada para el modelo de investigación definidos en 6.2.1. Para la generación del enmallado se consideró Tetra Mesh, 3D Solid, tamaño 0.05 metros, se crearon 5.914 nodos y 212.910 elementos para el muro de contención compuesto con neumáticos. Para el suelo interno, se crearon 80.450 nodos y 519.720 elementos. Para el enmallado del terreno, se optó por un tamaño de malla de 1 metro y se aplicó un control de malla en el contacto con los neumáticos, generando 6.994 nodos y 86.686 elementos.

7.3 Aplicación de cargas

El muro de contención construido con neumáticos tiene la función de contener las solicitaciones generadas por la vivienda hacia el terreno. Por lo que, se analizaron en primer lugar, estas solicitaciones mediante el avalúo de cargas muertas y vivas según la normativa vigente.

7.3.1 Carga muerta

Las cargas muertas definidas en el título B de la NSR-10 como aquellas cargas permanentes de construcción incluyendo su estructura, los muros, piso, cubiertas, cielos rasos, escaleras, equipos fijos y todas aquellas cargas que no son causadas por la ocupación y uso de la edificación (AIS, 2010, título B)

Tabla 28

Carga muerta generada por losa de contrapiso.

Carga muerta - Losa contrapiso		
Espesor (m)	Densidad (kN/m ³) *	Carga muerta (kN /m ²)
0,2	23	4,6

* Densidad tomada de Tabla B.3.2-1 *Masa de los materiales* (AIS, 2010)

Tabla 29

Carga muerta generada por muros.

Carga muerta - Muros				
Longitud perimetral (m)	Altura piso (m)	Densidad (kN /m ²) *	Carga muerta (kN)	Carga distribuida por área de piso (kN /m ²)
34,75	3	2,5	260,625	4,34

* Densidad tomada de Tabla B.3.2-4 *Cargas muertas mínimas de elementos no estructurales verticales-muros* (AIS, 2010)

Tabla 30

Carga muerta generada por cubierta de zinc.

Carga muerta - Cubierta Dos Aguas de Zinc				
Peso (Kg/m) tomado de ficha técnica (*)	Longitud de teja en la vivienda (m)	Peso por carga muerta de teja de zinc (Kg)	Peso expresado en (Kn)	Carga distribuida por área de piso (Kn/m ²)
1,17	117	136,89	1,37	0,023

(*) Peso tomado de (Homecenter, s.f.)

Tabla 31*Carga muerta generada por columnas.*

Carga muerta - Columnas					
Área columna (m ²)	Altura promedio (m)	Cantidad	Densidad (kN /m ³)*	Carga muerta (kN)	Carga distribuida por área de piso (kN /m ²)
0,03	3,5	13	24	32,76	0,55

* Densidad tomada de Tabla B.3.2-1 *Masa de los materiales* (AIS, 2010)**Tabla 32***Carga muerta generada por vigas de amarre*

Carga muerta - Vigas de amarre				
Área viga (m ²)	Longitud (m)	Densidad (kN /m ³)*	Carga muerta (kN)	Carga distribuida por área de piso (kN /m ²)
0,024	31	24	17,856	0,30

* Densidad tomada de Tabla B.3.2-1 *Masa de los materiales* (AIS, 2010)**Tabla 33***Carga muerta generada por perfil rectangular cuadrado.*

Carga muerta - Perfil rectangular cuadrado				
Peso (Kg/m) Tomado de ficha técnica *	Longitud Perfil (m)	Peso (Kg)	Peso (kN)	Carga distribuida por área de piso (kN /m ²)
7,73	48	371,12	3,711	0,062

* Peso tomado de (Acesco, 2023)

Tabla 34*Total carga muerta vivienda.*

Carga Muerta	9,872	kN /m2
--------------	-------	--------

7.3.2 Carga viva

Las cargas vivas definidas en (B.4) son aquellas cargas producidas por el uso y ocupación de la edificación y no debe incluir cargas ambientales como viento y sismo (AIS, 2010, título B). En la tabla B.4.2.1-1 de la NSR-10 se establecen las cargas vivas mínimas que dependen del tipo de utilización que se le va a dar a la estructura, para este caso se tiene una estructura que será de uso residencial para lo cual se considera la siguiente carga viva.

Tabla 35*Total carga viva*

Carga Viva	1,80	kN /m2
------------	------	--------

La carga generada al terreno es de 11.67 kN /m2 (1.17 Ton/m2)

7.4 Resultados

El modelo 3D de elementos finitos se analiza mediante el análisis por etapas constructivas de tipo Stress en el software de análisis geotécnico Midas GTS NX. Este método permite analizar la influencia del proceso constructivo y su variación ante las solicitaciones de la fuerza total ejercida al terreno y la fuerza gravitacional aplicadas sobre el eje Z.

Las etapas consideradas se exponen en la tabla 36.

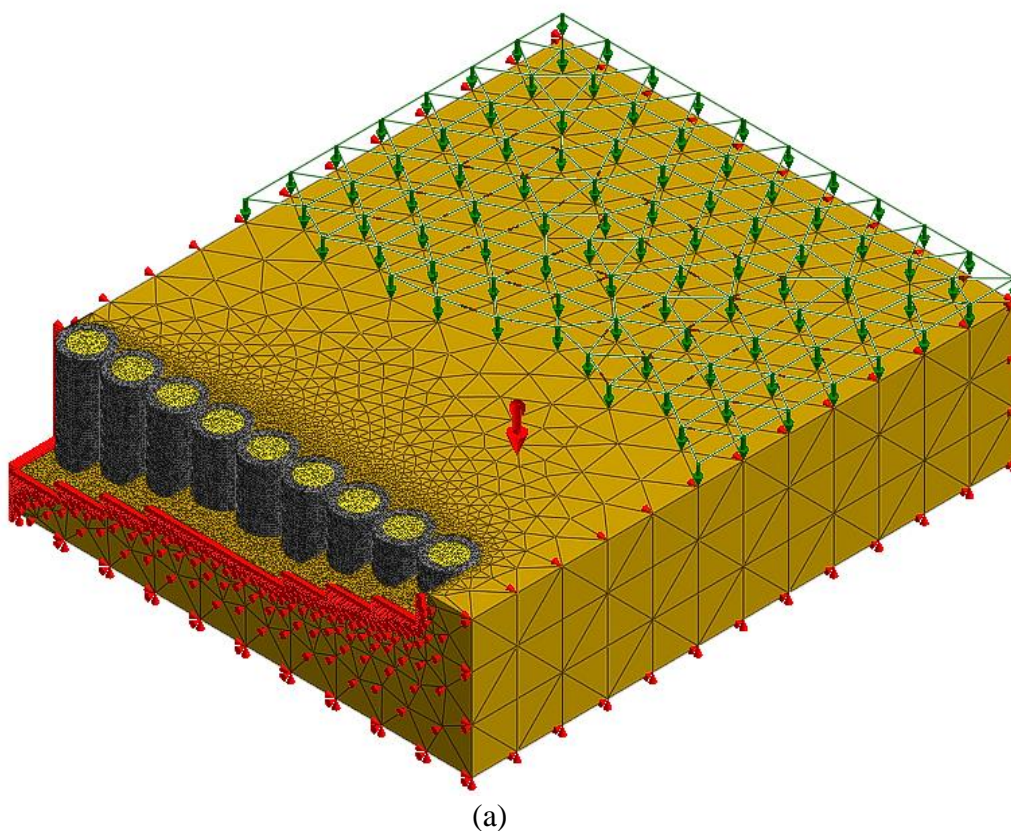
Tabla 36

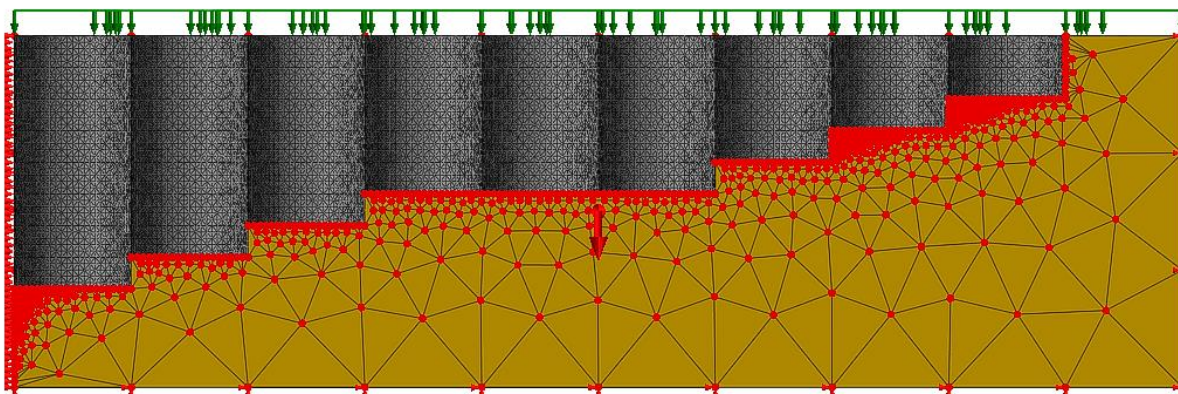
Etapas consideradas en la modelación.

ETAPA	DESCRIPCIÓN
1. Inicial	En esta etapa se activan las mallas del terreno. Se consideran las condiciones de fronteras y la carga generada por el peso propio.
2. Construcción muro	Se activan las mallas del muro de neumático, suelo interno.
3. Carga sobre terreno	Se activa la carga aplicada por la solicitación de la vivienda hacia el terreno.

Figura 33

Esquema modelación del sistema de estabilización del muro de contención construido con neumáticos.





(b)

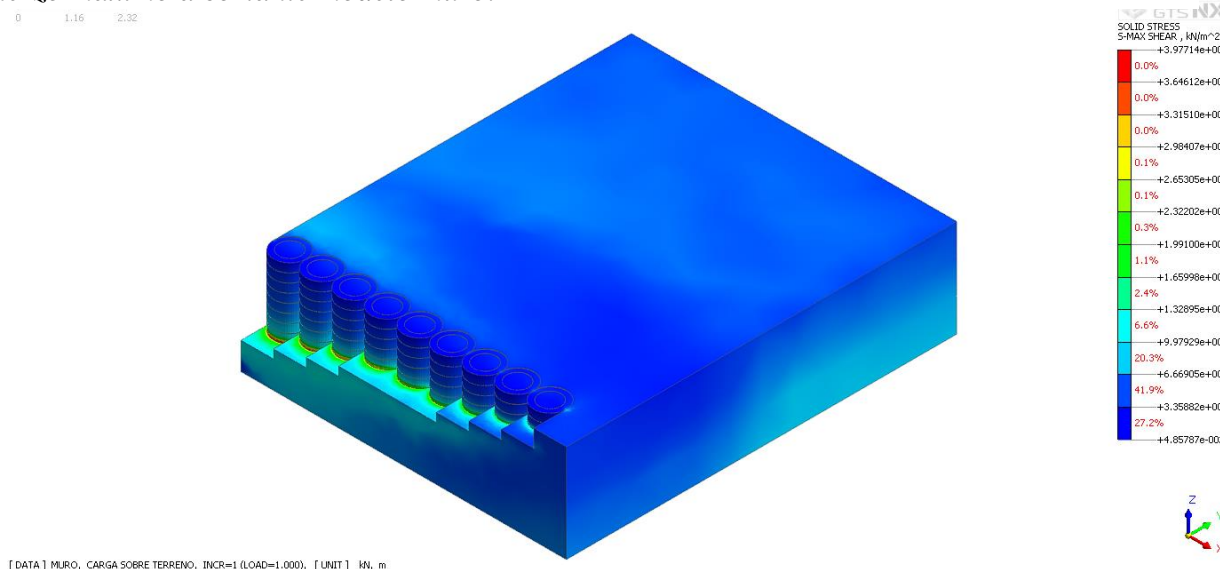
Nota. Se detalla en (a) la aplicación de las cargas generadas por la vivienda y aplicadas uniformemente distribuidas en el terreno y la carga generada por el peso propio; (b) Vista frontal, detalle de control de malla en los bordes cercanos al muro.

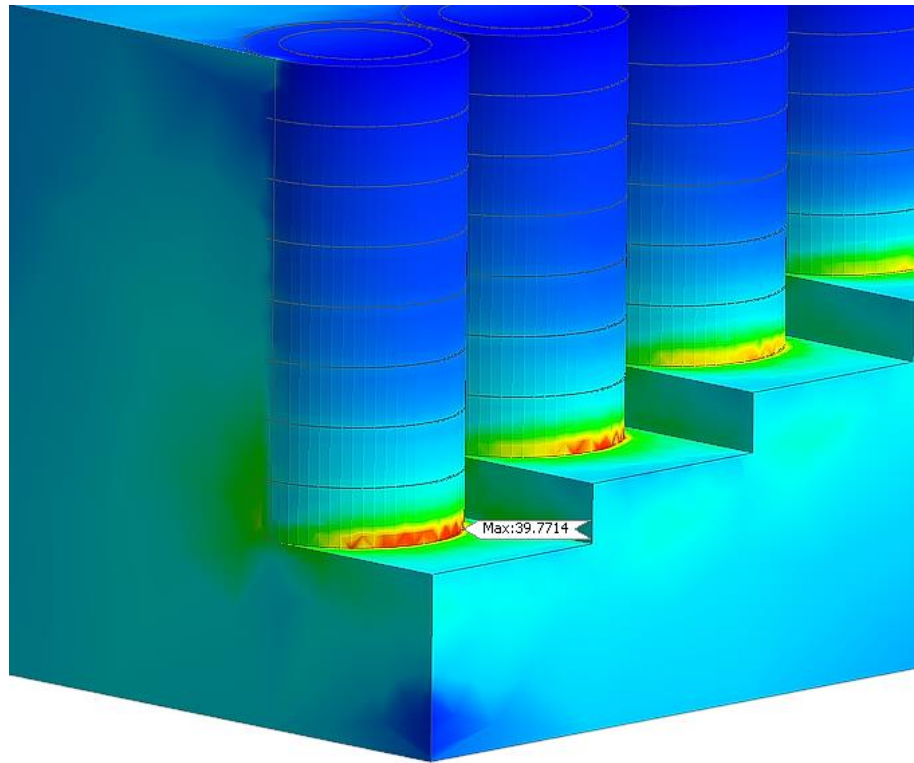
7.4.1 Esfuerzo cortante máximo

El esfuerzo máximo a cortante del modelo se detalla en la siguiente figura 34.

Figura 34

Esfuerzo máximo a cortante modelo muro.





Análisis:

El esfuerzo máximo a cortante se obtiene en la base del muro. Lo anterior tiene relación debido a la fricción desarrollada en la interfaz cuando interactúan dos tipos de materiales (neumático- suelo), es decir, las partículas se deslizan entre sí cuando el suelo del terreno que lo soporta se encuentra cargado por la sobrecarga de la vivienda y el empuje activo generado por la masa del suelo.

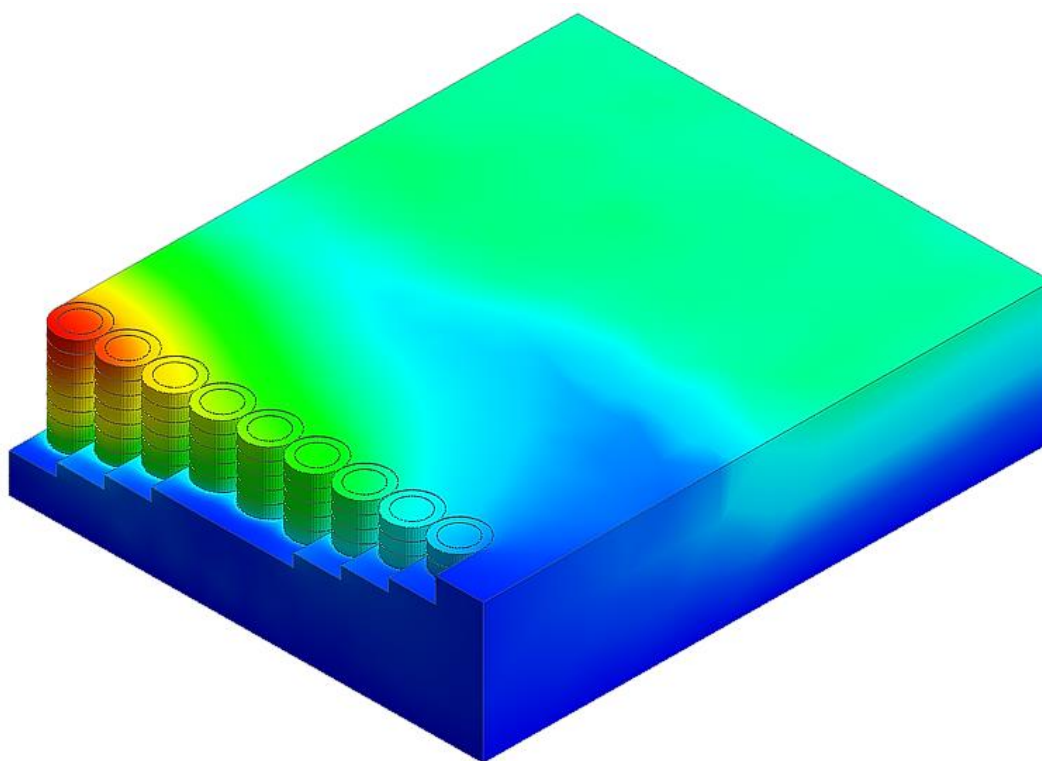
Se relaciona el esfuerzo máximo a cortante generado en la base del muro, como la posible falla que pueda desarrollar a lo largo de su vida útil, por lo que se deben implementar alternativas que refuercen y aumenten la resistencia en esta zona.

7.4.2 Desplazamiento máximo

Se determinan los desplazamientos máximos del sistema, teniendo en cuenta, las consideraciones descritas en 7.1 y 6.2.2. Por otra parte, se obtienen los resultados de los desplazamientos máximos alcanzados detallado en la figura 35.

Figura 35

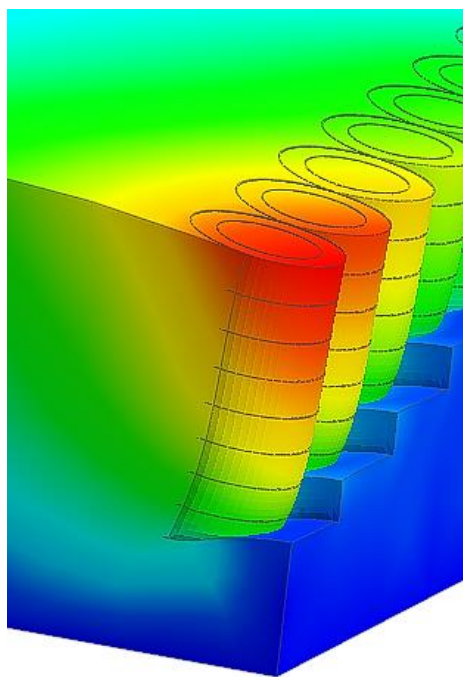
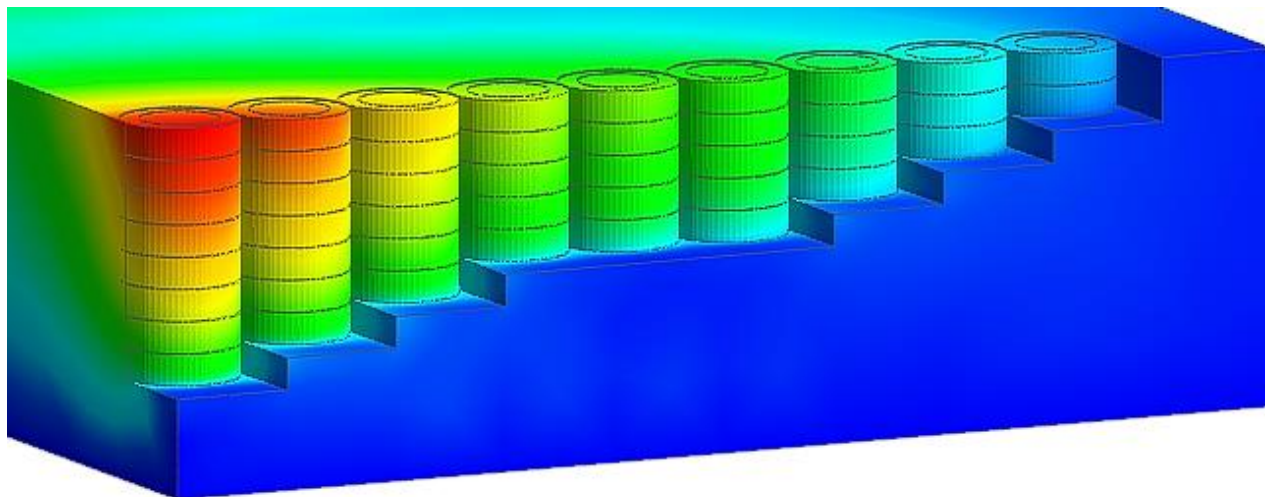
Desplazamientos máximos alcanzados.



Nota: Se observa el lugar donde tiene a lugar el desplazamiento máximo del sistema evaluado, entiéndase como el punto donde surgirá el desplazamiento relativo entre el terreno y el muro, sujeto a condiciones externas que lo aceleren.

Figura 36

Comparación desplazamiento máximo con estado actual del muro.



Nota: En las figuras se detalla el lugar de ocurrencia del máximo desplazamiento del sistema. Actualmente, el muro presenta una deformación en su primera columna, por la falta de un sistema eficiente de evacuación de agua.

Análisis:

Los resultados arrojados en la modelación representan la deformación que se está desarrollando actualmente en el caso de estudio. Tal y como se aprecia en las figuras 35 y 36, los neumáticos que se afectan en mayor proporción por los desplazamientos generados por las cargas impuestas son los primeros de la columna 1 (achurados con rojo).

Estos desplazamientos son inducidos por la falta de conexión entre los neumáticos y la carencia de un sistema de drenaje adecuado para aliviar la presión de agua en la parte posterior del muro.

También se relaciona al desplazamiento presentado en la modelación por la forma de disposición de los neumáticos. En la figura 13 (a) se aprecia que estos se acomodan de forma vertical, sin embargo, para poder contar con un sistema más estable se deben posicionar de forma sucesiva y escalonada una sobre otra, semejando la acomodación de bloques de mampostería.

CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL SISTEMA CON LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD DEL SITIO.

Se realiza el chequeo por deslizamiento y volcamiento para el muro construido con neumáticos de la zona de estudio. Se utiliza el procedimiento utilizado para el análisis de estabilidad del muro de contención fabricado con llantas recicladas usando suelo in situ, propuesto por (Criollo & León, 2017). Este análisis se fundamenta en la teoría de Rankine y en los factores de seguridad vigentes.

Los datos de entrada considerados para realizar el análisis se detallan en la tabla 37.

Tabla 37

Datos para realizar análisis de estabilidad.

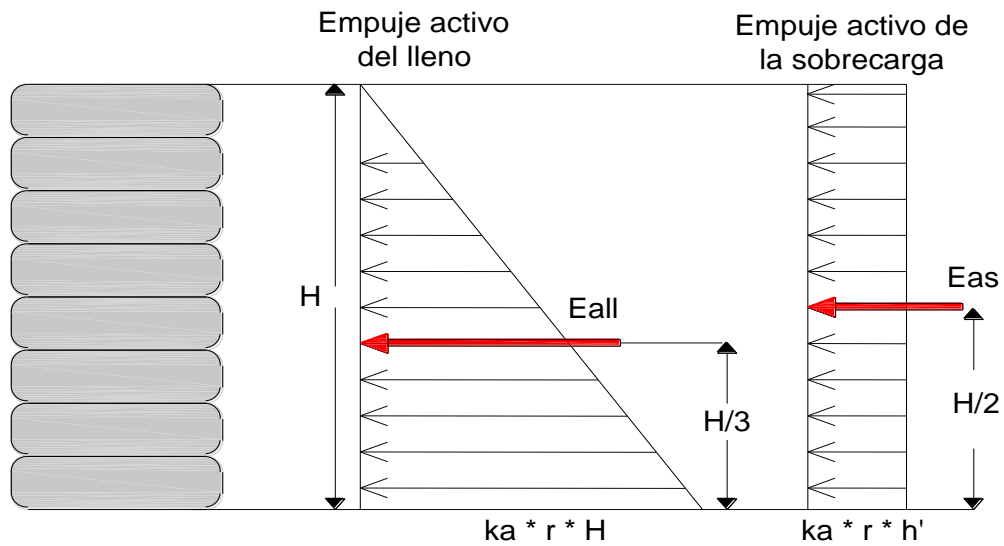
Datos muro	
Alto promedio muro (m)	1,35
Longitud (m)	9,00
Coef. Fricción (u)	0,75
Datos suelo relleno	
r (kN /m ³)	19,4
ϕ °	36,089
C (kPa)	12,279
Datos llanta	
Diámetro ext (m)	1,00
Diámetro interno (m)	0,67
Alto (m)	0,27
Peso llanta+suelo (Kg)	295,63
No. de llantas	45

8.1 Fuerzas desestabilizadoras

Las fuerzas desestabilizadoras del sistema son el empuje activo del lleno y el empuje generado por la carga de la vivienda hacia el terreno.

Figura 37

Diagrama fuerzas que desestabilizan.



Se determina el coeficiente de empuje activo para un talud horizontal (Ka) con la siguiente ecuación:

$$Ka = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) = Ka = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$$

$$Ka = \tan^2 \left(45 - \frac{36,089^\circ}{2} \right) \quad Ka = \frac{1 - \sin 36,089^\circ}{1 + \sin 36,089^\circ}$$

$$Ka = 0.26$$

- Cálculo empuje activo del suelo.

Como modelo conservador se toma un coeficiente de mayoración de 1.6 para tener mayor seguridad en el análisis.

$$E_{all} = 1.6 * \left(K_a * r * \frac{H^2}{2} \right)$$

$$E_{all} = 1.6 * \left(0.26 * 19.4 * \frac{1.35^2}{2} \right)$$

$$E_{all} = 4.57 \text{ Kn}$$

- Momento desestabilizador debido al empuje activo del suelo

El empuje del suelo genera un momento desestabilizador y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$M_{des-suelo} = E_{all} * \frac{H}{3}$$

$$M_{des-suelo} = 4,57 \text{ Kn} * \frac{1,35 \text{ m}}{3}$$

$$M_{des-suelo} = 2,06 \text{ Kn} * \text{m}$$

- Cálculo empuje activo de la sobrecarga.

$$E_s = 1.6 * K_a * r * h' * H$$

Donde h' es la altura equivalente, que se determina:

$$h' = \frac{\text{Sobrecarga}}{r} = \frac{11.67 \text{ Kn}/\text{m}^2}{19,4 \text{ Kn}/\text{m}^3}$$

$$h' = 0.602 \text{ m}$$

Reemplazando:

$$E_s = 1.6 * 0.26 * 19.4 \text{ Kn}/\text{m}^3 * 0.602 \text{ m} * 1.35 \text{ m}$$

$$E_s = 4.08 \text{ Kn}$$

- Momento desestabilizador debido a la sobrecarga

La sobrecarga genera un momento desestabilizador y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$M_{des-sobrecarga} = E_s * \frac{H}{3}$$

$$M_{des-suelo} = 4,08 Kn * \frac{1,35 m}{2}$$

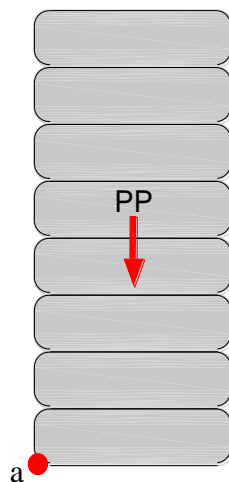
$$M_{des-suelo} = 2,75 Kn * m$$

8.2 Fuerzas estabilizadoras

Las fuerzas estabilizadoras son aquellas que contrarrestan los esfuerzos horizontales que ocasionan el volteo del muro, para este caso solo se considera la fuerza por peso propio de las 45 llantas que conforman el sistema.

Figura 38

Fuerza que estabiliza



El peso propio del muro es una fuerza estabilizadora característica de los muros de gravedad. La estabilidad de los muros de gravedad depende directamente al peso generado por su propio peso. Para los 45 neumáticos que conforman el muro, se determina el peso propio por metro lineal.

Tabla 38

Determinación del peso propio generado por el muro.

Peso del muro		
Peso llanta+ suelo	295,63	Kg
Peso 45	13303,35	Kg
Peso por 1 metro lineal	14,50	kN /m

- Momento estabilizador

Se considera el brazo (a) como 0.5 m, que es la distancia entre la base y el punto de aplicación del peso propio. El momento estabilizador es igual a:

$$M_{est} = 14.50 \text{ Kn} * 0,5 \text{ m}$$

$$M_{est} = 7,25 \text{ Kn} * \text{m}$$

8.3 Fuerzas y momentos resultantes.

En la tabla 39, se indican las fuerzas y momentos resultantes actuantes en el muro.

Tabla 39

Fuerzas y momentos resultantes.

Fuerzas y momentos resultantes.					
Fuerza	Fuerza que estabilizan (Fv)	Fuerza que desestabilizan (Fh)	Brazo	Momento estabilizador (M est)	Momento desestabilizador (M des)
Eall		4,57	0,45		2,06
Es		4,08	0,675		2,75
Peso Propio	14,50		0,5	7,25	
Total	14,50	8,65		7,25	4,81

8.4 Chequeo por deslizamiento.

$$\frac{F_V}{F_H} \mu \geq 1.6$$

Se asume el factor de μ como 0.75, de acuerdo con (Linares, 2020, citado por Sims & Gaffney, 1976) “la fricción llanta - llanta puede llegar a ser muy alta sin ninguna deformación (Valor estimado del coeficiente de fricción de 0.75)” (p. 34)

$$\frac{14.50 \text{ Kn}}{8.65 \text{ Kn}} * 0.75 = 1.26$$

Por deslizamiento		
1.26	<	1,6

No cumple.

8.5 Chequeo por volcamiento.

$$\frac{M_{est}}{M_{des}} \geq 3.0$$

$$\frac{7.25 \text{ Kn} * m}{4.81 \text{ Kn} * m} = 1.51$$

Por volcamiento		
1.51	<	3

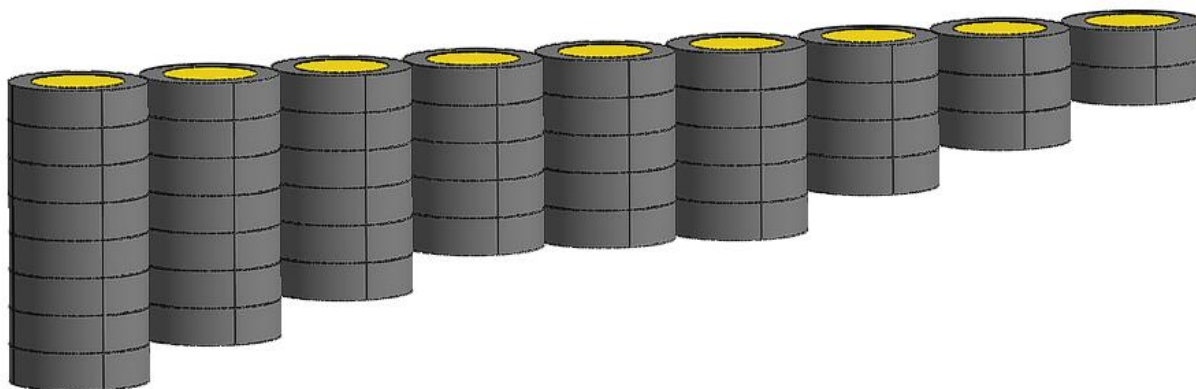
No cumple.

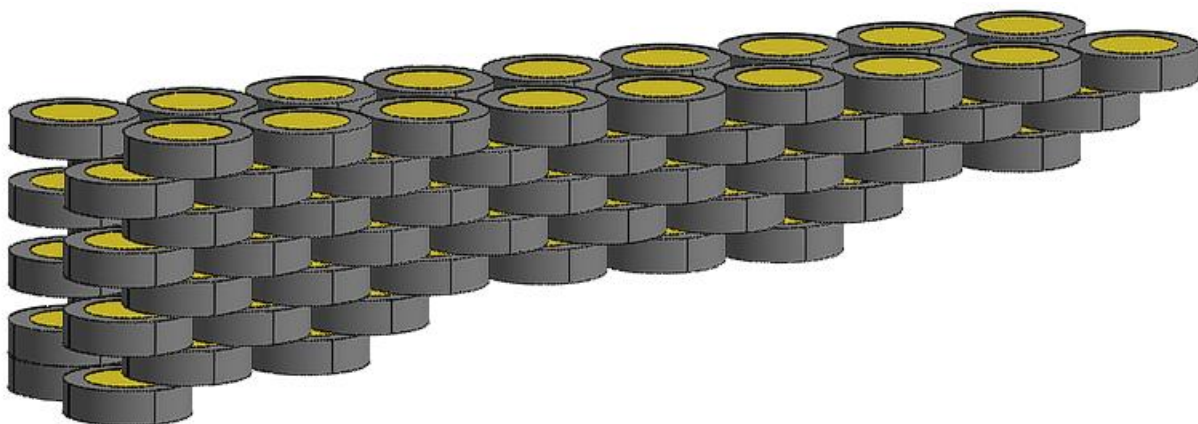
CAPÍTULO IX: ALTERNATIVAS DE OPTIMIZACIÓN

- La base del muro es el lugar donde se desarrollan los mayores esfuerzos a cortantes para los sistemas de contención con muros de neumáticos, por lo que se deben tomar medidas para aumentar la resistencia al corte en estos lugares críticos a largo plazo. Una alternativa para contrarrestar los esfuerzos a cortantes máximos desarrollados en la base del muro consiste en implementar varias pilas de neumáticos organizadas en forma escalonada, aumentando su peso propio y factor de seguridad.

Figura 39

Alternativas de optimización: posición.



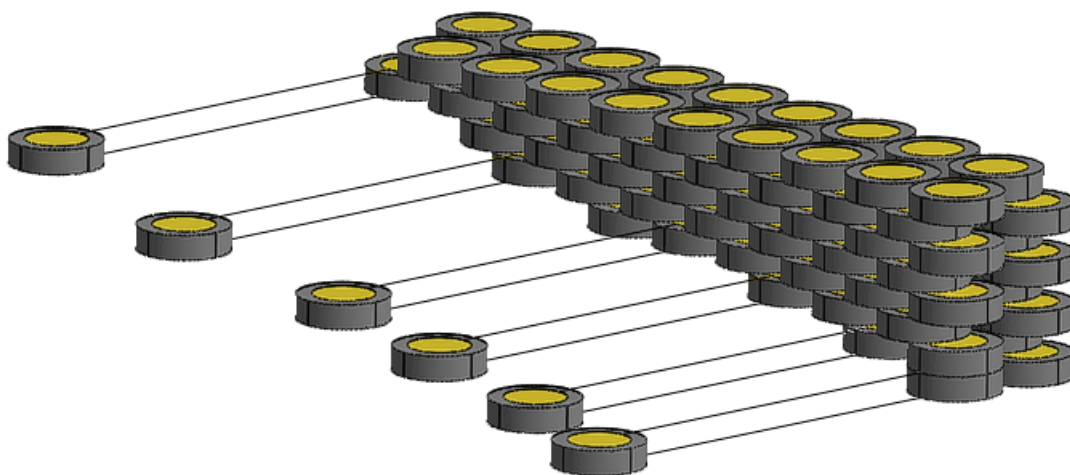


Nota: Se aprecia la posición del muro actual organizada en forma vertical y la propuesta de varias pilas organizadas de forma escalonada.

- Además, se debe implementar en la primera fila (base) el amarre con dados de peso que pueden ser del mismo material de neumático ubicados en posición hacia el terreno, de manera que proporcione al suelo la redistribución de esfuerzos.

Figura 40

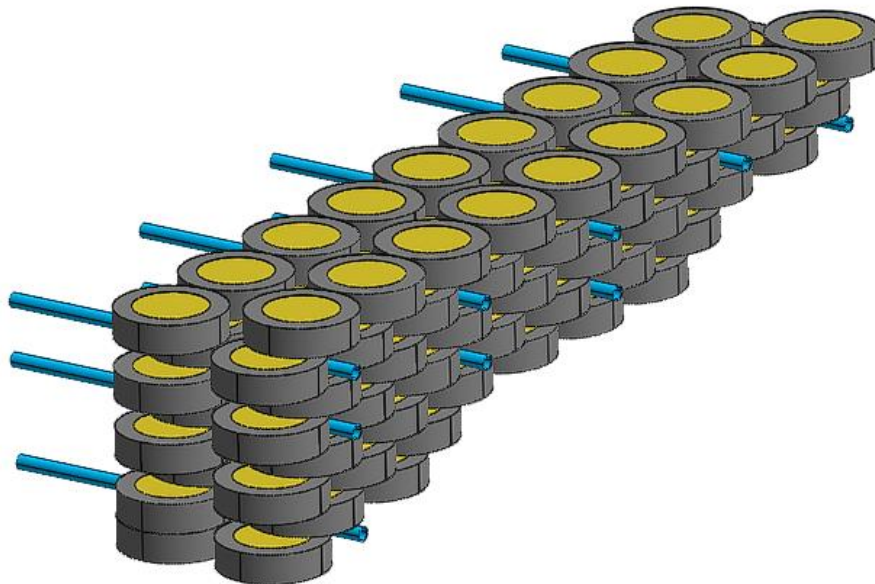
Alternativas de optimización: dados de contrapeso.



- Para evitar las presiones de poros por la acumulación de agua en la parte posterior, se debe implementar sistemas de evacuación como filtros horizontales para que el agua adyacente fluya. El factor más influyente en la inestabilidad de cualquier tipo de estructura de contención es el agua, por lo que se debe dar el manejo adecuado para evacuarla de una forma controlada y eficaz.

Figura 41

Alternativas de optimización: instalación filtros horizontales.

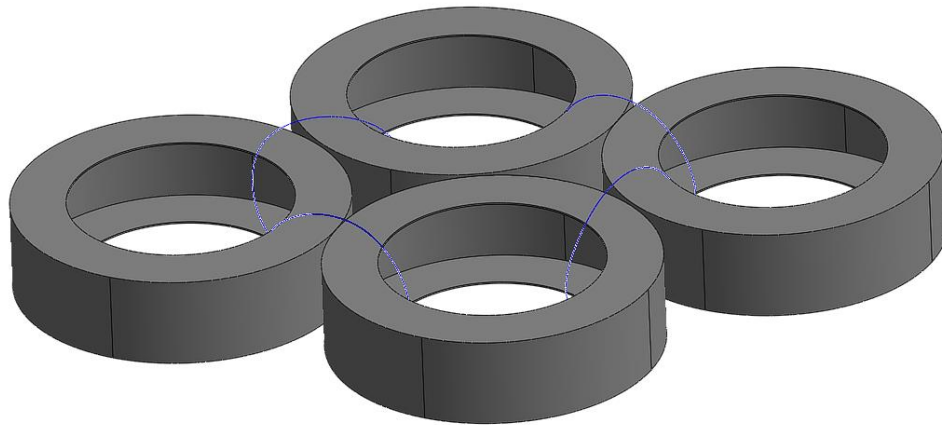


- Para asegurar que todos los elementos individuales de los neumáticos se conecten entre sí, se debe entrelazar adyacentemente entre ellos en sentido longitudinal y transversal, por medio de algún elemento conector. Se recomienda utilizar alambre, teniendo en cuenta los resultados de la investigación de (Sieira y otros, 2001) que señala que atar con

alambre los neumáticos, presenta mejor comportamiento y proporciona un aumento de rigidez al material suelo -neumático.

Figura 42

Alternativas de optimización: conexión neumáticos adyacentes.



CAPÍTULO X: CONCLUSIONES

Del primer objetivo, se logró caracterizar el suelo de cimentación de la zona de estudio mediante muestras representativas que fueron ensayadas mediante laboratorios de caracterización física tales como, contenido de humedad, gravedad específica, granulometría por hidrómetro y tamizado, límites líquido y plástico; además, se realizó la caracterización de resistencia por medio del laboratorio de corte directo CD. Se concluye que el material de estudio corresponde a una arena bien gradada (SW) con partículas limo- arcilloso de baja plasticidad (CL-ML)

Del segundo objetivo, se realizó la modelación de elementos finitos desarrollada en el software de análisis geotécnico Midas GTS NX se determinó la interacción entre el neumático y el suelo de relleno y la forma que se desarrollan sus esfuerzos internos ante la aplicación de cargas normales y tangenciales. Se realizaron dos hipótesis de modelación, con el neumático entero y sin la banda superior, obteniendo resistencias de esfuerzo a cortante máximo de 51.37 kPa, y 59.36 kPa, respectivamente.

Del tercer objetivo, se realizó la modelación en el software de análisis geotécnico MIDAS GTS NX se estableció la interacción del muro de contención con respecto al terreno y solicitaciones del sistema actual. La base del muro es la zona donde se presenta el mayor esfuerzo a cortante, lo anterior es debido a la interacción friccional entre las partículas del suelo y el material que compone al neumático.

Del cuarto objetivo, se concluye que la estabilidad de la estructura del muro de contención construido con neumáticos tomado como caso de estudio de la vereda Ospina Pérez del municipio

de Palermo-Huila contiene un total de 45 neumáticos organizados de forma vertical sin elementos de amarre con un peso propio de 13.303,35 Kg; se afecta por fuerzas horizontales desestabilizadores de 8.65 kN ocasionando la posible falla del sistema por deslizamiento en su base. Se realizan chequeo de factor de seguridad por deslizamiento y volcamiento de la estructura, donde se obtiene resultados de 1.26 y 1.51 respectivamente, los anteriores resultados no cumplen con el mínimo exigido en la normativa para estructuras de contención.

Del quinto objetivo se determina que el comportamiento de estas estructuras se ve determinado por la rigidez del sistema neumático- suelo; por lo que se relacionan algunas alternativas de optimización para implementar en estos sistemas y lograr estructuras más estables. Estas alternativas consisten en incrementar la relación de su base para aumentar significativamente su peso propio y obtener un mayor factor de seguridad, lo anterior, se considera incrementando varias pilas de neumáticos de forma escalonada; por otra parte, para disminuir los esfuerzos a cortante desarrollados en la base del muro, se propone considerar dados de peso para redistribuir los esfuerzos en el terreno sobre el muro, como también de optar por la instalación de filtros horizontales para aliviar las cargas ocasionadas por el empuje del agua y atar los neumáticos adyacentemente para garantizar que se conecten entre sí.

Para concluir, el sistema de muro de contención construido por medio de neumáticos es una alternativa utilizada para sistemas de contención en laderas naturales y terreno de altas pendientes que sirve para dar soporte lateral del suelo que contiene y aumentar la superficie útil en el lugar donde se implanta. Esta alternativa de muros de contención con neumáticos no está cubierta por los códigos de diseño actuales, generando que en su construcción no se consideren teorías de esfuerzos y análisis de estabilidad. La realidad encontrada en el sector de estudio

evidencia que las comunidades optan por realizar sus construcciones con materiales que disponen (neumáticos) ya que los materiales convencionales son costosos y su adquisición se dificulta al estar ubicadas en zonas de difícil acceso. Tomando como premisa, que el fin de la ingeniería debe ser idear soluciones prácticas según las necesidades sociales y desarrollar nuevas tecnologías que sean seguras, confiables y estables, esta investigación estudió el comportamiento geotécnico de una estructura de contención tomada como caso de estudio la vereda Ospina Pérez del municipio de Palermo- Huila, que tiene como unidad base neumáticos con relleno de suelo de la zona y determinó los lugares críticos donde se desarrollan los esfuerzos a cortante y desplazamientos máximos alcanzados haciendo uso del programa de análisis por elementos finitos de Midas GTS NX y proponiendo unas alternativas de optimización.

Referencias

Acesco. (2023). *Ficha Técnica Metaltub Tubería Estructural y cerramiento*. [PDF].

<https://www.acesco.com.co/descargas/fichastecnicas/ficha-tecnica-metaltub.pdf>

Acuerdo No. 031 de 2007 [con fuerza de ley]. Por medio del cual se modifica y ajusta el acuerdo

N°064 del 29 de diciembre de 1999. Junio 14 de 2007. https://www.sirhuila.gov.co/wp-content/uploads/2021/07/Acuerdo_N031_de_2007_Modificadorio_Palermo.pdf

Alcaldía de Palermo. (29 de Abril de 2021). *Palermo decretó calamidad pública por ola invernal*

2021: Sala de Prensa: [https://www.palermo-](https://www.palermo-huila.gov.co/NuestraAlcaldia/SaladePrensa/Paginas/PALERMO-DECRET%C3%93-CALAMIDAD-P%C3%9ABLICA-POR-OLA-INVERNAL-.aspx)

[huila.gov.co/NuestraAlcaldia/SaladePrensa/Paginas/PALERMO-DECRET%C3%93-CALAMIDAD-P%C3%9ABLICA-POR-OLA-INVERNAL-.aspx](https://www.palermo-huila.gov.co/NuestraAlcaldia/SaladePrensa/Paginas/PALERMO-DECRET%C3%93-CALAMIDAD-P%C3%9ABLICA-POR-OLA-INVERNAL-.aspx)

Alcaldía de Palermo. (2024). *Información del Municipio*. [https://www.palermo-](https://www.palermo-huila.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx)

[huila.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx](https://www.palermo-huila.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx)

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [AIS]. (2010). *Reglamento Colombiano de*

Construcción Sismo Resistente NSR-10. Título A Requisitos Generales de diseño y contrucciones sismo resistente. Bogotá, Colombia.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [AIS]. (2010). *Reglamento Colombiano de*

Construcción Sismo Resistente NSR-10. Título B Cargas. Bogotá, Colombia

- Arthur, E., Rehman, H., Tuller, M., Pouladi, N., Norgaard, T., Moldrup, P., & Wollesen, L. (2021). Estimating Atterberg limits of soils from hygroscopic water content. *Geoderma*, 9, 381. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114698>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [ANLA]. (2022). *Informe de Gestión y Sostenibilidad*. [PDF] <https://www.anla.gov.co/images/documentos/informes/2023-01-31-anla-gri-2022f.pdf>
- Bahena, O., & Rivera, M. (2022). *Evaluación de los esfuerzos internos en muros reforzados con llantas recicladas, a partir de modelos en elementos finitos (MEF)*. [Investigación no publicada]. Universidad Surcolombiana.
- Baroni, M., Pivoto, L., & Barbosa, R. (2012). Construction of earth retaining structures using scrap tires: numeric analysis and case study. *Engenharia Civil*, 65(4), 449-457. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672012000400004>
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2006). *Guía para el manejo de llantas usadas. Un sector más transparente con operación más limpia*. Biblioteca Digital CCB. <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/items/9ba8833a-65a3-4820-bb94-17aca233f5e5>
- Casagrande, A. (1948). Classification and Identification of Soils. Transactions of the American Society of Civil Engineers. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 113 (1) <https://doi.org/https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006109>

Chen, S., Zhang, B., Zheng, H., He, X., Su, Y., Xu, H., Zhu, Y., Pan, Y., & Chen, J. (2023).

Polymerized activating highly-dispersible waste tire powder for viscoelasticity regulation of modified asphalt at a lower mixing temperature. *Construction and Building Materials*, 366. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130216>

Criollo, J., & León, S. (21 de septiembre de 2017). *Construcción y análisis de un modelo experimental de muro de contención, fabricado con llantas recicladas usando suelo in situ*. Repositorio Institucional Universidad Distrital.

<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6885>

Das, B. M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Thomson Learning.

<https://es.slideshare.net/ralvmrz/fundamentos-de-ingeniera-geotcnica-braja-m-das>

Das, B. M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning Editores.

https://www.academia.edu/42603156/Braja_Das_Fundamentos_de_ingenieria_de_cimentaciones_7ed

Datos Mundial. (2024). *Crecimiento demográfico en Colombia*.

<https://www.datosmundial.com/america/colombia/crecimiento-poblacional.php>

Diario del Huila. (9 de Marzo de 2023). *Lluvias generaron emergencias en 12 veredas de*

Palermo, Huila. <https://diariodelhuila.com/lluvias-generaron-emergencias-en-12-veredas-de-palermo-huila/>.

El Tiempo. (30 de Abril de 2021). *Huila está en emergencia por las fuertes lluvias*.

<https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/temporada-de-lluvias-huila-en-emergencias-por-las-fuertes-lluvias-585058>

Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (s.f.). *SUELO. CAP 8.*

Consistencia del suelo.

https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706e/x6706e08.htm

GFDRR, MinVivienda, & Banco Mundial. (2014). *Gupia Metodológica para el inventario de asentamientos en zonas de alto riesgo*. [PDF].

<https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/guia-aplicacion-asentamientos.pdf>

Homecenter. (s.f.). *Teja Zinc Ondulada 3.048x0.80mt Cal 35 0.17mm*.

<https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/234320/teja-zinc-ondulada-3048x080mt-cal-35-017mm/234320/>

Huat, B., Aziz, A., & Chuan, L. (2008). Application of scrap tires as earth reinforcement for repair of tropical residual soil slope. [https://www.semanticscholar.org/paper/Application-of-scrap-tires-as-earth-reinforcement-Huat-](https://www.semanticscholar.org/paper/Application-of-scrap-tires-as-earth-reinforcement-Huat-Aziz/da9b2dc32094c7f825bee57a9e136ff8c62862f8)

[Aziz/da9b2dc32094c7f825bee57a9e136ff8c62862f8](https://www.semanticscholar.org/paper/Application-of-scrap-tires-as-earth-reinforcement-Huat-Aziz/da9b2dc32094c7f825bee57a9e136ff8c62862f8)

Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero- Ambiental y Nuclear

[Ingeominas]. (2002). *Levantamiento Geológico de la plancha 323 Neiva* [PDF]

<https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010002476/documento/pdf/0101024761101000.pdf>

Instituto Nacional de Vías [INV]. (2013). *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 122 Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo- agregado* [PDF]
<https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-122-13.pdf>

Instituto Nacional de Vías [INV]. (2013). *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 123 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos* [PDF] <https://es.scribd.com/document/363328885/INV-E-123-13-pdf>

Instituto Nacional de Vías [INV]. (2013). *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 125 Determinación del límite líquido de los suelos* [PDF]
<https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-125-13.pdf>

Instituto Nacional de Vías [INV]. (2013). *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 126 Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los suelos* [PDF]
<https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-126-13.pdf>

Instituto Nacional de Vías [INV]. (2013). *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 128 Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua* [PDF]
<https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-128-13.pdf>

Instituto Nacional de Vías [INV]. (2013). *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 154 Ensayo de Corte Directo en condición consolidada drenada (CD)* [PDF] <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-154-13.pdf>

Instituto Nacional de Vías [INVIAS]. (1998). *Manual de Estabilidad de Taludes Geotecnia Vial 1998*. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/proyectos-de-norma/11314-manual-de-estabilidad-de-taludes-geotecnia-vial-1998>

La Voz de la Región. (7 de Marzo de 2022). *Palermo entregó balance de atención por ola invernal*. <https://la-vozdelaregion.co/palermo-entrego-balance-de-atencion-por-ola-invernal/>

Lambe, W., & Whitman, R. (2012). *Mecánica de Suelos*. México: Limusa.
https://www.academia.edu/44624675/Mec%C3%A1nica_de_Suelos_T_William_Lambe_Robert_V_Whitman

Linares, N. (2020). *Propuesta teórica de muros con llantas de acuerdo con las características de los suelos de la región: departamento de Caldas*. Repositorio Universidad Nacional.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78555>

Long, N. T. (1993). *Le Pneusol : Recherches – Réalisations – Perspectives*. [Tesis para obtener el título de Doctor en Ingeniería Civil, Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Lyon]
<https://docplayer.fr/95474855-Le-pneusol-recherches-realizations-perspectives.html>

Michelin. (2024). *Fabricación de llantas y reciclaje*.

<https://www.michelin.com.co/auto/consejos/aspectos-basicos-de-las-llantas/fabricacion-llantas-reciclaje>

Midas. (s.f.). *Midas GTS NX Software para análisis geotécnicos 2D y 3D basado en el método de elementos finitos*.

<https://www.midasoft.com/es/latinoamerica/productos/ingenieriageotecnica/midasgtsnx>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Comercio, Industria y Turismo.

(2019). *Estrategia Nacional de Economía Circular* [PDF]

https://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf_637176135049017259.pdf

Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (Abril de 2014). “*Manual de Carreteras*” *Suelos, Geología y Pavimentos. Sección suelos y pavimentos*.

<https://www.udocz.com/apuntes/18840/manual-de-carreteras-mtc---peru--actual--suelos--geologi-a--geotecnia-y-pavimentos>

Moreno, J. M., & Alonso, J. (2022). Evaluation of the USDA soil texture triangle through Atterberg limits and an alternative classification system. *Applied Clay Science, 10*.

<https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106689>

Ospina, L., Córdoba, M., & Alcides, B. (2019). *Diseño y construcción de muro de contención en neumático usado en el Municipio de La Mesa*. Repositorio Uniminuto.

<https://repository.uniminuto.edu/handle/10656/7562>

Peña, C. A. (2018). *Muros de contención mediante la utilización de neumáticos desechados para alturas menores*. Repositorio USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/42202>

Pérez, R., & Saiz, L. (2018). Reciclado de neumáticos: transformación de un residuo en un recurso. *Revista de Plásticos Modernos*, 115(730), 11-18. <https://www.signus.es/wp-content/uploads/2018/04/reciclado-de-neumaticos-transformacion-de-un-residuo-en-un-recurso.pdf>

Resolución 1326 de 2017 [con fuerza de ley]. Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se dictan otras disposiciones. Julio 06 de 2017. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-1326-de-2017.pdf>

Resolución 1457 de 2010 [con fuerza de ley]. Por medio de la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se adoptan otras disposiciones. Julio 29 de 2010. D.O. 47786. <https://www.mincit.gov.co/ministerio/normograma-sig/procesos-de-apoyo/gestion-de-recursos-fisicos/resoluciones/resolucion-1457-de-2010.aspx>

Rodríguez, O. E. (2016). *Estandarización de técnicas de diseño y construcción de muros de tierra reforzada con llantas de desecho*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57245/71389816.2016.pdf?sequence=1>

- Sieira, A., Sayão, A., Medeiros, L., & Gerscovich, D. (2001). Estabilización de Taludes con Muros de Neumáticos. *V Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables*, (3) 1061-1070.
https://www.academia.edu/6400255/V_SIMPOSIO_NACIONAL_SOBRE_TALUDES_Y_LADERAS_INESTABLES_Estabilizaci%C3%B3n_de_Taludes_con_Muros_de_Neum%C3%A1ticos
- Suarez, J. (2021). Capítulo 3 Estructuras de Contención de Gravedad, *Deslizamientos: técnicas de remediación*. (pp. 109- 148)
https://www.academia.edu/35778918/Estructuras_de_contencion_de_gravedad
- Torrent, R. J. (s.f.). *El coeficiente de poisson, ¿de dónde proviene?, ¿cómo afecta las propiedades del hormigon?* [PDF] <https://www.aath.org.ar/wp-content/uploads/Torrent-NOTA-TECNICA.pdf>
- Vega, M. (2020). *Iniciativas Nacionales para el reciclaje de llantas usadas en Colombia*. [PDF] <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7844/1/233203-2020-I-GA.pdf>
- Zhang, X., Lu, Yi (2023). FEM analysis of wasted tire chip and sand as construction material. *Case Studies in Construction Materials*, 18.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01735>