

PROYECTO DE GRADO:
ESTABILIZACIÓN DE TALUDES CON NEUMÁTICOS USADOS

PAULA ANDREA TORRES LATORRE

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2016

ESTABILIZACIÓN DE TALUDES CON NEUMÁTICOS USADOS

PAULA ANDREA TORRES LATORRE

Trabajo presentado como
desarrollo del
proyecto de grado.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2016

Contenido

1. PROBLEMA.....	8
2. ANTECEDENTES	9
3. ALCANCE	11
4. JUSTIFICACIÓN.....	12
5. OBJETIVOS.....	14
6. MARCO TEÓRICO	15
6.1 Neumáticos.....	15
6.1.1 Producción de neumáticos.....	15
6.1.2. Ciclo de vida de los neumáticos.....	18
6.1.3 Impactos ambientales negativos por mala disposición del recurso.	19
6.1.4. Métodos de reciclaje que se han encontrado.	20
6.1.4.1. Métodos mediante aplicación del calor:	20
6.1.4.2. Métodos físicos	21
6.2. Estabilización de taludes con muro hecho de neumáticos.	21
7. DISEÑO METODOLÓGICO	22
8. EJECUCIÓN DEL PROYECTO.....	23
8.1 Problemática social y ambiental.....	23
Para comprender la problemática generada por la disposición de este material se va a nivel local primero se examinará la situación de algunos países desarrollados.	23
8.1.1. Disposición de residuos sólidos en el mundo.....	23
8.1.2. Disposición de neumáticos usados en países desarrollados.	23
8.1.3 Disposición de neumáticos en Bogotá D.C.....	25
8.1.4. Legislación nacional y distrital.....	28
• Resolución 1488 de 2003	28
• Resolución 1457 de 2010.	29
• Resolución 6981 de 2011	29
8.2 Usos alternativos de los Neumáticos fuera de uso.	29
8.3. Estabilización con neumáticos fuera de uso (<i>PNEUSOL O TIRESOIL</i>).....	31
8.3.1 Dimensionamiento de muro pneusol.....	34
8.3.2 Casos de estudio.....	34
8.3.2.1. Metodología empírica.....	35

8.3.2.2. Metodología Semi-Empírica.....	36
8.3.2.3. Metodología Racional.	38
❖ Caracterización del suelo local.	39
❖ Resultados de campo.....	40
❖ Ensayo de resistencia “pull out”.....	43
• Pruebas.(revisar secuencia numeración no es necesaria esta).....	43
❖ Costos	47
❖ Proceso de construcción.....	48
8.4. APLICACIÓN DEL MÉTODO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.	51
8.4.1. GEOLOGÍA LOCAL.....	51
8.4.2 CASO DE ESTUDIO EN BOGOTÁ D.C.....	52
8.4.2.1 CORRECCIÓN DE CÁLCULOS.....	54
8.4.2.2 FACTORES DE SEGURIDAD MURO CON NEUMÁTICOS Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD INTERNA.....	56
❖ Análisis de estabilidad interna.....	58
❖ Análisis de estabilidad externa.....	58
9. CONCLUSIONES	63
10. RECOMENDACIONES	64
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

Contenido Figuras

Figura 1	Montaje experimental del muro	9
Figura 2	Montaje experimental	10
Figura 3	Estructura interna de un neumático convencional	15
Figura 4	Estructura interna de un neumático radial	16
Figura 5	Ciclo de vida de los neumáticos	18
Figura 6	Corte de muro de contención hecho con neumáticos usados	22
Figura 7	Escombros generados por el incendio de 600.000 neumáticos	25
Figura 8	Localidades afectadas por el humo provocado por el incendio de la bodega	26
Figura 9	Mala disposición de neumáticos en la ciudad de Bogotá	27
Figura 10	Fundación “Llanta verde” elaborando canecas	30
Figura 11	Silla hecha con neumáticos usados y acolchonada	31
Figura 12	Nudo para el amarre de neumáticos con polipropileno	32
Figura 13	Ganchos metálicos para el amarre de neumáticos	32
Figura 14	Distribuciones de carga en muros pneusol	33
Figura 15	(a) Muro hecho en Guatemala. (ISDR, 2010) (b) inicio de construcción muro hecho en Medellín (c) muro casi terminado	35
Figura 16	Muro hecho en Costa Rica	36
Figura 17	Curva de ruptura y posición del pneusol	37
Figura 18	Perfil del talud	38
Figura 19	Perfiles de las secciones hechas en el muro	39
Figura 20	Gráficas de desplazamientos medidos con inclinómetros contra profundidad	41
Figura 21	Gráfica de esfuerzo contra altura de la sección B	42
Figura 22	Corte y planta del montaje para el ensayo “pull out”	43
Figura 23	Deformación de las llantas de la fase 2	44
Figura 24	Carga Vs desplazamiento para diferentes configuraciones fase 2	45
Figura 25	Factor de seguridad en la fase de final de construcción	47
Figura 26	Proceso de construcción del muro hecho en Brasil	49
Figura 27	Proceso de constructivo de la Guía de la Construcción del muro de contención, con llantas usadas	50
Figura 28	Geología de la sabana de Bogotá	51
Figura 29	Zona de falla para construcción del muro	53
Figura 30	Perfil del muro diseñado por el IDU	54
Figura 31	Factor de seguridad del muro diseñado por el IDU	55

Figura 32	secciones transversales propuestas para muros con neumáticos usados	57
Figura 33	resistencia al corte para los datos obtenidos con el ensayo pull out.	61

Contenido tablas

Tabla 1	Materiales que componen los neumáticos radiales	16
Tabla 2	Características geotécnicas del suelo	40
Tabla 3	comparados entre las medias, Rankine y Coulomb	42
Tabla 4	para el ensayo pull out	44
Tabla 5	Resultados del ensayo pull out fase 2	46
Tabla 6	Factores de seguridad para muro diseñado por el IDU	56
Tabla 7	Factores de seguridad a largo plazo para las secciones 1, 2, 3 y 4	60
Tabla 8	Factores de seguridad a corto plazo para las secciones 1, 2, 3 y 4	60
Tabla 9	9 Datos para grafica corte directo	61
Tabla 10	Valores de ángulo de fricción hallados para diferentes montajes	62
Tabla 11	Factores de seguridad Obtenidos con el programa SLIDE	63

1. PROBLEMA

Bogotá D.C, como muchas otras ciudades del mundo, tiene una población en crecimiento constante, así como aumenta dicha población aumenta también el número de vehículos que circulan por la ciudad, según el observatorio ambiental de Bogotá D.C en la ciudad se encontraban registrados 1'492.483 vehículos particulares para el año 2014. La página ABC MOTOR, 2014 recomienda que los neumáticos se deben cambiar como mínimo cada 10 años, este tiempo puede variar dependiendo de la cantidad de kilómetros recorridos. En ese periodo de tiempo cada vehículo particular generará mínimo 4 neumáticos de desecho. Es necesario hacer el correcto proceso de disposición de este residuo o encontrarle un nuevo uso amigable con el ambiente, pues de lo contrario se enfrentarán consecuencias ambientales como proliferación de enfermedades transmitidas por especies animales como mosquitos y roedores (SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE, 2006).

Convencionalmente, cuando se desarrolla un proyecto que requiere la estabilización de taludes, se piensa en el uso de estructuras de contención típicas como muros de contención, gaviones, tierra armada, etc. Estas estructuras se construyen con materiales convencionales tales como: concreto, acero, malla electro soldada, gravas, madera entre otros.

Desde hace un tiempo el campo de la construcción empezó a desarrollar una técnica para estabilizar los taludes presentes en los proyectos usando los neumáticos que ya cumplieron su vida útil. Para la implementación de este nuevo uso de los neumáticos en Colombia, hay que comprobar que las propiedades físicas y mecánicas del material lo hacen eficiente para competir con los materiales usados tradicionalmente.

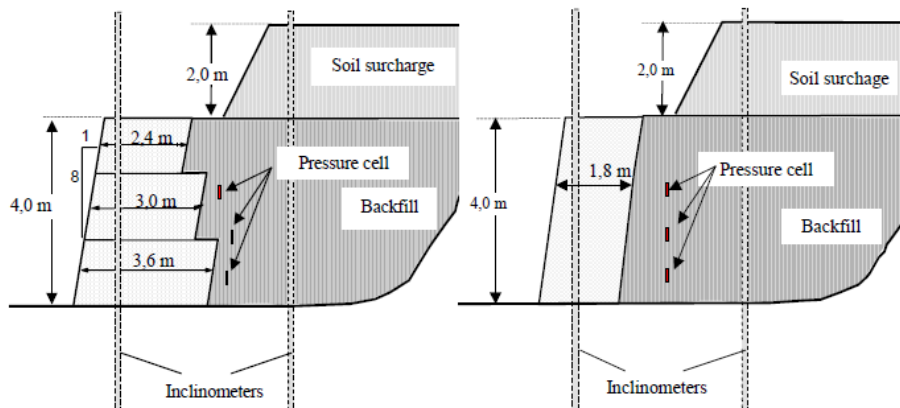
El uso de este material también presenta una simplificación del proceso constructivo, porque requiere de mano de obra no calificada y de poca maquinaria, pero, para poder implementarlo, es necesario tener los estudios que respalden su uso. Para ello, se revisarán los resultados de experiencias realizadas en diferentes países que permitan un acercamiento al contexto local.

2. ANTECEDENTES

Los documentos de consulta utilizados para la presente monografía son el resultado de investigaciones hechas en diferentes partes del mundo y consultados en la red acerca de esta técnica de estabilización.

De acuerdo con SAYÃO *et al.* 1997, el problema ambiental que genera la mala disposición de neumáticos en la ciudad de Rio de Janeiro (Brasil) se puede solucionar al usar este residuo como material de construcción de muros de contención. Para ello es necesario tener en cuenta las propiedades físicas y mecánicas del material, así como el hecho que el muro debe resistir presiones laterales, su propio peso, volcamiento y deslizamiento. En esta investigación los autores construyeron un muro de 4 secciones con diferentes distribuciones de neumáticos y dos tipos de amarres. Los neumáticos se usaron completos y sin una cara lateral para comprobar su efecto en la estabilidad del muro. Sobre el muro se colocaron 2m de suelo local, se instalaron inclinómetros en la parte frontal y posterior para medir desplazamientos y celdas de presión en la parte posterior como se muestra en la Figura 1.

Figura 1 Montaje experimental del muro. (Sayão *et al.*, 2009)



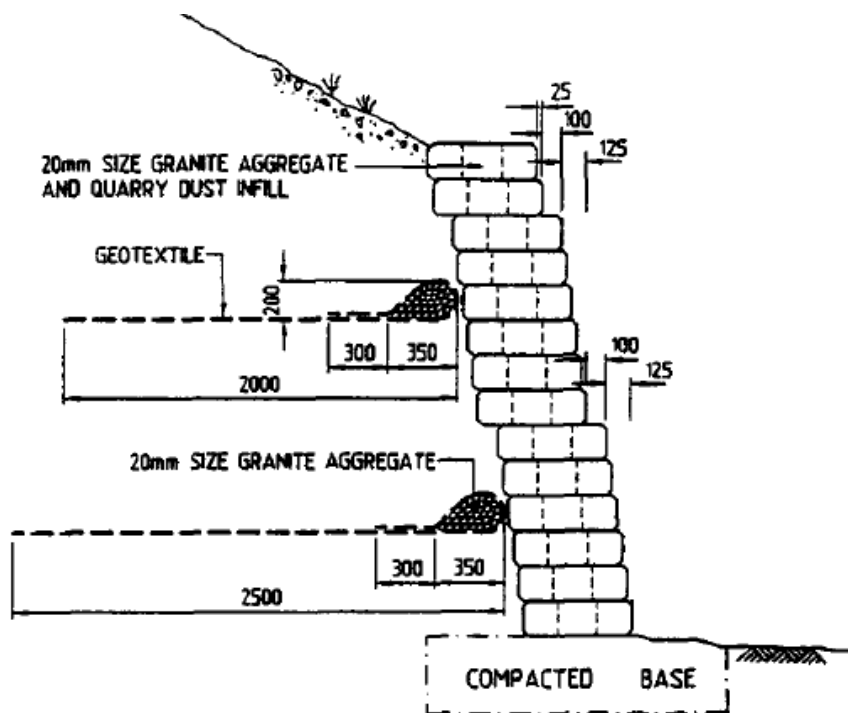
Según los autores en este muro se observó que los desplazamientos horizontales y verticales que se registraron fueron valores en rangos razonables. La estructura hecha con neumáticos resultó más flexible que un muro convencional, pero aun así logro resistir las condiciones. Los neumáticos que se usaron eran del mismo diámetro, esto debido a que la uniformidad permite mejor transferencia de cargas. Así se aprovecha un material del que es difícil y costoso disponer de manera adecuada.

Por otra parte POH, *et al.* (1995) usaron una combinación de geotextil y muro con neumáticos para estabilizar un talud. Para este estudio tuvieron en cuenta que el método podrá frenar la erosión producida en un talud que se encuentra cerca de una torre de señal telefónica, el muro de neumáticos es de fácil construcción y bajo costo, al ser un muro de contención debe resistir lo mismo que los muros hechos de material común, se utilizaron neumáticos para la protección de la parte del geotextil de las interacciones atmosféricas incluyendo la degradación ultravioleta.

El muro se construyó con 1400 neumáticos de las mismas características, recolectados de un botadero, las dimensiones de dichos neumáticos eran de 165mm x 550mm y el geotextil usado fue el UCOSG 80/80, la base del muro se estabilizó con arena fina que luego fue compactada, el geotextil se colocó a dos alturas diferentes en la parte trasera del muro, adicionalmente se crearon dos filtros con agregados de 20mm de diámetro aproximadamente (Figura 2). Esta obra de estabilización se hizo en cinco secciones.

En este estudio los autores comprobaron que el muro cumplió su función ya que a la fecha no ha presentado desplazamientos visibles o considerables. La técnica se puede usar en lugares donde los materiales típicos son caros o de difícil obtención.

Figura 2 Montaje experimental. (POH, *et al.* 1995)



3. ALCANCE

En la primera parte del proyecto se buscará la información existente acerca de la disposición de neumáticos usados en algunas partes del mundo y especialmente en la ciudad de Bogotá D.C, la problemática ambiental que esta representa y los usos alternativos que se han dado al material.

En la segunda parte del proyecto se va a hacer una revisión del estado del arte de la técnica de estabilización de taludes con neumáticos usados en Francia, Estados Unidos y algunos países de Latinoamérica. Con los datos obtenidos se realizará un modelo en el programa SLIDE de Rocscience versión 9 que permita determinar el comportamiento del talud estabilizado con el muro hecho con neumáticos.

4. JUSTIFICACIÓN

Para seleccionar el tipo de estructura de contención que se va a usar en una obra civil es necesario tener en cuenta los siguientes factores: localización del muro, altura de la estructura propuesta, topografía resultante, condiciones del terreno y nivel freático, cantidad de movimiento del terreno aceptable durante la construcción y la vida útil de la estructura, el efecto del movimiento en estructuras vecinas o redes de servicios públicos, disponibilidad de materiales, tiempo disponible para la construcción, apariencia, vida útil y mantenimiento (SUAREZ, 1998). En este proyecto, se revisará el estado del arte de una técnica para la estabilización de taludes con neumáticos reciclados.

Las características físicas de los neumáticos usados no permiten que estos sean fácilmente almacenados o compactados (SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE, 2006). En esa medida su disposición se hace más compleja y el no hacerla de manera adecuada puede generar diferentes problemas de índole ambiental.

Este residuo genera contaminación visual al ser dispuesto en lugares prohibidos como cuerpos de agua, predios baldíos, rellenos sanitarios, entre otros. En caso de apilar el material este se convierte en un riesgo por diferentes razones, por ejemplo, por su composición física el material es susceptible a ser quemado por personas que quieran extraer el metal presente en los neumáticos como ya ocurrió en la localidad de Fontibón en dos ocasiones (EL TIEMPO, 2015). Los neumáticos mal dispuestos se convierten en hogar de diferentes especies animales transmisoras de enfermedades como mosquitos y roedores.

Adicionalmente la fabricación de los neumáticos produce un alto gasto de energía que no sería en vano si se recicla el material; en algunos países desarrollados lo reutilizan para generar diferentes productos como polvo de caucho para pavimentos (WEISS *et al.* 2007), para aligerar terraplenes (READ *et al.* 1991), para mejoramiento de suelo arcillosos (BINOD *et al.* 2014), como material de drenaje (REDDY y MARELLA, 2001) Debido a las propiedades físicas y mecánicas de este material, uno de los usos que se le puede dar se encuentra en el campo de la construcción como material principal para estructuras de estabilización.

Actualmente el desarrollo sostenible es un concepto que todos los gobiernos que quieran ser competitivos deben desarrollar. En esa medida, la Secretaria de Ambiente de Bogotá cuenta con legislación y algunos manuales para la disposición de diferentes residuos, entre ellos los neumáticos usados.

Es importante conocer las propiedades físicas y mecánicas del material porque son estas las que permiten determinar si el material es apto para la construcción de muros de estabilización. Las propiedades físicas y mecánicas que se van a usar en la presente monografía para la combinación suelo-neumático son tomadas de otros autores cuyas investigaciones se acercan al objetivo de la misma, se harán las aproximaciones necesarias para aplicar el método de estabilización a nivel local.

De ser aplicable el método *pneusol*, este presentará un ahorro económico significativo a la hora de desarrollar una obra, pues una de las ventajas de este método es el ahorro en la adquisición de materiales de construcción.

5. OBJETIVOS

- **General:**

Hacer una revisión del estado del arte del método de estabilización de taludes con neumáticos.

- **Específicos:**

- Buscar y revisar información acerca del proceso de disposición de neumáticos en la ciudad de Bogotá D.C.
- Buscar información acerca de la aplicación del método de estabilización con neumáticos usados en diferentes partes del mundo.
- Conocer las propiedades físicas y mecánicas de los muros hechos con neumáticos desechados definidas en la literatura a nivel mundial.
- Modelaren el programa SLIDE un muro diseñado bajo los parámetros del método y determinar el comportamiento del talud.

6. MARCO TEÓRICO

6.1 Neumáticos

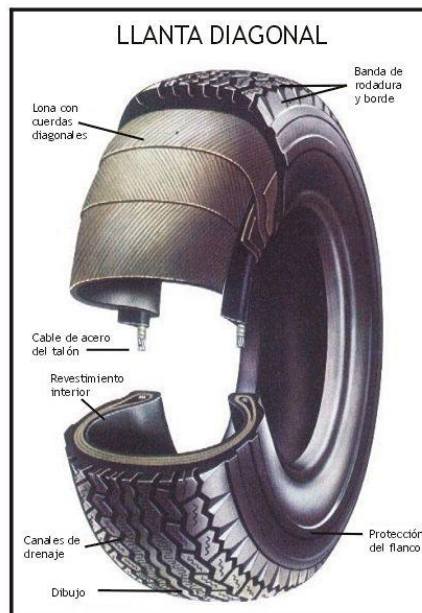
6.1.1 Producción de neumáticos

Para conocer a fondo el problema que genera la mala disposición de los neumáticos usados es necesario conocer su ciclo de vida completo; su fabricación, el final de su vida útil, su posible reutilización.

Existen dos tipos de neumáticos principales que se usan a la hora de ensamblar automóviles, esta clasificación se da según la estructura interna del neumático, los tipos son: convencionales o diagonales y radiales.

Los neumáticos que se fabrican bajo el denominado tipo convencional están compuestos por diferentes capas que se encuentran dispuestas de forma diagonal respecto del centro, el mayor inconveniente que presenta este tipo de neumático es que es muy rígido y de esa forma disminuye el agarre del neumático con el suelo, adicionalmente tienen mucho desgaste y hacen que los automóviles consuman mayor cantidad de gasolina (PEREZ, 2014). La estructura de un neumático convencional se puede observar en la Figura 3.

Figura 3 Estructura interna de un neumático convencional. (PEREZ, 2014)

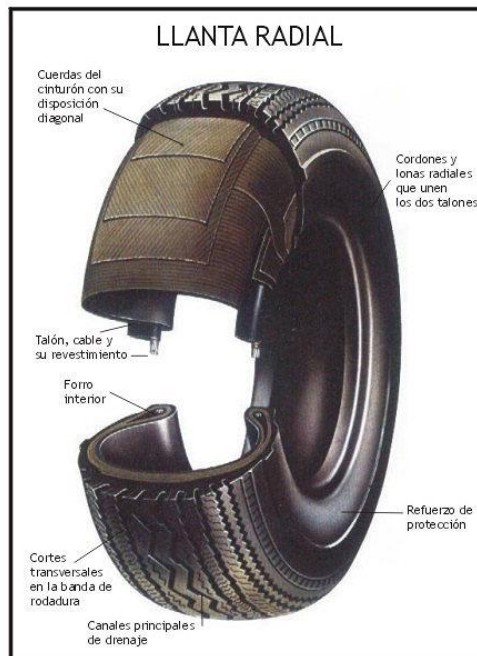


En la Figura 4 se observan los neumáticos que se denominan radiales, son actualmente los más usados. Las fibras que componen la primera capa se dirigen hacia el centro formando óvalos, después de la primera capa se encuentran otras dispuestas de forma diagonal. Para construir este tipo de neumático se necesita menos materia prima y tiene la gran ventaja de resistir la misma carga que las convencionales con menor cantidad de material. En la Tabla 1 se pueden observar los porcentajes de composición de los diferentes materiales usados para la fabricación de un neumático radial.

Tabla 1 Materiales que componen los neumáticos radiales. Guía para el manejo de llantas usadas, primera edición, 2006

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

Figura 4 Estructura interna de un neumático radial. (PEREZ, 2014)

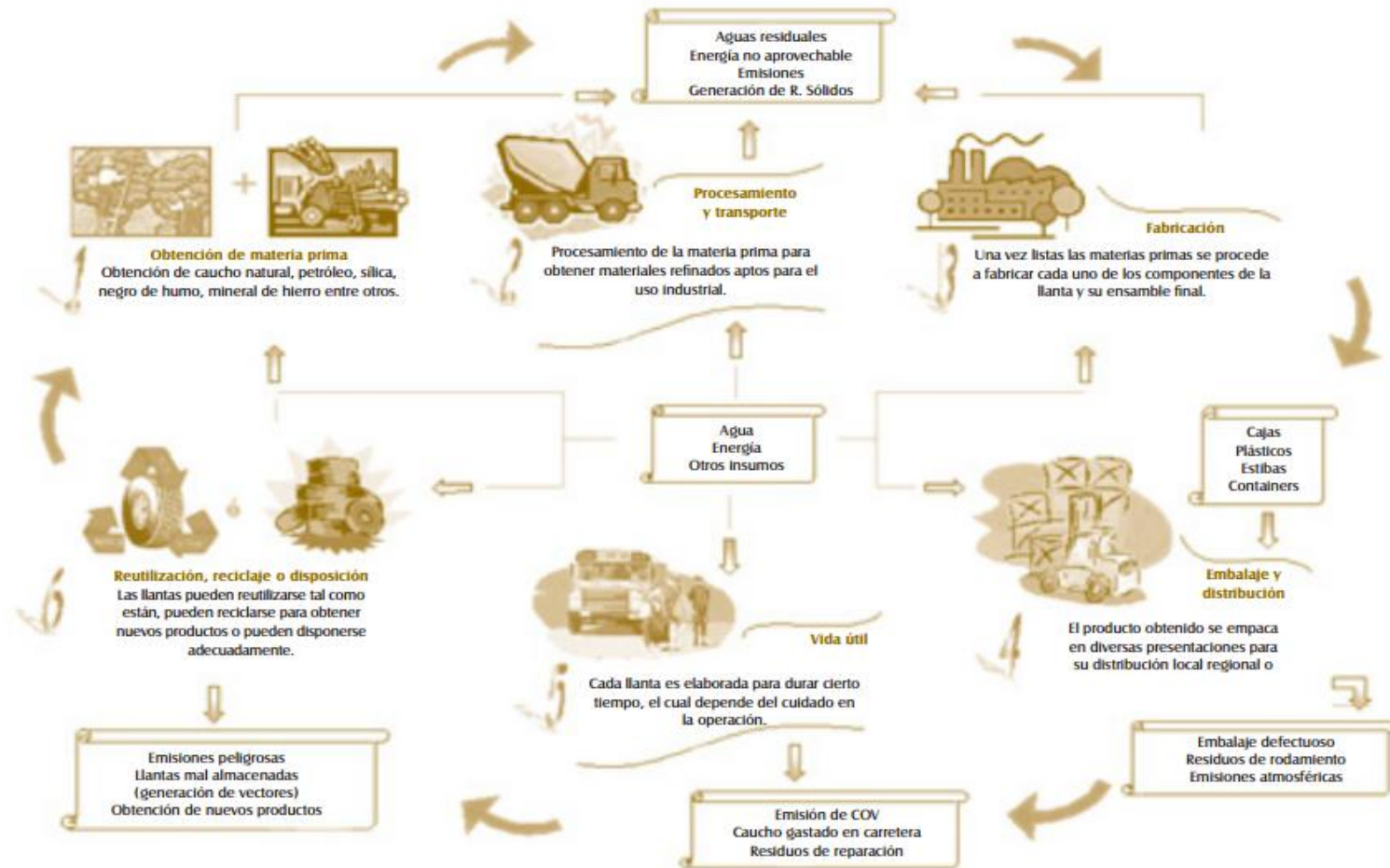


La manufactura de los neumáticos se encuentra dividida en diferentes etapas, estas son:

- **Formulación de los compuestos de caucho:** Se determinan los componentes y las cantidades en las que se van a usar para lograr que el neumático tenga la mayor eficiencia posible cuando se somete a diferentes situaciones.
- **Elaboración de cinturones de textil y acero:** Este paso se da en las llantas de tipo radial, el textil o el acero le dan mayor resistencia al neumático.
- **Calandrado:** Aquí se forman las capas de caucho y textil o caucho con acero, las cantidades se determinan según la necesidad del neumático.
- **Fabricación de la ceja:** La ceja consiste en un anillo que permite la fijación entre los compuestos del neumático y la llanta.
- **Extrusión:** Este paso es el que permite darle a la llanta sus características físicas definitivas, para realizarlo se necesita una mezcla precisa entre presión y temperatura.
- **Montaje de la llanta:** En este punto del proceso se unen todos los componentes del neumático.
- **Vulcanización:** El neumático se somete a una presa vulcanizadora en la que se le da forma a las figuras de la banda de rodamiento y se le su forma redonda definitiva.
- **Inspección final:** el neumático se somete a una exhaustiva revisión en la que se corta una rebanada y se le hace una radiografía para asegurarse de que su estructura interna sea la requerida.

6.1.2. Ciclo de vida de los neumáticos.

Figura 5 Ciclo de vida de los neumáticos. (SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE, 2006).



En la Figura 5 se ilustra el ciclo de vida de los neumáticos el cual tiene su inicio en la *obtención de materia prima*, en este paso se obtienen los materiales que componen los neumáticos, a continuación está el paso de *proceso y transporte* en el cual se hacen los procesos que permiten que las materias primas sean de uso industrial, en el paso siguiente se hace la *fabricación* de los componentes de los neumáticos con las materias primas procesadas y su respectivo ensamble. Los tres pasos anteriores generan aguas residuales (TUNCER, 2008), residuos solios y la emisión de gases contaminantes a la atmosfera.

El ciclo continúa en *embalaje y distribución*, en este paso se usan cajas y plásticos con los que se acomodan los neumáticos para su respectiva distribución, en este paso se generan los residuos de las cajas y los plásticos, adicionalmente los vehículos en los que se transportan los neumáticos generan emisiones a la atmósfera.

El siguiente paso es el de la *vida útil*, este depende de la operación del neumático. Finalmente está la *reutilización, reciclaje o disposición*, los neumáticos (como se verá más adelante) se pueden reutilizar de diferentes formas, también se pueden reciclar de forma que se obtengan los componentes del neumático y se puedan reutilizar o se pueden almacenar de forma adecuada de tal forma que no se permita la acumulación de agua o animales.

De acuerdo a lo anterior la presente monografía busca profundizar una de las formas forma mitigar el impacto ambiental que se genera al fabricar neumáticos.

6.1.3 Impactos ambientales negativos por mala disposición del recurso.

Hacer una mala disposición de los neumáticos desechados genera consecuencias negativas para el medio ambiente, las principales prácticas nocivas para el ambiente son el mal almacenamiento y la quema a cielo abierto.

Cuando se hace quema a cielo abierto del material este libera sustancias como monóxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, y compuestos orgánicos volátiles. Si un ser humano es expuesto a estos contaminantes su salud se puede ver afectada, pues estos pueden causar enfermedades como irritación de piel y ojos, depresión del sistema nervioso central, enfermedades respiratorias y algunos tipos de cáncer (ZIADAT, 2014).

Por otro lado si el material es almacenado de forma indebida los impactos negativos que se pueden generar son:

- La posibilidad que hay de que el agua se estanque en el neumático, el riesgo de proliferación de animales transmisores de enfermedades tales como mosquitos y roedores, para prevenir esta situación se recomienda agujerear los neumáticos antes de su almacenamiento.
- Riesgo de incendio para obtener el metal que lo compone.
- Deterioro del paisaje.

6.1.4. Métodos de reciclaje que se han encontrado.

En la actualidad se pueden utilizar diversos métodos para la recuperación de los neumáticos y la disposición de sus componentes peligrosos como se muestra a continuación:

6.1.4.1. Métodos mediante aplicación del calor:

A continuación se presentan los métodos de reciclaje por medio de la aplicación de calor:

- **Termólisis:** Se trata de un método en el que se somete a los materiales de residuos de neumáticos a un calentamiento en un medio en el que no existe oxígeno. Las altas temperaturas y la ausencia de oxígeno tienen el efecto de destruir los enlaces químicos. Aparecen entonces cadenas de hidrocarburos. Es la forma de obtener, de nuevo, los compuestos originales del neumático, por lo que es el método que consigue la recuperación total de los componentes del neumático.

- **Pirolisis:** En el caso de los neumáticos mediante pirolisis se produce la degradación del caucho mediante la aplicación de calor obteniendo: GAZ, un gas similar al propano que se puede emplear para su uso industrial, y aceite industrial líquido que puede ser refinado en diésel.

- **Incineración:** Proceso por el que se produce la combustión de los materiales orgánicos del neumático a altas temperaturas en hornos con materiales refractarios de alta calidad (RECICLA.COM, 2002).

- Neumáticos convertidos en energía eléctrica: Los residuos de neumáticos una vez preparados pueden convertirse en energía eléctrica utilizable en la propia planta de reciclaje o conducida a otras instalaciones distribuidoras. Los residuos se introducen en una caldera donde se realiza la combustión. El calor que se libera se convierte en vapor de elevada temperatura y presión que se conduce hasta una turbina. Al expandirse mueve la turbina y el generador acoplado a ella produce electricidad, que tiene que ser transformada posteriormente para su uso directo (ESTEVE, 2012). Sin embargo este método genera gases que inevitablemente son liberados a la atmósfera.

6.1.4.2. Métodos físicos

A continuación se presentan los métodos de reciclaje por métodos físicos:

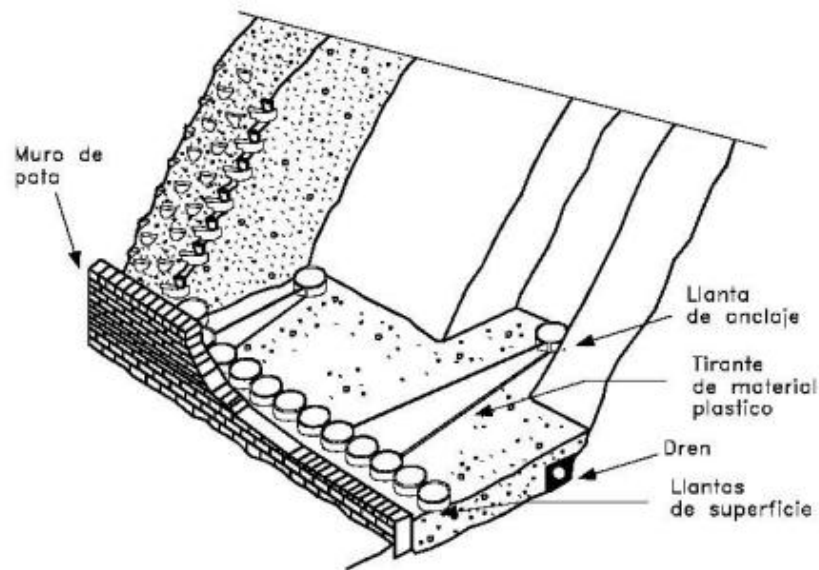
- Trituración criogénica: Este método necesita unas instalaciones muy complejas lo que lo hace poco rentable económicamente, adicionalmente el mantenimiento de la maquinaria y del proceso es difícil. La baja calidad de los productos obtenidos y la dificultad material y económica para purificar y separar el caucho y el metal entre sí y de los materiales textiles que forman el neumático, provoca que este sistema sea poco recomendable.
- Pisos de canchas deportivas al agregar neumáticos triturados.

6.2. Estabilización de taludes con muro hecho de neumáticos.

Esta clase de muro consiste en el uso de neumáticos rellenos de suelo unidos entre sí por sogas de refuerzo o ganchos metálicos. Generalmente, se utilizan sogas de polipropileno y se conoce de la utilización de elementos metálicos en su construcción; generalmente el análisis interno de los muros con llantas es homólogo al de un muro de tierra armada. Tanto los elementos de anclaje como los de retención superficial del suelo son construidos con neumáticos usados. Varios de los neumáticos en la superficie del talud están conectados por medio de sogas de acuerdo a una determinada distribución como se observa en la Figura 6.

Como los neumáticos en la superficie están conectados a los neumáticos de anclaje, se genera una fuerza de acción en la soga que las conecta. Si este refuerzo es lo suficientemente fuerte para no fallar a tensión y la resistencia de la extracción del neumático es mayor que la fuerza de fricción, entonces la estructura permanecerá estable (CLARA, 2009).

Figura 6 Corte de muro de contención hecho con neumáticos usados. (CLARA, 2009)



7. DISEÑO METODOLÓGICO

Se va a hacer una revisión bibliográfica de la teoría existente acerca del manejo que tienen los neumáticos desechados en la ciudad de Bogotá D.C, la problemática que se presenta debido a la mala disposición y usos alternativos para este material en el mundo con énfasis al que se le da para estabilizar taludes.

Para el desarrollo de la presente monografía se va a usar como herramienta principal la consulta bibliográfica en bases de datos, internet y entidades distritales. Otra herramienta utilizada en este trabajo será un programa de estabilización de taludes (SLIDE).

Con la información obtenida en la revisión bibliográfica, se va a simular un talud en un programa que permita determinar si el método de estabilización es viable para ciertas zonas de la ciudad de Bogotá D.C.

Para validar el modelo se comparan los resultados de este con una estabilización convencional. La utilización de neumáticos en obras de ingeniería se presenta como una alternativa que conjuga la eficacia mecánica y el bajo costo, propiciando la demanda de un residuo potencialmente perjudicial para el medio ambiente.

8. EJECUCIÓN DEL PROYECTO

8.1 Problemática social y ambiental.

Para comprender la problemática generada por la disposición de este material se va a nivel local primero se examinará la situación de algunos países desarrollados.

8.1.1. Disposición de residuos sólidos en el mundo.

En el mundo la Unión Europea encabeza la lista en lo referente al manejo de residuos sólidos, implementando diferentes métodos de reciclaje en los que los ciudadanos del común son la base al separar los residuos desde sus hogares, adicionalmente hay empresas que marcan los productos con puntos verdes que indican que el fabricante paga un valor por cada kilogramo de futuro residuo sólido que introduce en el mercado.

En Europa hay países que logran reciclar el 90% de sus residuos como Austria y otros que están mejorando cada vez el proceso con porcentajes de reciclaje del 60% como Bélgica.

En América Latina este proceso está menos desarrollado; esto se debe a que tanto los gobiernos como las empresas no generan suficiente conciencia para que los ciudadanos aprendan a reciclar y lo implementen; además no se hace mucha inversión en programas de reciclaje y aunque existe legislación para proteger el ambiente se ejerce poco control para el cumplimiento de las leyes.

8.1.2. Disposición de neumáticos usados en países desarrollados.

La situación ambiental generada por la mala disposición de neumáticos fuera de uso es una situación que se presenta alrededor del mundo en países tanto desarrollados como en subdesarrollo, algunos de estos países han implementado procesos de reciclaje de este material y le han dado diferentes usos como se verá más adelante, sin embargo estas soluciones no han sido suficientes para eliminar el problema de raíz.

Países desarrollados como Japón y Estados Unidos tienen programas de mitigación de ese impacto que se pueden tomar como referencia.

Estados Unidos

En Estados Unidos se generan anualmente aproximadamente 281 millones de neumáticos. Cerca de 237 millones son desechados, 10 millones se reutilizan y 33 millones se reencauchan. Entre dos y tres millones de neumáticos se han acumulado en pilas de almacenamiento y algunos millones más han sido vertidos ilegalmente.

Aproximadamente el 14% de los neumáticos desechados se utilizan como combustible; se estima que se utilizan un 5% para aglomerantes, polvo de caucho y usos misceláneos.

Los recolectores de neumáticos separan las cubiertas útiles para su reencauchamiento. Unas 800 compañías en Estados Unidos reencauchan o reparan neumáticos (los reencauchadores solamente cambian la llanta, mientras que los reparadores reponen la llanta y la goma de la pared lateral).

Japón

Japón fue uno de los primeros países en introducir el control de residuos peligrosos. En 1997 se generaron en Japón, 1008 millones de toneladas de NFU (neumáticos fuera de uso, de los que el 51% se valorizó energéticamente y un 40% se recicló. En la actualidad la gestión de los NFU se aborda de manera integral, abarcando aspectos organizativos, administrativos y económicos:

- Los NFU constituyen uno de los flujos prioritarios de la gestión de residuos.
- El sistema de gestión es un sistema integral que involucra a todos los agentes presentes en la cadena del reciclaje y valorización de los NFU.
- Puesta en marcha a nivel regional de un sistema de seguimiento y control que cubre todas las rutas de los NFU desde su origen hasta su destino final.
- Los costos del reciclaje y valorización son cubiertos por los consumidores/ usuarios que pagan 2,5 US por cada NFU.
- La normativa de protección contra incendios y las medidas reguladoras exigen instalaciones apropiadas para los emplazamientos que almacenan NFU en cantidades superiores a las 3 Ton.

8.1.3 Disposición de neumáticos en Bogotá D.C.

En la ciudad de Bogotá D.C. se generan al año casi 2,5 millones de neumáticos usados y casi el 30% de estos resultan dispuestos de forma inadecuada en calles, avenidas y parques entre otros lugares, o bien son quemados a cielo abierto para recolectar el acero (SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE, 2014).

Con esta mala disposición se está poniendo en peligro la integridad física de las personas y en la ciudad se han presentado situaciones que ponen esto en evidencia. El 7 de noviembre de 2014 en la localidad de Fontibón se incendió un depósito que contenía 600.000 neumáticos fuera de uso (NFU) como se observa en la Figura 7. En las localidades afectadas por el humo de los neumáticos incendiados que se presentan en la Figura 8 de color rojo las personas presentaron irritación en los ojos, dolores de cabeza y garganta (PERIODICO EL TIEMPO, 2014). Por muestras de aire tomadas durante la quema de neumáticos por 24 horas se sabe que esta produce componentes como partículas suspendidas, metales pesados, dióxido de sulfuro, amoníaco, componentes volátiles, etc. (ZIADAT, 2014). La exposición a estos componentes puede causar asma, irritación de ojos, tos, dolor de pecho, depresión del sistema nervioso, presión alta, cáncer e inflamación de las membranas mucosas, también puede agravar problemas cardiovasculares. (ZIADAT, 2014).

Figura 7 Escombros generados por el incendio de 600.000 neumáticos (EL TIEMPO.COM).



Figura 8 Localidades afectadas por el humo provocado por el incendio de la bodega (EL TIEMPO.COM).



La avenida Caracas es una de las arterias vehiculares más importantes de la ciudad de Bogotá. En esta Avenida se construyó una de las troncales de la fase 1 del sistema de transporte masivo *Transmilenio* y atraviesa toda la ciudad al unirse con la autopista norte, en la mitad de dicha calzada hay un separador que la divide en sentidos sur-norte y norte-sur. Desde hace algún tiempo en la zona centro de la Avenida Caracas, más exactamente en el tramo que comprende las estaciones de la calle 19 y la Av Jiménez los neumáticos están siendo dispuestos en el separador de la calzada como se observa en la Figura 9 (a) .

Esta situación representa un problema desde diferentes puntos de vista, primero genera contaminación visual para las personas que pasan por el sector, segundo y como ya se ha mencionado genera la proliferación de animales transmisores de enfermedades que afectan las personas que habitan o transitan el lugar

El problema también se presenta en los andenes de las zonas residenciales de la ciudad, y no se trata solo de mala disposición si no también de la quema del material como se observa en la Figura 9 (b), afectando no solo la salud de las personas sino también la circulación por el andén haciendo que el peatón tenga que bajar a la calzada para transitar.

Figura 9 Mala disposición de neumáticos en la ciudad de Bogotá. a) Av. Caracas con Calle 19 b) Cl. 71ª con 19



(a)



(b)

Esta problemática se repite en varias partes de la ciudad. Para mitigar lo anterior el 4 de junio del 2014 en el segundo día de la semana ambiental se lanzó la campaña “Llantas usadas en el lugar indicado”. Esta es una colaboración entre la secretaria distrital de ambiente, la secretaria distrital de movilidad, la unidad de mantenimiento vial y Transmilenio cuyo objetivo es minimizar la problemática que se presenta. El Distrito dispuso 92 puntos de recolección de este material (ver Anexo 1).

Por otra parte, como iniciativa privada se creó la empresa GRUPO RENOVA ubicada en el parque industrial de Cazucá. La empresa procesa cerca de 300 neumáticos fuera de uso al día con el objetivo de separar sus componentes y generar nuevas materias primas. Los procesos realizados por esta empresa son:

- **Recolección:** La empresa cuenta con vehículos equipados que se encargan de recorrer los diferentes lugares donde se desechan neumáticos y llevarlos a las instalaciones de la empresa.
- **Clasificación:** Una vez en el centro de acopio, los neumáticos se clasifican en reutilizables y no reutilizables, de no ser reutilizables pasan al siguiente proceso.
- **Proceso de Reciclaje:** Después de pasar por un proceso de limpieza se introduce el neumático usado dentro el equipo de reciclaje el cual en diversas etapas lo descompone en diferentes materiales.

- **Clasificación de materiales:** Terminado el proceso de reciclaje la maquina se encarga de separar el material textil, el caucho y el acero para su posterior almacenamiento y distribución; materiales que serán posteriormente reutilizados en diversas aplicaciones como, suelas para zapatos, pisos laminados, botas de caucho, cuerdas textiles, rellenos textiles y el acero para siderúrgicas.

Aunque el número de neumáticos que trata esta empresa parezca no ser muy grande, este se puede tomar como un buen comienzo para la adecuada disposición del material en la ciudad de Bogotá.

8.1.4. Legislación nacional y distrital.

La república de Colombia cuenta con un marco legal para la disposición de neumáticos fuera de uso y neumáticos nuevos con desviación de calidad. Las normas vigentes son la resolución 1488 de 2003 y la resolución 1457 de 2010, dichas resoluciones son de cumplimiento en todo el territorio nacional.

El Distrito Capital tiene la facultad de hacer su propia legislación a nivel distrital siempre y cuando esta no vaya en contra de la legislación nacional. En ese sentido en la ciudad de Bogotá existe la resolución 6981 de 2011 relacionada al tema del aprovechamiento de neumáticos fuera de uso y desviación de calidad.

A continuación, se hace una breve reseña de las resoluciones existentes:

- **Resolución 1488 de 2003**

Por medio de esta resolución el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial establece los requisitos, las condiciones y lo límites máximos permisibles de emisión, bajo los cuales se debe realizar la disposición final de llantas usadas y nuevas con desviación de calidad, en hornos de producción de Clinker de plantas cementeras.

Finalmente si la empresa es autorizada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial para la quema de los neumáticos usados y nuevos con desviación de calidad ésta debe presentar un informe anual al Ministerio que permita tener un control sobre tal actividad.

- **Resolución 1457 de 2010.**

Por medio de esta resolución el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial *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.*

Según la resolución el reciclaje de llantas es el proceso mediante el cual se aprovechan y transforman las llantas usadas recuperadas y se devuelve a los materiales su potencialidad de reincorporación como materia prima para la fabricación de nuevos productos.

- **Resolución 6981 de 2011**

En esta resolución el Distrito dicta lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados y llantas no conforme en la ciudad de Bogotá D.C, para ello se tienen contemplados los siguientes usos:

1. *Implementación en pavimentos asfálticos.*
2. *Implementación como materiales en parques distritales en aquellas áreas destinadas para recreación y deporte, de acuerdo a los diseños aprobados por el IDR (Instituto Distrital de Recreación y Deporte).*
3. *Como material para la construcción de pistas de deporte y canchas sintéticas.*
4. *Como materia prima destinada a la producción de materiales acústicos para edificaciones y obras de infraestructura.*

8.2 Usos alternativos de los Neumáticos fuera de uso.

El manual *Guidance manual for engineering uses of scrap tires* distingue 4 usos principales para los NFU:

- Fuente de generación de energía eléctrica.
- Materia prima para la fabricación de productos industriales.
- Materia prima para ingeniería civil.
- Combustible para los hornos de cemento.

Este trabajo se enfocará en el uso de los neumáticos como materia prima para ingeniería civil. Basados en esto, se tiene que el material se puede usar de tres formas: enteros, triturados o como TDA (“Tire derived aggregate” agregado derivado de neumáticos).

Como alternativa de solución a la problemática expuesta anteriormente en la ciudad de Bogotá D.C, los ciudadanos han decidido darle usos estéticos a los neumáticos enteros como se observa en la Figura 10 en la que dos mujeres de la fundación Llanta verde fabrican canecas de basura con diferentes partes de los neumáticos, y en la Figura 11 se observa un silla elaborada con el mismo material.

Los neumáticos también se pueden usar para hacer muros de contención y estabilidad de terraplenes (LONG, 1993), construcción de carreteras al incorporarse al asfalto (BRESSETTE *et al.*, 2008) fabricación de pisos sintéticos y reducir el empuje del terraplén cubierto con una capa de concreto (LONG, 1993), para mejorar las propiedades de los suelos arcillosos (BINOD *et al.*, 2014,) para relleno de terraplenes (READ *et al.*, 1991) y como material de drenaje al ser triturado (REDDY *et al.*, 2001).

Finalmente el agregado TDA se usa para aislamiento térmico y sonoro, sistemas de drenaje y disminución del peso de un terraplén (HUGGINS Y RAVICHANDRAN, 2011), para este último uso se dice que también se puede usar aserrín, sin embargo tiene la desventaja de pudrirse y dura menos que los neumáticos (LONG, 1993).

Figura 10 Fundación “Llanta verde” elaborando canecas. (DIARIO ADN)



Figura 11 Silla hecha con neumáticos usados y acolchonada.



8.3. Estabilización con neumáticos fuera de uso (*PNEUSOL O TIRESOIL*).

Como ya se mencionó anteriormente esta clase de muro consiste en el uso de neumáticos rellenos de suelo unidos entre sí por sogas de refuerzo, este método se conoce como *pneusol* o *tiresoil*. El primer estudio que permitió que se considerara que esta técnica de estabilización con neumáticos usados era viable se realizó en 1974 en Francia, en esta ocasión se construyó un muro de 5m de altura y 10m de longitud (LONG, 1993).

La técnica permite la reutilización de los neumáticos fuera de uso como un material de construcción en ingeniería civil sustituyendo los comúnmente usados (HOSSAIN y JAYAWICKRAMA, 2000), para el año de 1993 ya se habían construido unas 250 estructuras que usaban la combinación suelo-neumático en países como Francia, Argelia, Estados Unidos, Suiza, etc. (LONG 1993).

Se distinguen dos tipos de Pneusol, “lighweight” o de peso ligero y “heavy” o pesado, el primero consiste en usar los neumáticos enteros y el segundo requiere la remoción de una de las caras laterales lo que permite mayor relleno y por ende mayor peso (LONG, 1996). Una variable importante a tener en cuenta en este método son los amarres entre neumáticos, estos pueden ser de polipropileno para los que se recomienda un nudo tipo marinero cuyos pasos de elaboración se encuentran en la Figura 12 o el uso de metal con ganchos que funcionan como

anclaje entre la cara inferior de un neumático y la superior de la otra como se observa en la Figura 13.

Figura 12 Nudo para el amarre de neumáticos con polipropileno (Teixeira, 2010)

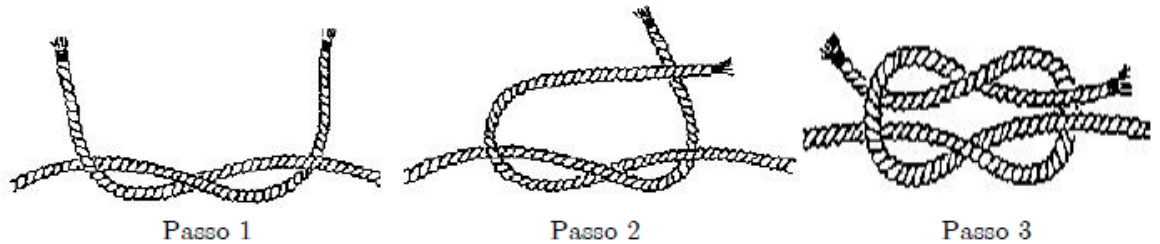
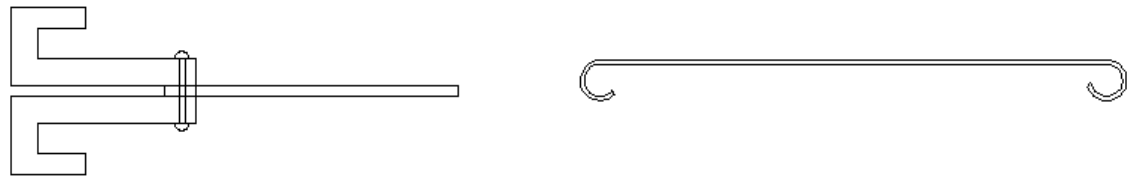


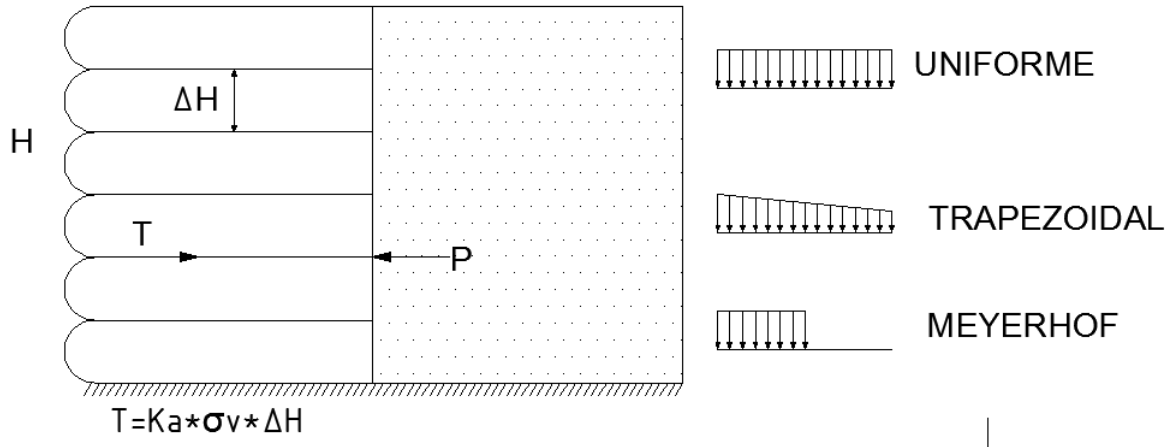
Figura 13 Ganchos metálicos para el amarre de neumáticos. (Teixeira, 2010).



Para el año de 1993 las estructuras de contención hechas con la técnica *pneusol* no contaban con datos completos (LONG, 1993), sin embargo como se mencionó anteriormente se tenía el conocimiento de que la técnica se comporta de manera similar a la tierra armada y a los muros de gravedad.

Para los muros de *pneusol* se revisan 3 tipos de falla; deslizamiento de base, falta de adherencia o cohesión y rotura. Para la distribución de la carga en el muro se tienen tres posibles formas uniforme, trapezoidal y Meyerhof, en el análisis de estabilidad interna de este tipo de muro se tienen en cuenta las tensiones que actúan entre las capas de neumáticos, y la altura de las mismas (Figura 14)

Figura 14 Distribuciones de carga en muros pneusol (Long, 1993).



Como se mencionó anteriormente el análisis interno de los muros *pneusol* se hace de manera similar al de los muros en tierra armada, las ecuaciones determinadas por LONG, 1993 para el cálculo de las tensiones entre las capas del muro se presentan a continuación:

$$T = K_a * \sigma_v * \Delta H$$

Donde K_a es el coeficiente de empuje activo, σ_v son los esfuerzos verticales, ΔH es la altura de la capa y T es la tracción entre las capas de neumáticos (Figura 14)

Si el terreno no tiene inclinación ($\beta = 0$)

$$k_a = \tan^2(45 - \varphi/2)$$

Si el terreno tiene inclinación ($\beta \neq 0$)

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

Para realizar el análisis es necesario conocer la tensión (T_1 , T_2 y T_3 para las distribuciones de carga trapezoidal, Meyerhof y uniforme respectivamente) que existe entre cada una de las capas de neumáticos, en esa medida cada distribución de carga tiene diferentes formas de calcular la tensión:

- Trapezoidal

$$T_1 = K_a * \gamma * H * \Delta H * \left(1 + K_a * \frac{H^2}{L^2} \right)$$

- Meyerhof

$$T_2 = (K_a * \gamma * H * \Delta H) / \left(1 - K_a * \frac{H^2}{3L^2} \right)$$

- Uniforme

$$T_3 = (K_a * \gamma * H * \Delta H)$$

Dónde:

γ : Es el peso específico del suelo.

H : Es la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza T hasta la parte superior del muro.

L : Longitud del refuerzo.

La longitud del refuerzo corresponde a $L = 0,5 * H$.

ΔH : Ancho del neumático

Dichas tensiones permiten hallar longitudes de refuerzo para el muro por medio del método de tierra armada.

8.3.1 Dimensionamiento de muro pneusol.

Para dimensionar un muro con esta técnica se hace en dos etapas. La primera es el dimensionamiento interno en la que se determinan los esfuerzos a tracción, el esfuerzo de rotura y la adhesión. La segunda es el dimensionamiento externo en la que se hace la verificación de la estabilidad global.

8.3.2 Casos de estudio.

Como se mencionó anteriormente el método ha sido aplicado en diferentes ocasiones alrededor del mundo, en ocasiones el método se limita a la construcción del muro sin mayor estudio y su comportamiento solo se puede determinar con el paso del tiempo, a esta metodología se le llamará empírica, en otras ocasiones se construye el muro y se hacen algunos estudios básicos como caracterizaciones del suelo al aplicar el método, a esta metodología se le llamará semi-empírica, finalmente se encuentra la construcción en la que se hacen estudios a fondo y se hace un modelo numérico de la aplicación del método, a esta metodología se le llamará racional. A continuación se describirán las

experiencias más representativas de cada metodología y sus respectivas conclusiones.

8.3.2.1. Metodología empírica.

Las Figura 15 y la 16 corresponden a construcciones rudimentarias de muros con neumáticos usados en diferentes partes de América Central y del Sur como solución para problemas de estabilización.

La Figura 15(a) presenta a la construcción de un muro con neumáticos usados en Guatemala para proteger carreteras y parcelas de cultivo de derrumbes en una zona altamente inestable. Este muro fue una iniciativa promovida en el desarrollo del proyecto RyGRAC-GTZ en el año 2007. (Reconstrucción y gestión del riesgo en América central después de la tormenta Stan), con el que se buscaba reducir los riesgos de las personas en situación de vulnerabilidad que vivían en zonas de alto riesgo geológico.

En la Figura 15 (b) y (c) se muestra la construcción de un muro con neumáticos usados en la ciudad de Medellín (Colombia), este fue planeado para recuperar un paso peatonal en el barrio Fuente Clara de Robledo en el noroccidente de Medellín que estaba sufriendo deslizamientos debido a la filtración de agua en el terreno, beneficiando así a más de 200 peatones. Este proyecto se llevó a cabo con la colaboración de la comunidad al aportar su mano de obra. Hasta el día de hoy el muro sigue en pie cumpliendo su labor.

Figura 15 (a) Muro hecho en Guatemala. (ISDR, 2010) (b) inicio de construcción muro hecho en Medellín (c) muro casi terminado (ALCALDIA DE MEDELLIN, 2012)



La clando al tiempo este material.

Figura 16 corresponde a un muro hecho en Costa Rica, este fue el ganador de un concurso realizado por la fundación Ford en la categoría *protección ambiental*, el ganador del premio diseño el muro para que las familiar que tienen sus casas en

zonas de inestabilidad de ladera puedan protegerlas reciclando al tiempo este material.

Figura 16 Muro hecho en Costa Rica (ALDEA GLOBAL, 2009).



8.3.2.2. Metodología Semi-Empírica.

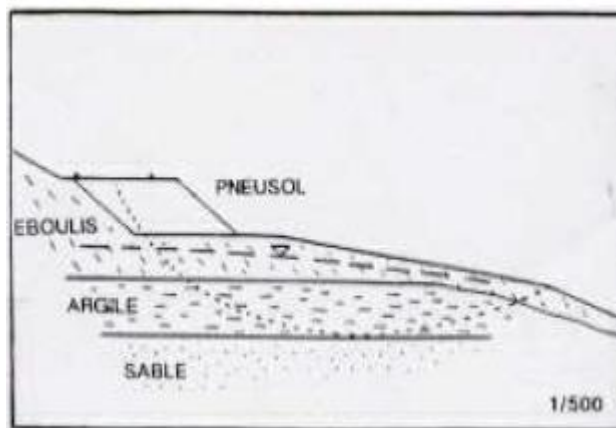
En 1987 se realizaron dos estudios importantes, el primero fue el muro Fertrup en la ciudad de Bas Rhin, y el segundo fue la reparación después de un deslizamiento en la ciudad de Aisne, las dos experiencias en Francia.

- Para reparación de un terraplén que sufrió un deslizamiento en el departamento francés de Aisne, el presupuesto con el que se contaba para realizar esta obra era muy bajo. De la zona se sabía que era boscosa y montañosa, y de los estudios de suelos se sabía que el terraplén estaba constituido por arcilla arenosa calcárea y pequeños bloques de piedra caliza. La arena era gruesa calcárea que constituye un porcentaje del suelo arcillo arenoso se constituía por arenas gruesas, esta capa tenía un espesor de 6m. Se encontró también arcilla compacta de color oscuro con un contenido bajo de arena a 6 a 10m de profundidad (
- En la base del muro se hizo una base de drenaje de 0,20m con material triturado, los neumáticos se dispusieron en forma ortorrómbica, se llenaron los huecos con material compactado y finalmente se cubrió con una capa vegetal. Las primeras 3 capas se rellenaron con grava y las 6 siguientes con suelo local, la construcción del muro tomó 10 días y resultó 6 veces más barato que con un material ligero tradicional.).

En esta ocasión se presentaron dos posibles soluciones para el problema. La primera fue hacer una disminución de la capa freática pero esta opción fue descartada debido a su alto costo, la segunda fue hacer una sustitución del material del deslizamiento con pneusol (Figura 17) esta fue la solución adoptada pues disminuía la densidad del terreno de 20 kN/m^3 a 10 kN/m^3 y aumentaba el factor de seguridad un 26%, se usó pneusol ligero y el muro tenía una longitud de 35m y una altura de 3,5m.

En la base del muro se hizo una base de drenaje de 0,20m con material triturado, los neumáticos se dispusieron en forma ortorrómbica, se llenaron los huecos con material compactado y finalmente se cubrió con una capa vegetal. Las primeras 3 capas se rellenaron con grava y las 6 siguientes con suelo local, la construcción del muro tomó 10 días y resultó 6 veces más barato que con un material ligero tradicional.

Figura 17 Curva de ruptura y posición del pneusol (LONG, 1993).



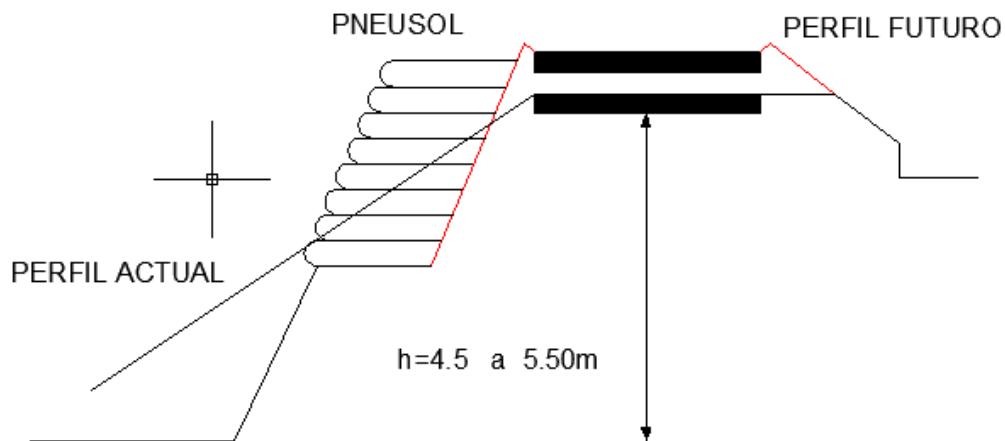
- El proyecto del muro Fertrup tenía como objetivo reemplazar un muro que se construyó en la ladera de un río para proteger la carretera departamental CD 416. Del suelo local se sabe que el diámetro máximo de las partículas es de 60mm, que el contenido de arena es del 17%, y que su peso específico es de $19,60 \text{ kN/m}^3$.

Una solución viable para este problema era un muro de retención en *pneusol* recubierto con concreto, en esta ocasión se usaron las superficies de rodadura de los neumáticos como tiras que formaban capas de suelo y tiras asemejando el comportamiento de la combinación suelo neumático. El muro tenía 5m de altura (H) lo que da un longitud (L) de 2,5 m, un K_a de 0,39 y un peso específico de la "tierra armada" de 20 kN/m^3 , este valor es más alto que el peso específico del suelo que es de $19,6 \text{ kN/m}^3$ debido a que se le agrega concreto a la combinación.

Para cada distribución de carga, lineal, Meyerhof y trapezoidal las tensiones dieron 22kN, 10kN y 17kN respectivamente. Los esfuerzos tanto horizontales como verticales en el revestimiento de concreto eran muy pequeños, del orden de 1 kPa. Para este estudio se determinó que el movimiento promedio entre las tiras fue de 1 a 1,5 cm/m, sin embargo Todas las tiras se estabilizaron prácticamente después de tres meses.

- En 1990 en Lozère al sur de Francia se requirió aligerar el peso del terraplén que llevaba las vías del ferrocarril por orden de la SNCF (“Société nationale des chemins de fer français” en español Sociedad Nacional de Ferrocarriles franceses) para la apertura de senderos peatonales. Si se hubiera usado material convencional se hubiera aumentado el esfuerzo a 140kPa por lo cual se usó pneusol ya que su peso específico es de 10kN/m³ (Figura 18).

Figura 18 Perfil del talud (LONG, 1993).



8.3.2.3. Metodología Racional.

En 1997 se unen la Universidad Católica de Rio de Janeiro, la Fundación Geo-Rio y la Universidad de Ottawa con el objetivo de avanzar en este campo investigativo, para ello construyeron un muro dividido en cuatro secciones que permitiría determinar el comportamiento del material en condiciones reales y con diferentes combinaciones de sección transversal y amarres, el estudio se realizó en la ciudad de Rio de Janeiro.

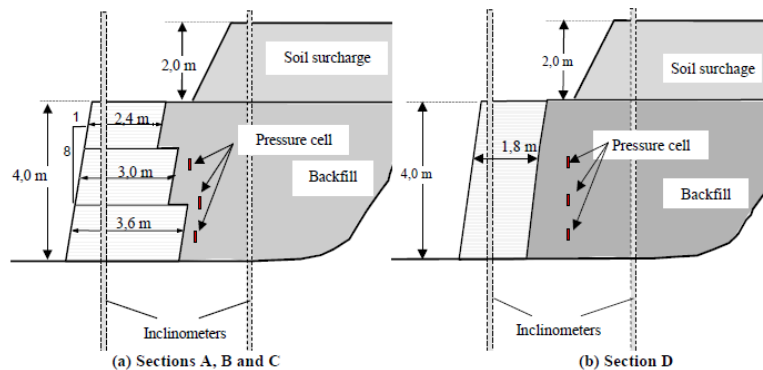
El muro se hizo de 60m de largo y 4m de alto, los neumáticos se dispusieron en forma horizontal y se amarraron entre sí, en la parte superior se puso una carga de suelo de 2m de altura cuyo peso específico es de 17.5 kN/m³.

Adicionalmente se usaron neumáticos de la misma medida (diámetro externo de 0,6m, diámetro interno de 0,3m y ancho de 0,20m), que fueron rellenos con suelo compactado. Para medir los desplazamientos y los esfuerzos sobre el muro se usaron inclinómetros y celdas de presión respectivamente.

Las cuatro secciones del muro (Figura 19):

- **Sección A:** neumáticos enteros atados con una cuerda de diámetro de 6mm de polipropileno con una sección variable de 6 neumáticos en la base y 4 en la parte superior.
- **Sección B:** neumáticos a los que se les retiro una de sus caras y fueron amarrados con polipropileno de 6mm.
- **Sección C:** neumáticos con una cara removida, con la misma sección A y los neumáticos se encuentran unidos entre sí con alambre de zinc galvanizado y recubierto de 2mm.
- **Sección D:** neumáticos con una cara removida unidos entre sí con polipropileno de 6mm, la sección es constante (3 neumáticos).

Figura 19 Perfiles de las secciones hechas en el muro. (Sayão A, et al., 2009)



El muro está dividido en secciones de 15m, para su construcción se usaron 15.000 neumáticos y 1.500m³ de suelo local, el suelo que se usa para rellenar los neumáticos puede ser de características geotécnicas pobres, pues este se usa solo para darle peso al muro.

❖ Caracterización del suelo local.

“El suelo se usa como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y sirve para soportar las cimentaciones estructurales. Por esto los

ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo tales como: origen, distribución granulométrica, capacidad para drenar agua, compresibilidad, resistencia cortante, capacidad de carga y otras más.” (BRAJA, 1999).

En el sitio de la construcción del muro el suelo que predominaba era arena arcillo limosa bien gradada, proveniente de la meteorización de la roca. El ensayo triaxial drenado en muestras saturadas bajo una presión de confinamiento entre 50kPa y 150 kPa determinó un ángulo de fricción de 29°.

El ensayo de corte directo en condiciones no saturadas determinó una cohesión de 13 kPa. Las características geotécnicas del suelo se determinaron con un ensayo de compactación estándar y muestran en la Tabla 2:

Tabla 2 Características geotécnicas del suelo (Sayão A, et al., 2009)

Caracterización del suelo local		
	Límite líquido (%)	36
	Límite plástico (%)	23
	Contenido de agua (%)	20
	Gravedad específica	2,72
Ensayos CD	Cohesión (kPa)	0
Muestra saturada	Ángulo de fricción (°)	29
Ensayo de corte directo	Cohesión (kPa)	13
Muestra no saturada	Ángulo de fricción (°)	29
Suelo compactado	Peso unitario seco (kN/m ³)	17,5
	Humedad óptima de suelo (%)	15

La estabilidad del muro es función del peso específico que a su vez depende de la geometría de los neumáticos, la densidad en campo se hizo en un pozo de concreto con las llantas enteras y cortadas y los resultados que se obtuvieron de pesos específicos fueron 16,2 kN/m³ y 15,4 kN/m³ respectivamente.

❖ **Resultados de campo.**

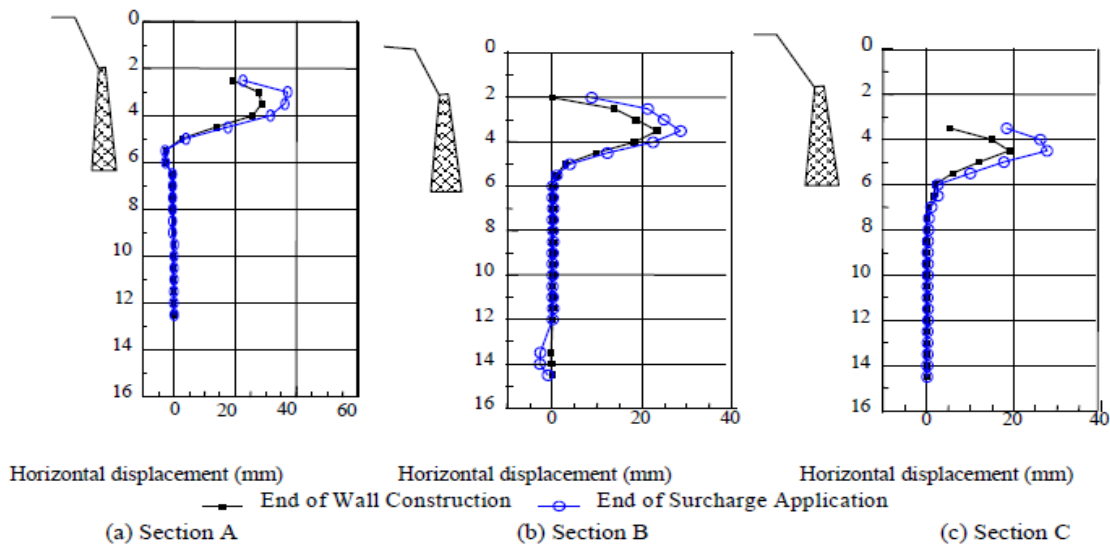
- Desplazamiento horizontal:

El máximo desplazamiento horizontal se observó al tercio de la altura del muro de arriba hacia abajo, este comportamiento vio al final de la construcción del muro y al aplicar la sobrecarga, lo que puede sugerir un movimiento entre los neumáticos del medio y los cercanos a la superficie y a la base (Figura 20), este es un comportamiento diferente al mostrado en los muros convencionales que giran respecto a la base, para la sección C el desplazamiento fue de 0,5% de H y para

sección A fue de 0,7% de H. El muro demostró que es más flexible que uno convencional cuyos desplazamientos están entre 0,2% y el 0,4% de H, adicionalmente se vio que las secciones que estaban amarradas entre sí con alambre tuvieron un 30% menos de desplazamientos que las conectadas con polipropileno.

Los equipos que tomaron las medidas de desplazamiento en la sección D mostraron problemas de instalación, por este motivo fueron descartadas. Teniendo en cuenta que la sección D fue diseñada para fallar se puede decir, que esta soporta las cargas laterales adecuadamente.

Figura 20 Gráficas de desplazamientos medidos con inclinómetros contra profundidad (Sayão A, et al., 2009)



- Presión de tierras:

Para hacer el dimensionamiento de un muro de contención es necesario conocer los empujes que están actuando sobre este. En la

Figura 21 se grafican los resultados de los esfuerzos horizontales respecto a la altura del muro presentados en la sección B, al final de la aplicación de la carga, los resultados fueron comparados con la presión de tierras activa de Rankine. Los esfuerzos medidos al finalizar la construcción tienen valores más cercanos a la teoría de Rankine según las mediciones hechas en sitio en condiciones no saturadas.

Según los resultados mostrados en la Figura 21 los esfuerzos no son lineales y son mayores a los calculados con la teoría de Rankine, pero esto se puede deber a que los esfuerzos se distribuyen desde la mitad del muro hacia los extremos.

Figura 21 Gráfica de esfuerzo contra altura de la sección B. (Sayão A, et al., 2009)

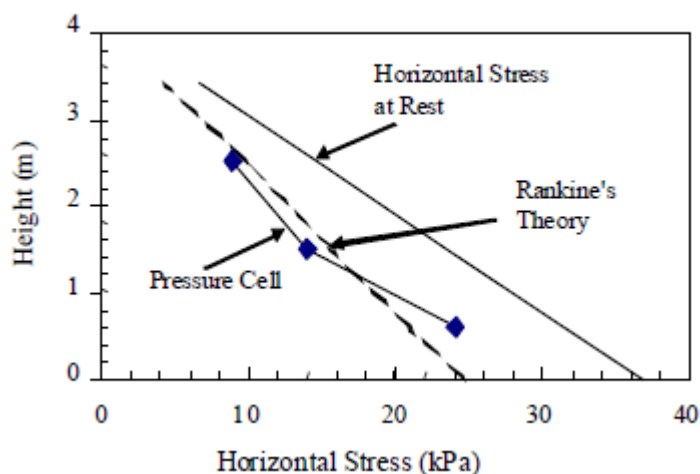


Tabla 3 Valores comparados entre las medias, Rankine y Coulomb. (Sayão A, et al., 2009)

	Método	Cohesión (kPa)	Presión de tierras (kN/m)
Al final de la construcción	Medida		49
	Rankine activa	0	48,6
		13	6,6
	Coulomb activa	0	53
13		8,3	
Después de la sobrecarga	Medida		64
	Rankine activa	0	91,6
		13	32,1
	Coulomb activa	0	66
13		21	

En la Tabla 3 se comparan las presiones según Rankine y Coulomb con las mediciones hechas en campo para la sección B. Sayão A, et al., 2009, las cuales suponen una superficie de falla plana. También se observa que después de la sobrecarga el comportamiento se parece más a la teoría de Rankine.

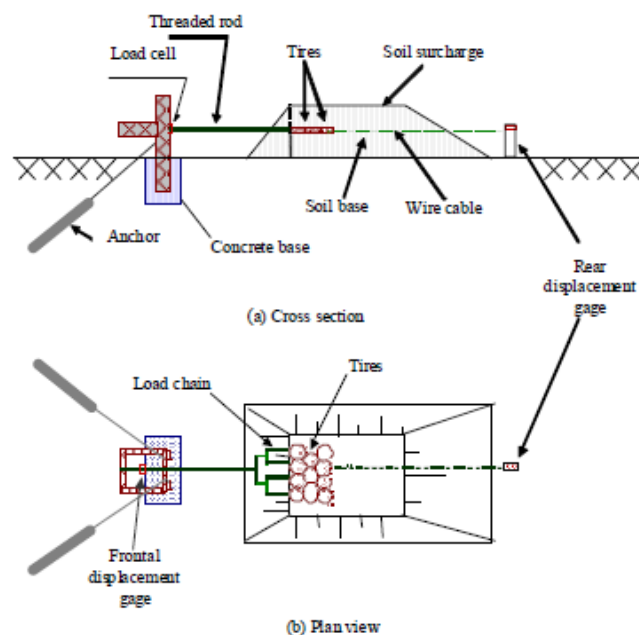
Durante el proceso de construcción se notó un pequeño movimiento que causó rotación en la cara externa del pie, para compensar este hecho se adoptó un ángulo de 10° con la vertical en ese lugar.

❖ Ensayo de resistencia “pull out”.

El estudio para determinar la resistencia *pull out* del muro consiste en la inserción de elementos al suelo que sean capaces de resistir tensiones, es importante tener en cuenta este aspecto ya que el esfuerzo de corte que se produce entre el suelo y el refuerzo reduce el empuje de tierras mejorando a su vez la estabilidad.

Como se requiere una magnitud de carga relativamente alta se usa una estructura de acero con capacidad de 50 kN. Esta estructura se diseñó y construyó como una viga de acero embebida en una base de concreto y anclada al suelo por medio de dos anclajes de 15 m de longitud, desde la estructura de acero un pistón hala un juego de cadenas amarrado a un montaje de neumáticos que se encuentra colocado dentro de una masa de suelo como se observa en la Figura 22








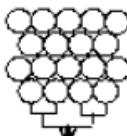
Figura 22 Corte y planta del montaje para el ensayo “pull out” (Sayão A, et al., 2009)



- Pruebas.(revisar secuencia numeración no es necesaria esta)

En la Tabla 4 se muestran los diferentes montajes de más de un neumático amarrados con polipropileno. El suelo que estaba frente a la primera fila de neumáticos no se compactó para reducir la resistencia pasiva del suelo, las filas de llantas se colocaron en una base de 0,5m de suelo y el terraplén se compactó manualmente.

Tabla 4 Montajes para el ensayo *pull out* (Sayão A, et al., 2009)

Arrangement	Description	Arrangement	Description
	1 Tire		4X3 Tires
	2 Tires		4X3X4 Tires
	4 Tires		4X3X4X3 Tires
	2X3 Tires		4X5X4X5 Tires

Las pruebas se hacen con el suelo local descrito en la Tabla 1 (fase 1) y con arena comercial que después de hacerle los ensayos necesarios se determinó que era arena bien gradada (fase 2). La arena tiene un $c'=4,3$ kPa y $\phi'=31,7^\circ$.

Se hizo un ensayo en el que un pistón halaba el muro hacia al frente y se vio que se deformaban los neumáticos de las primeras filas y subsecuentemente pero en mucho menor magnitud se deformaban las de las siguientes filas (Figura 23).

Figura 23 Deformación de las llantas de la fase 2 (Sayão A, et al., 2009)

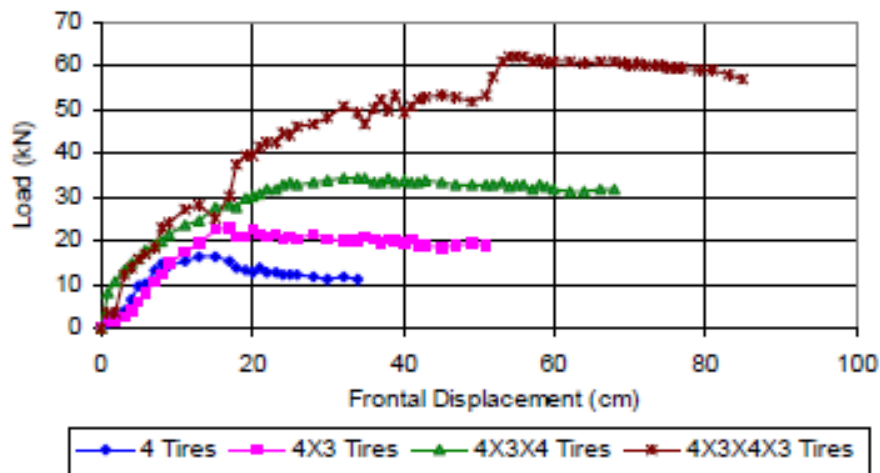


Resultados de campo

La importancia de este ensayo radica en que permite conocer la resistencia al empuje de la combinación suelo-neumático. En este ensayo los neumáticos pasaron de su forma circular a forma elíptica debido a la aplicación de la fuerza, los neumáticos en la parte frontal del montaje fueron los más deformados y a medida que se iban alejando su deformación fue menor.

En la Figura 24 se muestran los resultados de los desplazamientos horizontales frontales obtenidos respecto a la carga o fuerza que ejercía el pistón para halar, estos resultados corresponden a diferentes montajes de neumáticos, como se observa en esta Figura ninguna curva muestra un pico pronunciado. Se observó que a mayor número de neumáticos más fuerza se requería para deformar el montaje.

Figura 24 Carga Vs desplazamiento para diferentes configuraciones fase 2 (Sayão A, *et al.*, 2009)



Se realizó una prueba para un solo neumático y resultó que tenía mayor resistencia, esto se puede deber al hecho de que un neumático solo tiene mayor confinamiento y adicionalmente un montaje que involucre el amarre de material tiene huecos que son difíciles de rellenar lo que se puede traducir en una pérdida de resistencia del suelo-neumático. (Sayão A, *et al.*, 2009). En la Tabla 5 se muestran los resultados del ensayo *pull out*.

Tabla 5 Resultados del ensayo pull out fase 2 (Sayão A, et al., 2009)

Arreglo	H (mt)	Pf (kN)	Pf/Nt (kN)	$\Delta f(m)$
Fase 1				
1 (cut tire)	1,0	5,40	5,40	0,13
1 (entire tire)	1,0	6,70	6,70	0,20
2 (cut tire)	1,0	7,10	3,60	0,15
4 (entire tire)	1,0	16,30	4,10	0,15
5 (cut tire)	1,0	21,00	4,20	0,32
2x3 (cut tire)	1,0	22,00	3,20	0,20
4x3 (cut tire)	1,0	35,00	3,20	0,34
4x3x4x3 (cut tire)	1,0	62,00	4,40	0,61
4x5x4x5 (cut tire)	1,0	65,00	3,60	0,45
Fase 2				
1 (cut tire)	0,5	17,20	17,20	0,11
	1,0	36,50	36,50	0,20
	2,5	58,80	58,80	0,15
1 (entire tire)	1,0	22,60	22,60	0,12
	2,5	54,30	54,30	0,20
4 (cut tire)	0,5	34,80	8,70	0,18
	1,0	68,50	17,10	0,18
	2,5	123,20	30,80	0,24
4 (entire tire)	1,0	24,50	6,10	0,24
	2,5	108,94	27,20	0,30
4 x 3 (cut tire)	0,5	37,40	8,70	0,30
	1,0	88,20	17,10	0,20
	2,5	127,60	30,80	0,33
4 x 3 (entire tire)	1,0	50,00	1,70	0,40
	2,5	128,70	18,40	0,34
4 x 3 x 4 (cut tire)	0,5	55,10	5,00	0,40
	1,5	98,10	8,90	0,36
Suelo cemento 4 x 3 x 4 (entire tire)	1,5	103,30	9,40	0,47
	1,0	60,00	5,50	0,43
	2,5	142,20	12,50	0,56
4 x 3 x 4 x 3 (cut tire)	0,5	78,50	5,60	0,54
	1,5	104,20	7,40	0,40
4 x 3 x 4 x 3 (entire tire)	1,5	98,50	7,00	0,54
4x5x4x5 (cut tire)	1,0	78,50	5,60	0,34

H = Altura de la sobrecarga.

P_f = Fuerza *pull out* de falla

N_t = Numero de llantas

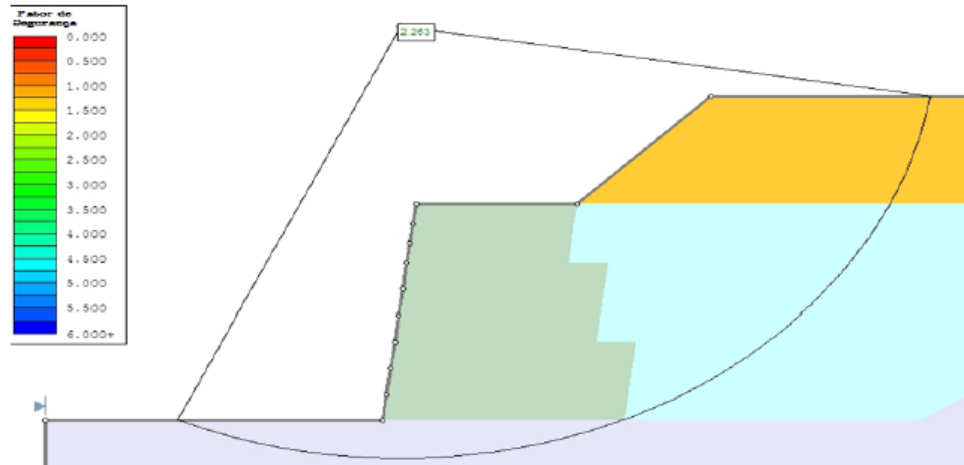
Δf = Desplazamiento frontal en la falla

❖ Estabilidad global

En un investigación posterior (Teixeira, 2012) se analizó el comportamiento del muro construido por (Sayão A, *et al.*, 2009). Él determinó el factor de seguridad para este. En esta oportunidad se utilizaron dos programas para realizar los análisis; SLIDE y PHASE 2 de Rocscience.

El programa SLIDE arrojó un factor de seguridad global igual a 2,263 usando el método de Bishop simplificado (Figura 25),

Figura 25 Factor de seguridad en la fase de final de construcción. (Teixeira, 2012)



❖ Costos

En esa misma investigación se determinó que el muro hecho con *pneusol* y con el relleno tiene un costo total de 7000€ aproximadamente contando con la cuerda, el suelo y la mano de obra, mientras que un muro hecho en concreto reforzado hubiera tenido un coste de 10200€.

Se dice que el método disminuiría los costos de construcción de un muro convencional, lo que fue demostrado en un muro construido en la isla de Batam (Indonesia) donde la montaña Bukit Batu Tujoh estaba presentando graves problemas de erosión y había riesgo de deslizamiento que dañaría una torre de comunicación.

Se usó una mezcla de geo-textil y muros de llantas para estabilizar el talud, decidieron usar neumáticos ya que al hacer el presupuesto contando con la mano de obra no calificada que se usó y la recolección del material que fueron 1400 neumáticos el costo total del muro fue de 44.000 dólares, mientras que si el muro se hubiera construido en concreto y su refuerzo convencional hubiera costado 112.000 dólares. (POH y BROMMS, 2009)

❖ **Proceso de construcción**

El muro construido en Brasil se hizo de acuerdo al siguiente proceso constructivo que se ilustra en la Figura 26

- 1) La superficie del suelo fue limpiada y nivelada.
- 2) La primera fila de neumáticos se colocó en el suelo, alineada horizontalmente.
- 3) Se colocan tres filas dispuestas de forma ortorrómbica.
- 4) Cada neumático se ató a 4 adyacentes a él, para las filas frontales se usó doble atadura bien fuera de polipropileno o de alambre galvanizado para evitar corrosión.
- 5) Se colocó el suelo en las esteras y se compactó con la ayuda de un vibrocompactador.
- 6) Se empezó a poner la siguiente fila de neumáticos corrida 3cm de la anterior.
- 7) Se repite el proceso de relleno con suelo y compactado hasta la última fila.
- 8) Se pone la capa de suelo de 2m de altura en la parte superior del muro.

Figura 26 Proceso de construcción del muro hecho en Brasil (SAYAO, 2012)

Pasos 1 y 2:



Paso 3:



Paso 4:



Pasos 5 y 6:



Paso 7:



Paso 8:



Otro proceso de construcción se usó en Honduras donde se hizo la “**Guía de la Construcción del muro de contención, con llantas usadas (Muro de Protección de Pendiente)**”, cuyo objetivo es dar a conocer el proceso constructivo de un muro hecho con neumáticos con la aclaración de que el diseño de este se debe modificar dependiendo de las condiciones del lugar.

Este manual tiene en cuenta las siguientes consideraciones para el diseño:

- La estructura debe soportar la presión del terreno.
- Si los muros son mayores a 2m buscar la ayuda de ingeniero experto.

El manual discrimina los siguientes pasos para la construcción del muro y se observan en la Figura 27

- 1) Cavar 20cm, rellenar con grava y compactar, si el suelo es malo se puede fundir concreto y se entierra la primera fila de neumáticos 10cm para evitar la erosión causada por la lluvia.
- 2) Las llantas se apilan corridas de 5 a 10cm una de la anterior.
- 3) Los neumáticos se rellenan con piedras, pedazos de concreto para aumentar el peso, posteriormente los huecos se rellenan con una mezcla de suelo-cemento, para lo cual hay que tener en cuenta que por cada metro cúbico de suelo se usan 100kg de cemento y se compacta.

- 4) El muro debe tener la forma de la pendiente a proteger
- 5) El peso del pisón debe ser de 10kg y se debe compactar cada fila 5 veces.
- 6) En caso de considerar la altura del muro como insegura, se pueden anclar o enterrar varillas de acero (diámetro de 0.5 pulgadas). Para que las varillas no se oxiden al momento de enterrarlas, se rellena la última llanta con unos 10 cm de concreto o mortero.

Para la etapa de mantenimiento se sugieren los siguientes ítems:

- 1) Revisar que las llantas no se hayan desenchajado de su posición.
- 2) Revisar que los cimientos no hayan sido dañados por el agua.
- 3) Revisar el relleno detrás de las llantas.
- 4) Revisar que no se esté lavando la combinación suelo cemento.

Figura 27 Proceso de constructivo de la Guía de la Construcción del muro de contención, con llantas usadas (Muro de Protección de Pendiente)



8.4. APLICACIÓN DEL MÉTODO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.

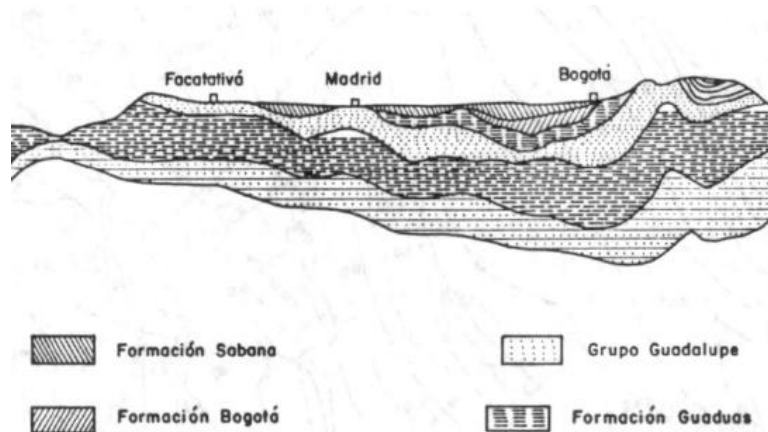
Para determinar si el método de estabilización de taludes *PNEUSOL* es aplicable en la ciudad de Bogotá D.C como alternativa de solución a la problemática anteriormente expuesta primero es necesario conocer la geología que compone de la ciudad.

8.4.1. GEOLOGÍA LOCAL.

La estructura general de la geología de la sabana de Bogotá es la de un sinclinorio formado por rocas sedimentarias del Cretáceo y Terciario que está cubierto por sedimentos recientes no consolidados del Cuaternario (FOPAE “Fondo de atención y prevención de emergencias”, 2010). La base del sinclinorio es el grupo Guadalupe, este es un grupo geológico que se extiende desde la cordillera oriental hasta el piedemonte llanero y está dividido en tres unidades; Formación de Arenisca Dura, Formación Plaeners y Formación Labor y Tierna (GUERRERO y SARMIENTO, 1996).

En la Figura 28 se observa un corte transversal de la geología de la sabana de Bogotá, allí se alcanzan a distinguir 6 grupos principales; Formación Sabana, Formación Bogotá, Formación Guaduas, Grupo Guadalupe, Formación Villeta y rocas pre cretáceas. Las características principales de los dos grupos que más presentan problemas para la estabilidad de laderas y en las que el método sería aplicable se explicarán a continuación.

Figura 28 Geología de la sabana de Bogotá (MOYA Y RODRIGUEZ, 1987)



- Formación Guaduas:

Esta formación se encuentra constituida por arcillolitas rojizas y abigarradas, mantos de carbón, areniscas y arcillolitas grises del cretáceo y comienzos del terciario, en su parte más profunda alcanza espesores de hasta 1000m. Por el material que compone esta formación se presta para la explotación de dicho material para la elaboración de ladrillos y artesanías favoreciendo así el problema de estabilidad de taludes (MOYA Y RODRIGUEZ, 1987).

- Grupo Guadalupe:

La formación de los cerros que rodean la sabana se dio por el afloramiento de las rocas de este grupo, debido a los fuertes plegamientos se han formado anticlinales estrechos y tumbados lo que provoca problemas de inestabilidad y permite que se creen depósitos de ladera. Este grupo está compuesto por areniscas friables de grano fino a medio en su Formación Labor y Tierna (esto entre 50 a 70 m superiores), capas planas y paralelas de liditas con intercalación de arcillas y areniscas en su Formación Plaeners (esto ente 70 y 100m) y bancos gruesos de arenisca compacta en su Formación de Arenisca Dura (esto de 100 hasta 300m).

Algunas de las condiciones presentes en estas formaciones geológicas propician que ocurra un deslizamiento, si no se toman las medidas necesarias para prevenirlo se pueden ver afectadas las condiciones tanto de las obras civiles como de las personas que habitan en las diferentes zonas.

8.4.2 CASO DE ESTUDIO EN BOGOTÁ D.C.

En el año 2010 el INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO (IDU) abrió un concurso de licitación para el proyecto denominado “Estudios y diseños para accesos a barrios y pavimentos locales en la localidad de San Cristóbal; y estudios y diseños para obras de estabilizaciones geotécnicas en las localidades de Sumapaz, San Cristóbal y Ciudad Bolívar en Bogotá D.C”. Como resultado de dicho concurso surgieron varios proyectos a desarrollar en el sector, el proyecto elegido como caso de estudio en Bogotá es el denominado “Proyecto 3” (Anexo 2).

El “Proyecto 3” se estudiará para determinar si la técnica es aplicable en zonas de inestabilidad de la ciudad de Bogotá, este corresponde a la estabilización del terraplén de una vía para la cual se diseñaron gaviones. En el análisis que se realizará a continuación se reemplazará el gavión del proyecto con un muro diseñado con neumáticos usados, se harán sus respectivos cálculos para determinar factores de seguridad y finalmente se hará un modelo con la ayuda del programa SLIDE que permitirá analizar la falla por corte.

El proyecto presentado por el IDU buscaba resolver los problemas de conectividad y movilidad vehicular de la vereda Pasquilla ubicada en la localidad Ciudad Bolívar. Se determinó que la población que habita la a lo largo de la vía San Juan - Pasquilla y los habitantes de la vereda Pasquilla estaban transitando por un sitio inestable para poder realizar sus actividades diarias.

Figura 29 Zona de falla para construcción del muro



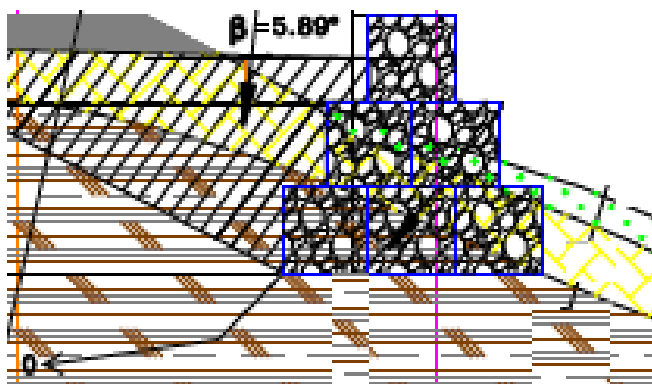
En la ealizar sus actividades diarias.

Figura 29 se observa el lugar de construcción del gavión después de sufrir una falla, para la estabilización se retirará el material fallado y se reemplazará con un nuevo material la ladera.

En el análisis del muro realizado en este proyecto Se verificaron los siguientes factores de seguridad según la NSR-10 (Norma Sismo Resistente del 2010):

- Factor de seguridad al deslizamiento $>1,6$
- Factor de seguridad al volcamiento $>3,0$
- Factor de seguridad por capacidad portante $>2,5$
- Estabilidad general a largo plazo $>1,5$
- Estabilidad general a corto plazo $>1,3$

Figura 30 Perfil del muro diseñado por el IDU



La Figura 30 corresponde a la sección transversal 1 del muro diseñado por el IDU en ella se observa el perfil que compone el terreno y la vía que se busca proteger de otro posible deslizamiento de material. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** El informe de los cálculos realizados para el de diseño de dicho muro se encuentra en el Anexo 2. Al revisar estos cálculos se determinó que existían algunas omisiones que alteran el resultado de los factores de seguridad determinados, en esa medida se volverán a hacer dichos cálculos para obtener valores corregidos y poder compararlos con el muro hecho de neumáticos

El plano del muro y la estratigrafía encontrada en el sitio corresponden al Anexo 3.

8.4.2.1 CORRECCIÓN DE CÁLCULOS

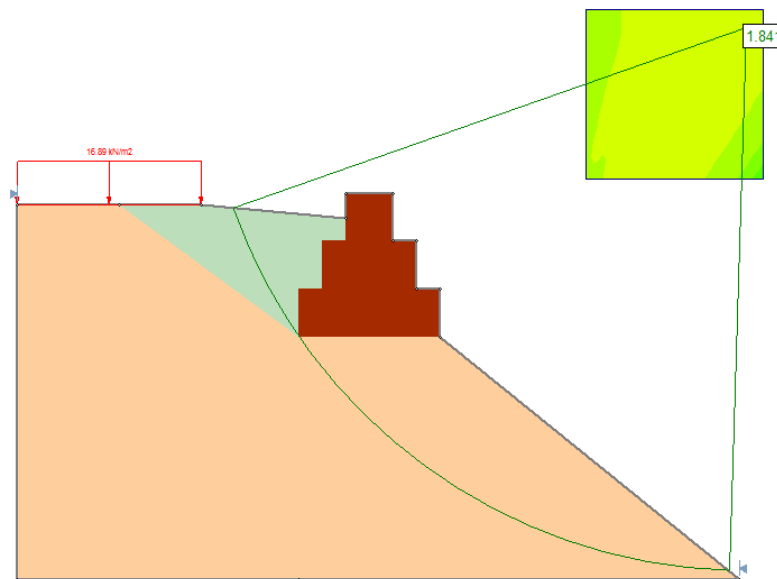
A continuación se presentan los resultados obtenidos con las correcciones hechas a los cálculos (Anexo 4) y los resultados obtenidos en el diseño del gavión hecho por el IDU.

Tabla 6 Factores de seguridad para muro diseñado por el IDU.

		Diseño IDU	Corrección
Largo plazo	Fs vuelco	5,93	10,76
	Fs deslizamiento	3,66	5,98
	Fs capacidad portante	2,5	13,4
	Fs global	2,03	1,84
Corto plazo	Fs vuelco	5,93	10,76
	Fs deslizamiento	1,98	3,2
	Fs capacidad portante	2,5	13,1
	Fs global	1,2	1,8

Como se puede observar en la Tabla 6 en los cálculos realizados por los diseñadores del IDU daban factores de seguridad menores a los corregidos en la mayoría de los casos y el factor de seguridad por capacidad portante no cumplía para la condición de corto plazo. Adicionalmente no se calcula un factor de seguridad por capacidad portante sino unos esfuerzos admisibles con un factor de seguridad supuesto de 2.5 por recomendación de la norma NSR-10.

Figura 31 Factor de seguridad del muro diseñado por el IDU



8.4.2.2 FACTORES DE SEGURIDAD MURO CON NEUMÁTICOS Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD INTERNA

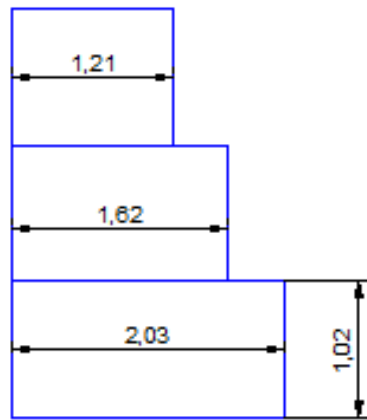
Se reemplazará el tipo de muro con muros de diferentes secciones hechos con neumáticos y se hará su respectivo análisis de estabilidad.

En Bogotá, los distribuidores de neumáticos tienen modelos de diámetros externos variables que van de 13 a 21 pulgadas (33,02 y 53,34 cm respectivamente), estos son los más usados en vehículos particulares (MICHELIN, 2014). Según el Observatorio Ambiental de Bogotá para finales del año 2014 en la ciudad circulaban cerca de 1'492,483 lo que convierte a los neumáticos desechados por estos carros en los del porcentaje más alto, por esta razón se va a trabajar con un diámetro de 16 pulgadas (40,6 cm) y una altura de 20.4cm que es el que ofrece mayor variedad para los diferentes usos de los carros.

De acuerdo a lo anterior se proponen las secciones de muros que se observan en la Figura 32 armadas con los neumáticos atrás especificados.

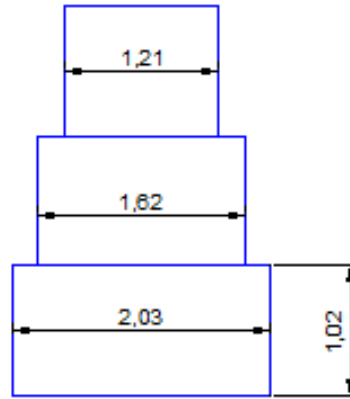
Figura 32 secciones transversales propuestas para muros con neumáticos usados

Sección 1



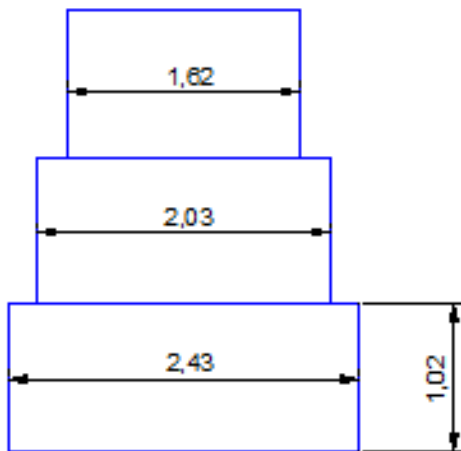
(a)

Sección 2



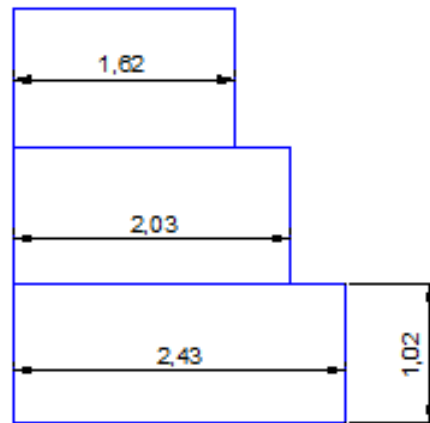
(b)

Sección 3



(c)

Sección 4



(d)

❖ Análisis de estabilidad interna.

El análisis de estabilidad interna del muro se realiza como un análisis de tierra armada.

De estos cálculos se sabe que las longitudes de los refuerzos que deben ser insertados en el suelo para anclar el muro son de 1,12m, 1,42 y 2,02m para profundidades de 2,65, 1,63m y 1,02m respectivamente (Anexo 5). Sin embargo, al usar la ecuación propuesta por Long $L_a = 0.5 * H$ se tiene que la longitud de esos refuerzos debe ser de 1,53m.

❖ Análisis de estabilidad externa.

En el estudio realizado por SAYÃO *et. Al* 2001 se determinaron valores de peso específico del material *pneusol*, para montajes con neumáticos enteros y con una cara cortada rellenos con el suelo local, dichos valores resultaron menores a los del suelo en sitio, en esa medida se hallara el valor de la diferencia entre los dos valores ($\Delta\gamma$) y esa diferencia se aplicará al suelo del caso de estudio en Bogotá D.C

$$\Delta\gamma = \gamma_{suelo\ neumáticos} - \gamma_{suelo\ local}$$

$$\Delta\gamma_{cor} = 15,4\ kN/m^2 - 17,5\ kN/m^2 = -2,1\ kN/m^2$$

$$\Delta\gamma_{ent} = 16,2\ kN/m^2 - 17,5\ kN/m^2 = -1,3\ kN/m^2$$

Al aplicar esa diferencia de valor al suelo de Bogotá da como resultado, $17,16\ kN/m^3$ y $17,96\ kN/m^3$ para neumáticos enteros y cortados respectivamente, amarrados con polipropileno. Estos serán los valores utilizados durante el desarrollo del método.

En la Tabla 7 y la Tabla 8 se muestran los valores de factores de seguridad para las diferentes secciones de neumáticos propuestas a largo y corto plazo respectivamente.

Tabla 7 Factores de seguridad a largo plazo para las secciones 1, 2, 3 y 4

		Sección transversal			
		1	2	3	4
Fs vuelco	enteros	4,8	4,68	5,82	7,05
	cortados	5,05	4,9	6,09	7,38
Fs deslizamiento	enteros	4,33	4,6	4,53	4,75
	cortados	3,98	4,54	4,62	4,85
Fs capacidad portante	enteros	11,5	9,5	13,2	16
	cortados	13,1	9,4	13,0	15,9
Fs global	enteros				
	cortados				

Tabla 8 Factores de seguridad a corto plazo para las secciones 1, 2, 3 y 4

		Sección transversal			
		1	2	3	4
Fs vuelco	enteros	5,09	4,68	5,82	7,05
	cortados	5,32	4,92	6,09	7,37
Fs deslizamiento	enteros	4,27	4,39	4,46	4,68
	cortados	3,92	4,47	4,54	4,77
Fs capacidad portante	enteros	11,3	9,4	13,0	15,8
	cortados	12,8	9,3	12,8	15,6
Fs global	enteros				
	cortados				

El análisis de factor de seguridad global se hizo con la ayuda del programa SLIDE, para este modelo es importante tener en cuenta que el concreto asfáltico que compone la vía ubicada en la parte superior de muro se tomó como una carga agregada distribuida aplicada en el suelo y modificando su estabilidad.

Para determinar las propiedades de resistencia al corte del material suelo-neumático trabajado por SAYÃO *et. Al* 2001 se decidió que se va a trabajar con la misma cohesión del suelo natural, mientras que para el ángulo de fricción se hizo una aproximación de los resultados del ensayo *pull out* (Tabla 5) como resultados de un ensayo de corte directo, lo anterior debido a que estas propiedades no fueron determinadas por los autores. Para hallar el valor de ángulo de fricción se

trabajaran 3 aproximaciones principales; una para el esfuerzo normal, otra para la fuerza máxima y la última para el área del ensayo.

- El material colocado sobre el montaje de neumáticos se toma como el esfuerzo normal aplicado en el ensayo al multiplicarlo por el peso específico del mismo, sobrecarga σ_v .
- La fuerza máxima a la que fallan los neumáticos será equivalente al punto máximo de la gráfica esfuerzo-deformación de un ensayo de corte directo.
- El área sobre la que se divide la fuerza de falla de los neumáticos corresponde al área una cara del neumático multiplicada por el número de neumáticos.

Con las anteriores suposiciones se hizo el procedimiento para los montajes que tenían 3 alturas de sobrecarga subrayados en la tabla que según lo anterior suponen tres esfuerzos normales y su vez permiten graficar una curva.

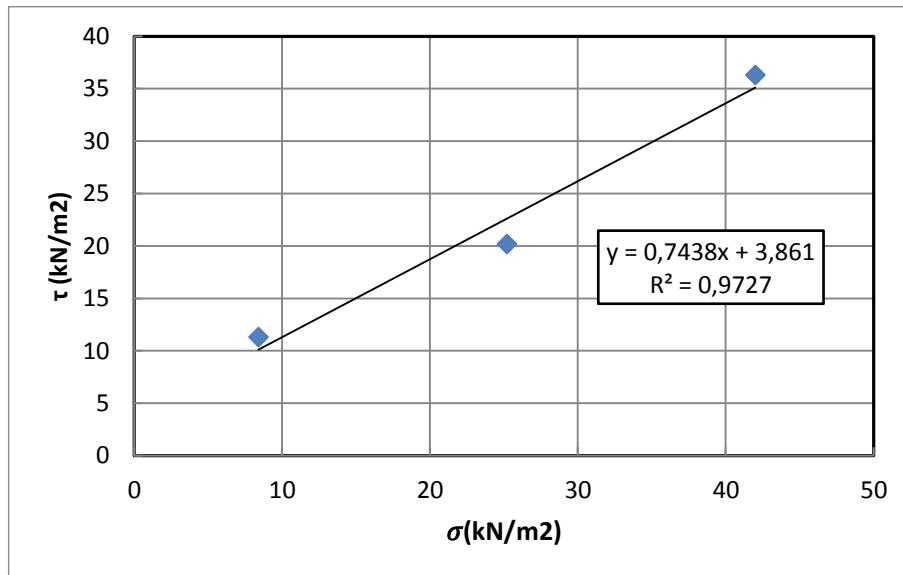
Tabla 9 Datos para grafica corte directo.

Altura sobrecarga (m)	Esfuerzo normal (kN/m ²)	Esfuerzo cortante pico (kN/m ²)
0,5	8,4	11,31
1,5	25,2	20,18
2,5	42	36,31

De la Tabla 9 el valor de esfuerzo normal corresponde al valor del peso específico del suelo de sobrecarga (16,8 kN/m³) multiplicado por la altura del mismo, el esfuerzo córtate pico corresponde al valor de la Tabla 5 dividido en el área de una cara del neumático que se halló de la siguiente manera:

$$A = \pi * R^2 - \pi * r^2 = \pi * 0,6^2 - \pi * 0,3^2 = 0,84m^2$$

Figura 33 resistencia al corte para los datos obtenidos con el ensayo pull out.



La Figura 33 corresponde a la gráfica de resistencia al corte de donde se halla un valor de ángulo de fricción como se muestra a continuación:

$$\varphi = \tan^{-1}(0,74) = 36,5^\circ$$

El valor de ángulo de fricción que tiene el suelo local es de 29° , lo que quiere decir que con el material suelo-neumático se aumenta este valor en $7,5^\circ$.

Se decidió trabajar con los resultados obtenidos para el montaje de 4 neumáticos ya que como se mencionó anteriormente para una llanta los valores de fuerza a la falla son altos por condiciones de confinamiento. Para montajes más grandes como 4x3 neumáticos la fuerza disminuye (Tabla 10), esto puede ser por los espacios entre neumático según SAYÃO *et. Al* 2001, pero como se observa en la

Figura 23 los neumáticos de la parte trasera del montaje no sufrieron deformaciones lo que puede indicar que no trabajaron a la hora de resistir la fuerza *pull out*. En ese orden de ideas siguiendo el mismo procedimiento para los diferentes montajes con 3 alturas de sobre carga se obtuvieron los siguientes valores de ángulo de fricción.

Tabla 10 Valores de ángulo de fricción hallados para diferentes montajes

Montaje	Angulo de fricción
1 cortada	54,46°
4x3 cortada	24,22

4x3x4 entera	74,47°
-----------------	--------

Así el ángulo de fricción seleccionado para aplicarle al muro *pneusol* de Bogotá es el del suelo local con el aumento debido a los neumáticos:

$$33^\circ + 7,5^\circ = 40,5^\circ$$

El factor de seguridad global hallado para todas las secciones de muro cumple con el valor mínimo de 1,5, adicionalmente los valores son iguales o mayores a los del muro gavión lo que demuestra que el muro hecho con neumáticos sirve para estabilizar el terraplén de la vía.

Es importante aclarar que para el desarrollo de presente trabajo se hicieron suposiciones y aproximaciones con base en los datos obtenidos en la revisión bibliografía, sin embargo para garantizar un mejor resultado del estudio de este método de estabilización se puede mejorar el montaje con el cual se determinan los parámetros de resistencia al corte del material suelo-neumático.

En la Tabla 11 se encuentran los valores de factor de seguridad obtenidos con el programa SLIDE para cada sección propuesta y con diferentes métodos de análisis de estabilidad para cada sección propuesta a largo y a corto plazo (imágenes del programa en el Anexo 6), el factor de seguridad global a largo y corto plazo cumple con los valores mínimos del diseño que son 1,5 y 1,3 respectivamente.

Tabla 11 Factores de seguridad Obtenidos con el programa SLIDE

	Sección 1		Sección 2		Sección 3		Sección 4	
	Corto plazo	Largo plazo	Corto plazo	Largo plazo	Corto plazo	Largo plazo	Corto plazo	Largo plazo
Bishop simplificado	2,02	2,06	1,81	2,07	1,96	1,93	1,93	1,94
Fellenius	1,93	1,91	1,74	1,92	1,85	1,79	1,78	1,81
Janbu	1,88	1,84	1,69	1,85	1,76	1,68	1,68	1,69
Spencer	2,02	2,02	1,81	2,03	1,95	1,9	1,9	1,92

9. CONCLUSIONES

- La ciudad de Bogotá dispone de normativas que permiten hacer reciclaje de los neumáticos fuera de uso, sin embargo la falta de conocimiento y el poco interés de las personas provoca que estos mecanismos no sean tan efectivos como debieran.
- El uso de este material no convencional podría reducir el impacto ambiental de la explotación de las canteras para obtener el material del que se componen los gaviones.
- El valor del peso específico de la combinación suelo-neumático es menor que el del suelo local aún en la combinación en la que los neumáticos tienen una cara cortada, lo anterior se debe a que aún sin una cara la disposición de los neumáticos permite la creación de vacíos en el muro.
- El cálculo de los factores de seguridad del vuelco, deslizamiento y capacidad portante cumplieron en todos los casos, adicionalmente el análisis hecho con el programa SLIDE demostró que el método de estabilización con neumáticos usados funciona para el caso de estudio a nivel local con factores de seguridad que cumplen con lo establecido en la norma NSR-10.
- Por las características de construcción y los materiales que se requieren los muros hechos con neumáticos usados representan una solución al problema ambiental que representa su disposición.
- Los neumáticos a los que se les retiro una cara lateral demostraron ser más efectivos que los que tenían las dos caras, esto se debe a que los neumáticos con la cara removida permiten una mejor compactación del material que se les introduce sin generar tantos vacíos como lo hacen los neumáticos con ambas caras.
- Las zonas geológicas de que componen Bogotá y que por su composición presentan problemas de estabilidad de taludes son la formación guaduas y la formación Guadalupe que representan la mayoría de los cerros de la ciudad.

10.RECOMENDACIONES

- La eficiencia del método se demostró según la teorías básicas de LONG y SAYÃO *et al.* para condiciones de carga baja, en caso de tener cargas muy altas contra el muro de debe hacer otro estudio que determine si es posible usar este material o se debe trabajar con las convencionales.
- El tipo de *Pneusol* que mejor funciono a la hora del cálculo de factores de seguridad fue el “heavy”, sin embargo si se tiene dificultad de hacer el corte de una de las caras de los neumáticos también es buena opción usarlos completos.
- Es importante tener en cuenta que los pesos específicos que se usaron para combinación suelo neumático provienen de una combinación de suelo local y neumáticos usados de esa zona, para un estudio más detallado es importante tener en cuenta que se debe hacer una prueba de densidad con el suelo de la zona en la que se pretenda diseñar el muro y los neumáticos desechados a nivel local.
- Por facilidad de instalación se recomienda usar amarres de polipropileno o tornillos ya que solo requieren de apertura de huecos en los neumáticos y realización del nudo, mientras que los metálicos requerirían hacer el gancho para cada amarre lo que resulta un trabajo más tedioso de realizar, aunque también se puede considerar el uso de tornillos.
- Para mejorar el montaje con el que se pueden determinar los parámetros de resistencia al corte se debe asegurar que todos los neumáticos en estudio trabajen, para ello se propone hacer una amarre entre neumáticos que puede ser por medio de una pequeña viga colocada a los lados de los neumáticos o una vida en la parte de atrás desde la que se hale el montaje de los neumáticos (Anexo 6).

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABC.ES. Motor. [en línea] <<http://www.abc.es/motor-reportajes/20140206/abci-entender-caducidad-neumaticos-201402052019.html>> [citado 22 de Mayo de 2015].
- ALCALDIA DE MEDELLIN, Con Innovador muro hecho de llantas, Alcaldía de Medellín recupera paso peatonal en el barrio Fuente Clara, sector La Iguaná. [En línea]. <<https://www.medellin.gov.co/irj/portal/ciudadanos?NavigationTarget=navurl://c13643354a4b6205e2000e7c1be8e4ed>> [citado 21 septiembre de 2015].
- BINOD, Tiwari; BEENA, Ajmera; SUZANNE, Moubeyed; LEMMON , Alexander y Guerrero, Josh. Improving Geotechnical Behavior of Clayey Soils with Shredded Rubber Tires Preliminary Study, Geo-congress, 2014.
- BRESSETTE, Terrie; ZHOU, Haiping; STONEX, Anne y HICKS, Gary. Asphalt rubber and its potential use in China, California department of transportation, 2008.
- CARACOL, Radio. ¿Qué hacer con las llantas usadas en Bogotá?, 2014. [en línea]. <http://caracol.com.co/radio/2014/11/06/bogota/1415274900_495850.html> [citado Agosto 25 de 2015]
- CLARA, Edgar. Estabilización de talud por medio de muro de retención a base de mampostería confinada, diseño de pavimento y mejoramiento de tramo carretero antiguo que conduce del municipio de San Juan Sacatepéquez al municipio de San Pedro Sacatepéquez del departamento de Guatemala. Universidad San Carlos de Guatemala. 2009. 155pag
- DEPARTAMENTO TÉCNICO Y ADMINISTRATIVO DE AMBIENTE (DAMA), Guía para el manejo de llantas usadas, primera edición, Bogotá D.C, Kimpres Ltda, 2006.
- DIAZ, Patricia y TORRES, Isis. Estado de Reutilización de Residuos Sólidos en la Construcción de Obras Civiles en la Región. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga, 2010.

- DIARIO ADN. Idea verde, convierten llantas en canecas. [en línea]. <<http://diarioadn.co/bogota/mi-ciudad/llantas-usadas-como-canecas-1.143915>> [citado 22 de Mayo de 2015].
- EL TIEMPO.COM. Comenzaron a remover escombros por incendio de depósito de llantas. [en línea]. <<http://www.eltiempo.com/bogota/alerta-por-llantas-quemadas-en-bogota/14797575>> [citado 5 Junio de 2015].
- ESTEVE, Jose. Reciclaje de neumáticos: Procesos y usos. [en línea] <<https://reciclajeverde.wordpress.com/2012/06/26/reciclaje-de-neumaticos-procesos-y-usos/>> [citado 30 Abril de 2015].
- FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS (FOPAE). Zonificación de la repuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones. FOPAE, 2010.
- GOMES, Catia. Combinação de Soluções Analíticas na Análise da Estabilidade de Taludes Rochosos reforçados. Universidade do Porto. 2010.
- GUERRERO, Javier; SARMIENTO, Gustavo. Estratigrafía física, palinológica, sedimentológica y secuencial del Cretácico superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero. Implicaciones en exploración petrolera. INGEOMINAS, 1996.
- HOSSAIN, Sadique; JAYAWICKRAMA, Priyantha. Use of whole tires and fly ash in earth retaining structures. Center for multicisiplinary research in transportation texas thech university. 2000.
- HUGGINS, E ; RAVICHANDRAN, N. Numerical study on the Dynamic behavior of retaining walls backfilled with shredded tires, Clemson University, 2011.
- JURADO, Liliana; MARIN, Edward. Herramienta didáctica e interactiva para el cálculo del modelo hiperbólico y los parámetros de la teoría del estado crítico, Universidad de La Salle, 2009.
- LONG, Nguyen. Le Pneusol: Recherches – Réalisations - Perspectives. Devant l'institut national des sciences appliquees de Lion. París, 1993.

- LONG, Nguyen. Lighweigth pneusol, the estabily of slopes and recovering the value of industrial byproducts. Laboratoire Central des Ponts et Chaussees. París,1996.

- MICHELIN. Lista completa de dimensiones de llantas por tamaño de llanta. 2014 [En línea] <<http://www.michelin.com.co/CO/es/tires/sizes.html>> [Citado Septiembre 20 de 2015]

- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERROTIRIAL, Resolución 1457 de 2010. Diario oficial 47786. 2010

- MOYA, Julio; RODRIGUEZ, Jorge, El Sub Suelo de Bogotá y los Problemas de Cimentaciones. VIII CPMSIF-PCSMFE. Cartagena, 1987.

- OBSERVATORIO AMBIENTAL DE BOGOTÁ. Número de vehículos particulares, 2013. [en línea]. <<http://oab.ambientebogota.gov.co/es/indicadores?id=272>> [citado 07 de Agosto 2015].

- PEREZ, Carlos. ¿Qué son las llantas radiales? [en línea] <<http://autografia1.blogspot.com>> [citado 07 de agosto 2015].

- POH, Paul; BROMMS, Bengt. Slope stabilization using old rubber tires and geotextiles. ASCE, 2009.

- RAMIREZ, Paulo. Estudio de impacto ambiental y gestión de neumáticos fuera de uso (NFU). [en línea]. <<http://www.ingenews.cl/web/download/publicaciones/137.pdf>> [citado 23 de Marzo de 2015].

- READ, John; DODSON, Tim; THOMAS, Joe. Experimental project use of sheredd tires for lightweight fill, Oregon department of transportation, 1991.

- REDDY, Krishna; MARELLA, Aravind. properties of different size scrap tire shreds: implications on using as drainage material in landfill cover systems. Departament of civil and material Engineering, 2001.

- RECICLA.COM. Neumáticos [en línea].
<<http://www.redcicla.com/neumaticos.html>>[citado 23 de Marzo de 2015].

- REVISTA EIRD, Análisis y mapeo de riesgos: instrumentos clave para la reconstrucción y la gestión del riesgo en Guatemala y El Salvador Reseña de la experiencia y metodología del proyecto RyGRAC-GTZ, enero de 2010 [en línea]. <http://www.eird.org/esp/revista/no_17_2010/art19.html> [citado 21 septiembre de 2015]

- SAYÃO, Alberto; GERSCOVICH, Denise; MEDEIROS, Luciano; SIERRA, Ana. Scarp—an attractive material for gravity retaining walls and soil reinforcement. Rios de Janeiro, Jouernal Of Soil Waste Technology & Management, 1997.

- SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Bogotá ya cuenta con 92 puntos de recolección de llantas usadas. [en línea]. <http://ambientebogota.gov.co/archivo-de-noticias/-/asset_publisher/5PPa/content/id/3153502> [citado 22 de Mayo de 2015].

- SHOSHIRO, Horigome. Guia de la Construcción del muro de contención, con llantas usadas (muro de protección de pendiente). Tegucigalpa, 2010.

- TEIXEIRA, José. Estruturas de suporte terras executadas com pneus. Instituto superior de engenharia do Porto. Porto, 2012.

- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Proyecto de microzonificación sísmica de Santa Fe Bogotá D.C. Bogotá 2009.

- WEISS, Charles; ROBERSON, Allen; MALONE, Tom; MALONE, Philip. Recycling Tires as Stay-in-Place Forms for Pavers. U.S. *Army Engineer Research and Development Center*, 2007.

- VARGAS, Alejandra. Ford Premió a Ticos por Rescate de Naturaleza y Cultura Nacional. [en línea]. <http://www.nacion.com/ln_ee/2009/diciembre/10/aldea2188982.html>[citado 22 de Mayo de 2015].

- ZIADAT, An enviromental impact assessment of the open burning of scrap tires. *Jounal of applied sciences*, 2014

**ANEXO 1: Puntos de recolección de neumáticos usados en
Bogotá D.C**

ANEXO 2: Diseño de muro realizado por el IDU

ANEXO 3: Plano de ubicación del muro diseñado por el IDU

ANEXO 4: Cálculos de muro diseñado por el IDU

ANEXO 5: Cálculos de longitud de refuerzo con tierra armada

ANEXO 6: Factores de seguridad obtenidos con el programa SLIDE
y propuesta de refuerzo para ensayo *pull out*.