

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA LA EVALUACIÓN
DE LA ESTABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDAS CON LLANTAS**

**PRESENTADO POR:
JOSÉ ALEXANDER PINEDA BLANCO**



**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ÁREA DE GEOTECNIA
BOGOTÁ
2018**

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA LA EVALUACIÓN
DE LA ESTABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN
CONSTRUIDAS CON LLANTAS**

JOSÉ ALEXANDER PINEDA BLANCO

Trabajo de Grado presentado para optar al título de ingeniero civil

Christian Camilo Gutiérrez Angulo

I.C. Magister en Geotecnia

Asesor Disciplinar

Lic. Roy W. Morales Pérez

Asesor Metodológico

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ÁREA DE GEOTECNIA

BOGOTÁ

2018

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. 15 mayo 2018

DEDICATORIA:

María José Pineda García

Mi hija, mi gran bendición

María Isabel Blanco Abril

Mi madre, a quien debo lo que soy

José Elver Pineda

Mi padre, por darme la vida

Genny García Ruiz

Mi esposa, mi fiel compañera de vida.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su más sincero agradecimiento:

A Dios, quien permite cada día que tenga la vida para alcanzar logros tan representativos y éste es el fruto de su inmensidad y compañía.

A mi madre, quien me tendió la mano cuando no veía soluciones en el largo camino de la vida y quien con su apoyo me ha demostrado su gran amor, junto con mi familia son mi más grande alegría.

A mi esposa que se ha convertido en mi fiel compañera en el camino de la vida y que junto a mi hija son el motor diario para alcanzar todas mis metas propuestas.

A la Universidad La Gran Colombia por permitirme desarrollar como profesional y a quien debo el crecimiento en el campo laboral.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2. ANTECEDENTES	21
3. OBJETIVOS	32
3.1 Objetivo general.....	32
3.2 Objetivos específicos	32
4. ALCANCES Y LIMITACIONES	33
5. JUSTIFICACIÓN	35
6. MARCO REFERENCIAL	40
6.1 Marco conceptual	40
6.1.1 Llanta.....	40
6.1.2 Características y parámetros principales de la llanta.....	41
6.1.4 Tipos de llantas	42
6.1.5 Componentes principales de la llanta.....	43
6.1.6 Dimensiones de las llantas.....	45
6.1.7 Símbolos de designación.....	47
6.1.8 Estructura de contención	49
6.1.8.1 Dimensionamiento de muros de contención.....	50
6.1.8.2 Cargas de diseño en un muro de contención	51
6.1.8.3 Presión lateral de tierra	53
6.1.8.4 Sobrecarga por llenos	55
6.1.8.5 Sobrecarga por cargas vehiculares (Cargas vivas).....	56

6.1.8.6 Cargas sísmicas	58
6.1.9 Factores de seguridad de estabilidad externa normativos.....	60
6.1.9.1 Análisis estabilidad externa de muros de contención	61
6.1.9.2 Revisión por volcamiento	61
6.1.9.2 Revisión a deslizamiento.....	62
6.1.9.3 Revisión por capacidad de carga	63
6.1.10 Consideraciones generales de diseño.....	64
6.1.10.1 Control de aguas dentro de la estructura.	65
6.1.10.2 Drenaje en la base del muro	65
7. METODOLOGÍA.....	66
7.1 Enfoque de la investigación	66
7.2 Tipo de investigación	66
7.3 Fases de la investigación	67
7.3.1 Fase I Descripción del comportamiento mecánico.....	67
7.3.2 Fase II. Codificación de formularios enfocados a estructuras de contención construidas con llantas usadas.....	68
7.3.3 Fase III Puesta en marcha del programa	69
8. DESARROLLO Y RESULTADOS	71
8.1 Desarrollo del software	71
8.1.1 Desarrollo de formulario evaluación de la sobrecarga por llenos	72
8.1.2 Desarrollo del formulario empuje del suelo.....	74
8.1.3 Desarrollo de formulario de empuje por sobrecargas.....	76
8.2 Descripción del comportamiento mecánico de las estructuras construidas con llantas usadas.....	77
8.2.1 Especificaciones de la Llanta	77

8.2.2. Estructura de contención:.....	79
8.2.4 Descripción de la presión lateral de tierras en WALLINTIRE V1.	93
8.2.5 Descripción de las sobrecargas por llenos en WALLINTIRE V1.....	96
8.2.6 Descripción del empuje del suelo en WALLINTIRE V1.	98
8.2.7 Descripción del Empuje por sobrecargas en WALLINTIRE V1.....	100
8.2.8 Descripción de la evaluación de la sobrecarga por cargas vehiculares en WALLINTIRE V1.....	101
8.2.9 Descripción de la evaluación de cargas sísmicas en WALLINTIRE V1...	103
8.2.10 Descripción del análisis de estabilidad externo en WALLINTIRE V1.....	105
8.3 Comportamiento mecánico de estructuras de contención construidas con neumáticos fuera de uso (NFU).....	108
8.3.1 Definición de la información del proyecto.	108
8.3.2 Comportamiento mecánico por presión lateral de tierras sobre la estructura.....	110
8.3.3 Comportamiento bajo la acción de la sobrecarga por llenos	111
8.3.4 Comportamiento por empuje del suelo.	112
8.3.5 Comportamiento bajo el empuje por sobrecargas	113
8.3.6 Comportamiento mecánico en la estructura por cargas vehiculares (vivas)	115
8.3.7 Comportamiento bajo la acción de cargas sísmicas.	118
8.3.8 Definición unitaria de la llanta para configuración general.....	119
8.3.10 Memoria de cálculo.	121
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS	123
10. CONCLUSIONES	136
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista general de la obra desarrollada con llantas de refuerzo utilizada para la investigación.	25
Figura 2. <i>Vista en planta de la configuración desarrollada en la investigación Baroni & Specht.</i>	27
Figura 3. Vista en corte de la configuración desarrollada en la investigación Baroni & Specht	28
Figura 4. Configuración realizada para llevar a cabo el estudio. Alberto Sayão	30
Figura 5. Configuración realizada para llevar a cabo el estudio. Alberto Sayão	30
Figura 6. Componentes principales de las llantas.	45
Figura 7. Sección nominal de un neumático.	46
Figura 8. Ejemplo de información en llantas. GOODYEAR	47
Figura 9. Algunas secciones típicas muros de gravedad	51
Figura 10. Esquema de dimensionamiento de muros de gravedad.	52
Figura 11. Esquema de muro de tierra reforzada con la aplicación de la carga viva	53
Figura 12. Presión lateral de tierras en una estructura de contención	54
Figura 13. Presión lateral de la tierra causada por (a) carga de línea.....	58
Figura 14. Obtención de la ecuación.....	59
Figura 15. Revisión por deslizamiento a lo largo de la base.	64
Figura 16. Desarrollo de formulario de presión lateral de tierras.....	71

Figura 17. Desarrollo de formulario sobre carga por llenos.....	74
Figura 18. Desarrollo de formulario para empujes por efecto del suelo	75
Figura 19. Desarrollo de formularios para empuje por sobrecargas	76
Figura 20. Muros convencionales	79
Figura 21. Muros mecánicamente estabilizados	80
Figura 22. Secciones típicas en WALLINTIRE V1	81
Figura 23. Parámetros geométricos de una llanta aplicados en el software WALLINTIRE V1	82
Figura 24. Geometría y dinámica de Wallintire en una llanta.....	83
Figura 25. Opciones de configuración Wallintire v1	84
Figura 26. Formulario sección trapezoidal input-data y out-data.....	85
Figura 27. Formulario sección rectangular input-data y out-data.	85
Figura 28. Configuraciones ofrecidas por WALLINTIRE V1	86
Figura 29. Formulario información del proyecto	87
Figura 30. Menú editar WALLINTIRE V1	88
Figura 31. Paleta de colores para modificar fondo. WALLINTIRE V1	88
Figura 32. Entorno de trabajo en WALLINTIRE V1 y la edición de colores de los trazos.	89
Figura 33. Menú editar unidades.....	90
Figura 34. Formulario editar coordenadas, entorno de trabajo.	90
Figura 35. Menú archivo y sus opciones. WALLINTIRE V1	91
Figura 36. Menú archivo WALLINTIRE V1	92
Figura 37. Barra de menú, opción presión lateral de tierras. WALLINTIREV1	93

Figura 38. Teoría Coulomb para empuje de tierras en una estructura de contención.....	94
Figura 39. Formulario presión lateral de tierras. WALLINTIREV1	95
Figura 40. Relación de ecuaciones input data y out-data para presión lateral de tierras.....	95
Figura 41. Formulario sobrecarga por llenos. WALLINTIREV1	96
Figura 42. Teoría tradicional para sobrecarga por llenos.....	97
Figura 43. Base para cálculo de empuje del suelo sobre la estructura	99
Figura 44. Formulario para captura de datos de empujes del suelo y gráfica de datos.....	99
Figura 45. Captura de datos para empujes por sobrecargas	100
Figura 46. Tipos de cargas en una estructura. Carga lineal(a) carga en franja (b)	101
Figura 47. Formulario para el cálculo de cargas vivas. en la estructura	102
Figura 48. Graficas estado elástico e inelástico del suelo.....	103
Figura 49. Coeficientes sísmicos	104
Figura 50. Parámetros para condiciones sísmicas.....	104
Figura 51 Formulario cargas sísmicas.	105
Figura 52. Formulación para factores de seguridad.....	106
Figura 53. Formulario captura de datos análisis de estabilidad externa. WALLINTIREV1	107
Figura 54. Pesos específicos base para el cálculo de análisis de estabilidad externa.....	108
Figura 55. Formulario con captura de datos información del proyecto.....	109
Figura 56. Captura de datos para presión lateral de tierras.	111

Figura 57. Captura de datos empuje del suelo.....	112
Figura 58. Gráfica para empujes del suelo ejemplo	113
Figura 59. Captura de datos para empuje por sobrecargas.....	114
Figura 60. Captura de datos por sobrecarga.....	114
Figura 61. Formulario captura de datos carga lineal distribuida	116
Figura 62. Gráfica de condiciones elásticas e inelásticas para el estudio de caso.	117
Figura 63. Formulario captura de datos de cargas sísmicas.....	118
Figura 64. Configuración de la llanta por defecto para el estudio del caso.	119
Figura 65. Definición de geometría de la sección trapezoidal estudio del caso. .	120
Figura 66. Análisis de estabilidad externa.....	121
Figura 67. Memoria de cálculo en Excel	122
Figura 68. Entrada de datos alto y ancho de la llanta.	125
Figura 69. Formularios de entrada de datos configuración global.....	126
Figura 70. Secciones globales en Wallintire V1.	127
Figura 71. Formulario de captura de datos presión lateral de tierras.	128
Figura 72. Captura de datos análisis estabilidad externa.....	129

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Pesos específicos en el sistema de suelo reforzado con llantas.	27
Tabla 2. Características de uso de las llantas	41
Tabla 3. Índices de carga vs peso en kg	42
Tabla 4. Tipos de llantas en el mercado	43
Tabla 5. Principales componentes de la llanta	44
Tabla 6. Sección nominal de un neumático.	46
Tabla 7. Designación respecto al tipo de servicio de la llanta.	48
Tabla 8. Ventajas de un muro de contención en tierra armada	50
Tabla 9. Muros de contención.	55
Tabla 10. Factores de seguridad tomados de las normas para condiciones estáticas.....	60
Tabla 11. Factores de seguridad tomados de las normas para condiciones pseudo-estáticas.....	61
Tabla 12. Base para cálculo de presión lateral de tierras	73
Tabla 13. Ejemplo de relación profundidad vs empuje para WALLINTIRE V1	74
Tabla 14. Lectura de características en el costado de una llanta	78
Tabla 15. Factores de seguridad normativos.....	123
Tabla 16. Relación geométrica sección trapezoidal.	130
Tabla 17. Datos de cambio de la sección en altura	132

ANEXOS

MANUAL DEL USUARIO: *Uso y aplicación del programa WALLINTIRE V1.*

CÓDIGO JAVA: *Lenguaje java utilizado para la programación de formularios (La información de códigos se encuentran dentro de la carpeta de WALLINTIRE).DIGITAL.*

RESUMEN

En este trabajo, a partir de una investigación formal y estructurada, de enfoque cuantitativo, se propone un programa de diseño para el análisis de la utilización y comportamiento de llantas de desecho como materia prima de estructuras de contención, y para el cálculo de presiones laterales de tierras con problemas de estructuras de contención, incorporando los NFU en la estructura de contención, con impacto ambiental ampliamente favorable. Para la descripción del comportamiento mecánico de estructuras de contención construidas con llantas usadas bajo parámetros de geometría y empujes de suelo, se propone, con base en la teoría, una herramienta de software para estructuras de contención construidas con llantas usadas; así mismo se analiza el comportamiento mecánico de la estructura de contención por los métodos de Coulomb y Rankine.

Palabras clave: estructura de contención, neumáticos fuera de uso (NFU)

INTRODUCCIÓN

El presente documento, es un informe acerca del proceso y resultados de una investigación formal y estructurada, de enfoque cuantitativo y tipo proyectivo, para el desarrollo de una aplicación que permita determinar y describir el comportamiento mecánico de estructuras de contención construidas con neumáticos fuera de uso (NFU), en la estabilidad de taludes.

La principal limitación que se debió sortear para la realización de esta investigación, es la poca información académica disponible sobre las llantas de desecho y su utilización como estructuras de contención, lo que dificultó la revisión bibliográfica y dejó temas planteados para posibles líneas de investigación futuras.

El proyecto de software se enfocó en Wallintire V1 y la base matemática para el cálculo del comportamiento mecánico en el estudio de estructuras de contención elaboradas con llantas se fundamentó en la teoría de estabilidad local por los métodos de Rankine y Coulomb.

En el primer capítulo se desarrolla el planteamiento del problema de investigación; a continuación exponen los antecedentes y en el tercer capítulo se enuncian los objetivos. Seguidamente se definen los alcances y limitaciones del trabajo, para luego pasar a su justificación. El sexto capítulo, del marco referencial, expone y discute todos los conceptos desde los cuales se realizó la investigación. En el capítulo metodológico se establece el enfoque, tipo y fases de la investigación, y en el octavo capítulo se presentan los resultados, cuyo análisis se desarrolla en el capítulo 9. Finalmente se presentan las conclusiones, referencias y anexos

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo de técnicas tradicionales de muros de tierra reforzada y la utilización de las llantas de desecho como materia prima, reflejan una variante técnica bajo las teorías y procedimientos que se deben tener en cuenta para muros de tierra reforzada o por gravedad, cuyo análisis y comportamientos presentan sustanciales variaciones, pero revelan ventajas respecto a sistemas de concreto y gaviones; sin embargo, carecen de una investigación formal y estructurada del modo constructivo, como programas de diseño, en los que se puedan identificar dichos comportamientos mecánicos de estructuras de contención con llantas de desecho.

En aras de contextualizar, la procedencia de las llantas para automotores se remonta a la ciudad de Francia por parte de los hermanos Michelin en el año 1891, cuando dicho descubrimiento revolucionó el uso del automóvil a nivel mundial. Michelin¹ encabeza actualmente el mercado de llantas con gran participación en el mismo, donde el uso de éstas para diferentes ramas del automovilismo ha tenido una evolución a lo largo de la historia, modificando la composición, así como la adaptación, a las necesidades de los usuarios. Al igual que Michelin, han surgido nuevas empresas dedicadas a la industria de las llantas para automotores tales como Goodyear, Bridgestone, BFGoodrich, Pirelli entre otras compañías dedicadas al mismo mercado.

Si bien el crecimiento en la industria de las llantas ha evolucionado a lo largo de la historia y ha tenido un crecimiento mundial, deja al descubierto que la presencia

¹ EL COMERCIO. Historia de la llanta. 14 sep. 2012 [en línea] Disponible:
<http://www.elcomercio.com/deportes/carburando/historia-llanta.html>

² REDACCIÓN NEGOCIOS, Economía: Argos usará llantas en sus hornos. En: El Espectador. Bogotá D.C. 14, Fecha 13/11/2014. Disponible:

de los NFU (neumáticos fuera de uso), es un claro problema ambiental y también considerado a primera vista como material poco aprovechable; sin embargo, a los NFU, se les pueden aprovechar ciertas propiedades tanto mecánicas como de geometría; para esto, se han podido utilizar como estructuras de contención sencillas, adoptadas como alternativas de uso común dentro de distintas comunidades a nivel mundial.

Si bien la producción de NFU a nivel mundial tiene volúmenes con consideraciones representativas en cuanto a impactos ambientales, en el caso de Colombia, la producción de llantas es de 110 mil toneladas al año, cifra que corresponde a un alto índice de impacto en el territorio nacional. Sin embargo, se intentan aprovechar las propiedades de estos materiales una vez cumplida su vida útil en diferentes campos; según Camilo Restrepo, vicepresidente de innovación de Cementos Argos, la reutilización de los neumáticos como material de construcción representa una alternativa de aprovechamiento en un 75% del volumen producido a nivel nacional².

La alternativa de utilizar las llantas fuera de uso en estructuras de contención tiene gran validez, pues es aprovechar las propiedades que presentan estos materiales en procesos constructivos. En el caso de Colombia, los estudios técnicos para la zonificación de susceptibilidad y amenaza por procesos de remoción en masa muestran que la región es propensa a sufrir deslizamientos de tierra cuando se ve afectada por periodos de lluvia o fenómenos que impliquen precipitaciones: “con más de ocho de cada diez colombianos ubicados en zonas propensas a desastres y el 87 por ciento del Producto Interno Bruto (PIB) del país en riesgo de tales eventos, más de 150 desastres naturales han afectado a Colombia en los últimos

² REDACCIÓN NEGOCIOS, Economía: Argos usará llantas en sus hornos. En: El Espectador. Bogotá D.C. 14, Fecha 13/11/2014. Disponible: <https://www.elespectador.com/noticias/economia/argos-usara-llantas-sus-hornos-articulo-527545>

40 años, cobrando la vida de más de 32.000 personas y afectando a más de 12 millones”³.

Mencionado lo anterior, a lo largo del territorio nacional se ven numerosas zonas afectadas por deslizamientos de tierras, que han ocasionado daños representativos en la economía regional o local dependiendo del caso. Para dar respuesta inmediata y económica a esta situación, se llevan a cabo numerosas obras de mitigación de dichos deslizamientos. Sin embargo, la escala de la tecnología puede ser escasa; así como también pueden ser tardíos, los aportes del gobierno para la solución de problemáticas que afectan a las poblaciones que se encuentran en situaciones difíciles cuando son alcanzadas por oleadas de invierno o comportamientos propios de la naturaleza.

La idea de llevar a cabo obras de mitigación responde a la necesidad que surge en la utilización y el desarrollo empírico de nuevas técnicas con el fin de corregir factores de movimientos de tierras, lo que ha llevado a ejecutar obras de manera simple tal como el uso de llantas de segunda mano como medio que permite disminuir costos como los tiempos constructivos.

En efecto, llevar los NFU a un sistema geotécnico, como el sistema que da respuesta a problemas de deslizamientos en las zonas que sean consideradas como vulnerables, ha sido una respuesta rápida a dichos problemas; pero sin lugar a duda, deja al descubierto una falencia en el soporte técnico y la viabilidad que genera un diseño, con el fin de identificar el comportamiento bajo la acción de deslizamientos, y lo que implica la elaboración real de un proyecto geotécnico,

³ CLIFFORD. Colombia to reduce its vulnerability to natural disasters with IDB support: Fecha 07/06/2016. Disponible: <http://www.iadb.org/en/news/news-releases/2011-11-09/natural-disasters-loan-colombia,9664.html>.

como las deformaciones excesivas o movimientos de la estructura de contención en la estabilidad de tierras.

El desarrollo de proyectos geotécnicos con conceptos empíricos no refleja la realidad de las condiciones actuantes a las cuales se encuentra expuesta la estructura elaborada con neumáticos fuera de uso (NFU); a pesar de que la construcción es relativamente fácil, y ayuda en el aprovechamiento de las propiedades que poseen, no existen en la actualidad procedimientos confiables de diseño que permitan identificar el comportamiento real cuando estos muros se encuentran trabajando como estructura de contención.

En aras de buscar alternativas de bioingeniería, se proyecta reutilizar los neumáticos como materia prima para la construcción de muros y barreras de contención, que bajo modelos numéricos se busque garantizar la vida útil de los proyectos elaborados con neumáticos, así como la calidad en el servicio que estas estructuras pueden prestar, en pro de respuestas a problemas tanto ambientales como naturales, con factores económicos que puedan ser de impacto para las comunidades que empleen y adopten este tipo de sistemas geotécnicos.

Con base en estas consideraciones, el presente proyecto busca dar respuesta a la siguiente interrogante investigativa:

¿Cuál es el comportamiento mecánico de estructuras de contención elaboradas con llantas usadas en la estabilidad de taludes?

2. ANTECEDENTES

Las estructuras de contención para la estabilidad de taludes son obras que, a lo largo de la historia, han sido producto del esfuerzo del ser humano en la búsqueda constante de soluciones adecuadas para casos de remoción de masas de suelo, que pueden llegar a afectar la calidad y la vida del mismo.

Es por eso que, en aras de dar respuesta a la necesidad de reducir impactos de valor económico y ambiental, se ha optado por utilizar alrededor del mundo materiales que puedan ser aprovechados de forma eficiente y sostenible desde el punto de vista ambiental. Un claro ejemplo de este aprovechamiento, es el uso de los NFU (neumáticos fuera de uso) como estructuras de contención en la estabilidad de taludes, donde la importancia de ahorro respecto a estructuras convencionales es de gran consideración.

Los NFU no han sido utilizados solo en estructuras geotécnicas, también han tenido otras aplicaciones en la rama técnica de las vías, tal como lo es la realización de pavimentos y mezclas asfálticas, caso en el cual, sin lugar a dudas, su acogida es particular, al punto de ser aceptada por la Sociedad Colombiana de Ingenieros⁴. Este material enriquece el pavimento en la mezcla bituminosa lo que, bajo un compromiso profesional y de interés público, conlleva la creación de programas con el fin de modernizar la infraestructura vial, y cumplir con la creciente cultura y legislación ambiental, en consonancia con la experiencia internacional, y la tecnología de reciclaje de llantas, bajo un contexto ambiental

⁴ CARDONA URRUTIA, Patricia. Estudio de factibilidad para la creación de planta de producción de granos de caucho (GCR), mediante el reciclaje de llantas fuera de uso. Pereira.2016. Trabajo de grado (Administradora Industrial). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías.

que tendrá impactos considerables, por las ideas innovadoras enfocadas a aportar el cuidado de nuestro planeta.

Implementar el concepto del uso de las llantas como elementos prefabricados para muros de contención, ha permitido realizar trabajos orientados a reducciones de costo y tiempo, como también la mejora en la calidad final de la estructura, y los niveles de estética para los distintos acabados superficiales a los que la estructura se pueda prestar, tales como el uso de vegetación, acabados industrializados, entre otros.

Para lo anterior, se ha estimulado el crecimiento de la parte técnica e investigativa, a cargo de diferentes profesionales, los cuales han estado orientados a la utilización de llantas en estructuras de contención bajo modelos numéricos e ingenieriles, donde las muestras investigativas en la línea del tiempo han obrado en la búsqueda de identificar propiedades mecánicas tales como las desarrolladas en los laboratorios Des Ponts et Chausseas⁵. Esta investigación, liderada por el ingeniero José Amortegüi, se enfocó en la determinación de las propiedades mecánicas de las llantas de desecho como elementos de refuerzo de masas de suelo y la interacción con éste⁶.

Dicha investigación separó las dos tapas laterales de una llanta dejando la banda de rodadura, las cuales fueron sometidas a tracción de forma individual. De esta actividad se encontró que la resistencia en la banda de rodadura fue en promedio de 56 KN, aproximadamente 5.7 toneladas. Los resultados promediados en muestras realizadas a diferentes especímenes daban la probabilidad de que las

⁵ ÉCOLE DES PONTS. [en línea]. Disponible: <http://www.enpc.fr/en/node?page=21>>

⁶ AMORTEGÜI, José Vicente. Utilización de Llantas en Obras civiles. En SOCIEDAD COLOMBIANA DE GEOTECNIA. Colombia: 2000.

bandas de rodadura alcanzaran una resistencia a la tensión superior a 26 KN (aproximadamente 2,7 ton). Las tapas laterales fueron sometidas al mismo procedimiento, presentando resistencias variables desde 17 KN (1.7 ton) para las tapas que se encontraban pobremente reforzadas y 52 KN para las que se encontraban bien reforzadas; el resultado promedio en los diferentes sometimientos fue de 25 KN (2.6 ton).

La investigación, por otra parte, buscó identificar y evaluar parámetros de adherencia y la interacción entre suelo y llanta. Se realizaron diferentes ensayos a gran escala sobre los dos tipos de elementos, banda de rodadura y tapas laterales, los cuales eran puestos en terreno, embebidos dentro de un terraplén construido con material aluvial, donde se les aplicaba fuerza a tracción a una velocidad de 0,75 mm/s. Entre los resultados obtenidos y graficados, se destacan que el valor del desplazamiento correspondiente a la tensión máxima se incrementó con el número de elementos y que la fuerza máxima no fue directamente proporcional al número de componentes.

Otra de las investigaciones del uso de neumáticos usados como estructuras de contención se remonta al año 1976, en Francia, la cual iba direccionada a verificar el comportamiento de este tipo de estructuras. Los análisis y las revisiones realizadas presentaron buenos resultados; dicha investigación estuvo encauzada a considerar las llantas como refuerzo de tipo pared vertical y que pudiese ser aplicado en la estabilidad de suelos o laderas, empleando el concepto de muros de contención con NFU. La metodología empleada se llevó a cabo con la construcción de un muro experimental de gravedad en la ciudad de West

Yorkshire; para el caso se sometieron llantas de R12 y R15 a ensayos de tracción.⁷

La primera prueba consistió en la medición de la resistencia de la llanta, al ser sometida a un alargamiento, aplicando una tensión a una velocidad constante de 50 mm/min, con el fin de llevarla a la ruptura, registrando la fuerza al momento de la falla. Una vez realizado el procedimiento, el resultado de la resistencia a tracción medida fue de 55,81 kN, con una desviación de 15,19 kN. Sin embargo, la prueba de campo era de alguna forma la más representativa, donde la idea era llevar todo a gran escala y efectivamente evaluar un muro de tierra armada conformado con llantas de reciclaje y describir su verdadero comportamiento.

Del caso anterior, se estaba enfocando a un sistema de confinamiento, que consistía en unir llantas para rellenarlas con suelo residual cohesivo, puestas en capas sucesivas a manera de estructura, aumentando el peso propio de cada elemento, donde las llantas fueron ligadas una y otra con una cuerda de polipropileno y colocadas en capas escalonadas hasta alcanzar 7,0 m de ancho por 5,0 m de altura en un ángulo de inclinación de 45°.

Los resultados fueron dados bajo un monitoreo con placas de asentamiento y celdas de presión, tomando lecturas de asentamientos de la estructura de 14, 26 y 59 para las placas colocadas; en general, los resultados fueron buenos, aun considerando que la compactación no estaba en el 90% de la máxima densidad seca, en las condiciones geométricas desarrolladas.

⁷ RODRÍGUEZ, Oscar Egidio. Estandarización de Técnicas de Diseño y Construcción de Muros de Tierra Reforzada con Llantas de Desecho. Medellín, 2016, pg. 17. Magister en Ingeniería Geotécnica. Universidad Nacional. Facultad de Minas. Antioquia.

Figura 1. Vista general de la obra desarrollada con llantas de refuerzo utilizada para la investigación.



Fuente: RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, Oscar Egidio. *Estandarización de técnicas de diseño y construcción de muros de tierra reforzada con llantas de desecho.* Medellín: 2016. Trabajo de grado, Magister en Ingeniería – Geotécnica. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil

Existe coincidencia de profesionales que buscan conocer los comportamientos de las llantas usadas en campos geotécnicos y que con el paso del tiempo han relacionado los mismos; son casos de investigación como el que se remonta al año 2006 por Baroni & Specht ⁸, quienes llevaron a cabo la evaluación de los

⁸ SHOSHIRO HORIGOME. Guía de construcción de muro de contención con llantas usadas [en línea]. Bogotá [citado 8 de octubre, 2014]. Disponible en Internet: https://www.jica.go.jp/project/all_c_america/001/materials.

parámetros de suelo que intervienen en el sistema de suelo reforzado con llantas de reciclaje. En dicha investigación, se realizó un análisis paramétrico basado en ensayos de laboratorio con diferentes tipos de llantas, considerando la altura del muro, las características del suelo del lleno, presencia de niveles de agua y el ángulo de fricción interna del suelo; además, se presenta un análisis estadístico de la influencia de cada variable en el sistema y especialmente en la base de la estructura dimensionada.

Entre los resultados obtenidos, se encuentra la variación del peso específico de un mismo suelo según el tipo de llanta que sea utilizada para la construcción del muro de contención; se concluye que la variación en los valores del peso específico del material radica en la manera como se realice el llenado y la compactación del material, y depende de la facilidad que se tenga para realizar el llenado y compactación al interior de la llanta.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de variación de pesos específicos según llanta y material utilizado para relleno:

Para llegar a los resultados de la investigación, se evaluó en un escenario real, con una estructura construida en la margen de un talud de un arroyo. A modo constructivo se efectuó la limpieza y nivelación del terreno, poniendo un geotextil y un elemento filtrante para el control de aguas de escorrentía; seguidamente se pusieron dos filas de llantas en distribución ortorrómbica para garantizar un mayor contacto de enlace entre las llantas y que de igual forma contribuyera a la estabilidad general. La estructura fue unida con alambre galvanizado No 16 rellena con bloques de roca, ante la vulnerabilidad de la estructura a procesos de erosión por el flujo del agua que tuviese contacto con ésta.

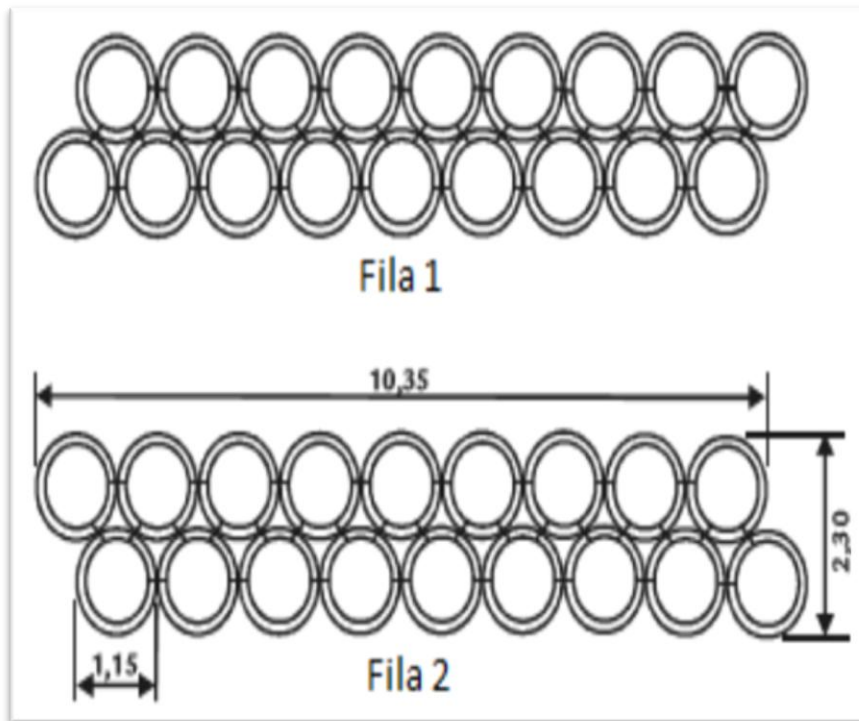
Tabla 1. Pesos específicos en el sistema de suelo reforzado con llantas.

Material de lleno	Llantas	Peso específico
SUELO	Vehículos de transporte público	14,95
	Vehículos de transporte particular	16,63
GRAVILLA	Vehículos de transporte público	13,52
	Vehículos de transporte particular	15,76
SUELO	Vehículos de transporte público	10,96
	Vehículos de transporte particular	13,00

Fuente. RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, Oscar Egidio. *Estandarización de técnicas de diseño y construcción de muros de tierra reforzada con llantas de desecho.* Medellín: 2016. Trabajo de grado, Magister en Ingeniería – Geotécnica. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil

La siguiente configuración representa el trabajo realizado de la estructura en terreno por Baroni & Specht:

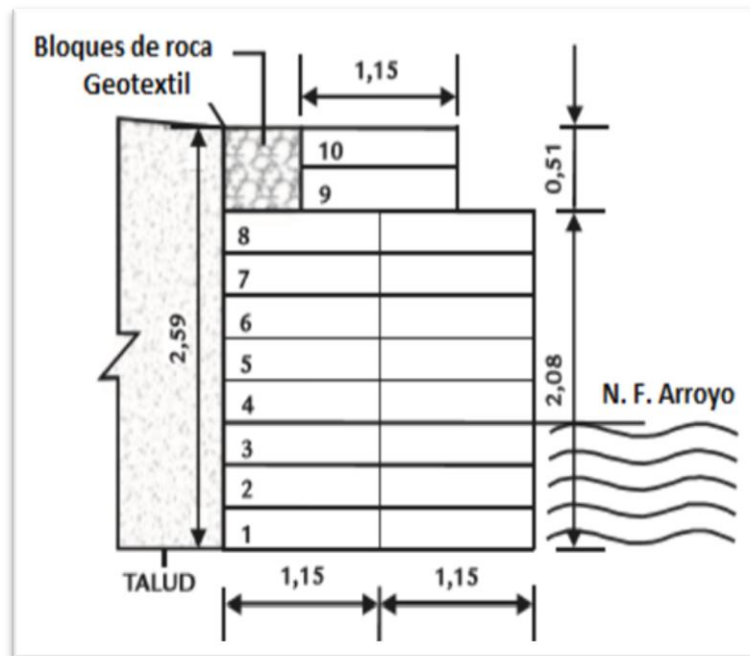
Figura 2. Vista en planta de la configuración desarrollada en la investigación Baroni & Specht.



Fuente: *Ibid.*

Una vez revisados los comportamientos en el prototipo real, los análisis llevan a que en relación con el conjunto (llanta, agregado, y geotextil), se puede describir que la estructura funcionaba como un material permeable y que en el comportamiento absorbe las deformaciones que trabajan en conjunto. Para la estructura, el muro con la sección transversal de 2,30 m, registró características seguras para la contención del talud de 2,60 m de altura, cuyos esfuerzos horizontales se estimaron en 20,28 KN/m; sin lugar a dudas, este tipo de estructura representa una solución ambiental en pro de la reutilización de llantas a nivel mundial o por quien crea conveniente el uso de éstas como una alternativa de contención.

Figura 3. Vista en corte de la configuración desarrollada en la investigación Baroni & Specht



Fuente: *Ibid*

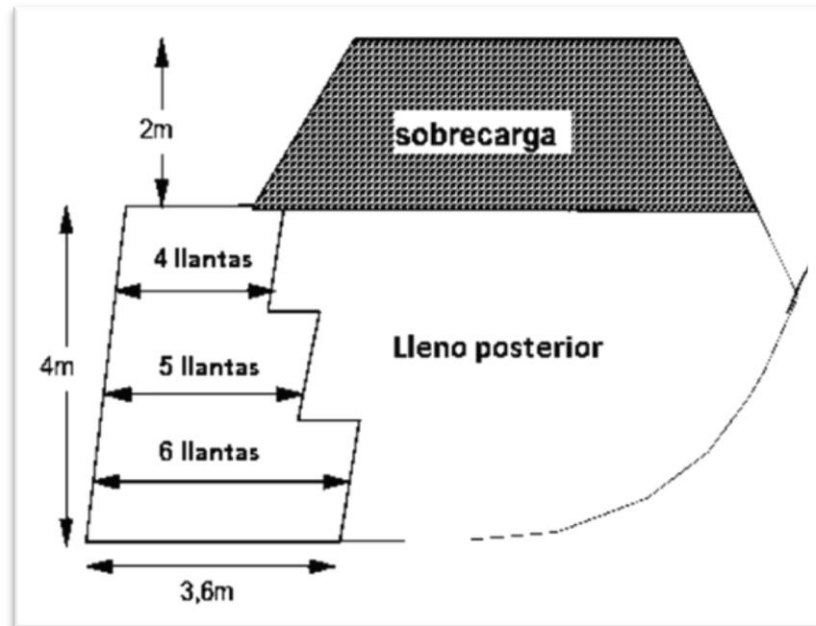
Otra investigación de evaluación de comportamientos a partir de escenarios reales se llevó a cabo en Rio de Janeiro, específicamente en la PUC (Pontificia Universidad Católica), donde se desarrolló una investigación con el propósito de estudiar la utilización de llantas usadas en el campo de la ingeniería civil, enfocada al uso en la construcción de muros de tierra armada.

El proyecto, orientado por el profesor Alberto Sayão (PUC-RJ), fue básicamente dirigido a la construcción de un muro experimental cuya materia prima fueran llantas, dispuestas en filas horizontales. La metodología constructiva estaba dada por amarrar con alambre o cuerda cada una de las llantas y hacer un relleno de éstas con suelo compactado; dicha estructura fue puesta en un área plana en Río de Janeiro, cercana a una zona que presentaba señales de inestabilidad. La geometría, para el caso de investigación, consistía en una longitud de 60,0 m y una altura de 4,0 m, lo cual requirió 15 mil llantas recicladas⁹.

Las características de las llantas utilizadas en promedio eran de 0,60 m de diámetro y de 0,20 m de ancho, las cuales son las dimensiones típicas de autos particulares. Las llantas eran puestas de manera horizontal, amarradas entre sí y posteriormente rellenas con material residual característico de la zona, el cual era compactado al interior de la llanta. Detrás del muro fue ejecutado un lleno con el mismo tipo de material utilizado para rellenar las llantas. Al finalizar la construcción del muro, fue adicionada una sobrecarga de 2,0 m de altura de suelo sobre el lleno construido en la parte posterior al muro.

⁹ QUEIROS, Augusto. Investigación recomienda neumáticos para construir muros de contención en Brasil. Agencia Brasil, Brasil (09/11/2015 14h23).

Figura 4. Configuración realizada para llevar a cabo el estudio. Alberto Sayão



Fuente: Ibid

Figura 5. Configuración realizada para llevar a cabo el estudio. Alberto Sayão



Fuente: Ibid.

Si bien las metodologías planteadas e investigaciones realizadas a lo largo de la historia han sido con un enfoque de aprovechamiento de recursos considerados a simple vista como desecho a causa de la actividad humana, sin embargo el papel de la fundamentación matemática en procesos constructivos de muros de contención con llantas usadas a lo largo de la línea del tiempo ha sido dejado al empirismo, los antecedentes de las investigaciones realizadas han estado encaminadas a buscar precisamente fundamentos con los que trabajan la ciencia.

De lo anterior, se busca que la aplicación de la normatividad ambiental vigente frente a la gestión de llantas usadas, y la importancia que tienen la identificación y evaluación de propiedades mecánicas e interacciones entre un suelo y una llanta con base a la teoría tradicional, conserven la validez correspondiente y pueda llegar a ser una herramienta de uso cotidiano y sustentado matemáticamente en los procesos constructivos en la rama de la geotecnia.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Modelar el comportamiento mecánico de estructuras de contención elaboradas con llantas usadas mediante la implementación de un software.

3.2 Objetivos específicos

Describir el comportamiento mecánico de estructuras de contención elaboradas con llantas usadas bajo parámetros de geometría y empujes de suelo.

Desarrollar, con base en la teoría, un software para estructuras de contención elaboradas empíricamente con llantas usadas.

Determinar el comportamiento mecánico de la estructura de contención por los métodos de Coulomb y Rankine.

4. ALCANCES Y LIMITACIONES

Esta sección del proyecto, detalla el alcance que éste tendrá en todos los aspectos concernientes a *Wallintire V1*, así como aquellos puntos que pueden llegar a ser referencia de partida para futuras líneas de investigación. A continuación, se presentan dichos alcances y limitaciones:

Alcances

El proyecto está enfocado exclusivamente a:

WALLINTIRE V1 permite hacer un trazado de perfil en dos dimensiones del suelo por medio de coordenadas planas de forma dinámica adicionando o eliminando puntos, de igual forma la edición de estilo y color según la necesidad del usuario.

WALLINTIRE V1 permite al usuario hacer un análisis de estabilidad local en la estructura de contención elaborada con llantas bajo definiciones de geometría y acción del suelo.

La base matemática para el cálculo del comportamiento mecánico en el estudio de estructuras de contención elaboradas con llantas está fundamentalmente en la teoría de estabilidad local por los métodos de Rankine y Coulomb.

El tipo de sección de estructura está dada por dos opciones, las cuales se denominaron, sección trapezoidal y sección rectangular (ángulos de 90°), cada una de estas está en función de la geometría de la llanta que defina el usuario.

La entrada de datos en cada uno de los formularios es dinámica lo que ahorra tiempos en digitación por parte del usuario.

Limitaciones

WALLINTIRE V1, dentro de su código en cuanto a la estabilidad regional, no está dentro de los alcances del programa, se deja abierto como punto de futura línea de investigación.

El análisis de la estructura es para suelos no cohesivos ($C=0$).

En relación con el control de aguas y la presión hidrostática, la inclusión de un adecuado sistema de drenaje excede el alcance del diseño de la estructura planteado, pero sí se considera importante dejar expresa su necesidad como referencia para una futura línea de investigación.

5. JUSTIFICACIÓN

Para poder identificar las falencias que ha dejado la construcción de estructuras de contención bajo el empirismo que han adoptado distintas comunidades, se acude a la ingeniería del software como la herramienta que está enfocada a la producción de aplicativos computacionales, que permitirá parametrizar las propiedades mecánicas de los NFU (Neumático Fuera de Uso), que puedan ser evaluados por parte de quien utilice la herramienta.

Las actividades constructivas que en la actualidad se encuentran dirigidas a la forma más óptima y recursiva de aprovechar materiales que cumplieron su ciclo de vida, y la de utilizar la ingeniería del software en la evaluación del comportamiento mecánico de NFU en estructuras de contención bajo un concepto de ingeniería geotécnica, es sin lugar a dudas una herramienta importante, ya que permite revisar de forma cuantitativa valores bajo modelos numéricos, con apoyo en la teoría tradicional, lo que permite revisar factores de seguridad y un acercamiento a lo que presentarían las estructuras de contención en un escenario real.

Para poner en contexto lo que se quiere lograr con la creación de WALLEINTIRE, ésta va dirigida a conocer cómo los neumáticos han sido utilizados en actividades de ingeniería y su trazabilidad histórica en estructuras de contención. Para ello, las actividades iniciales se remontan a la década de los 70 del siglo XX, con la reconstrucción de un terraplén reforzado en una carretera al norte de California; donde los primeros estudios para esta técnica se desarrollaron en un muro experimental de 5 metros de alto y 10 metros de largo, cuya funcionalidad fue dada a datos experimentales desarrollados en el terreno, que dieron como resultado un sistema práctico en obras de ingeniería y estabilidad de suelos.

Otro caso de adaptación de los NFU como estructuras de contención fue desarrollado en la ciudad de Guatemala, donde desde el año 2007 ha sido contemplado y de igual forma monitoreado por entidades no gubernamentales como un sistema constructivo que se encuentra bajo condiciones empíricas, pero que de igual forma ha sido desarrollado en diferentes zonas como una construcción aplicable para zonas que requieran del mismo.

Sin lugar a dudas, la búsqueda de alternativas ambientales y económicas ha alejado el concepto ingenieril y matemático que debe cumplir todo diseño en el mismo campo, si bien los trabajos ambientales y los enfoques que se han dado en aras de poder reducir cifras de desechos de NFU a nivel mundial, y según los datos del Banco Mundial, relacionan que cada 1.000 habitantes tienen un promedio de 283.24 automóviles, lo que considerando que la población mundial es de 68.946 mil millones, arroja que existen en el mundo 19.528 mil millones de automóviles, lo que se traduce en 97.641 mil millones de llantas de uso cada 3 años¹⁰. Esto representa, en efecto, un volumen considerable para el uso que se le pueda dar a este material.

En Colombia, el panorama no es distinto: se generan aproximadamente 3 millones de llantas de desecho al año, lo que se convierte en un problema ambiental y de disposición dentro del territorio nacional, debido al gran volumen y lo que tardan éstas en ser bio-degradadas. Se estima que su reducción y/o descomposición es de alrededor de 200 años; se intentan técnicas por ignición, sin embargo, no es lo más aconsejable por los altos contaminantes que son arrojados durante este proceso, como compuestos de azufre altamente tóxicos.

¹⁰ BARON ZAMBRANO, Juan. Viabilidad de muros de llantas para estabilización de taludes en el barrio la capilla Soacha Cundinamarca. Bogotá.2014. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Católica de Colombia Facultad de Ingeniería Civil.

Si bien los impactos ambientales que presenta los NFU son de consideración, el aprovechamiento de dicho material, orientado a procesos constructivos enfocados a propuestas como estructuras para contención bajo empujes de tierras, obedece a fenómenos de mitigación y soluciones que deben contemplar una verificación, como el cálculo de los diseños de tipo estructural y geotécnico. Una estructura debe cumplir, con respecto a las teorías tradicionales y normatividades vigentes, las condiciones fundamentales de estabilidad y rigidez que garanticen la vida útil de la construcción, como plantear modelos confiables que satisfagan las necesidades propias de cada proyecto.

Las alternativas contempladas para el diseño de estructuras de contención elaboradas con neumáticos no deben ser lejanas al análisis y cálculo que permita examinar el comportamiento mecánico, evaluado a través de una modelación con los atributos propios de materiales a emplear; dicho lo anterior, una estructura de contención por normatividad debe obedecer los criterios de estabilidad y por ende se debe buscar la confiabilidad necesaria para la construcción, por lo que se deben emplear modelos matemáticos que garanticen la verificación y la actividad real según la condición del terreno donde se pretenda hacer uso de este tipo de estructuras.

El concepto general de las estructuras de contención es resistir las fuerzas ejercidas por masas de tierras que actúan sobre ésta, y que en efecto transmitan dichas fuerzas de forma segura a la fundación según las especificaciones dadas por el diseño; en el caso de existir un deslizamiento, los modelos de programación deben cumplir con los parámetros de estabilidad y por ende garantizar su estabilidad a razón de modelos matemáticos.

La ingeniería, si bien depende de una forma de pensar, no puede estar soportada totalmente en los razonamientos lógicos y empíricos de la construcción de muros de contención desarrollados con llantas; esto debe estar necesariamente

acompañado de un modelo matemático y del fundamento tradicional teórico, como una modelación que busque satisfacer las necesidades e identificar comportamientos predecibles y puntuales de la construcción tanto antes como durante la ejecución de la misma.

Por otra parte, el enfoque y la búsqueda de herramientas apropiadas dará como resultado la comprensión del sistema desde el punto de vista analítico, lo que en efecto evalúa los comportamientos físicos y mecánicos que se presentan en el desarrollo de estructuras de este tipo, donde el uso de las llantas permitirá reducir impactos ambientales y de localización a grandes volúmenes de producción.

Los sistemas de modelación para muros de contención en llantas usadas, parametrizado en un software con características propias de los materiales, permiten optimizar tiempos de diseño así como facilitar el cálculo del mismo, y que de igual forma den resultados más precisos cuando estructuras de este tipo estén en funcionamiento.

Dicho lo anterior, se trae al caso un claro ejemplo del desarrollo de estructuras que cuentan con base de materia prima los NFU. Se trata de la empresa *Compañía de Suelos Constructores y Consultores S.A.S* que, en cabeza del Ingeniero José Ignacio Sierra Valencia, es pionera en Antioquia en la construcción de dichas estructuras y desde el año 2001, viene desarrollando obras con la implementación de este sistema. Una de las principales limitantes de esta empresa para el diseño y la construcción de los muros de tierra reforzada con llantas de desecho es que no tienen un soporte académico ni matemático que avale sus diseños, además de no hacer un análisis riguroso del comportamiento de la estructura como lo especifican las diferentes normas de diseño como son la NSR-10, el Código de Puentes y las normas internacionales AASHTO; es por eso que, en contexto, se deben desarrollar mecanismos o herramientas que puedan suplir y satisfacer necesidades.

WALLEINTIRE busca justamente encerrar parámetros que en los diseños correspondientes evalúen características propias, vistas desde los materiales, como la inestabilidad presentada en alguna zona que requiera trabajos de ingeniería.

6. MARCO REFERENCIAL

6.1 Marco conceptual

A partir de fenómenos naturales que afectan comunidades, la ingeniería es necesaria para disminuir riesgos y suplir ciertas necesidades. Con este propósito, el ser humano ha creado diferentes tipos de metodologías y programas de computación que han evolucionado con el tiempo y que de igual forma han alcanzado un alto grado de eficiencia en la búsqueda de soluciones para las prácticas ingenieriles.

El soporte lateral de los suelos y los movimientos laterales no deseados son un factor clave cuando de diseño de estructuras de contención se trata; la manera más adecuada de tener el acercamiento a una situación a un escenario real es precisamente por medio de cálculos donde se incorporan los modelos para simular el comportamiento del suelo y la interacción suelos estructura.

Por tal razón se convierte en un factor realmente importante, la forma de optimizar los tiempos de resolución de los modelos de interpretación de dichos fenómenos.

6.1.1 Llanta

Cerco de goma que cubre la rueda de los coches de caballos y carros para suavizar para suavizar el movimiento y que antiguamente también se utilizaba en automóviles¹¹.

¹¹ REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Definiciones. Disponible: <<http://dle.rae.es/?id=NU2U8ku|NU2xWhe>> [Consultado el 12 agosto 2016].

Una vez definido el concepto de llanta según la Real Academia Española, se describen las características principales de la llanta para poner en contexto al usuario.

6.1.2 Características y parámetros principales de la llanta

Las llantas están compuestas de una gran cantidad de materiales que les dan, dependiendo del uso al cual se destinan, sus características especiales como resistencia a la carga, posibilidad de manejar alta presión, características de adherencia, entre otros, a continuación, se presentan dichas características de uso y resistencia:

Tabla 2. Características de uso de las llantas

Descripción del servicio	<i>Corresponde a la identificación adicional a la designación del tamaño de la llanta, el cual consiste en un índice de carga (o dos índices de carga en el caso de montaje sencillo/dual) y un símbolo de velocidad.</i>
Índice de carga (LI)	<i>Este código corresponde a un número asociado con la carga máxima que una llanta puede llevar a la velocidad indicada, por su símbolo de velocidad bajo condiciones de servicio especificadas por el fabricante de la llanta.</i>

Fuente. GOODYEAR <http://www.goodyear.com.co>

A continuación, se relaciona una tabla con los índices de carga para llantas en estado de nuevas, esto permite identificar el peso según la lectura de índice.

Tabla 3. Índices de carga vs peso en kg

Indice de carga	Peso Kg	Indice de carga	Peso Kg	Indice de carga	Peso Kg	Indice de carga	Peso Kg
20	80	55	218	79	437	101	825
22	85	58	236	80	450	102	850
24	85	59	243	81	462	103	875
26	90	60	250	82	475	104	900
28	100	61	257	83	487	105	925
30	106	62	265	84	500	106	950
31	109	63	272	85	515	107	975
33	115	64	280	86	530	108	1000
35	121	65	290	87	545	109	1030
37	128	66	300	88	560	110	1060
40	136	67	307	89	580	111	1090
41	145	68	315	90	600	112	1120
42	150	69	325	91	615	113	1150
44	160	70	335	92	630	114	1180
46	170	71	345	93	650	115	1215
47	175	72	355	94	670	116	1250
48	180	73	365	95	690	117	1285
50	190	74	375	96	710	118	1320
51	195	75	387	97	730	119	1360
52	200	76	400	98	750	120	1400
53	206	77	412	99	775		
54	212	78	425	100	800		

Fuente: NEUMÁTICOS PNEUS. Neumáticos para auto. Disponible: <http://www.neumaticos-pneus-online.es/indices-de-carga-y-velocidad-consejos.html>. [Consultado el 14 oct 2016]

6.1.4 Tipos de llantas

En el mercado existen varios tipos de llantas: Las más avanzadas y las más populares son las llantas radiales. Las llantas convencionales y con cinturón aún están disponibles, pero ya no son tan comunes.

A continuación, se presentan los tipos de llantas anteriormente descritos:

Tabla 4. Tipos de llantas en el mercado

Convencional o diagonal	<i>La estructura de este tipo de llantas los cordones de las capas se extienden hasta las pestañas y están alternados con ángulos sustancialmente menores que 90° con relación a la línea central de la banda de rodamiento.</i>
Convencional con bandas estabilizadoras	<i>Estructura de tipo convencional en la cual la carcasa está restringida por un cinturón que comprende dos o más capas de cuerda esencialmente inextensibles.</i>
Convencional con bandas estabilizadoras	<i>Estructura en las que las cuerdas de las capas se extienden hasta las pestañas y están alternados sustancialmente a 90° con relación a la línea central de la banda de rodamiento, la carcasa ha sido estabilizada por un cinturón circunferencial esencialmente inextensible.</i>

Fuente. GOODYEAR. Disponible: <http://www.goodyear.com.co>

6.1.5 Componentes principales de la llanta

Una llanta se compone de varios elementos que hacen que cumpla correctamente con su función.

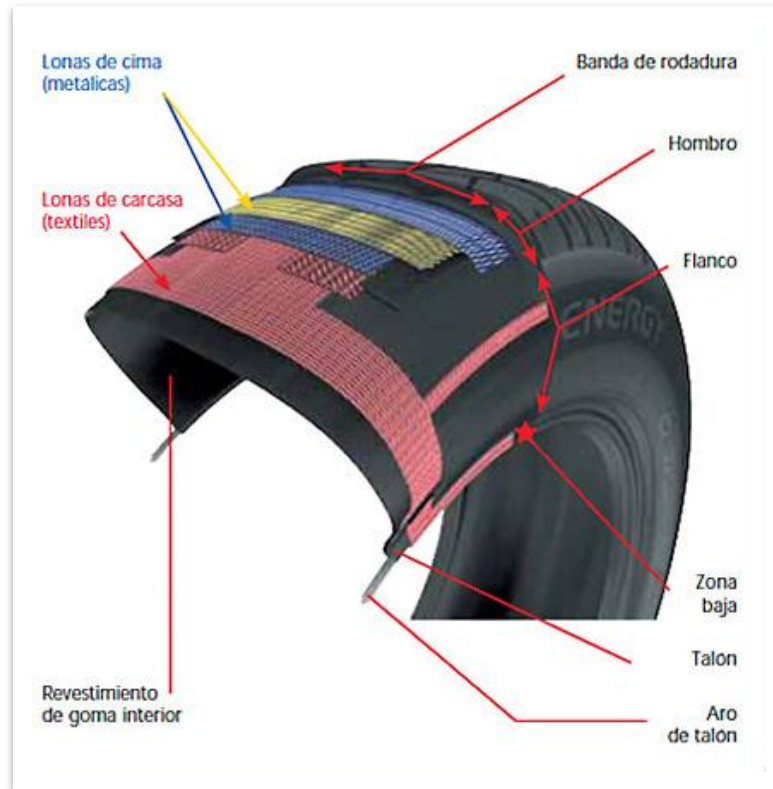
En la Tabla 5, se muestra la localización de cada una de las partes de la llanta.

Tabla 5. Principales componentes de la llanta

FLANCO	<i>Está constituido por goma flexible para adaptarse a las deformaciones del neumático en fase de rodadura. Protege al neumático de golpes laterales.</i>
HOMBRO	<i>La goma del hombro es la más gruesa, debido a que es la parte más expuesta a los bordillos y otros golpes, además permite distribuir fácilmente el calor producido por el neumático durante sus movimientos sobre la carretera.</i>
LONAS DE CARCASA	<i>Son cables de fibras textiles en arcos dispuestos en ángulos rectos y pegados al caucho de las cubiertas. Permiten al neumático resistir la presión. En una lona de neumático de un turismo hay aproximadamente unos 1400 cables.</i>
LONAS DE CIMA	<i>Son cables de acero muy finos y resistentes, cruzados oblicuamente y pegados unos a otros de manera que formen triángulos indeformables. Esta estructura garantiza al mismo tiempo robustez y flexibilidad.</i>
TALÓN	<i>Parte interior del neumático que se ajusta a las llantas, está compuesto por alambres de acero de alta tecnología formando un cable trenzado y circular, esto facilita el ajuste del neumático y las llantas evitando que patine en ella.</i>
REVESTIMIENTO DE GOMA INTERIOR	<i>Es la capa de goma más interna y sirve para retener el aire en el interior del neumático facilitando la estanqueidad.</i>

Fuente. MICHELIN. Disponible: www.michelinman.com

Figura 6. Componentes principales de las llantas.



Fuente. *Ibid.*

6.1.6 Dimensiones de las llantas.

La mayoría de neumáticos modernos de autos de pasajeros y camiones ligeros, poseen designaciones de tamaños que surgen de la combinación de sistemas métrico, matemático e inglés.

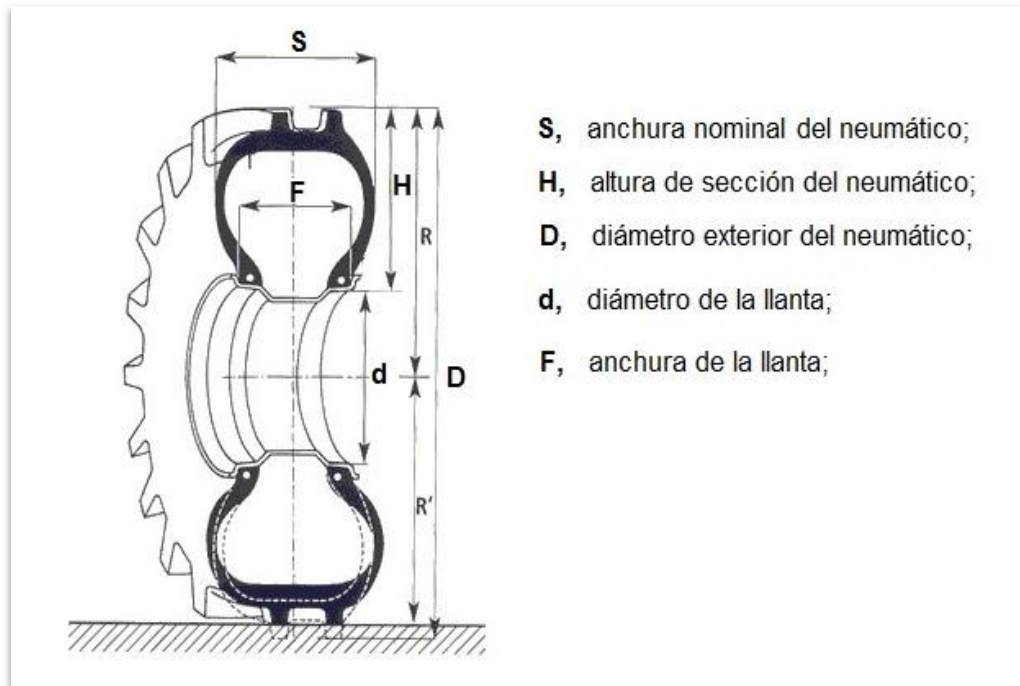
Mientras que esta combinación inusual de milímetros, porcentajes y pulgadas, es resultado de la evolución global de las especificaciones de los neumáticos, ésta, también, proporciona la habilidad de calcular/estimar dimensiones básicas. A continuación, se muestra la localización de cada una de las partes de la llanta para efectos del estudio del caso.

Tabla 6. Sección nominal de un neumático.

GEOMETRÍA	DESCRIPCIÓN
1. Altura de la sección del neumático (H)	Corresponde a la altura de inflado en sección transversal al diámetro exterior (D)
2. Diámetro exterior del neumático (D)	Es la distancia de piso a piso de la llanta, denominado con la letra "D"
3. Diámetro exterior del neumático (d)	Corresponde al diámetro de la zona donde encaja perfectamente el rin según lo estandarizado por la normativa o por el fabricante.
4. Anchura de la llanta F	Limitaciones en el montaje de neumáticos según la anchura de la llanta (F)

Fuente. LÓPEZ FERNÁNDEZ, Francisco Javier. Página web.. <http://www.ingenieriamecanica.com/>

Figura 7. Sección nominal de un neumático.



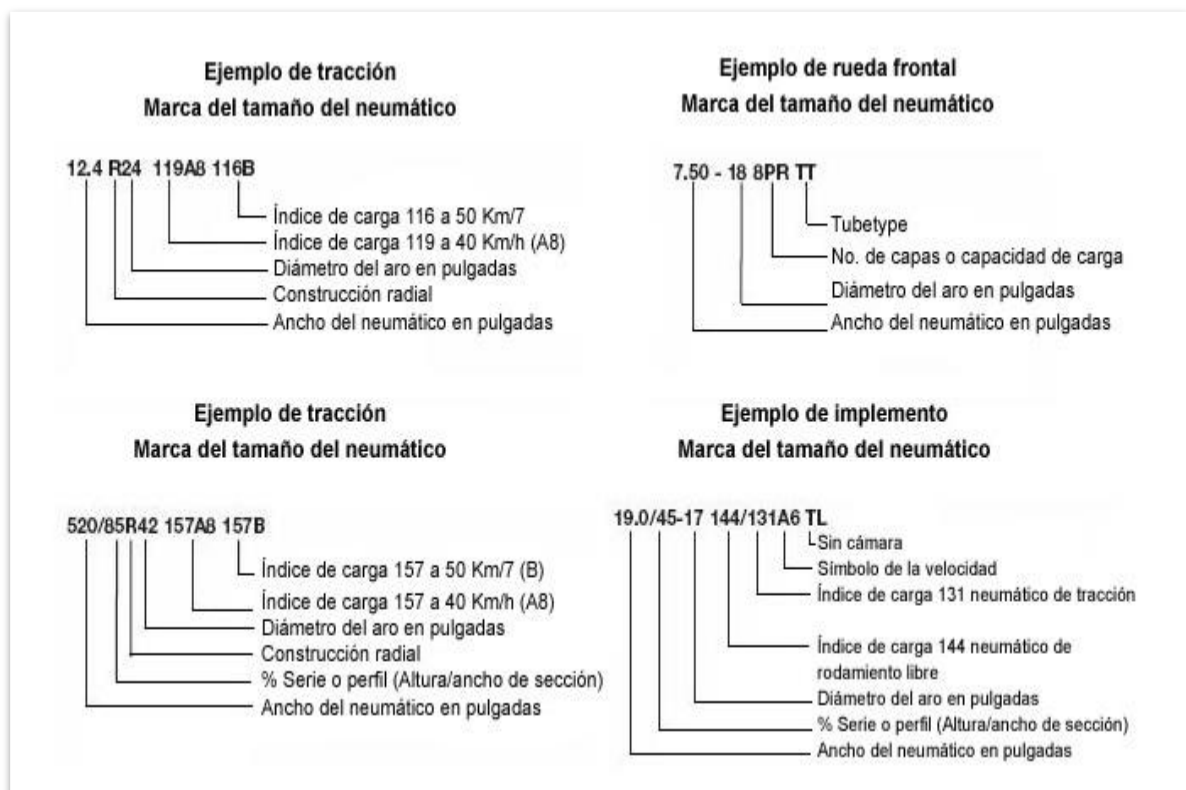
Fuente. Ibid

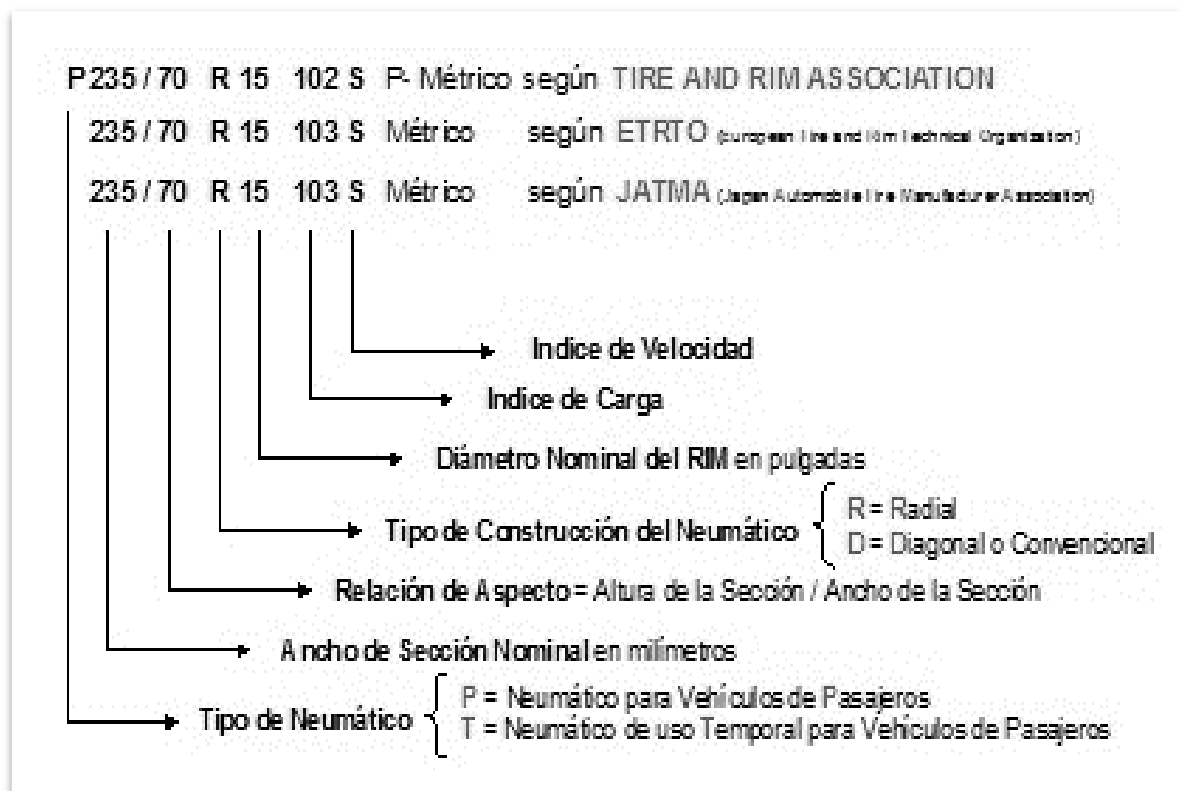
6.1.7 Símbolos de designación

Las posiciones de la información en el costado de la llanta son como se muestran a continuación:

1. Ancho de la llanta (mm. o pulgadas)
2. Serie o perfil SH/SW
3. Construcción Radial (R=Radial)
4. Diámetro del aro (pulgadas)
5. Índice de Carga (Max. carga por llanta a 40 (Km/H)
6. Índice de carga (Max. carga por llanta a 50 Km/H)
7. Símbolo de velocidad
8. Advertencia de seguridad

Figura 8. Ejemplo de información en llantas. GOODYEAR





Fuente: GOODYEAR. <http://www.goodyear.com.co>

Los símbolos de designación dependen a su vez del sistema que se use, donde pueden ser métrico, métrico europeo, alfa métrica, numérico, LT-Métrico y el de flotación, este incluye letras y números los cuales tienen los siguientes significados:

Tabla 7. Designación respecto al tipo de servicio de la llanta.

R	<i>Llanta Radial</i>
B	<i>Llanta de cinturón textil</i>
D	<i>Llanta convencional</i>
P	<i>Llanta para autos de pasajeros</i>
T	<i>Llanta para camiones (truck)</i>
LT	<i>Llanta para camiones ligeros (camionetas)</i>

Fuente. GOODYEAR. Lectura de llantas. Disponible: <http://www.goodyear.com.co>

6.1.8 Estructura de contención

La principal función de una estructura de contención es proporcionar el soporte lateral, temporal o permanente a taludes verticales o casi verticales en diferentes tipos de suelo, buscando controlar los parámetros que se encuentran en función de la cantidad de movimiento generado por masa de tierras activas o pasivas, como la resistencia al cortante del suelo, el peso específico del suelo.

A continuación, se presenta lo que hay que conocer de los muros de contención en tierra armada, para que el lector conozca en términos generales en qué consisten.

Una estructura de tierra armada se basa en un concepto sencillo., en donde se intercala suelo y refuerzos, generando un rozamiento en los puntos de contacto; esto crea una unión permanente y predecible, generando un material compuesto de construcción único. En estas estructuras de retención se combinan un relleno granular seleccionado con refuerzos de tracción sintéticos, que para el caso sería la llanta, pues este sistema permite modular, en cuanto a geometría homogénea y simétrica (secciones homogéneas).

La combinación de este sintético (llanta), crea una estructura duradera de contención por gravedad que, sumada a su peso propio, es capaz de soportar grandes sobrecargas dinámicas o estáticas.

A continuación, se presentan las principales ventajas de estructuras de tierra armada:

Tabla 8. Ventajas de un muro de contención en tierra armada

Resistencia	<i>La resistencia y la estabilidad de la estructura compuesta proporcionan una importante capacidad portante</i>
Fiabilidad	<i>La durabilidad de los materiales usados está bien documentada y las estructuras presentan una seguridad sin igual.</i>
Resiliencia	<i>La interacción entre el relleno tratado y los refuerzos permiten una absorción eficaz de las vibraciones, como las producidas por los trenes de alta velocidad y los de carga, los equipos industriales o las explosiones, además de un excepcional comportamiento durante los terremotos.</i>
Flexibilidad	<i>La modularidad del paramento y los dispositivos específicos de construcción permiten que las estructuras puedan aceptar importantes asientos totales y diferenciales sobre cimentaciones de mala calidad.</i>
Huella medio ambiental	<i>Utilizando menos cantidad de materiales, requiriendo una zona de paso limitada y generando menos CO2 que las soluciones convencionales, la técnica Tierra armada reduce el impacto de la construcción sobre el medio ambiente.</i>
Rentabilidad	<i>La sencillez y velocidad de montaje, así como el ahorro de materiales y el escaso mantenimiento constituyen importantes ventajas que reducen el coste total.</i>

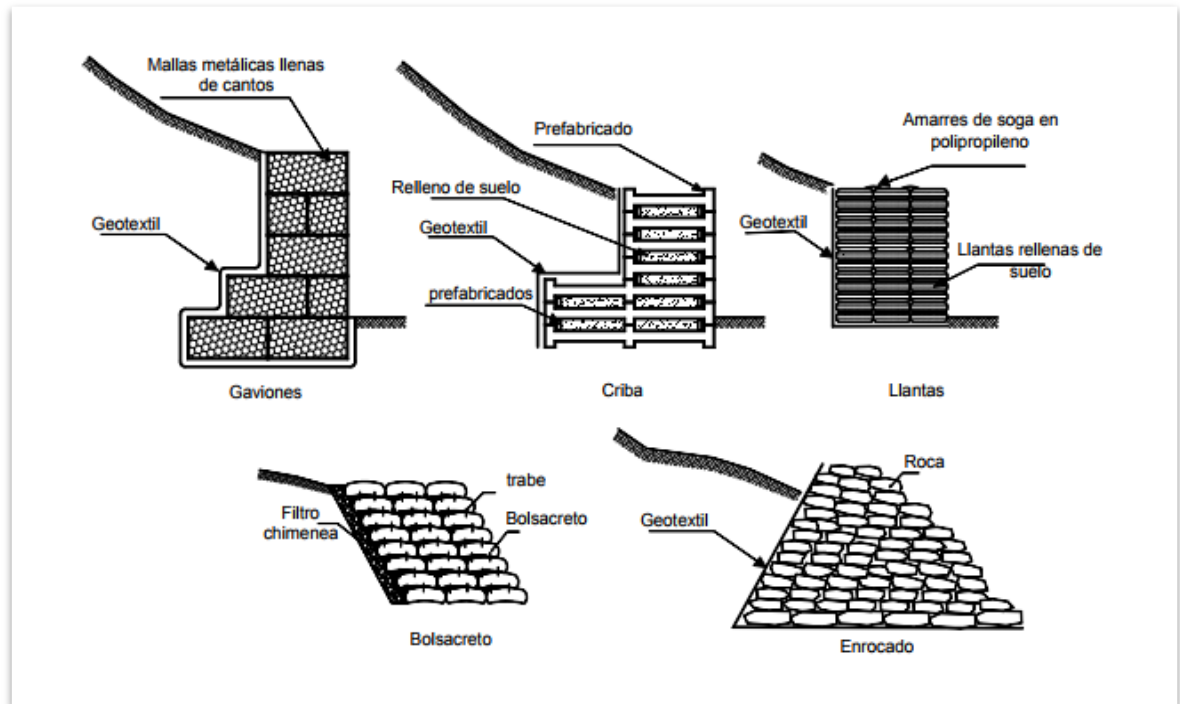
Fuente. TERRE ARMÉE. Disponible: www.terre-armee.com

6.1.8.1 Dimensionamiento de muros de contención

Para el dimensionamiento de los muros de contención, los ingenieros deben suponer algunas dimensiones, lo que se conoce como proporcionamiento o dimensionamiento; esto permite revisar las secciones de prueba por estabilidad. Si estas revisiones por estabilidad dan resultados incoherentes, la sección debe ser

cambiada y se vuelve a revisar la estabilidad de la estructura; a continuación, se muestran secciones típicas para muros de contención en tierra armada.

Figura 9. Algunas secciones típicas muros de gravedad



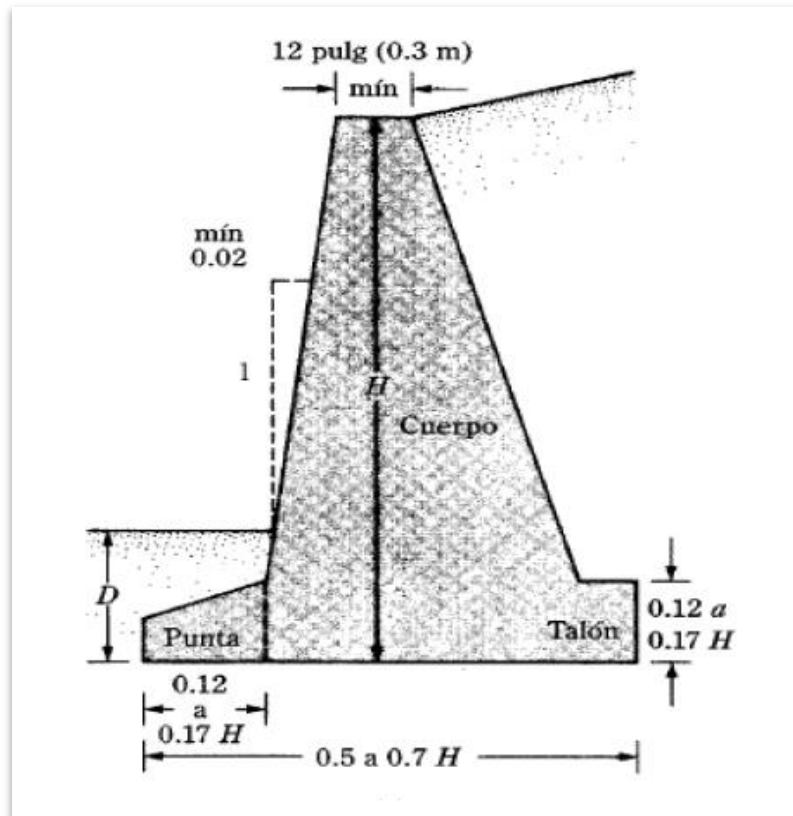
Fuente. SUÁREZ, Jaime. *Estructuras de Contención de Gravedad, capítulo 3.* En: *Deslizamientos: Técnicas de remediación.* Disponible: www.erosion.com.co

6.1.8.2 Cargas de diseño en un muro de contención

En el diseño de los muros de tierra armada, y en todos los muros en general, es necesario evaluar todas las condiciones de carga a las que va estar expuesta la estructura de contención; de igual forma, para el diseño de los muros de tierra reforzada con llanas de desecho, también se hace necesario hacer la evaluación de todas las cargas que pueden incidir en la estabilidad de la estructura. En los siguientes puntos se va a determinar cómo se va a evaluar la presión lateral de

tierra, la evaluación de la sobrecarga por llenos, sobrecarga por cargas vehiculares y finalmente la evaluación de las cargas sísmicas.

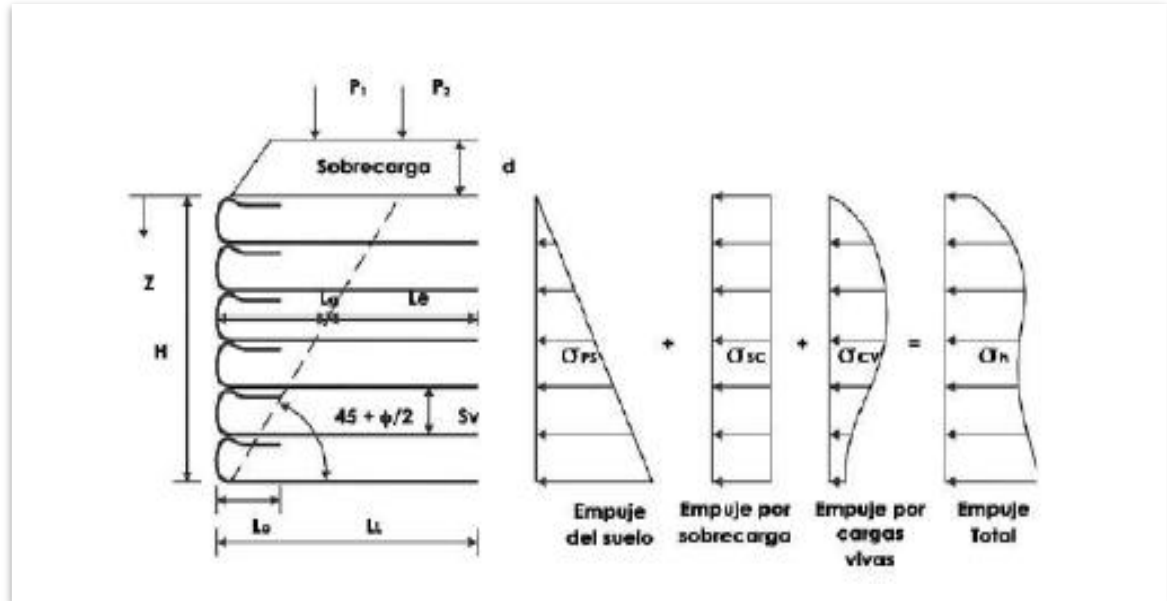
Figura 10. Esquema de dimensionamiento de muros de gravedad.



Fuente. BRAJA M. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. 5a edición. California State University, Sacramento, 2010, p.743

A continuación, se presentan las cargas de diseño a tener en cuenta en un muro de contención por tierra armada y sus respectivos esfuerzos por transmisión de carga:

Figura 11. Esquema de muro de tierra reforzada con la aplicación de la carga viva



Fuente: *Ibid.*

6.1.8.3 Presión lateral de tierra

El método de fluido equivalente para determinar la presión de tierra durante el diseño de los muros de contención fue descrito por Terzaghi y Peck, en 1967. Este método supone que el muro de contención tiene un relleno de un “fluido equivalente”.

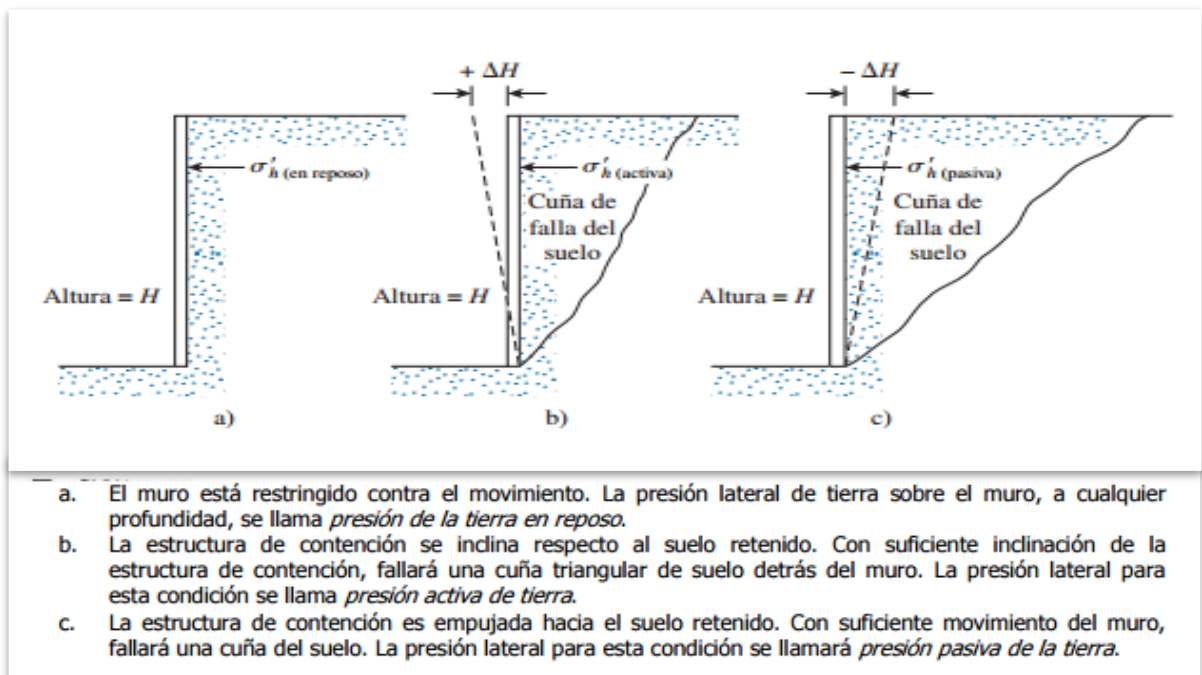
$$P_h = \frac{1}{2} \cdot K \cdot \gamma_{\text{Suelo}} \cdot H^2 \quad \text{Ecuación 1: Presión lateral de tierra}$$

El parámetro K corresponde al coeficiente de empuje de tierras que puede ser activo, pasivo o de reposo dependiendo las condiciones de rigidez del muro de contención.

La presión que las tierras ejercen sobre el muro que las contiene mantiene una estrecha interacción entre sí. En términos generales del desplazamiento del conjunto, en el estado natural, se dice que la presión es la de reposo; si el muro cede, la presión disminuye hasta un mínimo que se identifica como el estado

activo; si por el contrario, el muro se desplaza contra el frente de tierra, la presión sube hasta un máximo que se identifica como el estado pasivo. Si el desplazamiento del muro es vertical o implica un giro sobre la base, su distribución debe ser lineal o similar a la hidrostática; si el giro se efectúa alrededor del extremo superior del muro, la distribución debe adoptar una forma curvilínea. Los desplazamientos relativos se presentan en la Figura 12:

Figura 12. Presión lateral de tierras en una estructura de contención



Fuente: *Ibid*, pág 334.

- **Estado Activo.** El estado activo se identifica con un desplazamiento menor del muro en el sentido contrario al del banco de tierra que contiene. El valor del coeficiente activo de presión de tierras es entonces KA (Coeficiente de coulomb). En la tabla 9. se incluyen las formulaciones correspondientes y las que fueron utilizadas en el desarrollo de la macro para WALLINTIRE V1.

- **Estado Pasivo.** El estado activo se identifica con la resistencia del banco de tierra cuando es empujado por el muro; al contrario del caso activo, en este caso el desplazamiento es considerable mayor. El valor del coeficiente pasivo de presión de tierras es entonces K_P . En la Tabla 9 se incluyen las formulaciones correspondientes.

Tabla 9. Muros de contención.

Descripción	Estado activo	Estado pasivo
<i>Empuje total</i>	$P_A = K_A \frac{\gamma H^2}{2}$	$P_P = K_P \frac{\gamma H^2}{2}$
<i>Coulomb</i> Estático $\alpha = \pi/2$ $\delta' = \beta = 0$	$K_A = \frac{1 - \text{sen}\phi}{1 + \text{sen}\phi} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2}\right)$	$K_P = \frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right)$
<i>Rankine</i> Estático $\alpha = \pi/2$ $\delta' = \beta$	$K_A = \frac{\cos\beta [\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi'}]}{[\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi'}]}$	$K_P = \frac{\cos\beta [\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi'}]}{[\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi'}]}$

Fuente. AIS, NSR-10, Título H. 1998. p.165.

6.1.8.4 Sobrecarga por llenos

Para calcular la sobrecarga se debe tener en cuenta la carga generada por los elementos que se encuentren en la parte superior, como llenos o estructuras de pavimentos, en aplicaciones viales, la AASHTO recomienda como sobrecarga mínima la generada por un espesor de 0.60 m, repartida uniformemente sobre la superficie del muro.

$$q = \sum (\gamma \cdot d)$$

Ecuación 2: Sobre carga por llenos.

6.1.8.5 Sobrecarga por cargas vehiculares (Cargas vivas).

En varios casos, la teoría de la elasticidad se usa para determinar la presión lateral de la tierra sobre estructuras de retención, causada por varios tipos de sobrecarga, tales como una carga en línea (figura 11 a y una carga de franja (figura 11 b).

De acuerdo con la teoría de elasticidad el esfuerzo a cualquier profundidad, z, sobre una estructura de retención causada por una carga en línea de intensidad q/longitud unitaria (figura 11 a) se expresa por:

$$\sigma = \frac{2q}{\pi \cdot H} \cdot \frac{a^2 \cdot b}{(a^2 + b^2)^2}$$

Ecuación 3: Sobre carga por llenos.

donde:

σ : esfuerzo horizontal a la profundidad $z = b \cdot H$

Sin embargo, cómo el suelo no es un medio perfectamente elástico, deben esperarse algunas variaciones de la ecuación 3. Las formas modificadas de esta fórmula generalmente aceptadas para uso con suelos son las siguientes:

$$\sigma = \frac{4q}{\pi \cdot H} \cdot \frac{a^2 \cdot b}{(a^2 + b^2)^2}$$

Ecuación 4: Cargas vivas para $a > 0,4$

$$\sigma = \frac{q}{H} \cdot \frac{0,203 \cdot b}{(0,16 + b^2)^2}$$

Ecuación 5: Cargas vivas para $a \leq 0,4$

La figura 11 muestra una carga de franja con una intensidad de q/área unitaria localizada a una distancia b' desde un muro de altura H. Con base en la teoría de elasticidad, el esfuerzo horizontal, σ , a cualquier profundidad z sobre una estructura de retención.

$$\sigma = \frac{q}{\pi} \cdot (\beta - \text{sen}\beta \cdot \cos 2\alpha)$$

Ecuación 6: Cargas por franjas o distribuidas.

Los ángulos α y β se definen en la figura 11 b

Sin embargo, en el caso de suelos, el lado derecho de la ecuación 3.7 se duplica por tomar en cuenta el acomodo de la masa de suelo.

La fuerza total por unidad de longitud (P) debida únicamente a la carga de franja.

$$P = \frac{q}{90} \cdot (H(\theta_2 - \theta_1))$$

Ecuación 7: Fuerza total por unidad de longitud (P)

Donde:

$$\theta_1 = \text{TANG}^{-1} \left(\frac{b'}{H} \right) \text{GRADOS}$$

Ecuación 8: ángulo de entrada 1

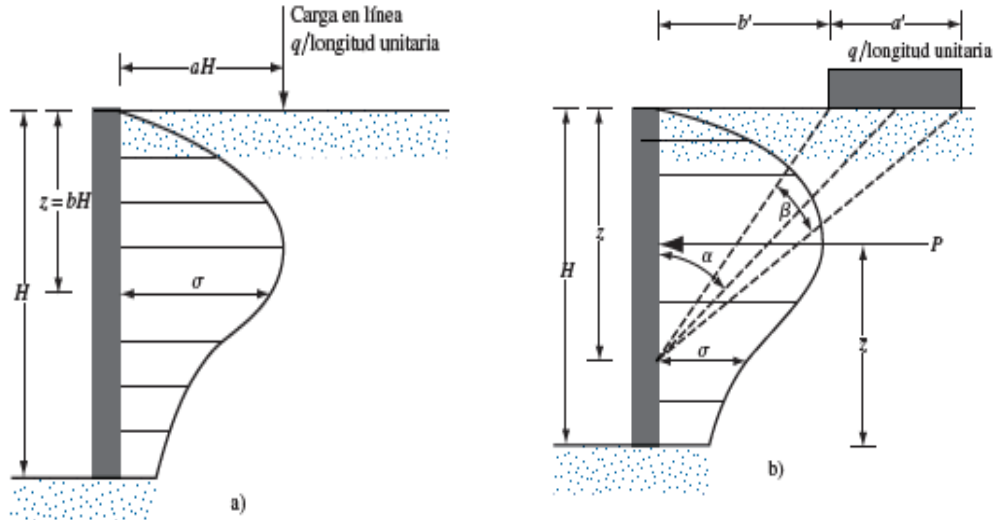
$$\theta_2 = \text{TANG}^{-1} \left(\frac{a' + b'}{H} \right) \text{GRADOS}$$

Ecuación 9: Angulo de entrada 2

El adecuado diseño de las estructuras de contención requiere la estimación necesaria de la presión lateral de tierra. En función de varios factores incluidos dentro del mismo diseño, se encuentran: el tipo y magnitud del movimiento de los muros, los parámetros de resistencia al cortante del suelo, el peso específico del mismo y las condiciones de drenaje en el relleno.

El comportamiento estático de una estructura lo definen las cargas que establezca el usuario en el escenario real. A continuación, se presentan en la figura 13 la presión lateral de tierras por cargas lineales y de franja.

Figura 13. Presión lateral de la tierra causada por (a) carga de línea



Fuente. BRAJA M. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. 5a edición. California State University, Sacramento, 2010, p.743

6.1.8.6 Cargas sísmicas

La teoría de la presión activa de Coulomb se extiende para tomar en cuenta las fuerzas generadas por un sismo. La figura 14 muestra una condición de presión activa con un relleno granular ($c = 0$).

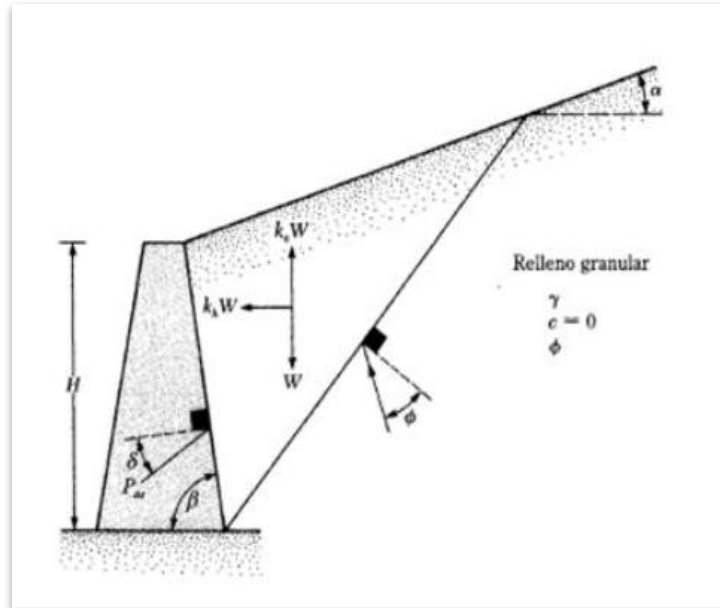
Las fuerzas que actúan sobre la cuña de falla del suelo en la figura 14, en esta figura se adicionan $K_h W$ y $K_v W$ en las direcciones horizontal y vertical, se pueden definir como.

$$K_h = \frac{\text{Componenete horizontal de la aceleración del sismo}}{\text{aceleración de la gravedad, } g}$$

$$K_v = \frac{\text{Componenete vertical de la aceleración del sismo}}{\text{aceleración de la gravedad, } g}$$

Ecuación 10 y 11: Coeficientes de aceleración sísmicas en estructuras.

Figura 14. Obtención de la ecuación



Fuente. Ibid..

$$Pae = \frac{1}{2} \cdot K \cdot (1 - Kv) \cdot Kae$$

Ecuación 12: Angulo de entrada 2

donde:

Kae : Coeficiente de presión activa de la tierra y se encuentra definido por la ecuación 13, a continuación:

$$Kae = \frac{SEN^2 \beta \cdot (\phi' + \beta + \theta')}{(COS \theta' * SEN^2 \beta * SEN (\beta - \theta' - \delta')) * \left(1 + \sqrt{\frac{SEN(\phi' + \delta') * SEN(\phi' - \theta' - \alpha)}{SEN(\beta - \delta' - \theta') * SEN(\alpha + \beta)}} \right)^2}$$

Ecuación 13: Coeficiente de presión activa.

Donde el valor de θ' , se encuentra definido por la siguiente ecuación:

$$\theta' = TANG^{-1} \left(\frac{Kh}{(1 - Kv)} \right) \text{GRADOS}$$

Ecuación 14: *valor de θ' .*

Para una condición sin sismo $K_h = 0$, $K_v = 0$, $\theta' = 0$. Por consiguiente $K_{ae} = K_a$.

La ecuación 12 se conoce como la solución Mononobe-Okabe. La resultante de la presión de la tierra en esta situación, tal como es calculada por la ecuación 3.12, no actúa a una distancia de $H/3$ desde el fondo del muro. El procedimiento siguiente se usa para obtener la localización de la fuerza resultante P_{ae} .

6.1.9 Factores de seguridad de estabilidad externa normativos

Haciendo una revisión de las normas, tanto las normas anteriores, como las normas actuales se construyó con cuadro comparativo de los factores de seguridad en condiciones estáticas. Las diferencias que existen no son muy significativas; para las condiciones estáticas se encontró que la norma es clara y específica para cada caso de evaluación en relación con los factores de seguridad que se deben cumplir.

Tabla 10. *Factores de seguridad tomados de las normas para condiciones estáticas*

FACTORES DE SEGURIDAD		NORMA			
		CCP-95	NSR-98	NSR-10	AASHTO
DESlizamiento	Suelos granulares	1,5	1,5	1,6	1,5
	Suelos cohesivos		2,0		
VOLCAMIENTO	Suelos granulares	2,0	3,0	3,0	2,0
	Suelos cohesivos		2,0		
CAPACIDAD DE CARGA	Suelos granulares	3,0	3,0	3,0	3,0
	Suelos cohesivos				

Fuente: Tomado NSR 10

Realizando el mismo ejercicio anterior, se encontró que la norma NSR-10 es la norma más clara y específica los factores de seguridad que se debe cumplir para cada caso de evaluación de estabilidad de la estructura de contención.

Tabla 11. Factores de seguridad tomados de las normas para condiciones pseudo-estáticas.

FACTORES DE SEGURIDAD	NORMA NSR-10
DESLIZAMIENTO	1,1
VOLCAMIENTO	2,0
CAPACIDAD DE CARGA	1,5

Fuente. AIS, NSR-10, Título H. 1998.

6.1.9.1 Análisis estabilidad externa de muros de contención

La revisión de estabilidad por falla, por volteo, deslizamiento y capacidad de carga se describe a continuación: es la metodología que se emplea para estimar la estabilidad de cualquier estructura de contención, y con esta metodología se hará la evaluación de estabilidad de los muros de tierra reforzada con llantas de desecho.

6.1.9.2 Revisión por volteo

El factor de seguridad contra volteo esperado a la punta, se expresa como.

$$FS(volteo) = \frac{\sum Mr}{\sum Mo}$$

Ecuación 15: factor de seguridad contra volteo.

Donde:

$\sum Mr$ Suma de los momentos de las fuerzas que tienden a voltear el muro
 $\sum Mo$ Suma de los momentos de las fuerzas que tienden a resistir el volteo

Suma de los momentos de las fuerzas que tienden a resistir el volteo viene definido por la siguiente ecuación

$$\sum Mo = Ph * \left(\frac{H'}{3}\right) \quad \text{Ecuación 16: Suma de los momentos de las fuerzas.}$$

6.1.9.2 Revisión a deslizamiento

El factor de seguridad contra deslizamiento se expresa por la ecuación:

$$FS(\text{deslizamiento}) = \frac{\sum Fg'}{\sum Fd} \quad \text{Ecuación 17: Factor de seguridad con deslizamiento.}$$

Donde:

$\sum Fg'$ = Suma de las fuerzas horizontales resistentes.

$\sum Fd$ = Suma de las fuerzas horizontales de empuje.

6.1.9.3 Revisión por capacidad de carga

La presión vertical, tal como es transmitida al suelo por la losa de base del muro de retención, debe revisarse contra la capacidad de carga última del suelo. La naturaleza de la variación de la presión vertical transmitida por la losa de base del suelo se muestra en la figura 15. Se identifica que q punta y q talón son las presiones máxima y mínima que ocurren en los extremos de las secciones de punta y del talón; la suma de las fuerzas verticales que actúan sobre la losa base es ΣV y la fuerza horizontal, Fh .

- El momento neto de esas fuerzas es:

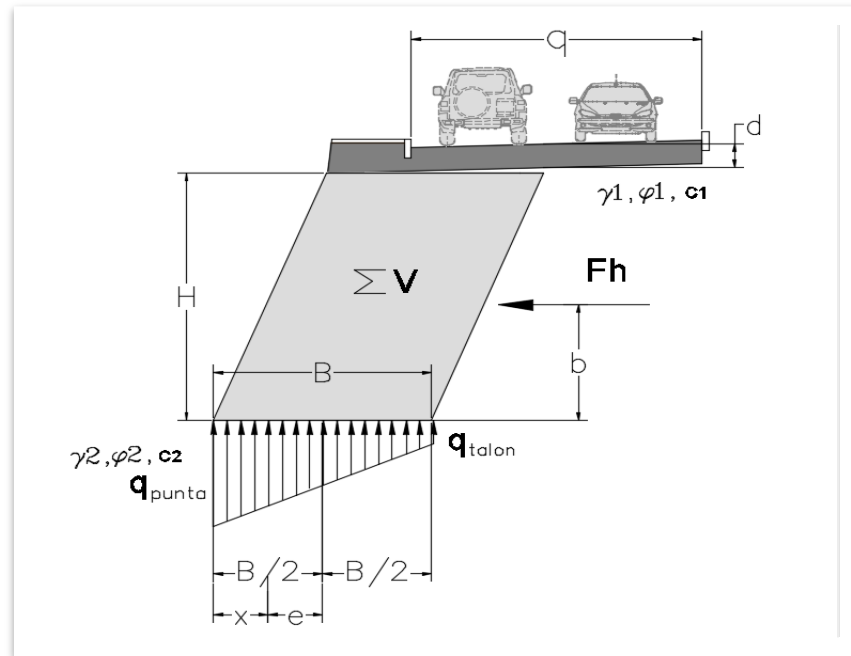
$$M_{neto} = \Sigma Mr - \Sigma Mo$$

Ecuación 18: *Momento neto.*

El factor de seguridad contra la falla por capacidad de carga se determina así:

$$FS(\text{capacidad de carga}) = \frac{q_u}{q_{max}} \quad \text{Ecuación 19: } \textit{Falla por capacidad de carga.}$$

Figura 15 .Revisión por deslizamiento a lo largo de la base.



Fuente. Ibid.

El factor de seguridad que se requiere es de 3. Para capacidad de carga última en cimentaciones superficiales, se da un asentamiento aproximado del 10% del ancho de cimentación. Para los muros de contención, el ancho B es grande, la carga ultima que ocurrirá para un asentamiento grande de la cimentación. Un factor de seguridad de 3 contra una falla de capacidad de carga no garantiza que el asentamiento esté dentro de los límites tolerables, lo que da lugar a una investigación mucho mayor.

6.1.10 Consideraciones generales de diseño.

El procedimiento general de diseño de cualquier muro de contención mecánicamente estabilizado se divide en dos partes:

- La satisfacción de los requerimientos de estabilidad interna.

- La revisión de la estabilidad externa del muro.

Las revisiones de la estabilidad interna implican determinar la resistencia a la tensión y la resistencia al cortante en los elementos de refuerzo, así como la integridad de los elementos frontales. Las revisiones por estabilidad externa incluyen la evaluación al volteo, al deslizamiento y de falla por capacidad de carga.

6.1.10.1 Control de aguas dentro de la estructura.

Al incluir un material con resistencia a la tensión dentro de una masa de suelo que debe soportar una serie de empujes, se logra aumentar la resistencia general del conjunto, básicamente por el esfuerzo friccionante desarrollado entre las llantas y las capas de suelo adyacentes.

Para garantizar que el muro trabaje de la manera adecuada y principalmente bajo condiciones sin presión hidrostática, se deberá incluir un adecuado sistema de drenaje, que si bien no se ha tenido en cuenta en el diseño de la estructura, se deja como referencia para una futura línea de investigación. Sin embargo, a continuación se plantean formas típicas de drenaje en estructuras de tierra armada,

6.1.10.2 Drenaje en la base del muro

Para controlar los ascensos de los niveles freáticos se debería construir un sistema de drenaje en la base de la estructura conformada, para lo cual sería de gran utilidad el uso de un colchón drenante (filtro francés), o bien la colocación de un sistema de drenaje según el criterio del diseñador hidráulico del proyecto. El colchón drenante se recomienda con un espesor mínimo de 0.3 m, en lo posible cubriendo toda la superficie de cimentación del muro. El colchón contribuye con la disipación de la presión de poros y al abatimiento del nivel freático.

7. METODOLOGÍA

En este capítulo se trata el diseño metodológico de la investigación que permitió abordar y dar respuesta al objetivo general y los objetivos específicos planteados. Para ello se expone el enfoque epistemológico, el tipo de investigación y sus fases. En estas últimas se describe todo el proceso seguido.

7.1 Enfoque de la investigación

Esta investigación se desarrolla a partir del enfoque cuantitativo. En ella, se recaban, organizan, analizan y evalúan datos numéricos, desde la teoría tradicional, para la verificación del proceso constructivo de los muros de contención con neumáticos fuera de uso (NFU), en aras de conocer su comportamiento mecánico y estudiar las propiedades mecánicas de este tipo de estructuras de contención en acción de cargas y empujes de suelo.

7.2 Tipo de investigación

El proceso de investigación de este proyecto se apoya en un diseño metodológico de tipo proyectivo, enfocado a las tácticas, en virtud de las teorías de diseño para el procesamiento de los datos recolectados. Con esto se persigue realizar el análisis correspondiente a los muros de contención elaborados con llantas usadas, creando modelaciones mediante el desarrollo de un software que permita evaluar estructuras de contención y los diferentes parámetros mecánicos y geométricos en escenarios reales, de acuerdo con la necesidad del usuario que interactúe con el aplicativo WALLINTIRE V1.

7.3 Fases de la investigación

La evaluación del comportamiento mecánico de los muros de contención contruidos con neumáticos usados se realizó en las siguientes fases:

7.3.1 Fase I Descripción del comportamiento mecánico.

Para describir el comportamiento mecánico de estructuras de contención construidas con llantas usadas bajo parámetros de geometría y empujes de suelo se tuvieron en cuenta los siguientes pasos para cumplir con esta fase de la investigación:

- Identificar la necesidad de contar con un modelo de diseño para estructuras de contención construidas con llantas como alternativa a la construcción empírica por parte de las diferentes comunidades.
- Recopilación, revisión y análisis de la información relacionada con el estado del arte de procesos constructivos para muros de contención con llantas usadas.
- Recopilación de información correspondiente a los tipos de llantas comerciales que se encuentran fuera de uso, y que pueden ser utilizadas en estructuras elaboradas con este material (NFU).
- Identificación de escenarios donde se utilizan este tipo de estructuras con llantas usadas, en pro de conocer las secciones típicas utilizadas por las comunidades.
- Conocer la normativa vigente para estructuras de contención elaboradas con llantas.
- Identificar las secciones típicas elaboradas con llantas fuera de uso y las limitantes de geometría que existen en las mismas según la teoría tradicional.

- Identificar modelos o software utilizados tradicionalmente para el desarrollo de estructuras de contención en tierra armada.
- Conocer las plataformas y lenguajes de programación actuales y de uso frecuente para desarrollo de software de ingeniería civil en la rama de la geotecnia.
- De las empresas líderes en producción y comercialización de llantas, conocer el producto desde el punto de vista geométrico, códigos de identificación y lectura, como características de fabricación.
- Análisis del problema desde el punto de vista de programación.
- Conocer de la teoría tradicional que se requiere para cumplir condiciones fundamentales de estabilidad, rigidez o flexibilidad.
- Procesamiento de la información recopilada de la llanta y condiciones fundamentales, enfocada al diseño de muros de contención con este material, desarrollado por medio de un lenguaje de programación.
- Diseño del algoritmo en borrador que describa el alcance que va a tener el programa en input-data y output-data.

7.3.2 Fase II. Codificación de formularios enfocados a estructuras de contención construidas con llantas usadas.

Para la fase de desarrollo, con base en la teoría tradicional, de un software para estructuras de contención construidas empíricamente con llantas usadas, se siguieron los pasos que se describen a continuación:

- Desarrollo de un producto con los requisitos de lenguaje en JAVA., definiendo las funciones que debe cumplir el software en cada formulario implementado para estructuras de contención construidas con llantas usadas.

- Aplicar atributos de la teoría tradicional a muros de contención construidos con llantas fuera de uso, encaminados a conocer el comportamiento mecánico (factores de seguridad óptimos) para este tipo de estructuras.
- Interactuar con las opciones que ofrece el lenguaje de JAVA y las diversas herramientas, creando la estructura de los formularios para la posterior codificación.
- Correr programas actuales para estructuras de contención y ver la interacción de un usuario en las diferentes plataformas, con el fin de concatenar información, para identificar una modelación cercana a los parámetros geométricos del material que son utilizados en una estructura de contención con llantas fuera de uso.
- Crear formularios con objetos que evidencien la información correspondiente a la estabilidad local, en una interfaz reconocida por el usuario con facilidad de navegación.
- Evaluar el comportamiento mecánico traducido en factores de seguridad, por medio de botones y formularios, de acuerdo con la información ingresada (input y output).
- Desarrollar formularios que evalúen el comportamiento mecánico de las estructuras de contención construidas con llantas fuera de uso, bajo la geometría definida por el usuario.
- Generar un informe de salida de datos por medio del aplicativo, que permita identificar las fuerzas que actúan así como el comportamiento de la estructura, en un escenario real de construcción, en un contexto de estabilidad regional y local.

7.3.3 Fase III Puesta en marcha del programa

- Con base en parámetros mecánicos y geométricos para un muro convencional de tierra armada, evaluar los resultados obtenidos con la

teoría tradicional, por medio de un aplicativo computacional en estructuras de contención construidas con llantas.

- Modificar parámetros mecánicos y geométricos del muro de contención en llantas y analizar las variaciones de factores de seguridad en relación con un muro convencional de tierra armada.
- Generar un informe de cálculo o informe de los datos ingresados por el usuario por medio en un formato Excel, mostrando valores de input-data y output-data.
- Generar un esquema general junto con las memorias de cálculo, que revise el análisis de comportamiento mecánico y muestre los factores de seguridad de la estructura de contención así como la respectiva geometría final, para el proceso constructivo en el escenario real.
- Ejecución del programa.

8. DESARROLLO Y RESULTADOS

En este capítulo se describen los resultados obtenidos a partir de la ejecución de los procedimientos descritos en el capítulo anterior.

8.1 Desarrollo del software

Para la captura de información que Wallintire V1 realiza, se procede a explicar el desarrollo en cada uno de los formularios así como las herramientas de Java utilizadas para dichos desarrollos. A continuación, se da inicio con el desarrollo del formulario de presión lateral de tierras y se muestra el respectivo código en lenguaje de Java.

Figura 16. Desarrollo de formulario de presión lateral de tierras.

The image shows a Java Swing window titled "Presion Lateral de Tierras". The window contains several UI components:

- FORM:** The main container for the input fields.
- LABEL:** Two labels pointing to the input fields for "Gamma Suelo" and "Phi".
- COMBO_BOX:** A dropdown menu for "Beta" with the value "35" selected.
- COMMAND BOTÓN:** A button labeled "Calcular".
- TEXT_BOX:** A text area displaying the results of the calculation.

Parameter	Value
Gamma Suelo	18
Phi	55
Beta	35
H	6.0

Result	Value
Ph:	32.209917711011435
PP:	3259.1204032822598
KA RANKINE:	0.13671846726210268
KP RANKINE:	4.
KA COULOMB:	0.
KP COULOMB:	10.059013590377345

Fuente: Elaboración propia, con valores ejemplo introducidos para presentación del formulario en Java

La formulación de ecuaciones tenida en cuenta para la codificación de este formulario fueron las siguientes: El PP (estado pasivo) y el PA (estado activo) como KA (coeficiente Coulomb), parámetros que se expresan por las ecuaciones a continuación, para los métodos de Rankine y Coulomb, están en función de las siguientes ecuaciones:

$$PA = KA \cdot \frac{\gamma_{Suelo} \cdot H^2}{2}$$

Ecuación 1: Empuje total estado activo.

$$PP = KP \cdot \frac{\gamma_{Suelo} \cdot H^2}{2}$$

Ecuación 2: Empuje total estado pasivo.

$$KA = \frac{1 - \text{SEN } \phi}{1 + \text{SEN } \phi}$$

Ecuación 3: Coulomb estático-estado activo para $\alpha=\pi/2$ y $\delta'=\beta=0$

$$KP = \frac{1 + \text{SEN } \phi}{1 - \text{SEN } \phi}$$

Ecuación 4: Coulomb estático-estado activo para $\alpha=\pi/2$ y $\delta'=\beta=0$

$$KA = \frac{\text{COS } \beta \cdot (\text{COS } \beta - \sqrt{\text{COS}^2 \beta - \text{COS}^2 \phi'})}{(\text{COS } \beta + \sqrt{\text{COS}^2 \beta - \text{COS}^2 \phi'})}$$

Ecuación 5: Rankine estático-estado activo para $\alpha=\pi/2$ y $\delta'=0$

$$KP = \frac{\text{COS } \beta \cdot (\text{COS } \beta + \sqrt{\text{COS}^2 \beta - \text{COS}^2 \phi'})}{(\text{COS } \beta - \sqrt{\text{COS}^2 \beta - \text{COS}^2 \phi'})}$$

Ecuación 6: Rankine estático-estado pasivo para $\alpha=\pi/2$ y $\delta'=0$

8.1.1 Desarrollo de formulario evaluación de la sobrecarga por llenos

Para calcular la sobrecarga se debe tener en cuenta la carga generada por los elementos que se encuentren en la parte superior, como llenos o estructuras de pavimentos; en aplicaciones viales, la AASHTO recomienda como sobrecarga

mínima la generada por un espesor de 0.60 m, repartida uniformemente sobre la superficie del muro.

En este formulario se capturan los datos de espesor (d) por gamma de suelo según el usuario, esto en el fin de conocer la carga total generada por los elementos que se encuentran en la parte superior

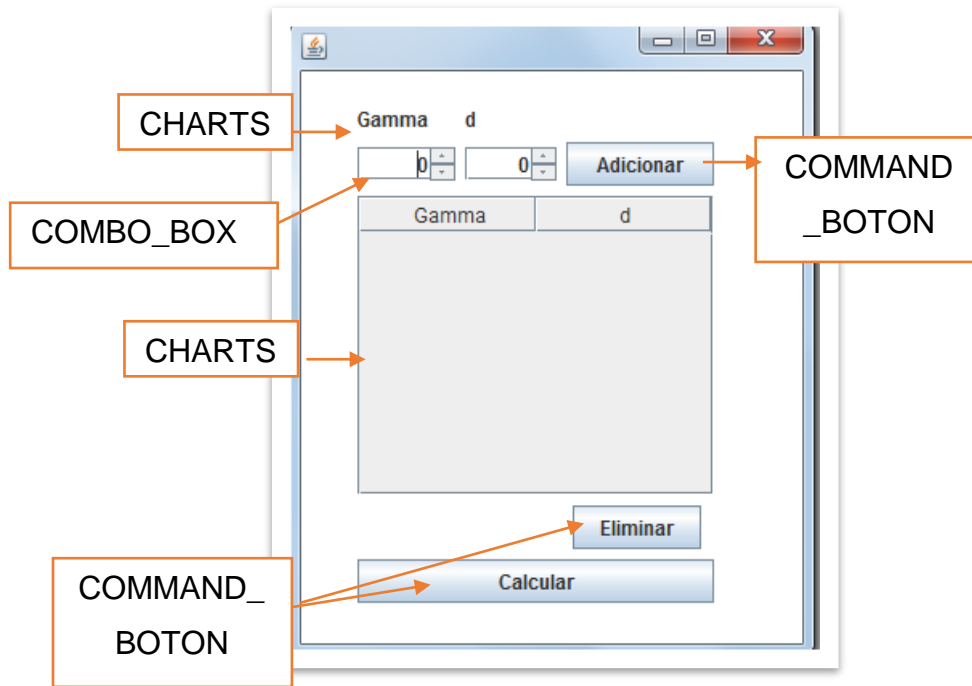
Tabla 12. Base para cálculo de presión lateral de tierras

γ (KN/M3)	d(espesor de sobre carga m)
18,5	0,6
12	0,5
$\Sigma =$	17,1

Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior se desprenden los datos correspondientes para el cálculo de la carga en la parte superior de la estructura, estos datos se encuentran desarrollados en el siguiente formulario:

Figura 17. Desarrollo de formulario sobre carga por llenos.

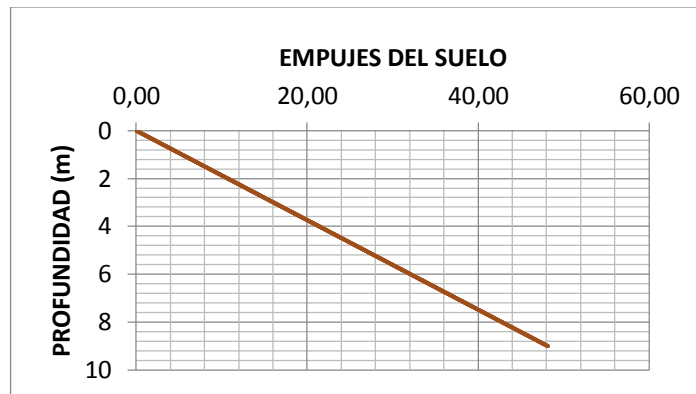


Fuente: Elaboración propia

8.1.2 Desarrollo del formulario empuje del suelo

El desarrollo de los empujes del suelo en Wallintire, se encuentra parametrizado en la siguiente gráfica, la cual relaciona empujes del suelo respecto a una profundidad:

Tabla 13. Ejemplo de relación profundidad vs empuje para WALLINTIRE V1

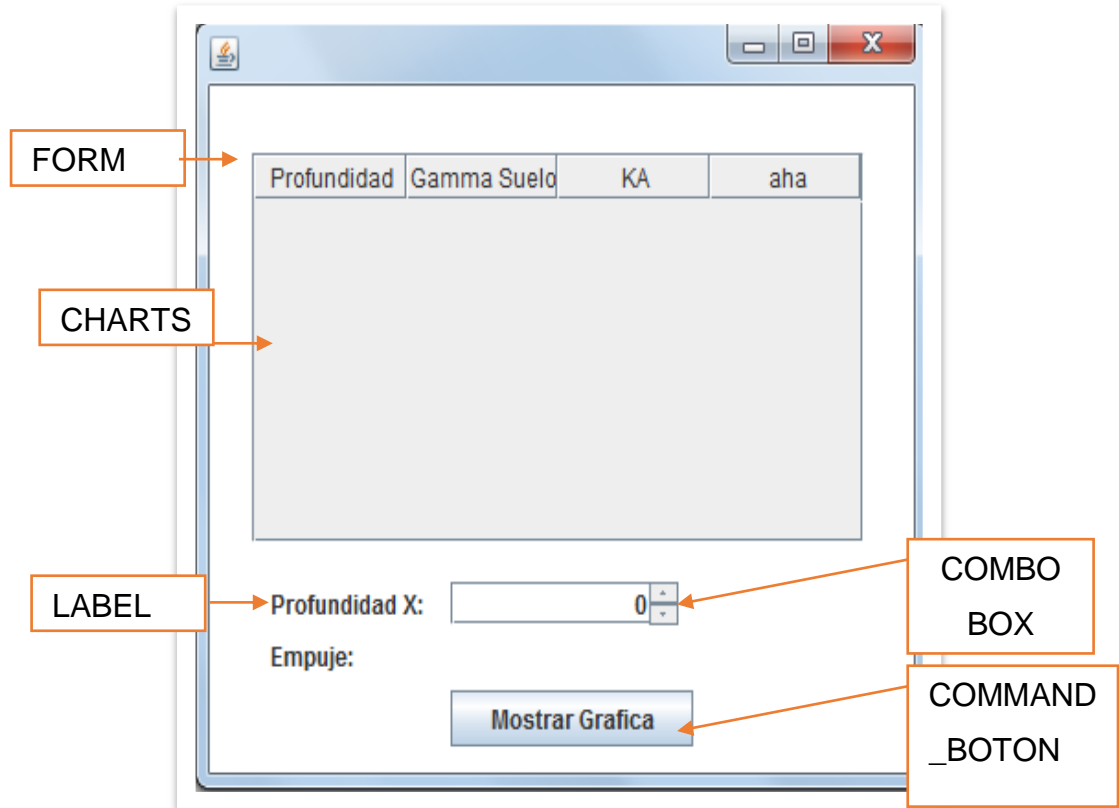


Fuente: Elaboración propia

Los valores de empuje están en función de la profundidad, la cual viene dada por la altura de la estructura definida por parte del usuario.

De igual manera, los datos están incluidos en el presente formulario, parametrizado con la teoría de empujes sobre la estructura. A continuación, se muestra dicha información y el desarrollo que se logró para obtener dicho empuje:

Figura 18. Desarrollo de formulario para empujes por efecto del suelo



Fuente: Elaboración propia

El valor de KA, corresponde al valor de coeficiente activo de Coulomb tomado de la siguiente ecuación:

$$KA = \frac{1 - \text{SEN } \phi}{1 + \text{SEN } \phi}$$

Ecuación: Coulomb estático-estado activo para $\alpha=\pi/2$ y $\delta'=\beta=0$

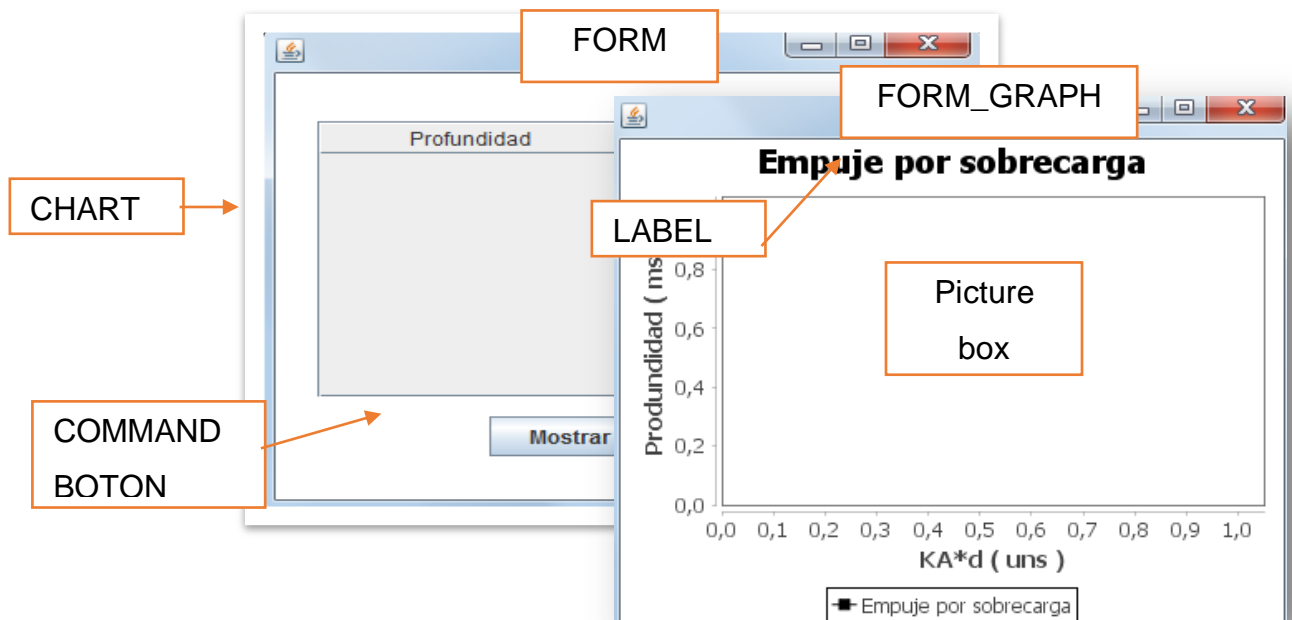
8.1.3 Desarrollo de formulario de empuje por sobrecargas.

El empuje por sobrecargas está fundamentado en el KA de Coulomb definido por el usuario, y se convierte en el producto de $KA*d$; cabe resaltar que el "d", es el acumulado de espesores que se adicionaron por el usuario en el formulario de sobrecarga por llenos.

Para una profundidad de 0 a 9 metros (altura variable en función del alto total definido por el usuario) el producto $KA*d$, representa un valor de 0,1735.

Los datos son consignados y graficados en los formularios correspondientes, como se muestra a continuación:

Figura 19. Desarrollo de formularios para empuje por sobrecargas



Fuente: Elaboración propia

8.2 Descripción del comportamiento mecánico de las estructuras construidas con llantas usadas


Para describir el comportamiento mecánico de estructuras de contención construidas con llantas usadas bajo parámetros de geometría y empujes de suelo, a lo largo de la investigación y el desarrollo del presente trabajo, se ha encaminado la información a crear un aplicativo computacional que permita conocer el comportamiento mecánico de estructuras construidas con llantas usadas, es decir, los respectivos factores de seguridad por deslizamiento, volcamiento y capacidad de carga.

Para entrar a describir el proceso, es importante conocer inicialmente la geometría de la llanta. A continuación, se presentan las características principales de las llantas y cómo esto interviene en la configuración de una estructura elaborada con este tipo de materiales.

8.2.1 Especificaciones de la Llanta

La especificación de la llanta describe sus características fundamentales, tales como tamaño, construcción, índice de velocidad, etc. En la siguiente tabla se muestran las especificaciones que se pueden encontrar en neumáticos fuera de uso (NFU), que de igual forma son factores importantes en la construcción de estructuras con este material.

Tabla 14. Lectura de características en el costado de una llanta

DETALLE DE INFORMACIÓN CONSIGNADA EN UN NEUMÁTICO	DESCRIPCIÓN	
	SÍMBOLO O NÚMERO	SIGNIFICADO
	P - Tipo de Llanta:	Esto indica el tipo de vehículo al cuál le sirve la llanta. P es para pasajeros en el sistema métrico. Otras letras son LT (para Light Truck), T (para uso temporal) y ST (para remolques especiales). Si su llanta no tiene letra, significa que utiliza el tamaño métrico europeo
	225- Ancho de la Llanta:	También se le conoce como el ancho de la sección, este es el ancho de la llanta en milímetros, si se mide desde el punto más grueso del costado exterior hasta el punto de rodadura
	55 - Perfil:	Esto identifica el perfil de la llanta, el cual es la relación que existe entre la altura del costado y el ancho de la llanta. En este ejemplo, la altura del perfil es el 55% de su ancho. Entre más bajo sea la relación, más pequeño será el perfil, lo cual significa mejor agarre en curvas, pero una conducción más dura.
	R - Construcción	Esta es la construcción interna de la llanta, la cual es "radial". Practicamente todas las llantas que hay en la calle tienen construcción radial, lo cual significa que las cuerdas o hilos que se encuentran debajo del labrado corren por el ancho de la llanta sin entrecruzarse, desde un borde hasta el otro, semejando lo que serían radios de un círculo.
	18 - Diámetro del Rin:	Este número (en pulgadas) indica que la llanta está diseñada para montarse sobre un rin de 18 pulgadas de diámetro.

Fuente. Sitio web. www.neumarket.com.

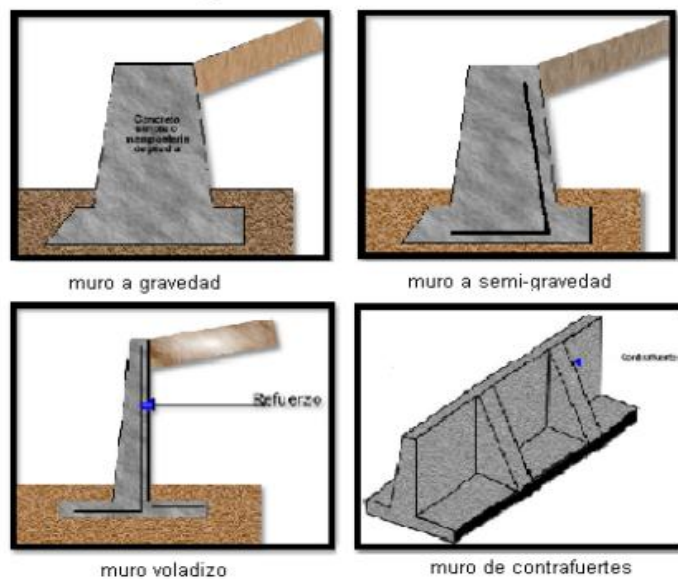
Otro de los puntos que se revisa para el desarrollo del software es en que consiste una estructura de contención, esto con el fin de poder describir la geometría de este tipo de estructuras construidas con llantas usadas, a continuación se presenta el concepto de estructura de contención y otros apartados:

8.2.2. Estructura de contención:

El muro de contención es una estructura sólida construida con distintos materiales, estas están sujetas a flexión al soportar empujes horizontales de diversos materiales, sólidos, granulados y líquidos.

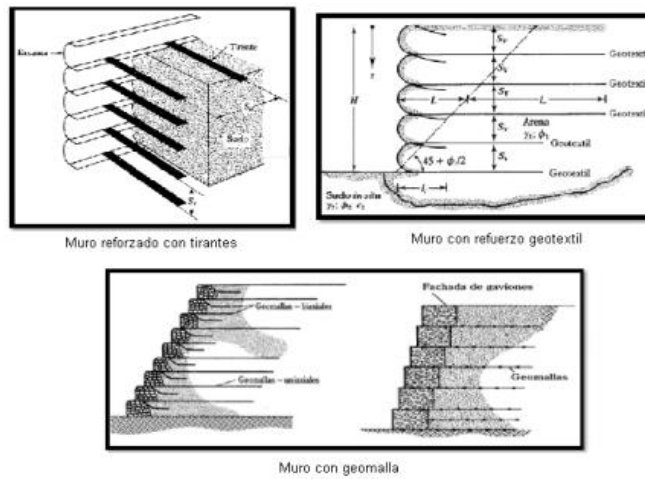
Dicho lo anterior es importante conocer la clasificación de los muros de contención; en primer lugar, los muros o estructuras de contención se dividen en dos categorías principales que son los convencionales y muros de tierra estabilizados mecánicamente. En la figura 20 se muestran tipos de estructuras clasificadas como convencionales o estabilizadas y sus subgrupos:

Figura 20. Muros convencionales



Fuente: GARCÍA F, Nancy. *Elaboración de texto guía y ayudas didácticas para la asignatura Fundaciones 1*. Citado por: CAMARGO G, Carolina y GONZÁLEZ E, Alba. *Manual de modelamiento de estructuras de contención lateral mediante programa de elementos finitos*. Bucaramanga, Universidad de Santander: 2011. Pág. 19.

Figura 21. Muros mecánicamente estabilizados



Fuente: *Ibid*, pág 20.

Las estructuras de contención convencionales y mecánicamente estabilizadas son parte de una serie de alternativas con las que se puede contar en diferentes escenarios para estabilizar taludes; sin embargo, no todas son aplicables en dichos escenarios, razón por la cual es importante tener criterios de selección de la estructura de contención. Dentro de estos criterios destacan el espacio disponible para la instalación de la estructura, la altura de la misma, las condiciones del terreno y aguas freáticas, la vida útil y su respectivo mantenimiento.

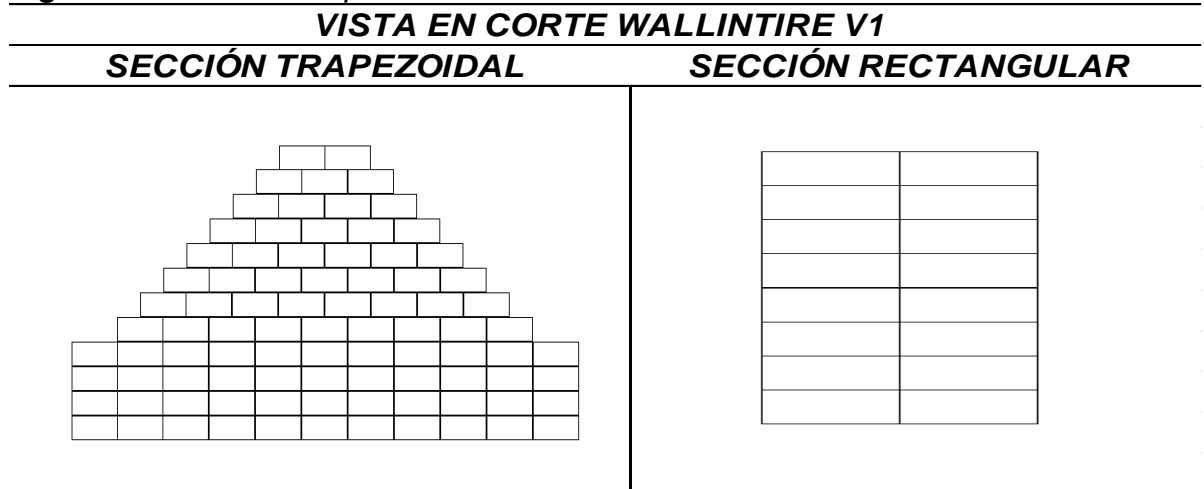
Cada parte de la estructura debe estar conectadas en pro de garantizar las condiciones fundamentales de estabilidad, rigidez o flexibilidad, al igual que durabilidad; para esto, durante los procesos constructivos, se requiere plantear alternativas de análisis y cálculos de interacción suelo estructura; de ahí la importancia de tener en cuenta, dentro de los procesos constructivos, secciones y materiales a ser utilizados.

El uso de las teorías clásicas presenta, sin lugar a dudas, alternativas de uso y configuraciones distintas, al igual que diversidad de cálculos y criterios propios de cada una de estas configuraciones. En aras de mantener las condiciones de estabilidad anteriormente mencionadas, se desarrolla un software que garantiza dichas condiciones para estructuras de contención construidas con neumáticos fuera de uso. Si bien este tipo de estructuras son consideradas, para el caso de estudio, como un muro de contención de tierra armada, se presentan dos configuraciones (trapezoidal y rectangular), cuyo comportamiento se evalúa por medio del software, bajo los criterios descritos anteriormente.

En la figura 22 se muestran las configuraciones que se definieron para concatenar las teorías aplicadas a este tipo de configuraciones.

Para el caso de Wallintire se muestran las estructuras de forma gráfica de la siguiente manera:

Figura 22. Secciones típicas en WALLINTIRE V1



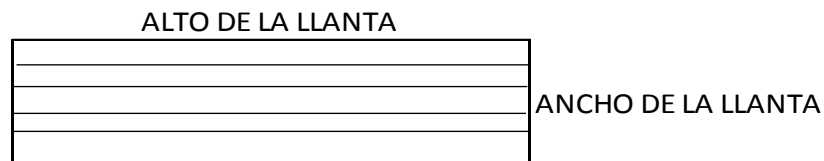
Fuente: Elaboración propia

A continuación se explica el principio geométrico que se tuvo para cada una de las secciones mostradas en la figura 18. Cabe señalar que el desarrollo de este

apartado es de forma descriptiva; sin embargo, se ejemplifica con un caso para una estructura construida con este material.

Para la sección trapezoidal y para la sección rectangular se parte de una geometría inicial de una sola llanta, de la cual, para el estudio geométrico, solo se tiene en cuenta el alto y el ancho, como se muestra en la figura 23.

Figura 23. *Parámetros geométricos de una llanta aplicados en el software WALLINTIRE V1*



Fuente: *Elaboración propia*

Gráficamente, se hizo el desarrollo del formulario y que de tal forma tuviese un detalle cercano a una llanta a nivel de dibujo, así como botones dinámicos de edición, bien sea de forma directa o por botón de desplazamiento numérico, como se muestra a continuación:

El formulario de edición de sección de la llanta se encuentra ubicado en el siguiente menú o ruta.

- *Geometría/Definir geometrías y configuración/tipo de llanta/definir geometría de llanta*

Figura 24. Geometría y dinámica de Wallintire en una llanta.



Fuente: Elaboración propia

Una vez mostrado lo anterior y la forma de editar la llanta, se procede a definir los demás parámetros de sección de la estructura que puede seleccionar el usuario (sección trapezoidal o sección rectangular).

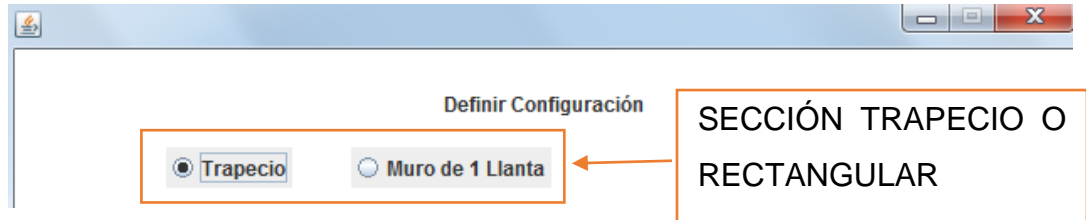
En la siguiente imagen se muestran los formularios para edición de una sección rectangular o trapezoidal según la necesidad del usuario.

La ruta para la selección de la opción de sección es la siguiente:

- *Geometría/Definir geometrías y configuración/Archivo/definir configuración.*

Al seguir la ruta mencionada se despliega el formulario que contiene las opciones de sección rectangular y trapezoidal.

Figura 25. Opciones de configuración Wallintire v1



Fuente: Elaboración propia

Para la sección trapezoidal, el formulario cuenta con los siguientes datos de entrada y de salida, como se muestra en la figura 25, según la necesidad del usuario. Cabe resaltar, que las definiciones que se hagan están en función de la llanta; como se mencionó en el apartado anterior; el programa hace el ajuste correspondiente por exceso de las medidas en función de la geometría de la llanta unitaria. Los parámetros y criterios para la sección trapezoidal se muestran a continuación.

- Ancho de corona.
- Alto de la sección trapezoidal
- Longitud de la punta y longitud del talón
- Altura de la base.

Figura 26.Formulario sección trapezoidal input-data y out-data.

Definir Configuración

Trapezio Muro de 1 Llanta

Ancho de la Corona:

Alto de Seccio Trapezoidal:

Longitud de Punta:

Ancho de Talon:

Altura de la base:

Ancho ajustado de Corona: 2.0 Numero de llantas de la Corona: 2
 Alto ajustado del Muro: 4.0 Numero de llantas de Altura: 8
 Ancho ajustado de Punta: 1.0 Numero de llantas de la punta: 1
 Ancho ajustado de Talon: 1.0 Numero de llantas del talon: 1
 Altura ajustada de base: 2.0 Numero de llantas de la Base: 4

Aceptar

INPUT-DATA PARA SECCIÓN TRAPEZOIDAL.

OUT-DATA PARA SECCIÓN TRAPEZOIDAL CANTIDADES Y GEOMETRÍA AJUSTADA.

Fuente: Elaboración propia

Para el caso en que el usuario defina la sección rectangular, que en el formulario se denomina muro en una llanta, las entradas y salidas de datos están definidas de la siguiente manera:

Figura 27.Formulario sección rectangular input-data y out-data.

Definir Configuración

Trapezio Muro de 1 Llanta

Ancho de la Corona:

Alto de Seccio Trapezoidal:

Ancho ajustado de Corona: 2.0 Numero de llantas de la Corona: 2
 Alto ajustado del Muro: 4.0 Numero de llantas de Altura: 8

Aceptar

INPUT-DATA PARA SECCIÓN RECTANGULAR.

OUTPUT-DATA PARA SECCIÓN RECTANGULAR Y GEOMETRÍA AJUSTADA.

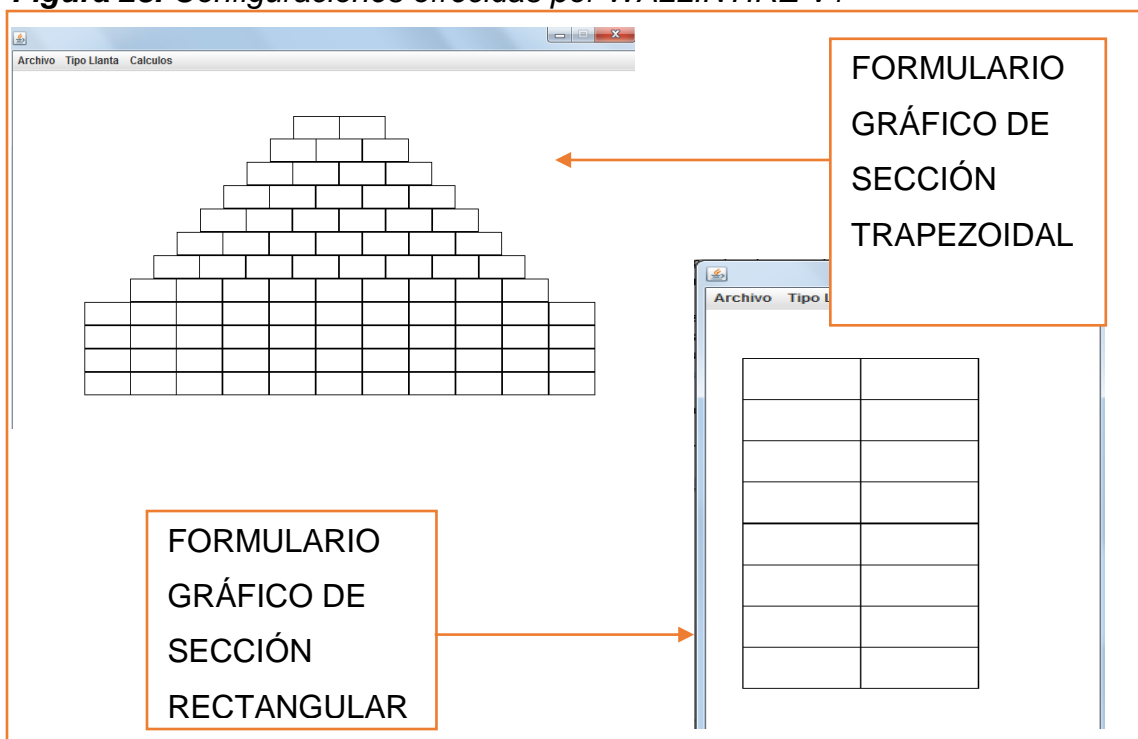
Fuente: Elaboración propia

Nótese que para la sección rectangular o muro en una llanta las entradas solo dependen de un ancho de corona y de una altura; estos datos de entrada son ajustados o son editados de acuerdo con la necesidad del usuario.

Las entradas de ancho de corona y alto de la sección rectangular, así como las salidas, son el ancho de corona ajustado; éstas dependen de la llanta definida. El alto ajustado del muro ajustado depende del ancho de la llanta, de igual forma definida por el usuario. Wallintire V1, calcula el número de llantas en altura y número de llantas en la corona.

Al dar aceptar en cada una de las opciones, se genera inmediatamente la geometría en función de la llanta unitaria. A continuación, se presenta cada una de las configuraciones aceptadas por el usuario.

Figura 28. Configuraciones ofrecidas por WALLINTIRE V1



Fuente: Elaboración propia

WALLINTIRE V, por otra parte, ofrece el almacenaje de información del proyecto; a tal efecto, se creó un formulario destinado a registrar dicha información que se describe a continuación, así como lo que éste contiene para el almacenaje de información del proyecto.

La ruta para almacenar la información del proyecto viene dada por lo siguiente, desde el formulario principal o entorno de trabajo.

- Proyecto/información del proyecto.

Figura 29. Formulario información del proyecto

The image shows a software window with a title bar containing a small icon and standard window controls (minimize, maximize, close). The main area of the window is light gray and contains two labels on the left: 'Nombre del Proyecto' and 'Descripcion'. To the right of 'Nombre del Proyecto' is a single-line text input field. To the right of 'Descripcion' is a larger, multi-line text input area. At the bottom right of the window is a button labeled 'Guardar'. An orange callout box is positioned to the right of the window, containing the text 'Nombre del proyecto y descripción del proyecto.' Two orange arrows originate from this box: one points to the 'Nombre del Proyecto' text box, and the other points to the 'Descripcion' text area.

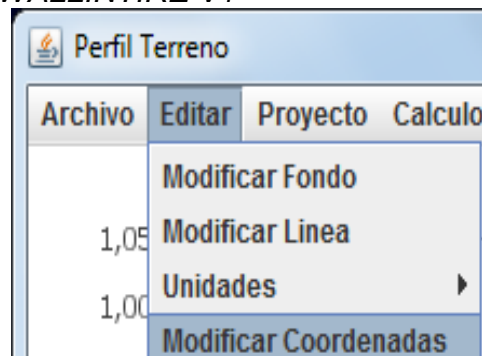
Fuente: Elaboración propa

El formulario de información del proyecto que ofrece Wallintire V1, es de gran utilidad pues no solo se puede contar con un solo proyecto o una sola estructura; es decir, el usuario puede, paralelamente, guardar una opción de forma trapezoidal o rectangular e irlos trabajando simultáneamente en diferentes archivos; la información almacenada sirve para identificar rápidamente el proyecto trabajado en su pc (propio computador) de trabajo.

Si bien hay alternativas que ofrecen diferentes programas de modelación respecto a la interfaz y paletas de colores, Wallintire V1, ofrece, dentro de su menú, editar opciones gráficas de colores; esto permite en el usuario la comodidad de acuerdo con las necesidades la edición. A continuación, se muestran las alternativas correspondientes. La ruta para edición de propiedades del entorno de trabajo se describe así:

- **Editar:** en ésta se encuentran alternativas de edición, como se puede apreciar en la siguiente figura.

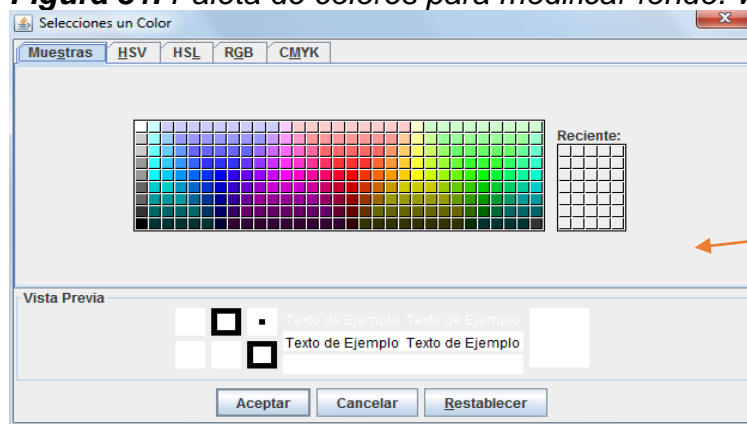
Figura 30. Menú editar WALLINTIRE V1



Fuente: Elaboración propia

Al activar la opción de modificar fondo se muestra el siguiente formulario.

Figura 31. Paleta de colores para modificar fondo. WALLINTIRE V1



FORMULARIO DE EDICIÓN DE COLORES DE FONDO EN WORKSPACE

Fuente: Elaboración propia

La opción de “modificar línea” del menú “editar” permite cambiar el color de la línea del perfil dibujado por el usuario.

A continuación, se muestra un ejemplo de perfil de terreno definido, al que se le puede editar el color de la línea.

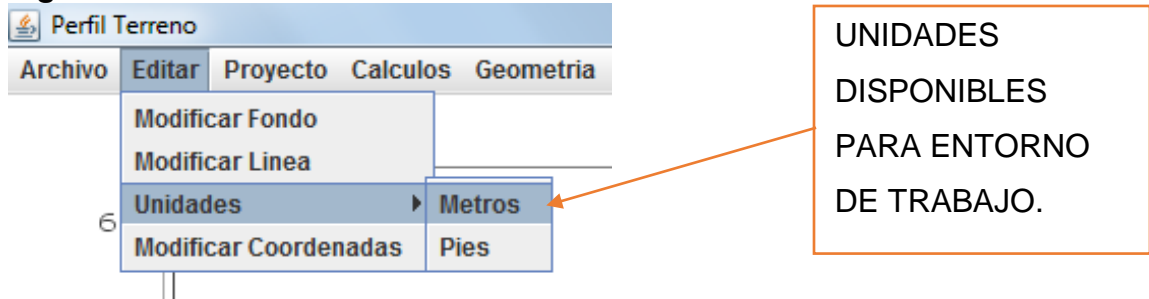
Figura 32. Entorno de trabajo en WALLINTIRE V1 y la edición de colores de los trazos.



Fuente: Elaboración propia

El usuario cuenta con la alternativa, en el menú “editar”, de cambiar las unidades de los ejes.

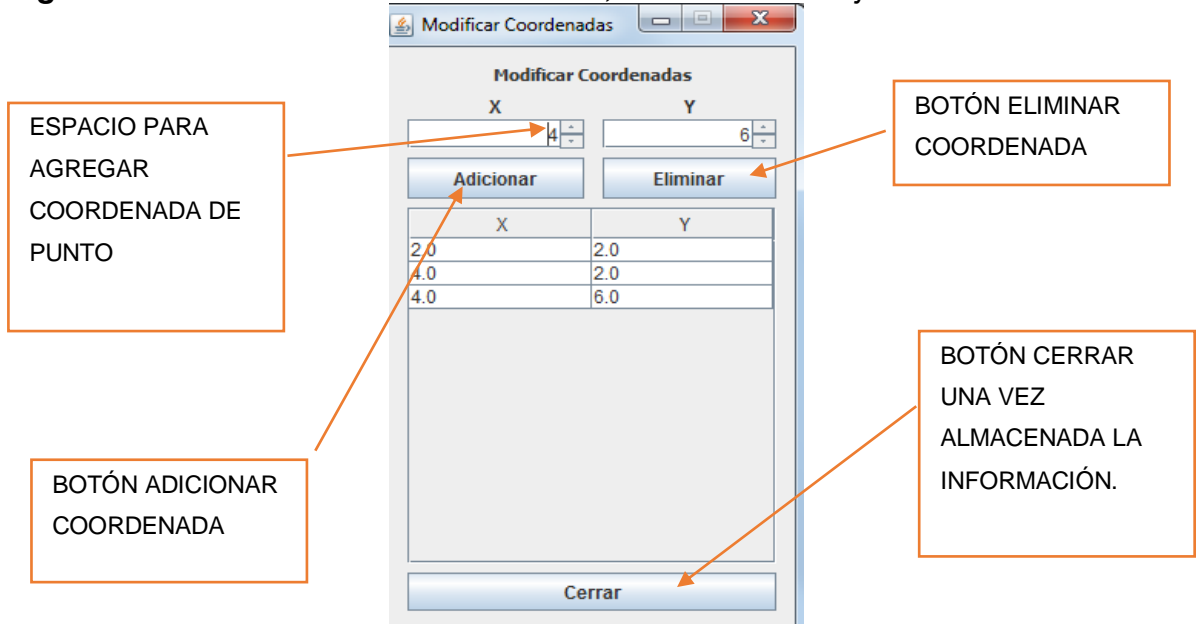
Figura 33. Menú editar unidades.



Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, Wallintire V1 ofrece la opción para dibujar un perfil por medio de coordenadas; dicha edición se muestra en el siguiente formulario, adicionando o eliminado puntos, los cuales serán dibujados según la necesidad del usuario, en el entorno de trabajo o workspace.

Figura 34. Formulario editar coordenadas, entorno de trabajo.



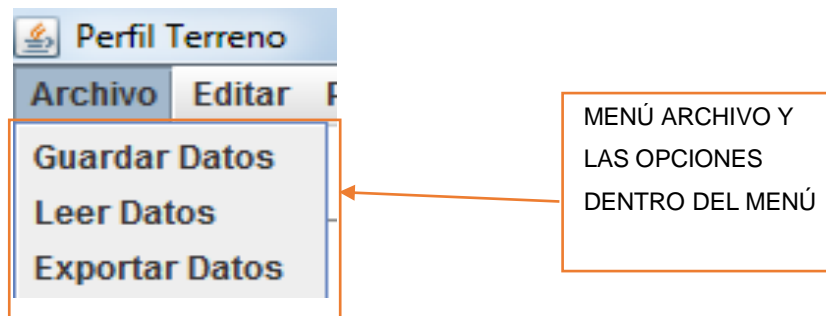
Fuente: Elaboración propia

En el menú archivo de WALLINTIRE V1, se encuentran las siguientes opciones para el usuario.

La ruta para edición de propiedades del entorno de trabajo se describe así:

- **Archivo;** en ésta se encuentran alternativas de archivo como:

Figura 35. Menú archivo y sus opciones. WALLINTIRE V1



Fuente: Elaboración propia

Guardar datos: permite hacer un SAVE de los datos almacenados en el programa y en los distintos formularios

Leer los datos: WALLINTIRE V1 hace una lectura de los datos; esto con el fin de poder encontrar errores a lo largo de los datos ingresados o inconsistencia en su edición.

Exportar datos: Una vez concluido el ingreso de datos en los formularios de cálculo, el usuario puede exportar los datos; dicha exportación se registra en formato de Excel, para facilidad de edición o atributos de presentación que pueden ser editados desde dicho entorno.

A continuación, se presentan cada uno de los mensajes de satisfacción para cada uno de los casos mencionados anteriormente:

Figura 36. Menú archivo WALLINTIRE V1



Fuente: Elaboración propia

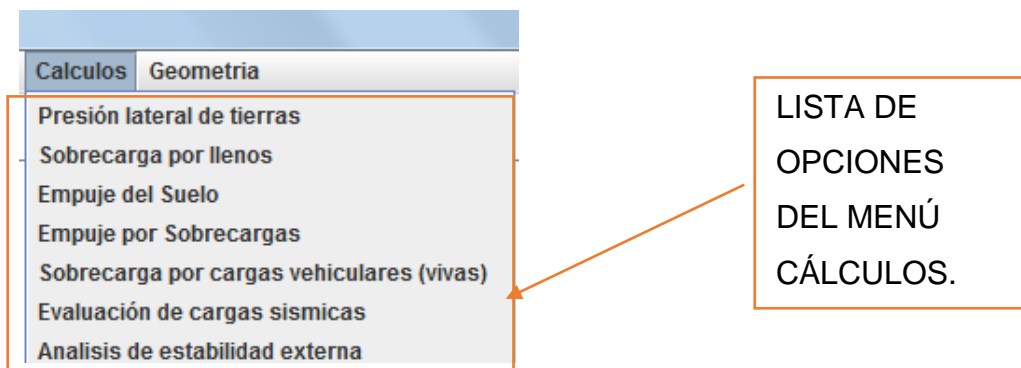
Para describir el comportamiento mecánico de estructuras de contención construidas con llantas usadas bajo parámetros de geometría y empujes de suelo, WALLINTIRE V1 ofrece opciones, desde la configuración unitaria a una configuración global (simétrica), para llegar a un análisis de dicho comportamiento mecánico traducido en factores de seguridad.

En aras de definir los alcances de WALLINTIRE V1 para las opciones de configuración mencionadas con anterioridad, se desarrolla el menú de cálculos dentro del formulario; de igual forma, se describen las variables de entrada y salida para cada uno de los formularios de cálculo:

La ruta para la selección de la opción de cálculos y sus diferentes opciones de cálculo:

- *Cálculos/lista de opciones.*

Figura 37. Barra de menú, opción presión lateral de tierras. WALLINTIREV1



Fuente: *Elaboración propia*

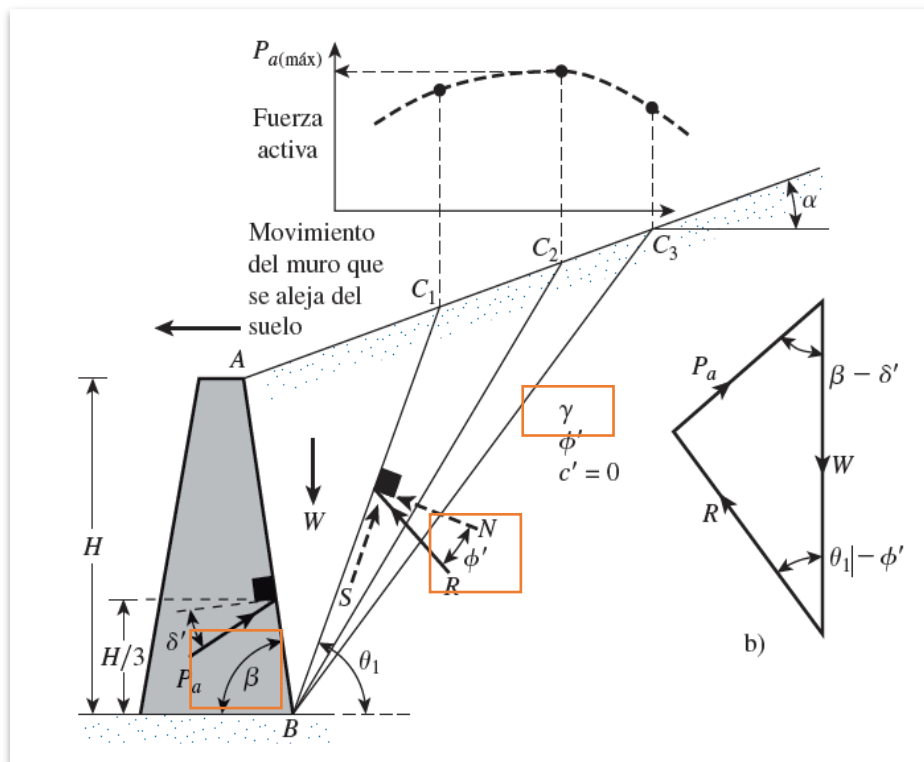
8.2.4 Descripción de la presión lateral de tierras en WALLINTIRE V1.

El método de fluido equivalente para determinar la presión de tierra durante el diseño de los muros de contención fue descrito por Terzaghi y Peck. Este método supone que el muro de contención tiene un relleno de un “fluido equivalente”.

La presión lateral de tierras en Wallintire V1, viene definida por la teoría de Coulomb de la siguiente manera:

Para aplicar la teoría de la presión activa de tierra de Coulomb, considere un muro de retención con su cara posterior inclinada a un ángulo “betha” con la horizontal, como se muestra en la figura 38. El relleno es un suelo granular con una pendiente a un ángulo” α ” con la horizontal; en aras de exponer la teoría de Coulomb, se ejemplificará en la sección de evaluación del comportamiento mecánico de la estructura.

Figura 38. Teoría Coulomb para empuje de tierras en una estructura de contención



Fuente: BRAJA M. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. 5a edición. California State University, Sacramento, 2010, p.743

En el formulario de Wallintire los valores a consignar deben ser de betha, phi, y el respectivo gamma del suelo, como se muestra en la figura 34, y que se encuentran señalados; el formulario desarrollado es el siguiente.

- Gamma del suelo: Peso específico del suelo
- Phi: Ángulo en función de la presión lateral de tierras (input-data)

- Beta: Ángulo de inclinación de tierras (input-data)

Figura 39. Formulario presión lateral de tierras. WALLINTIREV1

Fuente: Elaboración propia

Como datos de salida y en función de las variables anteriormente mencionadas se encuentran los siguientes out-data con sus respectivas ecuaciones:

Figura 40. Relación de ecuaciones input data y out-data para presión lateral de tierras

Ecuación 1: Presión lateral de tierra (Ph)

Ecuación 2: Empuje total estado activo (Pa)

Ecuación 3: Empuje total estado pasivo (PP)

Ecuación 4: Coulomb estático-estado activo para $\alpha=\pi/2$ y $\delta'=\beta=0$ (KA)

Ecuación 5: Coulomb estático-estado pasivo para $\alpha=\pi/2$ y $\delta'=\beta=0$ (KP)

Fuente: BRAJA M. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. 5a edición. California State University, Sacramento, 2010, p.743

La altura H (altura de la sección rectangular o trapezoidal), que se muestra en el formulario de presión lateral de tierras al momento de dar clic en el botón calcular, trae los datos definidos de altura de la sección rectangular o trapezoidal por parte del usuario; dicha definición se hizo en el formulario de “*Configuraciones ofrecidas por Wallintire v1*” (ver figura 23).

Al dar calcular, el usuario obtiene los valores de P_h (Presión lateral de tierra) y PP (*Empuje total estado pasivo*) y los coeficientes K (coeficiente de estado activo o pasivo), del método de Rankine y Coulomb respectivamente; estos serían los primeros datos de salida, de acuerdo con la necesidad del usuario.

8.2.5 Descripción de las sobrecargas por llenos en WALLINTIRE V1.

Para la condición en la que el usuario requiera conocer la sobrecarga de llenos y los valores, éstos serán captados en el siguiente formulario:

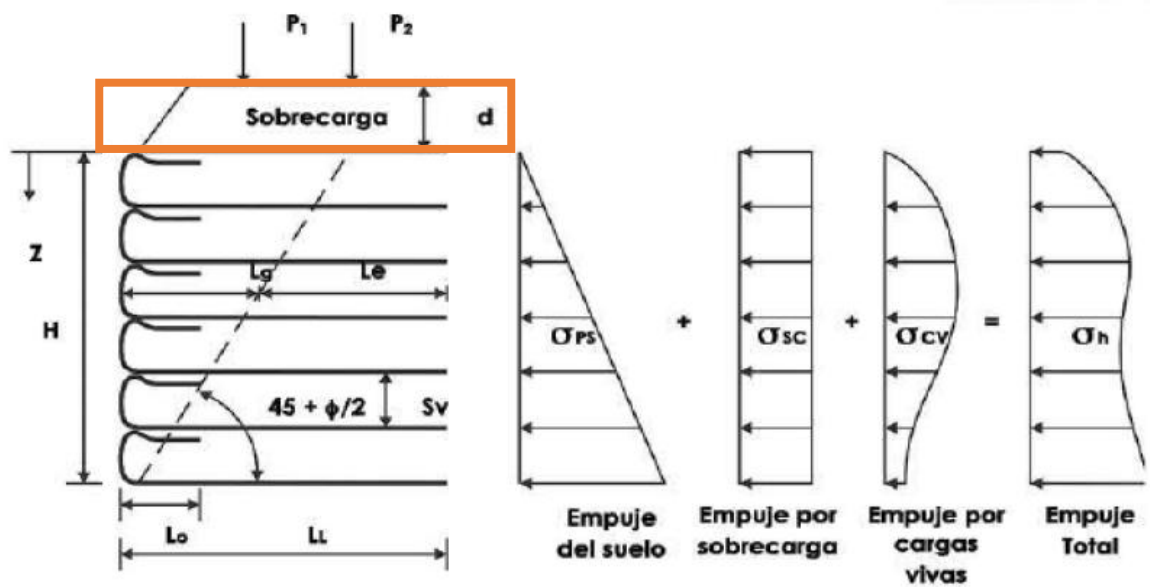
Figura 41. Formulario sobrecarga por llenos. WALLINTIREV1

Gamma	d
-------	---

Fuente: Elaboración propia

Nótese que en el anterior formulario, el usuario puede agregar diferentes gammas de suelo para diferentes espesores; esta interacción significa entonces la sobrecarga por llenos, según la teoría clásica que se muestra en la figura 42.

Figura 42. Teoría tradicional para sobrecarga por llenos.



Fuente: BRAJA M. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. 5a edición. California State University, Sacramento, 2010, p.743

Dicha teoría hace un acumulativo de gammas y espesores de capas (d) sobre la superficie de la estructura; la sumatoria representa la carga por llenos donde se obtiene de la siguiente ecuación:

n=número de capas de llenos

$$q = \sum_{L=1}^n (\gamma \cdot d) \quad \text{Ecuación 2: Sobrecarga por llenos.}$$

Existe una relación gráfica entre las cargas y los diferentes espesores que dan como resultado la carga final por llenos; en la anterior imagen se muestra la carga distribuida sobre la estructura en función de $\sum(Y \cdot d)$

8.2.6 Descripción del empuje del suelo en WALLINTIRE V1.

Para el cálculo del empuje del suelo sobre la estructura se cuenta con la siguiente base matemática, leída en un código dentro del formulario correspondiente al empuje de tierras; a continuación, se describe dicha base matemática para el desarrollo de este formulario.

Para definir cada uno de los pasos que realiza Wallintire v1, se tratan los siguientes parámetros.

- **Profundidad (H):** Esta profundidad está asociada a la altura (H) de la sección definida por el usuario inicialmente en el formulario de entrada de datos para la sección.
- **Gamma del suelo:** Corresponde al gamma del suelo.
- **KA:** Es el coeficiente activo de Coulomb este se define en el formulario de presión lateral de tierras.
- **σ_{ha} :** Es el empuje del suelo a la profundidad o altura de la estructura, esta viene definido por la ecuación. $\sigma_{ha} = KA * Y * H$.

Para el caso del empuje del suelo sobre la estructura, se cuenta con el siguiente formulario de cálculo en WALLINTIRE V1.

La base del cálculo se muestra en la siguiente tabla.

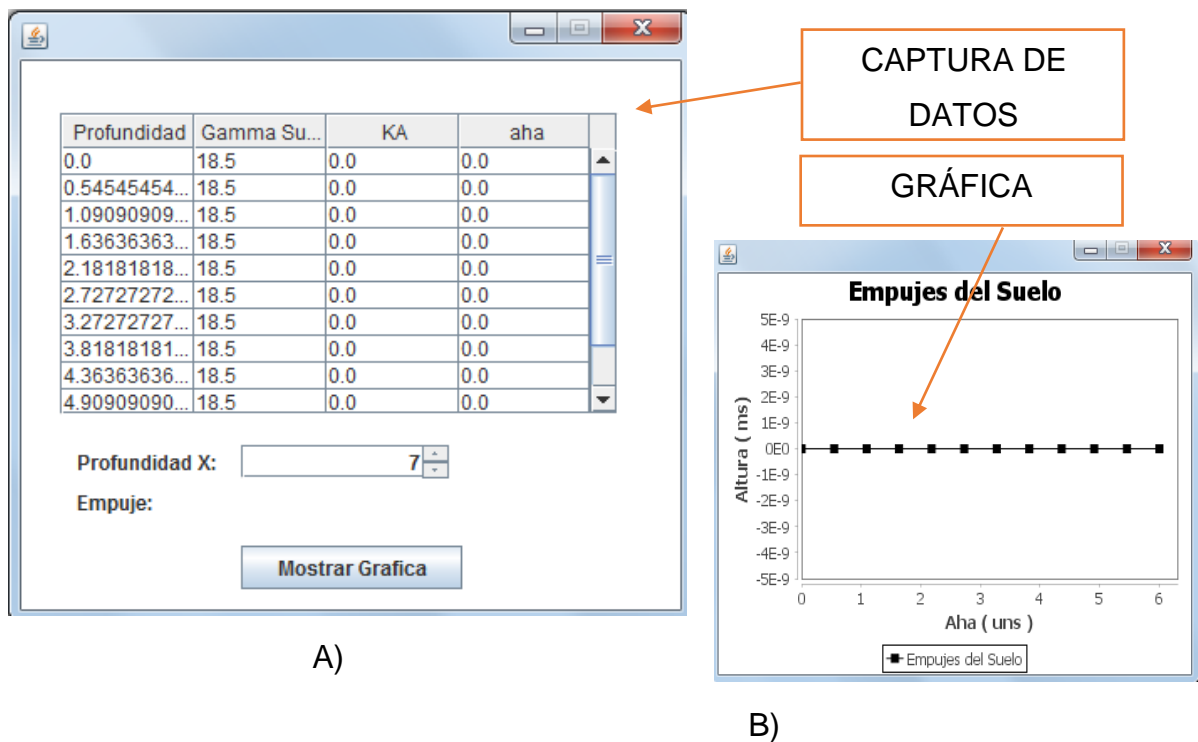
Figura 43. Base para cálculo de empuje del suelo sobre la estructura

PROFUNDIDAD	γ_{Suelo}	$KA(\text{COULOMB})$	$\sigma_{ha} = KA * \gamma * H$
0	18,5	0,289	0,00
1	18,5	0,289	5,35
2	18,5	0,289	10,70
3	18,5	0,289	16,05
4	18,5	0,289	21,40
5	18,5	0,289	26,75
6	18,5	0,289	32,09
7	18,5	0,289	37,44
8	18,5	0,289	42,79
9	18,5	0,289	48,14

Fuente: Elaboración propia (unidades definidas por el usuario que utilice el software)

A modo de ejemplo se muestra a continuación un formulario donde se capturan los datos correspondientes al igual que la gráfica para empujes del suelo sobre la estructura.

Figura 44. Formulario para captura de datos de empujes del suelo y gráfica de datos.



Fuente: Elaboración propia

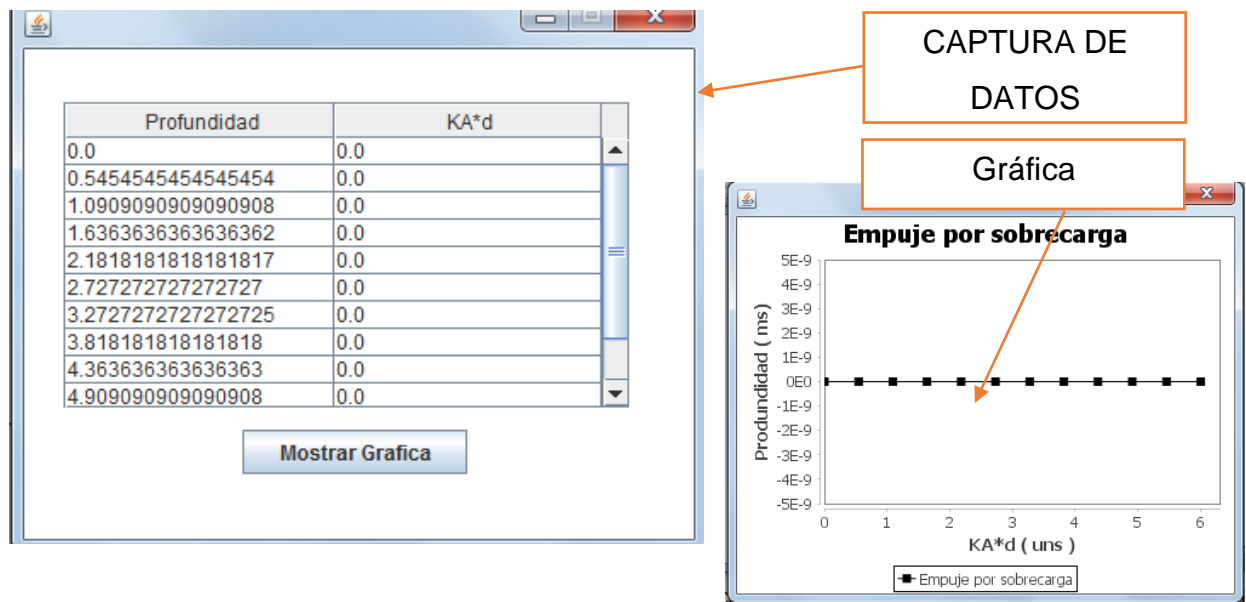
En este formulario se pueden evaluar datos de entrada definidos por el usuario, en función de KA (Coeficiente activo de Coulomb), que para estudio del caso se tomó el KA de Coulomb y un gamma de suelo; adicionalmente, se puede evaluar de igual forma el empuje del suelo a cualquier profundidad según la altura de la estructura en llantas definida por el usuario.

Una vez ingresados los valores correspondientes, se puede generar una gráfica figura (b) que muestra en detalle el comportamiento de los empujes en la estructura. Los resultados se consignan en el siguiente formulario.

8.2.7 Descripción del Empuje por sobrecargas en WALLINTIRE V1.

En la opción de sobrecargas en la estructura, se van a evaluar los empujes que existen en la estructura por sobrecargas; al dar clic en esta opción, se presenta el siguiente formulario. A continuación, se presenta el formulario que consigna datos de empuje por sobrecargas.

Figura 45. Captura de datos para empujes por sobrecargas



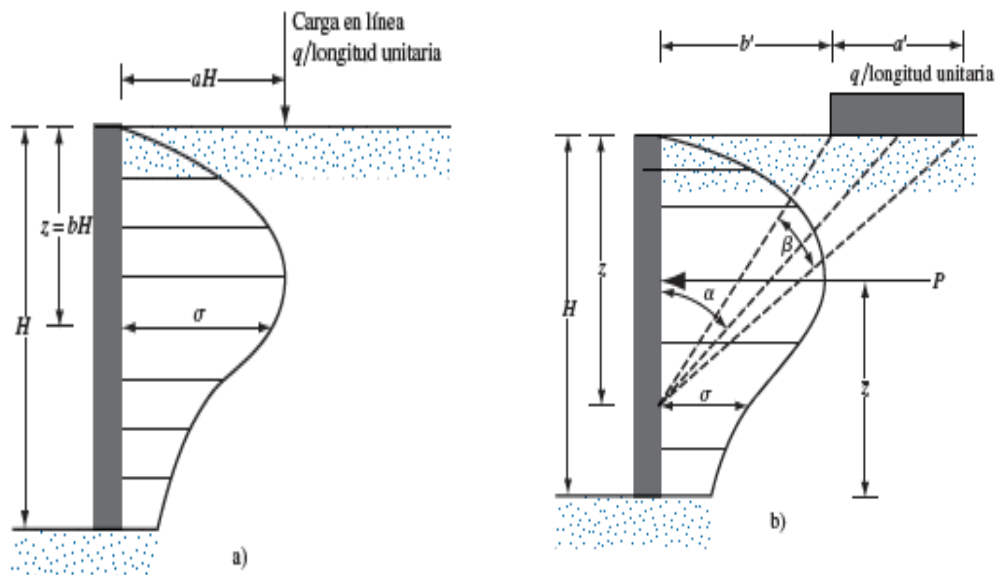
Fuente: Elaboración propia.

El presente formulario está ligado con los valores de profundidad (altura de la estructura), KA de Coulomb por los espesores acumulados definidos por el usuario en la opción de “Sobrecarga por llenos”. (Ver figura 37)

8.2.8 Descripción de la evaluación de la sobrecarga por cargas vehiculares en WALLINTIRE V1.

Para responder a la evaluación de sobrecarga por cargas vehiculares, Wallintire ofrece la opción de evaluar la estructura por cargas vehiculares con base en la teoría; a continuación, se describe la información teórica base para el respectivo cálculo. En varios casos, la teoría de la elasticidad se usa para determinar la presión lateral de la tierra sobre estructuras de retención, causada por varios tipos de sobrecarga, tales como una carga en línea (figura 46 a) y una carga de franja (figura 46 b), como se muestra a continuación.

Figura 46. Tipos de cargas en una estructura. Carga lineal(a) carga en franja (b)



Fuente: BRAJA M. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. 5a edición. California State University, Sacramento, 2010, p.743

De acuerdo con la teoría, el cálculo de empujes por cargas vivas está en función de las siguientes variables de cálculo:

- a) Un valor de “a” distancia de acción de la carga en sentido horizontal
- b) Un valor de “b”, distancia al centroide de la estructura.
- c) Un valor carga puntual q, carga en la superficie superior.

A continuación, se muestra el formulario que se desarrolló para evaluar las cargas vivas y su acción por dichas cargas. En este formulario se expresan valores de a y b (ingresados por el usuario) como las cargas correspondientes.

Figura 47. Formulario para el cálculo de cargas vivas. en la estructura

The screenshot shows a software interface with the following elements:

- Input fields for 'a' and 'b' with a 'b' label next to the second field.
- An input field for 'Carga Puntual' with the value '200'.
- A 'Calcular' button.
- Two tables: 'Condicion elastica' and 'Condicion inelastica'. Each table has columns for 'Profundidad' and 'ro'. The 'Condicion elastica' table has 5 rows, and the 'Condicion inelastica' table has 5 rows.
- Buttons labeled 'Ver grafica' next to each table.
- Input fields for 'Altura X' and 'Empuje:' on the right side.
- Annotations: An orange box labeled 'CAPTURA DE DATOS DISTANCIA a) y b) VER FIGURA 42' points to the 'a' and 'b' input fields. Another orange box labeled 'EVALUACIÓN DE LA CARGA A UNA PROFUNDIDA D X' points to the 'Altura X' and 'Empuje:' input fields.

Fuente: Elaboración propia

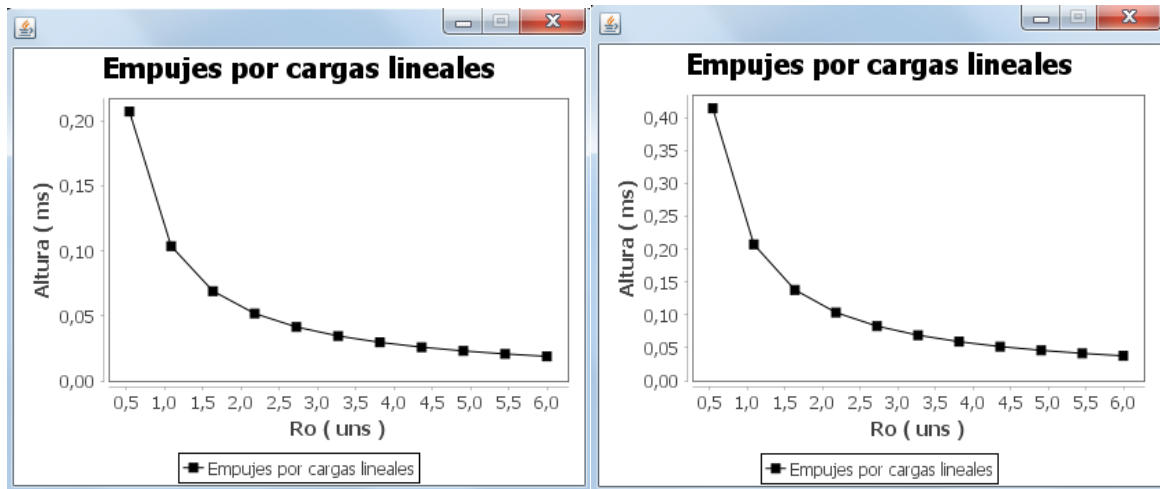
WALLINTIRE V1, permite graficar respectivamente en función de “a”. Sin embargo, como el suelo no es un medio perfectamente elástico, deben esperarse algunas variaciones definidas por las ecuaciones siguientes:

$$\sigma = \frac{4q}{\pi \cdot H} \cdot \frac{a^2 \cdot b}{(a^2 + b^2)^2} \quad \text{Para } a > 0,40$$

$$\sigma = \frac{q}{H} \cdot \frac{0,203 \cdot b}{(0,16 + b^2)^2} \quad \text{Para } a \leq 0,40$$

Bajo estas condiciones WALLINTIRE V1, grafica en formularios la siguiente información, desde un formulario principal y de ingreso de datos por parte del usuario.

Figura 48. Graficas estado elástico e inelástico del suelo.



A). Estado elástico

B). Estado inelástico

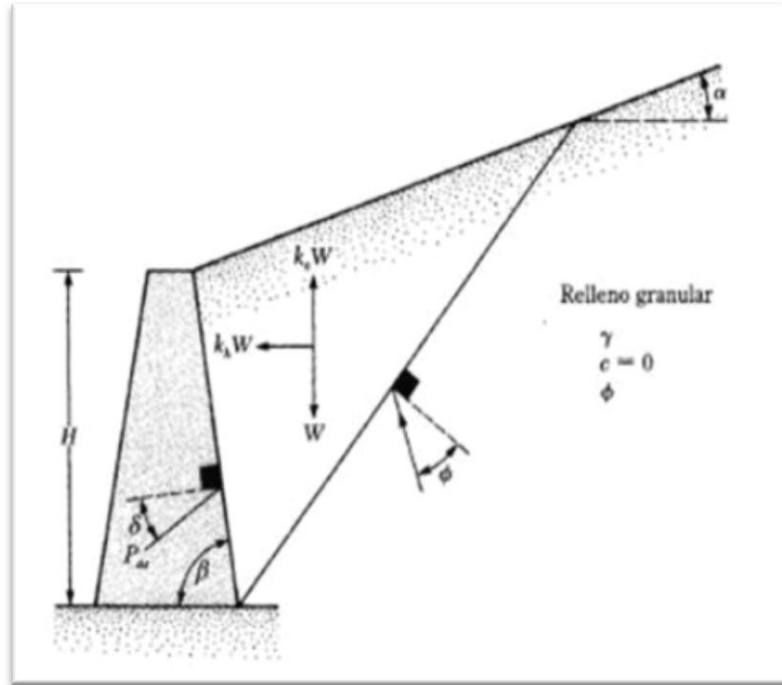
Fuente: Elaboración propia

8.2.9 Descripción de la evaluación de cargas sísmicas en WALLINTIRE V1.

La teoría de la presión activa de Coulomb se extiende para tomar en cuenta las fuerzas generadas por un sismo. La figura 45 muestra una condición de presión activa con un relleno granular ($c = 0$).

A continuación, se muestra la base teórica que se tuvo en cuenta para realizar la evaluación de cargas sísmicas:

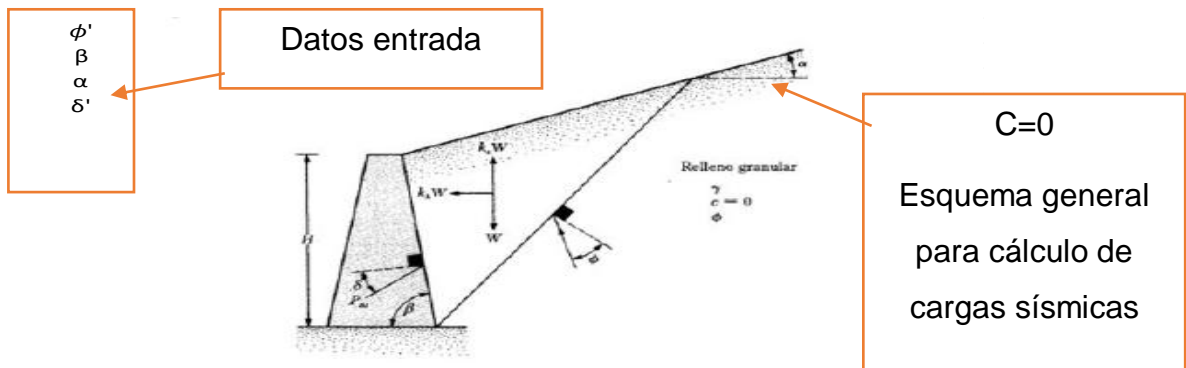
Figura 49. Coeficientes sísmicos



Fuente: BRAJA M. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. 5a edición. California State University, Sacramento, 2010, p.743

Para el desarrollo del formulario de cargas sísmicas, se tuvo en cuenta la teoría para cargas sísmicas. A continuación se presentan las ecuaciones

Figura 50. Parámetros para condiciones sísmicas



Fuente: BRAJA M. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. 5a edición. California State University, Sacramento, 2010, p.743

Dicho lo anterior se desarrolla el formulario en Wallintire V1, se presenta la interfaz y unos datos ejemplo para el caso.

Figura 51 Formulario cargas sísmicas.

Componente Horizontal:	200
Componente Vertical:	300
Phi:	75
Alfa:	20
Delta:	15

Calcular

kh: 20.408163265306122
kv: 30.612244897959183
kae: 68.0270349587031
pae: -20555.441008970884
theta: -0.6034271632705328

Fuente: Elaboración propia.

8.2.10 Descripción del análisis de estabilidad externo en WALLINTIRE V1

En WALLINTIRE V1, la estabilidad externa en la estructura de contención hace referencia a la estabilidad que ésta puede ofrecer, en función de la sección que el usuario defina; a continuación, se presenta el formulario en donde se harán las respectivas capturas de información:

La revisión de estabilidad por falla, por volteo, deslizamiento y capacidad de carga se describe a continuación; es la metodología que se emplea para estimar la estabilidad de cualquier estructura de contención, y con esta metodología se hará la evaluación de estabilidad de los muros de tierra reforzada con llantas de desecho.

En la figura 52, se presenta el Excel que se creó para relacionar factores de seguridad en la estructura de llantas usadas.

Figura 52. Formulación para factores de seguridad.

Análisis de estabilidad externa				
AREA NUMERO	ÁREA	PESOS	BRAZO CON RESPECTO A C	MOMENTO KN/m
1	12	168	2	336
2	15	210	3	630
	Pv	2	2	4
	ΣV	380	ΣMR	970
FACTORES DE SEGURIDAD				
1) FSV	80,83333	FACTOR DE SEGURIDAD POR VOLCAMIENTO		
2) $FSD = \Sigma Fg' / \Sigma Fd$	1		$\Sigma Fg'$	ΣFd
FACTOR DE SEGURIDAD POR DESLIZAMIENTO			1	1
			2	2
			3	3
			4	4
			5	5
			6	6
			21	21
3) FACTOR DE SEGURIDAD POR CAPACIDAD DE CARGA				
FSCC = q_u / q_{max}	0,666667		q_u	q_{max}
			2	3

Fuente: Elaboración propia

En la figura 52 los datos de color amarillo son datos de ingreso por parte del usuario y los de color naranja son los datos de salida, a continuación se presenta el resultado del formulario y sus diferentes espacios para captura de datos.

Figura 53. Formulario captura de datos análisis de estabilidad externa. WALLINTIREV1

Datos de entrada

Gamma de la Lianta:

Numero	Area	Peso	Brazo	Momento	Efg	Efd
1	16.0	32.0	2.0	64.0	2.0	2.0
2	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	2.0
					2.0	2.0
					2.0	2.0
					2.0	2.0
					2.0	2.0

FS Volteo: 1.3136627240874337
 Ph: 204.04082182924606
 Pv : 102.02041091462303
 MR: 536.0816436584921
 FSD: 1.6111111111111112

Datos de entrada

Fuente: Elaboración propia

En este formulario se relacionan las respectivas fuerzas actuantes y resistentes existentes en el sistema de contención, así como los respectivos valores de factores de seguridad (fsv, fsd, fsc), respecto a un punto C, en función de la sección definida por el usuario.

Donde:

Fsv: Factor de seguridad por volcamiento

Fsd: Factor de seguridad por deslizamiento

Fsc: Factor de seguridad por capacidad de carga.

Estos son unos datos de pesos específicos (de la llanta) encontrados en la literatura, para que sean tenidos en cuenta cuando se requiera hacer un análisis de estabilidad externa; cabe resaltar que este es un punto para futuras investigaciones.

Figura 54. Pesos específicos base para el cálculo de análisis de estabilidad externa.

Material de lleno	Llantas	Peso específico, (kN/m ³)
Suelo	Vehículos de transporte público	14,95
	Vehículos particulares	16,63
Gravilla	Vehículos de transporte público	13,52
	Vehículos particulares	15,76
Resíduo de construcción o de demolición	Vehículos de transporte público	10,96
	Vehículos particulares	13,00

Fuente: RODRÍGUEZ G., Oscar Egidio. Tesis geotécnica estandarización de técnicas de diseño y construcción de muros de tierra reforzada con llantas de desecho. Trabajo de grado, título de Magister en ingeniería – geotécnica. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Ingeniería Civil, 2016.

8.3 Comportamiento mecánico de estructuras de contención construidas con neumáticos fuera de uso (NFU).

Para la evaluación del comportamiento mecánico de la estructura se hace un ejemplo para una sección trapezoidal, el cual se desarrolla a continuación.

8.3.1 Definición de la información del proyecto.

En las secciones anteriores se trató la importancia que tiene conocer desde el punto de vista de orden y trabajo en paralelo; se da inicio con el ejemplo, suponiendo que el usuario requiere conocer cada una de las fuerzas que actúan en la estructura, a saber:

- Presión lateral de tierras sobre la estructura
- Evaluación de la sobrecarga por llenos
- Empuje del suelo
- Empuje por sobrecargas
- Evaluación de la sobrecarga por cargas vehiculares
- Evaluación de cargas pseudo-sísmicas
- Análisis de estabilidad externa.

Para el ejemplo, se supone que el proyecto se denomina de la siguiente forma:

PROYECTO: ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN CON NFL SECCIÓN TRAPEZOIDAL PARA ESTABILIDAD DE LA VÍA TUNJA SOGAMOSO

DESCRIPCIÓN: PROYECTO DEPARTAMENTAL QUE BENEFICIARÁ A LAS COMUNIDADES ALDAÑAS VULNERABLES A MOVIMIENTO DE TIERRAS EN EL K02+3000 + K02+5000.

Figura 55. Formulario con captura de datos información del proyecto.

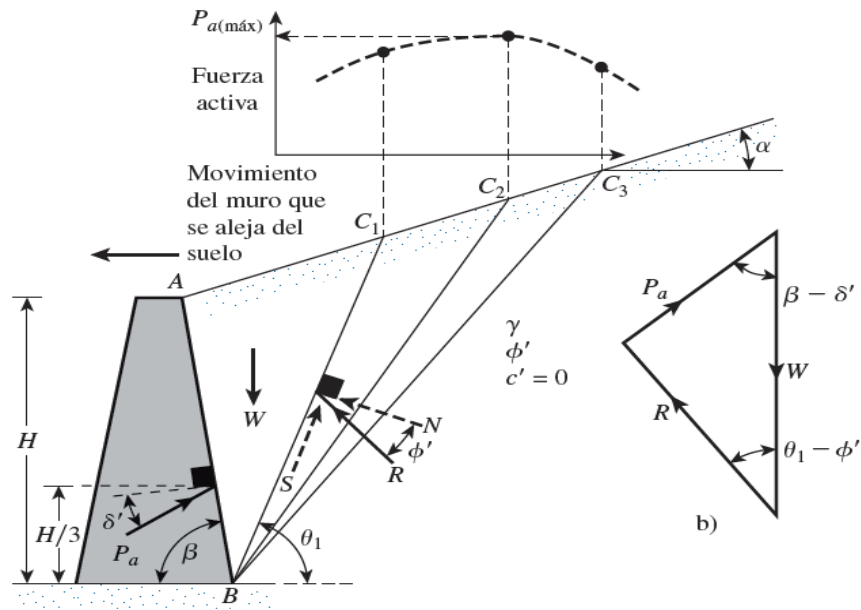
The image shows a screenshot of a software application window. The window title bar includes standard Windows controls (minimize, maximize, close). The main content area contains a form with two text input fields. The first field is labeled 'Nombre del Proyecto' and contains the text 'ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN SECCIÓN TR'. The second field is labeled 'Descripcion' and contains the text 'PROYECTO DEPARTAMENTAL QUE BENEFICIA'. Below the input fields is a horizontal scrollbar. At the bottom right of the form is a button labeled 'Guardar'. An orange arrow points from a box labeled 'GUARDAR INFORMACIÓN' to the 'Guardar' button.

Fuente: Elaboración propia

Dando inicio con el primer parámetro de cálculo, se alimenta con la siguiente información:

8.3.2 Comportamiento mecánico por presión lateral de tierras sobre la estructura.

Para el caso se genera una configuración de la siguiente forma y se alimenta el formulario de presión lateral de tierras; a continuación, se muestra la configuración ejemplo para el estudio de caso.



γ	18	KN/M3
ϕ	55	°
β	35	°

Figura 56. Captura de datos para presión lateral de tierras.

DATOS DE ENTRADA CON LOS VALORES DEL ENUNCIADO

Gamma Suelo	18
Phi	55
Beta	35
H: 6.0	

Calcular

Ph:	32.209917711011435
PP:	3259.1204032822598
KA RANKINE:	0.13671846726210268
KP RANKINE:	4.907969531112739
KA COULOMB:	0.09941332626855381
KP COULOMB:	10.059013590377345

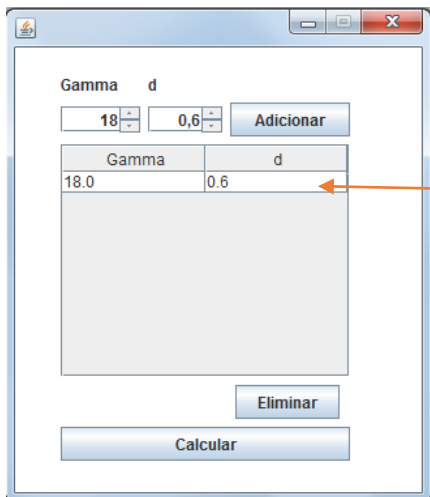
DATOS DE SALIDA CON LOS VALORES DEL ENUNCIADO

Fuente: Elaboración propia

Nótese que aparte de los valores que se arrojan, realmente el que tiene significado para el cálculo de los siguientes formularios es KA, el valor de éste es de 0,1; es un valor muy pequeño pues depende del ángulo beta y phi. La condición de ingreso de estos ángulos es que betha debe ser mayor a phi y máximo 90° y phi = 0, como condición extrema.

8.3.3 Comportamiento bajo la acción de la sobrecarga por llenos

Para este formulario, se va suponer que el usuario tiene un espesor de carpeta asfáltica por encima de la superficie del terreno de un espesor de 0,60 m; se capturan los datos a continuación.



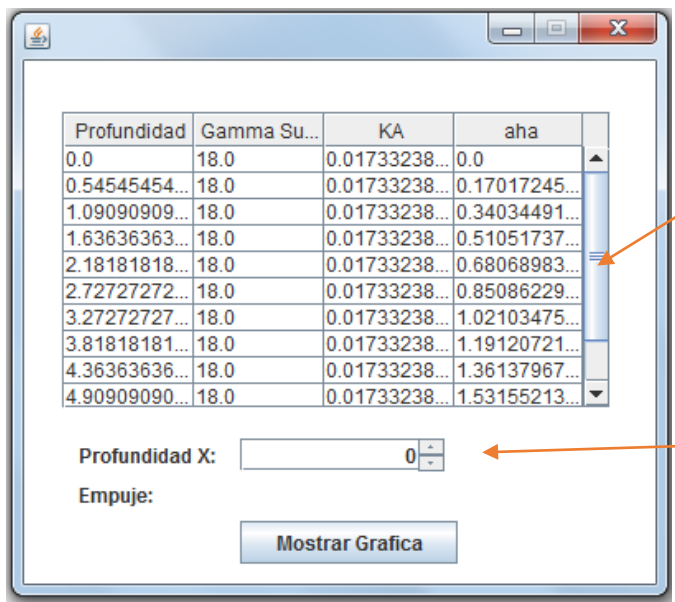
ADICIONAR VALORES DEL ENUNCIADO.

gamma	18	KN/m3
d (espesor carpeta asfaltica)	0,6	m

8.3.4 Comportamiento por empuje del suelo.

A continuación, se procede a calcular el empuje del suelo sobre la estructura.

Figura 57. Captura de datos empuje del suelo



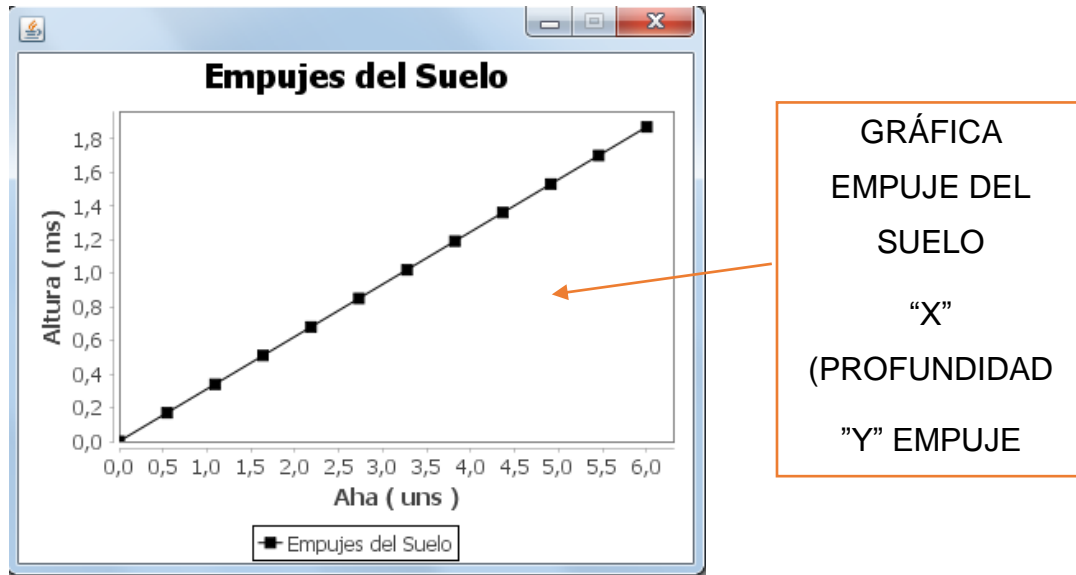
DATOS DE SALIDA EMPUJE DEL SUELO

EMPUJE A CUALQUIER PROFUNDIDAD (H)

Fuente: Elaboración propia

El usuario puede en este formulario conocer el empuje del suelo a cualquier profundidad (H); de igual forma hacer la respectiva gráfica haciendo clic en la opción mostrar gráfica, como se muestra a continuación.

Figura 58. Gráfica para empujes del suelo ejemplo

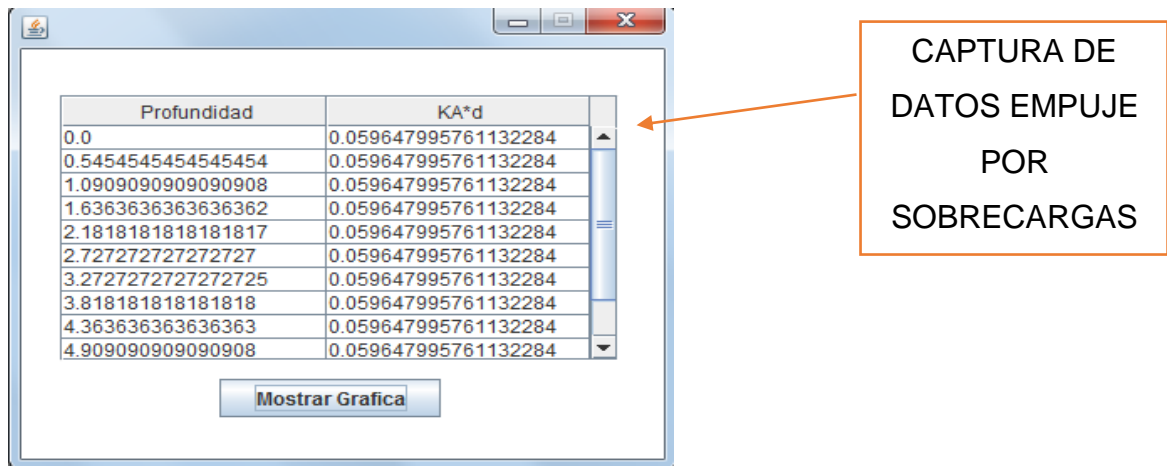


Fuente: Elaboración propia

8.3.5 Comportamiento bajo el empuje por sobrecargas

En el siguiente formulario se presenta el empuje por sobrecargas; este formulario viene definido por los espesores (d) acumulados en el formulario anterior (0,60) multiplicado por KA, definido también anteriormente.

Figura 59. Captura de datos para empuje por sobrecargas

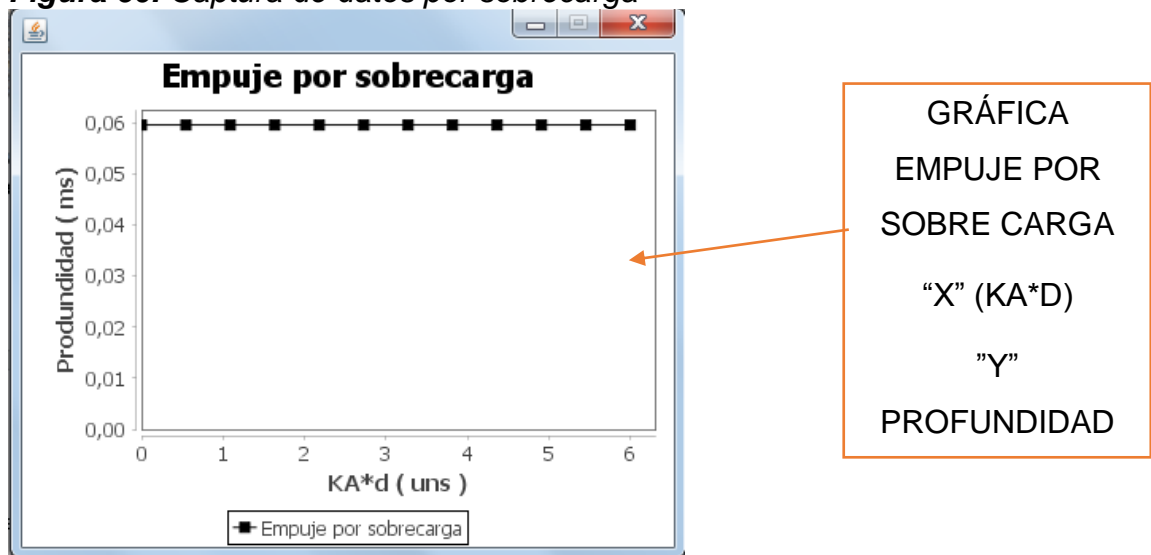


CAPTURA DE DATOS EMPUJE POR SOBRECARGAS

Fuente: Elaboración propia

Al igual que los empujes del suelo, se puede generar gráfica por sobrecarga; a continuación, se presenta el formulario que contiene la gráfica correspondiente:

Figura 60. Captura de datos por sobrecarga

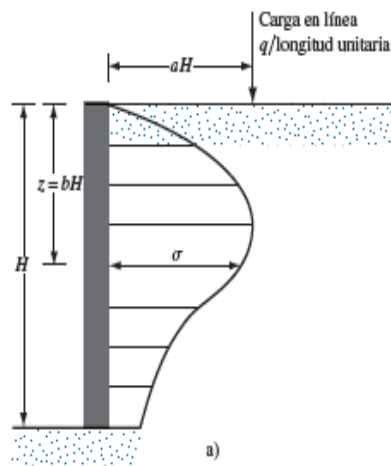


GRÁFICA EMPUJE POR SOBRECARGA
"X" (KA*D)
"Y"
PROFUNDIDAD

Fuente: Elaboración propia

8.3.6 Comportamiento mecánico en la estructura por cargas vehiculares (vivas)

En el siguiente formulario se presenta el empuje por cargas vehiculares o vivas, y las suposiciones del ejemplo.



Supóngase que la carga lineal actúa a 10 m de la corona de la estructura elaborada con llantas y que el parámetro b actúa a 3 m y una carga de 500 KN; entonces, se alimenta el formulario de evaluación de la sobrecarga por cargas vehiculares.

Figura 61. Formulario captura de datos carga lineal distribuida

a
 b
 Carga Puntual Calcular

Condicion elastica

Profundidad	ro
0.5454545454545454	0.21613634247047514
1.0909090909090908	0.10806817123523757
1.6363636363636362	0.07204544749015838
2.1818181818181817	0.054034085617618785
2.727272727272727	0.043227268494095035
3.2727272727272725	0.03602272374507919
3.818181818181818	0.030876620352925026
4.363636363636363	0.027017042808809393
4.909090909090908	0.02401514916338613

Ver grafica Altura X Empuje:

Condicion inelastica

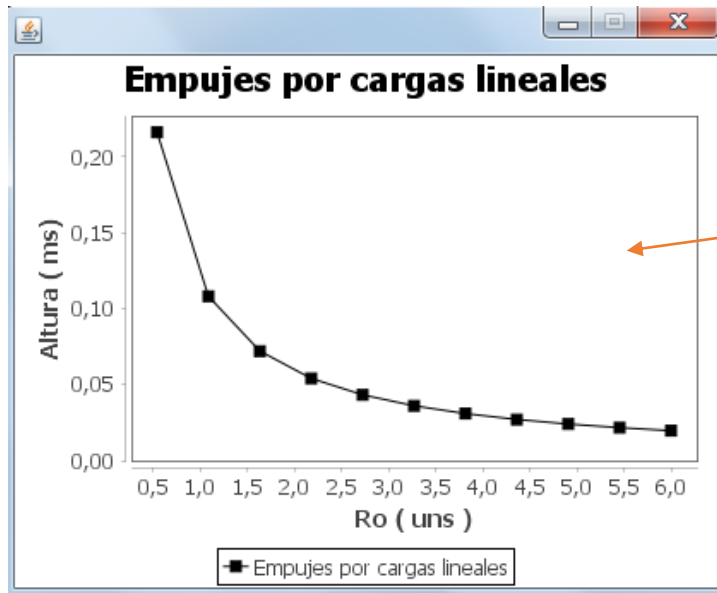
Profundidad	ro
0.5454545454545454	0.4322726849409503
1.0909090909090908	0.21613634247047514
1.6363636363636362	0.14409089498031677
2.1818181818181817	0.10806817123523757
2.727272727272727	0.08645453698819007
3.2727272727272725	0.07204544749015838
3.818181818181818	0.06175324070585005
4.363636363636363	0.054034085617618785
4.909090909090908	0.04803029832677226
5.454545454545453	0.043227268494095035

Ver grafica Altura X Empuje:

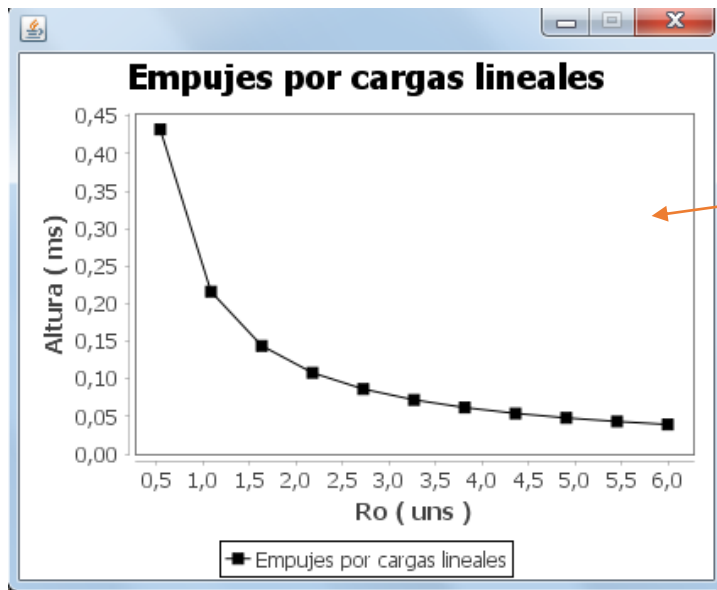
Fuente: Elaboración propia

En este formulario se puede hacer la respectiva evaluación de la carga a una profundidad cualquiera para el caso de condición elástica e inelástica. Para el ejemplo, se va a suponer que se quieren revisar ambas condiciones; para esto, se muestran los formularios de gráficas, relacionando las dos condiciones (elástica e inelástica).

Figura 62. Gráfica de condiciones elásticas e inelásticas para el estudio de caso.



GRÁFICA DE
CONDICIÓN
ELÁSTICA



GRÁFICA DE
CONDICIÓN
INELÁSTICA

Fuente: Elaboración propia

Nótese que los empujes en una condición inelástica aumentan respecto a una condición elástica; esto se debe a que el suelo no es un material flexible en condiciones de carga.

8.3.7 Comportamiento bajo la acción de cargas sísmicas.

El usuario requiere conocer la evaluación de cargas sísmicas para ello se van a suponer valores de coeficientes verticales y horizontales 1 y 1 (variables ejemplo) respectivamente, los valores de phi (Φ) alfa (α) y delta (δ), son también respectivamente 55,0.15, a continuación, se muestra el grafico que aclara la ubicación de dichos datos y el respectivo formulario de captura.

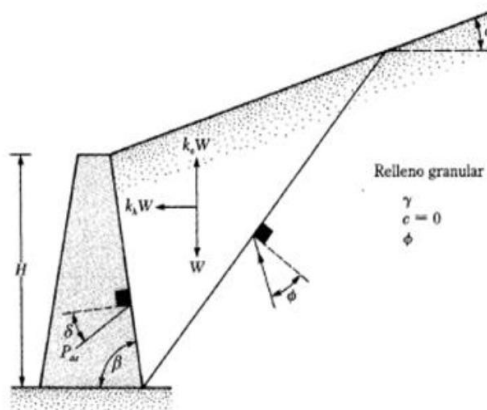


Figura 63.Formulario captura de datos de cargas sísmicas

Componente Horizontal:	<input type="text" value="1"/>
Componente Vertical:	<input type="text" value="1"/>
Phi:	<input type="text" value="55"/>
Alfa:	<input type="text" value="0"/>
Delta:	<input type="text" value="15"/>

kh: 0.1020408163265306
kv: 0.1020408163265306
kae: 138.24939198630582
pae: 6.333791386294727
theta: 0.11315098159048449

DATOS DE ENTRADA

DATOS DE SALIDA

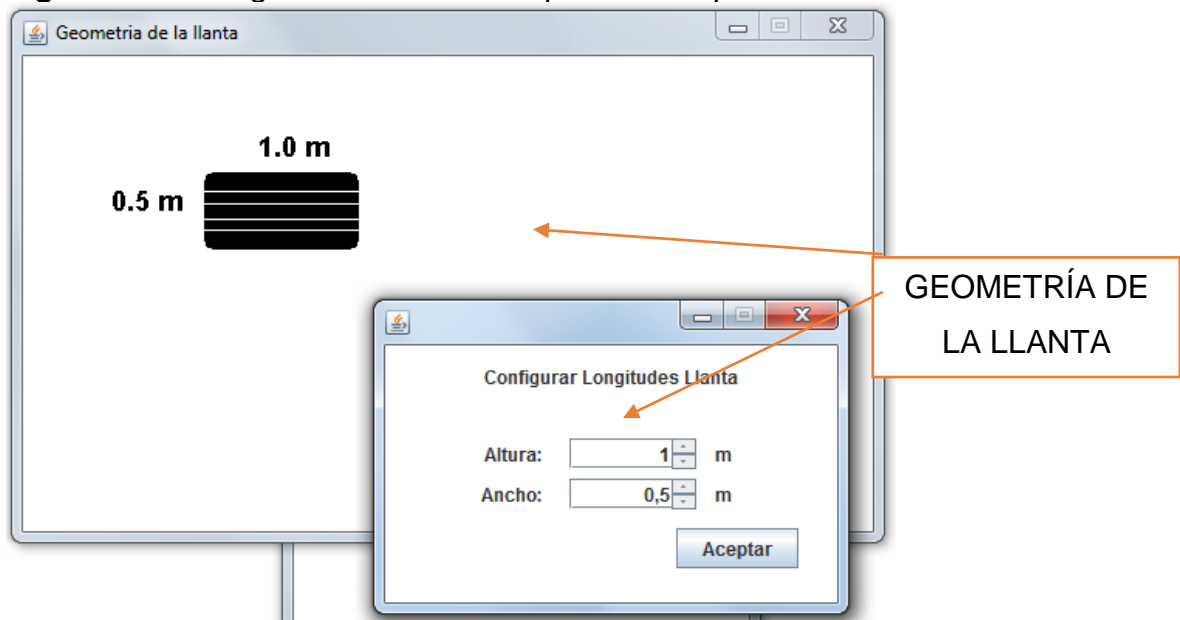
Fuente: Elaboración propia

8.3.8 Definición unitaria de la llanta para configuración general.

Para finalizar, el usuario requiere conocer el análisis externo de la estructura definida, que para el ejemplo se hizo con la siguiente configuración unitaria (se utilizó la que el programa trae por defecto), A continuación, se muestra la geometría y el análisis externo con un peso específico de la llanta de 14 KN/m³.

Tipo de llanta: Alto=1m y 0,5m de ancho

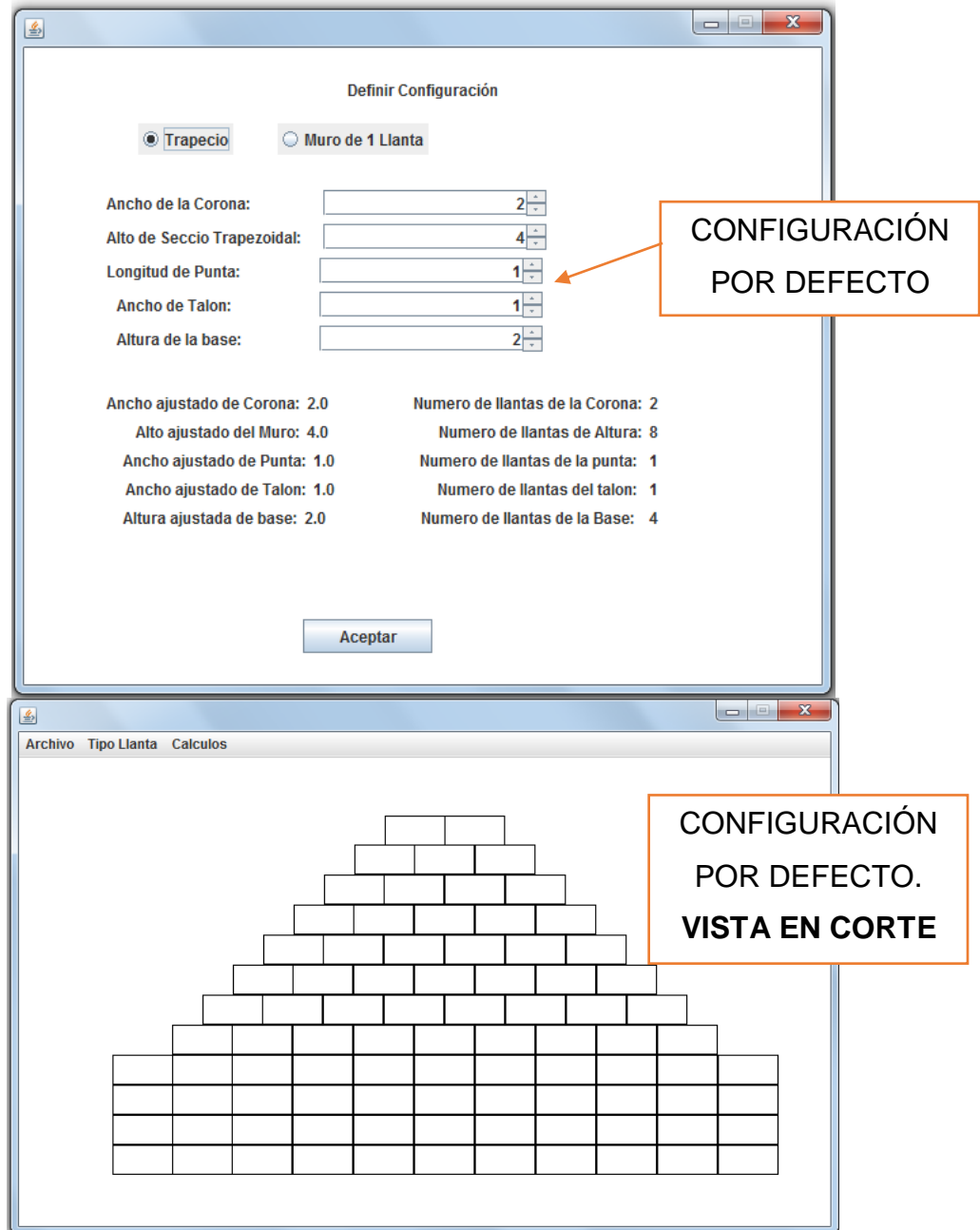
Figura 64. Configuración de la llanta por defecto para el estudio del caso.



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra el formulario que se abre por defecto para el cálculo de la sección. En él, se pueden apreciar las definiciones preliminares, como ancho de corona, punta de la sección, talón, altura total, entre otros

Figura 65. Definición de geometría de la sección trapezoidal estudio del caso.



Fuente: Elaboración propia

De igual forma, se presenta el esquema final de la sección a la cual se le realizó el anterior análisis (ver figura 65 b)

. 8.3.9 Análisis externo para la sección trapezoidal

En este formulario se pueden apreciar los respectivos factores de seguridad por deslizamiento y por volcamiento.

Figura 66. Análisis de estabilidad externa.

Numero	Area	Peso	Brazo	Momento	Efg	Efd
1	44.0	616.0	5.5	3388.0	12.0	12.0
2	54.0	756.0	5.5	4158.0	1.0	1.0

FS Volteo: 264.6781599785802
Ph: 28.809426220598397
Pv : 14.404713110299198
MR: 15250.451844213292
FSD: 1.0

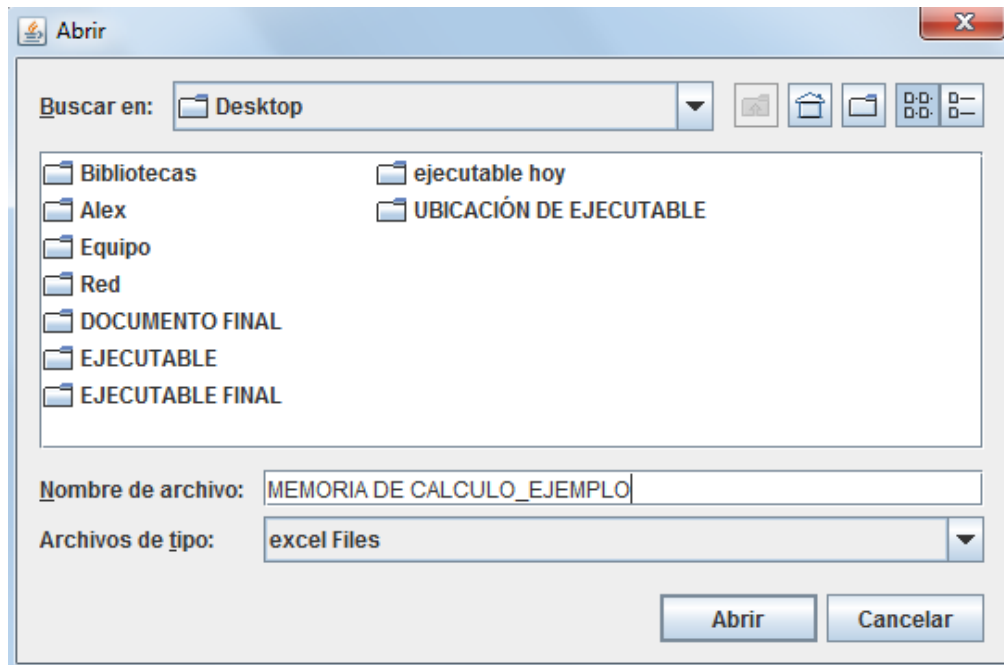
Fuente: Elaboración propia

8.3.10 Memoria de cálculo.

Finalmente, el usuario puede hacer la respectiva memoria de cálculo para el estudio del caso y lo que se ha tomado como ejemplo; a continuación se hace el respectivo paso a paso.

1). En el menú archivo, en el orden que se explica a continuación, hay que hacer un guardar datos, leer datos y finalmente exportar los datos. Se crea un archivo de Excel que contiene cada uno de los valores con los que se alimentaron los diferentes formularios.

RUTA DONDE SE DESEA GUARDAR LA MEMORIA DE CÁLCULO Y ABRIR.



Fuente: Elaboración propia

El programa Wallintire genera un archivo.exe que puede ser mejorado para la presentación, desde la misma plataforma; en él se reflejan los datos suministrados por el usuario.

Figura 67. Memoria de cálculo en Excel

Id	Nombre del Proyecto	Configuración	Alto del Muro	Longitud de la corona	Longitud de la base	Longitud de la punta	Longitud del talón	Presión lateral de Tierras	Gamma Suelo	Phi	Beta	H	Psi	Psi	Psi	Ka Rankine	Ka Rankine	Ka Coulomb	Ka Coulomb	Cargas por llenos	Gamma	d	ti	Empuje del Suelo
1	Nombre del Proyecto																							
2	Descripcion del proyecto																							
3	Configuración																							
4		Configuración del Muro	Trapezoidal																					
5		Alto del Muro	4																					
6		Longitud de la corona	2																					
7		Longitud de la base	9																					
8		Longitud de la punta	1																					
9		Longitud del talón	1																					
10																								
11		Presión lateral de Tierras																						
12		Gamma Suelo	18																					
13		Phi	55																					
14		Beta	35																					
15		H	6																					
16		Psi	0																					
17		Psi	0																					
18		Ka Rankine	0.136718																					
19		Ka Rankine	4.90797																					
20		Ka Coulomb	0.099413																					
21		Ka Coulomb	10.00001																					
22		Cargas por llenos																						
23		Gamma	18																					
24		d					0.6																	
25		ti				10.8																		
26		Empuje del Suelo																						
27																								

MEMORIA DE CÁLCULO

Fuente: Elaboración propia

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el capítulo que se expone a continuación, se presenta el análisis correspondiente a desarrollo del software bajo dos configuraciones, trapezoidal rectangular como se mostró en apartados anteriores; para llevar a cabo un análisis de los resultados obtenidos, se expresa a continuación el desarrollo por medio de un ejemplo con el respectivo análisis gráfico; dichas gráficas contienen las relaciones que existen en la estructura cuando se encuentra bajo la acción de cargas y cómo se comportan los factores de seguridad cuando se modifica la geometría de cada una de las que ofrece Wallintire V1.

Bajo los parámetros normativos de factores de seguridad, se muestran en la tabla 18, los factores de seguridad en condiciones estáticas; en esta tabla se evidencia la norma específica para cada caso, para la evaluación de los factores de seguridad que se deben cumplir.

Tabla 15. Factores de seguridad normativos.

FACTORES DE SEGURIDAD		NORMA			
		CCP-95	NSR-98	NSR-10	AASHTO
DESlizAMIENTO	Suelos granulares	1,5	1,5	1,6	1,5
	Suelos cohesivos		2,0		
VOLCAMIENTO	Suelos granulares	2,0	3,0	3,0	2,0
	Suelos cohesivos		2,0		
CAPACIDAD DE CARGA	Suelos granulares	3,0	3,0	3,0	3,0
	Suelos cohesivos		3,0		

Fuente: Factores de seguridad en diferentes normas

El resumen de los factores de seguridad que adoptan cada una de las normas, son en pro de poder cuantificar los valores de dichos factores en una estructura de

contención elaborada con llantas usadas; a continuación, se ejemplifican en las dos configuraciones (trapezoidal y rectangular) unos parámetros, y sobre éstos se hace el respectivo análisis:

Los parámetros a incluir en el software WALLINTIRE V1 para las dos (rectangular y trapezoidal) secciones van a ser los siguientes:

- SECCION RECTANGULAR

Valor de gamma: 18,5 KN/M3

Valor de Phi: 32° para sección rectangular y trapezoidal.

Beta sección rectangular: 90°

Beta sección trapezoidal: Este ángulo depende de la configuración geométrica.

La geometría de las llantas a emplear tanto en la sección trapezoidal y rectangular son las siguientes:

Alto de la llanta: 0,60m

Ancho de la llanta: 0,25 m

En cuanto a la geometría inicial en función de la llanta definida anteriormente se emplea la siguiente configuración, para la sección trapezoidal y la sección rectangular.

- SECCIÓN TRAPEZOIDAL:

Ancho de corona: 0,60m

Alto de la sección trapezoidal: 8 m

de llantas apiladas: 2

Longitud de la punta: 1m

Longitud del talón: 1m

Alto de la base: 1m

Para la sección rectangular:

Altura total de la sección: 8 m, esta altura es igual a la altura total que tiene la sección trapezoidal mostrada anteriormente.

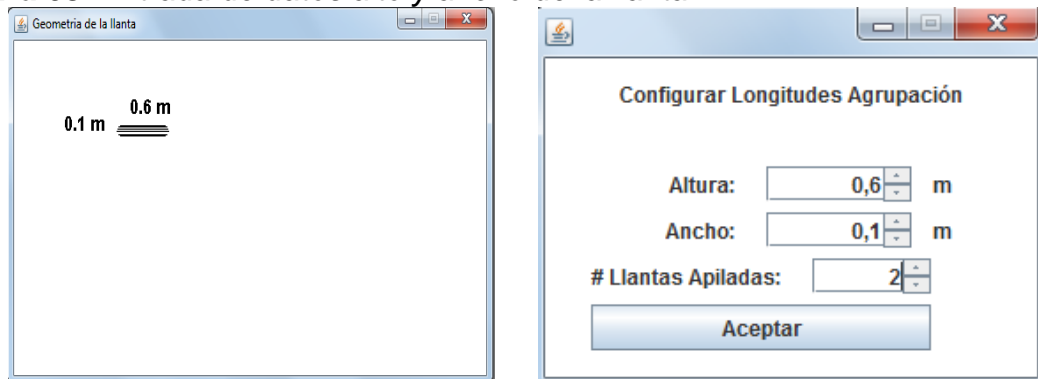
Ancho de la corona para la sección rectangular: 0,60m, esta altura es igual al ancho de corona de la sección trapezoidal y corresponde al alto de la llanta.

A continuación, se muestra el ingreso de los datos anteriormente descritos para dar inicio al análisis de resultados.

- 1) Se definen las medidas de una llanta.

En el formulario de *GEOMETRÍA/DEFINIR GEOMETRIAS Y CONFIGURACIÓN*, se selecciona *TIPO DE LLANTA* y se ingresan los respectivos datos.

Figura 68. Entrada de datos alto y ancho de la llanta.



Fuente: *Elaboración propia*

Nótese que en el formulario, se define de forma gráfica y numérica la sección. En la figura 68 se ven los datos solicitados en el enunciado del problema; cabe resaltar que la definición de estas medidas es funcional para la sección trapezoidal y rectangular.

- 2) Definición de la geometría global de la sección trapezoidal y rectangular.

En el formulario de *GEOMETRÍA/DEFINIR GEOMETRIAS Y CONFIGURACIÓN*, se selecciona *ARCHIVO/DEFINIR CONFIGURACIÓN*, y se ingresan los respectivos datos según el enunciado del ejemplo.

A continuación, se muestran los formularios de captura de datos para la geometría global y los formularios gráficos de estas definiciones.

Formulario

Figura 69. Formularios de entrada de datos configuración global.

a). Sección trapezoidal.

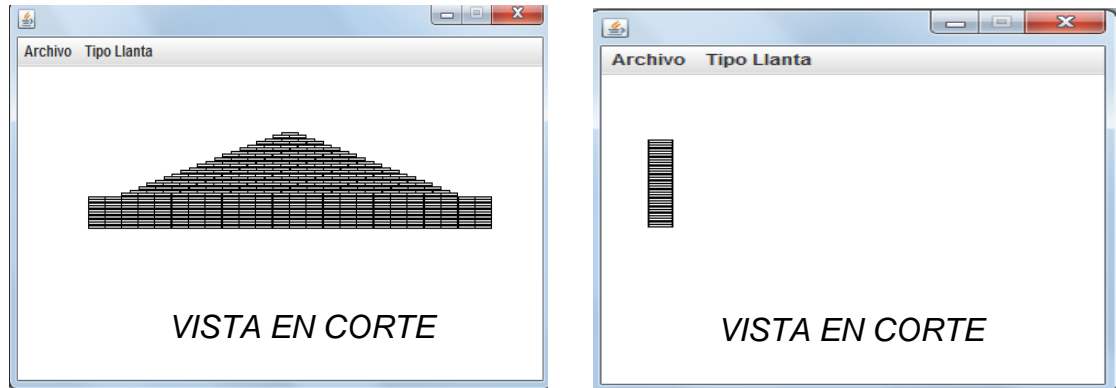
b). Sección rectangular.

Fuente: *Elaboración propia*

En la figura 69, se presentan los formularios a y b respectivamente; los datos ingresados en ellos corresponden a los solicitados para la sección rectangular así como para la trapezoidal.

La presente figura muestra la geometría general en función de los datos; nótese que se hace el ajuste en altura respecto al ancho de la llanta definido de (0,10m).

Figura 70. Secciones globales en Wallintire V1.



a). Sección trapezoidal.

b). Sección rectangular.

Fuente: Elaboración propia

3) Definición de parámetros de estabilidad en la estructura.

En el formulario de *CÁLCULOS/PRESIÓN LATERAL DE TIERRAS*, se selecciona la opción *PRESIÓN LATERAL DE TIERRAS*, y en el formulario que se activa, se ingresan los respectivos datos según el enunciado del ejemplo.

A continuación, se presenta el formulario de la sección trapezoidal y rectangular para el cálculo de la presión lateral de tierras; nótese que para cada uno de los formularios, los valores de salida varían en función de β (Beta); para la sección trapezoidal, el ángulo es de 35° , y para la rectangular, de 90° (valores con respecto a la horizontal).

Figura 71. Formulario de captura de datos presión lateral de tierras.

The figure shows two windows of a software application titled "Presion Lateral de Tierras".

Window a) Sección trapezoidal:

- Gamma Suelo: 17
- Phi: 40
- Beta: 35
- H: 4.0
- Calcular button
- Ph: 29.572225159343876
- PP: 625.4517507674209
- KA RANKINE: 0.3906377669816573
- KP RANKINE: 1.717729642086404
- KA COULOMB: 0.21744283205399909
- KP COULOMB: 4.598909932113389

Window b) Sección rectangular:

- Gamma Suelo: 17
- Phi: 40
- Beta: 90
- H: 3.0
- Calcular button
- Ph: 16.634376652130932
- PP: 351.81660980667425
- KA RANKINE: NaN
- KP RANKINE: NaN
- KA COULOMB: 0.21744283205399909
- KP COULOMB: 4.598909932113389

a). Sección trapezoidal.

b). Sección rectangular.

Fuente: Elaboración propia

La presión lateral de tierras para la sección trapezoidal y rectangular está en función de beta (35° y 90° respectivamente).

Nótese que los valores de salida de PH y PP (presión horizontal y PP presión pasiva en la estructura) varían respecto a la función, a la sección seleccionada (trapezoidal y rectangular), así como los parámetros de gamma, phi son iguales para ambas secciones; el KA y el KP (Coulomb); para el caso de KA y KP de Rankinne, en la sección trapezoidal, captura datos, y en la sección rectangular, no arroja valores; esto se debe a que está en función del ángulo beta.

4) Análisis externo, factores de seguridad.

En el formulario de *CÁLCULOS/ANÁLISIS EXTERNO*, se selecciona la opción *ANÁLISIS EXTERNO*, y en el formulario que se activa, se ingresan los respectivos datos según el enunciado del ejemplo.

Para hacer este análisis, se deben tener en cuenta los pesos específicos de la llanta y material de relleno, los cuales se han referenciado en apartados anteriores.

A continuación, se abordan las secciones por independiente, se dará inicio con la sección trapezoidal y se hará el respectivo análisis de estabilidad y los factores de seguridad.

Para el formulario de análisis externo se agregan los datos de gamma de la llanta y el suelo para el caso se toma un gamma de 14 KN/M3, a continuación, se presenta la captura de datos para una sección trapezoidal y sus respectivos datos de salida.

Figura 72. Captura de datos análisis estabilidad externa.

Numero	Area	Peso	Brazo	Momento
1	12.600000...	176.4000...	7.2	1270.080...
2	16.8	235.2000...	7.2	1693.44

FS Volteo: 153.72002828262703
FSD: 0.0
FSCC: NaN
Ph: 16.634376652130932
Pv: 2.734674676066205
MR: 5966.419315335354

Fuente: Elaboración propia

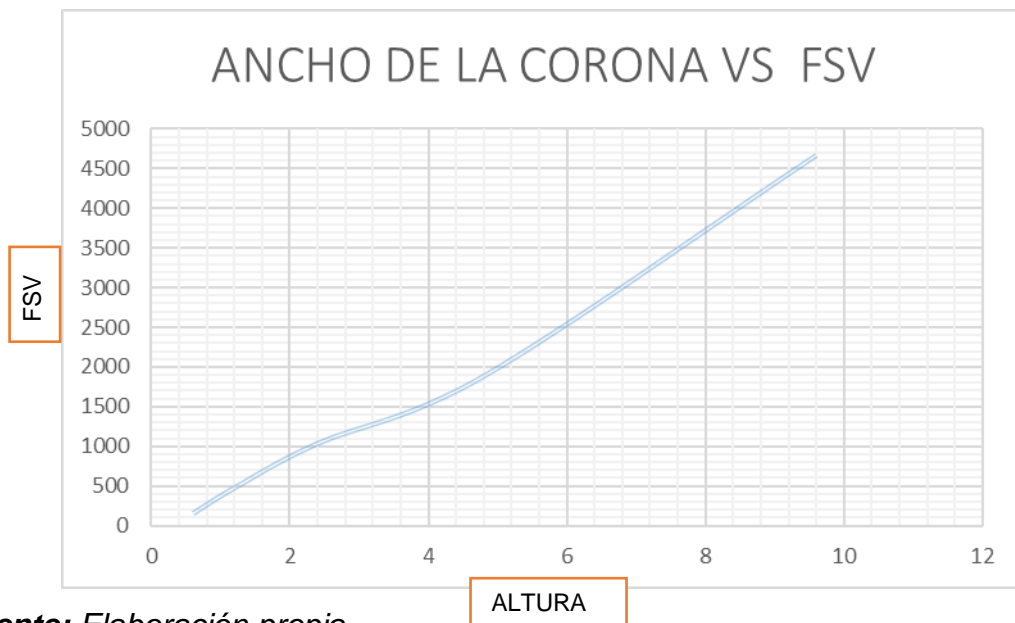
El factor de seguridad por volteo es de 154,72 en función de la geometría general y la definición unitaria de la llanta. A continuación, se tabulan datos para graficar la relación que se tiene entre la geometría global y el factor de seguridad por volcamiento, haciendo cambios en la sección trapezoidal.

Tabla 16. Relación geométrica sección trapezoidal.

ANCHO DE CORONA	ALTURA TOTAL DE LA SECCIÓN TRAPEZOIDAL	LONGITUD DE PUNTA	LONGITUD DE TALÓN	DATO DE CAPTURA FSV
0,6	3	1	1	153,72
1,2	4	1,5	1,5	477,69
2,4	5	2	2	1037,92
4,8	6	2,5	2,5	1886,97
9,6	7	3	3	4672,4

Fuente: Elaboración propia

Gráfica relación ancho de la corona vs factor de seguridad por volcamiento.



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica anterior, se muestra que a medida que aumenta el ancho de la corona los factores de seguridad para un volcamiento son mayores; la relación es directamente proporcional.

Por otra parte, se identifica de igual forma que el factor de seguridad respecto a la altura de la sección es de carácter exponencial. A mayor altura de la sección el factor de seguridad aumenta, siempre y cuando se mantenga la relación geométrica punta y talón.

Gráfica altura de la sección VS factor de seguridad por volcamiento.



Fuente: *Elaboración propia*

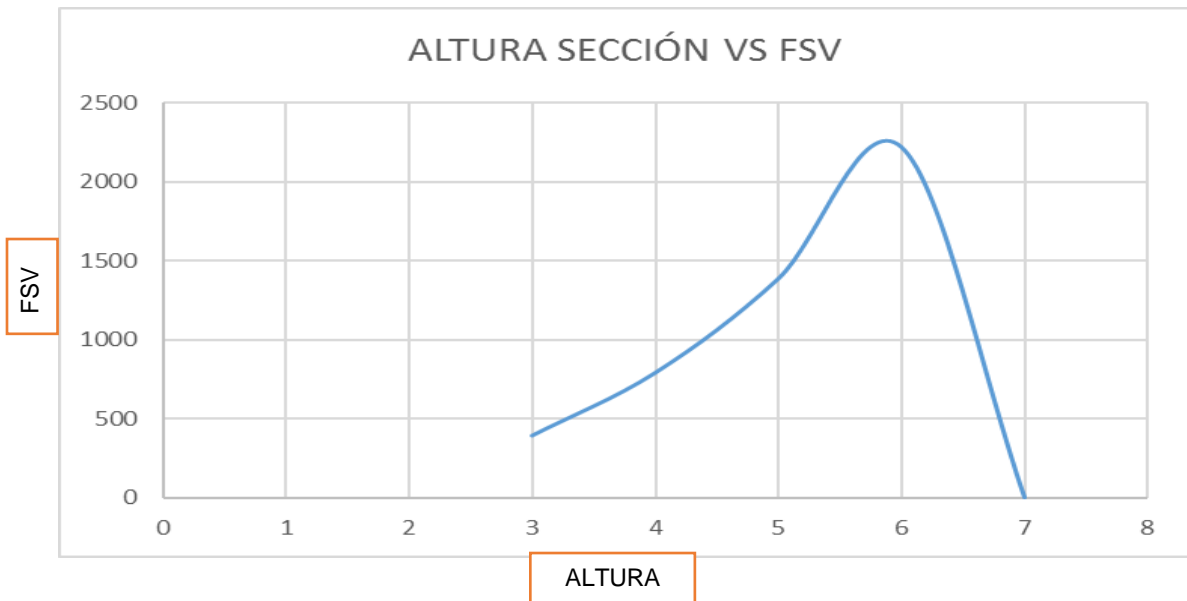
Si se mantiene la sección con las mismas medidas de punta y talón (1m) y se aumenta la altura de la sección trapezoidal se obtiene la siguiente relación.

Tabla 17. Datos de cambio de la sección en altura

ALTURA TOTAL DE LA SECCIÓN TRAPEZOIDAL	DATO DE CAPTURA FSV
3	392,16
4	790,31
5	1387,14
6	2221,6
7	3332.65

Fuente: Elaboración propia

Gráfica altura de la sección fija vs. Factor de seguridad por volcamiento



Fuente: Elaboración propia

Nótese que para el caso de la sección trapezoidal la geometría, en cuanto a estabilidad, se comporta de forma adecuada, esto se debe al área aferente que existe en contacto con el suelo; es decir, que el factor de seguridad por volcamiento es directamente proporcional a la base de la sección trapezoidal.

A continuación, se evalúa el comportamiento de la estructura de sección rectangular ($\beta=90$); para esta sección se evaluará el factor de seguridad por volcamiento. Inicialmente se había definido una configuración con ancho de corona igual al alto de la llanta (0,60m), lo que generaba un bloque de llantas puestas una encima de la otra.

Si se mantienen los mismos parámetros de estabilidad y se evalúa el comportamiento modificando la altura se obtiene la siguiente gráfica.

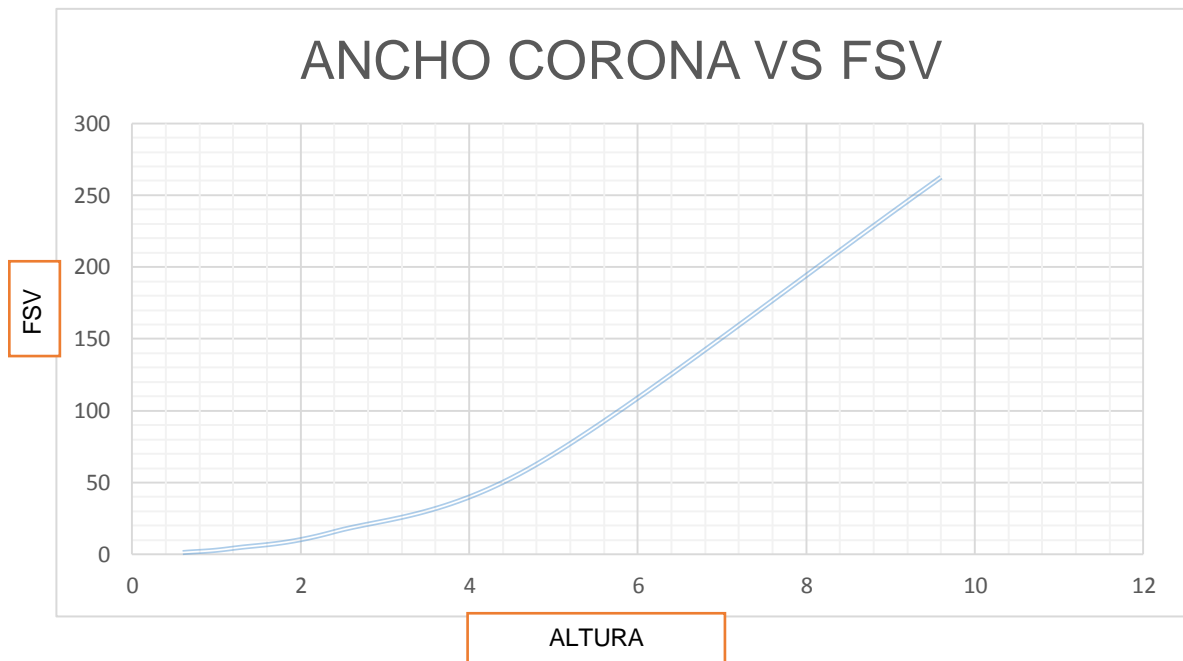
Gráfica altura de la sección rectangular VS factor de seguridad por volcamiento.



Fuente: *Elaboración propia*

En esta gráfica se puede observar que las alturas de la sección rectangular al ser modificada los factores de seguridad aumentan directamente en función de dicha altura.

Gráfica ancho de la sección vs. Factor de seguridad por volcamiento.



Fuente: *Elaboración propia*

Nótese que para la gráfica anterior, el factor de seguridad por volcamiento en función del ancho de corona es proporcional. Esta grafica es de comportamiento exponencial: a medida que se aumente el ancho de la corona, el factor de seguridad para esta sección aumenta considerablemente.

El análisis que se puede obtener de las dos configuraciones, y a modo de conclusión, corresponde a que si el área de contacto es mayor, automáticamente la estabilidad al volcamiento mejora.

Cualesquiera de las dos secciones son funcionales siempre y cuando la definición unitaria o la llanta a utilizar sea la que brinde mayor área aferente o contacto con el suelo.

Si el ancho de la sección rectangular se configura como el ancho de la llanta y se hace una elevación en altura superior a dos veces su base (ancho de la llanta para el caso), es propensa a fallar por volcamiento.

Los valores de factores de seguridad por capacidad de carga y deslizamiento pueden ser calculados, pero para el caso en estudio, se deja para que el usuario interactúe con el software, incluyendo valores de fuerzas actuantes y resistentes, como los valores de q_u y q_{max} .

10. CONCLUSIONES

A lo largo de la investigación, se buscó concatenar las propiedades mecánicas del conjunto de neumáticos fuera de uso (NFU) en estructuras de contención, lo que hace el desarrollo de Wallintire V1, que busca propiamente crear una herramienta en aras de contribuir a la ingeniería geotécnica; dicha herramienta permite evaluar parámetros propios de estructuras elaboradas con estos materiales y propiamente deja ver el comportamiento de fuerzas actuantes y resistentes dentro de la estructura, de una forma dinámica según los datos suministrados por el usuario.

Con base en la problemática matemática que genera el diseño de estructuras de contención, con conceptos empíricos, se crea la necesidad de generar un programa que identifique el comportamiento mecánico de estas estructuras en un escenario real, traducido en factores de seguridad.

El tamaño de los neumáticos fuera de uso (NFU) es una variable importante en la ejecución del programa, ya que existen muchos tamaños de llantas, y los tamaños de las llantas dependen de los fabricantes y del tipo de vehículo en el que se usen; sin embargo, este input data se deja abierto al usuario, pues depende del material a utilizar en un ambiente real y las condiciones que se ofrezcan en el mercado de llantas usadas.

A lo largo de la investigación existe una falencia en información sobre las llantas de desecho y su utilización como estructuras de contención; el no contar con artículos académicos hizo muy difícil la revisión bibliográfica, tales como parámetros de resistencia c y Φ y la relación que existe entre el suelo y la llanta (resistencia al corte); este tipo de parámetros desconocidos dificultó realizar la

investigación y se dejan abiertos puntos para posibles líneas de investigación futuras.

La geometría de las estructuras en función de la llanta juega un papel importante en la evaluación del comportamiento mecánico de las estructuras elaboradas con este tipo de material; la estrecha relación de geometrías de sección y el área aferente de las llantas afecta directamente los factores de seguridad. Sin embargo, la interacción del programa con el usuario, permite ajustar y ver los cambios de forma real, y tomar decisiones de acuerdo con la necesidad o condiciones del escenario real.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIS, 1998. NSR-10, Título H, p.165.
- ASTM, 2014. ASTM-5321-5321M, Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic- Geosynthetic Interfaces by Direct Shear. , p.11.
- AIS, NSR-10, Título H. 1998. p.165.
- AMORTEGÜI, José Vicente. Utilización de Llantas en Obras civiles. En SOCIEDAD COLOMBIANA DE GEOTECNIA. Colombia: 2000.
- BARON ZAMBRANO, Juan. Viabilidad de muros de llantas para estabilización de taludes en el barrio la capilla Soacha Cundinamarca. Bogotá.2014. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Católica de Colombia Facultad de Ingeniería Civil.
- Baroni, M., Specht, Luciano Pivoto & Barbosa Pinheiro, R.J., 2012. Construção de estruturas de contenção utilizando pneus inservíveis: análise numérico para caso de obra. *Engenharia Civil*, pp.449–457.
- Baroni, M. & Specht, L.P., 2006. Construção de un muro experimental de tierra armada. *CRICTE 2006*, pp.2–3.
- Barrientos C, B., 2010. Utilización del grano de caucho proveniente de llantas en mezclas asfálticas en caliente. *Tesis*, p.141.
- BRAJA M.* Principios de Ingeniería de Cimentaciones. 5a edición. California State University, Sacramento, 2010

CARDONA URRUTIA, Patricia. Estudio de factibilidad para la creación de planta de producción de granos de caucho (GCR), mediante el reciclaje de llantas fuera de uso. Pereira.2016. Trabajo de grado (Administradora Industrial). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías.

CARROLL, R., Jr. (1988). "Specifying Geogrids", Geotechnical Fabric Report Industrial Fabric Asociation Internacional, St. Paul, marzo/abril.

CLIFFORD. Colombia to reduce its vulnerability to natural disasters with IDB support: Fecha 07/06/2016. Disponible: <http://www.iadb.org/en/news/news-releases/2011-11-09/natural-disasters-loan-colombia,9664.html>.

ÉCOLE DES PONTS. [en línea]. Disponible: <http://www.enpc.fr/en/node?page=21>>

EL COMERCIO. Historia de la llanta. 14 sep. 2012 [en línea] Disponible: <http://www.elcomercio.com/deportes/carburando/historia-llanta.html>

GARCÍA F, Nancy. Elaboración de texto guía y ayudas didácticas para la asignatura Fundaciones 1. Citado por: CAMARGO G, Carolina y GONZÁLEZ E, Alba. Manual de modelamiento de estructuras de contención lateral mediante programa de elementos finitos. Bucaramanga, Universidad de Santander: 2011. Pág. 19.

GOODYEAR <http://www.goodyear.com.co>

LÓPEZ FERNÁNDEZ, Francisco Javier. Página web.. <http://www.ingenieriamecanica.com/>

MICHELIN. Disponible: www.michelinman.com

NEUMÁTICOS PNEUS. Neumáticos para auto. Disponible: <http://www.neumaticos-pneus-online.es/indices-de-carga-y-velocidad-consejos.html>. [Consultado el 14 oct 2016]

QUEIROS, Augusto. Investigación recomienda neumáticos para construir muros de contención en Brasil. Agencia Brasil, Brasil (09/11/2015 14h23).

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Definiciones. Disponible en <<http://dle.rae.es/?id=NU2U8ku|NU2xWhe>> [Consultado el 12 agosto 2016].

REDACCIÓN NEGOCIOS, Economía: Argos usará llantas en sus hornos. En: El Espectador. Bogotá D.C. 14, Fecha 13/11/2014. Disponible: <https://www.elespectador.com/noticias/economia/argos-usara-llantas-sus-hornos-articulo-527545>

RODRÍGUEZ, Oscar Egidio. Estandarización de Técnicas de Diseño y Construcción de Muros de Tierra Reforzada con Llantas de Desecho. Medellín, 2016, pg. 17. Magister en Ingeniería Geotécnica. Universidad Nacional. Facultad de Minas. Antioquia.

RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, Oscar Egidio. *Estandarización de técnicas de diseño y construcción de muros de tierra reforzada con llantas de desecho*. Medellín: 2016. *Trabajo de grado*, Magister en Ingeniería – Geotécnica. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil

SHOSHIRO HORIGOME. Guía de construcción de muro de contención con llantas usadas [en línea]. Bogotá [citado 8 de octubre, 2014]. Disponible en Internet: https://www.jica.go.jp/project/all_c_america/001/materials.

SUÁREZ, Jaime. *Estructuras de Contención de Gravedad, capítulo 3*. En: *Deslizamientos: Técnicas de remediación*. Disponible: www.erosion.com.co