



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

PROPUESTA TEÓRICA DE MUROS CON LLANTAS DE ACUERDO CON LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS DE LA REGIÓN. CASO DE ESTUDIO: DEPARTAMENTO DE CALDAS.

Nicolás Linares Serna

Universidad Nacional de Colombia
facultad de Ingeniería y Arquitectura
Manizales, Colombia

2020

PROPUESTA TEÓRICA DE MUROS CON LLANTAS DE ACUERDO CON LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS DE LA REGIÓN. CASO DE ESTUDIO: DEPARTAMENTO DE CALDAS.

Nicolás Linares Serna

Tesis para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Infraestructura y Sistemas de Transporte

Director (a):

Ing. Jorge Alonso Aristizábal

Codirector (a):

Ing. Juan Alejandro Dávila

Línea de Profundización

Universidad Nacional de Colombia
facultad de Ingeniería y Arquitectura

Manizales, Colombia

2020

A mis padres, apoyo y sustento incondicional

Agradecimientos

Luis Carlos Vásquez Torres, quien me acogió cual alumno para compartir sus conocimientos, revisar y brindar apoyo en el desarrollo de este trabajo final.

Antonio Hernández Escobar, que con toda gentileza y disposición realizó los ensayos de laboratorio a la muestra de suelo, escoria y ceniza volante en su laboratorio Hernández ingeniería.

Jorge Alonso Aristizábal Arias y Juan Alejandro Dávila, tutores de este trabajo final quienes realizaron su revisión y orientación para desarrollar la temática objeto.

La Secretaría de Infraestructura de la Gobernación de Caldas, en cabeza del ingeniero Luis Alberto Giraldo Fernández por compartirme la base de datos que se encuentra digitalizada, para obtener la información de suelos objeto de análisis.

Finalmente, a todas las personas cercanas que, con sus ideas y palabras de motivación contribuyeron para terminar este proceso.

Resumen

Este documento propone los parámetros de resistencia al corte de los suelos de varias zonas del Departamento de Caldas según la clasificación SUCS, la posibilidad de implementar escoria de fundición de acería mezclada con suelo como material de relleno en obras de estabilización, y el cálculo y el proceso constructivo de obras tipo de muros con llantas. La finalidad es aportar a la ingeniería local e impactar de forma positiva principalmente en zonas donde se ejecutan menores inversiones para solucionar problemas de inestabilidades. La metodología consistió en procesar la información de noventa y tres muestras de suelos de las diferentes subregiones del departamento obtenida de la base de datos de la Gobernación de Caldas de los ensayos de laboratorio de caracterización de los suelos y el ensayo de corte directo, para procesarla aplicando estadística descriptiva.

Se establecieron las funciones de distribución estadísticas más adecuadas para los suelos finos y las arenas del Departamento de Caldas para obtener de allí los parámetros de resistencia al corte, se realizaron ensayos de laboratorio a la escoria de la siderúrgica Ternium, localizada en Manizales, Caldas, Colombia para realizar mezclas con suelos de clasificación conocida y evaluar su potencial como material de relleno, también se propuso una correlación entre el índice de plasticidad y el ángulo de fricción. Con base en estas propiedades se establecieron los elementos de construcción de muros en llanta, tipo “cartilla”.

Palabras clave: Muros de contención con llantas, resistencia al corte del suelo, Suelos finos, Arenas, Ángulos de fricción, Cohesión.

Abstract

THEORETICAL PROPOSAL FOR WALLS WITH TIRES ACCORDING TO THE CHARACTERISTICS OF THE SOILS IN THE REGION. CASE STUDY: DEPARTMENT OF CALDAS.

This document proposes the parameters of resistance to shear strength of a soil of the department of Caldas according to the SUCS classification, the possibility of implementing slag mixed with soil as backfill material in stabilization works, and calculation and the construction process of type retaining wall with tires. The aim is to provide civil engineering a positively impact in areas where less investment is being made to solve instability problems. The methodology consisted of processing the information of ninety-three soil samples from the different subregions of the department obtained from the Gobernación de Caldas database of soil characterization laboratory tests and direct shear test, for processing using descriptive statistics.

The most appropriate statistical distribution functions were established for fine grained soils and the sands of the Caldas department to get from there the parameters of shear resistance. Laboratory tests were carried out on the slag of the Ternium steel mill, located in Manizales, Caldas, Colombia to make mixtures with known sorting soils and assess its potential as a backfill soil. A correlation was also proposed between the plasticity index and the friction angle. Based on these properties, a "primer" of type walls with tyres was raised.

Keywords: Retaining wall with tires, Shear strength of a soil, Fine - grained soils, Sands, The friction angle, Cohesion.

Contenido

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	23
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
2.1 Descripción del problema	25
3. OBJETIVOS, ALCANCE Y JUSTIFICACIÓN.....	27
3.1 Objetivos.....	27
3.1.1 Objetivo general	27
3.1.2 Objetivos específicos.....	27
3.2 Alcances	28
3.3 Justificación	29
4. METODOLOGÍA	30
4.1 Tipo de estudio.....	30
4.2 Revisión bibliográfica	30
4.3 Ensayos de laboratorio	30
4.4 Análisis y resultados esperados	30
5. MARCOS.....	32
5.1 Antecedentes - Estado del arte.....	32
5.1.1 Muros de contención	32
5.1.2 Llantas usadas.....	35
5.1.3 Cenizas volantes y escorias.....	39
5.2 Marco contextual	43
5.3 Marco legal.....	43
5.4 Marco teórico.....	45
5.4.1 Estadística	45
5.4.1.1. Parámetros estadísticos	46
5.4.1.2. Distribuciones de probabilidad.....	47
5.4.1.3. Distribución Weibull	47
5.4.1.4. Distribución normal.....	47
5.4.1.5. Distribución log normal	48
5.4.1.6. Regresión y correlación.....	48
5.4.2 Propiedades mecánicas del suelo	48
5.4.2.1. Resistencia al corte de los suelos.....	48
5.4.2.2. Ángulo de fricción	49
5.4.2.3. Cohesión.....	52
5.4.3 Muros en llantas	53
5.4.3.1. Tipos de muros de contención con llantas.....	55

5.4.3.2. Sistemas de enlaces entre llantas	56
5.4.3.3. Dimensiones de llantas	58
5.4.3.4. Hipótesis de diseño	59
6. Caracterización de los tipos de suelos del Departamento de Caldas.	60
6.1 Suelos finos.....	61
6.1.1 Ángulo de fricción – Suelos finos.....	63
6.1.2 Cohesión – Suelos finos.....	65
6.2 Arenas	67
6.2.1 Ángulo de fricción – Arenas.	69
6.2.2 Cohesión – Arenas.....	71
6.3 Gravas.....	73
6.4 Análisis de datos	74
6.4.1 Ángulo de fricción.....	75
6.4.2 Cohesión.....	79
6.5 Caracterización de materiales alternativos como suelos – Ceniza volante y escoria de siderúrgica.....	80
7. Muros de contención con llantas	83
7.1 Muros tipo.....	83
7.1.1 Propiedades de los tipos de suelo	84
7.1.2 Detalle de los muros en llanta calculados.....	85
7.2 Proceso constructivo.....	86
7.3 Recomendaciones de diseño.....	88
7.4 Ventajas y desventajas de los muros con llantas.....	88
8. Conclusiones y recomendaciones	89
8.1 Conclusiones.....	89
8.2 Recomendaciones	93
9. Referencias bibliográficas	94

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1.- Árbol de problemas para la construcción de muros de contención con materiales alternativos.....	26
Figura 2.- Uso en la ingeniería civil de llantas para estructuras de estabilización.	38
Figura 3.- Localización subregiones del Departamento de Caldas.	43
Figura 4.- Relación entre el ángulo de fricción y los límites de Atterberg.	51
Figura 5.- Muros mecánicamente estabilizados con llantas.	55
Figura 6.- Muro de llantas con las recomendaciones de 'The Pneusol'.	56
Figura 7.- Nudo - Enlace entre llantas.....	56
Figura 8.- Enlace entre llantas implementando amarras de plástico.....	57
Figura 9.- Enlace con barras de acero entre llantas.	57
Figura 10.- Dimensiones de llantas del rin 14" al rin 19" en centímetros (cms).	58
Figura 11.- Diferencia en las dimensiones de las llantas entre rin 14" al rin 16".....	59
Figura 12.- Histograma de distribución de frecuencias para el ángulo de fricción en suelos finos.....	63
Figura 13.- Funciones de distribución para el ángulo de fricción de la muestra de suelos finos.....	64
Figura 14.- Porcentaje de error en las funciones de distribución para el ángulo de fricción en suelos finos.	64
Figura 15.- Histograma de distribución de frecuencias para la cohesión en suelos finos.	65
Figura 16.- Funciones de distribución para la cohesión de la muestra de suelos finos... ..	66
Figura 17.- Porcentaje de error de las funciones de distribución para la cohesión en suelos finos.....	66
Figura 18.- Histograma de distribución de frecuencias para el ángulo de fricción en arenas.	69

Figura 19.- Funciones de distribución para el ángulo de fricción de la muestra de arenas.	70
Figura 20.- Porcentaje de error de las funciones de distribución para el ángulo de fricción en arenas.	70
Figura 21.- Histograma de distribución de frecuencias para la cohesión en arenas.	71
Figura 22.- Funciones de distribución para la cohesión de la muestra de arenas.	72
Figura 23.- Porcentaje de error de las funciones de distribución para la cohesión en arenas.	72
Figura 24.- Diagrama de envolvente de falla Mohr – Coulomb.	75
Figura 25.- Variación del ángulo de fricción con el índice de plasticidad para suelos finos	77
Figura 26.- Variación del ángulo de fricción con el índice de plasticidad para arenas	78
Figura 27.- Preparación de la muestra de ceniza volante y escoria en el laboratorio.	82
Figura 28.- Detalles de muros con llantas de 2.0 metros de altura.	85
Figura 29.- Detalles de muros con llantas de 4.0 metros de altura.	85
Figura 30.- Detalles constructivos de los muros de contención con llantas.	87
Figura 31.- Refuerzo con geotextil entre llantas.	88
Figura 32.- Correlación propuesta entre el ángulo de fricción con el índice de plasticidad para suelos finos.....	91

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1.- Rango de pesos de los tipos de llantas.....	36
Tabla 2.- Propiedades físicas para algunos tipos de llantas.	36
Tabla 3.- Ventajas y desventajas del reciclaje de llantas.....	37
Tabla 4.- Descripción de los ensayos de laboratorio empleados.....	45
Tabla 5.- Valores representativos para el ángulo de fricción.	50
Tabla 6.- Relaciones para hallar la resistencia al corte no drenado.	52
Tabla 7.- Ecuaciones para el cálculo de muros de contención con llantas.	53
Tabla 8.- Resultados de la exploración geotécnica de puntos críticos.	61
Tabla 9.- Distribución de frecuencia para el ángulo de fricción.	63
Tabla 10.- Análisis de estadística descriptiva para el ángulo de fricción.....	63
Tabla 11.- Distribución de frecuencia para la cohesión.	65
Tabla 12.- Análisis de estadística descriptiva para la cohesión en suelos finos.	65
Tabla 13.- Parámetros geotécnicos para arenas del Departamento de Caldas.....	67
Tabla 14.- Distribución de frecuencia para el ángulo de fricción en arenas.	69
Tabla 15.- Análisis de estadística descriptiva para el ángulo de fricción en arenas.	69
Tabla 16.- Distribución de frecuencia para la cohesión en arenas.	71
Tabla 17.- Análisis de estadística descriptiva para la cohesión en arenas.....	71
Tabla 18.- Parámetros geotécnicos para otras clasificaciones de suelos en el Departamento de Caldas.....	73
Tabla 19.- Ángulos de fricción para suelos del Departamento de Caldas.....	76
Tabla 20.- Diferencia máxima para el porcentaje de error.	76
Tabla 21.- Cohesión para suelos del Departamento de Caldas.	79
Tabla 22.- Resumen de los ensayos de laboratorio de la muestra de escoria de la siderúrgica Ternium, ubicada en Manizales, Caldas, Colombia y otros tipos de suelo de la región.	80

XVI Propuesta teórica de muros con llantas de acuerdo con las características de los suelos de la región. Caso de estudio: Departamento de Caldas

Tabla 23.- Parámetro de diseño de los suelos finos del Departamento de Caldas.....	84
Tabla 24.- Parámetro de diseño de las arenas del Departamento de Caldas.....	84
Tabla 25.- Valores propuestos para el ángulo de fricción de los suelos del Departamento de Caldas.....	90
Tabla 26.- Valores propuestos para la cohesión de los suelos del Departamento de Caldas.....	90

Lista de ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1.- Media aritmética o valor medio muestral	47
Ecuación 2.- Desviación estándar.....	47
Ecuación 3.- Función teórica de Weibull.....	47
Ecuación 4.- Función de distribución normal	47
Ecuación 5.- Función de distribución log normal	48
Ecuación 6.- Ecuación de Coulomb.....	49
Ecuación 7.- Presión activa de tierras.....	53
Ecuación 8.- Presión pasiva de tierras.....	53
Ecuación 9.- Momento al volcamiento/m del muro	53
Ecuación 10.- Presión en el talón del muro.	53
Ecuación 11.- Fuerza horizontal del relleno/m del muro.	54
Ecuación 12.- Resistencia a la fricción.	54
Ecuación 13.- Factor de seguridad al deslizamiento.....	54
Ecuación 14.- Chequeo quitando las cargas de llantas de anclaje al nivel de la base. ..	54
Ecuación 15.- Carga final del enlace con cuerdas entre llantas.	54
Ecuación 16.- Carga de diseño del enlace	54
Ecuación 17.- Longitud de cuerda requerida.....	54
Ecuación 18.- Fuerza horizontal sobre las llantas.....	54
Ecuación 19.- Número de llantas enlazadas con la tensión de la cuerda.	54
Ecuación 20.- Presión vertical en la cara del muro con llantas	55
Ecuación 21.- Presión horizontal en la parte posterior del muro con llantas	55
Ecuación 22.- Consideración del sistema como viga.	55
Ecuación 23.- Distancia de presión vertical del muro con llantas	55
Ecuación 24.- Correlación entre el índice de plasticidad con el ángulo de fricción.	77

Lista de anexos

	Pág.
Anexo A- I.- Distribución normal – ángulo de fricción suelos finos.....	100
Anexo A- II.- Distribución log normal – ángulo de fricción suelos finos.....	101
Anexo A- III.- Distribución normal – ángulo de fricción arenas.....	102
Anexo A- IV.- Distribución log normal – ángulo de fricción arenas.	103
Anexo A- V.- Distribución normal – cohesión suelos finos.	104
Anexo A- VI.- Distribución log normal – cohesión suelos finos.	105
Anexo A- VII.- Distribución normal – cohesión arenas.	107
Anexo A- VIII.- Distribución log normal – cohesión arenas.	108
Anexo B.- Memoria de cálculo para muros tipo con llantas de 2.0 y 4.0 metros.	109
Anexo C- 1.- Detalle de muros con llantas de 2.0 metros de altura.	115
Anexo C- 2.- Detalle de muros con llantas de 4.0 metros de altura.	116

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
φ	Ángulo de fricción	kg/m ³	Kilogramo por metro cúbico
σ'	Esfuerzo normal efectivo en el plano de corte	kg/cm ²	Kilogramo por centímetro cuadrado
γ	Peso unitario	kN/m ³	Kilo Newton por metro cúbico
ι	Ángulo del talud natural	kg	Kilogramo
S	Desviación estándar	Ton	Tonelada
λ	Parámetro de escala	kPa	Kilo pascales
β	Parámetro de forma	m/s	Metros sobre segundo
\bar{x}	Media aritmética	Mpa	Mega pascales
ϵ	Pertenece	t/m ³	Toneladas por metro cúbico
R	Números reales	W/mK	Vatios por metro-Kelvin
\forall	Para todo		
e	Número de Euler		
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados		
\pm	Rango mayor o menor		
π	Número Pi		

Subíndices

Subíndice	Término
-----------	---------

cv	Volumen constante – Traducida.
------	--------------------------------

i	Contador de la serie numérica
-----	-------------------------------

Superíndices

Superíndice	Término
-------------	---------

n	Exponente, potencia
-----	---------------------

β	Parámetro de forma
---------	--------------------

$^{\circ}$	Grados
------------	--------

Abreviaturas

Abreviatura	Término
-------------	---------

CBR	Ensayo “ <i>California Bearing Ratio</i> ”
-----	--

CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad
----	--

CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad
----	--

GC	Gravas arcillosas
----	-------------------

GM	Gravas limosas
----	----------------

IP	Índice de plasticidad.
----	------------------------

LL	Límite líquido
----	----------------

LP	Límite plástico.
----	------------------

MH	Limos inorgánicos de alta plasticidad
----	---------------------------------------

ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.
----	--

SC	Arena arcillosa, mezcla de arena y arcilla.
----	---

SM	Arenas limosas
----	----------------

Abreviatura Término

SC-SM	Mezcla de arena arcillosa y limosa
S.U.C.S	Sistema unificado de clasificación de suelos.
SO _x	Óxidos de azufre
NO _x	Óxidos de nitrógeno
CO	Monóxido de carbono
COV _s	Compuestos orgánicos volátiles
<i>M</i>	Momento al volcamiento
<i>K_a</i>	Presión activa de tierras
<i>K_p</i>	Presión pasiva de tierras
<i>g</i>	Gravedad
<i>h</i>	Altura de los muros
<i>l</i>	Longitud del muro
<i>M</i>	Momento al volcamiento del muro
Sen	Función seno
Cos	Función coseno
Tan	Función Tangente
<i>t</i>	Grosor de la llanta
<i>d</i>	Diámetro de la llanta
INVIAS	Instituto Nacional de Vías

1.INTRODUCCIÓN

La propuesta de los elementos de construcción de muros de contención con llanta, tipo cartilla hace referencia a evaluar la estabilidad general de la estructura que se compone de la interacción suelo – llanta, la característica principal de esta investigación es que se analizaron los parámetros de resistencia al corte de una muestra de noventa y tres suelos del Departamento de Caldas de la base de datos de los ensayos de laboratorio de los estudios y diseños que realiza la Gobernación de Caldas clasificándolos según la metodología S.U.C.S en suelos finos y arenas, además se realizaron ensayos de laboratorio para una muestra de ceniza volante y escoria de la siderúrgica Ternium, localizada en Manizales, Caldas, Colombia y finalmente se siguió una metodología de cálculo con base en las propiedades obtenidas.

El interés de desarrollar este tema se basa en aprovechar información de uso público para conocer cómo varía el comportamiento de las propiedades mecánicas de los tipos de suelo del Departamento de Caldas que tenían datos suficientes para considerarse como muestra representativa para proponer tendencias generales de suelos finos correspondientes a arcillas inorgánicas de alta plasticidad (CH), arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad (CL), limos inorgánicos de alta plasticidad (MH) y limos inorgánicos de baja plasticidad (ML) y arenas en las cuales se encuentran las arenas arcillosas (SC), las arenas limosas (SM) y las arenas arcillo-limosas (SC-SM). Por otra parte, el desarrollar los elementos que harían parte de una cartilla de forma clara y adaptada a las condiciones locales para una alternativa de estabilización que ha sido implementada y que impacta en el costo – beneficio de las obras civiles de intervención de puntos críticos debido al uso de materiales considerados como desecho, contribuyendo a usos amigables con el medio ambiente y profundizando en soluciones de tipo geotécnico para mejorar los procesos artesanales de estas estructuras que son comunes en las vías.

La metodología utilizada fue la revisión artículos científicos, libros técnicos, tesis o trabajos de grados, bases de datos científicas y literatura gris, con esto se procedió a la aplicación de técnicas de estadística descriptiva para procesar la información robusta, mediante gráficas y parámetros estadísticos del ángulo de fricción, la cohesión, la granulometría (pasante del tamiz N° 4 y N° 200), los límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad), peso unitario seco y húmedo y la clasificación S.U.C.S de los tipos de suelo del Departamento de Caldas y realizar ensayos de laboratorio a la ceniza volante y la escoria de la siderúrgica Ternium para evaluar sus propiedades para utilizarla como material dentro de la ingeniería civil, para los muros en llanta se hizo una revisión de las dimensiones de las llantas existentes en el mercado, los tipos de configuraciones de muros de contención, los sistemas de anclaje y enlace encontrados para la unión llanta – llanta, las suposiciones de diseño, el proceso constructivo y las recomendaciones de diseño, con la esquematización de los detalles y los muros propuestos.

El propósito principal es mostrar las metodologías existentes de diseños de muros con llantas como un mecanismo de estabilización funcional, adaptándolo a los parámetros de tipo de suelo del Departamento de Caldas. El documento se encuentra distribuido en el capítulo introductorio donde se encuentra el planteamiento del problema, los objetivos, alcances, justificación y metodología, a continuación el capítulo de los marcos donde se encuentran los antecedentes, el marco contextual, el marco legal y el marco teórico, después se encuentra el capítulo de caracterización de los tipos de suelo del Departamento de Caldas y los muros de contención con llantas, cada uno con el procedimiento experimental o la revisión metodológica y el análisis de resultados, finalmente se tienen las conclusiones referencias y anexos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Descripción del problema

En la zona tropical las lluvias y las condiciones estructurales del relieve montañoso hacen que se presenten inestabilidades y se generen deslizamientos en las laderas afectando vías de comunicación. Estas afectaciones son atendidas según el nivel de importancia estratégica y la prioridad de la vía dentro de la red vial departamental. Las vías terciarias reciben una menor atención e inversión, por lo tanto, los tratamientos geotécnicos convencionales limitan el alcance de las obras civiles al tornarse el factor económico en la variable principal.

Las temporadas de lluvias dan lugar a la aparición de puntos críticos en la red vial del Departamento de Caldas, que se atienden con obras de estabilización en los tramos que representan mayor importancia estratégica, para recuperar los anchos de calzada y la sección típica de la vía, buscando retornar la movilidad y la seguridad vial. Sin embargo, quedan una gran cantidad de sitios por atender, que conociendo los suelos del Departamento de Caldas se podría mejorar la relación costo – beneficio mediante la construcción de muros con llantas.

La disposición final de llantas usadas y materiales alternativos como escoria y ceniza volante se da mediante procesos que afectan al medio ambiente de manera importante. Esto se puede disminuir dándole usos alternativos a estos materiales en artesanías, en la industria y en la ingeniería. En la **Figura 1** se observa el árbol de problemas, estableciendo la relación causa y efecto del planteamiento principal que busca resolver este trabajo de grado.



Figura 1.- Árbol de problemas para la construcción de muros de contención con materiales alternativos.

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, las entidades públicas del departamento en los planes de desarrollo generan una matriz de alcances en los períodos de gobierno, destinando un gran porcentaje para las obras de infraestructura. La gobernación de Caldas, la alcaldía de Manizales, Inficaldas, Infimanizales y Corpocaldas ejecutan una gran cantidad de estudios y diseños para la estabilización de sitios críticos particulares a lo largo del departamento en los que se obtienen parámetros geotécnicos. Esta información se podría usar para tener un mayor conocimiento de los suelos de la región.

Lo anterior, acompañado de la escasa información que se conoce de las propiedades mecánicas, físicas y químicas de materiales alternativos como llantas usadas, cenizas volantes o escorias producidas en las siderúrgicas locales para su uso en la ingeniería.

Finalmente, el desarrollo de este trabajo de grado aportaría a una propuesta amigable con el medio ambiente, validando el modelo mediante la ingeniería con una alternativa adicional a muros de gravedad y de tierra armada, mejorando el costo – beneficio y reduciendo los tiempos de construcción, beneficiando principalmente a las vías terciarias en cuanto a las metas físicas de los proyectos.

3.OBJETIVOS, ALCANCE Y JUSTIFICACIÓN

3.1 Objetivos

3.1.1 Objetivo general

- Establecer los elementos de construcción tipo “cartilla” para el diseño y construcción de muros en llantas, con la caracterización de los suelos de la región como materiales de relleno y de apoyo o fundación.

3.1.2 Objetivos específicos

- Realizar el procesamiento de la información existente en la base de datos de los estudios y diseños de la Gobernación de Caldas, para obtener los parámetros geotécnicos del ángulo de fricción, la cohesión y la clasificación de los suelos para distintos sitios del Departamento de Caldas, con la finalidad de establecer unos parámetros generales de los suelos de la región para el diseño de alternativas de estabilización.
- Establecer un modelo de teórico de cálculo de muros en llantas, basando los mecanismos de análisis en el ángulo de fricción y la cohesión de los suelos analizados, partiendo de la clasificación de los suelos.
- Proponer muros tipo en llantas a partir de la altura y de las propiedades del suelo de relleno con base en la información del trabajo de grado.
- Llevar a cabo un documento con los elementos de construcción tipo “cartilla” de diseño y construcción de muros en llantas, aplicado a las características de suelos del Departamento de Caldas; pero con alcance al desarrollo de alternativas fundamentadas en ingeniería, amigables con el medio ambiente y que impacten la relación costo – beneficio de las obras civiles.

3.2 Alcances

Este trabajo final propondrá un documento con los elementos de construcción tipo “cartilla” para la construcción de muros en llantas y la caracterización de los suelos del Departamento de Caldas a través de la clasificación de los suelos y los parámetros del ángulo de fricción y la cohesión. Los alcances serán:

- Obtener de manera general para varias zonas del Departamento de Caldas los valores normales de los parámetros geotécnicos del ángulo de fricción y la cohesión, para suelos finos (CH, CL, ML y MH) y arenas (SC, SM y SC-SM), mediante el procesamiento de noventa y tres (93) ensayos de laboratorio de corte directo y clasificación de suelo existente en la base de datos de los estudios y diseños realizados por la Gobernación de Caldas para vías y sitios críticos de las subregiones Occidente alto, Occidente bajo, Norte, Centro sur, Norte y Magdalena.
- Aprovechar la información generada por las entidades públicas como la Gobernación de Caldas, las alcaldías de los diferentes municipios de Caldas, Corpocaldas, Inficaldas, Infimanizales y Corpocaldas en la realización de estudios y diseños, abriendo el camino para que posteriormente su utilización particular pueda consolidar la caracterización de los suelos en las diferentes subregiones del departamento.
- Obtener parámetros de resistencia de materiales alternativos como cenizas volantes o escorias de la siderúrgica Ternium, ubicada en la ciudad de Manizales, Caldas para establecer un aporte sobre la conveniencia de su utilización como suelo de relleno en obras de estabilización.
- Calcular muros en llantas empleando los materiales alternativos y los suelos del Departamento de Caldas en las teorías de muros de gravedad y muros mecánicamente estabilizados (MES).
- Proponer muros tipo mostrando el proceso constructivo y los elementos de construcción tipo “cartilla” de diferentes alturas, así como los suelos de relleno, de apoyo o fundación basados en parámetros geotécnicos generales para suelos finos y arenas, obtenidos para el Departamento de Caldas.

3.3 Justificación

Factores topográficos, climáticos, medio ambientales y económicos requieren el desarrollo constante de la geotecnia. Estabilizar laderas, mejorando la relación costo – beneficio, por medio de soluciones como muros de gravedad o muros mecánicamente estabilizados empleando los suelos de la región, materiales alternativos tales como llantas u otros materiales que puedan funcionar como relleno (Cenizas volantes y escorias). Con esto la red vial terciaria sería un beneficiario con la ampliación de las metas físicas de los proyectos.

En el contexto ambiental contribuiría a la disposición final de llantas usadas que tardan en biodegradarse como mínimo 100 años, disminuyendo disposiciones finales indeseadas como la quema, la acumulación desordenada, la generación de vectores sanitarios; aportando usos adicionales y reduciendo los impactos nocivos.

En zonas de influencia cercana a empresas productoras de energía como termoeléctricas o siderúrgicas, se podría utilizar la escoria y la ceniza volante generada para el relleno de los muros, porque las propiedades físicas y químicas de estos materiales son adecuadas como lo indica la literatura técnica. Sin embargo, se convierten en un caso particular objeto de estudio por medio de ensayos de laboratorio para definir su aplicabilidad.

Asimismo, se debería aprovechar la información generada en los estudios y diseños que realizan las entidades públicas, para producir información general acerca de los suelos que permita actuar de forma eficiente y técnica frente a problemas que necesitan una atención prioritaria.

Finalmente, aportar al diseño y construcción técnica de una cartilla para muros en llantas, para ampliar las metas físicas de los proyectos, mejorando un proceso que se realiza de forma artesanal y que funciona de forma adecuada.

4. METODOLOGÍA

4.1 Tipo de estudio

El trabajo final se desarrolla mediante un estudio descriptivo. A partir de una muestra de ensayos de laboratorios existentes se realizará un análisis estadístico a los datos, hallando los valores normales por medio de funciones de densidad representadas gráficamente con la finalidad de obtener valores de diseño de los suelos para el Departamento de Caldas y con esta parametrización llevar a cabo el cálculo y diseño de muros en llantas como alternativas geotécnicas con fundamento en la ingeniería.

4.2 Revisión bibliográfica

La información teórica consiste en la revisión de artículos científicos, libros técnicos, tesis o trabajos de grados, bases de datos científicas y literatura gris.

4.3 Ensayos de laboratorio

Se analizarán los ensayos de laboratorio de corte directo, clasificación de suelos según la metodología SUCS de noventa y tres (93) muestras de suelos de los estudios y diseños de puntos críticos existentes en la base de datos de la Gobernación de Caldas.

4.4 Análisis y resultados esperados

El análisis de datos y los resultados según el planteamiento del trabajo final, se da de la siguiente manera:

- Se organiza la información de los puntos críticos de cada una de las subregiones del Departamento de Caldas.
- Se establecen los parámetros, agrupando según los tipos de suelos de acuerdo con la clasificación SUCS, en:

- Suelos finos (CH, CL, ML y MH).
- Arenas (SC, SM y SC-SM).
- Gravas (GC y GM).
- Se aplica estadística descriptiva, obteniendo las variables para realizar las funciones de distribución normal y distribución log normal para analizar los valores de los ángulos de fricción y de la cohesión.
- Se comparan ambas funciones de densidad con la distribución teórica, para proponer la que tenga una menor diferencia en valor absoluto y que se ajuste más a los datos de la muestra de los ensayos de laboratorio.
- Se analizan los valores de los ángulos de fricción y de la cohesión en un intervalo de confianza que permita elegir los valores de diseño según su clasificación como suelos finos y arenas en el Departamento de Caldas.
- Para las gravas y los materiales alternativos, de los que no se disponen de suficientes datos para realizar un tratamiento estadístico, se planteará la hipótesis del comportamiento y se propondrá como profundizaciones de estudios futuros.

Con la información obtenida se realizará el modelo de estabilidad para muros tipos en llantas con base en los parámetros geotécnicos generales propuestos para el Departamento de Caldas, esto consistirá en:

- Establecer obras tipos con ángulos de fricción y cohesión propuestos para los suelos finos, las arenas o la combinación con materiales alternativos en el Departamento de Caldas, así como diferentes alturas de muros según la metodología de diseño implementada en el modelo (Muros de gravedad, muros mecánicamente estabilizados o muros en tierra armada).
- Plantear la propuesta teórica definiendo las propiedades mecánicas de los materiales, realizando la revisión de las sollicitaciones y los tipos de fallas del modelo, revisando las cargas de uso posibles, evaluando los factores de seguridad y estableciendo cómo calcular la fuerza de los enlaces para las llantas.

5.MARCOS

5.1 Antecedentes - Estado del arte.

5.1.1 Muros de contención

Charles Agustin Coulomb en 1773 publicó un artículo sobre presión de tierras en muros de contención con supuestos realistas deducidos mediante las observaciones de campo respecto a la forma de la superficie de falla, teoría que aún en la actualidad se aplica (Bowles, 1997; Peck et al., 1974).

Rankine en 1857 consideró el suelo en un estado de equilibrio plástico y usó esencialmente los mismos postulados de Coulomb, a excepción de que no consideró la fricción o la cohesión del suelo. Bell en 1915 incorporó la cohesión como un parámetro en la ecuación de presión lateral de tierras obtenida del círculo de Mohr que no había sido considerada por Coulomb o Rankine. Caquot y Kerisel en 1948 produjeron tablas de presión de tierras basadas en superficies de falla no lineales. Janbú en 1957 y luego Shield y Toluany en 1973 propusieron un acercamiento a la presión de tierras a través del método de las dovelas usando el análisis de estabilidad de pendientes. Sokolovski en 1960 presentó una solución aplicando diferencias finitas. Todas estas soluciones daban menores valores para el coeficiente pasivo de presión de tierras, que no variaban significativamente de los métodos de Coulomb y Rankine. (Bowles, 1997).

Para validar la confiabilidad de la presión lateral de tierras de Coulomb y Rankine, incluyó los ensayos de campo y modelos de Terzaghi (1934), Peck e Ireland (1961), Rowe y Peaker (1965), Mackey y Kirk (1967), James y Bransby (1970), Rehnman y Broms (1972), tienden a confirmar el concepto de presión activa de tierras, si el relleno se coloca adecuadamente para que los efectos de la compactación no creen tensiones excesivas y

si la pared gira y/o se mueve lo suficiente para generar la máxima resistencia al corte del suelo (Bowles, 1997).

El punto de aplicación de la fuerza sobre el muro fue propuesta por Terzaghi (1943), dividiendo en tres casos donde el primero donde no se tiene cargas concentradas sobre el relleno, la fuerza se localiza en el punto $H/3$, para los otros casos se tiene la fuerza aplicada antes y después del plano de falla y ya entra a consideración para el criterio su aplicación.

Según Kramer (1996) el desarrollo de la geotecnia tras la ocurrencia de los sismos que afectan las estructuras han permitido por medio del diseño racional, el desarrollo de refuerzos metálicos, poliméricos o geotextiles. Entender este funcionamiento ha generado mayor vida útil y mitigar con mayor confiabilidad el fallo en estas estructuras. Él aporta al desarrollo de teorías de diseño sísmico en muros de contención en tierra, en función del factor de seguridad, a través de la teoría de Rankine, la teoría de Coulomb, el método de la espiral logarítmica, el método del análisis esfuerzo - deformación, el método Mononobe-Okabe y el método Steedman-Zeng.

Los muros de contención tienen dos fases en su cálculo: en la primera se debe conocer la presión lateral, revisar estabilidad frente a diferentes tipos de falla (volteo, deslizamiento y capacidad de carga) y en la segunda fase se revisa que la resistencia del muro sea la adecuada. La teoría de muros de gravedad, de muros de semi-gravedad y de los muros mecánicamente estabilizados considera que pueden tener elementos de refuerzo tales como tiras metálicas, mallas de alambre soldado, geotextiles geomallas. El proceso de diseño consiste en realizar un pre-dimensionamiento y analizar su estabilidad externa e interna. En caso de no cumplir con los controles de estabilidad se deben cambiar las dimensiones de las secciones hasta alcanzar los valores exigidos para las diferentes sollicitaciones (Das, 2001).

Respecto a la durabilidad de estas estructuras se consideran como principales causas de deterioro en las llantas: el desgaste por rodamiento, la luz solar y el agua. En estas condiciones la durabilidad sería de 100 años y si las llantas estuvieran bajo tierra la vida útil sería aún mayor (Sims & Gaffney, 1976). El objetivo es aprovechar las llantas como

materiales de construcción en la ingeniería civil, reduciendo a una cuarta parte del costo de un muro convencional similar e inclusive con un mayor desarrollo el costo podría reducirse aún más según las experiencias realizadas, ayudando a resolver el problema de disposición final donde los principales métodos son el rencauchado, la recuperación, la incineración y la acumulación de llantas. Como material están disponibles en cantidades suficientes, además de ser baratas, fácilmente disponibles, durables, flexibles, con cargas de tensión considerables, fácil de manipular y transportar y permite el monitoreo de movimientos y deformaciones.

Las ventajas de la utilización de los muros de llantas son que: funcionan como estructura flexible y se mueven con los asentamientos del suelo sin agrietarse, la fricción llanta - llanta puede llegar a ser muy alta sin ninguna deformación (Valor estimado del coeficiente de fricción de 0.75). El llenado de las llantas se logra fácilmente con el uso de una pala o un trozo de madera. Cuanto más se llenen, mayor será la densidad compuesta con ventajas tales como que el ancho del muro y el número de neumáticos pueden reducirse y la rigidez del muro aumentará. En los muros en llanta construidos por el área 4 de la unidad de mantenimiento de carreteras de DOPET en el condado metropolitano de West Yorkshire y Santa Cruz California por el departamento de transportes de California, el suelo de relleno se consideró como arcilla cohesiva seca de baja resistencia, el nivel de desplante fue de un metro y medio, se incorporó un sistema de drenaje tipo filtro francés, se descubrió que obtener una implantación totalmente efectiva en la cara era difícil para pendientes más pronunciadas que aproximadamente 1 en 1 (Sims & Gaffney, 1976).

Rodríguez Gonzáles (2016) afirma que los muros en llantas son 24% más económicos que los muros mecánicamente estabilizados y 67% más que los de concreto reforzado. Las propiedades mecánicas del ángulo de fricción del conjunto disminuyen respecto al del material del relleno, del ensayo de corte directo se puede observar que se está presentando un incremento en la cohesión y que los conectores de acero otorgan mayor resistencia al cortante. El montaje fue realizado contiguo al laboratorio de Geotecnia de la universidad Cooperativa de Colombia en el cual se construyó un muro de contención con llantas en escala real y un aparato de corte directo para evaluar las propiedades y el comportamiento de este con el suelo de relleno que se encontraba en el sitio del muro. Se

calculó el empuje total, la presión lateral de tierras y se revisó las solicitaciones del terreno aplicando las teorías Coulomb o Rankine estático, Mayniel estático y Muller-Breslau estático; se hace la revisión de los factores de seguridad al deslizamiento y al volcamiento, cargas sísmicas y la capacidad de carga y la metodología de diseño usada es la AASHTO, proponiéndolos como solución viable económica y geotécnicamente.

5.1.2 Llantas usadas

Para el año 2015 en Bogotá, capital de Colombia los vehículos particulares que eran el 91% del parque automotor generaban 1.670.395 llantas usadas y el servicio público generó 389.160, para un total de 2.059.555 llantas usadas o 18.861 toneladas por año, de las cuales el 71.9% (1.910.027) que representan unas 13.560 toneladas se utilizaron para producir energía, el 17.2% (78.180) unas 3.245 toneladas fueron reencauchadas, el 6.2% para uso artesanal, 2.3% fueron regrabadas y el otro 2.3% en otros usos. Las mayores afectaciones se dan en el uso energético, que afecta el aire con SOX, NOX, CO, COVs, contaminantes carcinogénicos y mutagénicos. El agua y los suelos con los sólidos depositados, con la escorrentía y disposición de cenizas y escorias en zonas no autorizadas, el entorno biótico al afectar plantas y animales en las zonas de influencia y deteriorando el paisaje, otras implicaciones se dan en la recuperación para el transporte por la emisión de los vehículos, la contaminación visual y la ocupación del espacio público, los menores impactos se dan en el reencauche, el regrabado y el uso artesanal (OCADE LTDA, 2015).

En Colombia cada año se producen 61.000 toneladas de llantas usadas, para administrar la disposición final la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) tomó el liderato. De estos materiales solo se alcanza a comercializar un 50% en la producción de subproductos por medio de corporaciones que se encargan de la recolección mediante diferentes empresas en distintas ciudades y municipios del país, regulados por la resolución 1326 el 6 de julio de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Revista Auto Crash, 2018).

En CEMPRE (1998); Hylands & Shulman (2003); Simm, J. D., & Wallis (2004) y Sims & Gaffney (1976), explican algunos usos directos (No es necesario realizar ningún tipo de procesamiento industrial) que se le dan a las llantas usadas en la ingeniería civil con casos de aplicación en diferentes países a nivel mundial

- Arrecifes.
- Acción correctiva para fallar paredes de gravedad de mampostería.
- Defensas marítimas.
- Elemento de contención en parques y terrenos de juego.
- Estabilizando montones de escombros.
- Barreras de choque.
- Barreras de ruido.
- Montículos de cribado para unidades de eliminación de residuos sólidos.
- Muros de contención por gravedad.
- Obstáculos para el tránsito.
- Orientación para muros de tierra armada.
- Permitir la construcción de terraplenes con pendientes laterales empinadas.
- Permitiendo que los terraplenes tomen tensión dentro de las capas base.
- Pilares de puentes.
- Proyectos para la construcción de rellenos sanitarios considerando la estabilización del manto impermeable con una estructura de cauchos amarrados entre sí.
- Señalamiento de los costados de las carreteras.
- Terraplenes.

Simm, J. D., & Wallis (2004) presentan como se puede ver en la **Tabla 1** y **Tabla 2**, los resultados de diferentes ensayos realizados a algunos tipos de llantas para obtener el peso y algunas propiedades físicas de las llantas.

Tabla 1.- Rango de pesos de los tipos de llantas.

Tipo de llanta	Peso promedio kg	Número por toneladas
Coche de pasajeros	6.5 - 7.0	153.8
Transporte Público	11	90.9
Camiones	52.5	19

Fuente: "Table 3.4 Average weights of used tyres (Shulman, V., ETRA)". (Simm, J. D., & Wallis, 2004).

Tabla 2.- Propiedades físicas para algunos tipos de llantas.

PROPIEDAD FÍSICA	VALORES TÍPICOS
Ángulo de fricción	19° - 26°
Densidad aparente	~350 - 500 kg/m ³

PROPIEDAD FÍSICA	VALORES TÍPICOS
Densidad compactada	600 - 700 kg/m ³ (Aumenta a 990 kg/m ³ bajo 400kPa de tensión vertical)
Cohesión (kPa)	5 - 1
Compresibilidad	20% - 50% (De 21 - 147 KN/m ³)
Conductividad hidráulica	1x10 ⁻² - 1x10 ⁻³ m/s
Densidad aparente suelta	3.3 - 4.8 KN/m ³
Tamaño de partículas	Trozos pequeños
Coefficiente de Poisson	0.2 - 0.35
Modulo resiliente	1 - 2 Mpa
Gravedad específica	1.1 - 1.27 t/m ³
Conductividad térmica	0.15 - 0.23 W/mK
Absorción de agua	2% - 4%

Fuente: "Table 3.5 Typical values for physical properties (Shulman, V., ETRA)". (Simm, J. D., & Wallis, 2004).

Hylands & Shulman (2003) muestran las ventajas y desventajas de la implementación de llantas usadas para reciclaje en Reino Unido (UK) para el año 1.998 como se observa en la **Tabla 3**.

Tabla 3.- Ventajas y desventajas del reciclaje de llantas.

Uso	Descripción	Ventajas	Desventajas	Tamaño aproximado del mercado (toneladas) para 1998
Reciclaje	Aplicaciones en la Ingeniería Civil, rompeolas, barreras de reducción de ruido, estabilización de taludes, entre otros	<ul style="list-style-type: none"> Llantas requieren poco o nada de procesamiento Potencial de uso de grandes volúmenes No depende de un sector de mercado 	<ul style="list-style-type: none"> Mercado incierto en la actualidad Falta de especificaciones limita su uso en aplicaciones más grandes La mayoría de las aplicaciones potenciales se encuentran aún en investigación Usos finales de bajo valor 	25,000

Fuente: Extracto de "Table 2 Uses for post- Consumer tyres in 1998 in the UK" (Hylands & Shulman, 2003).

También Simm, J. D., & Wallis (2004) por medio de experiencias de construcción de muros con llantas donde un lado es removido y se utilizan rellenos de gravas, guijarros, suelos y arenas y para reducir el riesgo de deformación lateral se recomienda que los neumáticos se conecten de alguna manera y se anclen con intervalos dentro del relleno, dado que

algunos muros con llantas han experimentado una deformación lateral donde la fricción negativa de las paredes traseras (causada por la mayor compresión de los muros con llantas) ha aumentado significativamente la presión activa que actúa sobre ellas, presentan como casos de estudio el muro sobre Mill Burns cerca de Inverness en Escocia y una investigación en la Universidad Católica de Rio de Janeiro en Brasil.

A continuación, en la **Figura 2** se muestran algunas configuraciones y ejemplos de muros en llantas sin procesamiento dentro de la ingeniería civil.

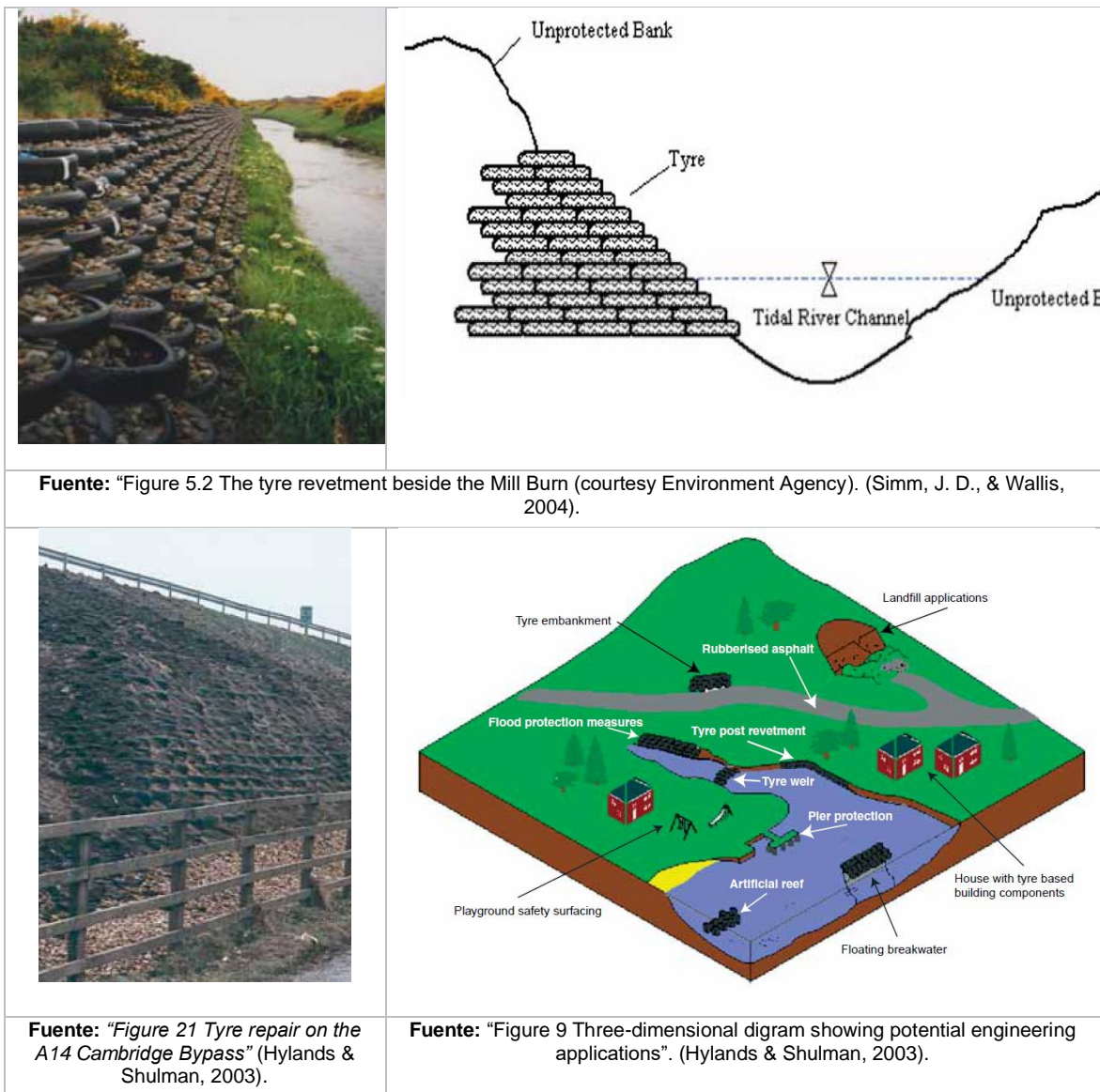


Figura 2.- Uso en la ingeniería civil de llantas para estructuras de estabilización.

5.1.3 Cenizas volantes y escorias.

El uso de la ceniza volante y la escoria producida en las siderúrgicas y termoeléctricas se han extendido en la ingeniería civil, debido a que se busca mitigar la disposición final de este residuo. Este material alternativo se puede implementar como relleno en la construcción de muros de contención, la estabilización y cementación de suelos contaminados, terraplenes, subbase, base, materiales cerámicos, entre otros.

Las cenizas volantes son el producto de la combustión del carbón pulverizado de las centrales térmicas, que es arrastrado por los gases en el proceso y recuperado a través de filtros, siendo el producto final un polvo fino, la densidad real varía entre 1.350 y 1.650 kg/m³, tiene una alta relación de vacíos, generalmente del 40%, lo que confiere a la ceniza un buen comportamiento en los ciclos de carga - descarga, su peso unitario entre el 70% - 80% más bajo que los otros suelos y en procesos de compactación asienta menos del 1%. (CEDEX, 2011; Dermatas & Meng, 2003; Valencia & Elena, 2001). De la ceniza se derivan algunos subproductos derivados como vidrio, cerámica, hormigones, estabilización de suelos, subbases, entre otros. Valencia & Elena (2001) afirma que existen 3 procedimientos de obtención de la ceniza volante, a través de centrales térmicas de alta temperatura (1.500°C – 1.700°C), de combustión seca (1.110°C – 1.400°C) y de lecho fluidificado (<900°C), tomando como referente el primer proceso mencionado para contextualizarlo de manera local, se tiene la ceniza volante clase F, que se genera a partir de la combustión de antracitas y carbones bituminosos, cuya suma de óxidos ácidos es mayor del 70%.

La producción de ceniza volante en India en el período 2014 - 2015 fue de 184.14 millones de toneladas, de los que solo el 55.69% fue utilizado. La capa superficial de las cenizas volantes es muy susceptible a la erosión, en ambos extremos climáticos ya sea en tiempo seco o en periodo de lluvias, ésto contribuye a la disminución de la densidad seca del material y la resistencia. Santayana y Mazo (1994), implementaron pruebas de carga, utilizando la ceniza volante y escoria de la central térmica Lada en España. Realizaron ensayos de laboratorio de compresión inconfiada y el ensayo triaxial para evaluar el potencial del material como terraplén para lo cual se construyeron 7 llenos, con altura de

2 metros, que estaban compuestos de ceniza volante compactada y escoria, en condiciones favorables de drenaje. El contenido de agua se manejó en un rango del 8% al 13%, la densidad máxima alcanzada fue de 1.460 Kg/m³ (en el proctor estándar 1.440 kg/m³ y en el proctor modificado 1.490 kg/m³), la permeabilidad obtenida en el laboratorio fue de 10⁻⁷ m/seg y la obtenida en campo fue de 10⁻⁶ m/seg. Las capas de la ceniza volante de la central térmica Lada fueron compactadas con vibrocompactador de rodillo.

Baykal et al. (2004) demuestran que el hielo puede ser utilizado satisfactoriamente para introducir un mayor contenido de agua en el proceso de compactación de la ceniza volante, sin causar problemas en la trabajabilidad del material, los terraplenes tendrán un peso más ligero, mayor estabilidad y, gracias a la mayor proporción de vacíos, la propiedad de aislamiento será mejor, esto disminuirá los costos del transporte. Añadir agua a las cenizas volantes para mejorar las condiciones cementantes del material sin sacrificar las condiciones de compactación, esto permite la construcción de terraplenes, bases y subbases durante el invierno en regiones frías. La ceniza volante analizada procede de la central térmica Soma, que se ubica en Turquía en la región de Aegean, el hielo se obtuvo de la nieve natural en invierno, los especímenes de prueba se prepararon mezclando un contenido óptimo de humedad del 10% en forma de hielo, las dimensiones del molde de prueba corresponden a 3.6 cm de diámetro y una altura de 7.6 cm, se tenía un martillo miniatura que proporcionaba energía de compactación de 600 kN m/m³ en tres capas, las muestras fueron envueltas en plástico y hojas de aluminio para ser almacenadas en un cuarto de curado para 1, 7, 14, 28 y 90 días a 21°C y 80 muestras preparadas (8 repeticiones por cada punto). La compactación de la ceniza es muy sensitiva al nivel de agua, entre un 1% a un 2% sobre el nivel óptimo de agua hace la compactación imposible. La ceniza volante tipo F, puede mezclarse con cal e iniciar las reacciones de cementación, la adición de nieve causa un aumento del 30% en la relación de vacíos; 14% de disminución en peso unitario, 70% de incremento en la resistencia al corte y el contenido de agua se puede incrementar en un 48% con la adición de nieve, esto genera ventajas para establecer rellenos ligeros y la cantidad de cenizas volantes para compactar el mismo volumen de terraplén disminuirá, disminuyendo igualmente los costos.

Calzada Pérez, Miguel Ángel, Vega Zamanillo, Ángel, Pascual Montejo, Ignacio, Hernández Sanz (2008) plantean que las cenizas volantes pueden considerarse como arenas de granulometría continua, de calidad bien gradadas con pocos finos y que presentan poca o nula plasticidad. Es claro que se debe conocer el comportamiento físico y químico de las cenizas volantes para ser propuesto como material competente. La densidad seca solo se modifica en 0,2-0,1 gr/cm³ variando de un 0% a un 20% de humedad, los valores de CBR que corresponden a estas densidades máximas se encuentran en un rango muy alto de capacidad portante.

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX, 2011), establece diferencia entre la escoria y la ceniza volante por el tamaño de las partículas. En terraplenes pueden presentar ventajas como poco peso volumétrico, menor compresibilidad (menores asentamientos diferenciales), buena capacidad de soporte, al combinar con un material cohesivo aumenta la resistencia al corte con el tiempo. En condiciones saturadas se disminuye la resistencia. Por su naturaleza cohesiva deben ser compactadas con compactadores neumáticos. No funciona como material homogéneo, no se ha comprobado ser un material que a través de escorrentía genere contaminación y son apropiadas en la realización de muros tierra armada, además debido a que su peso unitario está entre un 70% y un 80% menor que otros suelos, el asentamiento a largo plazo es menor que el 1%. por lo cual la resistencia al corte aumenta con el tiempo. La mayor limitación de este material se encuentra en las condiciones de humedad, cuando se satura la resistencia disminuye perdiendo capacidad portante. Por su reducido peso específico y su naturaleza cohesivo-friccional, induce reducidas presiones laterales. En su uso en muros de tierra armada se recomienda emplear elementos de refuerzo no metálico por su agresividad química.

Pérez Collantes (2012) afirma que por las condiciones naturales cuando un terreno no sea apto para la implementación de este material, se puede hacer una mezcla con el suelo en el sitio. Con respecto a los suelos arcillosos una concentración del 25%, permiten el incremento de la capacidad de soporte de la subrasante, esto se da por factores como la cementación generada al hidratarse el aluminato tricálcico presente en las cenizas volantes. La cal libre (CaO) reacciona con los minerales de la arcilla, causando compresión

de la capa de adsorción y la reducción en la plasticidad, proceso en el que no se da la total reacción química de la cal libre y todavía queda para realizarse el proceso de cementación adicional a través de la reacción puzolánica.

Las investigaciones realizadas por Kumar & Mandal (2017) sobre la implementación la ceniza volante como relleno para muros en una configuración escalonada (modelo reducido). El procedimiento consistió en unos modelos aplicando unas distancias de desfase de $0L$, $0.2L$, $0.4L$ y $0.6L$ teniéndose que L es la altura de la capa inferior y la longitud del refuerzo implementado fue de $0.7H$ para analizar el comportamiento. En el patrón de falla del modelo se encontró que la inclusión del refuerzo incrementa la distancia crítica de desfase, ésta debe ser 0.4 veces la altura de la capa inferior para el modelo sin refuerzo y 0.6 veces la altura de la capa inferior para la condición del modelo reforzado, el refuerzo disminuye el desplazamiento de la cara horizontal del muro. Los métodos de análisis aplicados fueron el de equilibrio limite y la mecánica de medios continuos. La inclusión del refuerzo reduce la deformación horizontal, asimismo la configuración geométrica juega un rol importante en la estabilidad en los muros de contención, el incremento en la distancia de desfase ayuda a disminuir los desplazamientos en la cara del talud.

Xu & Shi (2018) plantean que se pueden reemplazar los agregados no renovables con materiales reciclados, aplicando una gestión de desechos (SCM por sus siglas en inglés) con materiales como ceniza volante, escoria de alto horno, entre otros para una sustitución parcial o completa del cemento Portland; esto generaría una producción más limpia reduciendo emisiones, contaminantes del aire, residuos relacionados con la minería y la fabricación de materiales alternativos. Diferentes usos ingenieriles se pueden dar como geopolímeros basados en ceniza volante y otros campos de aplicación son los rellenos fluídos, terraplenes, base de rodadura, el arenado, catálisis, aplicaciones mineras, estabilización con residuos, agricultura y servicios petroleros. Esta revisión se enfoca en los avances recientes en la caracterización, la composición, el mecanismo de hidratación, enfoque de activación, la durabilidad y la sostenibilidad a modo de estado del arte, sintentizando la información con la metodología PQRS. En la ceniza volante la sostenibilidad ecológica puede ser medida en terminos de la evaluación del ciclo de vida y

un análisis de costo beneficio, aportando con la reducción del impacto ambiental de hasta el 43% basado en el índice potencial del calentamiento global.

5.2 Marco contextual

En este trabajo final se abarcaron noventa y tres (93) muestras de suelo. En la **Figura 3** se observan las diferentes subregiones del Departamento de Caldas (Centro – sur, Magdalena, Norte, Occidente alto, Occidente bajo y Oriente), mediante el ensayo de clasificación de los suelos, aplicando la metodología SUCS.

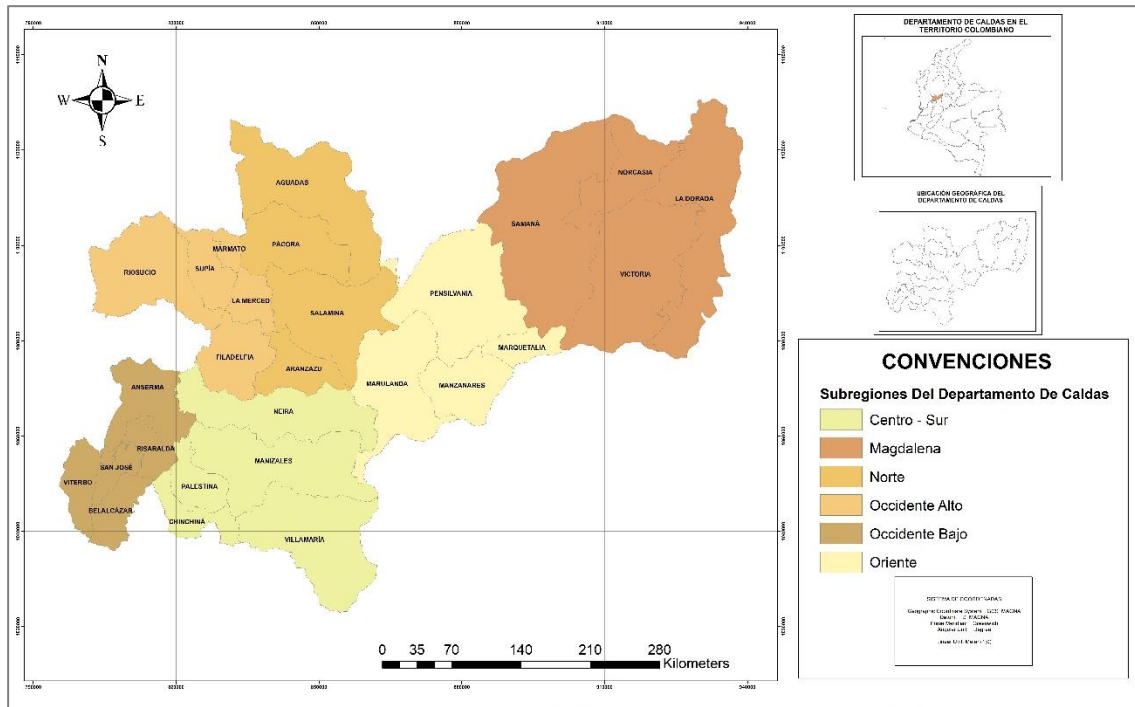


Figura 3.- Localización subregiones del Departamento de Caldas.

Fuente: Elaboración propia usando el software Qgis.

5.3 Marco legal

En Colombia a partir de Julio de 2017, entró en vigencia la resolución N° 1326, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que se busca el aumento sistemático de la recolección selectiva y la gestión ambiental de las llantas. En el artículo 13.1 de la mencionada resolución se establece “*las metas para la recolección selectiva y gestión ambiental para llantas usadas de rin 13” a 22.5”* y en la Tabla 3 se traza como objetivo que en el año 2023 “*la meta de recolección selectiva y gestión ambiental mínima se*

encuentre en un 80% para llantas de vehículos automóviles, camiones, camionetas, buses, busetas y tractomulas” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

La normatividad en el país está regulada por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), entidad que busca mitigar la incineración, la acumulación en rellenos sanitarios y la contaminación visual optando por procesos amigables ambientalmente, mejorando las políticas de recolección y disposición final. En el artículo 12 de la resolución N° 1326 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible se estipula “*el aprovechamiento de las llantas usadas, fomentando la reutilización, reciclaje y la valorización del componente energético*” y además establece “*que las llantas pueden tener usos como mobiliario urbano, construcción de taludes, jarillones y tuberías, canchas sintéticas, construcción de vías urbanas con asfalto modificado con GCR, la valorización del componente energético de las llantas usadas mediante el coprocesamiento, pirólisis, gasificación y demás opciones que ambiental y tecnológicamente sean viables*” (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2017).

En países como Brasil se viene implementando desde el año 2002 la resolución 258/99, de Conama, que en el 2005 se modificó para que cada cuatro llantas, entre fabricadas e importadas, al menos una deberá tener uso después de desechadas (Cantanhede and Monge, 2002). En Perú mediante decreto supremo N° 003-97-SA, se dictó por razones de sanidad, seguridad vial y protección del medio ambiente la suspensión de la importación de llantas usadas, artículo que tuvo sus respectivas aclaraciones en el 2001 (Cantanhede and Monge, 2002). En México la normativa ha impulsado programas de investigación, re-uso o reciclaje de llantas usadas, potenciando en ingeniería el avance en el estudio y relación de la interacción llantas-suelo (Cantanhede and Monge, 2002).

Lo anterior corresponde a la legislación acerca del uso de llantas, a continuación se menciona la normativa vigente para los ensayos de laboratorios de suelos regulado por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), mediante a la adaptación de las normas ASTM, en la **Tabla 4** se describen las normas de ensayos de laboratorio para realizar el análisis de los suelos del Departamento de Caldas..

Tabla 4.- Descripción de los ensayos de laboratorio empleados.

NOMBRE DE LA NORMA	OBJETIVO	REFERENCIA
INV E – 123 1 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos	Esta norma hace referencia a la determinación cuantitativa de la distribución de las partículas del suelo, si el tamaño es mayor de 75 Mm se determina por tamizado, si es menor el tamaño se realiza por hidrómetro	(INVIAS, 2013a)
INV E – 125 2 Determinación del límite líquido de los suelos	Esta norma busca determinar el límite líquido de los suelos, ya sea por vía húmeda o vía seca, a través de los métodos multipunto o de un sólo punto, sobre la porción de suelo que pasa por el tamiz No. 4	(INVIAS, 2013b)
INV E – 126 3 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.	Esta norma tiene como objetivo la determinación del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos, sobre la porción de suelo pasante del tamiz No. 40, el límite plástico se realiza con el mismo material preparado para la determinación del límite líquido	(INVIAS, 2013c)
INV E – 154 4 Ensayo de corte directo en condición consolidada – drenada.	Esta norma establece el procedimiento para determinar la resistencia al corte de una muestra consolidada y drenada, esto bajo condiciones de velocidad controladas, los resultados se pueden ver afectados por presencia de suelo grueso o fragmentos de roca, a partir de este se determinan las envolventes de falla y otros parámetros de diseño.	(INVIAS, 2013d)

Fuente: Elaboración propia.

5.4 Marco teórico

5.4.1 Estadística

El origen de la estadística se remonta al año 3.050 A.C desde las civilizaciones de Egipto, China, Israel, Grecia, Roma, Francia, Inglaterra, Alemania con un desarrollo en este orden. La etimología de la palabra viene de su uso por parte del estado para censar y mostrar datos, tomando carácter científico en el siglo XVI (Fernández, S. F., Sánchez, J. M. C., Córdoba, A., & Largo, 2002). La estadística descriptiva tiene la finalidad de mostrar y describir de manera clara y ordenada las características relevantes de una muestra

representativa, mediante un conjunto de técnicas de tabulación conocidas como medidas estadísticas y asimismo la representación gráfica de los datos. Permitiendo evaluar la dependencia entre las variables aplicando técnicas de regresión y correlación, manteniendo un control en el porcentaje de error para facilitar la interpretación de los datos buscando objetividad y universalidad (Fernández, S. F., Sánchez, J. M. C., Córdoba, A., & Largo, 2002; Sabadías, 1995).

Sabadías (1995) define la muestra como un subconjunto de datos delimitados por el tamaño al ser la totalidad de elementos (Población) difícil de abarcar. El carácter de la muestra hace referencia a los aspectos cómo puede ser analizada. Cuando el carácter cuantitativo toma un valor numérico se le conoce como variable estadística, que cuando está limitado en un rango los valores que pueda tomar se conocen como discreta y pueden ser agrupados en intervalos de clase. Un claro ejemplo de esto serían los suelos del Departamento de Caldas, de los que se tiene una muestra de noventa y tres (93) datos, el carácter cualitativo es la clasificación de los suelos utilizando la metodología SUCS y el carácter cuantitativo se encuentran los valores de resistencia al corte (el ángulo de fricción y la cohesión), los pasantes de los tamices en el análisis granulométrico, la humedad del suelo, el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad del ensayo de laboratorio de los límites de Atterberg o el peso unitario del suelo y los datos serían una variable estadística discreta

5.4.1.1. Parámetros estadísticos

También conocidos como medidas descriptivas, se dividen en medidas de tendencia central o de posición los cuales resumen en un valor numérico las características representativas de la muestra por medio de la moda, la mediana y la media aritmética y en medidas de dispersión o de variación las cuales cambian su valor dependiendo del comportamiento de los datos con respecto a la media (Parra, 1995). Según Russell (2008) los parámetros de la media aritmética (Ecuación 1) y la desviación estándar (Ecuación 2) son las variables más importantes para analizar las propiedades del suelo, para las cuales se aplicará la distribución de frecuencias con estas dos variables.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Ecuación 1.- Media aritmética o valor medio muestral

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Ecuación 2.- Desviación estándar.

5.4.1.2. Distribuciones de probabilidad

Las distribuciones de probabilidad hacen parte de la estadística inferencial, que se aplican ante la necesidad de conocer parámetros generales para una población partiendo de una muestra, por medio de una distribución teórica que se ajuste a los datos para explicar el comportamiento de los caracteres discretos, en especial la distribución normal corresponde a un modelo de distribución continua que representa con mayor precisión los fenómenos empíricos (Sabadías, 1995).

5.4.1.3. Distribución Weibull

El modelo de Weibull es posiblemente el modelo de distribución más implementado, teóricamente los cambios de parámetros generan casos específicos que coinciden con otras distribuciones las gaussianas, entre muchas otras. Como se observa en la Ecuación 3, donde λ es un parámetro de escala, β es un parámetro de forma y x es mayor que cero (Lawless, 2011).

$$f(x) = \lambda\beta(\lambda x)^{\beta-1}e[-(\lambda x^\beta)]$$

Ecuación 3.- Función teórica de Weibull

5.4.1.4. Distribución normal

Sea una variable aleatoria x sigue una distribución normal con parámetros \bar{x} y S , siendo la media aritmética (\bar{x}) un número real cualquiera y la desviación estándar (S) mayor que cero, como se observa en la **Ecuación 4**, esto implica que para cada pareja de parámetros \bar{x} y S , existirá una distribución diferente cumpliendo con las proposiciones y propiedades de una función de densidad (Sabadías, 1995).

$$f(x) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \cdot e\left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2S^2}\right], \forall x \in R$$

Ecuación 4.- Función de distribución normal

5.4.1.5. Distribución log normal

Sea la variable aleatoria (x) con media (\bar{x}) y varianza (S^2) tiene una distribución normal, entonces $y = e^x$ tiene una distribución log normal con parámetros \bar{x} y S^2 , como se observa en la **Ecuación 5**, esto implica que para cada pareja de parámetros \bar{x} y S , existirá una distribución diferente cumpliendo con las proposiciones y propiedades de una función de densidad (Russelli, 2008).

$$f(x) = \frac{1}{S_x \sqrt{2\pi}} \cdot e \left[-\frac{(\ln x - \bar{x})^2}{2S^2} \right], \forall x \in R$$

Ecuación 5.- Función de distribución log normal

5.4.1.6. Regresión y correlación

En Sabadías (1995) la regresión consiste en encontrar una función $y = f(x)$ que se ajuste a la dispersión de la variable estadística (x_i, y_i) , con el fin de que con una variable conocida se logre un valor aproximado de la otra, la tendencia de la nube de puntos define un tipo de modelo lineal, polinómico, logarítmica, exponencial o potencial. La correlación define el grado de dependencia que existe entre dos variables, siendo directa cuando es creciente o inversa cuando es decreciente.

5.4.2 Propiedades mecánicas del suelo

5.4.2.1. Resistencia al corte de los suelos

Según Terzaghi, K. & Peck (1978) los esfuerzos cortantes son los causantes de la mayoría de problemas prácticos en la ingeniería, los suelos al igual que los demás materiales también sufre esfuerzos de tensión que solo en algunas circunstancias se convierten en grietas que merecen atención. Mediante el diagrama de esfuerzos del círculo de Mohr se conocen los esfuerzos principales correspondientes al estado de falla del espécimen, donde se puede determinar la inclinación del plano en la que ocurre la falla (Peck et al., 1974), de allí se obtiene la línea intrínseca de rotura o envolvente de falla que normalmente es curva, y suele simplificarse a una línea recta como se muestra en la **Ecuación 6** conocida como la ecuación de Coulomb, donde la tensión al corte (τ) se reemplaza por la resistencia al corte (s) debido a que los puntos de la envolvente de falla se refieren a estados de tensión asociados con la rotura (Terzaghi, K., & Peck, 1978).

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

Ecuación 6.- Ecuación de Coulomb.

Los parámetros de resistencia al corte del ángulo de fricción (φ) y la cohesión (c) se determinan normalmente mediante dos pruebas estándar que son el ensayo triaxial y el ensayo de corte directo (Das, 2001). En la ingeniería local, el ensayo más empleado para determinar estos parámetros es el ensayo de corte directo. En él, explica (Das, 2001) se aplica a la muestra una fuerza normal, posteriormente se aplica un esfuerzo de corte hasta inducir la falla en el suelo, esto se halla mediante la envolvente de falla estimando los parámetros mediante la relación con el área de la sección transversal de la caja de corte.

Algunos suelos del Departamento de Caldas, especialmente los derivados de la meteorización de rocas ígneas y volcánicas, presentan propiedades ingenieriles adecuadas de los parámetros de esfuerzo no drenado y esfuerzo efectivo con resultados altos, esto se evidencia en pendientes montañosas donde estas son más pronunciadas y estables que el caso de los suelos sedimentarios como esquistos o suelos negros que con frecuencia presentan alto contenido de arcillas tipo montmorillonita que presentan problemas de expansión – contracción presentando baja resistencia a los esfuerzos cortantes (Wesley, 2010).

5.4.2.2. Ángulo de fricción

«En gravas, arenas, arenas limosas, y limos inorgánicos sin cohesión, el valor de φ_d depende principalmente de la capacidad relativa, de la distribución granulométrica, y de la forma de los granos» (Peck et al., 1974). Cuando en un suelo isotrópico los vacíos se encuentran ocupados por aire no se generan cambios significativos en φ_d , en presencia de agua se pueden producir cambios en los esfuerzos efectivos, impactando la resistencia al esfuerzo cortante y las relaciones esfuerzo deformación donde la presión de poros ($u = \sigma' - \sigma$) la soporta la parte líquida que tiene $tg(\varphi) = 0$ y la otra parte del esfuerzo efectivo (σ') lo soportan los componentes sólidos definidos por el parámetro $tg(\varphi)$ (Peck et al., 1974; Terzaghi, K., & Peck, 1978).

En la **Tabla 5** se presentan los valores del ángulo de fricción que se encuentran en libros de mecánica de suelos de Peck et al. (1974), Braja M Das (2001) y Lambe & Whitman (1972).

Tabla 5.- Valores representativos para el ángulo de fricción.

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

(a)

Material	Grados	
	Suelto	Denso
Arena, de grano redondo uniforme	27.5	34
Arena, de granos angulosos, bien gradada	33	45
Grava arenosa	35	50
Arena limosa	27 - 33	30 - 35
Limo inorgánico	27 - 30	30 - 34

(b)

Ángulos de fricción

Clasificación	Ángulo de talud natural		Para la resistencia residual		Para la resistencia máxima			
					Compacidad media		Compacta	
	i°	Talud (vert. A hor.)	ϕ_{cv}°	$\text{tg } \phi_{cv}^\circ$	ϕ°	$\text{tg } \phi$	ϕ°	$\text{tg } \phi$
Limo (no plástico)	26	1 : 2	26	0.488	28	0.532	30	0.577
	a		a		a		a	
Arena uniforme fina a media	30	1 : 1.75	30	0.577	32	0.625	34	0.675
	26	1 : 2	26	0.488	30	0.577	32	0.675
Arena bien graduada	30	1 : 1.75	30	0.577	34	0.675	36	0.726
	30	1 : 1.75	30	0.577	34	0.675	38	0.839
Arena y grava	34	1 : 1.50	34	0.675	40	0.839	46	1.030
	32	1 : 1.60	32	0.625	36	0.726	40	0.900
	a		a		a		a	
	36	1 : 1.40	36	0.726	42	0.900	48	1.110

Según B.K. Huogh, Basic Soils Engineering. Copyright © 1957, The Ronald Press Company, Nueva York.

Nota: Dentro de cada gama se asignan los valores menores si las partículas son redondeadas y si existe un contenido importante de arcilla blanda o mica, mientras que los valores más elevados corresponden a partículas duras, angulosas. Utilícense menores valores para presiones normales altas que para presiones moderadas.

(c)

Fuente: (a) "Tabla 1.3 Ángulo de fricción interna ϕ " (Das, 2001), (b) "Tabla 4.1 Valores representativos de ϕ_s para Arenas y limos" (Peck et al., 1974) y (c) "Tabla 11.3 Resumen de datos sobre ángulos de fricción para su utilización en anteproyectos" (Lambe & Whitman, 1972).

El ángulo de fricción normalmente determinado con el ensayo de corte directo es mayor que el obtenido en el ensayo triaxial, además con un esfuerzo normal alto, el ángulo de fricción será menor, esto también ocurre en suelos cohesivos como arcillas cuando aumenta el índice de plasticidad (Das, 2001).

L. D. Wesley (2010) propone la correlación entre el valor del ángulo de fricción ϕ' y los límites de Atterberg, para suelos residuales sin presencia de discontinuidades, como se observa en la **Figura 4**, afirmando que estos varían generalmente en un rango entre 25° - 35°, siendo que en algunas Arcillas Alófanas y Haloisitas alcancen valores altos de 40°.

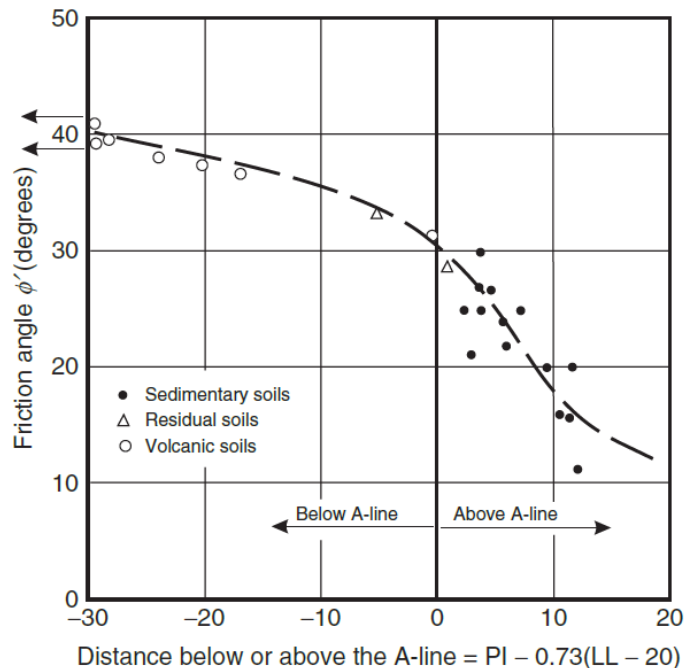


Figura 4.- Relación entre el ángulo de fricción y los límites de Atterberg.

Fuente: «*Figure 5.5 The friction angle (ϕ') related to position on the plasticity chart.*» (Wesley, 2010).

En un estudio realizado por Medina, S. B., & Salazar (2010) en la zona cafetera en los departamentos de Caldas, Quindío y Tolima, se tomaron muestras de suelos en el punto medio de la ladera a 1.50 metros de profundidad como máximo y se les realizó el ensayo de corte directo y se obtuvieron valores del ángulo de fricción para diferentes unidades de suelo en Caldas con el valor menor en la unidad Tablazo (19°) y el mayor en la unidad Chinchiná (31°).

Terzaghi (1943) afirma que no se puede asignar un valor definido del ángulo de fricción de la resistencia al corte (ϕ) a ningún tipo de suelo ya que este depende de diferentes condiciones de la naturaleza y el estado inicial del suelo, de modo que las arcillas pueden tener valores hasta 20° , y en casos excepcionales ángulos de fricción mayores; para arenas sueltas y saturadas el valor puede llegar hasta 35° .

5.4.2.3. Cohesión

Para Terzaghi, K., & Peck (1978) la cohesión «*explica las características engañosas respecto de la aparente estabilidad de aquellos taludes en los cuales ya se han producido deslizamientos con anterioridad*» en algunos tipos de suelos no cohesivos. La cohesión se representa con la abreviatura (c) que es igual a la resistencia al corte por unidad de área si $\sigma = 0$ (Terzaghi, 1943).

También se le conoce como resistencia al corte no drenado (c_u), que para depósitos de arcillas normalmente consolidados crece con el aumento de la presión efectiva de sobrecarga, esta puede disminuir cuando el suelo arcilloso es remoldeado (Das, 2001), en la **Tabla 6** se muestran algunas relaciones empíricas.

Tabla 6.- Relaciones para hallar la resistencia al corte no drenado.

Referencia	Relación	Observaciones
Skempton (1957)	$\frac{c_{u(VST)}}{p} = 0.11 + 0.0037IP$ IP=Índice de plasticidad (%) $C_{u(VST)}$ = resistencia cortante no drenada de la prueba de corte de la veleta	Para arcillas normalmente consolidadas
Chandler (1988)	$\frac{c_{u(VST)}}{p_c} = 0.11 + 0.0037IP$ p_c =presión de preconsolidación	Puede usarse para suelos sobreconsolidados exactitud $\pm 25\%$ No válida para arcillas sensitivas y fisuradas
Jamiolkowski et al. (1985)	$\frac{c_u}{p_c} = 0.23 + 0.04$	Para arcillas ligeramente sobreconsolidadas
Mesri (1989)	$\frac{c_u}{p} = 0.22$	
Bjerrum y simons (1960)	$\frac{c_u}{p} = f(IL)$ IL=Índice de liquidez	

Referencia	Relación	Observaciones
Ladd et al. (1977)	$\frac{\left(\frac{c_u}{p}\right)_{\text{Sobreconsolidada}}}{\left(\frac{c_u}{p}\right)_{\text{normalmente consolidada}}} = (OCR)^{0.8}$ $OCR = \text{tasa de sobreconsolidación} = \frac{p_c}{p}$	

Fuente: "TABLA 1.16 Ecuaciones empíricas relativas c_u y para la presión efectiva de sobrecarga" (Das, 2001)

5.4.3 Muros en llantas

Sims & Gaffney, (1976) afirman que el cálculo de los muros en llantas se puede realizar por varias metodologías, en general lo que se debe verificar es la estabilidad general para garantizar que cumpla con el factor de seguridad al volcamiento, al deslizamiento y los círculos de falla del talud, la estabilidad interna se calcula asumiendo la presión efectiva del fluido que actúa sobre el relleno del muro, la estabilidad de la cara del muro deben verificarse asegurando que las presiones se transmitan por fricción entre las llantas, por último se revisa la resistencia de los enlaces y la carga de arrancamiento del anclaje.

En la **Tabla 7** se muestran las ecuaciones para el cálculo de muros de contención según las metodologías de Sims & Gaffney, (1976) (**Tabla 7 (a)**) y la de 'The Pneusol' de Long, N. et.al (1990) (ver **Tabla 7 (b)**) para el cálculo de los muros con llantas tipo, los parámetros de resistencia al corte implementados serán los establecidos para los suelos del Departamento de Caldas.

Tabla 7.- Ecuaciones para el cálculo de muros de contención con llantas.

ECUACIONES DE CÁLCULO DE MUROS DE CONTENCIÓN EN LLANTAS	
$K_a = \frac{1 - \text{sen } \phi}{1 + \text{sen } \phi}$	Ecuación 7.- Presión activa de tierras.
$K_p = \frac{1 + \text{sen } \phi}{1 - \text{sen } \phi}$	Ecuación 8.- Presión pasiva de tierras.
FACTOR DE SEGURIDAD AL VOLCAMIENTO	
$M = \frac{1}{2} * K_a * g * \gamma * \frac{h^3}{3}$	Ecuación 9.- Momento al volcamiento/m del muro.
$\gamma * g * h - \frac{M * 6}{l^2}$	Ecuación 10.- Presión en el talón del muro.
FACTOR DE SEGURIDAD AL DESLIZAMIENTO	

$$\frac{1}{2} * K_a * \gamma * g * h^2$$

Ecuación 11.- Fuerza horizontal del relleno/m del muro.

$$\gamma * g * h * \tan \phi * l$$

Ecuación 12.- Resistencia a la fricción.

$$FS = \frac{\text{Resistencia a la fricción}}{\text{Fuerza horizontal del relleno}}$$

Ecuación 13.- Factor de seguridad al deslizamiento.

CHEQUEO DE LAS CARGAS SOBRE LAS LLANTAS

$$2 * \gamma * g * h * \pi * \frac{d^2}{4} * \tan \phi + K_p * \gamma * g * h * t * d$$

Ecuación 14.- Chequeo quitando las cargas de llantas de anclaje al nivel de la base.

EVALUACIÓN DEL MURO CON LLANTAS CON DIFERENTES TIPOS DE REFUERZO

A. Anclajes de llantas con cuerdas y acero de refuerzo de diferentes tensiones de carga de rotura

$$c_e = n_c * c_r * r_{fn} * g$$

c_e = Carga final del enlace

n_c = Número de cuerdas entre llantas

c_r = Carga de rotura de la cuerda (kg o KN)

r_{fn} = Porcentaje de reducción de la fuerza del nudo

g = Gravedad

$$c_d = \frac{c_e}{FS}$$

Ecuación 15.- Carga final del enlace con cuerdas entre llantas.

c_d = Carga de diseño

Ecuación 16.- Carga de diseño del enlace

$$l_c = n_c * (l_{uv} + l_n) + l_g$$

l_c = Longitud de cuerda requerida

l_{uv} = Longitud de una vuelta de la cuerda

l_n = Longitud del nudo

l_g = Longitud del gancho o nudo (según la tensión de la cuerda)

Ecuación 17.- Longitud de cuerda requerida.

$$FH_{ll} = K_a * \gamma * g * h * n_{\#c} * d * t$$

FH_{ll} = Fuerza horizontal sobre las llantas

Ecuación 18.- Fuerza horizontal sobre las llantas.

$n_{\#c}$ = Asumir como número de llantas/enlace

$$n_{\#c} = \frac{c_d}{FH_{ll}}$$

Ecuación 19.- Número de llantas enlazadas con la tensión de la cuerda.

CHEQUEO DE LA ESTABILIDAD LOCAL DE LA CARA FRONTAL DEL MURO CON LLANTAS

$$P_V = \gamma * g * h$$

P_V = Presión vertical en la cara del muro

Ecuación 20.- Presión vertical en la cara del muro con llantas

$$P_H = K_a * \gamma * g * h$$

P_H = Presión horizontal en la parte posterior del muro

Ecuación 21.- Presión horizontal en la parte posterior del muro con llantas

$$BM = \frac{WL}{12} = K_a * \gamma * g * \frac{h}{12} * x^2$$

Ecuación 22.- Consideración del sistema como viga.

$$\therefore x^2 = \frac{2w^2}{k_a}$$

x = Distancia de presión vertical del muro con llantas

Ecuación 23.- Distancia de presión vertical del muro con llantas

w = Ancho efectivo de las llantas

Fuente: Muros mecánicamente estabilizados según la metodología de Sims & Gaffney, (1976).

5.4.3.1. Tipos de muros de contención con llantas.

En la literatura se encuentran diferentes configuraciones de muros de contención con llantas con sus metodologías de cálculo. Sims & Gaffney (1976) calcularon diferentes muros con llantas mecánicamente estabilizados (MES), las ecuaciones de cálculo se presentan en la **Tabla 7** para los muros que se muestran en la **Figura 5 (a)**, **Figura 5 (b)** y **Figura 5 (c)**.

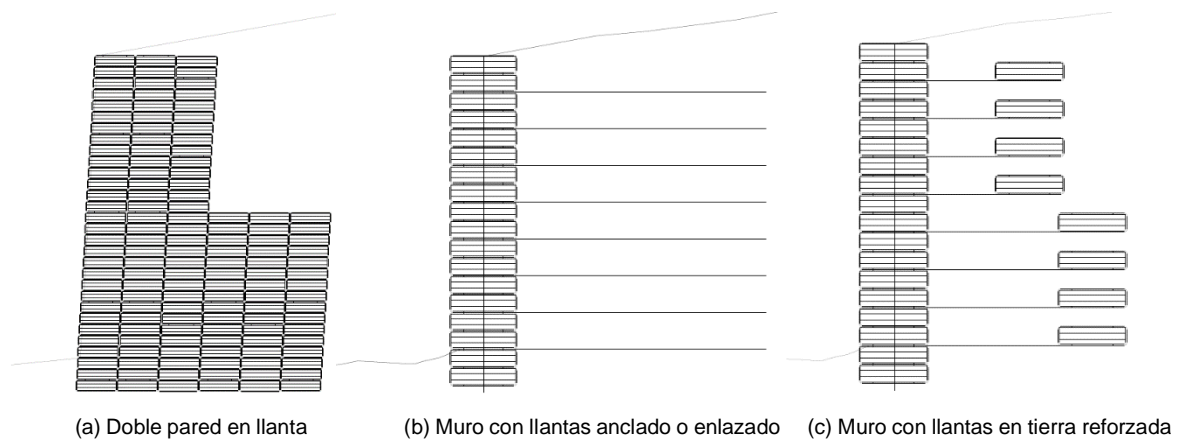


Figura 5.- Muros mecánicamente estabilizados con llantas.

Fuente: Digitalización y traducción de los modelos de Sims & Gaffney (1976).

Otra metodología de cálculo de muros con llantas se encuentra en (Long, N. et.al., 1990), del Ministerio francés de Ciencia, Tecnología y Redes. En la **Figura 6** se muestra un ejemplo del 'The Pneusol' con las recomendaciones de diseño para la pendiente (V:H de 2:1) del muro con llantas, además de la inclinación en la excavación con pendiente del 3% y nivel de desplante, así como la inclusión de drenaje para el manejo de la presión del fluido en la parte posterior del muro.

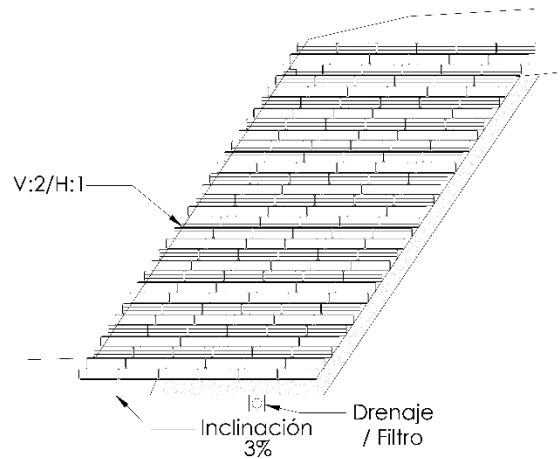


Figura 6.- Muro de llantas con las recomendaciones de 'The Pneusol'.

Fuente: Elaboración propia basada en "Fig. n° 2 Profile of the structure" (Long, N. et.al., 1990).

5.4.3.2. Sistemas de enlaces entre llantas

Rodríguez Gonzáles, (2016) propone el enlace entre llantas con manila de polipropileno siguiendo el enlace como se muestra en la **Figura 7**.

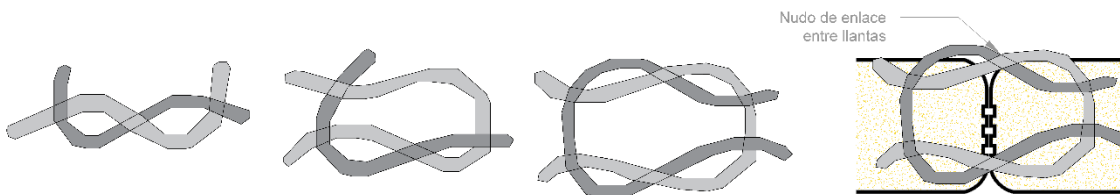


Figura 7.- Nudo - Enlace entre llantas

Fuente: Esquema de elaborado utilizando la "Figura 2. 6 Esquema del nudo recomendado para unir los elementos del muro" (Rodríguez Gonzáles, 2016)..

Barros, P., Sarabia, G., Valdés, F., Serrano, P., & Gaytan, (2019) proponen que el enlace se realice mediante amarras de plástico, como se muestra la **Figura 8**.

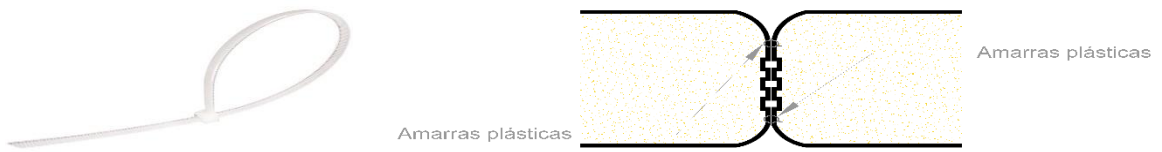


Figura 8.- Enlace entre llantas implementando amarras de plástico.

Fuente: Esquema elaborado utilizando "Figura 11. Diagrama de un muro trabado y asegurado con amarras de plástico (Dibujo: Pablo Barros L.)" (Barros, P., Sarabia, G., Valdés, F., Serrano, P., & Gaytan, 2019).

Sims & Gaffney (1976) proponen de enlace entre llantas mediante barras de acero esto como se puede observar en la **Figura 9**, en este tipo de enlace los aspectos a tener en cuenta la posibilidad de producirse una falla a flexión, así como la preocupación por la corrosión en los suelos, por lo que pide se realice la protección mediante galvanizado, revestimiento de resina, revestimiento de betún, acero inoxidable o aluminio.

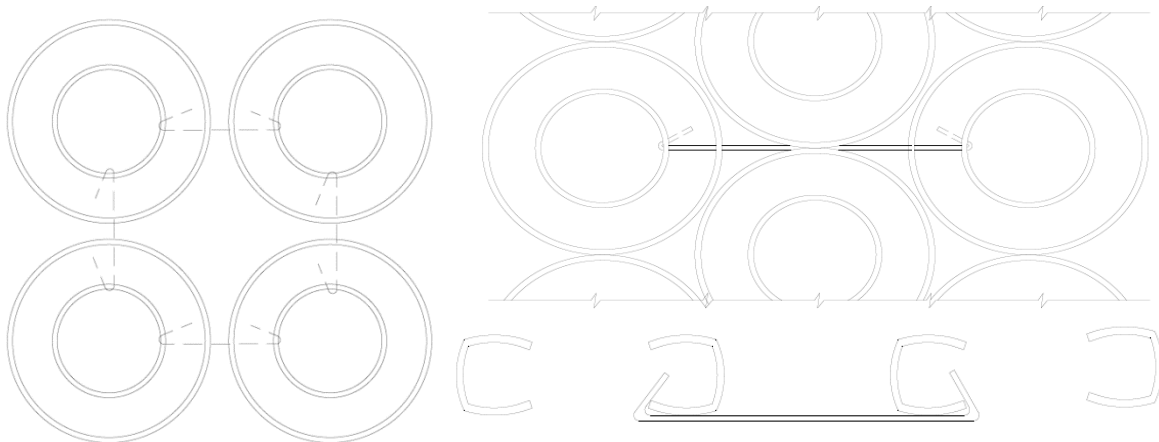


Figura 9.- Enlace con barras de acero entre llantas.

Fuente: Digitalización de los modelos de Sims & Gaffney (1976).

Adicionalmente, proponen que este enlace se pueda realizar con base a la tensión de las cuerdas utilizando la **Ecuación 15**, **Ecuación 16**, **Ecuación 17** y **Ecuación 18**, conociendo la resistencia de estas, en la metodología se recomiendan las cuerdas 'Parafil' utilizada para mástiles aéreos y aparejos de yates y la cuerda tipo 'Paraweb' empleada en amarres de boya, remolque marino cuerdas, entre otros.

5.4.3.3. Dimensiones de llantas

Previo a la construcción de los muros con llantas se deben tener en cuenta la variabilidad que existe en los tamaños de acuerdo con los rines de los diferentes medios de transporte. En la **Figura 10** se observa las dimensiones para automóviles y camionetas.

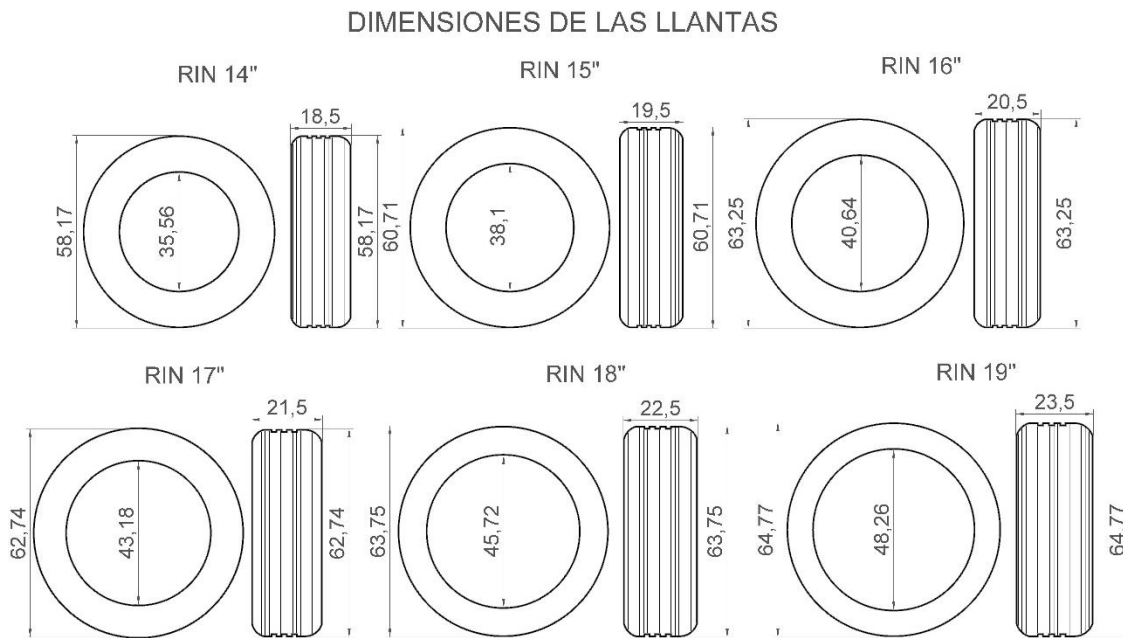


Figura 10.- Dimensiones de llantas del rin 14" al rin 19" en centímetros (cms).

Nota: El diámetro interior de las llantas corresponde al tamaño del rin, el diámetro exterior varía según el perfil de la llanta por lo tanto las ilustraciones sirven solo de referencia.

Fuente: Elaboración propia, basado en dimensiones comerciales de llantas.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017) dispuso en su gestión de recolección de llantas, aprovechar los tamaños entre el rin 13" al rin 22.5". Para la construcción de muros con llantas Hylands & Shulman, (2003); Simm, J. D., & Wallis, (2004); Sims & Gaffney, (1976), entre otros autores recomiendan que los tamaños menores de los rines se utilicen en estabilización de taludes y los más grandes en la tratamiento de cauces, asimismo se deberían buscar que la variación sea mínima entre los tamaños de las llantas. En la **Figura 11** se puede observar cómo influye la variación del diámetro del rin, por ejemplo, entre el rin 13" y el rin 19" la diferencia aproximada según el perfil es de 60 ± 5 centímetros y en cuanto a la altura cuando las llantas se encuentran acostadas es variación aproximada es de 20.5 ± 3 centímetros.

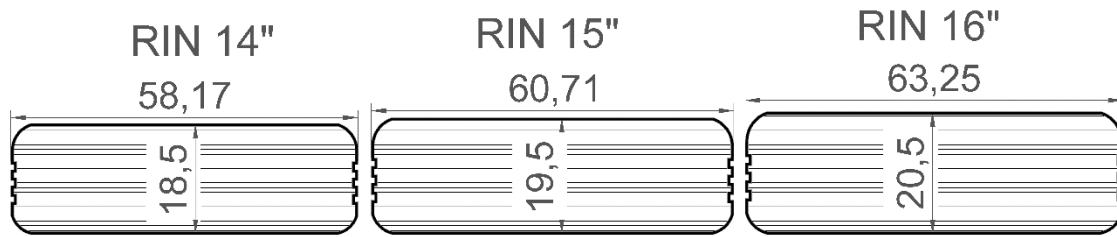


Figura 11.- Diferencia en las dimensiones de las llantas entre rín 14" al rín 16".

Nota: El diámetro interior de las llantas corresponde al tamaño del rín, el diámetro exterior varía según el perfil de la llanta por lo tanto las ilustraciones sirven solo de referencia.

Fuente: Elaboración propia.

5.4.3.4. Hipótesis de diseño

Long, N. et.al., (1990) presentan algunas hipótesis usadas en el diseño de muros de contención con llantas, como son:

- El suelo se considera como un material anisotrópico, por lo que se busca reforzar en la dirección que se generen los mayores esfuerzos.
- Se deben determinar las tensiones en el muro de contención con llantas a partir de la presión activa de tierras, el esfuerzo vertical y la variación en la altura de capa.
- La tierra entre los refuerzos se encuentra en estado límite.
- Las tensiones principales son paralelas y perpendiculares a la cara del muro con llantas.
- La tensión de los refuerzos de las llantas es suficiente para movilizar la fuerza de corte del suelo.
- Las fuerzas de tracción en los niveles de refuerzo son mayores en la cara del muro.
- Para el cálculo del equilibrio del muro bajo el efecto de la presión activa se pueden considerar cargas uniformes, lineales o de Meyerhof.
- Los ensayos de adherencia de llantas han demostrado que la combinación de tres elementos, prácticamente no existe posibilidad de deslizamiento con respecto a las fuerzas aplicadas.

6. Caracterización de los tipos de suelos del Departamento de Caldas.

La información procesada es una recopilación de las propiedades geotécnicas obtenidas de los estudios y diseños que se realizan a los sitios críticos generados en las temporadas de lluvias en el Occidente Alto, Occidente Bajo, Norte, Centro Sur, Oriente y Magdalena como se conocen a las subregiones del departamento.

Esta información particular es de gran relevancia porque da la posibilidad de generar cartillas o manuales para soluciones puntuales de inestabilidades recurrentes. De este modo se utilizan los parámetros geotécnicos del ángulo de fricción y la cohesión de las muestras para realizar el análisis aplicando estadística descriptiva para obtener, para los diferentes tipos de suelos, tener valores para el diseño para estructuras de contención adaptadas al Departamento de Caldas.

Con los resultados obtenidos en noventa y tres (93) muestras de ensayos laboratorio correspondientes a clasificación de los suelos, de corte directo y de compresión inconfiada, se realizó el análisis estadístico de los valores del ángulo de fricción y de la cohesión de los suelos finos y las arenas. La información presente de gravas arcillosas (GC) y gravas limosas (GM) por el poco número de muestras no se analiza estadísticamente. Esta es la misma condición para la ceniza volante y la escoria que mediante algunos ensayos se caracterizó una muestra obtenida de la siderúrgica Ternium, ubicada en la ciudad de Manizales, Caldas para evaluar su uso potencial como material de relleno.

A continuación, según los tipos de suelos enunciados anteriormente se realiza el desarrollo del análisis estadístico de los datos.

6.1 Suelos finos

Los suelos finos evaluados son arcillas inorgánicas de alta plasticidad (CH), arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad (CL), limos inorgánicos de alta plasticidad (MH) y limos inorgánicos de baja plasticidad (ML), localizados en diferentes zonas de las subregiones del Departamento de Caldas como se muestra en la **Tabla 8**.

Tabla 8.- Resultados de la exploración geotécnica de puntos críticos.

No.	LOCALIZACIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	Profundidad de la muestra (m)	Humedad Natural (%)	Ángulo de fricción (ϕ)	Cohesión (kg/cm ²)	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS
1	Varsovia - La Marina - Juntas	K6+800	1.2	34.9	27	0.20	CH
2	Varsovia - Filadelfia	K1+060	1.5	12.8	27	0.67	CL
3	Varsovia - La Marina - Juntas	K6+800	1.5	26.9	26	0.26	CL
4	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	6.0	28.9	27	0.88	CL
5	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	3.0	28.9	25	0.68	CL
6	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	6.1	57.8	30	0.62	MH
7	Salamina - La Merced	K6+540	1.5	34.7	21	0.41	MH
8	Pácora - Aguadas	K3+300	2.0	40.8	33	0.15	MH
9	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	2.5	51.0	23	0.59	MH
10	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	5.0	38.6	35	0.48	MH
11	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	6.0	54.0	35	0.12	MH
12	Manizales - Neira	K0+100	2.5	48.1	32	0.26	MH
13	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	3.0	32.0	32	0.36	MH
14	Petaqueros - Manzanares	K11+600	1.0	66.0	31	0.37	MH
15	Manzanares - Marquetalia	K6+600	2.0	52.5	31	0.29	MH
16	Varsovia - Filadelfia	K1+160	1.6	33.9	34	0.27	ML
17	Varsovia - Filadelfia	K1+700	3.5	41.6	30	0.34	ML
18	Varsovia - Filadelfia	K3+120	1.9	30.4	34	0.61	ML
19	Varsovia - Filadelfia	K4+420	1.5	21.0	35	0.25	ML
20	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+300	2.0	40.2	28	0.81	ML
21	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+450	4.5	41.4	41	0.56	ML
22	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+450	1.6	39.3	27	0.56	ML
23	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K9+500	2.0	36.4	47	0.45	ML
24	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K10+500	5.0	57.5	34	0.04	ML
25	Varsovia - La Marina - Juntas	K1+300	1.5	29.7	30	0.23	ML
26	Marmato - EL Llano	K2+020	3.0	17.8	34	0.61	ML
27	Marmato - EL Llano	K2+100	4.1	19.3	34	0.53	ML
28	Marmato - EL Llano	K2+165	3.5	19.8	34	0.59	ML
29	Marmato - EL Llano	K2+462	3.0	17.3	33	0.53	ML
30	Marmato - EL Llano	K2+504	3.0	17.3	33	0.58	ML
31	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	6.0	39.2	38	0.24	ML

62 Propuesta teórica de muros con llantas de acuerdo con las características de los suelos de la región. Caso de estudio: Departamento de Caldas

No.	LOCALIZACIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	Profundidad de la muestra	Humedad Natural	Ángulo de fricción	Cohesión	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
			(m)	(%)	(ϕ)	(kg/cm ²)	SUCS
32	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	2.5	59.3	19	0.71	ML
33	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	4.0	44.4	28	0.65	ML
34	Manizales - La Cabaña - Tres Puertas	K17+700	2.0	30.7	31	0.09	ML
35	Petaqueros - Manzanares	K6+700	2.0	23.4	29	0.26	ML
36	Marulanda- Alto del toro - Manzanares	K10+900	1.8	23.2	36	0.06	ML
37	Marulanda- Alto del toro - Manzanares	K10+900	1.5	11.9	34	0.10	ML
38	Manzanares - La quiebra-Pensilvania	K14+900	2.7	23.8	33	0.17	ML
39	Manzanares - La quiebra-Pensilvania	K14+900	2.5	25.0	30	0.11	ML
40	Manzanares - La quiebra-Pensilvania	K14+900	2.5	24.3	31	0.09	ML

De acuerdo con esta clasificación de los suelos se procesan los datos aplicando estadística descriptiva para el análisis de los parámetros geotécnicos del ángulo de fricción y la cohesión, las funciones de densidad de la distribución normal y la distribución log normal comparadas con la función teórica determinan el modelo con menor porcentaje de error aplicable para los suelos finos en el Departamento de Caldas.

6.1.1 Ángulo de fricción – Suelos finos.

En la **Tabla 9** se establecen los rangos de la distribución de frecuencias para el ángulo de fricción en los suelos finos. Por medio de la estadística descriptiva se presentan en la **Tabla 10** los parámetros relevantes para caracterizar la muestra de suelos finos.

Tabla 9.- Distribución de frecuencia para el ángulo de fricción.

Ángulo de fricción	
Clase	Frecuencia
19	1
24	2
28	8
33	15
38	11
42	2
y mayor...	1

Tabla 10.- Análisis de estadística descriptiva para el ángulo de fricción.

Análisis estadístico	
Media	31
Error típico	0.8
Mediana	32
Desviación estándar	5.1
Varianza de la muestra	26
Mínimo	19
Máximo	47

El histograma de la **Figura 12** muestra gráficamente la información y aclara la escogencia de las funciones de densidad para hacer el análisis a estos parámetros.

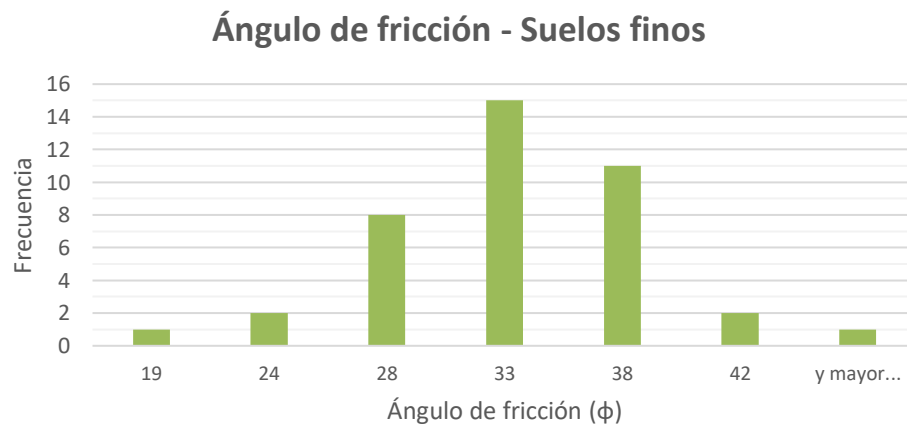


Figura 12.- Histograma de distribución de frecuencias para el ángulo de fricción en suelos finos.

Los datos se procesan aplicando la distribución normal y la distribución log normal que corresponden a funciones de densidad de dos parámetros, los cuales son la mediana o promedio y la desviación estándar, en la **Figura 13** se observa la campana de Gauss que ilustra todos los valores del ángulo de fricción hallados en los ensayos de laboratorio de las diferentes subregiones del Departamento de Caldas.

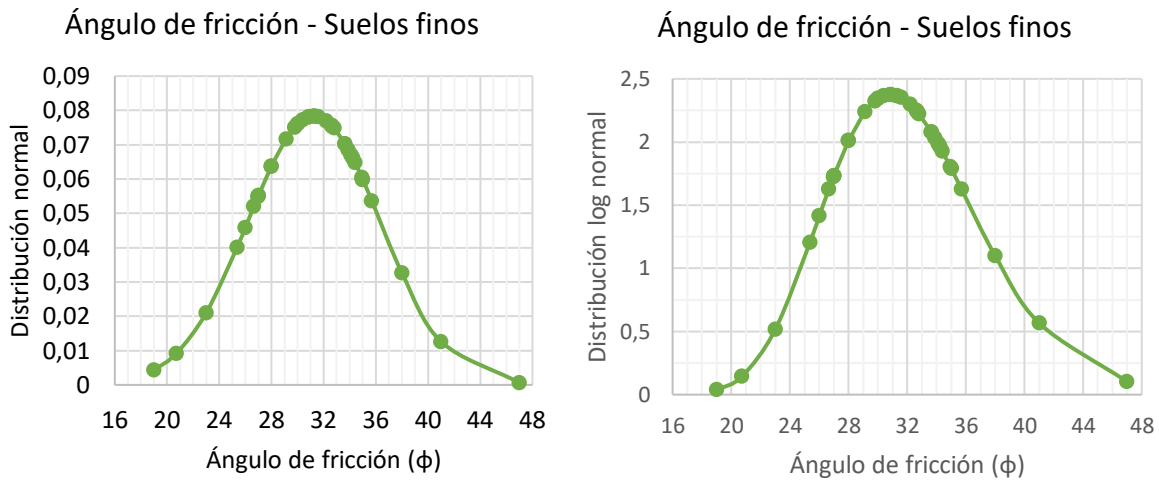


Figura 13.- Funciones de distribución para el ángulo de fricción de la muestra de suelos finos.

En la **Figura 14** se observa gráficamente la comparación del porcentaje de error de cada una de las distribuciones analizadas.

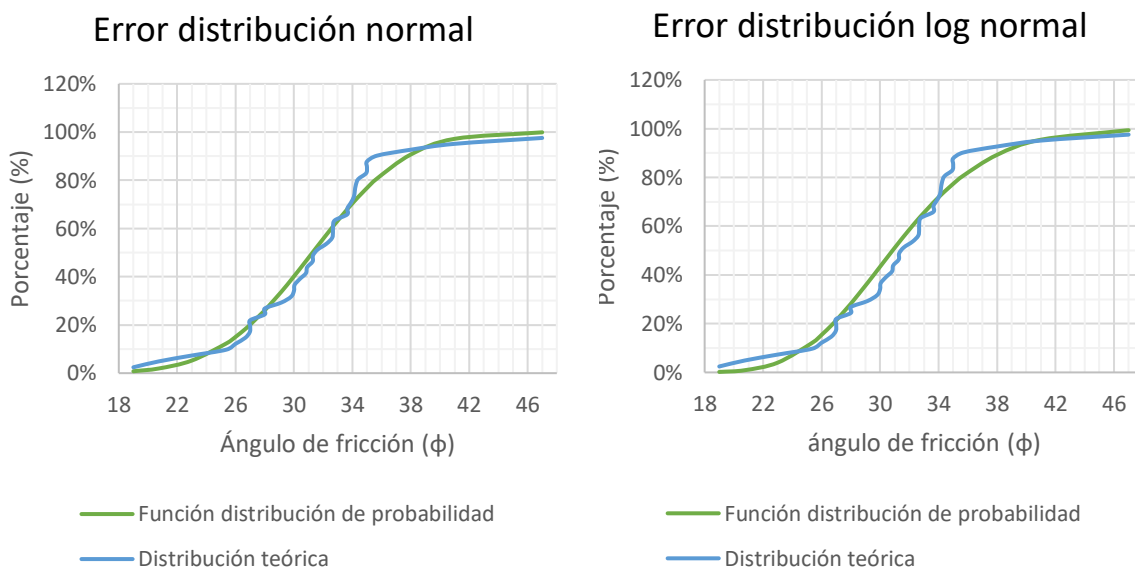


Figura 14.- Porcentaje de error en las funciones de distribución para el ángulo de fricción en suelos finos.

Con esto, comparando individualmente los valores mínimos hallados para la diferencia en valor absoluto entre las funciones de densidad y la función teórica (ver **Anexo A- I** y **Anexo A- II**), se propone para el ángulo de fricción de suelos finos aplicar la distribución normal que representa el menor porcentaje de error.

6.1.2 Cohesión – Suelos finos.

En la **Tabla 11** se establecen para los limos y las arcillas los rangos de la cohesión para establecer el histograma. Por medio de la estadística descriptiva se presentan en la **Tabla 12** los parámetros relevantes para caracterizar la muestra de suelos finos.

Tabla 11.- Distribución de frecuencia para la cohesión.

Cohesión (kg/cm²)	
Clase	Frecuencia
0.05	1
0.20	9
0.50	14
0.60	7
0.75	7
y mayor...	2

Tabla 12.- Análisis de estadística descriptiva para la cohesión en suelos finos.

Análisis estadístico	
Media	0.4
Error típico	0.0
Mediana	0.4
Desviación estándar	0.2
Varianza de la muestra	0.1
Mínimo	0.04
Máximo	0.878

En el histograma de la distribución de frecuencia de la **Figura 15** se observan los valores de la cohesión de los suelos finos.

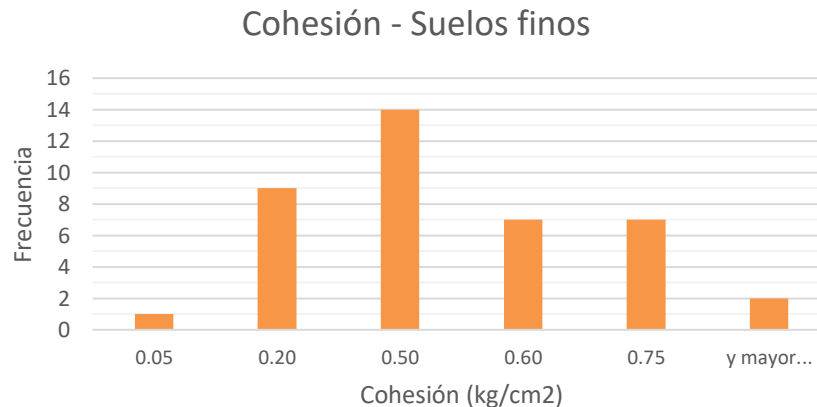


Figura 15.- Histograma de distribución de frecuencias para la cohesión en suelos finos.

Se presenta en la **Figura 16** las funciones de densidad de dos parámetros donde se observa la campana de Gauss que ilustra todos los valores de la cohesión hallados en los ensayos de laboratorio en las diferentes subregiones del Departamento de Caldas.

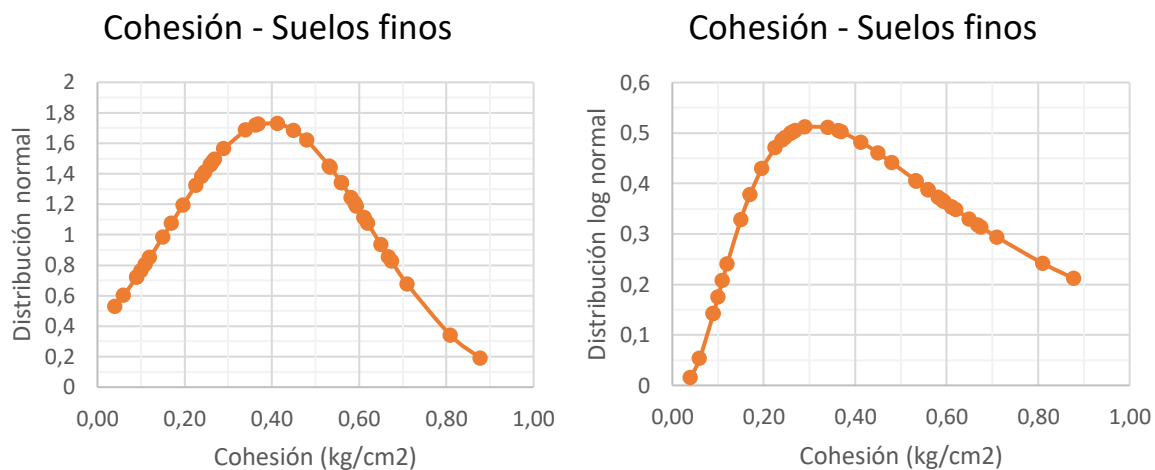


Figura 16.- Funciones de distribución para la cohesión de la muestra de suelos finos.

En la **Figura 17** se observa gráficamente la comparación del porcentaje de error de cada una de las distribuciones analizadas.

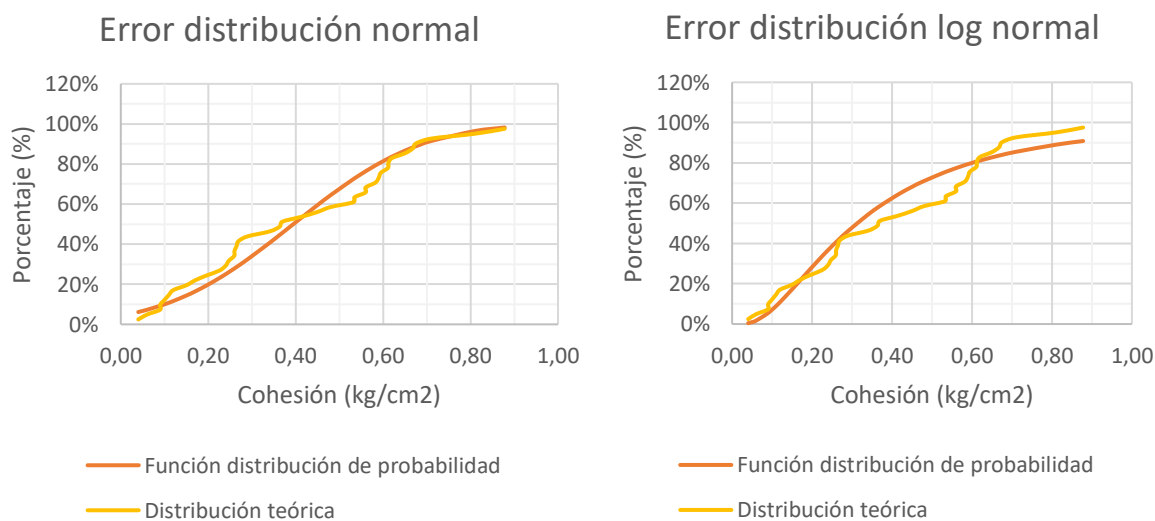


Figura 17.- Porcentaje de error de las funciones de distribución para la cohesión en suelos finos.

Con esto, comparando individualmente los valores mínimos hallados para la diferencia en valor absoluto entre las funciones de densidad y la función teórica (ver **Anexo A- V** y **Anexo A- VI**), se propone para la cohesión en los suelos finos aplicar la distribución normal que representa el menor porcentaje de error.

6.2 Arenas

En la **Tabla 13** se encuentran las arenas arcillosas (SC), las arenas limosas (SM) y las arenas arcillo-limosas (SC-SM) de los ensayos de clasificación de los suelos para cuarenta y nueve (49) muestras de suelo de los sitios críticos de los estudios y diseños en las diferentes subregiones del Departamento de Caldas.

Tabla 13.- Parámetros geotécnicos para arenas del Departamento de Caldas.

No.	LOCALIZACIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	Profundidad de la muestra (m)	Humedad Natural (%)	Ángulo de fricción (ϕ)	Cohesión (kg/cm ²)	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS
1	Varsovia - Filadelfia	K3+000	2.0	8.5	40	0.10	SC
2	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+450	10.5	23.4	51	0.13	SC
3	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K6+300	4.0	53.9	28	0.05	SC
4	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K13+400	2.5	21.5	33	0.99	SC
5	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K2+700	2.0	27.4	34	0.31	SC
6	Aránzazu - Salamina	K4+000	2.5	29.6	33	0.49	SC
7	Aránzazu - Salamina	K17+600	2.0	18.1	28	0.46	SC
8	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	3.0	42.8	28	0.50	SC
9	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	9.5	33.9	36	0.59	SC
10	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	7.5	12.6	28	1.09	SC
11	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	2.0	25.1	20	0.87	SC
12	Curazao - San Francisco	K13+200	2.0	39.0	36	0.12	SC
13	Curazao - San Francisco	K18+300	2.0	42.2	30	0.26	SC
14	Petaqueros - Manzanares	K4+550	5.3	14.5	43	0.50	SC
15	Norcasia - Berlín - Florencia	K50+300	5.4	30.1	46	0.88	SC
16	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K10+500	3.0	30.5	34	0.20	SM
17	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	2.6	79.6	59	0.56	SM
18	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	6.6	68.5	37	0.75	SM
19	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	3.0	97.3	22	0.21	SM
20	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	4.0	97.3	37	0.45	SM
21	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	2.0	84.7	40	0.32	SM
22	Marmato - EL Llano	K0+280	1.0	18.7	32	0.57	SM
23	Marmato - EL Llano	K0+700	1.7	12.6	32	0.51	SM
24	Marmato - EL Llano	K0+720	1.0	11.5	31	0.43	SM
25	Marmato - EL Llano	K0+724	1.2	11.5	31	0.43	SM
26	Marmato - EL Llano	K0+800	1.0	15.3	34	0.62	SM
27	Marmato - EL Llano	K0+960	1.4	12.6	33	0.48	SM
28	Marmato - EL Llano	K1+135	1.4	9.7	31	0.52	SM
29	Marmato - EL Llano	K1+315	1.8	14.7	18	0.92	SM
30	Marmato - EL Llano	K1+400	2.0	14.3	18	0.90	SM
31	Marmato - EL Llano	K1+460	2.0	14.7	23	0.91	SM
32	Marmato - EL Llano	K1+575	3.2	13.6	26	0.59	SM
33	Marmato - EL Llano	K1+790	1.0	18.7	32	0.57	SM

68 Propuesta teórica de muros con llantas de acuerdo con las características de los suelos de la región. Caso de estudio: Departamento de Caldas

No.	LOCALIZACIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	Profundidad de la muestra	Humedad Natural	Ángulo de fricción	Cohesión	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
			(m)	(%)	(ϕ)	(kg/cm ²)	SUCS
34	Marmato - EL Llano	K1+813	1.3	18.7	32	0.57	SM
35	Marmato - EL Llano	K1+821	1.0	18.3	31	0.49	SM
36	Marmato - EL Llano	K3+510	1.0	18.2	33	0.60	SM
37	Marmato - EL Llano	K3+584	1.0	19.7	33	0.60	SM
38	Marmato - EL Llano	K3+593	1.0	16.8	32	0.59	SM
39	Salamina - La Merced	K6+900	4.3	17.5	33	0.24	SM
40	Salamina - La Merced	K6+900	4.4	17.4	33	0.23	SM
41	Aránzazu - Salamina	K4+000	2.0	30.0	22	0.76	SM
42	Manizales - Neira	K0+100	1.5	38.2	36	0.33	SM
43	Manizales - Neira	K0+100	1.0	43.6	36	0.25	SM
44	Petaqueros - Manzanares	K3+500	2.0	14.6	34	0.17	SM
45	Petaqueros - Manzanares	K4+550	2.2	14.5	32	0.72	SM
46	Marulanda- Alto del toro - Manzanares	K10+900	1.5	15.5	32	0.16	SM
47	Salamina - La Merced	K6+900	2.9	5.0	43	0.24	SC-SM
48	Salamina - La Merced	K6+900	4.8	11.9	47	0.24	SC-SM
49	Salamina - La Merced	K6+900	5.2	10.0	46	0.22	SC-SM

De acuerdo con esta clasificación de los suelos se procesan los datos aplicando estadística descriptiva para el análisis de los parámetros geotécnicos del ángulo de fricción y la cohesión, las funciones de densidad de la distribución normal y la distribución log normal comparadas con la función teórica determinan el modelo con menor porcentaje de error aplicable para las arenas en el Departamento de Caldas.

6.2.1 Ángulo de fricción – Arenas.

En la **Tabla 14** se establecen los rangos de la distribución de frecuencias para el ángulo de fricción en las arenas. Por medio de la estadística descriptiva se presentan en la **Tabla 15** los parámetros relevantes para caracterizar la muestra de arenas.

Tabla 14.- Distribución de frecuencia para el ángulo de fricción en arenas.

Ángulo de fricción	
Clase	Frecuencia
18	1
24	5
29	5
35	23
41	8
47	5
53	1
y mayor...	1

Tabla 15.- Análisis de estadística descriptiva para el ángulo de fricción en arenas.

Análisis estadístico	
Media	33.4
Error típico	1.1
Mediana	33.0
Desviación estándar	8.0
Varianza de la muestra	63.5
Mínimo	17.6
Máximo	59.1

En el histograma de la distribución de frecuencia de la **Figura 18** se presentan los valores calculados para el ángulo de fricción para las arenas.

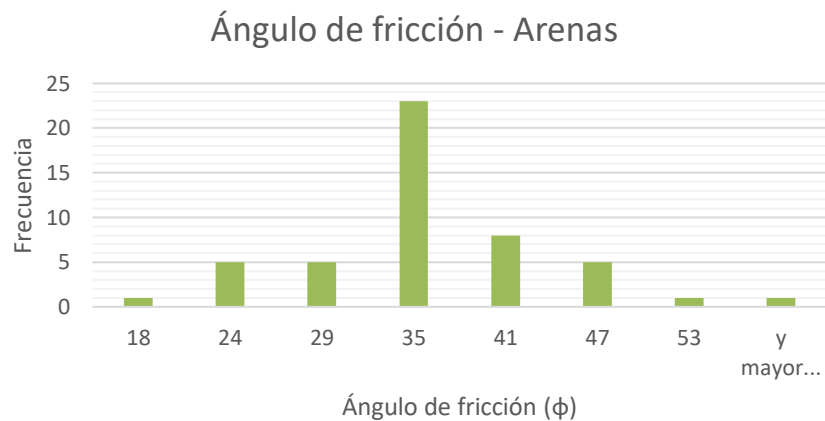


Figura 18.- Histograma de distribución de frecuencias para el ángulo de fricción en arenas.

En la **Figura 19** se tienen las funciones de densidad de los parámetros donde se observa la campana de Gauss que ilustra todos los valores del ángulo de fricción hallados en los ensayos de laboratorio de las muestras de las diferentes subregiones del Departamento de Caldas.

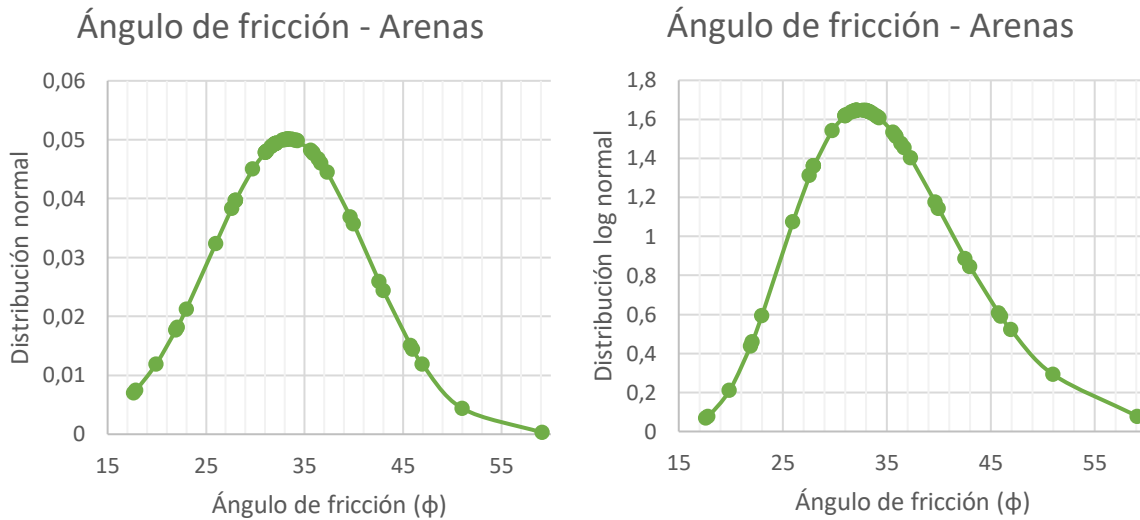


Figura 19.- Funciones de distribución para el ángulo de fricción de la muestra de arenas.

En la **Figura 20** se observa gráficamente la comparación del porcentaje de error de cada una de las distribuciones analizadas.

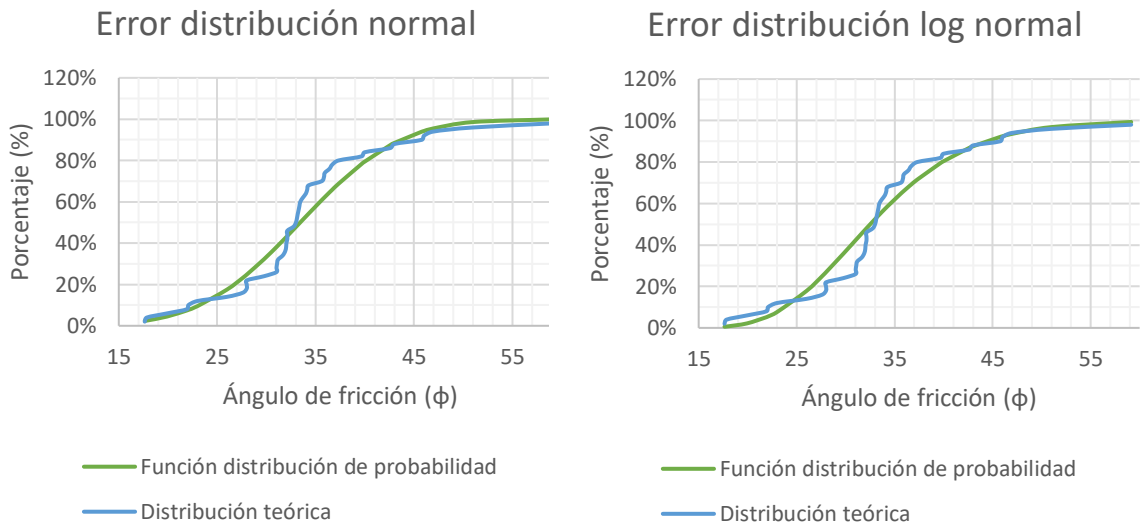


Figura 20.- Porcentaje de error de las funciones de distribución para el ángulo de fricción en arenas.

Con esto, comparando individualmente los valores mínimos hallados para la diferencia en valor absoluto entre las funciones de densidad y la función teórica (ver **Anexo A- III** y **Anexo A- IV**), se propone para el ángulo de fricción de las arenas aplicar la distribución log normal que representa el menor porcentaje de error.

6.2.2 Cohesión – Arenas.

En la **Tabla 16** se establecen los rangos de la distribución de frecuencias para la cohesión en las arenas. Por medio de la estadística descriptiva se presentan en la **Tabla 17** los parámetros relevantes para caracterizar la muestra de arenas.

Tabla 16.- Distribución de frecuencia para la cohesión en arenas.

Cohesión (kg/cm²)	
Clase	Frecuencia
0.05	1
0.2	6
0.5	20
0.6	11
0.9	7
0.95	2
y mayor...	2

Tabla 17.- Análisis de estadística descriptiva para la cohesión en arenas.

Análisis estadístico	
Media	0.48
Error típico	0.04
Mediana	0.49
Desviación estándar	0.26
Varianza de la muestra	0.07
Mínimo	0.05
Máximo	1.09

En el histograma de la distribución de frecuencia de la **Figura 21** se observa como se comportan los valores obtenidos de la cohesión para las arenas.

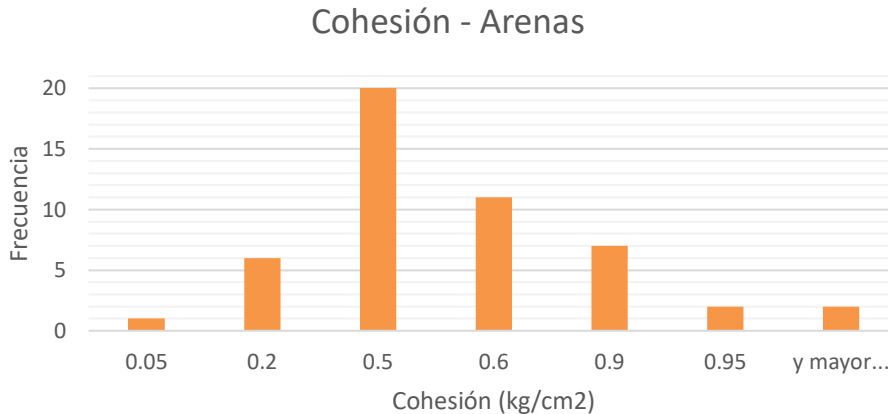


Figura 21.- Histograma de distribución de frecuencias para la cohesión en arenas.

Se presenta en la **Figura 22** las funciones de densidad de los resultados donde se observa la campana de Gauss que ilustra todos los valores de la cohesión hallados en los ensayos de laboratorio en las diferentes subregiones del Departamento de Caldas.

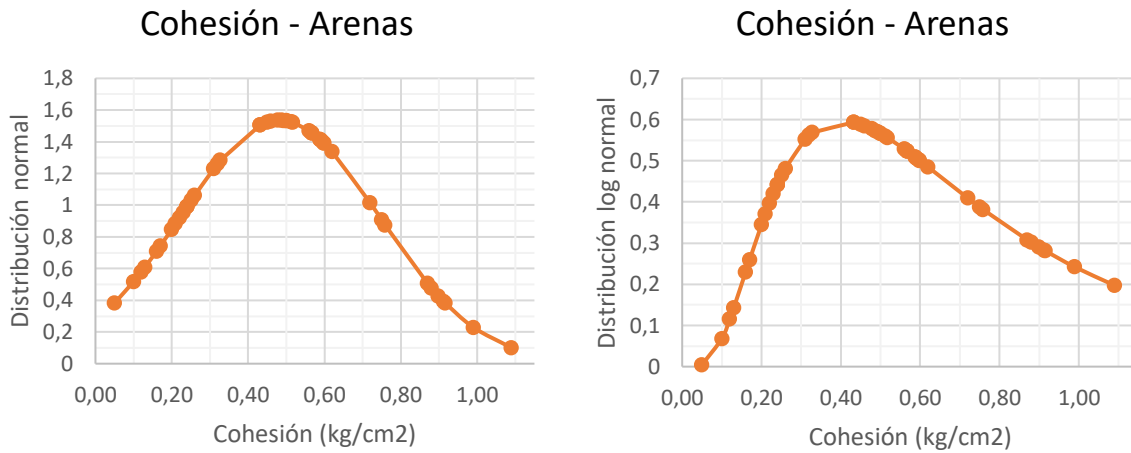


Figura 22.- Funciones de distribución para la cohesión de la muestra de arenas.

En la **Figura 23** se observa gráficamente la comparación del porcentaje de error de cada una de las distribuciones analizadas.

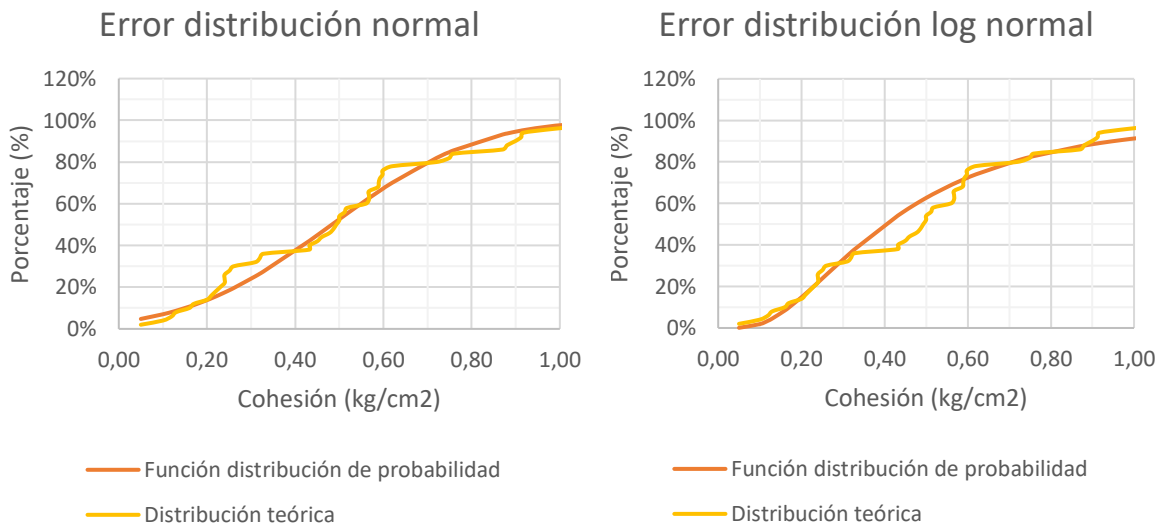


Figura 23.- Porcentaje de error de las funciones de distribución para la cohesión en arenas.

Con esto, comparando individualmente los valores mínimos hallados para la diferencia en valor absoluto entre las funciones de densidad y la función teórica (ver **Anexo A- VII** y **Anexo A- VIII**), se propone para la cohesión de las arenas aplicar la distribución log normal que representa el menor porcentaje de error

6.3 Gravass

En la **Tabla 18** se presentan los resultados de los ensayos realizados en gravas arcillosas (GC) y gravas limosas (GM) para clasificación de los suelos para cuatro (4.0) muestras de suelo de los sitios críticos de los estudios y diseños en las diferentes subregiones del Departamento de Caldas.

Tabla 18.- Parámetros geotécnicos para otras clasificaciones de suelos en el Departamento de Caldas.

No.	LOCALIZACIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	Profundidad de la muestra	Humedad Natural	Ángulo de fricción	Cohesión	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
			(m)	(%)	(ϕ)	(kg/cm ²)	SUCS
1	Margaritas - Risaralda - Cauya	K1+000	5.0	37.4	35	0.10	GC
2	Petaqueros - Manzanares	K4+700	5.4	14.5	43	0.50	GM
3	Petaqueros - Manzanares	K4+700	2.2	14.5	40	0.60	GM
4	Marquetalia - Samaná	K26+500	5.0	18.8	31	0.11	GM

Las gravas al no tener suficientes datos para ser una muestra representativa de ensayos de laboratorio no se realiza un análisis de estadística descriptiva para el análisis de los parámetros geotécnicos del ángulo de fricción y la cohesión, ni las funciones de densidad de la distribución normal y la distribución log normal comparadas con la función teórica para determinar el modelo con menor porcentaje de error.

6.4 Análisis de datos

Con la aplicación de la estadística descriptiva sobre la muestra de ensayos de laboratorio para la clasificación de suelos mediante la metodología SUCS, el ensayo de corte directo en condición consolidada drenada y en algunos casos la compresión inconfineda, genera resultados que ayudan a entender el funcionamiento de los suelos finos y las arenas con base en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del ángulo de fricción y la cohesión. Estos presentan un comportamiento de acuerdo con las funciones de densidades de distribución normal o distribución log normal. El modelo de análisis se calibró teniendo en cuenta el porcentaje de error que presente la menor diferencia para el valor absoluto con respecto a la función de distribución teórica. Una vez procesada la información, el análisis consiste en comparar los parámetros geotécnicos de suelos finos y arenas con respecto a la mecánica de suelos, para establecer:

- La relación de los parámetros de esfuerzo cortante de autores como, Lambe & Whitman (1972), Terzaghi, K. & Peck (1978), Peck (1993), Bowles (1997) y Braja M Das (2001), para obtener valores de diseño adaptados al Departamento de Caldas.
- La función de densidad más ajustada a los datos obtenidos para cada parámetro y tipo de suelo con base en el porcentaje de error.
- Un intervalo de confianza para definir con base en los datos con mayor frecuencia, los valores del ángulo de fricción y la cohesión de diseño, para la modelación de las obras tipo de los muros con llanta.

Además, se plantearán los escenarios para los parámetros de diseño cuando los suelos presentes sean gravas, hecho que necesitará identificar más zonas en el departamento donde se encuentre este tipo de suelo o la valoración de estas variables mediante otros ensayos de laboratorio como el ensayo de penetración estándar (SPT).

Luego, se analiza la implementación como relleno de los muros de materiales alternativos como las cenizas volantes y escoria de la siderúrgica Ternium ubicada en la ciudad de Manizales, Caldas, considerándolas como un suelo y estableciendo los escenarios al combinar con los suelos de la región.

Los resultados de los ensayos de corte directo para las muestras de estudios y diseños corresponden a la condición de “consolidado drenado”, por lo tanto, la resistencia al esfuerzo cortante del suelo se calcula con el criterio de falla Mohr–Coulomb, comportándose según la envolvente de falla ($s = c + \sigma' \tan \varphi$). Gráficamente se puede ver en la **Figura 24** y analíticamente en la **Tabla 8**, la **Tabla 13** y la **Tabla 18** para la clasificación de los suelos finos, las arenas y las gravas del Departamento de Caldas.

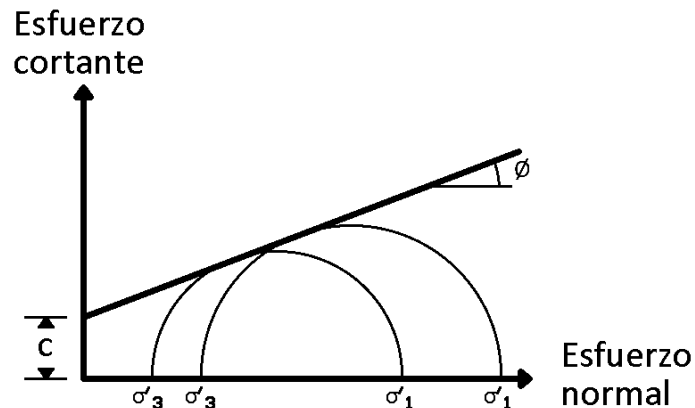


Figura 24.- Diagrama de envolvente de falla Mohr – Coulomb.

Fuente: (Das, 2001; Lambe & Whitman, 1972; Peck et al., 1974)

6.4.1 Ángulo de fricción

La **Tabla 5** se tomará para tener información de los suelos del Departamento de Caldas, cabe aclarar que en este caso de estudio se acogió en la denominación de suelos finos a las arcillas inorgánicas de alta plasticidad (CH), arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad (CL), limos inorgánicos de alta plasticidad (MH) y limos inorgánicos de baja plasticidad (ML) y en las arenas se encuentran arenas arcillosas (SC), arenas limosas (SM) y la mezcla de arena arcillosa y limosa (SC-SM).

En la **Tabla 19** se presentan los rangos para el ángulo de fricción de la **Tabla 9** y de la **Tabla 14** para las diferentes subregiones del Departamento de Caldas según las clasificaciones de suelos presentadas. Los suelos finos con respecto a la **Tabla 5** (a) se encuentran similar al rango de limos siendo coherente dado que de los cuarenta (40) datos procesados solo seis (6.0) son arcillas, en el caso de las arenas el rango acogería tanto los granos redondeados como los gruesos con una variación desde suelta hasta densa, en la **Tabla 5** (b) abarcando el rango suelto y compacto es comparable con los limos inorgánicos, en las arenas se tiene el mismo análisis que en (a), para la **Tabla 5** (c) los

suelos finos se comportan según el rango de los limos (no plásticos) para la compactación media y compacta de la resistencia máxima del ensayo triaxial, en las arenas teniendo en cuenta esta misma apreciación son comparables los rangos.

Tabla 19.- Ángulos de fricción para suelos del Departamento de Caldas.

Tipo de suelo	ϕ° (grados)
Suelos finos	
CH – CL	28 – 42
MH – ML	
Arenas	
SC – SM – SC-SM	24 – 47

Fuente: Elaboración propia

Nota: Los valores propuestos están basados en el ensayo de corte directo consolidado drenado a diferentes profundidades en diferentes profundidades y en diferentes subregiones del Departamento de Caldas.

Para entender el comportamiento de las funciones de densidad se analizó el porcentaje de error respecto a la distribución teórica, esto se observa en la **Figura 14** y la **Figura 20** que gráficamente presenta cuál distribución se ajusta más a los datos, analíticamente se pudo determinar con el valor absoluto de la diferencia de las distribuciones comparando uno a uno cual se ajustaba mejor a la distribución teórica, asimismo en la **Tabla 20** se establecieron los valores máximos de error hallados en el análisis estadístico.

Tabla 20.- Diferencia máxima para el porcentaje de error.

Ángulo de fricción		
Materiales	Diferencia máxima entre funciones de densidad frente a la función teórica	
	Distribución normal	Distribución log normal
Suelos finos	0.110	0.104
Arenas	0.137	0.163

Fuente: Elaboración propia.

Con lo anterior, se puede entender con más claridad la **Figura 13** y la **Figura 19** para el parámetro de la resistencia al corte del ángulo de fricción se recomienda para los suelos finos implementar la distribución normal y para las arenas la distribución log normal.

Siguiendo la metodología aplicada por Terzaghi, K., & Peck (1978) y Braja M Das (2001) citando a (Bjerrum y Simons, 1960) del “*Ángulo de fricción drenado de suelos cohesivos*”,

se nota que para los suelos Departamento de Caldas al aumentar el índice de plasticidad decrece el ángulo de fricción como se puede observar para los suelos finos en la **Figura 25**.

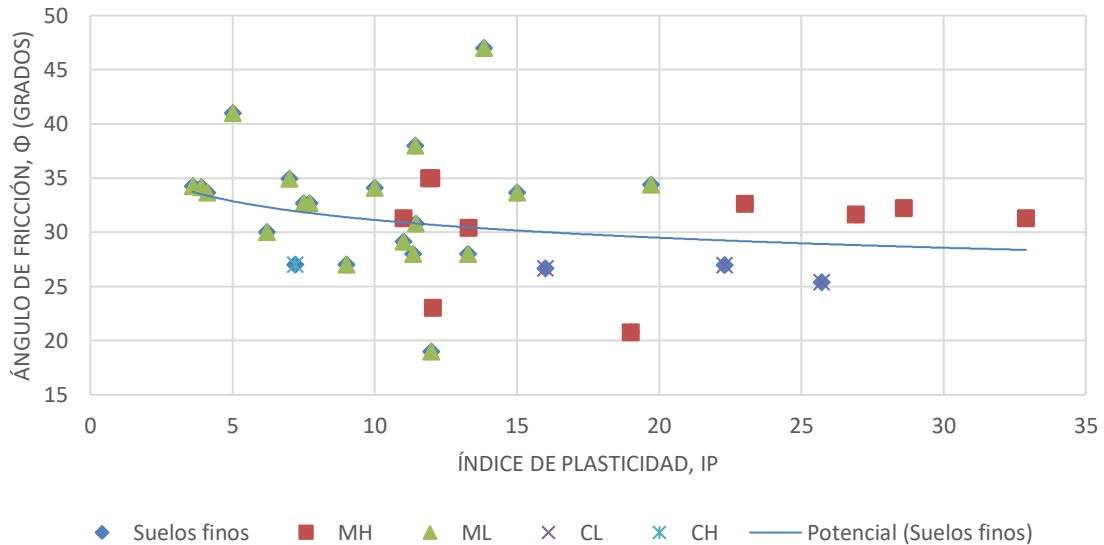


Figura 25.- Variación del ángulo de fricción con el índice de plasticidad para suelos finos

Fuente: Elaboración propia.

Con esto se pudo determinar que en el ensayo de corte directo consolidado drenado aplicando una línea de tendencia de función potencial que en un rango del índice de plasticidad entre 4% y 32%, el ángulo de fricción disminuye de 34 a 28 grados, descartando los datos que no tenían índice de plasticidad (NIP), para lo cual se propone la **Ecuación 24**

$$\varphi = 37.289 * IP^{-0.078}$$

Ecuación 24.- Correlación entre el índice de plasticidad con el ángulo de fricción.

Donde,

φ = Ángulo de fricción drenado, suelos finos cohesivos.

IP = Índice de plasticidad.

Para la aplicación se establecen las siguientes condiciones:

- Esta correlación solo aplica para suelos finos tipo arcillas inorgánicas de alta plasticidad (CH), arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad (CL), limos inorgánicos de alta plasticidad (MH) y limos inorgánicos de baja plasticidad (ML).

- El rango de aplicación para el índice de plasticidad está entre 4 y 32.
- Los valores del ángulo de fricción que se obtienen utilizando la **Figura 25** se adquirieron con la realización de ensayos de corte directo en condición consolidado drenado.
- La muestra de suelos corresponden a suelos finos tomadas de las diferentes subregiones del Departamento de Caldas, cuyas localizaciones se presentan en la **Tabla 8**.
- Esto no aplica para otros suelos como arenas y gravas.

Para las arenas no aplica esta correlación, dado que tienen un comportamiento con tendencia a ser constante frente al parámetro del índice de plasticidad, cómo se puede observar en la **Figura 26**.

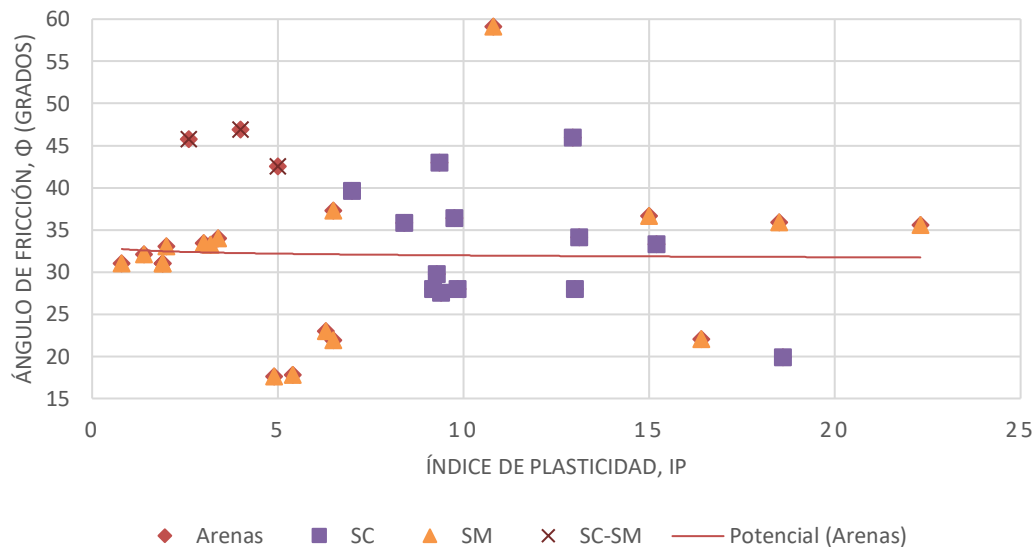


Figura 26.- Variación del ángulo de fricción con el índice de plasticidad para arenas

Fuente: Elaboración propia.

6.4.2 Cohesión

En la **Tabla 21** se observa para la información disponible para el Departamento de Caldas la distribución de frecuencias de la cohesión para los suelos finos y las arenas obtenidos en la **Tabla 11** y la **Tabla 16**, mostrándose los valores entre los que oscilan este parámetro de la resistencia al corte.

Tabla 21.- Cohesión para suelos del Departamento de Caldas.

Tipo de suelo	Cohesión (kg/cm ²)
Suelos finos	
CH – CL	0.20 – 0.75
MH – ML	
Arenas	
SC – SM – SC-SM	0.20 – 0.90

Fuente: Elaboración propia

En el histograma de la **Figura 16** y la **Figura 21** los valores más altos se agrupan en el rango de 0.20 a 0.50 kg/cm² para suelos finos y también para las arenas, esto se puede atribuir a la cantidad de limos y arcillas presentes en las muestras de suelos arenosos.

Tanto la distribución normal como la distribución log normal se acomodan adecuadamente a los datos, gráficamente la **Figura 17** y la **Figura 23** y son tan ajustadas que el modelo lo define por las diferencias entre la distribución normal y log normal (Ver **Anexo A- I, Anexo A- II, Anexo A- III, Anexo A- IV, Anexo A- V, Anexo A- VI, Anexo A- VII** y **Anexo A- VIII**), luego de revisar individualmente los valores con respecto a la distribución teórica, estableciendo que para los suelos finos se propone utilizar la distribución normal y para las arenas la distribución log normal.

Para utilizar adecuadamente la **Figura 16** y la **Figura 22**, se recomienda establecer un intervalo de confiabilidad con base en las distribuciones propuestas para los suelos finos y las arenas del Departamento de Caldas.

6.5 Caracterización de materiales alternativos como suelos – Ceniza volante y escoria de siderúrgica.

Se conformaron y ensayaron muestras con los suelos de diferentes sitios de la región adicionados o mejorados con ceniza volante y escoria obtenida en la siderúrgica Ternium, localizada en la ciudad de Manizales, Caldas, Colombia, los ensayos de granulometría (INVIAS, 2013a), peso específico y absorción de agregados gruesos (INVIAS, 2013g), peso específico aparente y peso unitario de muestras compactadas empleando especímenes parafinados (INVIAS, 2013i), ensayo de gravedad específica y absorción del agregado fino (INVIAS, 2013h), ensayo de Proctor estándar (INVIAS, 2013f), ensayo de CBR (INVIAS, 2013e), además se realizó la mezcla con un suelo de la región al cual se le realizó granulometría (INVIAS, 2013a), y de este modo realizar un ensayo de corte directo (INVIAS, 2013d) sobre la mezcla del suelo con la escoria.

Con esto se busca conocer de forma preliminar las propiedades mecánicas de la ceniza volante y la escoria local, este tipo de material generado en termoeléctricas y siderúrgicas ha mostrado un comportamiento adecuado en otros países en su uso en la ingeniería civil como se muestra en el numeral 5.1.3, asimismo como la utilización de llantas de disposición final para contribuir a mitigar sus efectos ambientales.

El resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a la escoria se puede observar en la **Tabla 22**.

Tabla 22.- Resumen de los ensayos de laboratorio de la muestra de escoria de la siderúrgica Ternium, ubicada en Manizales, Caldas, Colombia y otros tipos de suelo de la región.

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA						
Clasificación	% que pasa Tamiz N° 4	% que pasa Tamiz N° 200	Módulo de finura	LL	LP	IP
Escoria fina	88,15	1,93	3,91			
Escoria Intermedia	13,30	1,24				
ML**	100	62,62		47	36	12
ML**	100	62,92		45	33	12
ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO						
Clasificación	Peso específico Aparente	Peso específico Bulk	Peso específico Bulk SSS	% Absorción		
Escoria Gruesa (5,4 cm) *	2,40					

Escoria Intermedia	3,57	3,01	3,17	5,17
Escoria fina	3,32			3,49

ENSAYO DE COMPACTACIÓN - PROCTOR ESTANDAR

Clasificación	Porcentaje de Humedad	Peso unitario seco	Peso unitario húmedo
Escoria Punto 1	8,3	2,15	2,33
Escoria Punto 2	10,3	2,17	2,39
Escoria Punto 3	12,7	2,18	2,45
Escoria Punto 4	16,7	2,17	2,53

ENSAYO CBR

Clasificación	Golpes por capa	CBR 0.1"	CBR 0.2"
Mezcla 1:3 (Arena - Escoria)	12	39,9	42
Mezcla 1:3 (Arena - Escoria)	26	48,1	66,5
Mezcla 1:3 (Arena - Escoria)	55	60,1	82,5
Mezcla 1:3 (BG - Escoria)	12	30,3	59,7
Mezcla 1:3 (BG - Escoria)	26	56,1	70,6
Mezcla 1:3 (BG - Escoria)	55	77,1	103,5

ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Clasificación	Ángulo de fricción (ϕ)	Cohesión (c)	Peso unitario (γ)
Mezcla 2:1 (suelo - Escoria)	34	0.67	2.02

Nota: (**)- Clasificación del suelo de la región para realizar ensayo de corte directo mezclado con la escoria. (*)- Ensayo de peso específico con espécimen parafinado, las unidades de medida del peso específico, el ángulo de fricción y la cohesión son igual que en el numeral 6, las demás unidades son valores en porcentaje.

Fuente: Ensayos realizados en el laboratorio Hernández Ingeniería, localizado en Manizales, Caldas, Colombia.

En la **Figura 27** se observan algunas fotografías de ensayos de laboratorio realizado sobre la muestra de ceniza volante y escoria de la siderúrgica Ternium.





Figura 27.- Preparación de la muestra de ceniza volante y escoria en el laboratorio.

Fuente: Fotografías propias.

Sería importante tener un número significativo de ensayos de laboratorio de ceniza volante y escoria de la siderúrgica Ternium, porque en los ensayos preliminares, como se observa en la **Tabla 22**, que presenta buenas propiedades mecánicas para ser usado como material de capas del pavimento y relleno de obras de estabilidad cuando se mezclan con un suelo de tipo fino del Departamento de Caldas.

7. Muros de contención con llantas

En la red vial departamental de Caldas es común ver muros de contención con llantas como protección de laderas, la mayoría construidos de forma artesanal. La importancia de conocer los parámetros del suelo del Departamento de Caldas como se muestra en el capítulo anterior y de revisar las metodologías de cálculo para muros de contención con llantas existentes para proponer obras tipo, permitiría atender puntos críticos en la red vial terciaria de forma que impacte la relación costo – beneficio de la meta física, además de mitigar el efecto ambiental de un material con propiedades adecuadas para su uso dentro de la ingeniería civil.

Entre los elementos constructivos para la “cartilla” de muros con llantas que se presenta en este documento se encuentran las dimensiones de los rines de vehículos (numeral 5.4.3.3), los tipos de muros que se encuentran en las metodologías de cálculo (numeral 5.4.3.1), tipos de enlaces propuestos entre llanta y llanta (numeral 5.4.3.2), además de las suposiciones de diseño (numeral 5.4.3.4) y las ecuaciones de cálculo que se presentan en el numeral 5.4.3, en la **Tabla 7** y finalmente se presenta el proceso constructivo y los muros tipos con los parámetros de suelos calculados para el Departamento de Caldas. Además de los muros propuestos en el Anexo B, se puede observar las memorias de cálculo utilizadas en el cálculo de los muros propuestos y de este modo poder realizar el cálculo para diferentes configuraciones de muros con llantas.

7.1 Muros tipo

El muro de contención con llantas funciona como muro de gravedad o mecánicamente estabilizado, que dependen de su peso propio y del suelo de relleno. Los parámetros de diseño a tener en cuenta son el peso unitario, el ángulo de fricción y la cohesión. Se presentan los muros tipos con llantas según los parámetros de resistencia al corte de los suelos finos y las arenas propuestos para el Departamento de Caldas, para alturas de 2.0

y 4.0 metros. Fueron calculados como muros de gravedad y muros mecánicamente estabilizados, para los cuales se revisó los enlaces entre llantas con dos tipos de cuerdas de diferentes tensiones (500 kg y 1.000 kg), así como barras de acero (Varillas de ½”).

El dimensionamiento de diferentes alturas, tensiones de cuerda, diámetros de varillas de acero o refuerzo entre capas con geotextil se dejan al lector y se recomienda utilizar las ecuaciones de la **Tabla 7**, del Directorio del Planeación, Ingeniería y Transporte, del condado de West Yorkshire (Sims & Gaffney, 1976) o la metodología del Ministerio francés de Ciencia, Tecnología y Redes conocido como ‘*The Pneusol*’ (Long, N. et.al., 1990).

7.1.1 Propiedades de los tipos de suelo

Los parámetros de diseño implementados en la **Tabla 23** y la **Tabla 24** para el cálculo se tomaron con base en los siguientes criterios:

- El peso unitario húmedo se tomó como el promedio de los datos.
- El ángulo de fricción y la cohesión se tomaron como el valor pico de la función de distribución recomendada para suelos finos y arenas.

Tabla 23. - Parámetro de diseño de los suelos finos del Departamento de Caldas.

SUELOS FINOS		
MATERIAL DE RELLENO:		
Peso unitario húmedo (γ)	1,7	Ton/M ³
Ángulo de fricción (ϕ)	31	°
Cohesión (c)	40	KN/m ²
Longitud muro llantas (l)	2,5	m
Gravedad (g)	9,81	m/s ²
Altura del muro (h) - (m)	4.0	2.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. - Parámetro de diseño de las arenas del Departamento de Caldas.

ARENAS (LIMOSAS Y ARCILLOSAS)		
MATERIAL DE RELLENO:		
Peso unitario húmedo (γ)	1,79	Ton/M ³
Ángulo de fricción (ϕ)	33	°
Cohesión (c)	46	KN/m ²
Longitud muro llantas (l)	2,5	m
Gravedad (g)	9,81	m/s ²
Altura del muro (h) - (m)	4.0	2.0

Fuente: Elaboración propia.

7.1.2 Detalle de los muros en llanta calculados

En la **Figura 28** y la **Figura 29**, se muestran los detalles constructivos de muros con llantas de 2.0 y 4.0 metros de altura.

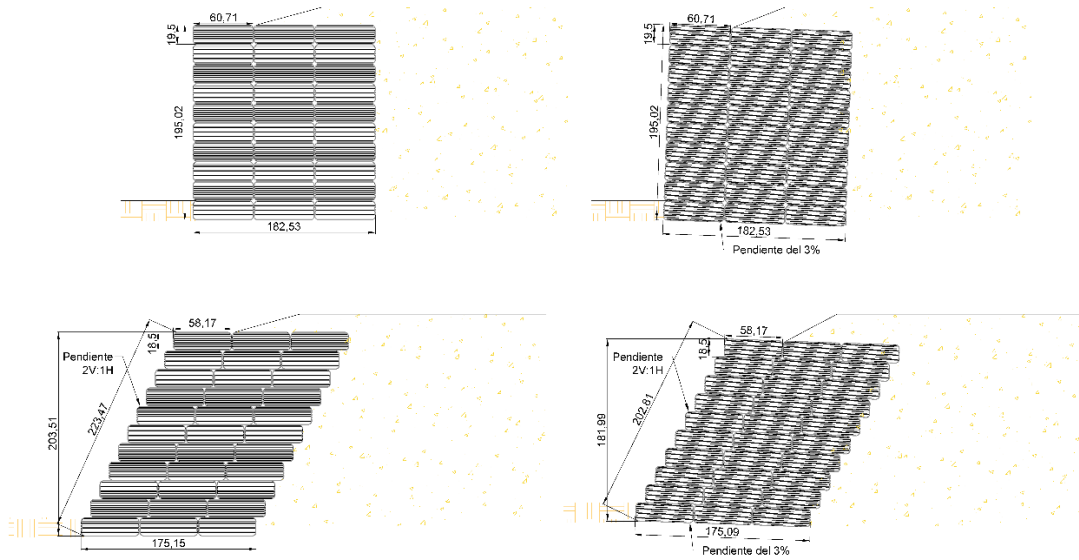


Figura 28.- Detalles de muros con llantas de 2.0 metros de altura.

Fuente: Elaboración propia

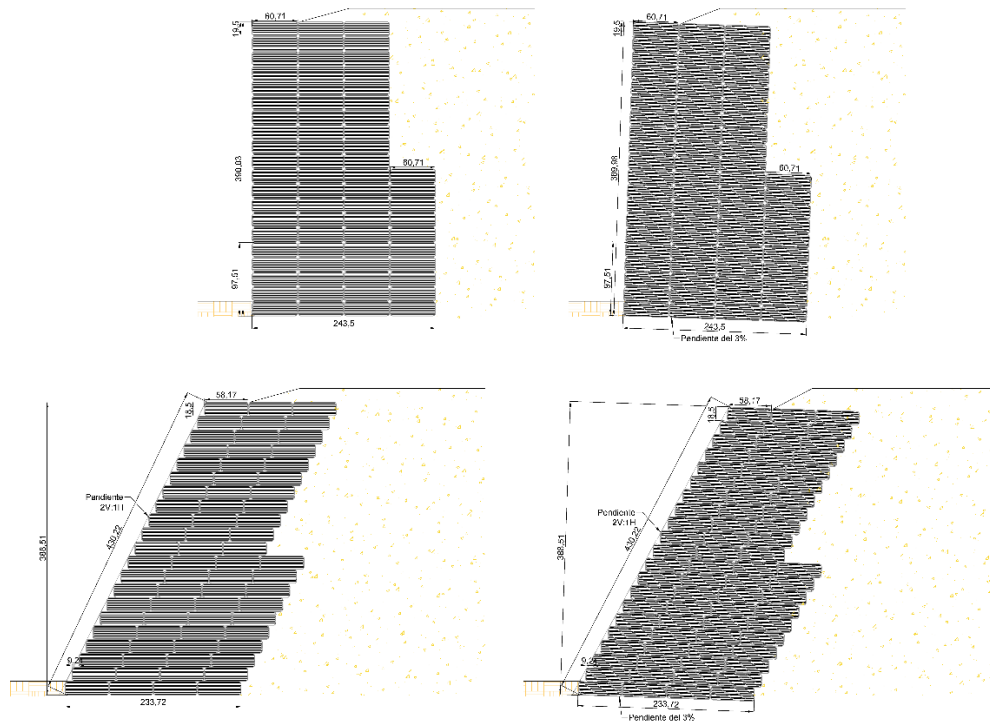


Figura 29.- Detalles de muros con llantas de 4.0 metros de altura.

Fuente: Elaboración propia

Los detalles constructivos se pueden ver con mayor claridad en el **Anexo C- 1** y el **Anexo C- 2**, se debe tener en cuenta que los esquemas de muro vertical son con base en dimensiones de llantas de rin 15” y el muro inclinado de pendiente 2:1 corresponden al rin 14”.

Las memorias de cálculo de los muros y el diseño de los elementos de enlace o anclajes se pueden observar en el anexo B. A continuación, se muestra el proceso constructivo en el numeral 7.2 y las recomendaciones de diseño en el numeral 7.3.

7.2 Proceso constructivo

Una vez evaluado que el diseño del muro de contención con llantas soporte las presiones laterales del terreno y cumpla con la estabilidad interna y externa, considerando esta alternativa como la solución adecuada al problema de estabilidad presentado según la pendiente y el nivel de erosión, se procede de la siguiente forma:

- Se procede con la excavación y nivelación del terreno según las dimensiones del diseño, así como la conformación del terreno.

Los procedimientos realizados con las llantas se pueden observar en la **Figura 30**, los pasos son los siguientes:

- En el corte de llantas la línea punteada indica el retiro de la parte superior de la llanta para facilitar la compactación del suelo con pisón.
- El llenado de las llantas se realiza en tres capas, los tipos de enlaces se eligen según los criterios del diseñador.
- Se pueden utilizar más de un tipo de elemento de refuerzo a la vez.
- La configuración del muro se puede dar de la forma gavión inverso o con una pendiente 2:1 (V:H).
- En la **Figura 30** también se muestra la distribución en planta de las llantas de dos filas, recomendadas en los métodos de diseño de muros con llantas.
- El llenado de las llantas se recomienda realizarse de forma manual y la compactación del suelo con un pisón.

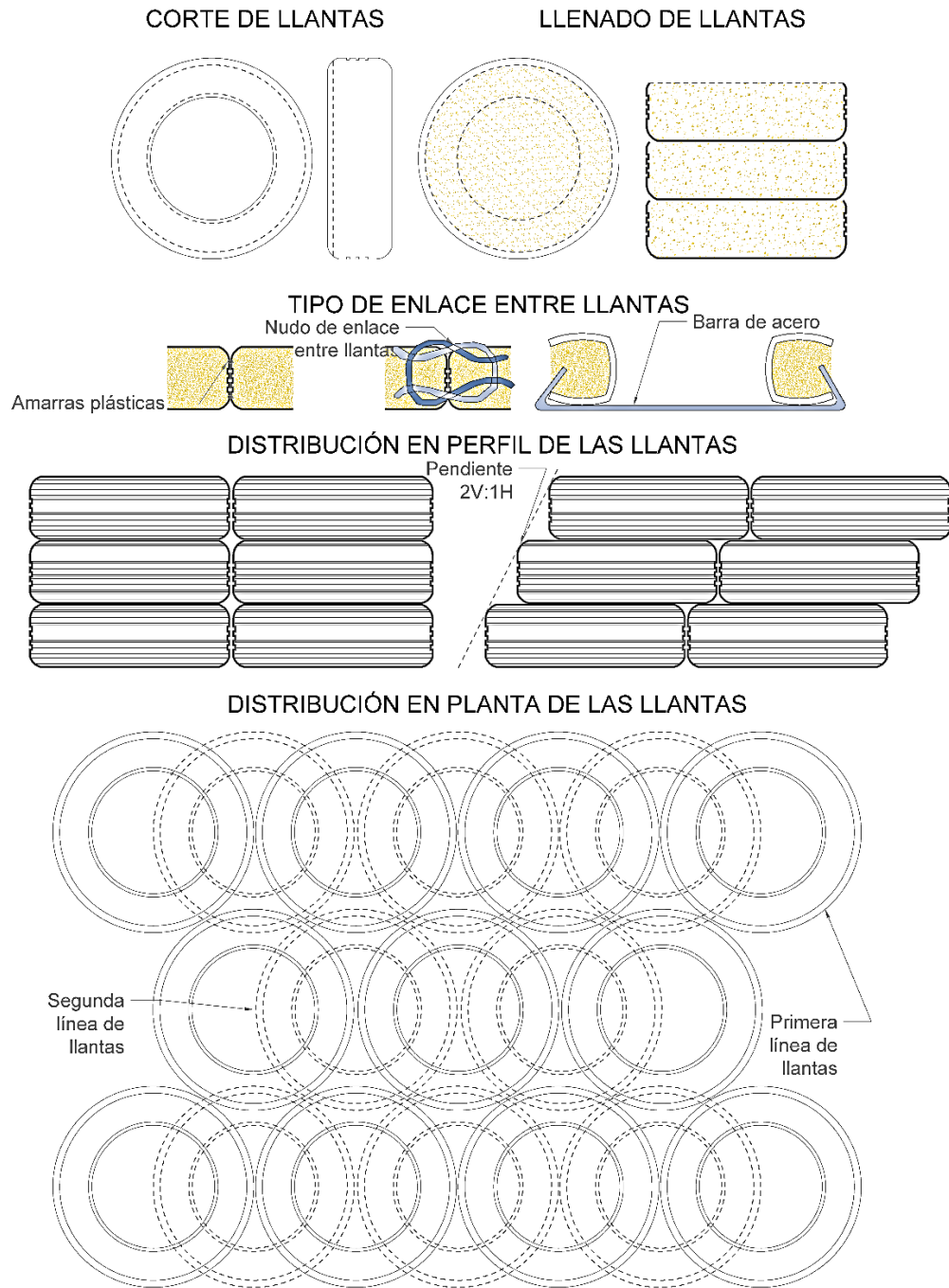


Figura 30.- Detalles constructivos de los muros de contención con llantas.

Nota: Las imágenes sirven de referencia para el proceso constructivo de los muros de contención con llantas, las dimensiones de las llantas dependen del tamaño del rin, y para cumplirse esto debe existir poca variabilidad entre los tamaños de las llantas a reciclarse.

Fuente: Elaboración propia basado en los diseños presentados por (Barros, P., Sarabia, G., Valdés, F., Serrano, P., & Gaytan, 2019; Hylands & Shulman, 2003; Rodríguez Gonzáles, 2016; Simm, J. D., & Wallis, 2004; Sims & Gaffney, 1976).

7.3 Recomendaciones de diseño.

Para mantener las buenas condiciones en las estructuras propuestas se recomienda:

- En caso de considerarse necesario por las condiciones del suelo, implementar solado de limpieza, con un espesor de losa de 0.1 metros en concreto clase F (14.5 MPa).
- Realizar filtros perimetrales y drenes horizontales, con salida a una zanja o cuneta para el manejo de las presiones hidrostáticas generadas por el agua. Para las laderas o zonas con presencia de matriz rocosas no son necesarios.
- Los valores del ángulo de fricción menores a 25° son críticos en los análisis de estabilidad al deslizamiento y al volcamiento para muros con llantas. En los suelos del Departamento de Caldas se encuentran con baja frecuencia según la información procesada en algunos ML, MH, SM y SC. Para estos tipos de suelos se recomienda mezclar el suelo con un material granular, piedras de los tamaños recomendados para gaviones o realizar un suelo cemento.
- El nivel de desplante y la inclinación en la pendiente (3% según la recomendación en 'The Pneusol'), favorecen la estabilidad del muro de contención con llantas.
- El reforzamiento con geotextil se puede realizar según la metodología del Ministerio francés de Ciencia, Tecnología y Redes, como se muestra en la **Figura 31**.

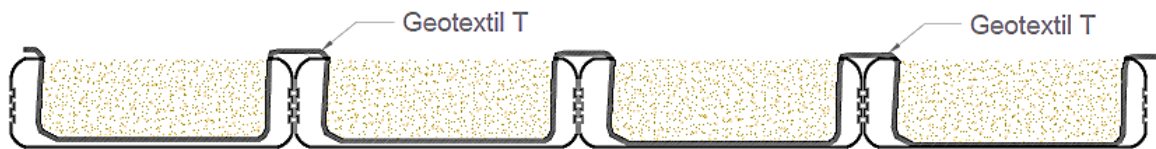


Figura 31.- Refuerzo con geotextil entre llantas.

Fuente: Adaptación de "Fig n° 2 Cross-section of first structure" (Long, N. et.al., 1990).

7.4 Ventajas y desventajas de los muros con llantas

Las ventajas de los muros con llantas son la rapidez en la construcción, necesidad mínima de personal técnico en obra, se puede realizar con herramienta básica, la duración prolongada de las llantas, impacto en la relación costo – beneficio, disminución de impactos ambientales adversos y comportamiento estructural adecuado como muro de contención.

Las desventajas consisten en la dificultad para minimizar la variabilidad en los tamaños de las llantas conseguidas y el impacto visual adverso.

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

El ensayo de caracterización del suelo mediante la metodología S.U.C.S que comprende el ensayo de granulometría y los límites de Atterberg es un ensayo cotidiano en cualquier estudio de suelo, por lo tanto, la división que se realizó en suelos finos que comprende arcillas inorgánicas de alta plasticidad (CH), arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad (CL), limos inorgánicos de alta plasticidad (MH) y limos inorgánicos de baja plasticidad (ML), en las arenas se encuentran las arenas arcillosas (SC), las arenas limosas (SM) y las arenas arcillo-limosas (SC-SM) y en las gravas se encuentran las gravas arcillosas (GC) y gravas limosas (GM) conlleva la aplicación de la investigación sea práctica para su implementación en la ingeniería civil.

El procesamiento de la información de la muestra constituida por noventa y tres (93) suelos del Departamento de Caldas en las diferentes subregiones (Alto Occidente, Bajo Occidente, Norte, Centro – Sur, Oriente y Magdalena) se realizó aplicando estadística descriptiva mediante un análisis estadístico de los parámetros de la resistencia al corte de los suelos, tablas de frecuencia, histogramas, gráficos de las funciones de densidad de dos variables (promedio y desviación estándar) de distribución normal y distribución log-normal y los gráficos del porcentaje de error de cada distribución con respecto a la distribución teórica.

El ángulo de fricción de los suelos del Departamento de Caldas presenta una variación amplia en el rango de valores, para los suelos finos en la **Tabla 9** se observa que estos varían entre 19° hasta 47°, los valores de mayor frecuencia se encuentran en el rango 28° a 33° (ver histograma en la **Figura 12**), para implementarse en el departamento para cálculos de obras de estabilización en la **Tabla 25** se recomienda el rango [28° - 42°]. En

las arenas en la **Tabla 14** se observa que los valores varían entre 18° hasta 59°, la mayor frecuencia se encuentra en el rango [29° a 35°] (Ver histograma en la **Figura 18**). para implementarse en el departamento para cálculos de obras de estabilización en la **Tabla 25** se recomienda el rango [24° - 47°].

Tabla 25.- Valores propuestos para el ángulo de fricción de los suelos del Departamento de Caldas.

Tipo de suelo	ϕ° (grados)
Suelos finos	
CH – CL	28 – 42
MH – ML	
Arenas	
SC – SM – SC-SM	24 – 47

Fuente: Elaboración propia

La cohesión de los suelos del Departamento de Caldas presenta una variación amplia en el rango de valores, para los suelos finos en la **Tabla 11** se observa que estos varían entre 0.04 kg/cm² hasta 0.88 kg/cm², los valores de mayor frecuencia se encuentran en el rango [0.20 kg/cm² – 0.50 kg/cm²] (ver histograma en la **Figura 15**), para implementarse en el departamento para cálculos de obras de estabilización en la **Tabla 26** se recomienda el rango [0.20 kg/cm² – 0.75 kg/cm²]. En las arenas en la **Tabla 16** se observa que los valores varían entre 0.05 kg/cm² hasta 1.09 kg/cm², la mayor frecuencia se encuentra en el rango [0.20 kg/cm² – 0.50 kg/cm²] (Ver histograma en la **Figura 21**). para implementarse en el departamento para cálculos de obras de estabilización en la **Tabla 26** se recomienda el rango [0.20 kg/cm² – 0.90 kg/cm²].

Tabla 26.- Valores propuestos para la cohesión de los suelos del Departamento de Caldas.

Tipo de suelo	Cohesión (kg/cm ²)
Suelos finos	
CH – CL	0.20 – 0.75
MH – ML	
Arenas	
SC – SM – SC-SM	0.20 – 0.90

Fuente: Elaboración propia

Para los parámetros de resistencia al corte de los suelos se eligió un intervalo de confianza basado en la frecuencia como se puede observar en la **Tabla 25** y **Tabla 26**, la inclusión de los valores fuera del rango depende de que se tenga un mayor número de ensayos de laboratorio y a partir de esto determinar si se incluyen o se consideran como valores atípicos.

Para los suelos finos se propone utilizar la distribución normal y para las arenas la distribución log normal, esto se deduce de la comparación entre datos de cada función de densidad con respecto a la función teórica como se puede analizar en las **Figura 14**, **Figura 17**, **Figura 20** y **Figura 23** o en los anexos (**Anexo A- I**, **Anexo A- II**, **Anexo A- III**, **Anexo A- IV**, **Anexo A- V**, **Anexo A- VI**, **Anexo A- VII** y **Anexo A- VIII**)

Para los suelos finos del Departamento de Caldas se propone la correlación $\phi = 37.289 * IP^{-0.078}$ (ver **Ecuación 24**) entre el ángulo de fricción y el índice de plasticidad según la metodología propuesta por Braja M Das (2001) citando a (Bjerrum y Simons, 1960). La variación según el tipo de suelo se puede observar en la **Figura 32**.

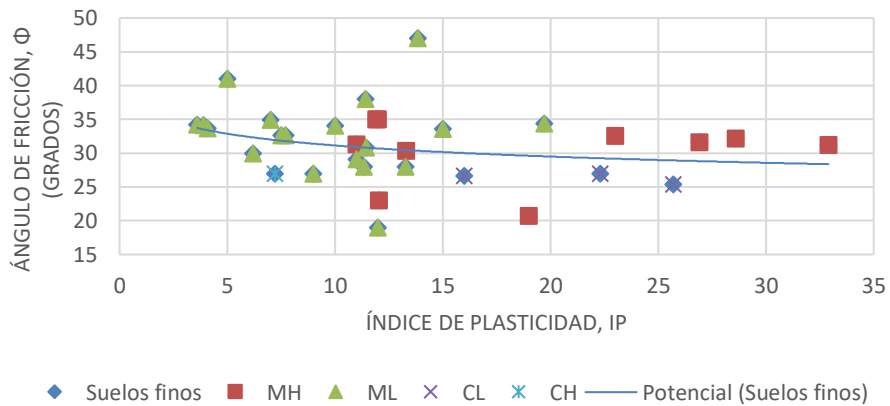


Figura 32.- Correlación propuesta entre el ángulo de fricción con el índice de plasticidad para suelos finos
Fuente: Elaboración propia.

Los ensayos de laboratorio realizados a la escoria de la siderúrgica Ternium, localizada en Manizales, Caldas, Colombia presenta buenas propiedades mecánicas para implementarse como material de base o material de relleno de obras de estabilidad al mezclarse con un tipo de suelo fino de la región para darle cohesión, dentro de los resultados se encuentra un peso específico de escoria de tamaño gruesa de 2.4 g/cm³, la escoria de tamaño intermedio 3.57 g/cm³ y escoria de tamaño fino 3.32 g/cm³, el ensayo

de compactación de Proctor estándar la humedad óptima se encontró en el 12.7% con valores de densidad seca de 2.18 g/cm^3 y húmeda de 2.45 g/cm^3 , los valores de los parámetros de resistencia al corte con relaciones 2:1 y 3:1 (Suelo : Escoria), se halló valores del ángulo de fricción de $^\circ$, de la cohesión de kg/cm^2 . Sin embargo, se propone evaluar una muestra representativa para conocer el comportamiento general del material o realizarle ensayos de laboratorio a la muestra antes de utilizarla.

Se propusieron muros con llanta tipo con las propiedades del suelo del Departamento de Caldas (ver **Tabla 23** y **Tabla 24**), para lo cual se aplicaron las ecuaciones desde la **Ecuación 7** hasta la **Ecuación 23** de la **Tabla 7**, aplicando la metodología implementada por (Sims & Gaffney, 1976), las memorias de cálculo se pueden ver en el Anexo B. Las alturas diseñadas fueron 2.0 metros y 4.0 metros, se diseñaron como muros mecánicamente estabilizados los elementos de enlace con cuerdas con resistencia a la tensión de 500 kg o 1.000 kg, también se diseñaron las barras de anclaje con acero de refuerzo con varillas de un diámetro de $\frac{1}{2}$ ", los detalles constructivos se observan en la **Figura 28** y la **Figura 29**, o con mayor detalle en el **Anexo C- 1** y el **Anexo C- 2**.

El ángulo de fricción es un parámetro determinante en el diseño de los muros con llantas, cuando el valor se encuentra por debajo de los 25° no se cumple con la estabilidad al deslizamiento y al volcamiento, en caso tal se recomienda atender las recomendaciones de diseño del numeral 7.3.

Se cumplió con el objetivo de establecer todos los elementos constructivos y el proceso tipo "cartilla" para muros de contención con llantas, en la **Figura 10** y la **Figura 11** se tienen las dimensiones comerciales de los vehículos tipo automóvil y camionetas, en el numeral 5.4.3.1 se tienen las configuraciones de muros con llantas, en el numeral 5.4.3.2 se tienen los tipos de enlaces que proponen diversas metodologías de cálculo, en el numeral 5.4.3.4 se presentan las hipótesis de diseño, en la **Tabla 7** se presenta la metodología de cálculo implementada por (Sims & Gaffney, 1976) y se deja al lector la revisión de la metodología del Ministerio francés de Ciencia, Tecnología y Redes denominada 'The Pneusol' del m (Long, N. et.al, 1990), el proceso constructivo se encuentra en el numeral 7.2 y en la **Figura 30** y finalmente las recomendaciones de diseño en el numeral 7.3.

8.2 Recomendaciones

Proponer que se genere una base de datos con los resultados de los ensayos de laboratorio existentes en las entidades públicas resultados de los de estudios y diseños contratados, con el objetivo de tener valores generales para el Departamento de Caldas y las subregiones (Alto Occidente, Bajo Occidente, Norte, Centro – Sur, Oriente y Magdalena) con la finalidad realizar diseños de obras de estabilización para atender los constantes deslizamientos que se presentan en las temporadas de lluvias, contribuyendo a la gestión del riesgo.

Evaluar con una muestra representativa el comportamiento de la ceniza volante y la escoria generada por la siderúrgica Ternium, para implementarse como material con propiedades adecuadas para su uso en obras de la ingeniería civil como ha sido el caso de otros países en los cuales se ha ido extendiendo su uso.

Para futuras investigaciones se plantea evaluar cómo influye en las propiedades del suelo la mezcla de suelos con materiales granulares o escoria, para implementarse como relleno de obras de estabilización.

9. Referencias bibliográficas

- Barros, P., Sarabia, G., Valdés, F., Serrano, P., & Gaytan, I. (2019). Muro de contención construido con neumáticos estabilizados mecánicamente. *Revista Ingeniería de Construcción*, 34(3), 252-267.
- Baykal, G., Edinçliler, A., & Saygili, A. (2004). Highway embankment construction using fly ash in cold regions. *Resources, Conservation and Recycling*, 42(3), 209–222. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.04.002>
- Bowles, J. E. (1997). Foundation analysis and design. In *FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN International Edition* (Fifth Edit).
- Calzada Pérez, Miguel Ángel, Vega Zamanillo, Ángel, Pascual Montejo, Ignacio, Hernández Sanz, A. (2008). *Vulnerabilidad geotécnica Caracterización y compactación de cenizas de Central Térmica empleadas en terraplenes de carreteras*. 13–20.
- Cantanhede, A., & Monge, G. (2002). Estado del arte del manejo de llantas usadas en las américas. *Division de Salud y Ambiente*, 41.
- CEDEX. (2011). *Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias*. 1–34. <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/24/diciembre-2011/valorizacion/aplicaciones/las-cenizas-volantes/33/terraplenes-y-obras-de-tierra.html>
- CEMPRE. (1998). *Manual de gestión integral de residuos sólidos urbanos*.
- Das, B. M. (2001). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*.
- Dermatas, D., & Meng, X. (2003). Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils. *Engineering Geology*, 70(3–4), 377–394. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00105-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00105-4)
- Fernández, S. F., Sánchez, J. M. C., Córdoba, A., & Largo, A. C. (2002). *Estadística descriptiva*. Esic Editorial.
- Hylands, K. N., & Shulman, V. (2003). *Civil engineering applications of tyres*. Viridis.

- [http://trl.demo.varistha.co.uk/uploads/trl/documents/VR5\(1\).pdf](http://trl.demo.varistha.co.uk/uploads/trl/documents/VR5(1).pdf)
- INVIAS. (2013a). I.N.V. E – 222 – GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo Para Materiales de Carreteras.*
- INVIAS. (2013b). I.N.V. E – 223 – GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo Para Materiales de Carreteras.*
- INVIAS. (2013c). I.N.V. E – 733 – GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SATURADOS Y SUPERFICIE SECA. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo Para Materiales de Carreteras.*
- INVIAS. (2013d). INV. E 125 - DETERMINACIÓN DEL LIMITE LÍQUIDO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo Para Materiales de Carreteras.*
- INVIAS. (2013e). INV. E 126 - LÍMITE PLÁSTICO DE LOS SUELOS. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo Para Materiales de Carreteras.*
- INVIAS. (2013f). INV. E 148 - CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO Y SOBRE MUESTRA INALTERADA. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo Para Materiales de Carreteras.*
- INVIAS. (2013g). INV. E 154 - ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA DRENADA (CD). *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo Para Materiales de Carreteras.*
- INVIAS. (2013h). INV.E 123 - Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo Para Materiales de Carreteras, 185–206.*
- Kramer, L. S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering.*
- Kumar, A., & Mandal, J. N. (2017). Effect of Reinforcement on Multi-tiered Fly Ash Wall. *Procedia Engineering, 189*(May), 446–453. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.072>
- Lambe, W., & Whitman, R. (1972). *Mecánica de Suelos* (p. 582). No. 624.151 LAM.
- Lawless, J. F. (2011). *Statistical models and methods for lifetime data (Vol. 362).* John Wiley & Sons.

- Long, N. T., AUDEOUD, B., BAILLY, J., JEAN, P., LAREAL, P., URSAT, P., & VALEUX, J. (1990). The Pneusol. *ETUDES ET RECHERCHES DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES-SERIE GEOTECHNIQUE, (GT 44)*.
- Medina, S. B., & Salazar, L. F. (2010). *Relación entre la resistencia al corte directo y propiedades físicas y químicas en algunos suelos de la zona cafetera colombiana*.
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2017). *Resolución 1326 de 2017* (pp. 1–22).
- OCADE LTDA. (2015). *Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá*. 18.
- Parra, J. M. (1995). *Estadística descriptiva e inferencial I*.
- Peck, R., Hanson, W., & Thornburn, T. (1974). *Ingeniería de Cimentaciones*. Wiley.
- Pérez Collantes, R. del C. (2012). *Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos*. 89. http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1313/1/perez_cr.pdf
- Revista Auto Crash. (2018). *Final al frustrado proceso en la disposición de llantas usadas*. <https://www.revistaautocrash.com/final-al-frustrado-proceso-la-disposicion-llantas-usadas/>
- Rodríguez Gonzáles, O. E. (2016). *Estandarización de técnicas de diseño y construcción de muros de tierra reforzada con llantas de desecho*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Russelli, C. (2008). Probabilistic methods applied to the bearing capacity problem. *Stuttgart: Institut Für Geotechnik*.
- Sabadías, A. V. (1995). *Estadística descriptiva e inferencial (Vol. 8)* (Univ de Castilla La Mancha (ed.)).
- Santayana, F. P. De, & Mazo, C. O. (1994). *Behavior of fly ash in experimental embankments*. 1603–1606.
- Simm, J. D., & Wallis, M. (2004). Sustainable re-use of tyres in port, coastal and river engineering. Guidance for planning, implementation and maintenance. In *Engineering* (Issue March). HR Wallingford.
- Sims, F. A., & Gaffney, J. A. (1976). Re-use of worn tyres in civil engineering construction (Interim report updated april 1977). *West Yorkshire Metropolitan County Council*.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1978). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica* ((No. 624.1).
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. JohnWiley & Sons.

-
- Valencia, S., & Elena, L. (2001). Caracterización física, química y mineralógica de las cenizas volantes. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 10(0124–8170), 47–62. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101007>
- Wesley, L. D. (2010). *Geotechnical engineering in residual soils* (John Wiley & Sons (ed.)).
- Xu, G., & Shi, X. (2018). Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review. *Resources, Conservation and Recycling*, 136(April), 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.010>

A. Anexo: Cálculo de las funciones de densidad de distribución normal y log normal para suelos finos y arenas.

N o	DESCRIPCIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	SUCS	ϕ	Función de densidad	Función de probabilidad	Distribución teórica	Diferencia
1	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	ML	19	0.004	0.008	0.024	0.016
2	Salamina - La Merced	K6+540	MH	21	0.009	0.019	0.049	0.029
3	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	MH	23	0.021	0.052	0.073	0.021
4	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	CL	25	0.040	0.123	0.098	0.026
5	Varsovia - La Marina - Juntas	K6+800	CL	26	0.046	0.150	0.122	0.029
6	Varsovia - Filadelfia	K1+060	CL	27	0.052	0.183	0.146	0.036
7	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	CL	27	0.055	0.200	0.171	0.029
8	Varsovia - La Marina - Juntas	K6+800	CH	27	0.055	0.201	0.195	0.006
9	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+450	ML	27	0.055	0.201	0.220	0.019
10	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+300	ML	28	0.064	0.261	0.244	0.017
11	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	ML	28	0.064	0.261	0.268	0.008
12	Petaqueros - Manzanares	K6+700	ML	29	0.072	0.337	0.293	0.045
13	Manzanares - La quiebra- Pensilvania	K14+900	ML	30	0.075	0.387	0.317	0.069
14	Varsovia - La Marina - Juntas	K1+300	ML	30	0.076	0.402	0.341	0.060
15	Varsovia - Filadelfia	K1+700	ML	30	0.076	0.405	0.366	0.039
16	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	MH	30	0.077	0.432	0.390	0.041
17	Manizales - La Cabaña - Tres Puertas	K17+700	ML	31	0.078	0.465	0.415	0.050
18	Manzanares - La quiebra- Pensilvania	K14+900	ML	31	0.078	0.471	0.439	0.032
19	Petaqueros - Manzanares	K11+600	MH	31	0.078	0.501	0.463	0.037
20	Manzanares - Marquetalia	K6+600	MH	31	0.078	0.502	0.488	0.015
21	Manizales - Neira	K0+100	MH	32	0.078	0.527	0.512	0.015
22	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	MH	32	0.077	0.574	0.537	0.038
23	Pácora - Aguadas	K3+300	MH	33	0.076	0.604	0.561	0.043
24	Marmato - EL Llano	K2+462	ML	33	0.075	0.608	0.585	0.023
25	Marmato - EL Llano	K2+504	ML	33	0.075	0.609	0.610	0.001
26	Manzanares - La quiebra- Pensilvania	K14+900	ML	33	0.075	0.618	0.634	0.016
27	Varsovia - Filadelfia	K1+160	ML	34	0.070	0.680	0.659	0.021
28	Marmato - EL Llano	K2+165	ML	34	0.070	0.680	0.683	0.003
29	Marulanda- Alto del toro - Manzanares	K10+900	ML	34	0.069	0.697	0.707	0.010
30	Varsovia - Filadelfia	K3+120	ML	34	0.067	0.711	0.732	0.021
31	Marmato - EL Llano	K2+100	ML	34	0.067	0.715	0.756	0.041
32	Marmato - EL Llano	K2+020	ML	34	0.066	0.720	0.780	0.061
33	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K10+500	ML	34	0.065	0.731	0.805	0.074

Nº	DESCRIPCIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	SUCS	ϕ	Función de densidad	Función de probabilidad	Distribución teórica	Diferencia
34	Varsovia - Filadelfia	K4+420	ML	35	0.060	0.764	0.829	0.065
35	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	MH	35	0.060	0.768	0.854	0.086
36	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	MH	35	0.060	0.768	0.878	0.110
37	Marulanda- Alto del toro - Manzanares	K10+900	ML	36	0.054	0.808	0.902	0.095
38	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	ML	38	0.033	0.907	0.927	0.020
39	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+450	ML	41	0.013	0.972	0.951	0.021
40	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K9+500	ML	47	0.001	0.999	0.976	0.023
PROMEDIO				31	Diferencia máxima entre funciones de distribución =0.11			
DESVIACIÓN ESTANDAR				5.1				

Anexo A- I.- Distribución normal – ángulo de fricción suelos finos

No	DESCRIPCIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	SUCS	Ángulo de fricción	$y=\ln(x)$	Función de densidad	Función de probabilidad	Distribución teórica	Diferencia
1	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	ML	19	2.944	0.037	0.002	0.024	0.022
2	Salamina - La Merced	K6+540	MH	21	3.032	0.145	0.009	0.049	0.040
3	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	MH	23	3.135	0.515	0.040	0.073	0.033
4	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	CL	25	3.234	1.206	0.122	0.098	0.025
5	Varsovia - La Marina - Juntas	K6+800	CL	26	3.258	1.413	0.154	0.122	0.032
6	Varsovia - Filadelfia	K1+060	CL	27	3.283	1.627	0.192	0.146	0.046
7	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	CL	27	3.295	1.725	0.212	0.171	0.041
8	Varsovia - La Marina - Juntas	K6+800	CH	27	3.296	1.733	0.214	0.195	0.018
9	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+450	ML	27	3.296	1.733	0.214	0.220	0.006
10	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+300	ML	28	3.332	2.010	0.282	0.244	0.038
11	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	ML	28	3.332	2.010	0.282	0.268	0.013
12	Petaqueros - Manzanares	K6+700	ML	29	3.372	2.240	0.366	0.293	0.073
13	Manzanares - La quiebra-Pensilvania	K14+900	ML	30	3.395	2.325	0.418	0.317	0.101
14	Varsovia - La Marina - Juntas	K1+300	ML	30	3.401	2.343	0.434	0.341	0.092
15	Varsovia - Filadelfia	K1+700	ML	30	3.403	2.346	0.437	0.366	0.071
16	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	MH	30	3.414	2.366	0.464	0.390	0.074
17	Manizales - La Cabaña - Tres Puertas	K17+700	ML	31	3.428	2.375	0.497	0.415	0.083
18	Manzanares - La quiebra-Pensilvania	K14+900	ML	31	3.431	2.375	0.504	0.439	0.065
19	Petaqueros - Manzanares	K11+600	MH	31	3.443	2.368	0.533	0.463	0.069
20	Manzanares - Marquetalia	K6+600	MH	31	3.444	2.367	0.534	0.488	0.046
21	Manizales - Neira	K0+100	MH	32	3.454	2.351	0.557	0.512	0.045
22	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	MH	32	3.473	2.298	0.602	0.537	0.065
23	Pácora - Aguadas	K3+300	MH	33	3.485	2.250	0.629	0.561	0.068
24	Marmato - EL Llano	K2+462	ML	33	3.486	2.242	0.633	0.585	0.048
25	Marmato - EL Llano	K2+504	ML	33	3.487	2.241	0.634	0.610	0.024
26	Manzanares - La quiebra-Pensilvania	K14+900	ML	33	3.490	2.223	0.642	0.634	0.008
27	Varsovia - Filadelfia	K1+160	ML	34	3.516	2.079	0.697	0.659	0.039
28	Marmato - EL Llano	K2+165	ML	34	3.516	2.078	0.698	0.683	0.015

No	DESCRIPCIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	SUCS	Ángulo de fricción	$y=\ln(x)$	Función de densidad	Función de probabilidad	Distribución teórica	Diferencia
29	Marulanda- Alto del toro - Manzanares	K10+900	ML	34	3.523	2.030	0.713	0.707	0.005
30	Varsovia - Filadelfia	K3+120	ML	34	3.529	1.989	0.724	0.732	0.007
31	Marmato - EL Llano	K2+100	ML	34	3.531	1.976	0.728	0.756	0.028
32	Marmato - EL Llano	K2+020	ML	34	3.533	1.961	0.732	0.780	0.048
33	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K10+500	ML	34	3.538	1.926	0.741	0.805	0.063
34	Varsovia - Filadelfia	K4+420	ML	35	3.554	1.806	0.771	0.829	0.059
35	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	MH	35	3.555	1.792	0.774	0.854	0.080
36	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	MH	35	3.555	1.792	0.774	0.878	0.104
37	Marulanda- Alto del toro - Manzanares	K10+900	ML	36	3.575	1.629	0.808	0.902	0.095
38	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	ML	38	3.638	1.100	0.893	0.927	0.034
39	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+450	ML	41	3.714	0.567	0.955	0.951	0.004
40	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K9+500	ML	47	3.850	0.103	0.994	0.976	0.018
PROMEDIO					3	Diferencia máxima entre funciones de distribución =0.104			
DESVIACIÓN ESTANDAR					0.17				

Anexo A- II.- Distribución log normal – ángulo de fricción suelos finos

No	DESCRIPCIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	SUCS	Ángulo de fricción	Función de densidad	Función de probabilidad	Distribución teórica	Diferencia
1	Marmato - EL Llano	K1+315	SM	18	0.007	0.024	0.020	0.004
2	Marmato - EL Llano	K1+400	SM	18	0.007	0.025	0.040	0.015
3	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	SC	20	0.012	0.045	0.060	0.015
4	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	22	0.018	0.074	0.080	0.006
5	Aranzazu - Salamina	K4+000	SM	22	0.018	0.077	0.100	0.023
6	Marmato - EL Llano	K1+460	SM	23	0.021	0.095	0.120	0.025
7	Marmato - EL Llano	K1+575	SM	26	0.032	0.175	0.140	0.035
8	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K6+300	SC	28	0.038	0.232	0.160	0.072
9	Aranzazu - Salamina	K17+600	SC	28	0.040	0.248	0.180	0.068
10	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	SC	28	0.040	0.248	0.200	0.048
11	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	SC	28	0.040	0.248	0.220	0.028
12	Curazao - San Francisco	K18+300	SC	30	0.045	0.322	0.240	0.082
13	Marmato - EL Llano	K0+720	SM	31	0.048	0.381	0.260	0.121
14	Marmato - EL Llano	K0+724	SM	31	0.048	0.381	0.280	0.101
15	Marmato - EL Llano	K1+135	SM	31	0.048	0.384	0.300	0.084
16	Marmato - EL Llano	K1+821	SM	31	0.048	0.389	0.320	0.069
17	Marmato - EL Llano	K3+593	SM	32	0.049	0.412	0.340	0.072
18	Marulanda- Alto del toro - Manzanares	K10+900	SM	32	0.049	0.424	0.360	0.064
19	Petaqueros - Manzanares	K4+550	SM	32	0.049	0.429	0.380	0.049
20	Marmato - EL Llano	K0+700	SM	32	0.049	0.430	0.400	0.030
21	Marmato - EL Llano	K0+280	SM	32	0.049	0.435	0.420	0.015
22	Marmato - EL Llano	K1+790	SM	32	0.049	0.435	0.440	0.005
23	Marmato - EL Llano	K1+813	SM	32	0.049	0.435	0.460	0.025
24	Marmato - EL Llano	K3+510	SM	33	0.050	0.467	0.480	0.013

No	DESCRIPCIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	SUCS	Ángulo de fricción	Función de densidad	Función de probabilidad	Distribución teórica	Diferencia	
25	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K13+400	SC	33	0.050	0.478	0.500	0.022	
26	Salamina - La Merced	K6+900	SM	33	0.050	0.483	0.520	0.037	
27	Marmato - EL Llano	K3+584	SM	33	0.050	0.487	0.540	0.053	
28	Marmato - EL Llano	K0+960	SM	33	0.050	0.492	0.560	0.068	
29	Aranzazu - Salamina	K4+000	SC	33	0.050	0.496	0.580	0.084	
30	Salamina - La Merced	K6+900	SM	33	0.050	0.500	0.600	0.100	
31	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K10+500	SM	34	0.050	0.513	0.620	0.107	
32	Marmato - EL Llano	K0+800	SM	34	0.050	0.529	0.640	0.111	
33	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K2+700	SC	34	0.050	0.536	0.660	0.124	
34	Petaqueros - Manzanares	K3+500	SM	34	0.050	0.543	0.680	0.137	
35	Manizales - Neira	K0+100	SM	36	0.048	0.609	0.700	0.091	
36	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	SC	36	0.048	0.619	0.720	0.101	
37	Manizales - Neira	K0+100	SM	36	0.048	0.623	0.740	0.117	
38	Curazao - San Francisco	K13+200	SC	36	0.047	0.646	0.760	0.114	
39	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	37	0.046	0.659	0.780	0.121	
40	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	37	0.044	0.687	0.800	0.113	
41	Varsovia - Filadelfia	K3+000	SC	40	0.037	0.783	0.820	0.037	
42	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	40	0.036	0.795	0.840	0.045	
43	Salamina - La Merced	K6+900	SC-SM	43	0.026	0.874	0.860	0.014	
44	Petaqueros - Manzanares	K4+550	SC	43	0.024	0.885	0.880	0.005	
45	Salamina - La Merced	K6+900	SC-SM	46	0.015	0.939	0.900	0.039	
46	Norcasia - Berlin - Florencia	K50+300	SC	46	0.014	0.943	0.920	0.023	
47	Salamina - La Merced	K6+900	SC-SM	47	0.012	0.955	0.940	0.015	
48	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+450	SC	51	0.004	0.986	0.960	0.026	
49	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	59	0.000	0.999	0.980	0.019	
PROMEDIO				33	Diferencia máxima entre funciones de distribución =0.137				
DESVIACIÓN ESTANDAR				8					

Anexo A- III.- Distribución normal – ángulo de fricción arenas.

No	DESCRIPCIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	SUCS	Ángulo de fricción	$y=\ln(x)$	Función de densidad	Función de probabilidad	Distribución teórica	Diferencia
1	Marmato - EL Llano	K1+315	SM	18	2.870	0.068	0.006	0.020	0.014
2	Marmato - EL Llano	K1+400	SM	18	2.882	0.077	0.007	0.040	0.033
3	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	SC	20	2.991	0.212	0.021	0.060	0.039
4	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	22	3.087	0.438	0.052	0.080	0.028
5	Aranzazu - Salamina	K4+000	SM	22	3.095	0.459	0.055	0.100	0.045
6	Marmato - EL Llano	K1+460	SM	23	3.135	0.593	0.076	0.120	0.044
7	Marmato - EL Llano	K1+575	SM	26	3.258	1.074	0.177	0.140	0.037
8	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K6+300	SC	28	3.318	1.311	0.249	0.160	0.089
9	Aranzazu - Salamina	K17+600	SC	28	3.332	1.363	0.269	0.180	0.089
10	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	SC	28	3.332	1.363	0.269	0.200	0.069
11	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	SC	28	3.332	1.363	0.269	0.220	0.049
12	Curazao - San Francisco	K18+300	SC	30	3.393	1.542	0.358	0.240	0.118

No	DESCRIPCIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	SUCS	Ángulo de fricción	$y=\ln(x)$	Función de densidad	Función de probabilidad	Distribución teórica	Diferencia
13	Marmato - EL Llano	K0+720	SM	31	3.435	1.618	0.423	0.260	0.163
14	Marmato - EL Llano	K0+724	SM	31	3.435	1.618	0.423	0.280	0.143
15	Marmato - EL Llano	K1+135	SM	31	3.437	1.620	0.426	0.300	0.126
16	Marmato - EL Llano	K1+821	SM	31	3.440	1.624	0.431	0.320	0.111
17	Marmato - EL Llano	K3+593	SM	32	3.455	1.638	0.456	0.340	0.116
18	Marulanda- Alto del toro - Manzanares	K10+900	SM	32	3.463	1.643	0.469	0.360	0.109
19	Petaqueros - Manzanares	K4+550	SM	32	3.466	1.645	0.474	0.380	0.094
20	Marmato - EL Llano	K0+700	SM	32	3.467	1.645	0.476	0.400	0.076
21	Marmato - EL Llano	K0+280	SM	32	3.470	1.646	0.480	0.420	0.060
22	Marmato - EL Llano	K1+790	SM	32	3.470	1.646	0.480	0.440	0.040
23	Marmato - EL Llano	K1+813	SM	32	3.470	1.646	0.480	0.460	0.020
24	Marmato - EL Llano	K3+510	SM	33	3.489	1.647	0.513	0.480	0.033
25	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K13+400	SC	33	3.497	1.645	0.525	0.500	0.025
26	Salamina - La Merced	K6+900	SM	33	3.500	1.643	0.530	0.520	0.010
27	Marmato - EL Llano	K3+584	SM	33	3.502	1.642	0.534	0.540	0.006
28	Marmato - EL Llano	K0+960	SM	33	3.505	1.640	0.538	0.560	0.022
29	Aranzazu - Salamina	K4+000	SC	33	3.507	1.639	0.542	0.580	0.038
30	Salamina - La Merced	K6+900	SM	33	3.510	1.637	0.546	0.600	0.054
31	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K10+500	SM	34	3.517	1.630	0.559	0.620	0.061
32	Marmato - EL Llano	K0+800	SM	34	3.527	1.620	0.574	0.640	0.066
33	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K2+700	SC	34	3.531	1.614	0.581	0.660	0.079
34	Petaqueros - Manzanares	K3+500	SM	34	3.535	1.608	0.587	0.680	0.093
35	Manizales - Neira	K0+100	SM	36	3.573	1.534	0.647	0.700	0.053
36	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	SC	36	3.579	1.519	0.657	0.720	0.063
37	Manizales - Neira	K0+100	SM	36	3.582	1.513	0.660	0.740	0.080
38	Curazao - San Francisco	K13+200	SC	36	3.595	1.477	0.680	0.760	0.080
39	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	37	3.603	1.454	0.691	0.780	0.089
40	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	37	3.619	1.402	0.715	0.800	0.085
41	Varsovia - Filadelfia	K3+000	SC	40	3.681	1.175	0.795	0.820	0.025
42	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	40	3.689	1.143	0.804	0.840	0.036
43	Salamina - La Merced	K6+900	SC-SM	43	3.751	0.886	0.867	0.860	0.007
44	Petaqueros - Manzanares	K4+550	SC	43	3.761	0.845	0.876	0.880	0.004
45	Salamina - La Merced	K6+900	SC-SM	46	3.824	0.607	0.921	0.900	0.021
46	Norcasia - Berlin - Florencia	K50+300	SC	46	3.829	0.589	0.924	0.920	0.004
47	Salamina - La Merced	K6+900	SC-SM	47	3.849	0.521	0.935	0.940	0.005
48	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+450	SC	51	3.932	0.292	0.969	0.960	0.009
49	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	59	4.080	0.078	0.993	0.980	0.013
PROMEDIO					3	Diferencia máxima entre funciones de distribución =0.163			
DESVIACIÓN ESTANDAR					0.24				

Anexo A- IV.- Distribución log normal – ángulo de fricción arenas.

No	DESCRIPCIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	SUCS	Cohesión (kg/cm ²)	Función de densidad	Función de probabilidad	Distribución teórica	Diferencia
1	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K10+500	ML	0.04	0.528	0.061	0.024	0.037
2	Marulanda- Alto del toro - Manzanares	K10+900	ML	0.06	0.602	0.073	0.049	0.024
3	Manizales - La Cabaña - Tres Puertas	K17+700	ML	0.09	0.721	0.093	0.073	0.019
4	Manzanares - La quiebra- Pensilvania	K14+900	ML	0.09	0.721	0.093	0.098	0.005
5	Marulanda- Alto del toro - Manzanares	K10+900	ML	0.10	0.763	0.100	0.122	0.022
6	Manzanares - La quiebra- Pensilvania	K14+900	ML	0.11	0.806	0.108	0.146	0.039
7	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	MH	0.12	0.850	0.116	0.171	0.055
8	Pácora - Aguadas	K3+300	MH	0.15	0.985	0.144	0.195	0.051
9	Manzanares - La quiebra- Pensilvania	K14+900	ML	0.17	1.077	0.164	0.220	0.055
10	Varsovia - La Marina - Juntas	K6+800	CH	0.20	1.196	0.194	0.244	0.050
11	Varsovia - La Marina - Juntas	K1+300	ML	0.23	1.324	0.231	0.268	0.037
12	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	ML	0.24	1.384	0.251	0.293	0.042
13	Varsovia - Filadelfia	K4+420	ML	0.25	1.412	0.260	0.317	0.057
14	Manizales - Neira	K0+100	MH	0.26	1.459	0.278	0.341	0.063
15	Petaqueros - Manzanares	K6+700	ML	0.26	1.462	0.279	0.366	0.087
16	Varsovia - La Marina - Juntas	K6+800	CL	0.26	1.480	0.286	0.390	0.104
17	Varsovia - Filadelfia	K1+160	ML	0.27	1.494	0.292	0.415	0.122
18	Manzanares - Marquetalia	K6+600	MH	0.29	1.564	0.324	0.439	0.115
19	Varsovia - Filadelfia	K1+700	ML	0.34	1.687	0.406	0.463	0.057
20	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	MH	0.36	1.719	0.446	0.488	0.042
21	Petaqueros - Manzanares	K11+600	MH	0.37	1.725	0.456	0.512	0.056
22	Salamina - La Merced	K6+540	MH	0.41	1.730	0.532	0.537	0.005
23	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K9+500	ML	0.45	1.686	0.595	0.561	0.034
24	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	MH	0.48	1.620	0.645	0.585	0.059
25	Marmato - EL Llano	K2+100	ML	0.53	1.450	0.725	0.610	0.116
26	Marmato - EL Llano	K2+462	ML	0.53	1.442	0.728	0.634	0.094
27	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+450	ML	0.56	1.340	0.764	0.659	0.105
28	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+450	ML	0.56	1.340	0.764	0.683	0.081
29	Marmato - EL Llano	K2+504	ML	0.58	1.243	0.793	0.707	0.086
30	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	MH	0.59	1.209	0.802	0.732	0.071
31	Marmato - EL Llano	K2+165	ML	0.59	1.188	0.808	0.756	0.052
32	Varsovia - Filadelfia	K3+120	ML	0.61	1.114	0.827	0.780	0.046
33	Marmato - EL Llano	K2+020	ML	0.61	1.109	0.828	0.805	0.023
34	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	MH	0.62	1.073	0.836	0.829	0.007
35	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	ML	0.65	0.936	0.867	0.854	0.013
36	Varsovia - Filadelfia	K1+060	CL	0.67	0.856	0.883	0.878	0.005
37	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	CL	0.68	0.825	0.889	0.902	0.014
38	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	ML	0.71	0.677	0.915	0.927	0.012
39	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+300	ML	0.81	0.339	0.965	0.951	0.013
40	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	CL	0.88	0.190	0.982	0.976	0.007
PROMEDIO				0.39	Diferencia máxima entre funciones de distribución =0.122			
DESVIACIÓN ESTANDAR				0.23				

Anexo A- V.- Distribución normal – cohesión suelos finos.

No	DESCRIPCIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	SUCS	Cohesión (kg/cm ²)	y=ln(x)	Función de densidad	Función de probabilidad	Distribución teórica	Diferencia
1	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K10+500	ML	0.04	-3.219	0.015	0.004	0.024	0.020
2	Marulanda- Alto del toro - Manzanares	K10+900	ML	0.06	-2.813	0.054	0.017	0.049	0.032
3	Manizales - La Cabaña - Tres Puertas	K17+700	ML	0.09	-2.408	0.142	0.054	0.073	0.019
4	Manzanares - La quiebra- Pensilvania	K14+900	ML	0.09	-2.408	0.142	0.054	0.098	0.043
5	Marulanda- Alto del toro - Manzanares	K10+900	ML	0.10	-2.303	0.175	0.071	0.122	0.051
6	Manzanares - La quiebra- Pensilvania	K14+900	ML	0.11	-2.207	0.208	0.089	0.146	0.057
7	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	MH	0.12	-2.120	0.240	0.109	0.171	0.062
8	Pácora - Aguadas	K3+300	MH	0.15	-1.897	0.329	0.172	0.195	0.023
9	Manzanares - La quiebra- Pensilvania	K14+900	ML	0.17	-1.772	0.378	0.216	0.220	0.003
10	Varsovia - La Marina - Juntas	K6+800	CH	0.20	-1.629	0.430	0.274	0.244	0.031
11	Varsovia - La Marina - Juntas	K1+300	ML	0.23	-1.489	0.471	0.337	0.268	0.069
12	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	ML	0.24	-1.427	0.485	0.367	0.293	0.074
13	Varsovia - Filadelfia	K4+420	ML	0.25	-1.398	0.491	0.381	0.317	0.064
14	Manizales - Neira	K0+100	MH	0.26	-1.349	0.500	0.405	0.341	0.064
15	Petaqueros - Manzanares	K6+700	ML	0.26	-1.347	0.500	0.407	0.366	0.041
16	Varsovia - La Marina - Juntas	K6+800	CL	0.26	-1.328	0.503	0.416	0.390	0.026
17	Varsovia - Filadelfia	K1+160	ML	0.27	-1.313	0.505	0.424	0.415	0.009
18	Manzanares - Marquetalia	K6+600	MH	0.29	-1.238	0.512	0.462	0.439	0.023
19	Varsovia - Filadelfia	K1+700	ML	0.34	-1.079	0.511	0.544	0.463	0.080
20	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	MH	0.36	-1.012	0.504	0.578	0.488	0.090
21	Petaqueros - Manzanares	K11+600	MH	0.37	-0.996	0.502	0.586	0.512	0.073
22	Salamina - La Merced	K6+540	MH	0.41	-0.884	0.482	0.641	0.537	0.104
23	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K9+500	ML	0.45	-0.799	0.460	0.681	0.561	0.120
24	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	MH	0.48	-0.734	0.441	0.710	0.585	0.125
25	Marmato - EL Llano	K2+100	ML	0.53	-0.630	0.406	0.754	0.610	0.144
26	Marmato - EL Llano	K2+462	ML	0.53	-0.626	0.405	0.756	0.634	0.122
27	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+450	ML	0.56	-0.580	0.387	0.774	0.659	0.116
28	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+450	ML	0.56	-0.580	0.387	0.774	0.683	0.091
29	Marmato - EL Llano	K2+504	ML	0.58	-0.541	0.372	0.789	0.707	0.082
30	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	MH	0.59	-0.528	0.367	0.794	0.732	0.062
31	Marmato - EL Llano	K2+165	ML	0.59	-0.520	0.364	0.797	0.756	0.041
32	Varsovia - Filadelfia	K3+120	ML	0.61	-0.493	0.354	0.806	0.780	0.026
33	Marmato - EL Llano	K2+020	ML	0.61	-0.491	0.353	0.807	0.805	0.002
34	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	MH	0.62	-0.478	0.348	0.812	0.829	0.018
35	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	ML	0.65	-0.431	0.329	0.828	0.854	0.026
36	Varsovia - Filadelfia	K1+060	CL	0.67	-0.403	0.318	0.836	0.878	0.042
37	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	CL	0.68	-0.393	0.314	0.840	0.902	0.063
38	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	ML	0.71	-0.342	0.294	0.855	0.927	0.072
39	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+300	ML	0.81	-0.211	0.242	0.890	0.951	0.061
40	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	CL	0.88	-0.130	0.212	0.909	0.976	0.067
PROMEDIO					-1.16	Diferencia máxima entre funciones de distribución =0.144			
DESVIACIÓN ESTANDAR					0.78				

Anexo A- VI.- Distribución log normal – cohesión suelos finos.

No	DESCRIPCIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	SUCS	Cohesión (kg/cm ²)	Función de densidad	Función de probabilidad	Distribución teórica	Diferencia
1	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K6+300	SC	0.05	0.382	0.048	0.020	0.028
2	Varsovia - Filadelfia	K3+000	SC	0.10	0.518	0.070	0.040	0.030
3	Curazao - San Francisco	K13+200	SC	0.12	0.578	0.081	0.060	0.021
4	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+450	SC	0.13	0.610	0.087	0.080	0.007
5	Marulanda- Alto del toro - Manzanares	K10+900	SM	0.16	0.708	0.107	0.100	0.007
6	Petaqueros - Manzanares	K3+500	SM	0.17	0.743	0.114	0.120	0.006
7	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K10+500	SM	0.20	0.848	0.138	0.140	0.002
8	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	0.21	0.884	0.147	0.160	0.013
9	Salamina - La Merced	K6+900	SC-SM	0.22	0.919	0.156	0.180	0.024
10	Salamina - La Merced	K6+900	SM	0.23	0.955	0.165	0.200	0.035
11	Salamina - La Merced	K6+900	SM	0.24	0.991	0.175	0.220	0.045
12	Salamina - La Merced	K6+900	SC-SM	0.24	0.991	0.175	0.240	0.065
13	Salamina - La Merced	K6+900	SC-SM	0.24	0.991	0.175	0.260	0.085
14	Manizales - Neira	K0+100	SM	0.25	1.032	0.186	0.280	0.094
15	Curazao - San Francisco	K18+300	SC	0.26	1.062	0.195	0.300	0.105
16	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K2+700	SC	0.31	1.230	0.253	0.320	0.067
17	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	0.32	1.261	0.265	0.340	0.075
18	Manizales - Neira	K0+100	SM	0.33	1.283	0.274	0.360	0.086
19	Marmato - EL Llano	K0+720	SM	0.43	1.506	0.422	0.380	0.042
20	Marmato - EL Llano	K0+724	SM	0.43	1.506	0.422	0.400	0.022
21	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	0.45	1.523	0.449	0.420	0.029
22	Aranzazu - Salamina	K17+600	SC	0.46	1.530	0.464	0.440	0.024
23	Marmato - EL Llano	K0+960	SM	0.48	1.535	0.492	0.460	0.032
24	Aranzazu - Salamina	K4+000	SC	0.49	1.535	0.506	0.480	0.026
25	Marmato - EL Llano	K1+821	SM	0.49	1.534	0.515	0.500	0.015
26	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	SC	0.50	1.532	0.526	0.520	0.006
27	Petaqueros - Manzanares	K4+550	SC	0.50	1.532	0.526	0.540	0.014
28	Marmato - EL Llano	K0+700	SM	0.51	1.526	0.545	0.560	0.015
29	Marmato - EL Llano	K1+135	SM	0.52	1.522	0.552	0.580	0.028
30	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	0.56	1.470	0.616	0.600	0.016
31	Marmato - EL Llano	K0+280	SM	0.57	1.457	0.627	0.620	0.007
32	Marmato - EL Llano	K1+790	SM	0.57	1.457	0.627	0.640	0.013
33	Marmato - EL Llano	K1+813	SM	0.57	1.457	0.627	0.660	0.033
34	Marmato - EL Llano	K3+593	SM	0.59	1.416	0.656	0.680	0.024
35	Marmato - EL Llano	K1+575	SM	0.59	1.413	0.659	0.700	0.041
36	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	SC	0.59	1.408	0.662	0.720	0.058
37	Marmato - EL Llano	K3+584	SM	0.60	1.392	0.671	0.740	0.069
38	Marmato - EL Llano	K3+510	SM	0.60	1.391	0.672	0.760	0.088
39	Marmato - EL Llano	K0+800	SM	0.62	1.337	0.701	0.780	0.079
40	Petaqueros - Manzanares	K4+550	SM	0.72	1.013	0.819	0.800	0.019
41	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	0.75	0.906	0.848	0.820	0.028
42	Aranzazu - Salamina	K4+000	SM	0.76	0.875	0.855	0.840	0.015
43	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	SC	0.87	0.506	0.932	0.860	0.072
44	Norcasia - Berlin - Florencia	K50+300	SC	0.88	0.478	0.937	0.880	0.057
45	Marmato - EL Llano	K1+400	SM	0.90	0.427	0.945	0.900	0.045
46	Marmato - EL Llano	K1+460	SM	0.91	0.391	0.951	0.920	0.031
47	Marmato - EL Llano	K1+315	SM	0.92	0.384	0.952	0.940	0.012
48	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K13+400	SC	0.99	0.229	0.974	0.960	0.014
49	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	SC	1.09	0.100	0.990	0.980	0.010

No	DESCRIPCIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	SUCS	Cohesión (kg/cm ²)	Función de densidad	Función de probabilidad	Distribución teórica	Diferencia
PROMEDIO				0.48	Diferencia máxima entre funciones de distribución =0.105			
DESVIACIÓN ESTANDAR				0.26				

Anexo A- VII.- Distribución normal – cohesión arenas.

No	DESCRIPCIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	SUCS	Cohesión (kg/cm ²)	y=ln(x)	Función de densidad	Función de probabilidad	Distribución teórica	Diferencia
1	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K6+300	SC	0.05	-2.996	0.005	0.001	0.020	0.019
2	Varsovia - Filadelfia	K3+000	SC	0.10	-2.303	0.068	0.019	0.040	0.021
3	Curazao - San Francisco	K13+200	SC	0.12	-2.120	0.116	0.035	0.060	0.025
4	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K5+450	SC	0.13	-2.040	0.143	0.045	0.080	0.035
5	Marulanda- Alto del toro - Manzanares	K10+900	SM	0.16	-1.833	0.230	0.084	0.100	0.016
6	Petaqueros - Manzanares	K3+500	SM	0.17	-1.772	0.259	0.098	0.120	0.022
7	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K10+500	SM	0.20	-1.609	0.345	0.147	0.140	0.007
8	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	0.21	-1.561	0.371	0.165	0.160	0.005
9	Salamina - La Merced	K6+900	SC-SM	0.22	-1.514	0.396	0.183	0.180	0.003
10	Salamina - La Merced	K6+900	SM	0.23	-1.470	0.420	0.201	0.200	0.001
11	Salamina - La Merced	K6+900	SM	0.24	-1.427	0.442	0.219	0.220	0.001
12	Salamina - La Merced	K6+900	SC-SM	0.24	-1.427	0.442	0.219	0.240	0.021
13	Salamina - La Merced	K6+900	SC-SM	0.24	-1.427	0.442	0.219	0.260	0.041
14	Manizales - Neira	K0+100	SM	0.25	-1.381	0.465	0.240	0.280	0.040
15	Curazao - San Francisco	K18+300	SC	0.26	-1.347	0.481	0.256	0.300	0.044
16	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K2+700	SC	0.31	-1.171	0.552	0.347	0.320	0.027
17	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	0.32	-1.139	0.562	0.365	0.340	0.025
18	Manizales - Neira	K0+100	SM	0.33	-1.117	0.568	0.378	0.360	0.018
19	Marmato - EL Llano	K0+720	SM	0.43	-0.839	0.593	0.541	0.380	0.161
20	Marmato - EL Llano	K0+724	SM	0.43	-0.839	0.593	0.541	0.400	0.141
21	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	0.45	-0.799	0.588	0.565	0.420	0.145
22	Aranzazu - Salamina	K17+600	SC	0.46	-0.777	0.585	0.578	0.440	0.138
23	Marmato - EL Llano	K0+960	SM	0.48	-0.738	0.577	0.601	0.460	0.141
24	Aranzazu - Salamina	K4+000	SC	0.49	-0.719	0.573	0.611	0.480	0.131
25	Marmato - EL Llano	K1+821	SM	0.49	-0.707	0.570	0.619	0.500	0.119
26	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	SC	0.50	-0.693	0.566	0.626	0.520	0.106
27	Petaqueros - Manzanares	K4+550	SC	0.50	-0.693	0.566	0.626	0.540	0.086
28	Marmato - EL Llano	K0+700	SM	0.51	-0.669	0.559	0.640	0.560	0.080
29	Marmato - EL Llano	K1+135	SM	0.52	-0.659	0.556	0.645	0.580	0.065
30	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	0.56	-0.580	0.528	0.688	0.600	0.088
31	Marmato - EL Llano	K0+280	SM	0.57	-0.567	0.523	0.695	0.620	0.075
32	Marmato - EL Llano	K1+790	SM	0.57	-0.567	0.523	0.695	0.640	0.055
33	Marmato - EL Llano	K1+813	SM	0.57	-0.567	0.523	0.695	0.660	0.035
34	Marmato - EL Llano	K3+593	SM	0.59	-0.532	0.509	0.713	0.680	0.033
35	Marmato - EL Llano	K1+575	SM	0.59	-0.529	0.508	0.715	0.700	0.015
36	Pacora - Aguadas K10+700	K10+700	SC	0.59	-0.525	0.506	0.717	0.720	0.003
37	Marmato - EL Llano	K3+584	SM	0.60	-0.514	0.501	0.722	0.740	0.018

No	DESCRIPCIÓN PUNTO CRÍTICO	ABSCISA	SUCS	Cohesión (kg/cm ²)	$y=\ln(x)$	Función de densidad	Función de probabilidad	Distribución teórica	Diferencia
38	Marmato - EL Llano	K3+510	SM	0.60	-0.513	0.501	0.723	0.760	0.037
39	Marmato - EL Llano	K0+800	SM	0.62	-0.478	0.485	0.740	0.780	0.040
40	Petaqueros - Manzanares	K4+550	SM	0.72	-0.329	0.409	0.807	0.800	0.007
41	Asia - El Crucero - Las Margaritas	K17+700	SM	0.75	-0.288	0.388	0.823	0.820	0.003
42	Aranzazu - Salamina	K4+000	SM	0.76	-0.276	0.381	0.828	0.840	0.012
43	La Violeta - La Y - El rosario	K6+000	SC	0.87	-0.139	0.308	0.875	0.860	0.015
44	Norcasia - Berlin - Florencia	K50+300	SC	0.88	-0.128	0.302	0.878	0.880	0.002
45	Marmato - EL Llano	K1+400	SM	0.90	-0.107	0.291	0.885	0.900	0.015
46	Marmato - EL Llano	K1+460	SM	0.91	-0.091	0.283	0.889	0.920	0.031
47	Marmato - EL Llano	K1+315	SM	0.92	-0.088	0.281	0.890	0.940	0.050
48	Filadelfia - La Florida - La Felisa	K13+400	SC	0.99	-0.010	0.242	0.910	0.960	0.050
49	Aguadas - Arma K4+900	K4+900	SC	1.09	0.086	0.197	0.931	0.980	0.049
PROMEDIO					-0.91	Diferencia máxima entre funciones de distribución =0.161			
DESVIACIÓN ESTANDAR					0.67				

Anexo A- VIII.- Distribución log normal – cohesión arenas.

B. Anexo: Memoria de cálculo para muros tipo con llantas de 2.0 y 4.0 metros.

A continuación se anexan las hojas de cálculo de Excel para los muros con llantas, así como los diferentes tipos de enlaces.

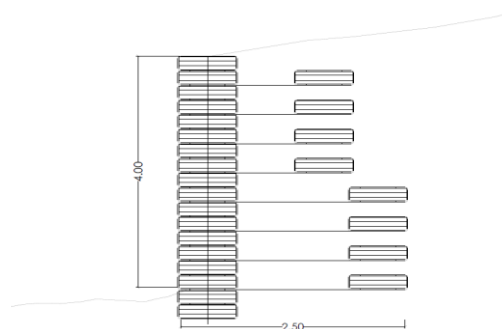
HOJA DE CÁLCULO MURO CON LLANTAS

DATOS DE ENTRADA

MATERIAL DE RELLENO:

Densidad (γ)	1,5 Ton/M ³	
Ángulo de fricción (ϕ)	30 °	
Longitud muro llantas (l)	2,5 m	
Gravedad (g)	9,81	
Altura del muro (h)	4	2
Dimensiones llantas para diseño del muro:		
Diámetro (d)	0,6 m	
Grosor llanta (t)	0,1 m	

GEOMETRÍA DEL MURO



VERIFICACIÓN DE LA ESTABILIDAD GENERAL

1. Volcamiento / overturning

Momento al volcamiento/m del muro $M = \frac{1}{2} * K_a * g * \gamma * \frac{h^3}{3}$ 52,32 KN-m/m

$K_a = \frac{1 - \text{sen } \phi}{1 + \text{sen } \phi}$ 0,333 -

Verificación del no levantamiento en el talón del muro - Criterio de diseño conservador

Presión en el talón del muro $\gamma * g * h - \frac{M * 6}{l^2}$

1	2	1	58,86	
		2	50,23	
		=	8,63	KN/m ² Ok - no levantamiento

2. Deslizamiento / Sliding

Fuerza horizontal del relleno / m del muro $\frac{1}{2} * K_a * \gamma * g * h^2$ 39,24 KN/m²

Resistencia a la fricción $\gamma * g * h * \text{tan} \phi * l$ 84,96 KN

Factor de seguridad al deslizamiento $\frac{\text{Resistencia a la fricción}}{\text{Fuerza horizontal del relleno}}$ 2,2 ok

Chequeo quitando las cargas de neumáticos de anclajes a nivel de base considerando la altura 'h=4,0 m'

Quitando cargas $2 * \gamma * g * h * \pi * \frac{d^2}{4} * \text{tan} \phi + K_p * \gamma * g * h * t * d$

1	2		
	1	19,22	
	2	10,59	
	=	29,81	28 La resistencia del anclaje es menor de 28KN

$K_p = \frac{1 + \text{sen } \phi}{1 - \text{sen } \phi}$ 3

Chequeo quitando las cargas de neumáticos de anclajes a nivel de base considerando la altura 'h=2,0 m'

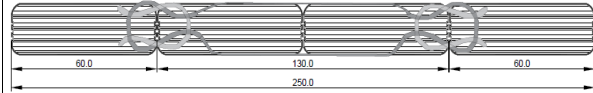
NOTA: Siempre que no sea mayor a 28KN que es la carga de falla del neumático o es mayor que la resistencia del anclaje

1	9,6	
2	5,3	
=	14,9	15 La resistencia del anclaje es menor de

EVALUACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE REFUERZOS EN EL MURO DE CONTENCIÓN CON LLANTAS

A. Diseño de anclaje con cuerda de 500 kg de carga de rotura en el nivel base donde h=4.0 m

Aspectos asumidos:		
Muro	Altura= 4m	Altura= 2m
Cuerdas entre llantas	4	2
Reducción fuerza del nudo	90%	
Carga rotura de la cuerda (kg)	500	
Altura del muro 'h' (m)	4	
Longitud de 1 vuelta cuerda (m)	1,3	0,8
Longitud del nudo (m)	0,3	



$$\begin{aligned} \text{Carga final enlace} &= 4 \times 500 \times 0,9 \times 9,81 \text{ kg} \\ &= 17658 \text{ kg} \\ &= 17,7 \text{ KN} \end{aligned}$$

Carga de diseño (FS=2)	8,8 KN
------------------------	--------

$$\begin{aligned} \text{Longitud de cuerda requerida} &= 4 (1,3 + 0,3) + 0,3 \text{ m} \\ &= 6,7 \text{ m} \end{aligned}$$

Asumir que el número de llantas / Enlace = n_4

$$\begin{aligned} \text{Fuerza horizontal sobre las llantas} &= K_a * \gamma * g * h * n_4 * d * t \\ &= 1,18 n_4 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$\text{Carga de diseño} = \text{fuerza sobre } n_4 \text{ de las llantas}$$

$$8,8 = 1,18 n_4$$

$\therefore n_4 =$	7,5 Llantas
--------------------	-------------

Nota: Use 4 tiras de cuerdas de 500 kg para 8 llantas en la cara del talud en la base a 2 m de distancia

A un nivel de 2 m desde la base h=2m

Nota: Asumir las mismas disposiciones anteriores pero solo con 2 cuerdas

$$\begin{aligned} \text{Carga final enlace} &= 2 \times 0,5 \times 0,9 \times 9,81 \text{ KN} \\ &= 8,8 \text{ KN} \end{aligned}$$

Carga de diseño (FS=2)	4,4 KN
------------------------	--------

$$\begin{aligned} \text{Longitud de cuerda requerida} &= 2 (0,8 + 0,3) + 0,3 \text{ m} \\ &= 2,5 \text{ m} \end{aligned}$$

Asumir que el número de llantas / Enlace = n_2

$$\begin{aligned} \text{Fuerza horizontal sobre las llantas} &= K_a * \gamma * g * h * n_2 * d * t \\ &= 0,59 n_2 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$\text{Carga de diseño} = \text{fuerza sobre } n_2 \text{ de las llantas}$$

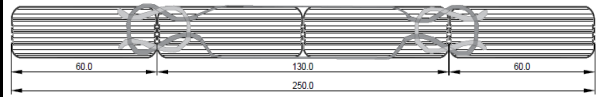
$$4,4 = 0,59 n_2$$

$\therefore n_2 =$	7,5 Llantas
--------------------	-------------

Nota: use 2 tiras de cuerda de 500 kg para 8 llantas en la mitad del muro

B. Diseño de anclaje con cuerda de 1,000 kg de carga de rotura en el nivel base donde h=4.0 m

Aspectos asumidos:		
Muro	Altura= 4m	Altura= 2m
Cuerdas entre llantas	2	2
Toda la fuerza del nudo	100%	
Carga rotura de la cuerda (kg)	1000	
Altura del muro 'h' (m)	4	
Longitud de 1 vuelta cuerda (m)	1,3	0,8
Longitud del nudo (m)	0,3	
Traslapo junta doblada al calor (m)	0,35	



$$\begin{aligned} \text{Carga final enlace} &= 2 \times 1000 \times 1 \times 9,81 \text{ kg} \\ &= 19620 \text{ kg} \\ &= 19,6 \text{ KN} \end{aligned}$$

Carga de diseño (FS=2)	9,8 KN
------------------------	--------

$$\begin{aligned} \text{Longitud de cuerda requerida} &= 2 (1,3 + 0,3) + 0,3 \text{ m} \\ &= 3,6 \text{ m} \end{aligned}$$

Asumir que el número de llantas / Enlace = n₄

$$\begin{aligned} \text{Fuerza horizontal sobre las llantas} &= K_a * \gamma * g * h * n_4 * d * t \\ &= 1,18 \text{ n}_4 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$\text{Carga de diseño} = \text{fuerza sobre } n_4 \text{ de las llantas}$$

$$9,8 = 1,18 \text{ n}_4$$

$$\therefore n_4 = 8,3 \text{ Llantas}$$

Nota: use 2 tiras de cuerda de 1,000 kg para 8 llantas en la mitad del muro

A un nivel de 2 m desde la base h=2m

Nota: Asumir las mismas disposiciones anteriores pero solo con 2 cuerdas

$$\begin{aligned} \text{Carga final enlace} &= 2 \times 1 \times 1 \times 9,81 \text{ KN} \\ &= 19,6 \text{ KN} \end{aligned}$$

Carga de diseño (FS=2,5)	7,8 KN
--------------------------	--------

$$\begin{aligned} \text{Longitud de cuerda requerida} &= 2 (0,8 + 0,3) + 0,35 \text{ m} \\ &= 2,55 \text{ m} \end{aligned}$$

Asumir que el número de llantas / Enlace = n₂

$$\begin{aligned} \text{Fuerza horizontal sobre las llantas} &= K_a * \gamma * g * h * n_2 * d * t \\ &= 0,59 \text{ n}_2 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$\text{carga de arrancamiento de neumáticos} = 15\text{KN} < \text{carga final de enlace} = 19 \text{ KN}$$

$$\text{Carga de diseño} = \text{fuerza sobre } n_2 \text{ de las llantas}$$

$$7,8 = 0,59 \text{ n}_2$$

$$\therefore n_2 = 13,3 \text{ Llantas}$$

Nota: use 2 tiras de cuerda de 1,000 kg para 13 llantas en la mitad del muro

C. Diseño de anclaje con acero

	M= 4 m	M= 2,0 m	Unidad
Diámetro de varilla (mm)	12,7	12,7	mm
Diámetro de varilla (Pulg)	1/2"	1/2"	In
Carga última de arrancamiento	13	13	KN
Carga de diseño	6,5	6,5	KN
Longitud de las varillas entre llantas (Base)	1,3	0,8	m
Longitud gancho a cada lado	0,25	0,25	m
Cantidad de varillas entre llantas	2	2	Unds
Longitud total varillas	3,6	2,6	m
Ancho efectivo de las llantas	0,5	0,5	m



Nota: La base total considerada es de 2,5 metros para el muro de 4,0 metros

Asumir que el número de llantas / Enlace = n_4

$$\text{Fuerza horizontal sobre } n_4 \text{ de las llantas} = K_a * \gamma * g * h * n_4 * d * t$$

$$1,18 n_4 \text{KN}$$

Carga de diseño = fuerza sobre las llantas

$$6,5 = 1,18 n_4$$

$$n_4 = 5,52 \text{ Llantas}$$

Nota: Usar varillas de acero de 1/2" como se muestra en la figura por cada 5 llantas en la base hasta la mitad del muro

A un nivel de 2 m desde la base $h=2\text{m}$

Asumir que la dimensión del muro a una altura de 2,0 metros de la base se reduce de 2,5 metros a 2,0 metros

$$\text{Fuerza horizontal sobre las llantas} = K_a * \gamma * g * h * n_2 * d * t$$

$$\text{Fuerza horizontal sobre las llantas} = 0,59$$

Carga de diseño = fuerza sobre las llantas

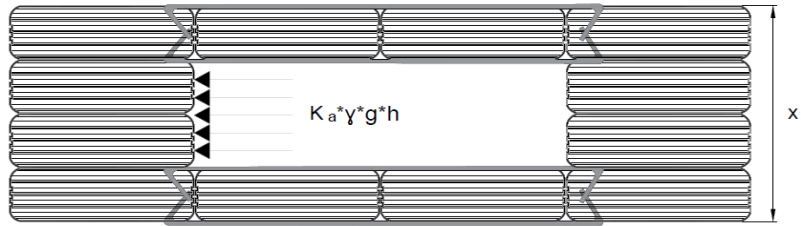
$$6,5 = 0,59 n_2$$

$$n_2 = 11,0 \text{ Llantas}$$

Nota: Usar varillas de acero de 1/2" como se muestra en la figura por cada 11 llantas desde la mitad del muro

CHEQUEO DE LA ESTABILIDAD LOCAL DE LA CARA FRONTAL DEL MURO

Nota: Considerar la estabilidad del elemento de la cara del muro de llantas entre las barras de enlace y la distancia x de presión vertical en la cara del muro con llanta = $\gamma * g * h$



Presión horizontal en la parte posterior de la cara del muro con llantas = $K_a * \gamma * g * h$

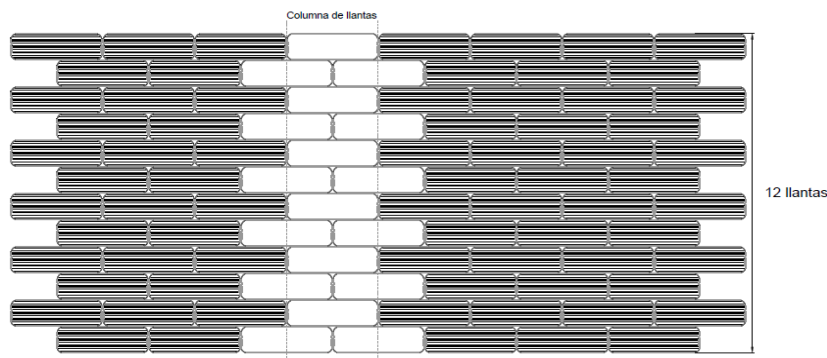
Considerado como una viga entre barras de enlace

$$BM = \frac{WL}{12} = K_a * \gamma * g * \frac{h}{12} * x^2$$

Consideración de diseño: Para que no se levante en el borde de las llantas, se supone un ancho efectivo de la superficie de las llantas = w , se presenta la siguiente ecuación:

$$\gamma * g * h = K_a * \gamma * g * \frac{h}{12} * x^2 * \frac{1}{1/6 w^2} \quad \therefore x^2 = \frac{2w^2}{k_a} \quad \text{Se asume } w = 0.5$$

$x = 1,73 \text{ m}$ distancia de presión vertical en la cara del muro con llanta



Suponiendo que actúa como una sola columna de llantas sin efectos secundarios o restricción de otras llantas - espacio de descanso de la varilla

$$\begin{aligned} \text{Espacio de descanso de la varilla} &= 12 \text{ Llantas} * 0,1 \text{ m} \\ &= 1,2 \text{ m} < 1,73 \text{ m} \end{aligned}$$

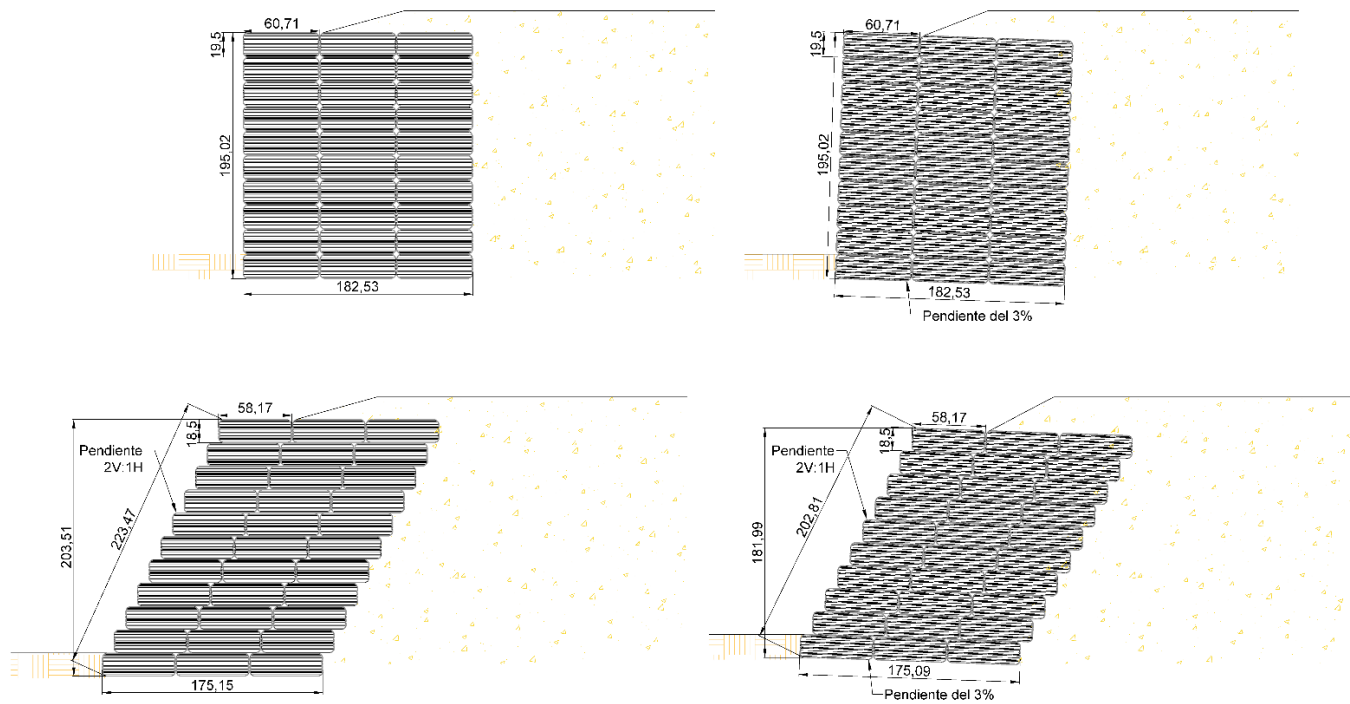
En la práctica, existe una restricción considerable de los bordes debido al bloqueo de las llantas.

Por lo tanto la estabilidad de la cara delantera del muro con llantas es satisfactoria incluso cuando se reducen los enlaces como se muestra en el ejemplo con las 12 llantas

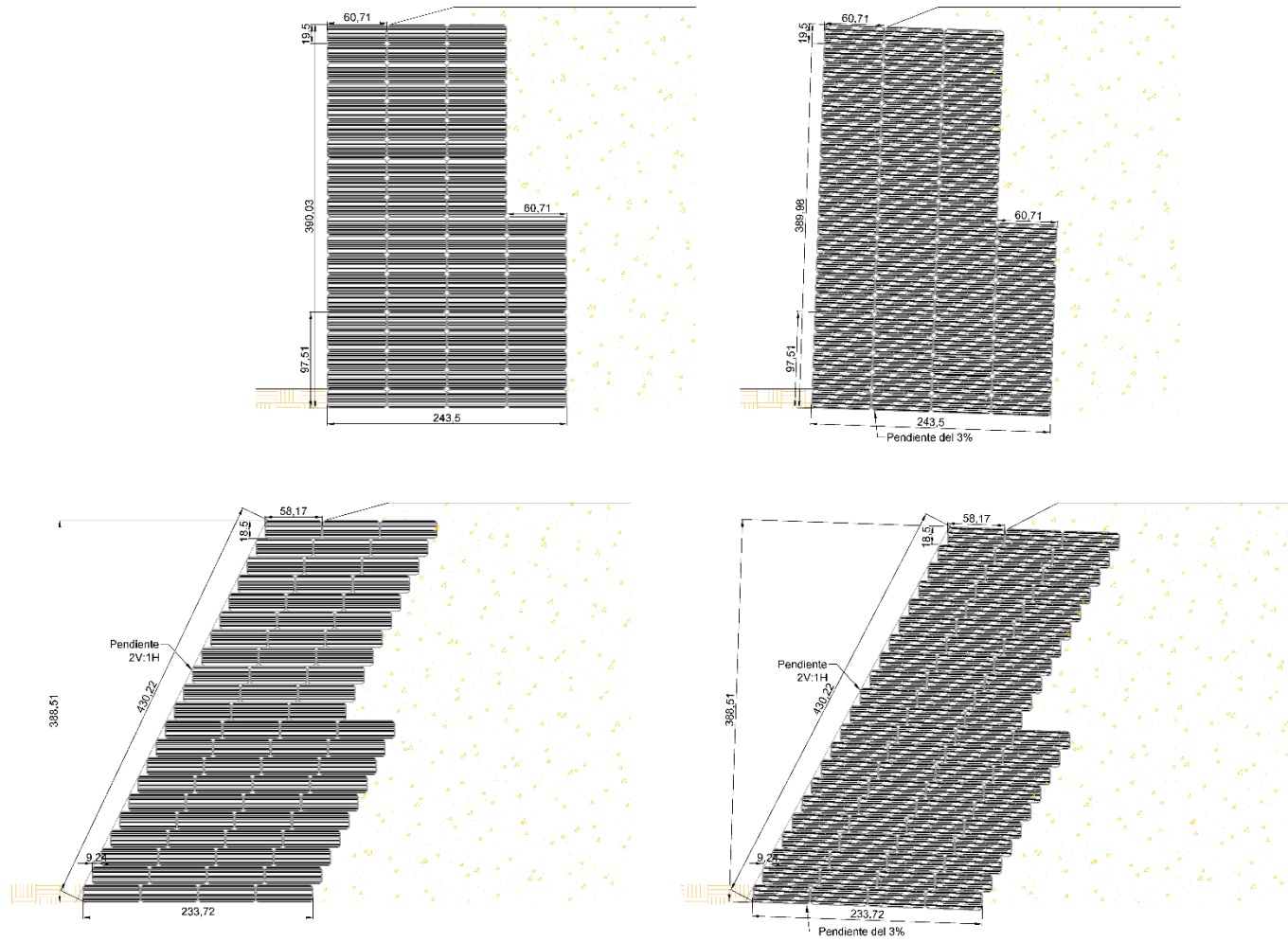
Nota: La cohesión se puede tener en cuenta aportando a la resistencia, restandola de la presión de tierras en la profundidad calculada, siempre para un muro de llantas con altura $h=4,0$ metros este parámetro será negativo

Si existe la posibilidad de que se acumule agua en el relleno, utilice la presión activa equivalente a la carga de presión hidrostática completa. Si no existe la posibilidad de que se acumule agua en el relleno, utilice la presión activa equivalente a un fluido de $0,5 \text{ Mg/m}^3$

C. Anexo: Muros con llantas para alturas de 2.0 y 4.0 m



Anexo C- 1.- Detalle de muros con llantas de 2.0 metros de altura.



Anexo C- 2.- Detalle de muros con llantas de 4.0 metros de altura.