

**MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE SUELOS FINOS
MEDIANTE LA ADICIÓN DE RESIDUOS PROVENIENTES DE FIBRAS
VEGETALES**



**UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA**

AUTOR

GUILLERMO ALBERTO AGUIRRE FUELANTALA

JAIRO FERNANDO FUEL VALENCIA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERO CIVIL

Director:

DR. SAIETH CHAVES PABÓN

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA - FAEDIS

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C., OCTUBRE DE 2020

**MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE SUELOS FINOS
MEDIANTE LA ADICIÓN DE RESIDUOS PROVENIENTES DE FIBRAS
VEGETALES**

**GUILLERMO ALBERTO AGUIRRE FUELANTALA
CODIGO: 7301797**

**JAIRO FERNANDO FUEL VALENCIA
CODIGO: 7301689**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al Título de
Ingeniero Civil**

Director:

DR. SAIETH CHAVES PABÓN

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA - FAEDIS
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C., OCTUBRE DE 2020**

Nota aceptación

Firma de tutor

Firma de jurado 1

Firma de jurado 2

BOGOTÁ D.C., OCTUBRE DE 2020

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado principalmente a DIOS el Ser Supremo que guía mis pasos y acciones en mi Diario Vivir, a mis Padres Luis Hernando Fuel Velasco (QEPD) que desde el Cielo me protege al igual me dio muchos consejos para cada día crecer como Persona, a mi Madre Teresa Valencia una persona Luchadora que día a día demuestra tenacidad y disciplina, a mi Familia Mi Esposa Ruby mis Hijos Fernando y Mariángel apoyo incondicional Ya que sin su ayuda no hubiese sido posible este Título, mi Director de Proyecto Ing. Saieth Baudilio Chávez por ser una Persona incondicional y Creyente de que todo puede hacerse y todo se puede Solucionar mil gracias por su apoyo.

Jairo Fernando Fuel Valencia

Este trabajo de grado va Dedicado a mis padres por el apoyo incondicional que siempre me han brindado, a mis Hijos Juan Guillermo y Samuel Aguirre porque gracias a ellos he crecido como persona y esto me ha permitido cumplir cada una de las metas que me he propuesto. Al Igual que mi esposa Mayer ya que con su ayuda desinteresada ha sido posible mi título, y por último al Ing. Saieth Baudilio Chávez nuestro director de Tesis quien fue la persona que nos colaboro con sus conocimientos y experiencia a que sea Posible este Proyecto

Guillermo Alberto Aguirre Fuelantala

PALABRAS CLAVE: Fique y suelos finos, propiedades mecánicas, adición de fique

RESUMEN

Las fibras naturales han logrado un papel protagónico respecto a su uso en una amplia gama de procesos, los materiales como la fibra natural, son objeto de investigación para su aplicabilidad en diferentes campos; en relación la Ingeniería Civil se han realizado investigaciones con materiales geotextiles en las mezclas que conforman el pavimento para establecer su funcionalidad; también se ha buscado si la tela de fique puede formar parte del acabado superficial en el pavimento rígido; en otra investigación se buscó la resistencia ofrecida por un geotextil y una geomalla al ser usadas en la capa granular subrasante confiriendo mayor resistencia ante las fuerzas de flexión que experimenta el pavimento; estos y otros trabajos han reportado buenos resultados; lo cual es motivante para la presente investigación cuyo objetivo es: Determinar el mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante la adición de residuos generados de material vegetal (fique); Esta es una investigación tipo experimental; debido a que se realizó manipulación de las variables a estudio para llegar a establecer el comportamiento de la fibra de fique, en adiciones al 0.5%, 1,0%, 1,5% y al 2,0%, para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos finos; dentro de los resultados obtenidos se tiene que las fibras incluidas en los porcentajes que van de 1,5% al 2,0%, generan respuesta positiva ante las pruebas de esfuerzo vs deformación, la fuerza máxima registrada en los ensayos de compresión en los especímenes calculados es de 8.1 kg/cm² con una dosificación de Fibra natural del 2%; se reporta que el porcentaje de humedad optima de mezclado que da a las fibras naturales la presencia de mejor adherencia con el suelo fue de 27%; se concluye que la fibra natural aumenta la resistencia a la compresión y mejora las condiciones físicas de soporte del suelo fino.

IMPROVEMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF FINE SOILS BY ADDING RESIDUES FROM VEGETABLE FIBERS

KEYWORDS: Fique and fine soils, mechanical properties, addition of fique

SUMMARY

Natural fibers have achieved a leading role regarding their use in a wide range of processes, materials such as natural fiber are the object of research for their applicability in different fields; In relation to Civil Engineering, investigations have been carried out with geotextile materials in the mixtures that make up the pavement to establish its functionality; It has also been sought if the fique fabric can be part of the surface finish of the rigid pavement; In another investigation, the resistance offered by a geotextile and a geogrid when used in the subgrade granular layer was sought, conferring greater resistance to the bending forces experienced by the pavement; These and other works have reported good results; which is motivating for the present investigation whose objective is: To determine the improvement of the mechanical properties of fine soils by means of the addition of residues generated from vegetal material (fique); This is an experimental type investigation; Due to the manipulation of the variables under study to establish the behavior of the fique fiber, in additions at 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2.0%, for the improvement of the mechanical properties of fine soils; Among the results obtained, the fibers included in the percentages ranging from 1.5% to 2.0%, generate a positive response to the stress vs deformation tests, the maximum force recorded in the compression tests in the specimens calculated is 8.1 kg / cm² with a natural fiber dosage of 2%; It is reported that the percentage of optimal mixing humidity that gives the natural fibers the presence of better adherence with the soil was 27%; It is concluded that the natural fiber increases the resistance to compression and improves the physical support conditions of the fine soil.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. CAPITULO I. GENERALIDADES	4
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1.1 Formulación Del Problema	4
1.2 JUSTIFICACIÓN	5
1.3 OBJETIVOS	6
1.3.1 Objetivo General	6
1.3.2 Objetivos Específicos	7
1.4 MARCO DE REFERENCIA	7
1.5 ESTADO DEL ARTE	8
1.6 MARCO TEÓRICO	14
1.6.1 Constitución de la Subrasante	14
1.6.1.1 Preparación de la Subrasante	17
1.6.1.2 Tipología de los suelos	21
1.6.1.3 Compactación de suelos	23
1.6.1.4 Agregado fino	25
1.6.1.5 Agregados pétreos	26
1.6.1.6 Material fino (pasa el tamiz # 200)	28
1.6.1.7 Gravedad Específica del agregado	28
1.6.1.8 Absorción	29
1.6.1.9 Propiedades Mecánicas del Suelo	29
1.6.2 Las Fibras y su uso en la Construcción	30
1.6.2.1 Fibra de fique	32
1.7 MARCO LEGAL	37
1.8 METODOLOGIA	38
1.8.1 TIPO DE INVESTIGACION	39
1.8.2 HIPÓTESIS	39
1.8.3 VARIABLES	40
1.8.3.1 Variables Independientes	40
1.8.3.2 Variables Dependientes	40
1.8.4 PRUEBAS A REALIZAR	41

1.8.5	PROCEDIMIENTO PARA OBTENCION Y REGISTRO DE RESULTADOS	
	54	
1.8.5.1	Procedimiento para la Obtención de Resultados	54
1.8.5.2	Registro de Resultados	55
2.	CAPITULO II. RESULTADOS	56
2.1	Granulometría	57
2.2	Limite líquido y Limite plástico	64
2.3	Muestras cilindros	70
2.3.1	Muestra al 0.5% de adición	73
2.3.2	Muestras al 1.0%de adición	76
2.3.3	Muestras al 1.5%de adición	79
2.3.4	Muestras al 2.0%de adición	82
2.4	Vigas	85
2.5	Promedios consolidados	89
2.	CONCLUSIONES	99
	BIBLIOGRAFÍA	103

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estado del arte del 2015 al 2017	8
Tabla 2. Estado del arte del 2010 al 2014	9
Tabla 3. Estado del arte del 2004 al 2009	11
Tabla 4. Propiedades de la Subrasante	17
Tabla 5. Sistema unificado de clasificación de los suelos	22
Tabla 6. Tipos de Agregados Pétreos	26
Tabla 7. Propiedades mecánicas del suelo	29
Tabla 8. Coeficiente de permeabilidad (CTE).....	30
Tabla 9. Algunas fibras naturales según el origen.....	32
Tabla 10. Componentes químicos de la fibra de fique	33
Tabla 11. Propiedades mecánicas de la fibra de fique.....	34
Tabla 12. Normas INVIAS 2017	38
Tabla 13. Normas ASTM.....	38
Tabla 14. Variables Independientes	40
Tabla 15. Variable Dependiente	41
Tabla 16. Límites de Atterberg (liquido – plástico)	64
Tabla 17. Límites e índice de plasticidad	65
Tabla 18. Resultados viga al natural	86
Tabla 19. Resultados viga con adición al 20%	89
Tabla 20. Promedio consolidado sin adición de fibras	90
Tabla 21. Promedio consolidado con adición de fibras al 0,5%	91
Tabla 22. Promedio consolidado con adición de fibras al 1,0%	92
Tabla 23. Promedio consolidado con adición de fibras al 1,5%	93
Tabla 24. Promedio consolidado con adición de fibras al 2,0%	94
Tabla 25. Fuerza axial de las muestras.....	95
Tabla 26. Resistencia a la deformación en todas las muestras.....	96
Tabla 27. Porcentaje y esfuerzo máximo	98
Tabla 28. Condensado Resistencia a la deformación	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Capas de la Subrasante.....	16
Figura 2. Planta y fibras de Fique.....	35
Figura 3. Características de la fibra de fique	36
Figura 4. Componentes químicos de la hoja de fique	36
Figura 5. Estipulación de tamaño y masa para agregado	42
Figura 6. Material retenido en el tamiz (máximo admitido en kg)	43
Figura 7. Datos de precisión.....	45
Figura 8. Precisión en muestras de 300g y 500g	46
Figura 9. Aparato del límite de líquido.....	47
Figura 10. Equipo para probar la resilecia.....	49
Figura 11. Resultados de ensayos sobre limites Atterberg	51
Figura 12. Resumen de resultados del ensayo de cada laboratorio.....	54
Figura 13. Aplicación de la INV E102-7 Selección de suelos finos	56
Figura 14. Norma INV E 213-07 Granulometría	58
Figura 15. Análisis granulométrico de suelos – limites líquido y plástico	59
Figura 16. Gradación.....	60
Figura 17. Línea de gradación.....	60
Figura 18. Peso unitario suelto y compacto.....	62
Figura 19. Peso específico	63
Figura 20. Secuencia para la obtención del límite líquido	65
Figura 21. Continuación de la secuencia para establecer el límite líquido	66
Figura 22. Fibra de fique seleccionada Natural y Procesada	67
Figura 23. Plantas de Fique	67
Figura 24. Material de suelo fino, Fique, Agua, Preparación de la Mezcla.....	68
Figura 25. Dimensiones de las Fibras de Fique	68
Figura 26. Preparación de la Fibra de Fique al suelo Fino.....	68
Figura 27. Toma de Cilindros y Vigas	69
Figura 28. Secado y curado al aire libre	69
Figura 29. Muestra en estado natural – esquema de falla anterior	71
Figura 30. Muestra en estado natural – esquema de falla anterior	72
Figura 31. Muestra al 0.5% de adición de fibras de fique cilindros (1 al 5)	74
Figura 32. Muestra al 0.5% de adición de fibras de fique cilindros (6 al 10)	75
Figura 33. Muestra al 1.0% de adición de fibras de fique cilindros (1, 2, 4, 5, 6 y 10).....	77
Figura 34. Muestra al 1.0% de adición de fibras de fique cilindros (3, 7, 8 y 9)	78
Figura 35. Muestra al 1.5% de adición de fibras de fique cilindros (1, 2, 3, 7 y 8).....	80
Figura 36. Muestra al 1.5% de adición de fibras de fique cilindros (4, 5, 6, 9 y 10)....	81
Figura 37. Muestra al 2.0% de adición de fibras de fique cilindros (1, 2, 5, 6, y 7)....	83

Figura 38. Muestra al 2.0% de adición de fibras de fique cilindros (3, 4, 8 y 9)	84
Figura 39. Conformación de vigas.....	85
Figura 40. Ensayo a flexión de vigas – estado natural	87
Figura 41. Ensayo de flexión de vigas con adición de fibras al 2.0%	88
Figura 42. Fuerza axial para las muestras	95
Figura 43. Resistencia a la deformación en las muestras	96
Figura 44. Tasa optima	97

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculos agregado fino	25
Ecuación 2. Cálculo de la masa por fracción.....	44
Ecuación 3. Cálculos para el contenido de agua.....	48
Ecuación 4. Cálculo para el índice de plasticidad	51
Ecuación 5. Cálculo para la resistencia al corte	52
Ecuación 6. Cálculo para la deformación axial.....	53
Ecuación 7. Cálculo del área de la sección transversal media.....	53
Ecuación 8. Cálculo del esfuerzo compresivo	53

INTRODUCCIÓN

La planta de fibra de fique es una especie nativa de la zona intertropical del continente americano, dentro del cual se encuentra Colombia, la fibra natural puede tener 2,5 m de longitud, es utilizada generalmente en la fabricación de productos artesanales; ahora bien, teniendo en cuenta que las propiedades mecánicas de los suelos finos son totalmente deficientes, lo cual se ha observado en los procesos constructivos, lo que conlleva realizar desalojo y remplazo del material encontrado en el suelo natural por material seleccionado que tenga mejores características mecánicas, estos procesos reconstructivos ocasionan significativos aumentos en los costos para la obra, así surgió la inquietud de establecer si las propiedades mecánicas de los suelos finos, se pueden mejorar con la adición de residuos de fibras vegetales provenientes del fique, por ello se deben realizar las mezclas y las pruebas pertinentes para establecer cuál es el porcentaje óptimo de fique que se debe adicionar a los suelos finos para mejorar sus propiedades mecánicas.

La fibra de fique ha sido caracterizada mecánicamente mediante ensayos de tensión, donde además de valorarse esta resistencia (MPa), se incluyó el módulo de elasticidad (GPa) (Pinzón, 2013) encontrando un porcentaje mayor ante la elongación a la fractura; igualmente el análisis del comportamiento de sus propiedades mecánicas durante su procesamiento ha entregado resultados importantes demostrando que la fibra de fique presenta buenas propiedades mecánicas; se han realizado aplicaciones del fique en diversas investigaciones, tal como se referencia en el aparte de estado del arte, de ellas se destacan de una parte el estudio geotécnico y de diseño estructural de pavimentos presentado por (Galvis 2017) para la estructuración del pavimento

rígido se incluyó en el proceso tela de fique ubicada en la capa superficial, confiriendo mayor resistencia al pavimento; otra de las investigaciones relevantes es la presentada por (Vettorelo, Claria 2014) quienes presentaron una revisión a las investigaciones realizadas sobre suelos reforzados con fibras, encontrando que las fibras mejoran las propiedades de los suelos, una de las evidencias es la ausencia de deformaciones de gran tamaño.

La relevancia del tema radica en varios aspectos, de una parte en las posibilidades de aplicación que puede tener esta iniciativa, porque si bien es cierto, que diferentes investigaciones han realizado estudios mediante los cuales se adiciona fibras naturales y sintéticas a los suelos con el fin de mejorar sus propiedades físico mecánicas, aún no se contaba con investigaciones que determinen el aporte que harían los residuos de fibras de fique en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos finos, es decir para la subrasante, lo cual puede convertirse en una novedosa alternativa técnica, que se hace viable por el aporte significativo que implica la reducción de costos económicos para el desarrollo de este tipo de obras civiles; de esta forma se aporta a la academia y al ámbito científico con la metodología aplicada y los resultados obtenidos; de otra parte el aporte realizado al ámbito social puede radicar, también, en la reducción de costos para la construcción de vías con este tipo de inclusiones, lo cual favorecen el desarrollo de las comunidades y su economía.

Este trabajo de investigación se presenta través de dos capítulos bien definidos, el primer capítulo, denominado generalidades se conforma con los elementos que trazan el camino a seguir, por ello se encuentra el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos; con estos elementos claros se elaboró el marco de referencia, este

último compendia los diversos marcos que limitan y establecen los parámetros dentro de la investigación; así pues, el estado del arte, se dirige a revisar en los informes de investigaciones existentes a la fecha de construcción de la presente investigación, cuáles eran las investigaciones realizadas con preguntas de investigación similares a la propuesta, y que resultados obtuvieron como aporte para esta investigación; ahora respecto al marco teórico, comprenden la revisión de la teoría alrededor de la construcción de la subrasante y también la descripción del fique y sus fibras; por su parte en el marco legal se incluyen las normas Invias y ASTM, usadas en las pruebas realizadas; la parte final del primer capítulo expone la metodología que se siguió durante la investigación; por su parte el segundo capítulo, denominado resultados, presenta el proceso seguido para realizar las pruebas y los resultados obtenidos, lo cual llevo a las conclusiones, en donde se logró determinar que las propiedades mecánicas de suelos finos mejoro mediante la adición de fique.

1. CAPITULO I. GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hasta el momento no se han realizado ensayos experimentales, en detalle, que permitan determinar el comportamiento de las propiedades mecánicas de los suelos finos, es decir de la subrasante con la adición de fibras naturales de fique y de manera particular la adición de residuos de estas fibras.

Lo anterior, teniendo en cuenta que las propiedades mecánicas de los suelos finos son totalmente deficientes, lo cual se ha observado en los procesos constructivos, lo que conlleva realizar desalojo y remplazo del material encontrado en el suelo natural por material seleccionado que tenga mejores características mecánicas, estos procesos reconstructivos ocasionan significativos aumentos en los costos para la obra.

Lastimosamente, el desconocimiento del aporte que pueden realizar las fibras naturales en relación con el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos finos, conlleva que en las obras civiles todavía se continúe reemplazando el material fino sin tener la posibilidad de contar con alternativas técnicas, que a partir de procesos experimentales ayuden a la toma de decisiones en favor de la estabilidad de la obra, de su economía y por supuesto con muy bajo impacto hacia el medio ambiente.

1.1.1 Formulación Del Problema

¿Cuál es el porcentaje óptimo de residuos de fibras vegetales provenientes del fique que se debe adicionar a los suelos finos para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos?

1.2 JUSTIFICACIÓN

La tendencia actual en materia de mejoramiento de los suelos se dirige a probar diversos materiales, que adicionados a las mezclas tradicionales ofrezcan nuevas propiedades mecánicas y en relación con la capacidad de tensión, soporte de cargas, durabilidad, materiales que también deben ofrecer mínima o nula contaminación; es bien conocido que este tipo de adiciones favorecen la utilidad mejorando las propiedades de los materiales de base, es el caso de las adiciones realizadas al adobe, lo cual ha sucedido desde épocas anteriores y hoy cobran gran relevancia estas prácticas que tienden a la sustentabilidad moviéndose en una forma de atenuación de los impactos negativos al medio ambiente (Vetorelo & Clariá, 2014).

Si bien es cierto, que diferentes investigaciones han realizado estudios mediante los cuales se adiciona fibras naturales y sintéticas a los suelos con el fin de mejorar sus propiedades físico mecánicas, dentro de estas investigaciones se han realizado adiciones al concreto, pero aún no se cuenta con investigaciones que permitan determinar el aporte que harían los residuos de fibras de fique en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos finos, es decir para la subrasante, lo cual podría convertirse en una novedosa alternativa técnica, que además se viabilice desde el aporte significativo que implicaría la reducción de costos económicos para el desarrollo de este tipo de obras civiles.

Es desde esta perspectiva que la investigación se considera novedosa en virtud de que no se conocen estudios, que hasta el momento, se relacionen con el aprovechamiento de residuos de fibras de fique, como una fibra natural por excelencia adicionada a los suelos finos con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, que

para efectos de la presente investigación se convierten en la unidad de trabajo, lo cual quiere decir que en varias muestras de suelos finos, se aplicarán diferentes porcentajes de residuos de fibras de fique los cuales serán evaluados a través de ensayos de laboratorio con el fin de indicar con datos reales, como cada uno de los diferentes porcentajes de adición de residuos de estas fibras permiten mejorar las propiedades mecánicas de los suelos finos.

Además, es innovador por la intencionalidad de dar continuidad a los procesos de investigación, que ayuden a consolidar las líneas de investigación relacionadas con el mejoramiento de las propiedades mecánicas de material granular mediante la implementación de tecnologías más amigables.

Con este proyecto se pretende aportar a la Ingeniería una alternativa para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos finos para asegurar, desde las normas, el holgado cumplimiento de las especificaciones técnicas, con la consideración de criterios técnicos, económicos y ambientales que sean más favorables para las obras.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Determinar el porcentaje óptimo de residuos de fibras vegetales provenientes del fique que se debe adicionar a los suelos finos para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos finos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Comprobar en el laboratorio la calidad de los agregados finos de acuerdo a la norma INV E 213-07, para establecer el análisis granulométrico de agregados gruesos y finos con los que se realizaran los cilindros y las vigas a ser falladas en el laboratorio.
- Realizar un diseño de mezcla a partir de diferentes porcentajes de material vegetal con respecto a la totalidad del grano fino, encontrado en la subrasante, hasta obtener el contenido porcentual óptimo para lograr el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos finos.
- Establecer la resistencia a la flexión del material fino sin adición de fibras versus la adición en porcentajes de residuos de fibras de fique, para así determinar la eficiencia del material adicionado.

1.4 MARCO DE REFERENCIA

El marco de referencia se construye teniendo en cuenta las investigaciones que existen a la fecha las cuales consideran temáticas similares a la propuesta en este trabajo, lo cual se presenta en el estado del arte, posterior a ello se construye el marco conceptual con las conceptualizaciones existentes alrededor del tema de estudio; desde el marco teórico se consideran los aportes que puedan realizar los documentos existentes en relación con los procesos de adición para suelos; finalmente el marco legal recoge las normativas vigentes en el país y en el ámbito internacional que regulan las adiciones favoreciendo los procesos constructivos dentro de los parámetros aceptables para su implementación.

1.5 ESTADO DEL ARTE

Con el fin de realizar una reseña, se presentan las investigaciones que se han elaborado en temas similares al propuesto en este trabajo, con lo cual se obtiene una panorámica de las aplicaciones de la fibra de fique y se verifica que no exista un trabajo con la misma intencionalidad, también para reconocer los alcances obtenidos con propuestas que de una u otra forma se relacionan con el tema propuesto, en la tabla 1, se incluyen los trabajos más recientes.

En ellos se encontró que, usando también fibras, se expone el estudio de una malla geotextil, su aplicabilidad, al igual que en la presente investigación se dirige a la construcción de vías, específicamente se centra en carreteras NT2 y NT3, puede formar parte de la capa sin composición estructural; otro trabajo incluido se desarrolla para la estructuración del pavimento rígido, aquí se usó tela de fique, pero para la parte de acabado superficial; el siguiente trabajo incluido realizó la evaluación en el nivel de resistencia de una subrasante, mismo lugar objeto de la presente investigación, pero con el uso combinado de una geomalla y un geotextil; otro trabajo que llamo la atención fue el que mostro el uso de fibra de cáñamo para mejorar las propiedades mecánicas del concreto; finalmente se encontró que en la Cartilla de andenes de Bogotá D.C., dentro de algunos componentes se considera la adición de fibra de vidrio y de otras fibras para el sellamiento; lo cual resulta interesante si se tiene en cuenta que la adición de fibras mejoran las propiedades mecánicas, confiriendo mayor resistencia y menor costo.

Tabla 1. Estado del arte del 2015 al 2017

AÑO	TITULO	AUTOR	UNIVERSIDAD/REVISTA	DESCRIPCION
2017	Análisis físico-mecánico de mezclas densas en caliente MDC-19 con adición de tiras de geotextil de 1cm	Alcides José Landinez Saurith; Gustavo Adolfo Restrepo Piedrahita; Jerson Said Lázaro Suárez	Universidad Católica de Colombia/Facultad de Ingeniería/Especialización en Ingeniería de Pavimentos	con la inclusión del geotextil se estableció mayor volumen en la briqueta así la densidad fue menor, la caracterización tiende a la porosidad, su aplicabilidad se centra en carreteras NT2 y NT3, puede formar parte de la capa sin composición estructural
2017	Estudio geotécnico y diseño estructural de pavimentos centro de mantenimiento, hangar y zona de guajes, empresas varias de Medellín ESP	Alexander Galvis	INTEINSA Pavimentos - Empresas Varias de Medellín E.S.P.	se expone para la estructuración del pavimento rígido, el uso de tela de fique para la parte de acabado superficial se realiza de forma posterior al proceso de allanado, esta tela se incluye en el proceso de curado del cemento para cubrir la parte superficial de la zona del pavimento
2016	Evaluación en el nivel de resistencia de una subrasante, con el uso combinado de una geomalla y un geotextil	Andrés Sebastián Bustamante Noboa	Universidad de Cuenca - Facultad de Ingeniería- Centro de Posgrados - Maestría en Ingeniería en vialidad y transportes - Cuenca - Ecuador	el estudio sirvió para establecer la resistencia que proporciona un geotextil y una geomalla en la interface capa granular subrasante para dar refuerzo adicional
2016	Uso de fibra de cáñamo para mejorar las propiedades mecánicas del concreto	Iván Leonardo Carvajal Corredor; Luis Eduardo Terreros Rojas	Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá	se determinó y se realizó análisis de las propiedades a la compresión tanto como a la flexión en el concreto normal con adición de cáñamo mediante experimentos de laboratorio con lo que se encontró mayor resistencia ante las fuerzas de flexión y también al proceso de agrietamiento con contención del material

2015	Cartilla de andenes de Bogotá D.C.	Sandra Mónica Mora Ramírez; Jennifer Hernández puentes; Jhon Jairo Duque Ríos; Oscar Andrés Navarro	Secretarías Distritales de Ambiente y de Movilidad, IDU-CIDDCA	dentro del aparte de mejoramiento de la subrasante se considera la conformación de lo granular con la inclusión de geotextiles que hagan separación; dentro de las estructuras de los pavimentos, en el aparte de los materiales también se considera la inclusión de geotextiles; asimismo dentro de algunos componentes se considera la adición de fibra de vidrio y de otras fibras para el sellamiento
------	------------------------------------	---	--	--

Fuente: Los Autores

La tabla 2 considera los trabajos que se relacionan con el tema objeto, elaborados en el periodo comprendido entre los años 2010 a 2014.

Tabla 2. Estado del arte del 2010 al 2014

AÑO	TITULO	AUTOR	UNIVERSIDAD/REVISTA	DESCRIPCION
2014	Evaluación del comportamiento mecánico de los materiales compuestos a base de fibra de fique y fibras sintéticas	Luis Alberto Pérez García	Universidad autónoma del Caribe, Barranquilla	se obtuvo el impacto de las mezclas que se lograron con cuatro capas de fique y los tres elementos de mezcla: resina, thinner y catalizador, logrando mejores resultados en la absorción del impacto
2014	Suelos reforzados con fibras: estado del arte y aplicaciones	Paula Vettorelo, Juan Clariá	Laboratorio de Geotecnia, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales/Universidad Nacional de Córdoba	Revisión de la bibliografía existente alrededor de la temática de los suelos (granular, cohesivo) que pueden ser mejorados con la adición de diversas fibras, con lo cual se obtiene que este tipo de adiciones fomentan la resistencia ante el corte dificultando deformaciones de gran tamaño, con lo cual se pueden

2013	Análisis de la resistencia a compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique	Sandra Pinzón Galvis	Universidad Piloto de Colombia/Revista Ingenierías, volumen XVI, N°61	establecer diversos modos de aplicación. para dar refuerzo al concreto utilizo fibra proveniente de fique la cual es desecho de la industria que elabora productos de esta materia prima, recomienda trabajar con adiciones que no superen los tres kilogramos por cada metro cubico de concreto, cuya longitud no supere los cinco centímetros
2013	Uso de materiales compuestos reciclados de fibra de vidrio-poliéster como cargas en concreto polimérico	Rodolfo Morales Ibarra, Elsa Abigail Duncan Flores, Saida Mayela García Montes, Alma Gisela Martínez Arellano, Juan Francisco Barrón Granados, Denisse Arantxa Cepeda Mújica	Reacciones Químicas S.A. de C.V./Universidad Piloto de Colombia/Revista Ingenierías, volumen XVI, N°61	con el uso de material formado por fibra de vidrio y resina poliésteres pulverizaron como carga dentro del concreto polimérico, con lo cual se analizó la respuesta valorando los resultados dentro de las propiedades mecánicas, con lo cual la formula obtenida expone 10% de resina más 90% de carga con un tope de 2% de reciclado obteniendo buenas propiedades
2013	Análisis de las propiedades mecánicas del suelo a partir de la mezcla con residuos de la construcción	David Escobar Zarrabe, Sebastián Giraldo Hoyos	Escuela de Ingeniería de Antioquia/Ingeniería Civil	se obtuvo con las pruebas que el agregado de ladrillo de forma triturada adicionado al 8% favorece la cohesión y al 12% se resta el ángulo de fricción del interior
2013	Manual de carreteras - Especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013	Dirección General de Caminos y Ferrocarriles - Perú	Ministerio de Transportes y Comunicaciones - Viceministerio de Transportes - Dirección General de Caminos y Ferrocarriles - Perú	en la sección 434 que se refiere al pavimento de concreto asfaltico al cual se le realizan adiciones de Stone Mastic Asphalt (SMA), dentro del contenido de los materiales en los agregados finos se consideran las fibras de celulosa; también en el aparte de geotextiles se

2011	Guía de manejo ambiental de proyectos de infraestructura subsector vial	INVIAS	Presidencia de la Republica de Colombia - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial	consideran las fibras para facilitar el drenaje, en el proceso de pavimentación y para evitar la erosión con el fin de promover la protección de taludes con elementos vegetales, en el literal e se considera dentro de la hidrosiembra el uso de fibras de mantillo dispuestas en la cobertura; dentro del literal f, se consideran las fibras de tipo natural para dar una nueva vegetación a las áreas que requieren control de la erosión
2010	Generalidades sobre las fibras artificiales - Modulo de lectura para la asignatura Análisis de estructuras	Luis Octavio González Salcedo	Universidad Nacional de Colombia sede Palmira	considera dentro de las fibras de origen natural las vegetales como el fique, la cual se destaca por las propiedades tanto físicas como químicas que le confieren ductilidad a la hora de ser mezclada con otros componentes en la construcción

Fuente: Los Autores

La tabla 3 incluye los trabajos relacionados a la temática presentados entre los años 2004 a 2009.

Tabla 3. Estado del arte del 2004 al 2009

AÑO	TITULO	AUTOR	UNIVERSIDAD/REVISTA	DESCRIPCION
2009	Evaluación del jugo de fique como aditivo ocluser del aire y su influencia en la durabilidad y resistencia del concreto	Leyla Yamile Jaramillo Zapata	Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Minas- Escuela de Ingeniería - Maestría en Ingeniería área de materiales y procesos	para aprovechar los residuos agrícolas disminuyendo así el negativo impacto ambiental se propone este uso del jugo de fique en el sector de la construcción como aditivo mejorando las características conocidas del concreto en torno a la durabilidad y la resistencia

2009	Manual de diseño con geosintéticos	Geosistemas PAVCO S.A.	Departamento de Ingeniería - Geosistemas PAVCO S.A. Bogotá	con el fin de proveer materiales que respondan con excelsa calidad sin generar profundos impactos en el ambiente y generando reducción en los costos, los geosintéticos resultan ser opciones muy viables en los procesos de construcción de carreteras, se describe la aplicabilidad de las fibras de fique y de fique-coco para la elaboración de mantos para hacer control efectivo a la erosión
2007	Tejas corrugadas y placas planas basadas en matriz cementica reforzada con fibras de fique	Silvio Delvasto; Eduard Fernando Toro; Marie-Ange Arsene; Ketty Bilba; Cristel Onessipe	I Reunión acción Coordinación de proyectos de investigación 307AC0307 Residuos agro-industriales: fuente sostenible de materiales de construcción - Madrid - Universidad del Valle - Escuela de Ingeniería de Materiales	el proceso de ensayo apoyado por Colciencias, el Ministerio de Educación y el Icetex, junto con el gobierno francés, se dirigió a buscar alternativas de solución para las cubiertas en torno a resistencia a la flexión, el proceso se basó en el uso de cemento portland tipo I; uno de los aditivos adicionados en el proceso fue las fibras de fique, las cuales demostraron capacidad como elemento de moldeo
2007	Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar	Jairo Alexander Osorio Saraz; Fredy Varón Aristizabal; Jhonny Alexander Herrera Mejía	Revista DYNA - Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad Nacional de Colombia - Medellín	a partir de la mezcla de concreto con fibra de bagazo de caña, se valoró la resistencia en cuanto a la compresión en relación con la densidad de la fibra, obteniendo mayor resistencia con la adición de fibras retenidas por tamiz #6 con un porcentaje oscilante entre 0.5% y 2.5% de fibras para el peso del agregado de concreto
2006	Estudio experimental de refuerzo de suelos con fibras sintéticas	Carlos Fernández Calvo	GEOGACETA - Centro Regional de Control de Calidad - Junta de Castilla y de León - Valladolid	con el fin de obtener mejoramientos en la caracterización geotécnica del suelo in situ, se ensayaron 6 fibras sintéticas diferentes, todas en base de

2006	Uso de fibras de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto Ingeniería y desarrollo	Sandra Liliana Quintero García; Luis Octavio González Salcedo	Universidad del Norte, Barraquilla	polipropileno; para lo cual no se encontraron variaciones significativas que confieran propiedades específicas a las muestras ensayadas con la evaluación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas realizadas se proveen los parámetros para la elaboración de concreto fibroreforzado
2004	Pavimentos de concreto reforzados con fibras de polipropileno provenientes de plásticos reciclados	Lorena del Carmen Santos Cortes, José Arturo Hernández Ruiz	Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural/Instituto de Ingeniería/Universidad Veracruzana/Congreso Nacional de Ingeniería Estructural	con los ensayos se da pie a generar especificidades para la construcción de pavimento cuyos materiales son el concreto hidráulico que se le aplica reforzamiento con fibras tipo PP

Fuente: Los Autores

1.6 MARCO TEÓRICO

El marco teórico se encuentra estructurado de acuerdo a los ejes temáticos que surgen a partir del problema y los objetivos propuestos; es así como teniendo en cuenta que los suelos finos conforman la capa subrasante se inicia con los contenidos teóricos que establecen los conocimientos de los cuales se parte para el cumplimiento del objeto de estudio, se considera entonces en la constitución de la subrasante: (preparación, tipología, compactación, agregado fino y agregados pétreos, definición de material fino, gravedad específica, absorción y propiedades mecánicas del suelo); luego se presenta lo concerniente a la fibra objeto presentando el uso de las fibras en la construcción y detallando lo relacionado a la fibra de fique. Es decir que, de esta manera se cubre la revisión teórica que guía el desarrollo de la investigación al contemplar lo concerniente a los suelos finos, a las propiedades mecánicas de estos suelos y a las fibras vegetales (fique).

1.6.1 Constitución de la Subrasante

La subrasante es el mismo suelo sobre el que se construye cada capa que compone el pavimento de una vía, en las primeras construcciones que se hicieron de carreteras esta capa definía la forma de diseño que operaría para esa vía, debido a que se partía de la determinación de ese suelo teniendo en cuenta la composición, el comportamiento ante el corte, la respuesta a las temperaturas altas y bajas y la forma como realizaba el drenaje, en la época siguiente mediante ensayos se generó una mejor caracterización de los suelos lo que mostro resultados del comportamiento de la subrasante ante la carga de tipo estática, es decir de velocidad mínima o muy baja

para detectar la capacidad de deformación, también se generaron pruebas ante la compresión y otra serie de ensayos con un dinamismo mayor como la repetición de cargas, es el caso de la prueba para determinar la resiliencia, estos ensayos en conjunto permiten determinar la respuesta de la subrasante ante la deformación y tensión (Rodríguez, 2010).

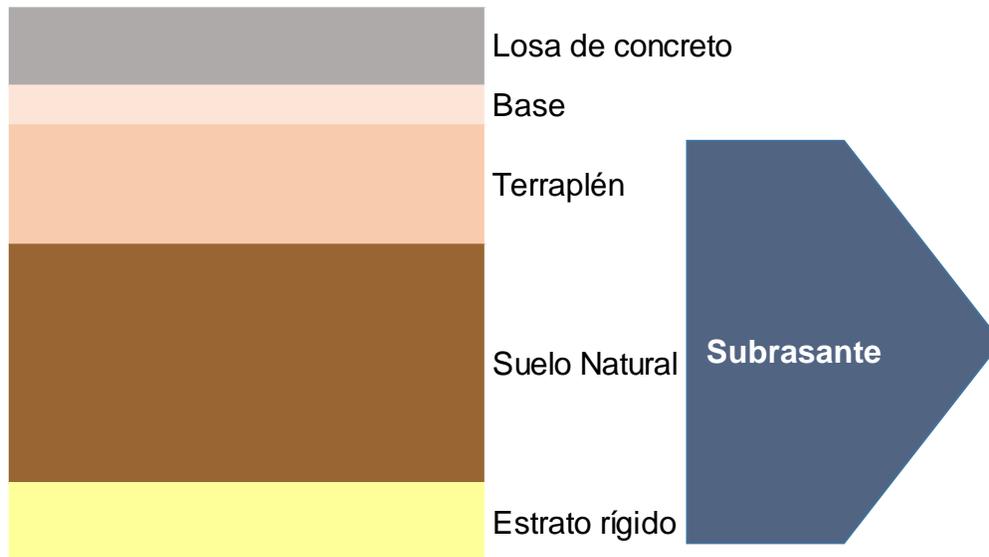
Así pues, la subrasante presenta propiedades tanto físicas como de competencia en ingeniería, las físicas se determinan para hacer una elección adecuada de materiales para la construcción de las vías, lo cual facilita la determinación de las especificaciones técnicas y por ende la forma adecuada para establecer la calidad, esta última es relacionada de forma directa con los módulos de Poisson, de reacción de la subrasante y resiliente, así como la determinación del valor soporte del suelo (Rodríguez, 2010).

Ahora bien, un factor esencial en la construcción de una vía es dado por la forma en la que se da estructura a la subrasante, esto debido a que de la calidad que tenga esta capa determina el grosor de los pavimentos, ello sin importar si el pavimento será rígido o de tipo flexible, porque en todos los casos se requiere la valoración puntal del suelo en torno a la humedad, teniendo en cuenta además de la resistencia la posible variabilidad en cuanto al volumen que puede darse en un suelo de características expansivas, lo cual permitiría daños inconmensurables a la estructura del pavimento cimentado sobre ese tipo de suelo; lo cual se evita ejerciendo control en la variabilidad volumétrica que es consecuencia de la humedad (ICPC, 2010).

Cabe aclarar que, como elemento de sustento a la construcción de una carretera la subrasante puede usarse en su estado formativo o pueden agregarse materiales

que mejoren su condición dando mayor estabilización para el desempeño mecánico; algunos de estos materiales usados como aditivo son el cemento tipo Portland, o el compuesto de cal, también suele usarse asfalto; los componentes de la subrasante se presentan de forma gráfica en la figura 1.

Figura 1. Capas de la Subrasante



Fuente: elaboración de los autores a partir de (ICPC, 2010, pág. 7)

De acuerdo a lo que se establece en la figura 1, desde la zona del terraplén hasta el estrato rígido requieren ser estudiados mediante ensayos cuidadosos porque estos elementos de la subrasante determinan la calidad del pavimento en la carretera, con los ensayos mencionados además de lo expuesto, la indagación se dirige a establecer la forma en la que se relacionan tanto la carga como la deformación unitaria que puede darse; la fundamentación de todas las pruebas está dada por las circunstancias en la humidificación, la forma de compactación y por supuesto el confinamiento; es así como estos datos resultantes dan la base para el diseño del pavimento que se construirá,

por lo cual resulta pertinente resaltar las propiedades que son necesarias en la subrasante, como se presenta en la tabla 4.

Tabla 4. Propiedades de la Subrasante

Resistencia
 Drenaje
 Compactación eficiente
 Compactación conservada
 Estabilidad volumétrica

Fuente: Los Autores con datos de (ICPC, 2010, pág. 13)

Cabe destacar que dependiendo de los parámetros de calidad que cumpla será el factor determinante en el grosor que deba adjudicársele al pavimento, por esa razón en el diagnóstico que se realiza a la capa se establece la capacidad de soporte que manifiesta la resistencia a la deformación, también resulta importante establecer regulaciones que impidan la variación expansiva como las impermeabilizaciones (Montejo, 2002). En la determinación de las propiedades físicas de la subrasante, se establece el contenido de humedad, se realiza un análisis de granulometría, además se determina el límite plástico y el líquido, se determina el peso de forma específica y se realizan ensayos que establecen la compactación, también debe calcularse la densidad y la resistencia (Montejo, 2002).

1.6.1.1 Preparación de la Subrasante

El material de la subrasante debe encontrarse limpio, sin materia orgánica y debe permitir el proceso de compactación con el rodillo, con lo cual se forma la subbase con características de estabilidad, por esta razón el material debe responder a las siguientes características:

- ✚ El coeficiente de uniformidad bien clasificado (D60 / D10) no debe ser inferior a 3.
- ✚ El tamiz pasante de fracciones # 200 no debe ser mayor que 2/3 de la fracción que pasa por el tamiz # 40.
- ✚ Debe tener una L.L no mayor del 25%.
- ✚ P.I no mayor de 6
- ✚ CBR no debe ser menor de 25.
- ✚ En el grano grueso, el agregado retenido por el tamiz # 10, el% de edad de desgaste no debe ser mayor del 5%.
- ✚ El diámetro máximo de cualquier partícula no deberá ser mayor que 2/3 del espesor de capa de la sub-base (Khan A. , 2016).

La importancia que adquiere la subrasante en la preparación de las carreteras se debe a que de su estado depende el éxito del pavimento que se construya y esto depende de factores como la capacidad de carga la cual proviene de la estructura del pavimento y debe ser soportada sin una enorme deformación; como se expuso con anterioridad el contenido de humedad tiende a afectar a las propiedades de la subrasante, incluyendo capacidad de carga, contracción e hinchamiento; este contenido de humedad puede verse influenciado por una serie de factores tales como drenaje, elevación de la capa freática, infiltración o porosidad del pavimento (que puede ser asistido por grietas en el pavimento); es decir que la subrasante desmesuradamente húmedas se deformarán desatinadamente bajo carga (Khan J. , 2015).

Asimismo la capacidad de contracción que tenga el suelo también depende de la humedad del mismo, cabe anotar que los suelos con un contenido excesivo de finos pueden ser susceptibles a la helada en climas más fríos, por ende la contracción y el

levantamiento de las heladas tenderán a deformar y agrietar cualquier tipo de pavimento construido sobre ellos; por ello en este tipo de suelos así como en los suelos débiles deben aplicarse las metodologías existentes que confieren estabilidad para el pavimento, una de las formas es la remoción de este suelo para ser remplazado con un relleno que brinde excelsa calidad, estas excavaciones están determinadas en cuanto a su profundidad por la Asociación de Pavimentos Asfálticos de Colorado (CAPA) (Khan J. , 2015).

Los suelos marginalmente pobres pueden compensarse usando capas de base adicionales; estas capas (generalmente de piedra triturada - ya sea estabilizada o no estabilizada) sirven para esparcir las cargas del pavimento sobre un área de la subrasante más grande; pero debe tenerse en cuenta que no siempre una estructura de pavimento gruesa sobre una subrasante pobre no necesariamente hará un buen pavimento; ahora bien los materiales de la subrasante se caracterizan normalmente por su resistencia a la deformación bajo carga, lo que puede dar una medida de su resistencia (la tensión necesaria para romper o romper un material) o la rigidez (la relación entre el estrés y la tensión en el rango elástico o lo bien que un el material es capaz de volver a su forma y tamaño originales después de ser estresado), pero en términos generales, cuanto más resistente es a la deformación de una subrasante, más carga puede soportar antes de alcanzar un valor de deformación crítico; para este fin se aplican tres caracterizaciones básicas de dureza / rigidez de subrasante:

- ✚ California Cociente de cojinetes (CBR),
- ✚ Valor de resistencia (valor R) y
- ✚ Módulo elástico (elástico) (Khan J. , 2015)

Aunque hay otros factores que intervienen cuando se evalúan los materiales de la subrasante (como el hinchamiento en el caso de ciertas arcillas), la rigidez es la caracterización más común. Por lo expuesto resulta primordial la preparación de la superficie para la construcción de la carretera, es así como una preparación adecuada de la superficie es esencial para el desempeño a largo plazo del pavimento, esto porque los pavimentos construidos sin una adecuada preparación de la superficie pueden no cumplir con las especificaciones de suavidad, por lo tanto, no se unirían al pavimento existente (en el caso de los recubrimientos) o podrían fallar debido a un soporte insuficiente de las superficies; entendido esto debe saberse que la preparación de la superficie generalmente toma una de dos formas: una la preparación de la base y de la base granular para nuevos pavimentos, esto puede implicar actividades tales como la estabilización de la subrasante (por ejemplo, con cal, cemento o asfalto emulsionado), sobre excavación de suelos bajos, aplicación de una capa principal o compactación de la subrasante, la otra es la preparación de una superficie de pavimento existente para superposición, esto puede implicar actividades tales como la eliminación de una capa superior a través de la molienda, la aplicación de un curso de nivelación, la aplicación de una capa adhesiva, rubblizing o agrietamiento y el asiento de un pavimento rígido subyacente, también la sustitución de áreas localizadas de daño extremo (Khan J. , 2015).

Las acciones específicas para cada método dependen del tipo y propósito del pavimento, condiciones ambientales, condiciones de subrasante, experiencia local y especificaciones; pero de acuerdo a lo relevante dentro de este contenido la preparación de los suelos para la construcción de pavimentos nuevos debe considerar

que la resistencia total y el rendimiento de un pavimento dependen no sólo de su diseño (incluyendo el diseño de la mezcla y el diseño estructural), sino también de la capacidad de carga del suelo de la subrasante; por lo tanto, cualquier cosa que se pueda hacer para aumentar la capacidad portante (o soporte estructural) del suelo de la subrasante mejorará muy probablemente la capacidad portante del pavimento y por lo tanto, la resistencia y rendimiento del pavimento; además, una mayor capacidad estructural de la capa de suelo puede resultar en estructuras de pavimento más delgadas (pero no excesivamente delgadas) con lo cual además se reducen los costos (Khan J. , 2015). Cabe destacar que en los suelos finos la tendencia es a aumentar en el módulo de resiliencia en respuesta al nivel de esfuerzo presente en el material de tipo granular (Garnica, Gómez, & Sesma, 2002).

1.6.1.2 Tipología de los suelos

La clasificación de los suelos depende básicamente de la variación física así como de las propiedades que exhibe desde la perspectiva mecánica, para lo cual se ejemplifica la clasificación en la tabla 7, esto corresponde al sistema unificado SUCS (Unified Soil Classification System), esta clasificación se aplica en ingeniería para hacer una descripción detallada en la texturización que adquiere el suelo así como la diversidad de tamaños de sus componentes, de estos valores se sirve la granulometría; la simbología presente en el segmento derecho de la tabla 5, muestra la denominación que es conocida en el ámbito internacional con lo cual su aplicación es global; esta clasificación es expedida por el Departamento de Transporte de California y es denominado (unified soil classification system) sistema unificado de clasificación de suelos (CALTRANS, 2010).

Tabla 5. Sistema unificado de clasificación de los suelos

Divisiones mayores			Símbolo del grupo	Nombre del grupo
Suelos granulares gruesos más del 50% retenido en el tamiz n°200 (0.075 mm)	Grava > 50% de la fracción gruesa retenida en el tamiz n°4 (4.75 mm)	grava limpia menos del 5% pasa el tamiz n° 200	GW	grava bien graduada, grava fina a gruesa
			GP	grava pobremente graduada
		grava con más de 12% de finos pasantes del tamiz n° 200	GM	grava limosa
			GC	grava arcillosa
	Arena ≥ 50% de fracción gruesa que pasa el tamiz n°4	Arena limpia	SW	Arena bien graduada, arena fina a gruesa.
			SP	Arena pobremente graduada
		Arena con más de 12% de finos pasantes del tamiz n° 200	SM	Arena limosa
			SC	Arena arcillosa
Suelos de grano fino más del 50% pasa el tamiz No.200	Limos y arcillas límite líquido < 50	Inorgánico	ML	limo
			CL	arcilla
		orgánico	OL	Limo orgánico, arcilla orgánica
	Limos y arcillas límite líquido ≥ 50	inorgánico	MH	limo de alta plasticidad, limo elástico
			CH	Arcilla de alta plasticidad
		orgánico	OH	Arcilla orgánica, Limo orgánico
Suelos altamente orgánicos			Pt	turba

Fuente: (CALTRANS, 2010, pág. 1).

Los suelos también pueden ser clasificados como finos y gruesos, de acuerdo a la tabla 5, los suelos de grano de características finas (M y C) es decir corresponden aquellos que se conforman con al menos un 50% de limos y de arcilla; de acuerdo a la clasificación española de suelos, el que puede ser *Seleccionado* está dentro de los GW, GP, GM y en última instancia los GC, este último pertenece a los estipulados como *Adecuados* dentro de ellos los SW, SP, SM; los Tolerables son los SC, ML, CL, OL, MH y en menor escala los CH; este último en algunos casos ya entra a formar parte de los suelos Inadecuados, los cuales son los MH, CH, OH y por supuesto los Pt.

1.6.1.3 Compactación de suelos

Con el fin de proporcionar el máximo apoyo estructural (medido por MR, CBR o valor R), un suelo subgraduado debe ser compactado a una densidad adecuada, de no ser así, la subrasante continuará comprimiéndose, deformándose o erosionándose después de la construcción, causando grietas en el pavimento y deformación; por ello habitualmente se especifica una densidad relativa para la parte superior de 150 mm (6 pulgadas) de subrasante no inferior al 95% de la densidad máxima determinada en el laboratorio; es así como en las áreas de llenado, la subrasante bajo la parte superior de 150 mm (6 pulgadas) se considera a menudo adecuada si se compacta al 90 por ciento de densidad relativa; ahora bien para conseguir estas densidades, la subrasante debe estar cerca de su contenido óptimo de humedad (el contenido de humedad en el que puede alcanzarse la densidad máxima); por lo general, la compactación de in situ o de suelos de relleno resultará en un soporte estructural adecuado (Khan J. , 2015).

De otra parte, si el apoyo estructural ofrecido por la subrasante compactada in situ es o se estima que es inadecuado, hay tres opciones, se puede usar cualquiera o una combinación de las tres:

Estabilización

Las características de unión de estos materiales generalmente aumentan la capacidad de soporte de la capa de suelo; por lo general, la cal se utiliza con suelos altamente plásticos (índice de plasticidad superior a 10), el cemento se utiliza con menos suelos de plástico (índice de plasticidad inferior a 10) y el asfalto emulsionado se puede utilizar con suelos arenosos. Para los pavimentos flexibles, una primera capa no es efectiva en suelos de arcilla o arcilla porque el material no puede ser absorbido en un suelo tan fino (TRB, 2000).

Sobre excavación

El principio general es reemplazar la mala superficie in situ deficiente por la carga con un mejor relleno de carga; se pueden excavar entre 0,3 - 0,6 m (1 - 2 pies) de suelos pobres y reemplazarlos con un mejor relleno de carga tal como un préstamo de grava; una base ofrece una capacidad de carga adicional, con los nuevos diseños estructurales del pavimento se usa a menudo algún tipo de agregado básico granular a menos que el soporte estructural de la subrasante sea extremadamente bueno y las cargas esperadas sean extremadamente bajas; los agregados de base se someten a los mismos requisitos de compactación y elevación que los suelos.

Elevación de suelos

Después de la clasificación fina, la elevación de la subred debe generalmente ajustarse estrechamente a la elevación de la subrasante dentro del plan de construcción, pero las grandes diferencias de elevación no deben ser compensadas por la variación del pavimento o grosor de la base porque se afecta la calidad del pavimento y se aumentan los costos de construcción (Khan J. , 2015).

1.6.1.4 Agregado fino

Dentro del proceso de estabilización de los suelos un procedimiento usado es la inclusión de agregados los cuales pueden ser finos; se llama agregado fino a la porción del agregado comprendida entre los tamices No. 4 y N 200; de acuerdo a lo consignado en la normativa que contiene las especificaciones expedidas por el INVIAS bajo el Artículo 450-7 se tiene que:

Deberá proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o de grava natural, o parcialmente de fuentes naturales de arena. La proporción de arena natural no podrá exceder del quince por ciento (15%) de la masa total del agregado combinado, cuando el tránsito de diseño sea superior a cinco millones ($> 5 \cdot 10^6$) de ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño, ni exceder de veinticinco por ciento (25%) para tránsitos de menor intensidad. En todo caso, la proporción de agregado fino no triturado no podrá exceder la del agregado fino triturado. (p.2).

Para elaborar los cálculos del agregado fino se parte de considerar la partícula de características livianas en el agregado, para lo cual de acuerdo con (INVIAS, 2013) se usa la ecuación 1:

Ecuación 1. Cálculos agregado fino

$$L = \frac{M_1}{M_2} \times 100$$

En donde:

L = % en masa de partículas livianas

M_1 = corresponde a las partículas que quedan en el colador de masa seca

M_2 = Masa seca de la muestra que queda en el tamiz (300 μ m) (No. 50) (p.105)

1.6.1.5 Agregados pétreos

El agregado pétreo es básicamente material sólido de características inertes y de tipo granular, usados en los firmes dentro de la construcción de las carreteras, pueden ser adicionados elementos que sean activos, siempre y cuando se cumplan los parámetros estandarizados en cuanto a granulometría; su aplicación se concentra en preparados artificiales a los cuales se les confiere resistencia cuando se les incluyen aglomerantes que son de activación hidráulica, es el caso del cemento y de la cal, también se pueden usar ligante de tipo asfáltico, funcionan como favorecedores del rozamiento de acuerdo a los demás componentes de los agregados, pueden provenir de rocas calizas, silíceas, ígneas o metamórficas (Padilla, 2013). Los tipos existentes se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Tipos de Agregados Pétreos

Tipo	Son
Natural	modificados en el tamaño según el uso final
Trituración	tritutados de roca, granulometría rechazada de los naturales, material de cantera
Artificial	productos de desecho de actividad industrial, reciclados
Marginal	los que no cumplen especificaciones actuales

Fuente: Elaborado a partir de datos de (Padilla, 2013) (p. 5)

La selección de la forma y los ángulos de estos agregados, influye significativamente en la resistencia que va a presentar el pavimento ante el desgaste, con lo cual se establece la resistencia mecánica; también favorecen la forma que adopte el pavimento en la medida que este agregado presente alta resistencia ante el pulimento, otro factor característico importante se establece con la capacidad de generar adhesividad y con ello se ofrece resistencia ante el desplazamiento (Padilla, 2013).

Dentro del estudio, ensayo y selección de los agregados para establecer las mezclas a usar, un elemento de relevancia son los valores que pauta la granulometría, debido a que esta es la distribución porcentual en masa, de las partículas de acuerdo a su tamaño, lo cual se obtiene mediante la ejecución de ensayos de tamices, para lo cual una de las especificaciones técnicas la establece la norma ASTM C136; las especificaciones de límites y rangos de gradación son normalmente expresados como el porcentaje de material que pasa en cada tamiz en una serie; ahora bien con una buena granulometría se puede llegar a obtener un óptimo acomodo de las partículas durante la vibración de la mezcla y de esta manera se puede lograr un buen material granular con buenas propiedades mecánicas para la construcción de mezclas de concreto (INVIAS, 2013).

Lo cual significa que unos de los parámetros importantes para una buena dosificación del concreto son la granulometría y el tamaño máximo de los agregados, ya que estos tienen una gran influencia en la dosificación, trabajabilidad, economía, porosidad y contracción; asimismo el complemento del análisis granulométrico de los agregados es el módulo de finura, el cual se muestra como un indicativo del grosor del

agregado, se lo calcula dividiendo la suma de los porcentajes retenidos acumulados en la serie de Tyler, para cien; para el caso del agregado fino que vaya a ser utilizado en la fabricación del concreto, las normas ASTM dan un rango del módulo de finura que debe variar entre 2,3 y 3,1; de otra parte el tamaño máximo del agregado grueso es la abertura del tamiz inmediatamente superior al que retiene el 15% o más según la norma ASTM; también considera, como el tamiz que retiene hasta el 10%, de los dos se debería considerar el mayor (INVIAS, 2013).

1.6.1.6 Material fino (pasa el tamiz # 200)

En una mezcla de concreto hay que tomar en cuenta que la presencia de limos y arcillas es perjudicial debido a los efectos negativos, tales como el incremento de agua de mezcla y los cambios volumétricos, siendo aún más perjudicial la arcilla por su alta plasticidad; según la norma ASTM C 33, se establece que el material que pasa el tamiz # 200 debe ser del 3 % para concretos sometidos a abrasión y 5 % para concretos de otro tipo, como máximo para agregados finos; y en el caso, que el material fino que pasa el tamiz #200, no sea natural, sino obtenido por trituración de la piedra, los valores especificados pueden aumentarse en un 2%, es decir, hasta un 5% y 7% respectivamente. Para el caso de agregado grueso, la misma norma establece como porcentaje máximo el 1% para todo tipo de hormigón.

1.6.1.7 Gravedad Específica del agregado

La gravedad específica de un agregado se define como la relación entre su masa y la masa de un volumen igual de agua; estos valores de gravedad específica varían

entre 2,4 y 2,9; las normas utilizadas para realizar estos ensayos son: la norma ASTM C128 para el agregado fino y ASTM C127 para el agregado grueso.

1.6.1.8 Absorción

Los agregados por su estructura interna son capaces de absorber agua, es decir que la absorción es la cantidad de agua en porcentaje que el agregado puede asimilar para llegar al estado saturado con superficie seca; los agregados tienen esta propiedad por su estructura interna y externa, la cual es capaz de albergar líquidos dentro de sus poros permeables; para obtener el grado de absorción, se sumerge la muestra en agua por un lapso de 24 horas, siguiendo la norma ASTM C127 y C128 para agregado grueso y fino respectivamente; en el proceso deben tenerse en cuenta las propiedades mecánicas del suelo, lo cual se presenta en la tabla 7.

Tabla 7. Propiedades mecánicas del suelo

Propiedad	Descripción
Permeabilidad	favorece la circulación del agua, sucede de acuerdo a la viscosidad, ubicación y tamaño de los poros, granulometría, relación de vacío, rugosidad de la partícula de composición mineral y la saturación existente en el suelo
Consolidación	sucede por aumento en el esfuerzo debido a la cimentación, lo cual genera compresión

Fuente: Elaborado a partir de datos de (Mata, 2010) (p. 38-55)

1.6.1.9 Propiedades Mecánicas del Suelo

Dentro de las propiedades mecánicas del suelo se encuentra la **permeabilidad**, lo cual se traduce en la capacidad de un suelo determinado para facilitar el movimiento del agua, esto se relaciona con el grado viscoso que presenta el agua, la ubicación y

el tamaño de las zonas porosas, la distribución en términos granulométricos, también cuentan los espacios de vacío junto con qué tan rugosas están las partículas de los diversos minerales y por supuesto el factor de saturación que presenta el suelo; la **consolidación** es la propiedad mecánica que denota el aumento en el esfuerzo como respuesta al proceso de cimentación y también de otro tipo de cargas que van a generar una compresión en los diversos estratos del suelo; ahora bien el comportamiento de estas propiedades mecánicas varía ostensiblemente según el tipo de suelo (Mata, 2010), cuya clasificación fue presentada en la tabla 9. Algunos de los datos que pueden denotar el índice de permeabilidad de un suelo están orientados en la tabla 8.

Tabla 8. Coeficiente de permeabilidad (CTE)

Tipo de suelo	k_z (m/s)
Grava limpia	$> 10^{-2}$
Arena limpia y mezcla de grava y arena limpia	$10^{-2} - 10^{-5}$
Arena fina, limo, mezclas de arenas, limos y arcillas	$10^{-5} - 10^{-9}$
Arcilla	$< 10^{-9}$

Fuente: tomado de (Pérez, 2016, pág. 23)

1.6.2 Las Fibras y su uso en la Construcción

En los registros antiguos de construcción se menciona la aplicación de fibras en procesos constructivos con lo cual se fortaleció el material de base; estos referentes ubican el uso de fibras tanto en el pueblo de Egipto como en las construcciones realizadas por las civilizaciones asentadas en las regiones latinoamericanas, de los cuales se reconoce el uso de fibras de paja para dar fortaleza tanto al ladrillo como a las paredes que se construyeron con base de adobe; en este mismo sentido en Roma

se usó la cerda proveniente del caballo con el fin de elaborar, entre otras cosas el mortero (Rivera & Sosa, 2010).

Hacia la época considerada entre 1800 y 1900 se empezó a usar la fibra de asbesto, la cual continua con su aplicabilidad, pero los diversos estudios en el área de salud han demostrado la asociación de su uso a la presencia de cáncer, este hecho motiva la búsqueda de otras fibras que confieran características mejoradas a las mezclas, que no atenten contra la salud del ser humano y que además funcionen sin lesionar el medio ambiente; por lo anterior existen diversos tipos que pueden ser empleados (Rivera & Sosa, 2010), a saber:

Fibras naturales: a pesar de encontrar ensayos que denotan sus bondades no solo en las características que confiere, sino que además representan un costo mínimo para los eventos constructivos, están limitadas para ser aplicadas debido al tema conservacionista del ambiente.

Fibras metálicas: en las décadas comprendidas dentro de los años 1950 a 1960, fueron introducidas, las cuales demuestran un buen comportamiento mecánico en materiales como el hormigón, pero el uso tiene limitaciones debido a la permisibilidad del material ante la entrada de agentes nocivos para la salud y que terminan generando eventos corrosivos, lo cual limita la durabilidad.

Fibras sintéticas: en diversas áreas del saber se han realizado estudios de tipo tecnológicos con el fin de establecer selección de fibras, longitudes, materiales, posibles combinaciones, características, bondades y demás actividades investigativas para dar aplicabilidad de estas fibras en diversas áreas; dentro de estas las más estudiadas son las que se conservan en longitudes de 0,5 a 6 cm, definidas dentro de

las acrílicas, de carbono, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno, también se denominan fibra química o fibra artificial (Rivera & Sosa, 2010).

En el mismo sentido y de acuerdo con lo expuesto por Rojas (2015), una forma más específica de caracterizar las fibras de origen natural o vegetal se da en la medida en la que se observa el origen, es así como suelen provenir de la semilla, de la raíz, del tallo, de la hoja, del fruto y mediante procesos artesanales, semi industriales e industriales se obtienen las fibras; ahora bien, las más utilizadas se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Algunas fibras naturales según el origen

Semilla	Raíz	Tallo	Hoja	Flor	Fruto
Algodón	Konjac	Banana	Abacá	Bromelia	Coco
Lino		Kenaf	Cabuya		
Bambú		Yute	Esparto		
Coco		Linum	Cáñamo		
Ramio					

Fuente: Elaboración de los autores a partir de datos de (Rojas, 2015, p. 10)

La extensión de su uso en varias industrias radica en las propiedades que se les atribuyen, dentro de estas la elasticidad, poseen mínimo peso y también son de bajo precio, una de las características más valoradas en su capacidad biodegradable y no abrasiva, las propiedades son conferidas, en gran medida por los compuestos químicos hallados, los cuales se presentan en la tabla 5. (Rojas, 2015).

1.6.2.1 Fibra de fique

En cuanto a la fibra natural (vegetal) de fique, la cual es objeto de uso en este trabajo, debe establecerse su origen en las regiones tropicales americanas, en el país su cultivo se extiende en la zona andina, cuya clasificación taxonómica se define así:

Reino: Vegetal; División: Sphermatophyta; Clase: Angiospermae; Orden: Liliales; Familia: Agavaceae; Género: Furcraea; Especie: Furcraea macrophylla, son usadas más de veinte de sus especies para obtener de las hojas las fibras denominadas fique, de las cuales también emerge la cabuya, son utilizadas en procesos constructivos a manera de refuerzo para los materiales con los que son mezcladas estas fibras, las cuales de forma más sencilla también tienen aplicabilidad en la disminución de los eventos erosivos que suelen suceder a lo largo de las diferentes carreteras, los componentes químicos se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Componentes químicos de la fibra de fique

Cenizas	2.60%
Fibras	1.58%
Pentosas	17.65%
Lignina	12.00%
Celulosa	62.70%

Fuente: (Pinzón, 2013, p. 29)

Para el caso del trabajo desarrollado por Rojas (2015) se consideró lo expuesto por el subgrupo de fibras de la Secretaria Técnica del Comité de Concreto del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) tomando una longitud de 6cm y teniendo como punto de partida lo aplicado en el ámbito internacional, en donde el fique es considerado una macrofibra por lo cual el rango de longitudes varía entre los 13 mm y 70 mm con equilibrios que van de los 9 hasta los 18 kg/m³; en el trabajo aplico cuatro valores porcentuales para la inclusión del fique, así: 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0% en relación al peso del agregado fino.

Asimismo, se debe considerar que la fibra de fique ha sido caracterizada mecánicamente mediante ensayos de tensión (Pinzón, 2013) igualmente el análisis del comportamiento de sus propiedades mecánicas durante su procesamiento ha entregado resultados importantes demostrando que la fibra de fique presenta buenas propiedades mecánicas, lo cual se presenta en la tabla 11 (Pinzón, 2013):

Tabla 11. Propiedades mecánicas de la fibra de fique

Propiedad	Promedio	Mínimo	Máximo
Resistencia a la Tensión (MPa)	305,15	200	625,2
Módulo de Elasticidad (GPa)	7,52	5,5	25,5
Porcentaje de elongación a la fractura (%)	4,96	3,2	5,7

Fuente: (Pinzón, 2013, p. 29)

A pesar de que estas fibras presentan una alta resistencia a la tensión y que es un material elástico por naturaleza, hasta el momento no se ha estudiado la adición de este material en suelos finos con el fin de determinar el mejoramiento de las propiedades mecánicas de estos suelos; por ello la falta de estudios experimentales en laboratorio, o la falta de divulgación de experiencias adquiridas con estos materiales, está generando desconocimiento de aplicación de este material para la construcción de obras viales, en sectores donde abundan estos materiales, en la figura 2 se muestra la planta de fique y su fibra.

Figura 2. Planta y fibras de Fique



Fuente: (Hidalgo, 2014, pág. 34)

Las características de la fibra de fique se establecen a partir de los diámetros, las densidades, la absorción de agua, el contenido de agua, el esfuerzo de tensión de la fibra, la capacidad de elongación y el módulo de elasticidad; en este proceso se encuentra que los diámetros que obtienen las fibras son de gran variación, estas características se presentan en la figura 3; de otra parte los componentes químicos de la hoja de fique consideran la fibra así como el jugo que posee la hoja y el bagazo resultante, lo cual se presenta en la figura 4; cabe anotar que en cuanto a temperatura la fibra soporta un máximo de 220°C, esto sin presentar deterioro (Hidalgo, 2014).

Figura 3. Características de la fibra de fique

Característica	Fique	Media
Diámetro equivalente (mm)	0.16-0.42	0.24
Densidad Aparente (gr/cm ³)	0.72	---
Densidad Específica (gr/cm ³)	1.47	---
Absorción de agua (%)	60.00	
Agua (%)	12.00	---
Esfuerzo de tensión último (MPa)	43.00-71.00	132.40
Elongación última (%)	9.80	
Módulo de elasticidad (GPa)	8.20-9.10	---

Fuente: tomado de (Hidalgo, 2014, pág. 35)

Figura 4. Componentes químicos de la hoja de fique

Fibra		Jugo	Bagazo	
Cenizas	0.70 %	Clorofila	Cenizas	12.20 %
Celulosa	73.80 %	Carotenoides	E.E.	3.64 %
Resinas, ceras y grasas	1.90 %	Saponinas	Proteína	9.84 %
		Azúcares	Elementos Nitrogenados	71.29 %
Lignina	11.30 %	Resinas	Calcio	21.65 %
Pentosanos	10.50 %	Flavonoides	Fósforo	0.09 %
		Ácidos orgánicos	Magnesio	0.2 %
TOTAL	98.20 %	Alquitranes	Fósforo	1.81 %
		Agua	Sodio	0.04 %
		Lignina	Cobre	14 ppm
		Calcio	Hierro	647.00 ppm
		Lipoides	Manganeso	33.00 ppm
		Fósforo	Zinc	17.00 ppm

Fuente: (Hidalgo, 2014, pág. 35)

Lo anterior, está directamente relacionado con el manejo eficiente de los recursos con que cuentan el Departamento y los Municipios para la adecuación de la red de carreteras a su cargo y la necesidad de que en las vías se vayan fortaleciendo la

estructura de la red Nacional, Departamental y Municipal promoviendo la integración, favoreciendo las regiones y reduciendo los costos de transporte de los productos agrícolas hacia los centros de consumo; lo anterior, evidentemente llevará a muchas administraciones territoriales a considerar la pavimentación de aquellos tramos de carretera que se muestren más prometedores para sus regiones, desde los puntos de vista económico, social, político y estratégico para lo cual las tecnologías de materiales amigables y/o ecológicos adquieren cada vez mayor importancia y aceptación.

Teniendo en cuenta lo expresado, corresponde al profesional encargado de diseñar, construir y conservar pavimentos la búsqueda de la información necesaria de los materiales que se encuentran en la región, con lo cual se tiene una mayor precisión en el control de la calidad, así como de las tecnologías y nuevas alternativas para optimizar sus características y sus propiedades mecánicas; en esta medida este estudio permite la utilización de diversas herramientas que ayuden a determinar la aplicabilidad tecnológica y la capacidad técnica que implica la adición de residuos de fibras vegetales a los suelos finos para mejorar sus propiedades mecánicas, así como los costos, beneficios y el grado de aceptación que la propuesta que genera en la actividad ingenieril.

1.7 MARCO LEGAL

Dentro del marco legal a ser estimado en el proceso de la investigación se consideran, de una parte, las expuestas dentro de las Normas y especificaciones Invias 2017, que describen el contenido de las pruebas a realizar; expuestas en la tabla 12.

Tabla 12. Normas INVIAS 2017

Norma	Definición
INV E 213-07	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos
INV E 125-13	Determinación del límite líquido de los suelos
INV E 126-13	Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos
INV E 152-13	Compresión inconfiada en muestras de suelos

Fuente: Elaborado a partir de datos de (INVIAS, 2013)

Respecto a las normas ASTM, se consideran, las expuestas en la tabla 13.

Tabla 13. Normas ASTM

Norma	Descripción
ASTM C 39	Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens
ASTM C 192/C 192M-02	Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory
ASTM C117-03	Standard test method for materials finer than 75µm (Nº 200) sieve in mineral aggregates by washing
ASTM C 29/C 29M-97	Standard test method for bulk density (unit weight) and voids in aggregate

Fuente: elaborado a partir de la Norma ASTM

1.8 METODOLOGIA

Este segmento se explica desde dos perspectivas, de un lado desde la perspectiva de metodología de la investigación, este trabajo responde a la investigación aplicada, se enmarca en un enfoque cuantitativo y en el diseño experimental (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010), en tanto se realiza manipulación de variables al adicionar fibras de fique en porcentajes (0,5; 1,0; 1,5 y 2,0) y se miden esas variables con el propósito de responder a la pregunta de investigación y así cumplir los objetivos de la presente investigación, también de esta forma se somete la hipótesis a prueba; de otra parte, la metodología entendida como la secuencia de acciones a seguir para

dar cumplimiento a los objetivos planteados, en donde se requiere obtener el mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante la adición de residuos provenientes de fibras vegetales, se organiza de acuerdo a las pruebas a realizar: primero el análisis granulométrico de agregados gruesos y finos; el segundo paso es la determinación del límite líquido de los suelos; luego se establece el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos y finalmente se realiza la compresión de las muestras de suelos y con la adición de las fibras a los porcentajes descritos.

1.8.1 TIPO DE INVESTIGACION

El tipo de investigación es experimental; esto significa que se hace manipulación de una variable experimental no comprobada (comportamiento de la fibra de fique para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos finos) (Tamayo, 2003); lo cual sucede en condiciones controladas y respondiendo a los ensayos específicos que guía la normatividad seleccionada al respecto, de esta forma se construyen las probetas con agregados de fibra natural en cantidades pre establecidas, se sigue el procedimiento normativo de secado para después ser aplicadas las pruebas seleccionadas y de esta manera presentar la secuencia de resultados hallados.

1.8.2 HIPÓTESIS

Teniendo en cuenta que la hipótesis busca encontrar la respuesta al problema planteado, en donde se requiere confirmar o anular la conjetura (Tamayo, 2003), generada a rededor de lograr una mejora significativa en las propiedades mecánicas que en la actualidad presentan los suelos finos realizando un agregado de fibras naturales, en la cantidad suficiente para lograr el cometido, la hipótesis lógica planteada es:

Si se adicionan residuos provenientes de fibras vegetales a suelos finos es viable el mejoramiento de las propiedades mecánicas de estos suelos.

1.8.3 VARIABLES

Las variables a ser consideradas dentro del estudio se dividen en independientes y dependientes; las cuales se disponen de tal forma que puedan ser medidas, esto teniendo en cuenta la escala de medición que ofrecen los lineamientos del INVIAS para este tipo de ensayos.

1.8.3.1 Variables Independientes

Dentro del proceso de investigación una variable independiente, establece la pauta, genera la condición que permite revisar la variable dependiente (Tamayo, 2003); en este caso los parámetros de las variables independientes del estudio son los lineamientos específicos que establecen las normas INVIAS para valorar la presencia de las propiedades mecánicas en estos ensayos; las variables según la norma se presentan en la tabla 14.

Tabla 14. Variables Independientes

Norma	Definición
INV E 213-07	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos
INV E 125-13	Determinación del límite líquido de los suelos
INV E 126-13	Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos
INV E 152-13	Compresión inconfina da en muestras de suelos

Fuente: Los Autores

1.8.3.2 Variables Dependientes

En esta variable se centra el interés del estudio, es dependiente de los porcentajes de agregación que se requieran hasta llegar a la obtención de los resultados

requeridos, por lo cual es susceptible de ser manipulada mediante valores específicos y de esta forma ser explicada en relación con los resultados que se obtengan, los porcentajes de fibra a ser usados, así como el suelo fino objeto de estudio se presentan en la tabla 15.

Tabla 15. Variable Dependiente

Variable	Descripción
Fibra de fique	Selección de tamaño y porcentaje de inclusión en la mezcla
Suelo fino	material encontrado de la subrasante que es el material de corte que se realiza al hacer excavaciones en la vía

Fuente: Los Autores

1.8.4 PRUEBAS A REALIZAR

Con el fin de hacer un proceso metódicamente científico, se describen las pruebas a realizar, las cuales proporcionan los datos cuantitativos para ser analizados y contrastados con las normativas vigentes en el tema, en este sentido el enfoque cuantitativo proporciona información resultante de forma confiable para dar respuesta al problema planteado y a la hipótesis construida; su proceso se centra en ofrecer resultados de acuerdo a mediciones precisas, la mayoría numéricas, establecidas de forma explícita en las normas referentes, por lo cual el análisis estadístico con la aplicación descriptiva tiene base en las pruebas normalizadas.

INV E 213-07: Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos: con su aplicación se determina desde el punto de vista cuantitativo, la forma como se distribuyen las partículas que componen los agregados tanto gruesos como finos, lo

cual se logra a través de las mediciones realizadas con diferentes tamices; por lo expuesto los equipos requeridos son de una parte una balanza, la cual debe estar calibrada de tal forma que exprese una sensibilidad mínima del 0,1% de otra parte se requieren los diferentes tamices, de requerirse se incluye la tamizadora mecánica para muestras con un peso mayor a 20kg y horno.

En cuanto a las muestras para el agregado fino en particular, se estipula que una vez secas la masa mínima debe ser de 300gm, los gruesos, así como los que contienen tanto gruesos como finos, se rigen por los lineamientos se expresan en la figura 5.

Figura 5. Estipulación de tamaño y masa para agregado

Máximo tamaño nominal con aberturas cuadradas		Masa mínima de la muestra de ensayo
mm	(Pulg.)	kg
9.5	(3/8)	1
12.5	(1/2)	2
19.0	(3/4)	5
25.0	(1)	10
37.5	(1 1/2)	15
50.0	(2)	20
63.0	(2 1/2)	35
75.0	(3)	60
90.0	(3 1/2)	100
100.0	(4)	150
125.0	(5)	300

Fuente: (INVIAS, INV E 213-07, pág. 3)

Para elaborar los ensayos la muestra requerida corresponde a “un tamaño máximo nominal mayor o igual a 50mm”; cuando la medición se dirige al material fino es decir que pasa el tamiz de 75µm o N°200 debe tenerse en cuenta: se debe realizar primero

el ensayo expresado en la norma INV E 214 hasta el proceso de secado después se procede a usar el tamiz; el procedimiento entonces se dirige, después del secado según los lineamientos a realizar el proceso de tamiz usándolos en orden decreciente, ubicando la muestra en el superior y se realiza el proceso; ahora se debe tener presente que las retenciones en “aberturas menores de 4.75mm o N°4, al terminar no debe ser mayor a 7kg/m²”, en términos generales, la cantidad retenida máxima admitida en un tamiz en kg se expresa en la figura 6.

Figura 6. Material retenido en el tamiz (máximo admitido en kg)

Tamaños de la abertura del tamiz, mm	Dimensiones de tamiz				
	203.2 mm diámetro	254 mm diámetro	304.8 mm diámetro	350 x 350 mm	372 x 580 mm
	Área de tamizado, m ²				
	0.0285	0.0457	0.0670	0.1225	0.2158
125	a	a	a	a	67.4
100	a	a	a	30.6	53.9
90	a	a	15.1	27.6	48.5
75	a	8.6	12.6	23	40.5
63	a	7.2	10.6	19.3	34
50	3.6	5.7	8.4	15.3	27
37.5	2.7	4.3	6.3	11.5	20.2
25	1.8	2.9	4.2	7.7	13.5
19	1.4	2.2	3.2	5.8	10.2
12.5	0.89	1.4	2.1	3.8	6.7
9.5	0.67	1.1	1.6	2.9	5.1
4.75	0.33	0.54	0.8	1.5	2.6

a. Esto indica que los tamices tienen menos de 5 aberturas completas y no deberían ser usados en la prueba

Fuente: (INVIAS, INV E 213-07, pág. 5)

Quando se requiere la reducción en cantidad del agregado más fino que el encontrado con el tamiz 4.75mm o N°4, debe calcularse la masa por fracción en relación a la muestra completa, para ello se requiere aplicar la ecuación 2:

Ecuación 2. Cálculo de la masa por fracción

$$A = \frac{M_1}{M_2} \times B$$

Donde:

A=masa de la fracción en cada tamiz, respecto de la totalidad de la muestra

M₁=masa de la muestra total que pasa el tamiz 4.75mm o N°4

M₂=masa de la porción reducida ensayada de la materia que pasa el tamiz 4.75mm
o N°4

B=masa de la fracción reducida en cada tamiz tamizada

Los calculos deben considerar los siguientes porcentajes: el que pasa, el retenido, el de las fracciones que responden a diferentes tamaños, “con una aproximacion de 0,1% teniendo como base el dato de la muestra inicial seca”; por esto el informe debe mostrar los porcentajes estipulados; la precision se presenta en la figura 7, estos datos se fundamentan en los referentes usados en la normativa: AASHTO (Materials Reference Laboratory Proficiency Samples Program), en los propios de la norma INV 213-07, el metodo T-27 de AASHTO y ASTM C-136.

En cuanto a los valores dados en la precision para el agregado fino se presentan en la figura 8, los cuales surgen a partir de muestras de 300g, tambien consigna los datos de precision para las muestras tanto de 300g como de 500g.

Figura 7. Datos de precisión

	Porcentaje Total de Material Pasante			Desviación Estándar (1s), %	Variación aceptable de 2 resultados (D2s), %
Agregado Grueso*					
Un solo operador Repetibilidad	0	a	2	0.27	0.8
	2	a	5	0.53	1.5
	5	a	10	0.75	2.1
	10	a	15	1.00	2.8
	15	a	20	0.95	2.7
	20	a	60	1.32	3.7
	60	a	80	2.25	6.4
	80	a	85	1.34	3.8
	85	a	95	0.81	2.3
	95	a	100	0.32	0.9
Múltiples laboratorios Reproducibilidad	0	a	2	0.45	1.3
	2	a	5	1.04	3.0
	5	a	10	1.22	3.4
	10	a	15	1.48	4.2
	15	a	20	1.60	4.5
	20	a	60	1.97	5.6
	60	a	80	2.82	8.0
	80	a	85	1.92	5.4
	85	a	95	1.37	3.9
	95	a	100	0.35	1.0
Agregado Fino					
Un solo operador Repetibilidad	0	a	2	0.14	0.4
	2	a	10	0.37	1.1
	10	a	15	0.36	1.0
	15	a	20	0.54	1.5
	20	a	60	0.83	2.4
	60	a	95	0.55	1.6
	95	a	100	0.26	0.7
Múltiples laboratorios Reproducibilidad	0	a	2	0.31	0.9
	2	a	10	0.65	1.8
	10	a	15	0.73	2.1
	15	a	20	1.10	3.1
	20	a	60	1.41	4.0
	60	a	95	0.77	2.2
	95	a	100	0.23	0.6

* Los cálculos de precisión están basados en agregados con tamaño máximo nominal de 19 mm.

Fuente: (INVIAS, INV E 213-07, pág. 8)

Figura 8. Precisión en muestras de 300g y 500g

Agregado Fino de Referencia				Dentro del laboratorio		Entre laboratorios	
	Tamaño muestra	Número de laboratorios	Promedio	1s	D2s	1s	D2s
Total material pasante tamiz No.4 (%)	500	285	99.992	0.027	0.066	0.037	0.104
	300	276	99.99	0.021	0.06	0.042	0.117
Total material pasante tamiz No.8 (%)	500	281	84.1	0.43	1.21	0.63	1.76
	300	274	84.32	0.39	1.09	0.69	1.92
Total material pasante tamiz No.16 (%)	500	286	70.11	0.53	1.49	0.75	2.1
	300	272	70	0.62	1.74	0.76	2.12
Total material pasante tamiz No.30 (%)	500	287	48.54	0.75	2.1	1.33	3.73
	300	276	48.44	0.87	2.44	1.36	3.79
Total material pasante tamiz No.50 (%)	500	286	13.52	0.42	1.17	0.98	2.73
	300	275	13.51	0.45	1.25	0.99	2.76
Total material pasante tamiz No.100 (%)	500	287	2.55	0.15	0.42	0.37	1.03
	300	270	2.52	0.18	0.52	0.32	0.89
Total material pasante tamiz No.200 (%)	500	278	1.32	0.11	0.32	0.31	0.85
	300	266	1.3	0.14	0.39	0.31	0.85

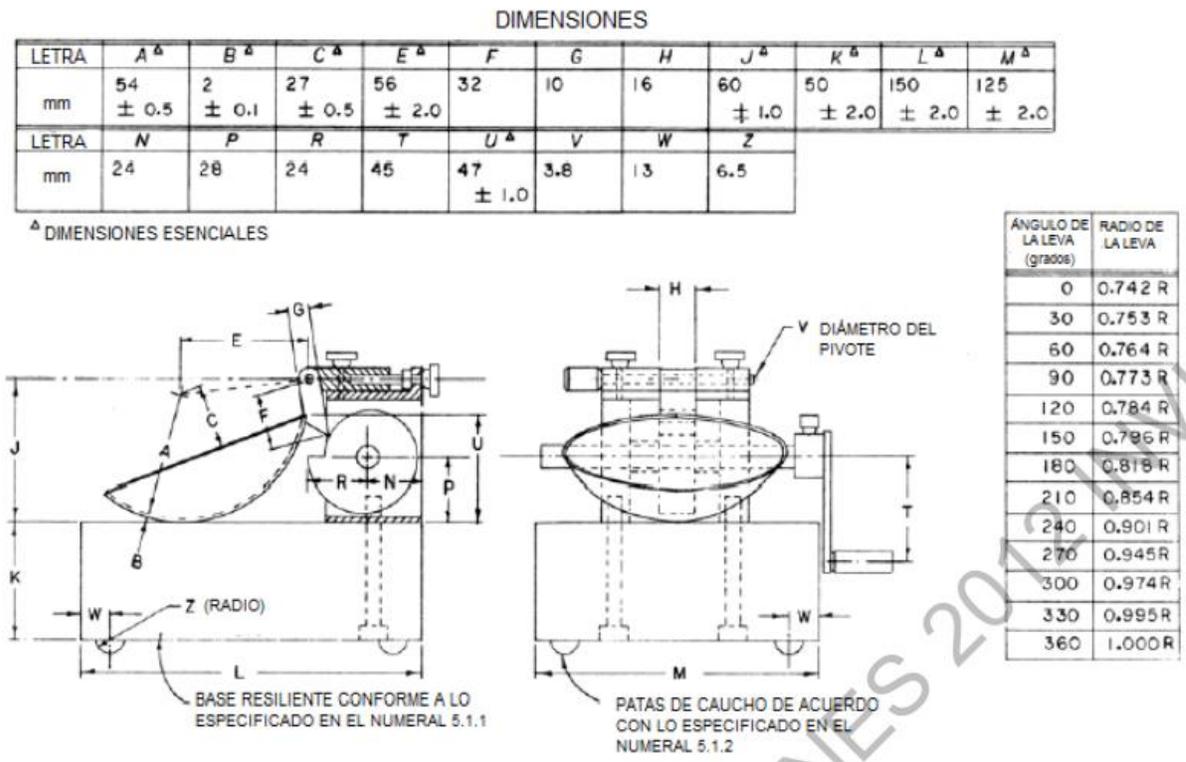
Fuente: (INVIAS, INV E 213-07, pág. 9)

INV E 125-13: Determinación del límite líquido de los suelos: con esta norma se determinan tanto los límites líquidos como los límites de consistencia; en primera instancia las muestras se pueden fallar por vía seca o vía húmeda, además los ensayos pueden ser realizados con el método multipunto o de un único punto, este ensayo de determinación del límite líquido (LL, W_L) se aplica a la muestra que pasa el tamiz 425 μ m o N°40, y busca establecer cuanta humedad contiene la muestra, en el proceso se aplican los enunciados de Albert Atterberg; en cuanto a la consistencia se evalúa la capacidad de deformación que presenta la muestra.

Establecer el límite líquido de la muestra de suelo es fundamental en la caracterización de los suelos finos, este dato permite visualizar junto con otras caracterizaciones el comportamiento que tendrá ante posibles construcciones, por ello esta información aunada al “índice de plasticidad y el porcentaje de las partículas

menores a $2\mu\text{m}$, dan a conocer la actividad respecto a la fracción fina de un suelo”; de acuerdo a la norma se emplea el aparato del límite líquido, el cual se presenta en la figura 9, además se emplea la base, patas de caucho, la cazuela o copa, leva y soporte; el proceso puede efectuarse mediante el accionamiento por motor, se usa un ranurador, un calibrador, los recipientes que sirven para la determinación de humedad, la balanza, el recipiente para mezclar y almacenar, espátula, horno y agua.

Figura 9. Aparato del límite de líquido



Fuente: (INV E 125-13, pág. 210)

Una vez dispuesto lo anterior, se procede con el proceso de muestreo y también de la elaboración de la muestra de ensayo, es decir un peso dado entre 150g a 200g el cual debe pasar el tamiz de $425\mu\text{m}$ N°40; en el momento inicial debe verificarse la

calibración del equipo como lo señala la norma, luego decidir si hará el proceso por vía húmeda o seca; en todo caso se aconseja dentro de los lineamientos que los ensayos sean realizados con multipuntos, con lo cual se logran resultados que dan mayor fiabilidad, los cálculos para este proceso se presentan en la ecuación 3:

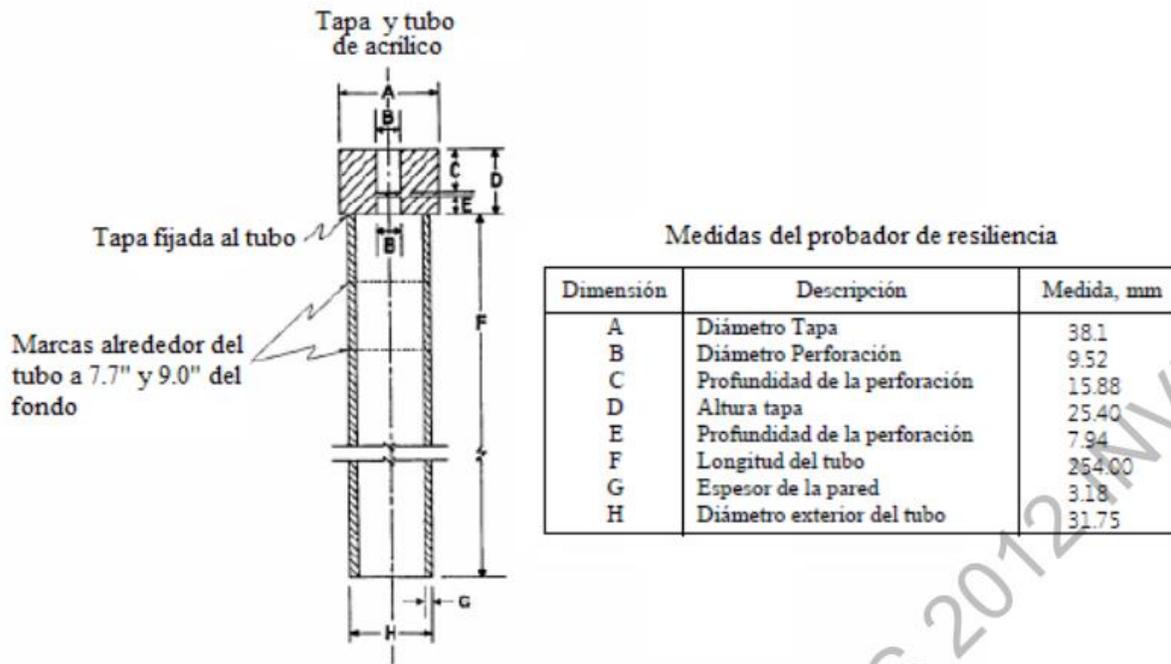
Ecuación 3. Cálculos para el contenido de agua

$$\text{Contenido de agua} = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa del suelo secado al horno}} \times 100$$

Luego de esto se debe realizar la curva de fluidez, con lo cual se hace una representación que permite visualizar la relación existente entre el contenido de humedad y el número de golpes efectuado en la cazuela; de acuerdo a esto “el contenido de agua correspondiente a la intersección de la curva de fluidez con la abscisa de 25 golpes se toma como límite líquido del suelo y se redondea al número entero más cercano” (INV E 125-13, pág. 223). En caso de hacer la determinación del límite líquido con solo un punto de ensayo, debe seguirse el procedimiento descrito en la norma, así como la aplicación de cálculos a partir de las dos fórmulas señaladas, aplicando en los datos resultantes la tabla de número de golpes por factor para establecer el límite líquido. Una vez realizado uno u otro proceso de determinación se debe realizar la prueba de residencia de la base del equipo de límite líquido, lo cual se realiza con el equipo que se presenta en la figura 10; se realiza conservando la temperatura a la que se encuentra el ambiente, para el registro de datos se usan las marcas que aparecen en la escala, de esta forma se observa la ubicación más alta alcanzada en la parte inferior de la bola al rebotar, cuya repetición debe darse al menos

tres veces, en cada caída debe ubicarse el probador en diferente posición con lo cual se obtiene el promedio del rebote de la bola, esto denota el porcentaje completo de la caída lo cual se convierte en el dato de resilecia.

Figura 10. Equipo para probar la resilecia



Fuente: (INV E 125-13, pág. 226)

INV E 126-13: Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos: con su aplicación se determina el límite plástico que posee el suelo objeto de estudio y con ello se establece el índice de plasticidad, en la norma se considera el suelo que pasa el tamiz 425 μ m o N°40, para la ejecución del ensayo se considera como consistencia la "facilidad relativa con la cual el suelo puede ser deformado", y el límite plástico (LP, w_p) como el contenido de agua que tiene el suelo, lo cual se manifiesta en porcentaje, al establecer el límite entre el estado plástico y el que es semisólido; de acuerdo a lo anterior el índice de plasticidad (IP) será el "rango de contenidos de agua,

dentro del cual el suelo asume un comportamiento plástico” desde lo cuantitativo es el resultado en la diferencia dada por el límite líquido menos el límite plástico.

El ensayo sucede a partir de la presión repetitiva realizada a una porción de suelo húmedo, el cual se ha configurado en rollos de 3.2mm en su diámetro, la repetición debe llegar al momento en el que la pérdida de agua se denote con el agrietamiento, de esta forma al obtener el dato respecto al punto de humedad más bajo en el que no se ha llegado al agrietamiento determina el límite plástico; seguido a esto se realiza el cálculo que lleva a determinar el índice de plasticidad con la resta entre el límite plástico y el líquido; con el resultado se favorece la “caracterización de la fracción fina del suelo.

Teniendo los datos del límite líquido, del límite plástico y del contenido de agua se logra establecer la consistencia relativa del suelo lo cual se expresa como el índice de liquidez, así mismo aunado al índice de plasticidad el porcentaje de las partículas menores de $2\mu\text{m}$, se logra establecer la actividad de la fracción fina del suelo, para lograr el ensayo se requieren los siguientes equipos y materiales: placa de vidrio esmerilado, equipo de enrollar, papel para el equipo de enrollar, espátula, capsula para la evaporación, balanza, capsulas determinantes de humedad, botella en plástico, horno, tamiz y agua; una vez se tengan dispuestos los requerimientos previos se realiza el procedimiento descrito en la norma INV E 126-13 en el punto 8 de procedimiento.

Los cálculos se realizan teniendo como base los tanteos del límite plástico, el valor resultante después de ser redondeado al entero más cercano es el (LP), después el índice de plasticidad se obtiene mediante la ecuación 4:

Ecuación 4. Cálculo para el índice de plasticidad

$$IP = LL - LP$$

En donde el LL corresponde al límite líquido expresado en número entero, y LP es el límite plástico, igualmente expresado en número entero; ahora bien, “si alguno de los límites considerados no se puede considerar o si el plástico se iguala o es mayor que el líquido, se expresa que el suelo es no plástico (NP)”, la guía para los resultados de los ensayos se presenta en la figura 11.

Figura 11. Resultados de ensayos sobre límites Atterberg

(1)	(2)			(3)			(4)			(5)		
TIPO DE SUELO	NÚMERO DE LABORATORIOS QUE HICIERON ENSAYOS POR TRIPLICADO			VALOR PROMEDIO ^A (PORCENTAJE DE PUNTOS)			DESVIACIÓN ESTÁNDAR ^B (PORCENTAJE DE PUNTOS)			RANGO ACEPTABLE ENTRE 2 RESULTADOS ^C (PORCENTAJE DE PUNTOS)		
Tipo de ensayo												
	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
Resultados de un solo operador (repetibilidad en el mismo laboratorio)												
CH	13	13	13	59.8	20.6	39.2	0.7	0.5	0.8	2	1	2
CL	14	13	13	33.4	19.9	13.6	0.3	0.4	0.5	1	1	1
ML	12	11	11	27.4	23.4 ^D	4.1 ^D	0.5	0.3	0.6	2	1	2
Resultados multi-laboratorio (reproducibilidad entre laboratorios)												
CH	13	13	13	59.8	20.6	39.2	1.3	2.0	2.5	4	6	7
CL	14	13	13	33.4	19.9	13.6	1.0	1.2	1.7	3	3	5
ML	12	11	11	27.4	23.4 ^D	4.1 ^D	1.3	0.9	1.9	4	3	5

^A El número de dígitos significativos y de cifras decimales que se presentan, representan los datos de entrada.

^B La desviación estándar se refiere al límite 1s.

^C El rango aceptable entre dos resultados se refiere al límite d2s. Este valor se calcula mediante el producto $1.960 \times \sqrt{2} \times 1s$ como se define en la práctica ASTM E 177. La diferencia entre los resultados de dos ensayos adecuadamente realizados no debe superar este límite.

^D Para el suelo ML, dos de los laboratorios reportaron el suelo como NP

Tabla 126 - 2. Resumen de resultados de ensayos de cada laboratorio

(1)	(2)	(3)			(4)			(5)			
TIPO DE SUELO	NÚMERO DE LABORATORIOS	VALOR PROMEDIO (PORCENTAJE DE PUNTOS)			DESVIACIÓN ESTÁNDAR (PORCENTAJE DE PUNTOS)			RANGO ACEPTABLE ENTRE 2 RESULTADOS (PORCENTAJE DE PUNTOS)			
Tipo de ensayo											
		LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP	
CH	24	59.9	20.4	39.5	2.1	2.7	3.1	6	7	9	
CL	24	33.3	19.9	13.4	0.8	1.3	1.6	2	4	4	
ML	18	27.1	23.2 ^A	3.9 ^A	1.3	1.2	1.8	4	3	5	

^A Para el suelo ML, 6 de 24 laboratorios reportaron el suelo como NP

Fuente: (INVIAS, INV E 126-13, pág. 235)

INV E 152-13: Compresión inconfiada en muestras de suelos: con su aplicación se demuestra la resistencia a la compresión no confinada que posee el suelo objeto de estudio; esto en suelos cohesivos a los cuales se les aplica carga axial, proceso al que se le practica control de deformación; del proceso realizado se obtiene un valor aprox., respecto de la resistencia de los suelos cohesivos; la resistencia a la compresión inconfiada (q_u) es entendida como el mínimo esfuerzo compresivo con el cual la muestra seleccionada falla, por ello se traduce en la “máxima carga por unidad de área alcanzada en el proceso del ensayo” también , “cuando la carga por unidad de área alcanza el 15% de deformación axial” es decir que el valor a referenciar es el que surja primero durante el ensayo. Así mismo dentro del ensayo se considera la resistencia al corte (S_u) que se define según la siguiente ecuación 5:

Ecuación 5. Cálculo para la resistencia al corte

$$S_u = 0.5xq_u$$

Con lo cual se logra establecer el valor de la resistencia a la compresión que poseen los suelos con la cohesión requerida para “ser apoyados en condición inconfiada”; para lograr desarrollar la prueba se requiere el aparato de compresión, el extractor de muestra, el indicador de deformaciones, el micrómetro con dial comparador, cronometro, balanza, equipo para la determinación del contenido de humedad y misceláneo; las muestras se preparan con un diámetro no menor a 30mm, la mayor partícula que se contenga debe ser menor a 1/10 de ese diámetro, en todo caso la relación existente entre altura y diámetro debe ubicarse entre 2 y 2,5; para el ensayo existen tres tipos de muestras: inalteradas, remodeladas y compactadas, para

el procedimiento se sigue el paso a paso presentado en el punto 6 de la INV E 152-13.

Los cálculos se establecen teniendo en cuenta las formulas específicas, para la deformación axial:

Ecuación 6. Cálculo para la deformación axial

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100$$

Donde:

ΔL Responde al cambio de longitud de la muestra a fallar, lo cual resulta de “las lecturas del indicador de deformaciones o calculado por un dispositivo electrónico.

L_0 Es la longitud inicial del espécimen de ensayo, mm (pg).

El cálculo del “área de la sección transversal media, A, para una carga aplicada dada”, con la aplicación de la ecuación:

Ecuación 7. Cálculo del área de la sección transversal media

$$A = \frac{A_0}{1 - \frac{\epsilon_1}{100}}$$

Donde

A_0 Es el área media inicial de la selección transversal de la muestra, mm² (pg²) y

ϵ_1 Es la deformación axial para una carga específica en %.

Así pues, para cada una de las cargas debe calcularse el esfuerzo compresivo σ_c , se desarrolla la siguiente ecuación 8:

Ecuación 8. Cálculo del esfuerzo compresivo

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

Donde:

P es la carga que se aplica (kN (lbf)) y

A es el área medida que corresponde a la sección transversal mm^2 (pg^2)

De acuerdo a los resultados obtenidos una guía de su expresión se presenta en la figura 12.

Figura 12. Resumen de resultados del ensayo de cada laboratorio

NÚMERO DE LABORATORIOS	PARÁMETRO MEDIDO	VALOR PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (1s)	RANGO ACEPTABLE ENTRE DOS RESULTADOS (d2s)
<i>Precisión de un solo operador (repetibilidad en un laboratorio)</i>				
22	Resistencia, kPa	989	42	120
22	Deformación, %	4.16	0.32	0.9
<i>Precisión entre laboratorios (reproducibilidad entre laboratorios)</i>				
22	Resistencia, kPa	989	53	150
22	Deformación, %	4.16	0.35	1.0

Fuente: (INVIAS, INV E 152-13, pág. 476)

1.8.5 PROCEDIMIENTO PARA OBTENCION Y REGISTRO DE RESULTADOS

1.8.5.1 Procedimiento para la Obtención de Resultados

Los pasos a seguir dentro del proceso son:

1. Se realiza el ensayo de granulometría, con lo cual se determina el pasante, para detectar dentro de los suelos, la composición de limos (desde no plásticos

hasta baja plasticidad) y arcillas (desde mediana plasticidad hasta muy alta plasticidad)

2. Se buscan los límites de consistencia (límites de Atterberg), específicamente el límite líquido (paso de estado plástico a un estado líquido), el límite plástico (paso de estado semisólido a un estado sólido).
3. Se elaboran las probetas (cilindros y vigas) sin adición de fibra y también con adición de fibra al 0,5%, 1,0%, 1,5% y 2,0%, para realizar los ensayos de resistencia.
4. Se realiza el ensayo de compresión a las muestras sin y con adición de fibras.

1.8.5.2 Registro de Resultados

Los resultados se registran en tablas descriptivas y cuantitativas, así como se realiza un registro fotográfico de las pruebas realizadas con el fin de presentar los resultados obtenidos y facilitar el análisis.

2. CAPITULO II. RESULTADOS

De acuerdo al procedimiento planteado el primer paso realizado fue la recolección de suelos finos para la obtención de las muestras necesarias a ser falladas; con ese material seleccionado, se procede a la aplicación de la **norma INV E 102-07**, con lo cual se logra la descripción y la identificación de suelos, el proceso se lleva a cabo de forma manual y visual con base en el sistema de clasificación unificada; así se define la muestra de suelo tomada como fina, debido a que la muestra pasa el tamiz de 75 μm (N° 200), proceso que se presenta en la figura 13.

Figura 13. Aplicación de la INV E102-7 Selección de suelos finos



Fuente: los Autores

Posterior al proceso descrito, se realizó el ensayo del suelo de acuerdo con la **normativa INV E 182**; con lo cual se obtiene la clasificación de la fracción fina del suelo, seleccionado como muestra, esto a partir del valor de azul de metileno, de igual forma se tiene en cuenta los símbolos de clasificación que establece la norma.

Dando cumplimiento al primer objetivo específico propuesto: se comprobó en el laboratorio la calidad de los agregados finos de acuerdo a la norma INV E 213-07, para establecer el análisis granulométrico de agregados gruesos y finos con los que se realizaran los cilindros y las vigas a ser falladas en el laboratorio, tal como se describe a continuación.

2.1 Granulometría

De las cuatro pruebas a realizar se presenta la primera: INV E 213-07: Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos: Los resultados que se presentan a continuación corresponden a los ensayos realizados, una vez obtenida la muestra identificada como suelo fino, se procede a realizar lo pertinente a lo contenido en la norma INV E 213-07, cuyo objetivo se centró en la determinación cuantitativa de los tamaños de las partículas, esta clasificación se aplica a los agregados gruesos tanto como a los finos; en este caso el uso de los tamices se efectúa de forma decreciente, parte de la secuencia realizada hasta obtener el registro de los resultados como se evidencia en la figura 14.

La muestra de agregado fino, de acuerdo con lo estipulado por esta norma, para poder realizarles el análisis granulométrico, se tuvo en cuenta que la muestra estuviese seca, para este proceso la norma determina el secado a temperatura constante en los $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, con lo cual se logra una masa constante, esto alcanza un valor de 0,1%

de la masa original, además se precisó que correspondiera a una masa mínima de 300g.

Figura 14. Norma INV E 213-07 Granulometría



Fuente: los Autores

Al realizar el ensayo de granulometría, se determinó el pasante, detectando dentro de los suelos, la composición de limos (desde no plásticos hasta baja plasticidad) y arcillas (desde mediana plasticidad hasta muy alta plasticidad), lo cual se plasma en la figura 15 que compila los resultados de los laboratorios realizados, ahora bien el desglose del contenido del resultado se presenta en tablas subsiguientes; es así como en la figura 16 presenta los valores obtenidos para la gradación; de acuerdo a esos datos la línea de gradación obtenida se plasma en la figura 17.

Figura 15. Análisis granulométrico de suelos – límites líquido y plástico

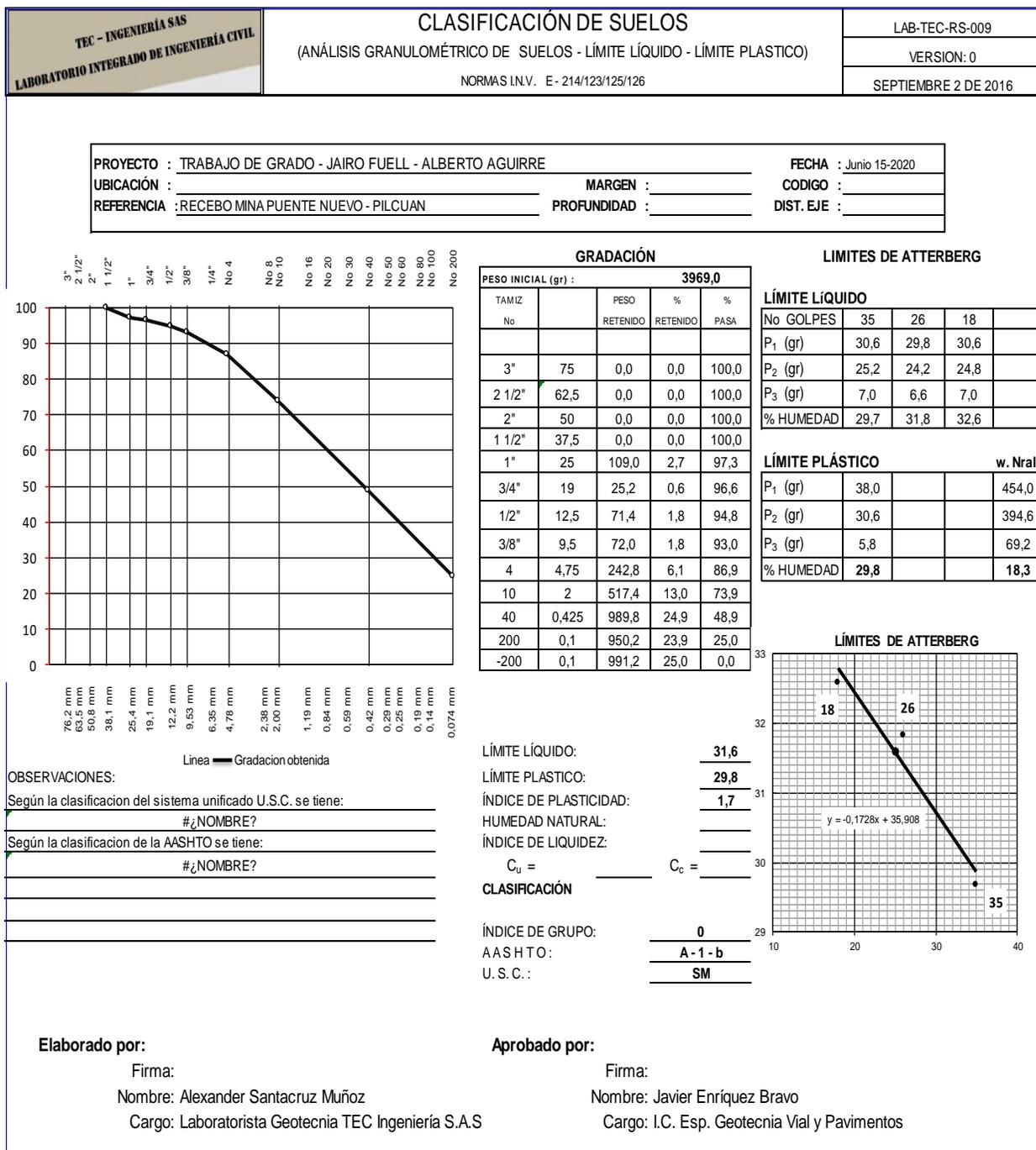
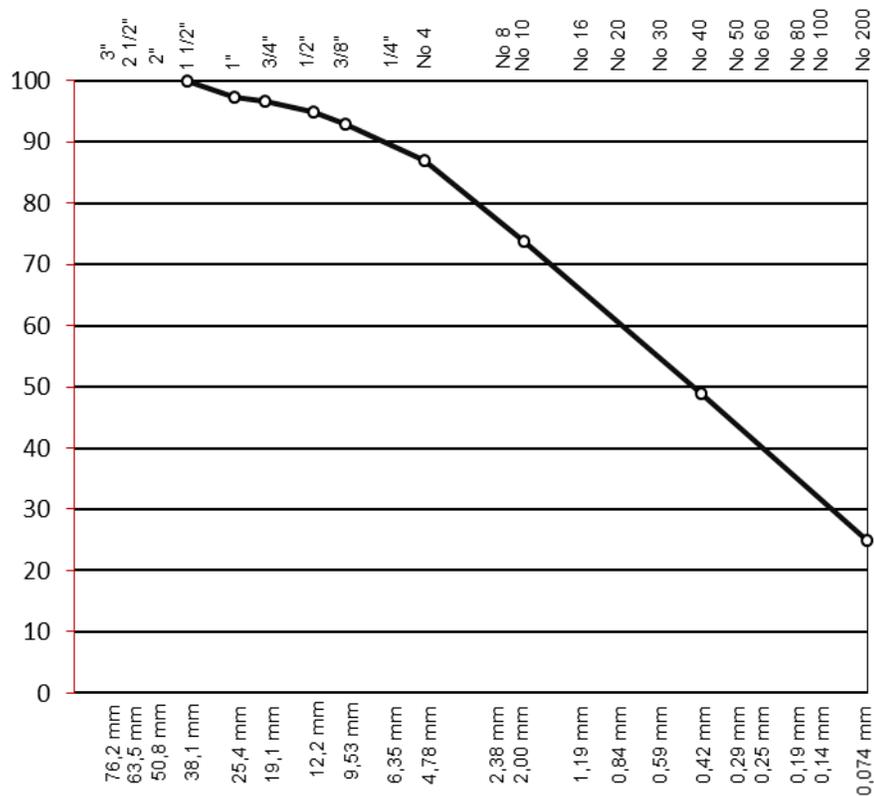


Figura 16. Gradación

PESO INICIAL (gr) :		3969,0		
TAMIZ No		PESO RETENIDO	% RETENIDO	% PASA
3"	75	0,0	0,0	100,0
2 1/2"	62,5	0,0	0,0	100,0
2"	50	0,0	0,0	100,0
1 1/2"	37,5	0,0	0,0	100,0
1"	25	109,0	2,7	97,3
3/4"	19	25,2	0,6	96,6
1/2"	12,5	71,4	1,8	94,8
3/8"	9,5	72,0	1,8	93,0
4	4,75	242,8	6,1	86,9
10	2	517,4	13,0	73,9
40	0,425	989,8	24,9	48,9
200	0,1	950,2	23,9	25,0
-200	0,1	991,2	25,0	0,0

Fuente: Laboratorio TEC Ingeniería SAS

Figura 17. Línea de gradación



Fuente: Laboratorio TEC Ingeniería SAS

Otra de las valoraciones realizadas fue el establecer el peso unitario suelto y compacto, el reporte del laboratorio consultado expreso los resultados que se presentan en la figura 18. Las muestras para valorar se extrajeron de la zona llamada Mina puente viejo en Pilcuan.

De las muestras registradas como recebo, se tiene que para el peso unitario suelto el promedio se estableció $1,064 \text{ g/cm}^3$ y el peso unitario compacto $1,208 \text{ g/cm}^3$; acto seguido se realizó la valoración de las muestras en laboratorio, para establecer la gravedad específica y la absorción de los agregados finos; la descripción del agregado fino reportado como: arena procedente de la cantera las terrazas; los promedios presentados en la figura 19, registran los promedios alcanzados para la temperatura del ensayo, el peso de la muestra, el peso del matraz con la adición del agua, luego al matraz y al agua se adiciona la muestra como tal; en esa línea el promedio de la temperatura fue de $18,00^\circ\text{C}$; el promedio de la muestra con el agua y el peso del matraz registro $846,30 \text{ gr}$ y por su parte el peso de la muestra seca fue de $242,20 \text{ gr}$.

De acuerdo a la muestra, el valor de densidad nominal arrojó un promedio de $2,69 \text{ g/cm}^3$, mientras que la densidad aparente fue de $2,48 \text{ g/cm}^3$. Entonces, la tolerancia para el límite líquido según la norma INV E 311-13 el máximo es el 40%, se obtuvo un resultado de 31,6%, así se cumple con la especificación requerida; por su parte el índice de plasticidad según la norma debe estar entre el 4% y el 9%, el resultado fue de 1,7%, con ello se concluye que el material es óptimo para su utilización.

Cabe anotar que las especificaciones INVIAS utilizadas para estos ensayos son la 213-13, la 125-13 y la 126-13.

Figura 18. Peso unitario suelto y compacto

		PESO UNITARIO SUELTO Y COMPACTO			LAB-TEC-RS-004
		NORMA INVIAS E-217			VERSION: 0 Septiembre 7 de 2016
IDENTIFICACION DEL PROYECTO:					
Contratista:	Jairo Fuel - Guillermo Alberto Aguirre Estudiante ng Civil UMNG				
Proyecto:	MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LOS SUELOS FINOS MEDIANTE LA ADICION DE RESIDUOS PROVENIENTES DE LOS VEGETALES				
Contrato No:					
IDENTIFICACION DEL MATERIAL:					
Procedencia:	MINA PUENTE VIEJO - PILCUAN				
Descripción:	RECEBO	Fecha del ensayo:	Junio 16-2020		
Otros:					
PESO UNITARIO SUELTO					
	PESO MOLDE + MUESTRA	PESO MOLDE	PESO MATERIAL	VOLUMEN DEL MOLDE	PESO UNITARIO
	(g)	(g)	(g)	(g/cm ³)	(g/cm ³)
	7596	5354	2242	2087	1,074
	7539	5354	2185	2087	1,047
	7585	5354	2231	2087	1,069
	7562	5354	2208	2087	1,058
	7586	5354	2232	2087	1,069
	PROMEDIO:				1,064
PESO UNITARIO COMPACTO					
	PESO MOLDE + MUESTRA	PESO MOLDE	PESO MATERIAL	VOLUMEN DEL MOLDE	PESO UNITARIO
	(g)	(g)	(g)	(g/cm ³)	(g/cm ³)
	7878	5354	2524	2087	1,209
	7840	5354	2486	2087	1,191
	7872	5354	2518	2087	1,207
	7890	5354	2536	2087	1,215
	7899	5354	2545	2087	1,219
	PROMEDIO:				1,208
OBSERVACIONES					
Elaborado por:			Aprobado por:		
					
Firma:			Firma:		
Nombre: Alexander Santacruz Muñoz			Nombre: Javier Enriquez Bravo		
Cargo: Laboratorista de Suelos TEC-Ingeniería-SAS			Cargo: I.C. Esp. Geotecnia Vial y Pavimentos		

Fuente: Laboratorio TEC Ingeniería SAS

Figura 19. Peso específico

	GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS			TEC.INGENIERIA		
	NORMA INVIAS - E -222-13			VERSION 0		
				SEPTIEMBRE 06-2016		
IDENTIFICACION DEL PROYECTO:						
CONTRATISTA:	Jairo Fuel V - Guillermo Alberto Aguirre					
PROYECTO:	MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LOS SUELOS FINOS MEDIANTE LA ADICION DE RESIDUOS PROVENIENTES DE FIBRAS VEGETALES					
IDENTIFICACION DEL MATERIAL:						
PROCEDENCIA:	MINA PUENTE NUEVO PILCUAN					
DESCRIPCION:	MATERIAL DE RECEBO			FECHA DEL ENSAYO:	Junio 15-2020	
OTROS:						
DESCRIPCIÓN AGREGADO FINO: Arena procedente de la cantera las terrazas						
ENSAYO N°						
Temperatura de ensayo		°C	1	2	Promedio	
Peso de la muestra sss	Wsss	gr	250	250	250,00	
Peso matraz + agua	Wma	gr	678,2	710	694,10	
Peso matraz + agua + muestra	Wmam	gr	830,4	862,2	846,30	
Peso muestra seca	Ws	gr	242,2	242,2	242,20	
Densidad Nominal = $Ws / Ws + Wma - Wmam$			gr/cm3	2,691	2,691	2,69
Densidad Aparente = $Ws / Wsss + Wma - Wmam$			gr/cm3	2,476	2,476	2,48
Densidad Aparente SSS = $Wsss / Wsss + Wma - Wmam$			gr/cm3	2,556	2,556	2,56
Absorción = $(Wsss - Ws / Ws) * 100$			%	3,22	3,22	3,22
Peso muestra seca + recipiente	gr	387,6	380,6			
Peso recipiente	gr	145,4	138,4			
Peso muestra seca	gr	242,2	242,2			
OBSERVACIONES:						
DATOS DE ELABORACIÓN						
ELABORADO POR			REVISADO POR			
CARGO:	LABORATORISTA DE GEOTECNIA		I.C DIRECTOR DE LABORATORIO			
NOMBRE:	ALEXANDER SANTACRUZ MUÑOZ		JAVIER ENRIQUEZ BRAVO			
FIRMA:						

Fuente: Laboratorio TEC Ingeniería SAS

2.2 Limite líquido y Limite plástico

Realizando la segunda prueba: INV E 125-13: Determinación del límite líquido de los suelos y la tercera prueba: INV E 126-13: Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos: Se obtuvieron los límites de consistencia (límites de Atterberg), específicamente el límite líquido (paso de estado plástico a un estado líquido), el límite plástico (paso de estado semisólido a un estado sólido); con esos datos fue posible obtener el índice de plasticidad y el índice de liquidez.

El proceso para la obtención del límite líquido requirió la secuencia de acciones descrita en la **norma INV E 125-13**, en primera instancia se requiere la preparación de la muestra; la norma prevé dos formas de ejecución de la prueba, siendo el método A multipunto y el B de un solo punto, dentro de los resultados encontrados se presentan los límites de Atterberg, los cuales provienen de la figura 15 y se amplían a partir de la tabla 16; es decir que el valor para el límite líquido es de 31,6 y el valor para el límite plástico es de 29,8, por lo cual el índice de plasticidad puntuó en 1,7; estos valores se presentan en la tabla 17.

Tabla 16. Límites de Atterberg (líquido – plástico)

LIMITES DE ATTERBERG

LÍMITE LÍQUIDO

No GOLPES	35	26	18	
P ₁ (gr)	30,6	29,8	30,6	
P ₂ (gr)	25,2	24,2	24,8	
P ₃ (gr)	7,0	6,6	7,0	
% HUMEDAD	29,7	31,8	32,6	

LÍMITE PLÁSTICO

w. Nral

P ₁ (gr)	38,0			454,0
P ₂ (gr)	30,6			394,6
P ₃ (gr)	5,8			69,2
% HUMEDAD	29,8			18,3

Fuente: Laboratorio TEC Ingeniería SAS

Tabla 17. Límites e índice de plasticidad

LÍMITE LÍQUIDO:	<u>31,6</u>
LÍMITE PLÁSTICO:	<u>29,8</u>
ÍNDICE DE PLÁSTICIDAD:	<u>1,7</u>
HUMEDAD NATURAL:	_____
ÍNDICE DE LIQUIDEZ:	_____
$C_u =$ _____	$C_c =$ _____
CLASIFICACIÓN	
ÍNDICE DE GRUPO:	<u>0</u>
AASHTO:	<u>A - 1 - b</u>
U. S. C. :	<u>SM</u>

Fuente: Laboratorio TEC Ingeniería SAS

La secuencia de acciones para la preparación de la muestra se representa en la figura 20, lo cual parte de la calibración de la altura de caída.

Figura 20. Secuencia para la obtención del límite líquido



Fuente: los Autores

La secuencia planteada por la norma se continúa con las acciones presentadas en la figura 21, donde se realizan los ensayos pertinentes a la obtención del límite plástico.

En conclusión y como se explicó anteriormente: la tolerancia para el límite líquido según la norma INV E 311-13 el máximo es el 40%, se obtuvo un resultado de 31,6%, así se cumple con la especificación requerida; por su parte el índice de plasticidad según la norma debe estar entre el 4% y el 9%, el resultado fue de 1,7%, con ello se concluye que el material es óptimo para su utilización.

Figura 21. Continuación de la secuencia para establecer el límite líquido



Fuente: los Autores

De otra parte, en busca de la resistencia, en donde se evalúa la compresión no confinada (ensayo uniaxial para realizar control ante la deformación) y la confinada, así como el ensayo de tracción, parten de la elección realizada de las fibras de fique

que serán incluidas de acuerdo con porcentajes preestablecidos para ser falladas de acuerdo con la norma se presentan en la figura 22, las fibras usadas proceden de plantas como las que se aprecian en la figura 23.

Figura 22. Fibra de fique seleccionada Natural y Procesada



Fuente: los Autores

Figura 23. Plantas de Fique



Fuente: los Autores

Una vez seleccionado los Materiales tanto el suelo fino y el fique se procedió a la elaboración de cilindros y vigas, tanto en estado natural como también en diferentes porcentajes de material de fique para lo obtención de resultados y la factibilidad de las conclusiones esperadas en este estudio.

Se inició realizando varias muestras de cilindros y vigas, esto con el fin de obtener las cantidades necesarias tanto para la obtención de Material de suelo fino como también para el fique y la obtención de la Humedad Optima necesaria para la trabajabilidad de los materiales y la obtención de los cilindros y vigas, esta selección

inicial se presenta en las figuras 24 y 25, por su parte la figura 26 presenta la forma como se preparó la fibra de fique al suelo fino.

Figura 24. Material de suelo fino, Fique, Agua, Preparación de la Mezcla



Fuente: los Autores

Figura 25. Dimensiones de las Fibras de Fique



Fuente: los Autores

Figura 26. Preparación de la Fibra de Fique al suelo Fino



Fuente: los Autores

Luego de ser mezclada la fibra con el suelo fino, se procedió a tomar los cilindros y vigas para la obtención de fallos a la compresión días, tal como se aprecia en la figura 27; estos cilindros y vigas se dejaron a temperatura ambiente, hasta obtener la contextura y edad para su proceso de fallos, lo cual se presenta en la figura 28.

Figura 27. Toma de Cilindros y Vigas



Fuente: los Autores

Figura 28. Secado y curado al aire libre



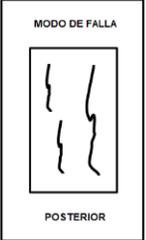
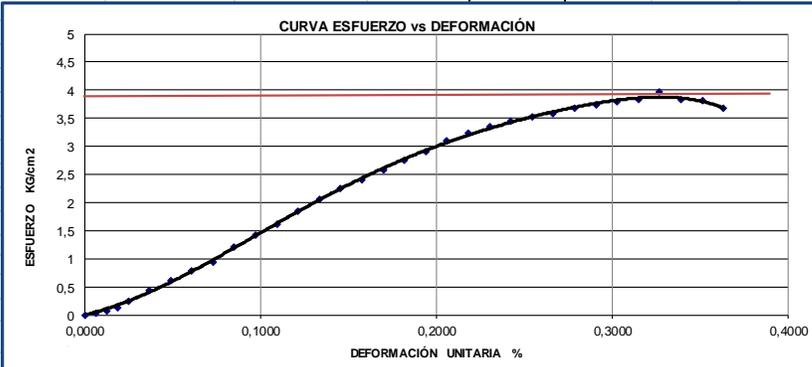
Fuente: los Autores

2.3 Muestras cilindros

Se presenta el reporte de la última prueba a realizar: INV E 152-13: Compresión inconfiada en muestras de suelos: Una vez realizados los laboratorios base se generaron las muestras, de una parte, se trabajó con los cilindros y las vigas sin adición de fibras, de otra se construyeron los cilindros y las vigas con la adición de fibras al 0.5 %, al 1.0%, al 1.5% y finalmente al 2.0% para lograr después realizar los ensayos propuestos; En la figura 29 se presentan los resultados para la falla de la muestra en estado natural; en donde se establece la deformación según las cargas, las medidas de la muestra en diámetro mostraron una configuración de 10,50 cm, la altura alcanzo los 21,30 cm, ocupando un área de 86,59 cm³, por lo cual el volumen fue de 1844 cm³ y la humedad alcanzo el 3,50%, ante la prueba el esfuerzo máximo se registró en los 4,90 kg/cm².

El reporte del laboratorio mostro la generación de la curva de esfuerzo contra la deformación, marcando el máximo punto por debajo de los 5 kg/cm², el esquema denota que el modo de falla fue anterior; junto a esta se realizaron 9 pruebas de modelos en estado natural, las muestras: 6, 7, 8, y 9 fallaron de forma similar a este reporte que corresponde a la muestra 1. Las muestras 3, 4 y 5, fallaron de forma similar a la 2, como se presenta en la figura 30, las medidas de la muestra en diámetro mostraron una configuración de 10,50 cm, la altura alcanzo los 21,30 cm, ocupando un área de 86,59 cm³, por lo cual el volumen fue de 1844 cm³ y la humedad alcanzo el 3,50%, ante la prueba el esfuerzo máximo se registró en los 6,17 kg/cm²; el esquema denota que el modo de falla fue posterior.

Figura 30. Muestra en estado natural – esquema de falla anterior

TEC - INGENIERÍA SAS LABORATORIO INTEGRADO DE INGENIERÍA CIVIL		COMPRESION INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS INV E - 152 - 13							
PROYECTO: TRABAJO DE GRADO SOLICITA: JAIRO FUELL - ALBERTO AGUIRRE DESCRIPCIÓN: Material Arena Limosa - Recebo en Estado Natural				MUESTRA: 2 PROF: EDAD: 28 DÍAS	FECHA: 7/06/2020 CODIGO: 2-150121CL041 ABSCISA: N/A				
DEFORMACIÓN 10 ⁻²	DEFORMACIÓN cm	DEF UNITARIA ΔH/H	1 - DEF UNIT	CARGA 10 ²	CARGA Kg	AREA CORREGIDA	RESISTENCIA Kg/cm ²	MEDIDAS DE LA MUESTRA	
0	0,00000	0,0000000	1,0000000	0	0	0	0	DIAMETRO	10,90 cm
5	0,12700	0,0060476	0,9939524	30	3,06	93,19	0,03	ALTURA	21,00 cm
10	0,25400	0,0120952	0,9879048	70	7,13	93,06	0,08	AREA	93,31 cm ³
15	0,38100	0,0181429	0,9818571	120	12,23	92,93	0,13	VOLUMEN	1960 cm ³
20	0,50800	0,0241905	0,9758095	230	23,44	92,81	0,25	HUMEDAD DEL MATERIAL	3,50 %
30	0,76200	0,0362857	0,9637143	390	39,74	92,55	0,43	PESO SECO DE LA MUESTRA: 3,286 gr	
40	1,01600	0,0483810	0,9516190	560	57,06	92,30	0,62	CONSTANTE DE LA CELDA (N)	
50	1,27000	0,0604762	0,9395238	700	71,33	92,04	0,77	0,1019	
60	1,52400	0,0725714	0,9274286	850	86,62	91,79	0,94	AREA CORREGIDA	
70	1,77800	0,0846667	0,9153333	1080	110,05	91,54	1,20	Ac	Ao 1 - def unitaria
80	2,03200	0,0967619	0,9032381	1270	129,41	91,28	1,42	ESFUERZO MAXIMO = δ	
90	2,28600	0,1088571	0,8911429	1450	147,76	91,03	1,62	3,97 kg/cm ²	
100	2,54000	0,1209524	0,8790476	1640	167,12	90,77	1,84	C= Cohesión	C= qu/2 = 1,986
110	2,79400	0,1330476	0,8669524	1830	186,48	90,52	2,06	ESQUEMA DE LA FALLA	
120	3,04800	0,1451429	0,8548571	2000	203,80	90,27	2,26	 <p>MODO DE FALLA</p> <p>POSTERIOR</p>	
130	3,30200	0,1572381	0,8427619	2120	216,03	90,01	2,40		
140	3,55600	0,1693333	0,8306667	2270	231,31	89,76	2,58		
150	3,81000	0,1814286	0,8185714	2410	245,58	89,50	2,74		
160	4,06400	0,1935238	0,8064762	2550	259,85	89,25	2,91		
170	4,31800	0,2056190	0,7943810	2710	276,15	89,00	3,10		
180	4,57200	0,2177143	0,7822857	2820	287,36	88,74	3,24		
190	4,82600	0,2298095	0,7701905	2910	296,53	88,49	3,35		
200	5,08000	0,2419048	0,7580952	2980	303,66	88,23	3,44		
210	5,33400	0,2540000	0,7460000	3040	309,78	87,98	3,52		
220	5,58800	0,2660952	0,7339048	3090	314,87	87,73	3,59		
230	5,84200	0,2781905	0,7218095	3160	322,00	87,47	3,68		
240	6,09600	0,2902857	0,7097143	3200	326,08	87,22	3,74		
250	6,35000	0,3023810	0,6976190	3240	330,16	86,96	3,80		
260	6,60400	0,3144762	0,6855238	3270	333,21	86,71	3,84		
270	6,85800	0,3265714	0,6734286	3370	343,40	86,46	3,97		
280	7,11200	0,3386667	0,6613333	3240	330,16	86,20	3,83		
290	7,36600	0,3507619	0,6492381	3210	327,10	85,95	3,81		
300	7,62000	0,3628571	0,6371429	3090	314,87	85,69	3,67		
								APROBÓ: ING JAVIER ENRIQUEZ BRAVO	
OBSERVACIONES: Cilindros de Prueba - Material Pasante Malla 1/4"									

Fuente: Laboratorio TEC Ingeniería SAS

En relación con el segundo objetivo específico propuesto, se realizó el diseño de mezcla a partir de diferentes porcentajes de material vegetal con respecto a la totalidad del grano fino, encontrado en la subrasante, hasta obtener el contenido porcentual óptimo para lograr el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos finos; por ello a continuación se presentan los laboratorios logrados con muestras al 0.5%, al 1.0%, al 1.5%, y finalmente al 2.0%.

2.3.1 Muestra al 0.5% de adición

Las muestras falladas con la inclusión del 0.5% de fibras fueron descritas con la humedad deseada del 27%, los cilindros de prueba presentaron material pasante N° ¼%, la fibra de fique al 0.5%, con un largo de dicha fibra de 5.0 cm, y agua adicional de 807 ml por cilindro; se realizaron 10 pruebas; dentro de las cuales las numero: 2, 3, 4, y 5 fallaron de forma similar a la 1, con un esquema de falla posterior, cuyos valores se presentan en la figura 31.

Las medidas de la muestra 1, en diámetro mostraron una configuración de 11,00 cm, la altura alcanzo los 21,00 cm, ocupando un área de 95,03 cm³, por lo cual el volumen fue de 1996 cm³ y la humedad alcanzo el 3,50%, ante la prueba el esfuerzo máximo se registró en los 5,85 kg/cm²; el esquema denota que el modo de falla fue posterior.

Las medidas de la muestra 6, que se corresponde con los resultados obtenidos con las muestras 7, 8, 9, y 10; en diámetro mostraron una configuración de 11,20 cm, la altura alcanzo los 21,30 cm, ocupando un área de 98,52 cm³, por lo cual el volumen fue de 2098 cm³ y la humedad alcanzo el 3,50%, ante la prueba el esfuerzo máximo

Figura 32. Muestra al 0.5% de adición de fibras de fique cilindros (6 al 10)

TEC - INGENIERÍA SAS LABORATORIO INTEGRADO DE INGENIERÍA CIVIL		COMPRESION INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS INV E - 152 - 13					
PROYECTO: TRABAJO DE GRADO SOLICITA: INGENIERO JAIRO FUELL - ARQ. ALBERTO AGUIRRE DESCRIPCIÓN: Material Arena Limosa - Recebo con 0,5% de Fique				MUESTRA: 6 PROF: EDAD: 28 DÍAS	FECHA: 06/07/2020 CODIGO: 2-150121CL041 ABSCISA: N/A		
DEFORMACIÓN 10 ⁻²	DEFORMACIÓN cm	DEF UNITARIA ΔH / H	1 - DEF UNIT	CARGA 10 ⁻²	CARGA Kg	AREA CORREGIDA	RESISTENCIA Kg/cm ²
0	0,00000	0,0000000	1,0000000	0	0	0	0
5	0,12700	0,0059624	0,9940376	20	2,04	98,39	0,02
10	0,25400	0,0119249	0,9880751	50	5,10	98,27	0,05
15	0,38100	0,0178873	0,9821127	70	7,13	98,14	0,07
20	0,50800	0,0238498	0,9761502	100	10,19	98,01	0,10
30	0,76200	0,0357746	0,9642254	140	14,27	97,76	0,15
40	1,01600	0,0476995	0,9523005	180	18,34	97,50	0,19
50	1,27000	0,0596244	0,9403756	270	27,51	97,25	0,28
60	1,52400	0,0715493	0,9284507	370	37,70	97,00	0,39
70	1,77800	0,0834742	0,9165258	470	47,89	96,74	0,50
80	2,03200	0,0953991	0,9046009	660	67,25	96,49	0,70
90	2,28600	0,1073239	0,8926761	970	98,84	96,23	1,03
100	2,54000	0,1192488	0,8807512	1380	140,62	95,98	1,47
110	2,79400	0,1311737	0,8688263	1960	199,72	95,73	2,09
120	3,04800	0,1430986	0,8569014	2560	260,86	95,47	2,73
130	3,30200	0,1550235	0,8449765	3110	316,91	95,22	3,33
140	3,55600	0,1669484	0,8330516	3630	369,90	94,96	3,90
150	3,81000	0,1788732	0,8211268	4160	423,90	94,71	4,48
160	4,06400	0,1907981	0,8092019	4590	467,72	94,46	4,95
170	4,31800	0,2027230	0,7972770	4950	504,41	94,20	5,35
180	4,57200	0,2146479	0,7853521	5210	530,90	93,95	5,65
190	4,82600	0,2265728	0,7734272	5380	548,22	93,69	5,85
200	5,08000	0,2384977	0,7615023	5460	556,37	93,44	5,95
210	5,33400	0,2504225	0,7495775	5470	557,39	93,19	5,98
220	5,58800	0,2623474	0,7376526	5390	549,24	92,93	5,91
230	5,84200	0,2742723	0,7257277	5290	539,05	92,68	5,82
240	6,09600	0,2861972	0,7138028	5190	528,86	92,42	5,72
MEDIDAS DE LA MUESTRA							
DIAMETRO		11,20		cm			
ALTURA		21,30		cm			
AREA		98,52		cm ²			
VOLUMEN		2098		cm ³			
HUMEDAD DEL MATERIAL		3,50		%			
PESO SECO DE LA MUESTRA: 3,224 gr							
CONSTANTE DE LA CELDA (N)							
0,1019							
AREA CORREGIDA							
Ac		Ao		1 - def unitaria			
ESFUERZO MAXIMO = δ							
5,98 kg/cm ²							
ESQUEMA DE FALLA							
<p>MODO DE FALLA</p> <p>ANTERIOR</p>							
APROBÓ : ING. JAVIER ENRIQUEZ BRAVO							
<p>CURVA ESFUERZO vs DEFORMACIÓN</p>							
OBSERVACIONES: Humedad deseada 27% - Cilindros de Prueba - Material Pasante No. 1/4", fibra de fique 0,5 % largo de la fibra 5,0 cm, agua adicional 807 ml por cada cilindro							

Fuente: Laboratorio TEC Ingeniería SAS

2.3.2 Muestras al 1.0%de adición

Las muestras falladas con la inclusión del 1.0% de fibras de fique, fueron descritas con material pasante N° ¼", la fibra de fique al 1.0%, con un largo de dicha fibra de 5.0 cm, y agua adicional de 807 ml por cilindro; se realizaron 10 pruebas; dentro de las cuales las numero: 2, 4, 5, 6 y 10 fallaron de forma similar a la 1, con un esquema de falla anterior, cuyos valores se presentan en la figura 33.

Las medidas de la muestra 1, en diámetro mostraron una configuración de 11,00 cm, la altura alcanzo los 21,00 cm, ocupando un área de 95,03 cm³, por lo cual el volumen fue de 1996 cm³ y la humedad alcanzo el 3,50%, ante la prueba el esfuerzo máximo se registró en los 5,88 kg/cm²; el esquema denota que el modo de falla fue anterior.

Las medidas de la muestra 3, que se corresponde con los resultados obtenidos con las muestras 7, 8, y 9; en diámetro mostraron una configuración de 11,00 cm, la altura alcanzo los 20,90 cm, ocupando un área de 95,03 cm³, por lo cual el volumen fue de 1986 cm³ y la humedad alcanzo el 3,50%, ante la prueba el esfuerzo máximo se registró en los 6,19 kg/cm²; el esquema denota que el modo de falla fue posterior; tal cómo se registra en la figura 34.

Figura 33. Muestra al 1.0% de adición de fibras de fique cilindros (1, 2, 4, 5, 6 y 10)

TEC - INGENIERÍA SAS LABORATORIO INTEGRADO DE INGENIERÍA CIVIL		COMPRESION INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS INV E - 152 - 13					
PROYECTO: TRABAJO DE GRADO SOLICITA: JAIRO FUELL - ALBERTO AGUIRRE DESCRIPCIÓN: MUESTRA INCONFINADA CON 1,0% DE FIQUE				MUESTRA: 1 PROF: EDAD: 28 DÍAS.	FECHA: 13/07/2020 CODIGO: 2-150121CL041 ABSCISA: N/A		
DEFORMACIÓN 10 ⁻²	DEFORMACIÓN cm	DEF UNITARIA ΔH / H	1 - DEF UNIT	CARGA 10 ⁻²	CARGA Kg	AREA CORREGIDA	RESISTENCIA Kg/cm ²
0	0,00000	0,0000000	1,0000000	0	0	0	0
5	0,12700	0,0060476	0,9939524	100	10,19	94,91	0,11
10	0,25400	0,0120952	0,9879048	170	17,32	94,78	0,18
15	0,38100	0,0181429	0,9818571	250	25,48	94,65	0,27
20	0,50800	0,0241905	0,9758095	340	34,65	94,53	0,37
30	0,76200	0,0362857	0,9637143	450	45,86	94,27	0,49
40	1,01600	0,0483810	0,9516190	550	56,05	94,02	0,60
50	1,27000	0,0604762	0,9395238	780	79,48	93,76	0,85
60	1,52400	0,0725714	0,9274286	1020	103,94	93,51	1,11
70	1,77800	0,0846667	0,9153333	1270	129,41	93,26	1,39
80	2,03200	0,0967619	0,9032381	1480	150,81	93,00	1,62
90	2,28600	0,1088571	0,8911429	1670	170,17	92,75	1,83
100	2,54000	0,1209524	0,8790476	1850	188,52	92,49	2,04
110	2,79400	0,1330476	0,8669524	2030	206,86	92,24	2,24
120	3,04800	0,1451429	0,8548571	2250	229,28	91,99	2,49
130	3,30200	0,1572381	0,8427619	2450	249,66	91,73	2,72
140	3,55600	0,1693333	0,8306667	2600	264,94	91,48	2,90
150	3,81000	0,1814286	0,8185714	2810	286,34	91,22	3,14
160	4,06400	0,1935238	0,8064762	2990	304,68	90,97	3,35
170	4,31800	0,2056190	0,7943810	3200	326,08	90,72	3,59
180	4,57200	0,2177143	0,7822857	3380	344,42	90,46	3,81
190	4,82600	0,2298095	0,7701905	3590	365,82	90,21	4,06
200	5,08000	0,2419048	0,7580952	3700	377,03	89,95	4,19
210	5,33400	0,2540000	0,7460000	3890	396,39	89,70	4,42
220	5,58800	0,2660952	0,7339048	4030	410,66	89,45	4,59
230	5,84200	0,2781905	0,7218095	4170	424,92	89,19	4,76
240	6,09600	0,2902857	0,7097143	4260	434,09	88,94	4,88
250	6,35000	0,3023810	0,6976190	4410	449,38	88,68	5,07
260	6,60400	0,3144762	0,6855238	4520	460,59	88,43	5,21
270	6,85800	0,3265714	0,6734286	4650	473,84	88,18	5,37
280	7,11200	0,3386667	0,6613333	4670	475,87	87,92	5,41
290	7,36600	0,3507619	0,6492381	4830	492,18	87,67	5,61
300	7,62000	0,3628571	0,6371429	4870	496,25	87,41	5,68
310	7,87400	0,3749524	0,6250476	4940	503,39	87,16	5,78
320	8,12800	0,3870476	0,6129524	4980	507,46	86,91	5,84
330	8,38200	0,3991429	0,6008571	5000	509,50	86,65	5,88
340	8,63600	0,4112381	0,5887619	4910	500,33	86,40	5,79
350	8,89000	0,4233333	0,5766667	4820	491,16	86,14	5,70

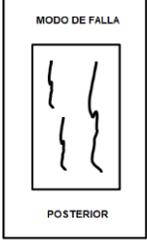
MEDIDAS DE LA MUESTRA	
DIAMETRO	11,00 cm
ALTURA	21,00 cm
AREA	95,03 cm ²
VOLUMEN	1996 cm ³
HUMEDAD DEL MATERIAL	3,50 %
PESO HUMEDO DE LA MUESTRA: 3,324 gr	
CONSTANTE DE LA CELDA (N)	
0,1019	
AREA CORREGIDA	
Ac	Ao 1 - def unitaria
ESFUERZO MAXIMO = δ	
5,88 kg/cm ²	
C= Cohesión	C= qu/2: 2,940
ESQUEMA DE LA FALLA	
APROBÓ : ING JAVIER ENRIQUEZ BRAVO	

CURVA ESFUERZO vs DEFORMACIÓN

OBSERVACIONES: Cilindros de Prueba - Material Pasante No. 1/4" fibra de fique 1,0 %, largo de la fibra 5,0 cm, agua adicional 807 ml por cada cilindro

Fuente: Laboratorio TEC Ingeniería SAS

Figura 34. Muestra al 1.0% de adición de fibras de fique cilindros (3, 7, 8 y 9)

TEC - INGENIERÍA SAS LABORATORIO INTEGRADO DE INGENIERÍA CIVIL		COMPRESION INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS INV E - 152 - 13							
PROYECTO: TRABAJO DE GRADO SOLICITA: JAIRO FUELL - ALBERTO AGUIRRE DESCRIPCIÓN: INCONFINADA CON 0,5% DE FIQUE				MUESTRA: 3 PROF: EDAD: 28 DÍAS.	FECHA: 13/07/2020 CODIGO: 2-150121CL041 ABSCISA: N/A				
DEFORMACIÓN 10 ⁻²	DEFORMACIÓN cm	DEF UNITARIA ΔH/H	1 - DEF UNIT	CARGA 10 ²	CARGA Kg	AREA CORREGIDA	RESISTENCIA Kg/cm ²	MEDIDAS DE LA MUESTRA	
0	0,0000	0,000000	1,000000	0	0	0	0	DIAMETRO	11,00 cm
5	0,12700	0,0060766	0,9939234	40	4,08	94,91	0,04	ALTURA	20,90 cm
10	0,25400	0,0121531	0,9878469	50	5,10	94,78	0,05	AREA	95,03 cm ³
15	0,38100	0,0182297	0,9817703	70	7,13	94,65	0,08	VOLUMEN	1986 cm ³
20	0,50800	0,0243062	0,9756938	90	9,17	94,53	0,10	HUMEDAD DEL MATERIAL	3,50 %
30	0,76200	0,0364593	0,9635407	210	21,40	94,27	0,23	PESO HUMEDO DE LA MUESTRA: 3,362 gr	
40	1,01600	0,0486124	0,9513876	490	49,93	94,02	0,53	CONSTANTE DE LA CELDA (N)	
50	1,27000	0,0607656	0,9392344	740	75,41	93,76	0,80	0,1019	
60	1,52400	0,0729187	0,9270813	1000	101,90	93,51	1,09	AREA CORREGIDA	
70	1,77800	0,0850718	0,9149282	1350	137,57	93,26	1,48	Ac Ao 1 - def unitaria	
80	2,03200	0,0972249	0,9027751	1670	170,17	93,00	1,83	ESFUERZO MAXIMO = δ	
90	2,28600	0,1093780	0,8906220	2050	208,90	92,75	2,25	6,19 kg/cm ²	
100	2,54000	0,1215311	0,8784689	2440	248,64	92,49	2,69	C= Cohesión C= qu/2 = 3,094	
110	2,79400	0,1336842	0,8663158	2810	286,34	92,24	3,10	 <p>MODO DE FALLA</p> <p>POSTERIOR</p>	
120	3,04800	0,1458373	0,8541627	3190	325,06	91,99	3,53		
130	3,30200	0,1579904	0,8420096	3540	360,73	91,73	3,93		
140	3,55600	0,1701435	0,8298565	3780	385,18	91,48	4,21		
150	3,81000	0,1822967	0,8177033	4070	414,73	91,22	4,55		
160	4,06400	0,1944498	0,8055502	4290	437,15	90,97	4,81		
170	4,31800	0,2066029	0,7933971	4480	456,51	90,72	5,03		
180	4,57200	0,2187560	0,7812440	4710	479,95	90,46	5,31		
190	4,82600	0,2309091	0,7690909	4810	490,14	90,21	5,43		
200	5,08000	0,2430622	0,7569378	4990	508,48	89,95	5,65		
210	5,33400	0,2552153	0,7447847	5070	516,63	89,70	5,76		
220	5,58800	0,2673684	0,7326316	5180	527,84	89,45	5,90		
230	5,84200	0,2795215	0,7204785	5250	534,98	89,19	6,00		
240	6,09600	0,2916746	0,7083254	5310	541,09	88,94	6,08		
250	6,35000	0,3038278	0,6961722	5330	543,13	88,68	6,12		
260	6,60400	0,3159809	0,6840191	5370	547,20	88,43	6,19		
270	6,85800	0,3281340	0,6718660	5270	537,01	88,18	6,09		
280	7,11200	0,3402871	0,6597129	5120	521,73	87,92	5,93		
290	7,36600	0,3524402	0,6475598	5070	516,63	87,67	5,89		
								<p>APROBÓ : ING JAVIER ENRIQUEZ BRAVO</p>	
OBSERVACIONES: Cilindros de Prueba - Material Pasante No. 1/4" fibra de fique 1,0 %, largo de la fibra 5,0 cm, agua adicional 807 ml por cada cilindro									

Fuente: Laboratorio TEC Ingeniería SAS

2.3.3 Muestras al 1.5%de adición

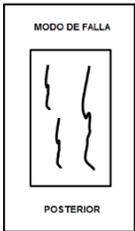
Las muestras falladas con la inclusión del 1.5% de fibras de fique, fueron descritas con material pasante N° ¼", la fibra de fique al 1.5%, con un largo de dicha fibra de 5.0 cm, y agua adicional de 807 ml por cilindro; se realizaron 10 pruebas; dentro de las cuales las numero: 2, 3, 7, y 8 fallaron de forma similar a la 1, con un esquema de falla posterior, cuyos valores se presentan en la figura 35.

Las medidas de la muestra 1, en diámetro mostraron una configuración de 11,00 cm, la altura alcanzo los 21,00 cm, ocupando un área de 95,03 cm³, por lo cual el volumen fue de 1996 cm³ y la humedad alcanzo el 3,50%, ante la prueba el esfuerzo máximo se registró en los 7,82 kg/cm²; el esquema denota que el modo de falla fue posterior.

Las medidas de la muestra 4, que se corresponde con los resultados obtenidos con las muestras 5, 6, 9 y 10; en diámetro mostraron una configuración de 11,00 cm, la altura alcanzo los 21,30 cm, ocupando un área de 95,03 cm³, por lo cual el volumen fue de 2024 cm³ y la humedad alcanzo el 3,50%, ante la prueba el esfuerzo máximo se registró en los 7,29 kg/cm²; el esquema denota que el modo de falla fue anterior; tal cómo se registra en la figura 36.

Figura 35. Muestra al 1.5% de adición de fibras de fique cilindros (1, 2, 3, 7 y 8)

TEC - INGENIERÍA SAS LABORATORIO INTEGRADO DE INGENIERÍA CIVIL		COMPRESION INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS INV E - 152 - 13					
PROYECTO: TRABAJO DE GRADO SOLICITA: JAIRO FUELL - ALBERTO AGUIRRE DESCRIPCIÓN: Material Arena Limosa - Recebo con 1,5% de Fique				MUESTRA: 1 PROF: EDAD 28 DÍAS	FECHA: 21/07/2020 CODIGO: 2-150121CL041 ABSCISA: N/A		
DEFORMACIÓN 10 ⁻²	DEFORMACIÓN cm	DEF UNITARIA ΔH / H	1 - DEF UNIT	CARGA 10 ⁻²	CARGA Kg	AREA CORREGIDA	RESISTENCIA Kg/cm ²
0	0,00000	0,0000000	1,0000000	0	0	0	0
5	0,12700	0,0060476	0,9939524	40	4,08	94,91	0,04
10	0,25400	0,0120952	0,9879048	80	8,15	94,78	0,09
15	0,38100	0,0181429	0,9818571	110	11,21	94,65	0,12
20	0,50800	0,0241905	0,9758095	150	15,29	94,53	0,16
30	0,76200	0,0362857	0,9637143	200	20,38	94,27	0,22
40	1,01600	0,0483810	0,9516190	270	27,51	93,76	0,29
50	1,27000	0,0604762	0,9395238	410	41,78	93,51	0,45
60	1,52400	0,0725714	0,9274286	570	58,08	93,26	0,62
70	1,77800	0,0846667	0,9153333	780	79,48	93,00	0,85
80	2,03200	0,0967619	0,9032381	1020	103,94	92,75	1,12
90	2,28600	0,1088571	0,8911429	1260	128,39	92,49	1,39
100	2,54000	0,1209524	0,8790476	1530	155,91	92,24	1,69
110	2,79400	0,1330476	0,8669524	1790	182,40	91,99	1,98
120	3,04800	0,1451429	0,8548571	2100	213,99	91,73	2,33
130	3,30200	0,1572381	0,8427619	2440	248,64	91,48	2,72
140	3,55600	0,1693333	0,8306667	2730	278,19	91,22	3,05
150	3,81000	0,1814286	0,8185714	3060	311,81	90,97	3,43
160	4,06400	0,1935238	0,8064762	3380	344,42	90,72	3,80
170	4,31800	0,2056190	0,7943810	4060	378,05	90,46	4,18
180	4,57200	0,2177143	0,7822857	4430	413,71	90,21	4,59
190	4,82600	0,2298095	0,7701905	4700	451,42	89,95	5,02
200	5,08000	0,2419048	0,7580952	5030	478,93	89,70	5,34
210	5,33400	0,2540000	0,7460000	5350	512,56	89,45	5,73
220	5,58800	0,2660952	0,7339048	5570	545,17	89,19	6,11
230	5,84200	0,2781905	0,7218095	5780	567,58	88,94	6,38
240	6,09600	0,2902857	0,7097143	6080	588,98	88,68	6,64
250	6,35000	0,3023810	0,6976190	6170	619,55	88,43	7,01
260	6,60400	0,3144762	0,6855238	6340	628,72	88,18	7,13
270	6,85800	0,3265714	0,6734286	6460	646,05	87,92	7,35
280	7,11200	0,3386667	0,6613333	6570	658,27	87,67	7,51
290	7,36600	0,3507619	0,6492381	6630	669,48	87,41	7,66
300	7,62000	0,3628571	0,6371429	6670	675,60	87,16	7,75
310	7,87400	0,3749524	0,6250476	6680	679,67	86,91	7,82
320	8,12800	0,3870476	0,6129524	6650	680,69	86,65	7,86
330	8,38200	0,3991429	0,6008571	6630	677,64	86,40	7,84
340	8,63600	0,4112381	0,5887619				

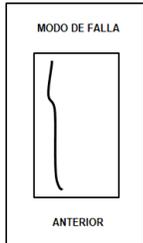
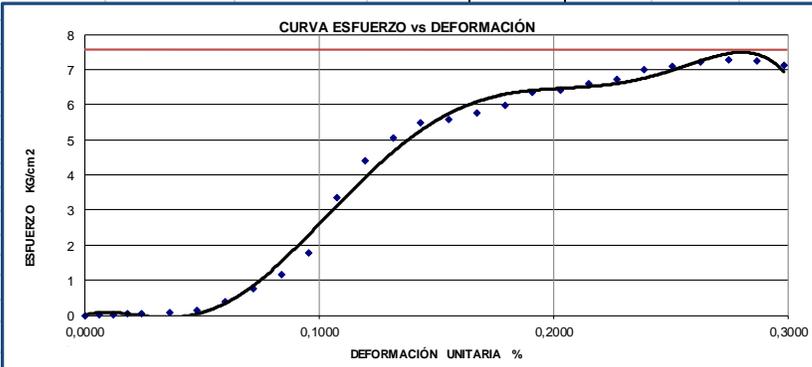
MEDIDAS DE LA MUESTRA	
DIAMETRO	11,00 cm
ALTURA	21,00 cm
AREA	95,03 cm ²
VOLUMEN	1996 cm ³
HUMEDAD DEL MATERIAL	3,50 %
PESO SECO DE LA MUESTRA: 3,269 gr	
CONSTANTE DE LA CELDA (N)	
0,1019	
AREA CORREGIDA	
Ac	Ao 1 - def unitaria
ESFUERZO MAXIMO = δ	
7,82 kg/cm ²	
C= Cohesión	C= qu/2: 3,910
ESQUEMA DE LA FALLA	
	
APROBÓ : ING JAVIER ENRIQUEZ BRAVO	

CURVA ESFUERZO vs DEFORMACIÓN



OBSERVACIONES: Material Pasante No. 1/4", fibra de fique 1,5 %, largo de la fibra 5,0 cm, agua adicional 807 ml por cada cilindro.

Figura 36. Muestra al 1.5% de adición de fibras de fique cilindros (4, 5, 6, 9 y 10)

TEC - INGENIERÍA SAS LABORATORIO INTEGRADO DE INGENIERÍA CIVIL		COMPRESION INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS INV E - 152 - 13							
PROYECTO: TRABAJO DE GRADO SOLICITA: INGENIERO JAIRO FUELL - ARQ. ALBERTO AGUIRRE DESCRIPCIÓN: Material Arena Limosa - Recebo con 1,5% de Fique				MUESTRA: 4 PROF: EDAD 28 DÍAS	FECHA: 21/07/2020 CODIGO: 2-150121CL041 ABSCISA: N/A				
DEFORMACIÓN 10 ⁻²	DEFORMACIÓN cm	DEF UNITARIA ΔH / H	1 - DEF UNIT	CARGA 10 ⁻²	CARGA Kg	AREA CORREGIDA	RESISTENCIA Kg/cm ²	MEDIDAS DE LA MUESTRA	
0	0,00000	0,0000000	1,0000000	0	0	0	0	DIAMETRO	11,00 cm
5	0,12700	0,0059624	0,9940376	20	2,04	94,91	0,02	ALTURA	21,30 cm
10	0,25400	0,0119249	0,9880751	30	3,06	94,78	0,03	AREA	95,03 cm ³
15	0,38100	0,0178873	0,9821127	40	4,08	94,65	0,04	VOLUMEN	2024 cm ³
20	0,50800	0,0238498	0,9761502	60	6,11	94,53	0,06	HUMEDAD DEL MATERIAL	3,50 %
30	0,76200	0,0357746	0,9642254	80	8,15	94,27	0,09	PESO SECO DE LA MUESTRA: 3,218 gr	
40	1,01600	0,0476995	0,9523005	120	12,23	94,02	0,13	CONSTANTE DE LA CELDA (N)	
50	1,27000	0,0596244	0,9403756	350	35,67	93,76	0,38	0,1019	
60	1,52400	0,0715493	0,9284507	690	70,31	93,51	0,75	AREA CORREGIDA	
70	1,77800	0,0834742	0,9165258	1070	109,03	93,26	1,17	Ac Ao 1 - def unitaria	
80	2,03200	0,0953991	0,9046009	1620	165,08	93,00	1,78	ESFUERZO MAXIMO = δ	
90	2,28600	0,1073239	0,8926761	3040	309,78	92,75	3,34	7,29 kg/cm ²	
100	2,54000	0,1192488	0,8807512	3990	406,58	92,49	4,40	C=Cohesión C= qu/2 = 3,645	
110	2,79400	0,1311737	0,8688263	4560	464,66	92,24	5,04	ESQUEMA DE LA FALLA	
120	3,04800	0,1430986	0,8569014	4960	505,42	91,99	5,49	 <p>MODULO DE FALLA</p> <p>ANTERIOR</p>	
130	3,30200	0,1550235	0,8449765	5010	510,52	91,73	5,57		
140	3,55600	0,1669484	0,8330516	5160	525,80	91,48	5,75		
150	3,81000	0,1788732	0,8211268	5350	545,17	91,22	5,98		
160	4,06400	0,1907981	0,8092019	5680	578,79	90,97	6,36		
170	4,31800	0,2027230	0,7972770	5700	580,83	90,72	6,40		
180	4,57200	0,2146479	0,7853521	5850	596,12	90,46	6,59		
190	4,82600	0,2265728	0,7734272	5950	606,31	90,21	6,72		
200	5,08000	0,2384977	0,7615023	6190	630,76	89,95	7,01		
210	5,33400	0,2504225	0,7495775	6230	634,84	89,70	7,08		
220	5,58800	0,2623474	0,7376526	6330	645,03	89,45	7,21		
230	5,84200	0,2742723	0,7257277	6380	650,12	89,19	7,29		
240	6,09600	0,2861972	0,7138028	6320	644,01	88,94	7,24		
250	6,35000	0,2981221	0,7018779	6190	630,76	88,68	7,11		
								APROBÓ : ING JAVIER ENRIQUEZ BRAVO	
OBSERVACIONES: Material Pasante No. 1/4", fibra de fique 1,5 % largo de la fibra 5,0 cm, agua adicional 807 ml por cada cilindro.									

Fuente: Laboratorio TEC Ingeniería SAS

2.3.4 Muestras al 2.0%de adición

Las muestras falladas con la inclusión del 2.0% de fibras de fique, fueron descritas con material pasante N° ¼", la fibra de fique al 2.0%, con un largo de dicha fibra de 5.0 cm, y agua adicional de 807 ml por cilindro; se realizaron 9 pruebas; dentro de las cuales las numero: 2, 5, 6, y 7 fallaron de forma similar a la 1, con un esquema de falla anterior, cuyos valores se presentan en la figura 37.

Las medidas de la muestra 1, en diámetro mostraron una configuración de 11,00 cm, la altura alcanzo los 21,30 cm, ocupando un área de 95,03 cm³, por lo cual el volumen fue de 2024 cm³ y la humedad alcanzo el 3,50%, ante la prueba el esfuerzo máximo se registró en los 8,41 kg/cm²; el esquema denota que el modo de falla fue anterior.

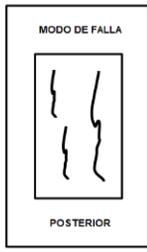
Las medidas de la muestra 3, que se corresponde con los resultados obtenidos con las muestras 4, 8 y 9; en diámetro mostraron una configuración de 11,00 cm, la altura alcanzo los 21,00 cm, ocupando un área de 95,03 cm³, por lo cual el volumen fue de 1996 cm³ y la humedad alcanzo el 3,50%, ante la prueba el esfuerzo máximo se registró en los 7,82 kg/cm²; el esquema denota que el modo de falla fue posterior; tal cómo se registra en la figura 38.

Figura 37. Muestra al 2.0% de adición de fibras de fique cilindros (1, 2, 5, 6, y 7)

TEC - INGENIERÍA SAS LABORATORIO INTEGRADO DE INGENIERÍA CIVIL		COMPRESION INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS INV E - 152 - 13							
PROYECTO: TRABAJO DE GRADO SOLICITA: JAIRO FUELL - ALBERTO AGUIRRE DESCRIPCIÓN: Material Arena Limosa - Recebo con 2,0% de Fique				MUESTRA: 1 PROF: EDAD 28 DÍAS	FECHA: 21/08/2020 CODIGO: 2-150121CL041 ABSCISA: N/A				
DEFORMACIÓN 10 ⁻²	DEFORMACIÓN cm	DEF UNITARIA ΔH/H	1 - DEF UNIT	CARGA 10 ⁻²	CARGA Kg	AREA CORREGIDA	RESISTENCIA Kg/cm ²	MEDIDAS DE LA MUESTRA	
0	0,0000	0,000000	1,0000000	0	0	0	0	DIAMETRO	11,00 cm
5	0,12700	0,0059624	0,9940376	20	2,04	94,91	0,02	ALTURA	21,30 cm
10	0,25400	0,0119249	0,9880751	40	4,08	94,78	0,04	AREA	95,03 cm ³
15	0,38100	0,0178873	0,9821127	60	6,11	94,65	0,06	VOLUMEN	2024 cm ³
20	0,50800	0,0238498	0,9761502	70	7,13	94,53	0,08	HUMEDAD DEL MATERIAL	3,50 %
30	0,76200	0,0357746	0,9642254	110	11,21	94,27	0,12	PESO SECO DE LA MUESTRA: 3,260 gr	
40	1,01600	0,0476995	0,9523005	150	15,29	94,02	0,16	CONSTANTE DE LA CELDA (N)	
50	1,27000	0,0596244	0,9403756	260	26,49	93,76	0,28	0,1019	
60	1,52400	0,0715493	0,9284507	380	38,72	93,51	0,41	AREA CORREGIDA	
70	1,77800	0,0834742	0,9165258	580	59,10	93,26	0,63	Ac Ao 1 - def unitaria	
80	2,03200	0,0953991	0,9046009	840	85,60	93,00	0,92	ESFUERZO MAXIMO = δ	
90	2,28600	0,1073239	0,8926761	1150	117,19	92,75	1,26	8,41 kg/cm ²	
100	2,54000	0,1192488	0,8807512	1530	155,91	92,49	1,69	C=Cohesión C= qu/2 = 4,204	
110	2,79400	0,1311737	0,8688263	1960	199,72	92,24	2,17	ESQUEMA DE LA FALLA	
120	3,04800	0,1430986	0,8569014	2360	240,48	91,99	2,61	MODO DE FALLA	
130	3,30200	0,1550235	0,8449765	2820	287,36	91,73	3,13	ANTERIOR	
140	3,55600	0,1669484	0,8330516	3380	344,42	91,48	3,77	APROBÓ : ING JAVIER ENRIQUEZ BRAVO	
150	3,81000	0,1788732	0,8211268	3890	396,39	91,22	4,35		
160	4,06400	0,1907981	0,8092019	4520	460,59	90,97	5,06		
170	4,31800	0,2027230	0,7972770	5130	522,75	90,72	5,76		
180	4,57200	0,2146479	0,7853521	5810	592,04	90,46	6,54		
190	4,82600	0,2265728	0,7734272	6460	658,27	90,21	7,30		
200	5,08000	0,2384977	0,7615023	6940	707,19	89,95	7,86		
210	5,33400	0,2504225	0,7495775	7260	739,79	89,70	8,25		
220	5,58800	0,2623474	0,7376526	7380	752,02	89,45	8,41		
230	5,84200	0,2742723	0,7257277	7260	739,79	89,19	8,29		
240	6,09600	0,2861972	0,7138028	7160	729,60	88,94	8,20		
OBSERVACIONES: Material Pasante No. 1/4" - fibra de fique 2,0 %, largo de la fibra 5,0 cm, agua adicional 807 ml por cada cilindro									

Fuente: Laboratorio TEC Ingeniería SAS

Figura 38. Muestra al 2.0% de adición de fibras de fique cilindros (3, 4, 8 y 9)

TEC - INGENIERÍA SAS LABORATORIO INTEGRADO DE INGENIERÍA CIVIL		COMPRESION INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS INV E - 152 - 13							
PROYECTO: TRABAJO DE GRADO SOLICITA: JAIRO FUELL - ALBERTO AGUIRRE DESCRIPCIÓN: Material Arena Limosa - Recebo con 2,0% de Fique				MUESTRA: 3 PROF: EDAD 28 DÍAS	FECHA: 21/08/2020 CODIGO: 2-150121CL041 ABSCISA: N/A				
DEFORMACIÓN 10 ⁻²	DEFORMACIÓN cm	DEF UNITARIA ΔH/H	1 - DEF UNIT	CARGA 10 ⁻²	CARGA Kg	AREA CORREGIDA	RESISTENCIA Kg/cm ²	MEDIDAS DE LA MUESTRA	
0	0,00000	0,0000000	1,0000000	0	0	0	0	DIAMETRO	10,90 cm
5	0,12700	0,0060476	0,9939524	20	2,04	93,19	0,02	ALTURA	21,00 cm
10	0,25400	0,0120952	0,9879048	70	7,13	93,06	0,08	AREA	93,31 cm ³
15	0,38100	0,0181429	0,9818571	120	12,23	92,93	0,13	VOLUMEN	1960 cm ³
20	0,50800	0,0241905	0,9758095	180	18,34	92,81	0,20	HUMEDAD DEL MATERIAL	3,50 %
30	0,76200	0,0362857	0,9637143	220	22,42	92,55	0,24	PESO HUMEDO DE LA MUESTRA: 3,280 gr	
40	1,01600	0,0483810	0,9516190	290	29,55	92,30	0,32	CONSTANTE DE LA CELDA (N)	
50	1,27000	0,0604762	0,9395238	410	41,78	92,04	0,45	0,1019	
60	1,52400	0,0725714	0,9274286	640	65,22	91,79	0,71	AREA CORREGIDA	
70	1,77800	0,0846667	0,9153333	1150	117,19	91,54	1,28	Ac	Ao 1 - def unitaria
80	2,03200	0,0967619	0,9032381	1910	194,63	91,28	2,13	ESFUERZO MAXIMO = δ	
90	2,28600	0,1088571	0,8911429	2480	252,71	91,03	2,78	7,85 kg/cm ²	
100	2,54000	0,1209524	0,8790476	3170	323,02	90,77	3,56	C=Cohesión C= qu/2 = 3,927	
110	2,79400	0,1330476	0,8669524	3810	388,24	90,52	4,29	ESQUEMA DE LA FALLA	
120	3,04800	0,1451429	0,8548571	4400	448,36	90,27	4,97	 <p>MODO DE FALLA POSTERIOR</p>	
130	3,30200	0,1572381	0,8427619	4820	491,16	90,01	5,46		
140	3,55600	0,1693333	0,8306667	5370	547,20	89,76	6,10		
150	3,81000	0,1814286	0,8185714	5690	579,81	89,50	6,48		
160	4,06400	0,1935238	0,8064762	6050	616,50	89,25	6,91		
170	4,31800	0,2056190	0,7943810	6350	647,07	89,00	7,27		
180	4,57200	0,2177143	0,7822857	6560	668,46	88,74	7,53		
190	4,82600	0,2298095	0,7701905	6730	685,79	88,49	7,75		
200	5,08000	0,2419048	0,7580952	6800	692,92	88,23	7,85		
210	5,33400	0,2540000	0,7460000	6780	690,88	87,98	7,85		
220	5,58800	0,2660952	0,7339048	6670	679,67	87,73	7,75		
230	5,84200	0,2781905	0,7218095	5910	602,23	87,47	6,88		
								<p>APROBÓ: ING JAVIER ENRIQUEZ BRAVO</p>	
OBSERVACIONES: Material Pasante No. 1/4" - fibra de fique 2,0 %, largo de la fibra 5,0 cm, agua adicional 807 ml por cada cilindro									

Fuente: Laboratorio TEC Ingeniería SAS

2.4 Vigas

El proceso seguido para la conformación de las vigas tanto al natural como con la adición de fibras siguió los lineamientos presentes en la norma, la secuencia se resume en la figura 39.

Figura 39. Conformación de vigas



Fuente: los Autores

Ahora bien, las pruebas realizadas a las vigas se realizaron en dos fases, la fase uno comprendió la falla de las vigas en estado natural, en la fase dos se valoró la respuesta de las vigas con la adición de fibras de fique; en el caso de las vigas al natural, el ensayo a flexión fue realizado a nueve muestras, las cuales reportaron resultados similares.

Los especímenes presentaron en sus medidas: de lado 10,00cm, con una longitud de 30,00cm cubriendo un área de 100,0cm y por consiguiente un volumen de 3000cm³; el esfuerzo máximo alcanzado fue de 0,37kg/cm², por lo cual el registro de resistencia fue de 2,48, esto de acuerdo a lo presentado en la figura 40; en ese sentido los resultados alcanzados por las nueve muestras se consignan en la tabla 18.

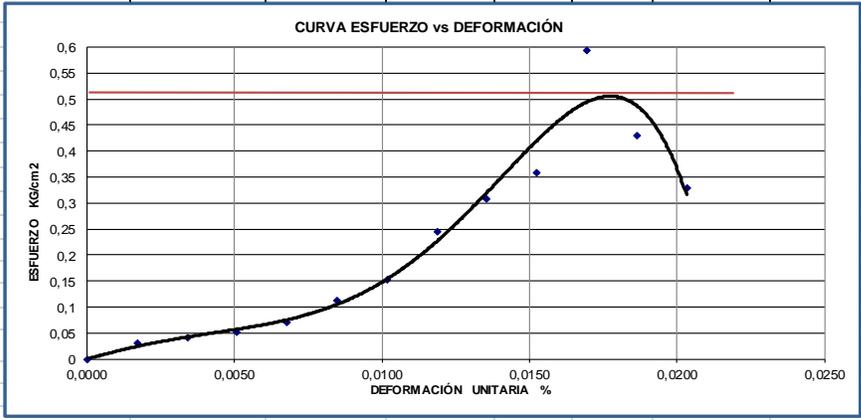
Tabla 18. Resultados viga al natural

Muestra	Esfuerzo máximo	Registro de resistencia
1	0,37kg/cm ²	2,48
2	0,59kg/cm ²	4,00
3	0,49kg/cm ²	1,24
4	0,43kg/cm ²	1,86
5	0,49kg/cm ²	1,86
6	0,53kg/cm ²	3,59
7	0,48kg/cm ²	2,69
8	0,47kg/cm ²	3,03
9	0,41kg/cm ²	2,00

Fuente: los Autores

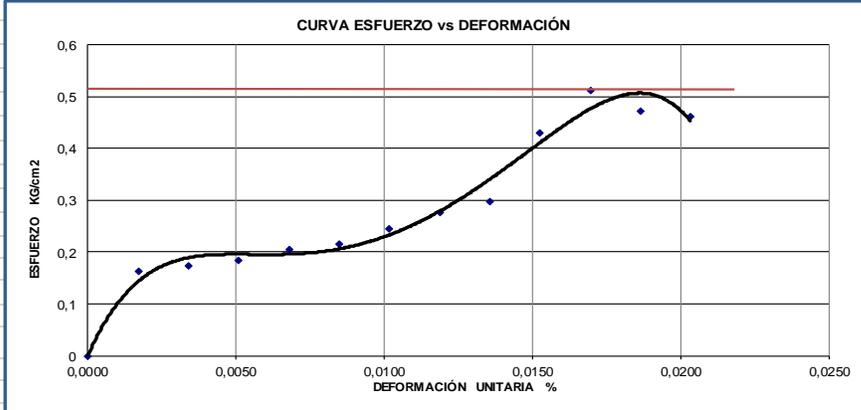
Después se realizaron los ensayos con la adición de fibras de fique al 2,0%, estos especímenes presentaron en sus medidas: de lado 10,00cm, con una longitud de 30,00cm cubriendo un área de 100,0cm y por consiguiente un volumen de 3000cm³; el esfuerzo máximo alcanzado fue de 0,51kg/cm², por lo cual el registro de resistencia en Mpa de 3,45, esto de acuerdo a lo presentado en la figura 41; en ese sentido los resultados alcanzados por las nueve muestras se consignan en la tabla 19.

Figura 40. Ensayo a flexión de vigas – estado natural

		ENSAYO A FLEXION ASTM D6108						LAB-TEC-RS-009 VERSION :0 SEPTIEMBRE 2 DE 2018	
PROYECTO:	TRABAJO DE GRADO					FECHA :	27/08/2020		
SOLICITANTE:	JAIRO FUELL - ALBERTO AGUIRRE					CODIGO :	2-150121CL041		
DESCRIPCIÓN:	MUESTRA CON 27% DE HUMEDAD - AGUA ADICIONAL 805 ml					EDAD:	28 DÍAS		MUESTRA No. 2
DEFORMACIÓN SEGUNDOS	DEFORMACIÓN cm	DEF UNITARIA ΔH / H	1 - DEF UNIT	CARGA KN	CARGA Kg	AREA CORREGIDA	RESISTENCIA Kg/cm ²	MEDIDAS DE LA MUESTRA	
0	0,00000	0,0000000	1,0000000	0	0	0	0	LADO	10,00 cm
20	0,05080	0,0016933	0,9983067	30	3,06	99,95	0,03	LONGITUD	30,00 cm
40	0,10160	0,0033867	0,9966133	40	4,08	99,90	0,04	AREA	100,0 cm
60	0,15240	0,0050800	0,9949200	50	5,10	99,85	0,05	VOLUMEN	3000 cm ³
80	0,20320	0,0067733	0,9932267	70	7,13	99,80	0,07	PESO DE LA MUESTRA	
100	0,25400	0,0084667	0,9915333	110	11,21	99,75	0,11	PESO HUMEDO	2197 gr
120	0,30480	0,0101600	0,9898400	150	15,29	99,70	0,15	PESO SECO	2143 gr
140	0,35560	0,0118533	0,9881467	240	24,46	99,64	0,25	HUMEDAD	2,5 %
160	0,40640	0,0135467	0,9864533	300	30,57	99,59	0,31	PESO UNITARIO	
180	0,45720	0,0152400	0,9847600	350	35,67	99,54	0,36	PESO UNITARIO HUMEDO =	0,73
200	0,50800	0,0169333	0,9830667	580	59,10	99,49	0,59	PESO UNITARIO SECO =	0,71
220	0,55880	0,0186267	0,9813733	420	42,80	99,44	0,43	CONSTANTE DEL ANILLO DE CARGA	
240	0,60960	0,0203200	0,9796800	320	32,61	99,39	0,33	0,1019 Kg	
								AREA CORREGIDA	
								Ac	Ao 1 - def unitaria
								ESFUERZO MAXIMO = δ	
								0,59 kg/cm ²	
								C = qu/2 =	
								0,297	
								RESISTENCIA EN Mpa.	
								4,00	
									
									
OBSERVACIONES: VIGAS CON MATERIAL NATURAL									
DATOS DE ELABORACIÓN									
ELABORADO POR:					REVISADO POR:				
CARGO:	LABORATORISTA DE GEOTECNIA				I.C. Esp. GEOTECNIA VIAL Y PAVIMENTOS				
NOMBRE:	ALEXANDER SANTA CRUZ MUÑOZ				JAVIER ENRIQUEZ BRAVO				

Fuente: Laboratorio TEC Ingeniería SAS

Figura 41. Ensayo de flexión de vigas con adición de fibras al 2.0%

		ENSAYO A FLEXION ASTM D6108						LAB-TEC-RS-009 VERSION :0 SEPTIEMBRE 2 DE 2018	
PROYECTO:	TRABAJO DE GRADO					FECHA :	15/09/2020		
SOLICITANTE:	JAIRO FUELL - ALBERTO AGUIRRE					CODIGO :	2-150121CL041		
DESCRIPCIÓN:	MUESTRA CON 2,0% DE FIQUE					EDAD:	28 DÍAS		
MUESTRA No.	1								
DEFORMACIÓN SEGUNDOS	DEFORMACIÓN cm	DEF UNITARIA ΔH / H	1 - DEF UNIT	CARGA KN	CARGA Kg	AREA CORREGIDA	RESISTENCIA Kg/cm ²	MEDIDAS DE LA MUESTRA	
0	0,00000	0,0000000	1,0000000	0	0	0	0	LADO	10,00 cm
20	0,05080	0,0016933	0,9983067	160	16,30	99,95	0,16	LONGITUD	30,00 cm
40	0,10160	0,0033867	0,9966133	170	17,32	99,90	0,17	AREA	100,0 cm
60	0,15240	0,0050800	0,9949200	180	18,34	99,85	0,18	VOLUMEN	3000 cm ³
80	0,20320	0,0067733	0,9932267	200	20,38	99,80	0,20	PESO DE LA MUESTRA	
100	0,25400	0,0084667	0,9915333	210	21,40	99,75	0,21	PESO HUMEDO	2197 gr
120	0,30480	0,0101600	0,9898400	240	24,46	99,70	0,25	PESO SECO	2143 gr
140	0,35560	0,0118533	0,9881467	270	27,51	99,64	0,28	HUMEDAD	2,5 %
160	0,40640	0,0135467	0,9864533	290	29,55	99,59	0,30	PESO UNITARIO	
180	0,45720	0,0152400	0,9847600	420	42,80	99,54	0,43	PESO UNITARIO HUMEDO =	0,73
200	0,50800	0,0169333	0,9830667	500	50,95	99,49	0,51	PESO UNITARIO SECO =	0,71
220	0,55880	0,0186267	0,9813733	460	46,87	99,44	0,47	CONSTANTE DEL ANILLO DE CARGA	
240	0,60960	0,0203200	0,9796800	450	45,86	99,39	0,46	0,1019 Kg	
								AREA CORREGIDA	
								Ac	Ao 1 - def unitaria
								ESFUERZO MAXIMO = δ	
								0,51 kg/cm ²	
								C = qu/2 =	
								0,256	
								RESISTENCIA EN Mpa.	
								3,45	
									
OBSERVACIONES: - 27% DE HUMEDAD - AGUA ADICIONAL 805 ml									
DATOS DE ELABORACIÓN									
ELABORADO POR:					REVISADO POR:				
CARGO:	LABORATORISTA DE GEOTECNIA				I.C. Esp. GEOTECNIA VIAL Y PAVIMENTOS				
NOMBRE:	ALEXANDER SANTA CRUZ MUÑOZ				JAVIER ENRIQUEZ BRAVO				

Fuente: Laboratorio TEC Ingeniería SAS

Tabla 19. Resultados viga con adición al 20%

Muestra	Esfuerzo máximo	Registro de resistencia
1	0,51kg/cm ²	3,45
2	0,74kg/cm ²	4,96
3	0,64kg/cm ²	2,21
4	0,58kg/cm ²	2,9
5	0,66kg/cm ²	2,96
6	0,71kg/cm ²	4,76
7	0,66kg/cm ²	3,86
8	0,59kg/cm ²	3,86
9	0,60kg/cm ²	3,31

Fuente: los Autores

Con lo expuesto en este segmento se da respuesta al último objetivo específico propuesto, en tanto se dirigió a establecer la resistencia a la flexión del material fino sin adición de fibras versus la adición en porcentajes de residuos de fibras de fique para así determinar la eficiencia del material adicionado.

2.5 Promedios consolidados

Acudiendo a la estadística descriptiva se establecieron los promedios consolidados, los cuales responden a las muestras falladas, primero para las muestras con el suelo natural sin adición; obteniendo los resultados que se presentan en la tabla 20.

En donde para los especímenes 1, 2, y 3, el promedio de la fuerza axial (KN) se registró en 36,87 y la resistencia a la deformación máxima (K/cm²) se promedió en 4,56; en cuanto a los especímenes 4, 5, y 6, el promedio de la fuerza axial (KN) se registró en 50,77 y la resistencia a la deformación máxima (K/cm²) se promedió en 6,44; en tanto que para los especímenes 7, 8, y 9, el promedio de la fuerza axial (KN)

se registró en 42,67 y la resistencia a la deformación máxima (K/cm²) se promedió en 5,53.

Tabla 20. Promedio consolidado sin adición de fibras

Ensayos con suelo natural			
Peso Muestra (gr.)	Especimen	Fuerza Axial (KN)	Resistencia a la deformación máxima (K/CM2)
3.268	1	38,70	4,90
3.286	2	33,00	3,97
3.159	3	38,90	4,82
Promedio		36,87	4,56

Ensayos con suelo natural			
Peso Muestra (gr.)	Especimen	Fuerza Axial (KN)	Resistencia al Esfuerzo Cortante de Rotura (K/CM2)
3.194	4	55,30	7,14
3.159	5	48,00	6,17
3.224	6	49,00	6,00
Promedio		50,77	6,44

Ensayos con suelo natural			
Peso Muestra (gr.)	Especimen	Fuerza Axial (KN)	Resistencia al Esfuerzo Cortante de Rotura (K/CM2)
3.290	7	36,60	4,83
3.285	8	43,00	5,51
3.285	9	48,40	6,25
Promedio		42,67	5,53

Fuente: los Autores

Luego se promediaron los valores para las muestras con el suelo natural más la adición de fibras al 0,5%; obteniendo los resultados que se presentan en la tabla 21.

En donde para los especímenes 1, 2, y 3, el promedio de la fuerza axial (KN) se registró en 53,43 y la resistencia a la deformación máxima (K/cm²) se promedió en 6,01; en cuanto a los especímenes 4, 5, y 6, el promedio de la fuerza axial (KN) se registró en 54,23 y la resistencia a la deformación máxima (K/cm²) se promedió en

6,09; en tanto que para los especímenes 7, 8, y 9, el promedio de la fuerza axial (KN) se registró en 49,63 y la resistencia a la deformación máxima (K/cm²) se promedió en 5,67.

Tabla 21. Promedio consolidado con adición de fibras al 0,5%

Ensayos suelo natural mas 0.5% fibra natural (fique)			
Peso Muestra (gr.)	Especimen	Fuerza Axial (KN)	Resistencia a la deformación máxima (K/CM2)
3.235	1	52,00	5,76
3.281	2	52,00	5,85
3.159	3	56,30	6,43
Promedio		53,43	6,01

Ensayos suelo natural mas 0.5% fibra natural (fique)			
Peso Muestra (gr.)	Especimen	Fuerza Axial (KN)	Resistencia a la deformación máxima (K/CM2)
3.159	4	62,50	7,15
3.159	5	45,30	5,13
3.224	6	54,90	5,98
Promedio		54,23	6,09

Ensayos suelo natural mas 0.5% fibra natural (fique)			
Peso Muestra (gr.)	Especimen	Fuerza Axial (KN)	Resistencia a la deformación máxima (K/CM2)
3.224	7	56,10	6,07
3.176	8	46,30	5,46
3.178	9	46,50	5,48
Promedio		49,63	5,67

Fuente: los Autores

Después se promediaron los valores para las muestras con el suelo natural más la adición de fibras al 1,0%; obteniendo los resultados que se presentan en la tabla 22.

En donde para los especímenes 1, 2, y 3, el promedio de la fuerza axial (KN) se registró en 53,43 y la resistencia a la deformación máxima (K/cm²) se promedió en

6,01; en cuanto a los especímenes 4, 5, y 6, el promedio de la fuerza axial (KN) se registró en 54,23 y la resistencia a la deformación máxima (K/cm²) se promedió en 6,09; en tanto que para los especímenes 7, 8, y 9, el promedio de la fuerza axial (KN) se registró en 49,63 y la resistencia a la deformación máxima (K/cm²) se promedió en 5,67.

Tabla 22. Promedio consolidado con adición de fibras al 1,0%

Ensayos suelo natural mas 1.0% fibra natural (fique)			
Peso Muestra (gr.)	Espécimen	Fuerza Axial (KN)	Resistencia a la deformación máxima (K/CM2)
3.324	1	50,90	5,88
3.366	2	55,00	6,37
3.362	3	54,70	6,19
Promedio		53,53	6,15

Ensayos suelo natural mas 1.0% fibra natural (fique)			
Peso Muestra (gr.)	Espécimen	Fuerza Axial (KN)	Resistencia a la deformación máxima (K/CM2)
3.159	4	67,00	7,63
3.159	5	68,40	7,66
3.160	6	69,00	7,72
Promedio		68,13	7,67

Ensayos suelo natural mas 1.0% fibra natural (fique)			
Peso Muestra (gr.)	Espécimen	Fuerza Axial (KN)	Resistencia a la deformación máxima (K/CM2)
3.366	7	55,30	6,40
3.366	8	55,70	6,45
3.159	9	67,40	7,67
Promedio		59,47	6,84

Fuente: los Autores

Acto seguido se promediaron los valores para las muestras con el suelo natural más la adición de fibras al 1,5%; obteniendo los resultados que se presentan en la tabla 23. En donde para los especímenes 1, 2, y 3, el promedio de la fuerza axial (KN)

se registró en 71,40 y la resistencia a la deformación máxima (K/cm²) se promedió en 8,08; en cuanto a los especímenes 4, 5, y 6, el promedio de la fuerza axial (KN) se registró en 71,83 y la resistencia a la deformación máxima (K/cm²) se promedió en 7,93; en tanto que para los especímenes 7, 8, y 9, el promedio de la fuerza axial (KN) se registró en 67,53 y la resistencia a la deformación máxima (K/cm²) se promedió en 7,68.

Tabla 23. Promedio consolidado con adición de fibras al 1,5%

Ensayos suelo natural mas 1.5% fibra natural (fique)			
Peso Muestra (gr.)	Espécimen	Fuerza Cortante de Rotura (KN)	Resistencia a la deformación máxima (K/CM2)
3.269	1	67,90	7,82
3.281	2	69,30	7,89
3.159	3	77,00	8,52
Promedio		71,40	8,08

Ensayos suelo natural mas 1.5% fibra natural (fique)			
Peso Muestra (gr.)	Espécimen	Fuerza Cortante de Rotura (KN)	Resistencia a la deformación máxima (K/CM2)
3.218	4	65,00	7,29
3.258	5	75,20	8,41
3.196	6	75,30	8,10
Promedio		71,83	7,93

Ensayos suelo natural mas 1.5% fibra natural (fique)			
Peso Muestra (gr.)	Espécimen	Fuerza Cortante de Rotura (KN)	Resistencia a la deformación máxima (K/CM2)
3.265	7	68,20	7,86
3.280	8	69,20	7,88
3.220	9	65,20	7,31
Promedio		67,53	7,68

Fuente: los Autores

Finalmente se promediaron los valores para las muestras con el suelo natural más la adición de fibras al 2,0%; obteniendo los resultados que se presentan en la tabla 24.

En donde para los especímenes 1, 2, y 3, el promedio de la fuerza axial (KN) se registró en 69,77 y la resistencia a la deformación máxima (K/cm²) se promedió en 7,85; en cuanto a los especímenes 4, 5, y 6, el promedio de la fuerza axial (KN) se registró en 72,73 y la resistencia a la deformación máxima (K/cm²) se promedió en 8,10; en tanto que para los especímenes 7, 8, y 9, el promedio de la fuerza axial (KN) se registró en 70,23 y la resistencia a la deformación máxima (K/cm²) se promedió en 7,87.

Tabla 24. Promedio consolidado con adición de fibras al 2,0%

Ensayos suelo natural mas 2.0% fibra natural (fique)			
Peso Muestra (gr.)	Especimen	Fuerza Cortante de Rotura (KN)	Resistencia a la deformación máxima (K/CM2)
3.260	1	75,20	8,41
3.220	2	65,10	7,30
3.280	3	69,00	7,85
Promedio		69,77	7,85

Ensayos suelo natural mas 2.0% fibra natural (fique)			
Peso Muestra (gr.)	Especimen	Fuerza Cortante de Rotura (KN)	Resistencia a la deformación máxima (K/CM2)
3.265	4	67,90	7,82
3.196	5	75,20	8,09
3.258	6	75,10	8,40
Promedio		72,73	8,10

Ensayos suelo natural mas 2.0% fibra natural (fique)			
Peso Muestra (gr.)	Especimen	Fuerza Cortante de Rotura (KN)	Resistencia a la deformación máxima (K/CM2)
3.218	7	64,90	7,28
3.159	8	76,70	8,48
3.281	9	69,10	7,86
Promedio		70,23	7,87

Fuente: los Autores

En atención a los resultados del promedio consolidado, la fuerza axial en los diferentes tipos de muestras fallados se comportó como se registra en la tabla 25.

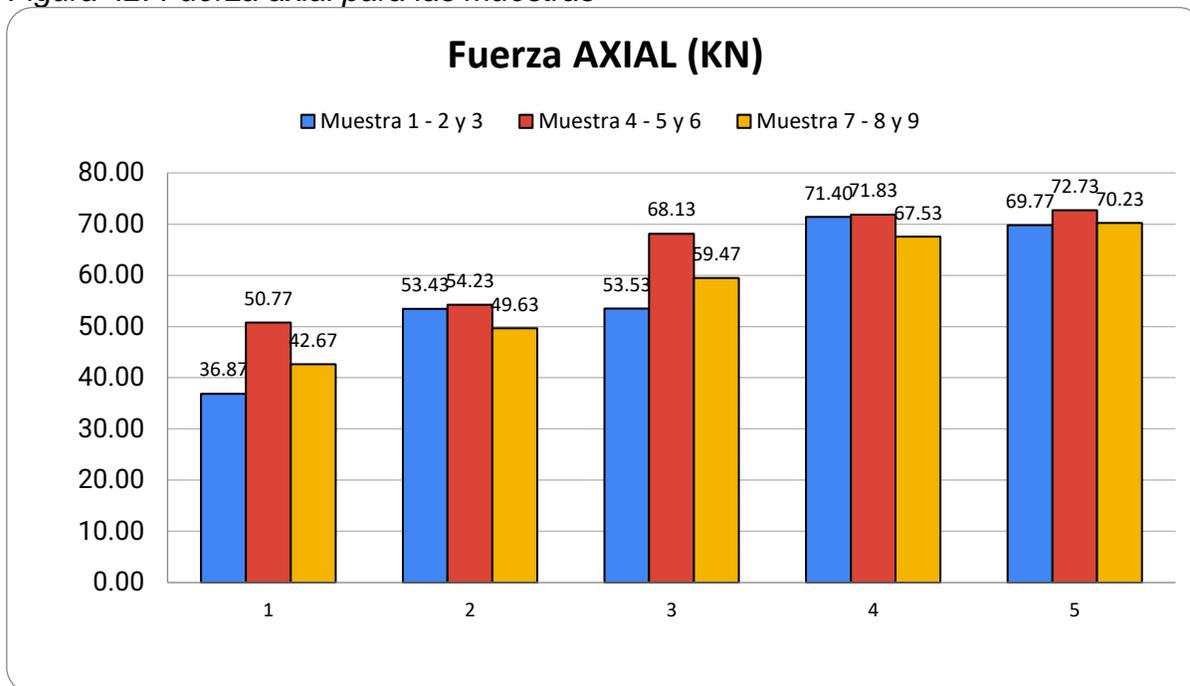
Tabla 25. Fuerza axial de las muestras

FUERZA AXIAL (KN)					
	MUESTRA NATURAL	MUESTRA 0,5%	MUESTRA 1,0%	MUESTRA 1,5%	MUESTRA 2,0%
Muestra 1 - 2 y 3	36,87	53,43	53,53	71,40	69,77
Muestra 4 - 5 y 6	50,77	54,23	68,13	71,83	72,73
Muestra 7 - 8 y 9	42,67	49,63	59,47	67,53	70,23

Fuente: los Autores

Es decir que al revisar los valores obtenidos se hace evidente la eficiencia del material adicionado en las muestras con 1,5% y 2,0%, con lo cual se obtienen los resultados esperados de acuerdo al tercer objetivo específico, lo cual se refleja de forma gráfica en la figura 42.

Figura 42. Fuerza axial para las muestras



Fuente: los Autores

En cuanto a la resistencia a la deformación (K/cm^2) y en atención a los resultados del promedio consolidado, resistencia en los diferentes tipos de muestras fallados se comportó como se registra en la tabla 26.

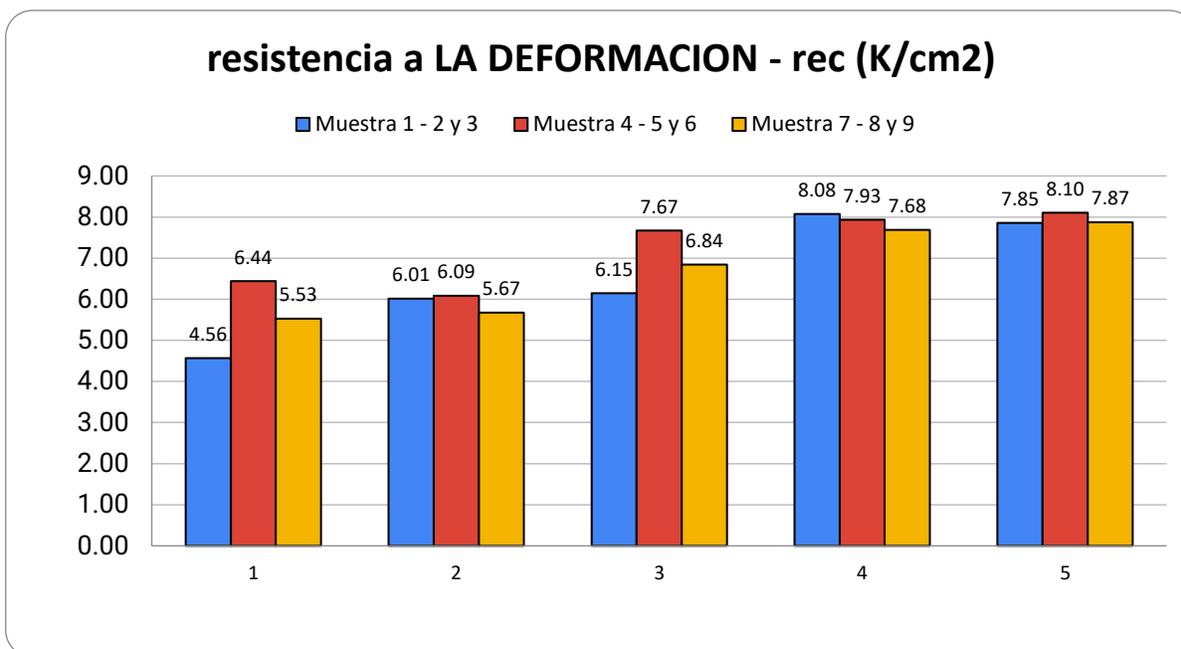
Tabla 26. Resistencia a la deformación en todas las muestras

RESISTENCIA A LA DEFORMACION (K/cm ²)					
	MUESTRA NATURAL	MUESTRA 0,5%	MUESTRA 1,0%	MUESTRA 1,5%	MUESTRA 2,0%
Muestra 1 - 2 y 3	4,56	6,01	6,15	8,08	7,85
Muestra 4 - 5 y 6	6,44	6,09	7,67	7,93	8,10
Muestra 7 - 8 y 9	5,53	5,67	6,84	7,68	7,87

Fuente: los Autores

Es decir que al revisar los valores obtenidos se hace evidente la eficiencia del material adicionado en las muestras con 1,5% y 2,0%, con lo cual se obtienen los resultados esperados de acuerdo al tercer objetivo específico, lo cual se refleja de forma gráfica en la figura 43.

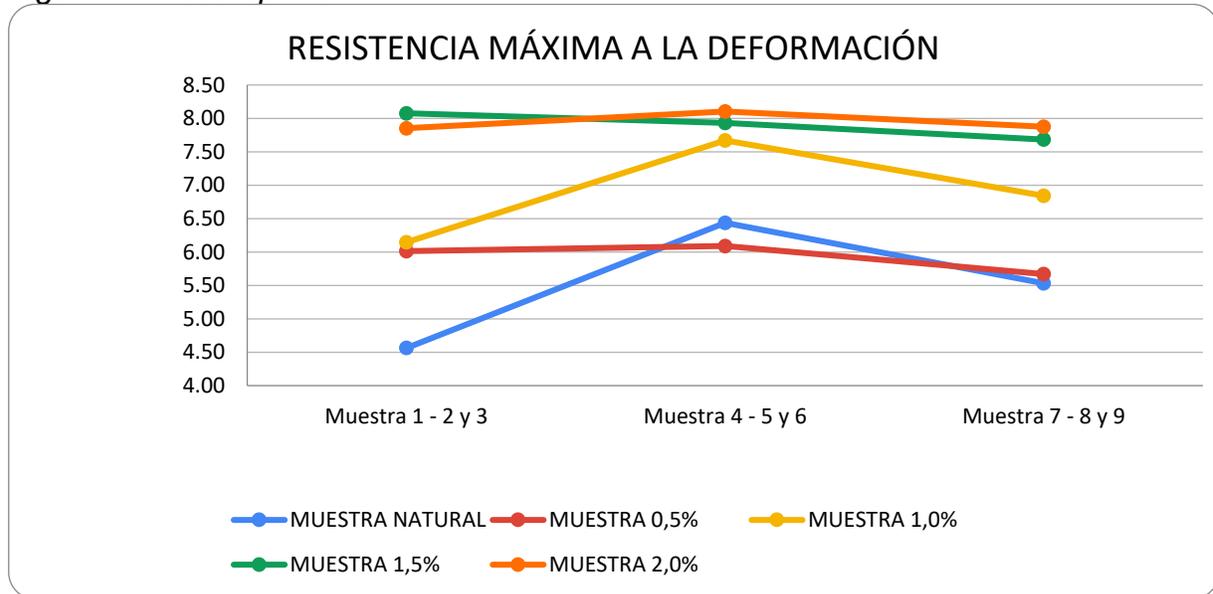
Figura 43. Resistencia a la deformación en las muestras



Fuente: los Autores

Con los valores hallados en la tabla 26 respecto de la resistencia a la deformación (K/cm²), se buscó establecer la tasa óptima, lo cual se plasma en la figura 44.

Figura 44. Tasa óptima



Fuente: los Autores

Con estos resultados es posible determinar el mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante la adición de material vegetal (fique), cuando esta adición oscila entre el 1,5% y el 2,0%; estos valores, se obtuvieron a partir de comprobar en el laboratorio la calidad de los agregados finos de acuerdo a las normas existentes, y después de realizar un diseño de mezcla a partir de diferentes porcentajes de material vegetal con respecto a la totalidad del grano fino, encontrado en la subrasante, hasta obtener el contenido porcentual óptimo entre el 1,5% y el 2,0%, con lo cual se logra el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos finos.

En suma, respecto a los ensayos realizados bajo la aplicación de la norma INV E 152-13: Compresión confinada en muestra de suelos, no se cuenta con un modelo a seguir, por cuanto la adición de fibras de fique no cuenta con un referente, además se

aplicaron diferentes porcentajes de material para obtener un resultado estadístico que muestre la cantidad de fibra vegetal a utilizar para llegar a obtener una mayor resistencia, con lo cual se logra plasmar, en la tabla 27, el resumen de los porcentajes de las adiciones y el resultado de esfuerzo máximo expresado en k/cm^2 .

Tabla 27. Porcentaje y esfuerzo máximo

Porcentaje % fibra vegetal	Esfuerzo máximo k/cm^2
Estado natural	4.90
0,5	5.76
1	5.88
1,5	7.82
2	8.41

Fuente: los Autores

De acuerdo a los datos obtenidos, se observa en la tabla 27 la comparación dada entre las muestras en estado natural, donde se obtiene un esfuerzo máximo de 4.90k/cm^2 , el cual sin dejar de ser un buen resultado, es inferior a las probetas cuyos contenidos contaron con la adición de las fibras naturales; en donde: para la adición al 5% el esfuerzo obtenido fue de 5.76k/cm^2 , para la adición al 1% el esfuerzo obtenido fue de 5.88k/cm^2 , para la adición al 1,5% el esfuerzo obtenido fue de 7.82k/cm^2 , para la adición al 2% el esfuerzo obtenido fue de 8.41k/cm^2 ; obteniendo así, una superioridad ostensiblemente notoria.

2. CONCLUSIONES

En cuanto al primer objetivo específico propuesto: *Comprobar en el laboratorio la calidad de los agregados finos de acuerdo a la norma INV E 213-07, para establecer el análisis granulométrico de agregados gruesos y finos con los que se realizaran los cilindros y las vigas a ser falladas en el laboratorio.* Se logró evidenciar en el laboratorio que la calidad de los agregados finos, respondió correctamente a las normas existentes; por cuanto la tolerancia para el límite líquido según la norma INV E 311-13 el máximo es el 40%, se obtuvo un resultado de 31,6%, así se cumple con la especificación requerida; por su parte el índice de plasticidad según la norma debe estar entre el 4.% y el 9%, el resultado fue de 1,7%, con ello se concluye que el material es óptimo para la utilización de acuerdo al propósito de este proyecto.

En relación al segundo objetivo específico: *Realizar un diseño de mezcla a partir de diferentes porcentajes de material vegetal con respecto a la totalidad del grano fino, encontrado en la subrasante, hasta obtener el contenido porcentual óptimo para lograr el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos finos.* Se realizó el diseño de mezcla al 5%, 1,0%, 1,5% y al 2,0%; obteniendo que al 1.5% y al 2.0% de adición de material vegetal con respecto a la totalidad del grano fino encontrado en la subrasante, resultan ser los porcentajes óptimos para lograr el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos finos, confirmando para la adición al 1,5% el esfuerzo obtenido fue de 7.82k/cm², para la adición al 2% el esfuerzo obtenido fue de 8.41k/cm².

Continuando la secuencia, el tercer y último objetivo específico: *Establecer la resistencia a la compresión y flexión del material fino sin adición de fibras versus la adición en porcentajes de residuos de fibras de fique, para así determinar la eficiencia del material adicionado.* La comparación permite establecer que entre las muestras en estado natural, donde se obtiene un esfuerzo máximo de 4.90k/cm², el cual sin dejar de ser un buen resultado, es inferior a las probetas cuyos contenidos contaron con la adición de las fibras naturales; en donde: para la adición al 5% el esfuerzo obtenido fue de 5.76k/cm², para la adición al 1% el esfuerzo obtenido fue de 5.88k/cm², para la adición al 1,5% el esfuerzo obtenido fue de 7.82k/cm², para la adición al 2% el esfuerzo obtenido fue de 8.41k/cm²; obteniendo así, una superioridad ostensiblemente notoria, lo cual se visualiza en la tabla 28.

Tabla 28. Condensado Resistencia a la deformación

RESISTENCIA A LA DEFORMACION (k/cm ²)					
	MUESTRA NATURAL	MUESTRA 0,5%	MUESTRA 1,0%	MUESTRA 1,5%	MUESTRA 2,0%
Muestra 1 - 2 y 3	4,56	6,01	6,15	8,08	7,85
Muestra 4 - 5 y 6	6,44	7,67	7,67	7,93	8,10
Muestra 7 - 8 y 9	5,53	6,84	6,84	7,68	7,87

Fuente: los autores

Una vez Realizado este estudio se concluye que la Fibra natural aumenta la resistencia a la compresión, se establece que los resultados obtenidos de las gráficas de Esfuerzo vs Deformación son más altos que los de suelo natural.

La Fuerza máxima registrada en los ensayos de compresión en los especímenes calculados es de 8.1 kg/cm² con una dosificación de Fibra natural del 2%.

El mínimo esfuerzo a la deformación, se presenta en los especímenes de suelo natural, lo cual confirma que la fibra natural mejora las condiciones físicas de soporte del suelo fino.

Se observa que, el porcentaje de Humedad Optima de mezclado, el cual presenta mejor amasado y fluidez, dando a las fibras naturales la presencia de mejor adherencia con el suelo fue de 27%.

Las fibras tratadas con material fino presentaron un desempeño aceptable y mejoraron las propiedades mecánicas al evaluarla sin refuerzo; este hallazgo, permite demostrar que las fibras vegetales sí están actuando como refuerzo dentro del material compuesto, esto al comparar los módulos de elasticidad de los especímenes ensayados.

La fibra longitudinal le otorgó al cilindro la capacidad para soportar carga aún en condición fisurada, sin embargo, para su uso habría que analizar sus limitaciones a largo plazo.

Los especímenes evaluados a esfuerzo flexo compresión en cuanto a los resultados obtenidos en diferentes porcentajes, no presento modificación alguna, concluyendo que la fibra a esfuerzo de flexo compresión no ejerce ninguna mejora.

Las fibras tratadas con material fino presentaron un desempeño aceptable y mejoraron las propiedades mecánicas al evaluarla sin refuerzo; este hallazgo, permite demostrar que las fibras vegetales sí están actuando como refuerzo dentro del material compuesto al comparar los módulos de elasticidad de las probetas ensayadas.

Los resultados encontrados entorno al mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante la adición de residuos provenientes de fibras vegetales entre el 1.5% y el 2.0%, complementa una de las investigaciones referente dentro del estado del arte, denominada: Estudio geotécnico y diseño estructural de pavimentos centro de mantenimiento, hangar y zona de guajes, empresas varias de

Medellín ESP, ya que ellos trabajaron sobre la estructuración del pavimento rígido, usando tela de fique para la parte de acabado superficial, esta tela se incluye en el proceso de curado del cemento para cubrir la parte superficial de la zona del pavimento.

Se recomienda a los estudiantes interesados en este tema tratar de evaluar especímenes de suelos finos naturales, para analizar el comportamiento cuando se realice la prueba de forzar a tensión.

Bibliografía

- Borja, M. (2017). *Metodología de la Investigación Científica para Ingenieros*. Chiclayo: Librería Favorita Web.
- CALTRANS. (2010). *Unified Soil Classification System*. California: California Department of Transportation.
- Chimborazo, W. (2012). *Diseño de mezclas asfálticas mediante método SUPERPAVE*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Contreras, M. F., Hormanza, W. A., & Marañón, A. (2009). Fractografía de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz resina poliéster. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales - X Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales IBEROMET*, 57-67.
- Delgado, H., Garnica, P., Villatoro, G. M., & Rodríguez, G. (2006). *Influencia de la Granulometría en las Propiedades Volumétricas de la Mezcla Asfáltica*. Mexico : Sanfandila, Qro. Publicación Técnica N°299 - Secretaria de Comunicaciones y Transportes - Instituto Mexicano de Transporte.
- Determinación del límite líquido de los suelos. (INV E 125-13). *INV E 125-13*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías y Ministerio de Transporte.
- Garnica, P., Gómez, J. A., & Sesma, J. A. (2002). *Mecánica de Materiales para pavimentos - Publicación Técnica N° 197*. Mexico: Instituto Mexicano del Transporte.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. d. (2010). *Metodología de la investigación*. México: McGrawHill - Interamericana Editores S.A.
- Hidalgo, M. A. (2014). *Comportamiento Mecánico y Viscoelástico de Materiales Compuestos con Fibras Naturales. Caso: PEBD-AI-Fique*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente - Dirección de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico - Facultad de Ingeniería - Grupo de Investigación en Tecnología para la Manufactura, Gitem.
- Humpiri, K. (2015). *Tesis Analisis Superficial de Pavimentos Flexibles para el Mantenimiento de Vías en la Región de Puno*. Juliaca/Perú: Universidad Andina Néstor Cáceres Velázquez/ Escuela de Posgrados/Maestría en Ingeniería Civil/ Mención Geotecnia y Transportes.
- ICPC. (2010). *Instituto Colombiano de Productores de Cemento*. Obtenido de Subrasantes - Estabilización de Subrasantes: http://anfocal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Estabilizacion_de_Suelos/Estab.Doc.Colombiano,varios%20insumos,Cal.2010-F_Upload.pdf
- IDU/ET. (2005). *Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público en Bogotá - Capítulo 4 Especificaciones IDU-ET-2005*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá - Instituto de Desarrollo Urbano.

- INVIAS. (2013). *Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.
- INVIAS. (2013). *Normas y Especificaciones Técnicas - Sección 200 - Agregados Pétreos*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.
- INVIAS. (INV E 102-07). Norma INV E 102-07. *Descripción e Identificación de Suelos*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías Ministerio de Transporte.
- INVIAS. (INV E 126-13). Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. *INV E 126-13*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Transporte.
- INVIAS. (INV E 152-13). Compresión inconfiada en muestras de suelos. *INV E 152-13*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Transporte.
- INVIAS. (INV E 182-13). Clasificación de la fracción fina de un suelo a partir de su valor de azul de metileno. *INV E 182-13*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Transporte.
- INVIAS. (INV E 213-07). Análisis Granulométrico de Agregados Gruesos y Finos. *INV E 213-07*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Transporte.
- Khan, A. (15 de Julio de 2016). *What materials are used for road construction?* Obtenido de Sub-grade: <https://www.quora.com/What-materials-are-used-for-road-construction>
- Khan, J. (4 de octubre de 2015). *IMPORTANCE OF SUB GRADE PREPARATION FOR HIGHWAYS/ ROADS*. Obtenido de Subgrade: <https://www.linkedin.com/pulse/importance-sub-grade-preparation-highways-roads-jahangir-khan/>
- Mata, M. T. (2010). *Guía Básica para la Conformación de Bases y Subbases para Carreteras en el Salvador*. El Salvador: Universidad de el Salvador - Facultad de Ingeniería y Arquitectura - Escuela de Ingeniería Civil.
- Mata, M. T. (2010). *Guía Básica para la Conformación de Bases y Subbases para Carreteras en el Salvador*. Ciudad Universitaria: Universidad de el Salvador.
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería Aplicada de Pavimentos para Carreteras*. Bogotá: Ediciones y Publicaciones Universidad Católica de Colombia.
- Padilla, A. (2013). *Materiales Básicos - Agregados Pétreos - Capítulo II*. Barcelona: Universitat politècnica de Catalunya Barcelona TECH.
- Pérez, J. (2016). *Conceptos Generales de la Mécanica del Suelo*. la Coruña : ETS Arquitectura de la Coruña - Departamento de Tecnología de la Construcción.
- Pinzón, S. (2013). Análisis de la resistencia a compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique. *Revista Ingenierías - Universidad Piloto de Colombia*, 27-37.
- Rivera, M. L., & Sosa, J. A. (2010). *Mejoramiento en las propiedades físico, mecánicas y de durabilidad de un pavimento rígido, con la adición de fibras sintéticas estructurales*. Quito: Pontificia Universidad Católica de Ecuador.

- Rodriguez, H. (12 de marzo de 2010). *Pavimentos*. Obtenido de Características de la Subrasante: <http://libro-pavimentos.blogspot.com.co/2010/03/caracteristicas-de-la-subrasante.html>
- Rojas, A. M. (2015). *Adicion de fibra de coco en hormigón y su incidencia en la resistencia a compresión*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato - Facultad de Ingeniería Civil.
- Sanchez, F. (2016). *Módulo 7. Materiales para Base y Subbase*. In SlideShare. Ingeniería. Obtenido de <https://es.slideshare.net/castilloaroni/mdulo-7-materiales-para-base-y-subbase-fernando-sanchez-sabogal>
- Tamayo, M. (2003). *El Proceso de la Investigación Científica*. Mexico: Limusa Noriega Editores.
- Vetorelo, P., & Clariá, J. J. (2014). Suelos reforzados con fibras: Estado del arte y aplicaciones. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba*, 27-34.