



OPCION DE GRADO

Presentado por:

Luis Miguel Jiménez Sicachá

Código: d7303705

Presentado a:

ING. MIGUEL ANGEL OSPINA GARCIA

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

OPCION DE GRADO

05 DE NOVIEMBRE DE 218

Bogotá

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS DE SUELO ARCILLOSO MEDIANTE LA
ADICIÓN DE ESCORIA DE ACERIA.

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil

Director del Proyecto:
ING. MIGUEL ANGEL OSPINA GARCIA

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE EDUCACIÓN A DISTANCIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTA D.C. NOVIEMBRE 2018

HOJA DE ACEPTACIÓN:

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá D. C. ____ de _____ 2018

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	9
1.1 FORMULACIÓN	10
1.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES O COMPONENTES DEL PROBLEMA	10
1.2.1 Independientes.....	11
1.2.2 Dependientes	11
1.3 GENERAL.....	12
1.4 ESPECÍFICOS.....	12
2 MARCO DE REFERENCIA	15
2.1 ANTECEDENTES	15
2.2 MARCO CONTEXTUAL INSTITUCIONAL	16
2.3 MARCO LEGAL O NORMATIVO	17
2.4 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	19
3 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	22
3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	22
3.2 DISEÑO METODOLÓGICO	22
3.2.1 Fase 1 Caracterización de los materiales	23
3.2.1.1 Caracterización Caolín	23
3.2.1.2 Caracterización Escoria de Acería.....	25
3.2.2 Fase 2 Plan de dosificación.....	31
3.2.3 Fase 3 Ensayos de laboratorio	31
3.2.3.1 Relación de Humedad – Masa Unitaria Seca en los Suelos	32
3.2.3.2 Ensayo de Compresión Inconfinada para muestras compactadas – Muestra de arcilla Caolínica.....	32
3.2.4 Fase 4 Análisis de Resultados	35
3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA:.....	36
3.4 INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	37
4 PRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	38
4.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES OBJETO DE INVESTIGACIÓN	38
4.1.1 Caracterización Escoria de Acería	38
4.1.2 Caracterización Caolín	40
4.1.2.1 Limites – Muestra Caolín.....	41

4.2	PLANIFICAR EL REEMPLAZO Y DISTRIBUCIÓN DE LA ESCORIA DE ACERIA DENTRO DE LA ARCILLA CAOLINITICA.	42
4.2.1	Matriz de Dosificación – Muestra Caolín.....	42
4.3	ELABORACIÓN DE ENSAYOS PROCTOR Y CBR	43
4.3.1	Humedad y Densidad Seca Máxima - Muestra Arcilla Caolínitica.....	43
4.3.2	Ensayo de CBR - Muestra Caolín.....	45
4.3.3	Ensayo Compresión Inconfinada – Muestra de Caolín	48
5	DIAGNÓSTICO	51
5.1	DIAGNOSTICO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN.	51
5.1.1	Caracterización Escoria de Acería	52
5.1.2	Caracterización Caolín	53
5.2	DIAGNOSTICO DE LA MATRIZ DE DOSIFICACION.....	53
5.3	DIAGNÓSTICO DE ENSAYOS DE LABORATORIO.....	54
5.3.1	Comparación Resultados Proctor Muestra de Caolín	54
5.3.2	Comparación Resultados CBR -Muestra Caolín.....	55
5.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
7	BIBLIOGRAFÍA	64

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Marco legal que rige los ensayos del proyecto	19
Tabla 2. Tipo de Ensayo y Norma del ensayo, para Caracterización – Muestra de Caolín	23
Tabla 3. Tipo de Ensayo y Norma del ensayo, para Caracterización – Escoria de Acería	25
Tabla 4. Masa mínima en gramos ensayo porcentaje de caras fracturadas	28
Tabla 5. Penetración Según Tipo de Agregado.....	30
Tabla 6. Ensayos para Determinar Comportamiento Mecánico Muestra de suelo arcilloso con Escoria de Acería	32
Tabla 7. Población y muestra de ensayos.....	36
Tabla 8. Cantidad de Ensayos Muestra de Caolín	37
Tabla 9. Caracterización Escoria de Acería	38
Tabla 10. Composición Química Escoria de Acería	39
Tabla 11. Porcentaje de Mineral en el ensayo BFS y XRD	40
Tabla 12. Limite Líquido - Muestra Caolín.....	41
Tabla 13. Limite Plástico y Humedad Natural - Muestra caolín	41
Tabla 14. Matriz de Dosificación - Muestra Caolín	43
Tabla 15. Resultados Humedad Óptima de Compactación y Densidad Seca – arcilla Caolínica ...	44
Tabla 16.. Relaciones de esfuerzo deformación en el ensayo CBR – Muestra de Caolín.....	45
Tabla 17. Resultados de Humedad para ensayos de Compresión Inconfinada	48
Tabla 18. Clasificación de Terzaghi, Para evaluar la consistencia del Suelo.....	48
Tabla 19. Esfuerzo Vs Deformación - Muestra Caolín.....	49
Tabla 20. Resultados Matriz de Dosificación – Muestra Caolín.....	51
Tabla 21. Cumplimiento Normas INVIAS – Muestra Escoria de Acería.	52
Tabla 22. Aumento y Disminución de Densidad Seca en la muestra Patrón de Caolín.	60
Tabla 23. Aumento de CBR – Muestra Caolín.	60
Tabla 24. Comparación de esfuerzo, resistencia al corte y consistencia del suelo.	61

TABLA DE GRAFICAS

Grafica 1	Flujo Metodológico	22
Grafica 2.	Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima – muestra Caolín.....	44
Grafica 3.	CBR Corregido Caolín	46
Grafica 4.	Compresión inconfiada	50
Grafica 5.	Porcentajes de Masa Minerales de la escoria.....	53
Grafica 6.	Comparación en Diagrama de Barras, Proctor – Muestra de arcilla Caolínica	54
Grafica 7.	Comparación Diagrama de barras de Humedad Óptima – Muestra de Caolín.....	55
Grafica 8.	Comparación en Diagrama de Barras del CBR – Muestra de Caolín	55
Grafica 9.	Comparación en Diagrama de Barras Esfuerzo – Muestra de Caolín	57
Grafica 10.	Comparación en Diagrama de Barras Resistencia al corte – Muestra de Caolín	57
Grafica 11.	Comparación en Diagrama de Barras Índice de Plasticidad – Muestra de Caolín.....	58

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo muestra la investigación realizada acerca de la Evaluación del comportamiento de mezclas de suelo arcilloso mediante la adición de escoria de acería.

Dado que se requiere continuar con las tendencias mundiales, de buscar solución a las problemáticas de desechos y/o residuos industriales, que pueden generar impactos ambientales negativos, se ve la necesidad de encontrar un adecuado uso a la gran cantidad de escoria de acería que se genera en Colombia.

La metodología empleada se inicia con la recolección de información bibliográfica especializada, sobre el tema de estudio; dicha información fue analizada con el fin de llegar a un punto de partida, y así poder orientar la investigación.

Posteriormente, se realizaron diferentes ensayos de laboratorio con el fin de determinar la conveniencia o no de la adición de escoria de acería a sub-rasantes de materiales finos.

En la investigación se realiza un análisis de los resultados obtenidos, con el fin de determinar la mejor opción en porcentaje de la mezcla del suelo arcilloso (arcilla caolinitica) con la escoria de acería y así entregar un informe con las conclusiones y recomendaciones; Así mismo, para que en un futuro se siga indagando y profundizando en el tema.

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS DE SUELO ARCILLOSO MEDIANTE LA ADICIÓN DE ESCORIA DE ACERÍA.

1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Latino América es una región que a la fecha se encuentra rezagada en cuanto a infraestructura vial: El Banco de Desarrollo de América Latina en 2011 inició una agenda estratégica para su desarrollo llamada “infraestructura en el desarrollo de América Latina”, en el cual en su primera edición llegó a la conclusión de que aproximadamente 3 millones de kilómetros de carreteras que tiene América Latina, En donde, solo un poco más del 20% se encuentra pavimentado; han pasado 7 años desde la primer entrega y aunque se ha avanzado en la inversión para la pavimentación de las vías en Latinoamérica, continua con un retraso frente a los países de Europa [1].

Teniendo en cuenta, las relaciones entre la longitud de la red vial y la superficie territorial, la población, el Producto Bruto Interno y el parque automotor son indicadores habitualmente utilizados en la comparación internacional, aunque su utilidad como descriptores es relativa; Por consiguiente, en éste informe se establece que hay disparidades entre países de Latinoamérica, y sale a relucir que Colombia se encuentra en el extremo más desfavorable entre los países con peor red vial, acorde a los indicadores antes descritos.

Así mismo, en Colombia las vías presentan un alto grado de deterioro, especialmente la red terciaria que no cuenta con una infraestructura adecuada para el alto volumen de tránsito. Lo anterior, según datos del ministerio de transporte (documento CONPES 3857), el país cuenta con una red de carreteras de 204.855 km, de los cuales 17.434 km, corresponden a la red primaria, 45.137 km a la red vial secundaria y 142.284 km a la red vial terciaria. Por consiguiente, al ver el mal estado de las vías, el ministerio ha venido desarrollando y aplicando nuevas tecnologías y procesos constructivos para la optimización de los recursos. Ya que, si bien la red terciaria está compuesta por caminos de bajos volúmenes de tránsito, una proporción importante de este puede corresponder a vehículos pesados. Las soluciones de ingeniería, por lo tanto, deben buscar dos condiciones en las estructuras propuestas: menores costos en la intervención adelantada y viabilidad técnica [2].

Debido, a que la generación y gestión de los residuos provenientes de las grandes y pequeñas acerías pueden llegar a constituir un problema ambiental grave para el país, el abandono o la gestión inadecuada de los residuos producen impactos notables en los medios receptores; Lo anterior, puede provocar contaminación en el agua, en el suelo, en el aire, contribuir al cambio climático y afectar a los ecosistemas y a la salud humana.

La problemática planteada, abarcada y en contexto para Colombia; En donde, la evaluación del comportamiento de mezclas de suelo arcilloso mediante la adición de escoria de Acería. En donde, se realizaron diferentes ensayos de laboratorio con el fin de determinar la conveniencia o no de la adición de escoria a sub-rasantes de materiales finos. Lo anterior, con el fin de determinar la mejor opción en porcentaje de la mezcla del suelo arcilloso con la escoria y así entregar un informe con las conclusiones y recomendaciones.

Sin embargo, es de saber que cuando los residuos se coordinan y gestionan de forma adecuada, estos se convierten en recursos que contribuyen al ahorro de materias primas, a la conservación de los recursos naturales, del clima y al desarrollo sostenible. Así mismo, “las escorias de acería son desechos generados de la fabricación del acero, cuya materia prima principal es la chatarra; en Colombia se producen aproximadamente cerca de 1266×10^6 Kg de acero anual, generando entre 100 Kg a 300 Kg de escorias, [3].

1.1 FORMULACIÓN

Por consiguiente, se busca describir y analizar la situación existente, cobertura y calidad para la evaluación del comportamiento de mezclas de suelo arcilloso, mediante la adición de escoria de Acería.; Así mismo, dar respuesta a la pregunta de investigación: **¿Cuál es el comportamiento mecánico de un suelo arcilloso al mezclarse con escoria de acería en diferentes proporciones?**

1.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES O COMPONENTES DEL PROBLEMA

En toda investigación se cuentan con variables que ayudan a obtener resultados que permiten comparar y elegir los datos más favorables para dicho propósito.

1.2.1 Independientes

- Escoria de acero proveniente de la acería Paz del Río
- Arcilla Caolínica proveniente del Municipio de Nemocon, Departamento de Cundinamarca – Floristería: FLORES EL FUTURO, material para uso industrial.

1.2.2 Dependientes

Las propiedades mecánicas de la arcilla Caolínica que van a ser modificadas en los porcentajes de dosificación propuestos.

- Porcentajes de Dosificación.
- CBR.
- Granulometría (Gradación y caracterización de los materiales)
- Proctor Muestras

2 OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Evaluar mediante ensayos de laboratorio el comportamiento mecánico de mezclas de suelo arcilloso (arcilla caolinitica) con escoria de acería.

2.2 ESPECÍFICOS

Caracterizar el material de investigación, suelo arcilloso y el material de escoria de acería.

Planificar el reemplazo y distribución de la escoria de acería dentro del suelo arcilloso, en cada uno de los tamices analizados.

Realizar ensayos de Compresión Inconfinada para el suelo arcilloso con el fin de evaluar el comportamiento mecánico de los materiales utilizados y de la mezcla con adición de escoria de acería.

Analizar y Comparar los resultados de los ensayos realizados en el material adicionado con escoria de acería y establecer con base en la normatividad INVIAS 2013, su posible utilización o rechazo.

3 JUSTIFICACIÓN

Es importante realizar esta investigación en el campo de la ingeniería civil, en este caso específico para el contexto de la infraestructura vial y diseño de pavimentos; Teniendo en cuenta, que se tendría otra alternativa como material de estabilización de sub-rasantes de materiales finos, para pavimentos de tránsito alto y/o bajo, según resultados, conclusiones y recomendaciones producto de la presente investigación; Por lo anterior, disminuyendo costos y evitando la explotación de nuevas canteras. Así mismo, teniendo investigaciones realizadas por diferentes autores, se evidencia la posibilidad de que la escoria de acero sea aplicable a la construcción de las vías ya sea para la estabilización de la subrasante o como material de Sub-base para pavimentos.

Debido, al desarrollo de la tecnología automotriz y la carencia de materiales granulares con propiedades mecánicas y físicas acorde con las necesidades, han hecho que las instituciones de investigación adelanten procesos para desarrollar aditivos, los cuales generan o estabilizan las propiedades mecánicas de las capas que conforman la estructura de pavimento [4].

De igual manera, la alta cantidad de vehículos de tráfico pesado según INVIAS [5]. Cuya estimación se tiene en (140.834 vehículos) que circulan por las vías colombianas, lo que conlleva que, al momento de diseñar estructuras de pavimento, las especificaciones de los materiales a utilizar tengan excelentes propiedades mecánicas y físicas; Lo anterior, debido al aumento de cargas de ejes equivalentes. Materiales que en la actualidad son escasos en el mercado y la gran mayoría no cumplen con las especificaciones de las normas vigentes en el país, por esta razón se hace necesario realizar investigaciones para buscar métodos de estabilización que mejoren las propiedades de los materiales granulares que componen la estructura de una vía. De igual manera, otra de las razones para realizar la investigación es poder mitigar el impacto ambiental que genera la escoria de acería y darle un uso adecuado y técnico como estabilizante de los materiales granulares.

Por consiguiente, la presente investigación podría ser de gran ayuda al desarrollo de las vías y pavimentos del país con la posible utilización de la escoria de acería disminuyendo la explotación de canteras que generan un gran impacto ambiental. Teniendo en cuenta que en la actualidad se cuenta

con investigaciones a nivel mundial de la escoria como posible estabilizante. Por ejemplo: En países como España, Perú e incluso Chile es donde más se han realizado investigaciones al respecto ya que cuentan con las industrias más productoras de acero, obteniendo resultados alentadores, siguiendo estos indicios se ve la posibilidad de iniciar las indagaciones de las propiedades de la escoria como estabilizante.

4 MARCO DE REFERENCIA

Debido a que en el país existe muy poca información sobre las temáticas a desarrollar en esta investigación, se optará por la revisión documental de autores de diferentes lugares del mundo quienes, a partir de sus experiencias y estudios según las características de estos tipos de materiales, permitirán obtener conclusiones y resultados, sobre las mezclas de residuos de escoria con materiales arcillosos.

A continuación, se presentan los antecedentes investigados que son referencias conceptuales de los temas que serán abordados para dar un correcto sustento teórico y sirven apoyo para la formulación del proyecto investigativo.

4.1 ANTECEDENTES

En el desarrollo de la presente investigación, se presentan los antecedentes consultados a la fecha que sirven como soporte para la formulación de esta investigación:

Según [6], se hizo un estudio experimental para evaluar el uso de escoria de acería de alto horno como material alternativo en la construcción de bases y sub bases de pavimentos. Esta evaluación permitió reconocer que, al hidratar la escoria, ésta presenta índice de expansión elevados por lo cual no la recomiendan para este uso.

Los autores [4], realizaron una caracterización del material granular mediante los ensayos de granulometría, contenido de materia orgánica, desgaste de la máquina de los Ángeles, equivalentes de arena, límites de Atterberg, posteriormente, se establecieron las propiedades físicas y mecánicas a materiales de sub-base y base granular. Estos autores concluyeron que al adicionar escoria a los tamices N°10, 40, 200 y fondo, se presenta un incremento en la densidad, y la resistencia de la sub-base y base granular obtenida mediante los ensayos de Proctor y CBR. La compactación aumenta para 12 y 26 golpes entre un rango de 80% y 260%, pero para 55 golpes disminuyen la resistencia en un 23%. En la investigación se buscó determinar el tamiz más útil para realizar la mezcla de escoria

ya que no en todos los tamaños de la muestra se ven resultados óptimos, según la investigación realizada el mejor resultado que se evidencia podría ser el arrojado por el tamiz 10 con un 18%.

Según [16] se realizó la caracterización de la escoria de acería por medio de ensayos de granulometría, peso específico, humedad, absorción y partículas planas y alargadas; los resultados obtenidos, demuestran que la escoria es un material que no absorbe gran cantidad de agua y contiene un alto porcentaje de finos, además las propiedades químicas de la escoria analizada en este estudio son similares a la escoria de nuestra investigación, por lo que es muy útil conocer todos los datos obtenidos. El estudio concluyo que la utilización de escoria como único componente de mezcla es viable por las características que posee, se debe tener en cuenta que es susceptible a cambios volumétricos y que tiene formas irregulares que dificultan el mezclado y la compactación.

4.2 MARCO CONTEXTUAL INSTITUCIONAL

El presente proyecto se desarrolla como opción de grado de la carrera de Pregrado de Ingeniería Civil en la Universidad Militar Nueva Granada y uno de sus objetivos es seguir la ruta de las tendencias mundiales, que buscan desde la investigación científica y académica el desarrollo de nuevas tecnologías con la reutilización de materiales generados de los procesos industriales, y así contribuir al medio ambiente.

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de NIVIA INGENIERIA S.A.S ubicado en la Vereda Parcelas, Parcela 45, Puerta 3, Cota-Cundinamarca.

La escoria de acería utilizada en esta investigación es proveniente de la planta de Acerías Paz de Río, ubicada en el municipio de Sogamoso en el departamento de Boyacá y la arcilla caolinitica es proveniente de la floristería Flores el Futuro, ubicada en el municipio de Nemocon en el departamento de Cundinamarca.

El caolín es una arcilla que proviene del mineral caolinita, producto de la descomposición de rocas a través de procesos de erosión química, de plasticidad baja o moderada. Para la investigación se tomó la arcilla caolinitica como un material de sub-rasante al cual se le adicionó escoria de acería para evaluar su comportamiento físico y mecánico.

En los suelos arcillosos se encuentran problemas de inestabilidad volumétrica ante la ganancia o pérdida de agua. Existen métodos para estabilizar suelos arcillosos (caolín) como es la adición de arena, cal o cemento, mejorando el comportamiento de esfuerzo en la deformación de los suelos.

Se analizó la mezcla caolín en diferentes dosificaciones de escoria de acería (25%, 50% y 75%) del peso de la muestra, con el fin de determinar mediante ensayos de laboratorio si es posible su utilización como estabilizante; esto se realizó siguiendo las normas INVIA 2013 [25].

4.3 MARCO LEGAL O NORMATIVO

Para esta investigación los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio deben estar en el rango de mínimos y máximos establecidos por las especificaciones INVIA 2013, entidad que en Colombia regula las especificaciones técnicas en la construcción de vías.

Ensayo de compresión inconfiada: Norma INV E - 152-13. El ensayo permite determinar la resistencia a la compresión no confinada de suelos cohesivos aplicando una carga axial con control de deformación. La muestra debe tener un diámetro mínimo de 0,033 m y la relación altura-diámetro de las muestras debe estar comprendida entre 2 y 3. El ensayo se aplica a suelos cohesivos que no expulsan agua durante la etapa de carga.

Ensayo de relación de humedad: Norma INV E - 142-13. El ensayo se realiza para determinar el porcentaje de una muestra de suelo, utilizando un horno donde se pueda controlar la temperatura, el método de ensayo se aplica a mezclas de suelos que tienen el 40% o menos retenido en el tamiz de 4.75×10^{-3} m (No 4) se usan los métodos A o B.

El método A emplea Un molde de diámetro 0,1016 m (4"), el método B emplea un molde de diámetro 0,1524 m (6"). La muestra representativa es pesada en una balanza, se introduce la muestra a una temperatura de 110 °C durante 18 horas. La muestra es extraída del horno y es pesada en la balanza, se obtiene el peso seco de la muestra; finalizado el procedimiento se calcula el porcentaje de humedad.

Ensayo de CBR de suelos compactados en laboratorio: Norma INV E - 148-13. El ensayo de CBR permite determinar la capacidad de soporte (CBR) de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima. Evalúa la resistencia de materiales que contengan tamaños máximos de partículas de menos de 0,019 m (3/4"). La norma INV E – 148-13 comprende los siguientes 3 ensayos: determinación de la densidad y humedad, determinación de las propiedades expansivas del material, determinación de la resistencia a la penetración.

El CBR se obtiene de la relación de la carga unitaria (lbs/pulg².) correspondiente a 0.1" o 0.2" de penetración requerida para lograr una cierta profundidad del pistón de penetración (19.4 cm²) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón (lbs/pulg².) requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado. Se calcula las relaciones de soporte dividiendo los esfuerzos por los esfuerzos de referencia 6.9MPa (100lb/pg²) y 10.3 MPa (1500lb/pg²) [25].

Para la obtención de los resultados si, los CBR para 0.1" y 0.2" son semejantes, se recomienda emplear en los cálculos el CBR correspondiente a 0.2". Si el CBR correspondiente a 0.2" es muy superior al CBR correspondiente al 0.1", deberá repetirse el ensayo [25].

-Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras del Instituto Nacional de Vías – INVIAS.

Tabla 1. Marco legal que rige los ensayos del proyecto

NORMA	ENSAYO
INV E-152-13	Compresión Inconfinada en Muestras de suelos.
INV E 142-13	Relación de humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación).
INV E -148-13	CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.

Fuente: propia del autor

4.4 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

A continuación, se desarrolla una breve descripción de conceptos técnicos tendientes a ambientar mejor el entorno de la investigación, esto llevado desde el marco descrito en el numeral anterior.

La escoria de acería resulta del proceso de fabricación de un material fundido, está compuesto por silicatos cálcicos y contiene otras sustancias como alúmina y magnesia. Las propiedades químicas de la escoria de acería depende de la composición del mineral de hierro y de las impurezas oxidadas durante el proceso de refinado del material. En esta investigación busca darle un uso a la escoria de acería para aprovechar sus propiedades mecánicas en el mejoramiento de materiales granulares y finos. Éste residuo si no se logra el manejo y/o utilización adecuado puede ocasionar problemas ambientales. [6], [17].

Granulometría: este ensayo es usado para determinar la gradación y cuantificar cada uno de los tipos de tamaños de granos que tiene un material, proporcionando información necesaria para el control y producción de productos de agregados y de las mezclas. En este proyecto la granulometría indicará el tipo de base granular que se empleará como muestra patrón. El ensayo se realiza utilizando mallas o tamices de laboratorio [25].

Relaciones de humedad, es la cantidad de humedad óptima, para alcanzar una densidad máxima seca de un material, para este caso de las muestras de Caolín en cada una de sus dosificaciones. Para la investigación se tomó una muestra de 3 Kg de material que pasa por el tamiz N°4 con experiencia del

laboratorista se estima una humedad óptima del 7% para este tipo de materiales y así se decide bajarle 2 puntos por encima y por debajo para hallar la densidad en estos puntos y conseguir la gráfica de humedad Vs Peso específico que será una curva cóncava, usando un martillo de 4.54 kg que cae a 12". Se golpea el material dentro de un molde de 4" en tres capas aproximadamente iguales de 25 golpes uniformemente distribuidos, posteriormente se limpia el material y se saca la muestra compactada del molde y se corta verticalmente y se toma una muestra representativa del material de una de las caras del corte; se pesa inmediatamente y se seca en el horno a 110+/-5° por un tiempo mínimo de 12 horas.

Ensayo CBR, permite determinar la capacidad de soporte (CBR) de suelos y agregados, indicando el índice de resistencia de un suelo, con una humedad óptima y niveles de compactación variable. Es un método desarrollado por la división de carreteras del estado de California (EE.UU.), sirve para evaluar la calidad del suelo para sub-rasante, sub-bases y bases. [25].

Para la presente investigación se tomaron tres porciones de arcilla caolinitica de aproximadamente de 7 kg cada una, se realiza tamizado y se pesa cada fracción (1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°10, N°20, N°40, N°60, N°100, N°200), para hacer el reemplazo del 25%, 50%, 75% con escoria de acería. Se adiciona la humedad óptima del material, se mezcla hasta quedar homogénea. La primera probeta se compacta en 5 capas con una energía de compactación de 56 golpes, la segunda probeta se compacta en 5 capas y energía de compactación de 25 golpes cada una; y la tercera probeta en 5 capas de 10 golpes de energía de compactación. Cada una de las anteriores se pesa y se determina su densidad. Posteriormente las probetas se sumergen en agua durante 96 horas, colocando unas pesas de 4,54 kg, encima de la muestra con unos diales de lectura para determinar la expansión. Una vez se sacan las muestras del agua se deja secar por 15 minutos y se determina la resistencia a la penetración, tomando lecturas de carga cuando las lecturas de penetración son de 0,025 - 0,050 - 0,075 - 0,100 - 0,125 - 0,150 - 0,175 - 0,200 - 0,300 - 0,400 y 0,500 pulgadas.

Compresión inconfiada: ensayo realizado a la muestra de caolín tanto como muestra patrón (condición sola) y a las variaciones en porcentaje con adición de escoria, consiste en la aplicación de una carga axial a una probeta cilíndrica de suelo. El ensayo se basa en la obtención del valor de la

resistencia a la compresión de los suelos que tienen una cohesión suficiente para ser ensayados en condición confinada. Se realiza la preparación de las muestras de Caolín mezcladas con escoria de acería en las siguientes dosificaciones: 0%, 25, 50%, 75%, se adiciona agua y se mezcla el Caolín con la escoria, luego a este material resultante se le realiza un ensayo de humedad, se compacta la muestra en tres capas de 25 golpes cada una con un martillo de 10 libras. La muestra es compactada en tres capas, se procede a enrasar la muestra, para luego desencofrar. Posteriormente la muestra se lleva a la máquina de compresión, se centra el cilindro o muestra y se coloca en cero el indicador de deformación.

A la muestra se le aplica una carga de tal manera que se genere una deformación axial a razón de 0.05 pulgadas/minuto. Se registran los valores de carga, deformación, tiempo del anillo de deformaciones y del anillo de cargas a intervalos suficientes para poder definir la curva esfuerzo – deformación. En el ensayo se continúa aplicando carga hasta que los valores decrezcan al aumentar la deformación. [25]

Ensayo Proctor modificado: este ensayo permite determinar el porcentaje de compactación, la masa unitaria seca (densidad seca) y el contenido de humedad. Para la investigación se tomaron muestras alteradas con escoria de acería en diferentes dosificaciones. Se determino el contenido de humedad óptimo de las mezclas Caolín – Escoria. Se colocaron las muestras en un molde en cinco capas; cada capa se compactó con 56 golpes con un martillo de 44.5 N (10 lb), se deja caer desde una distancia de 45.7 centímetros (18"). Después se determina el peso unitario seco. Se repite el procedimiento para más muestras con diferentes contenidos de escoria para establecer la relación entre el contenido de agua para el suelo y el peso unitario seco. Con los contenidos de humedad óptima de agua y el peso unitario seco máximo se determinó la curva de compactación [25].

5 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

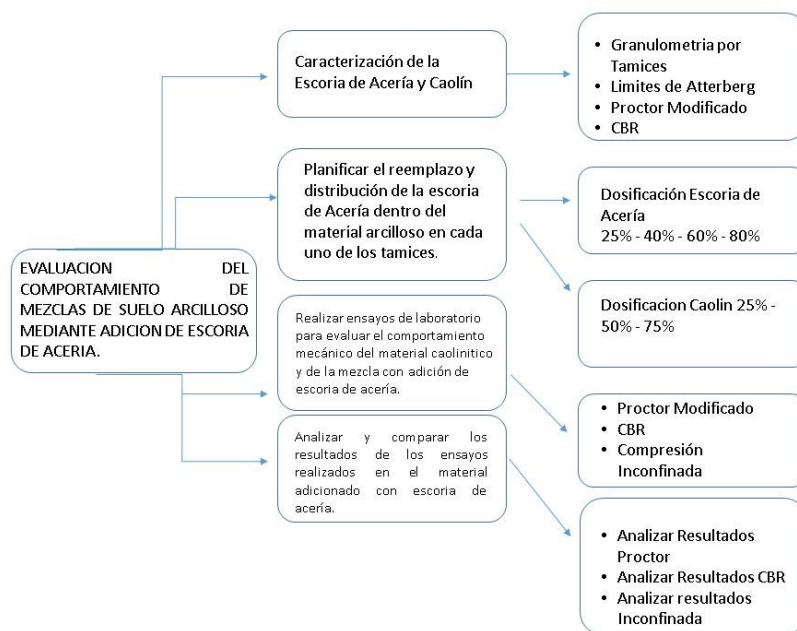
5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación realizada es considerada de tipo experimental cualitativa y cuantitativa, ya que mediante ensayos de laboratorio realizados a las muestras de materiales (subrasante y base) con diferentes adiciones de escoria, se busca obtener resultados para analizar el comportamiento de la mezcla y sus propiedades.

5.2 DISEÑO METODOLÓGICO

A continuación, se presenta el diagrama de actividades del proceso de la investigación.

Grafica 1. Flujo Metodológico



Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se describe el procedimiento de las fases del proyecto:

5.2.1 Fase 1 Caracterización de los materiales.

En esta fase del proyecto se realiza un análisis a los materiales de investigación (Caolín y Escoria de Acería), esto con el fin de conocer sus propiedades mecánicas y físicas, y así establecer la naturaleza de cada uno de ellos.

5.2.1.1 Caracterización Caolín

A la muestra de arcilla caolínica se realizaron los siguientes ensayos, para determinar el comportamiento mecánico al adicionar Escoria de acería en diferentes dosificaciones.

Tabla 2. Tipo de Ensayo y Norma del ensayo, para Caracterización – Muestra de Caolín

ENSAYO	NORMA DEL ENSAYO
Determinación del Limite Liquido de los Suelos	I.N.V. -E – 125 – 07
Limite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos	I.N.V. -E – 126 - 07

Fuente: Elaboración del autor

Limite Liquido: Se determina el contenido de humedad del suelo expresado en porcentaje utilizando el método de Casagrande, se toman 0,15 Kg. de muestra que pasa por el tamiz N°40, se humedece lo suficiente hasta lograr una pasta homogénea, se coloca en un recipiente en forma de cuchara (aparato de casa grande) y se alisa con una espátula a una altura de 0,01 m, La muestra se separa con un ranurador en un surco de 0,063 m de longitud. Luego se gira la manivela del aparato con una frecuencia de 2 golpes por segundo, contando el número de golpes necesarios para que la ranura cierre en 10^{-4} m de longitud en el fondo, finalmente se toma una muestra aprox. de 0,01 Kg de material que se junta en el fondo para determinar la humedad. La muestra restante se mezcla nuevamente para repetir el procedimiento por lo menos 2 veces más de modo de obtener tres puntos que varíen en un rango de 15 a 35 golpes.

Imagen 1. Ensayo de Limite Liquido – Muestra Arcilla caolinitica



Fuente: [14]

Limite Plástico: Se define como el contenido de humedad del suelo, al cual un cilindro de este se rompe o resquebraja al amasado presentando un diámetro de 0,003 m, se toma 0,025 kg. aproximadamente de muestra que pase por el tamiz N°40, se amasa entre las manos y se hace rodar con la palma de la mano sobre la superficie de amasado formando un cilindro, cuando se alcance un diámetro de 10^{-3} m, se dobla y amasa nuevamente para volver a formar el cilindro lo que se repite hasta que el cilindro se deshaga al llegar a un diámetro de 10^{-3} m, en trozos de tamaño de 5^{-3} m a 0,01m de largo y no pueda ser remasado ni reconstruido. El contenido de humedad que tiene el suelo en ese momento representa el límite plástico el cual se representa colocando las fracciones de suelo en un recipiente y secándolas.

Imagen 2. Ensayo de Limite Plástico – Muestra Arcilla caolinitica



Fuente: [14]

5.2.1.2 Caracterización Escoria de Acería

Las propiedades físicas y químicas de la Escoria de Acería, fueron suministradas por la Empresa Acerías Paz de Rio, quienes suministraron las muestras para realizar la presente investigación.

Tabla 3. Tipo de Ensayo y Norma del ensayo, para Caracterización – Escoria de Acería

ENSAYO	NORMA DEL ENSAYO
Gravedad Especifica / Absorción (3/4" -3/8" – N°4 – N°40 – N°200)	AASHTO 85-91
Resistencia al Desgaste de los Agregado de Tamaño menores de 0,0375 m (11/2"), por medio de la Máquina de los Ángeles.	I.N.V. – E -218 -07
Determinación de la Resistencia del agregado Grueso al Desgaste por Abrasión Utilizando el aparato MICRO-DEVAL	I.N.V. – E -238 -07
Evaluación de la Resistencia Mecánica de los Agregados Gruesos por el Método de 10% de Finos.	I.N.V. – E -227 -07
Porcentaje de Caras Fracturadas en los Agregados	I.N.V. – E -224 -07
Índice de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados para Carreteras	I.N.V. – E -230 -07
Limite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos	I.N.V. -E – 126 -07
CBR (100% de densidad seca máxima y cuatro días de inmersión en agua)	AASHTO T193-99

Fuente: Elaboración propia del autor

Gravedad Específica: Para este ensayo se tomó una muestra seca y se pasó por el tamiz No. 4, todo el material que no quedo retenido se descartó. La muestra que quedo se Lavó para eliminar cualquier polvo u otros recubrimientos de la superficie. Posteriormente se secó la muestra en un horno a una temperatura de 230 ± 9 ° F (110 ± 5 °C). A continuación, la muestra se dejó enfriar hasta obtener un manejo cómodo de la temperatura, luego se Sumergió la escoria de acería en agua a una temperatura ambiente durante un período De 17 ± 1 hora. Luego se retiró la escoria del agua y se secó con un paño absorbente hasta eliminar películas de agua visibles. En este punto la escoria está en un estado superficie seca saturado (SSD). Se Colocó la muestra en un recipiente, se pesó y se registró como peso de la muestra de superficie seca saturada en el aire.

Después del pesaje, se colocó la muestra de superficie seca saturada en un recipiente, se sumerge en agua a una temperatura de $73.4 \pm 3^{\circ} \text{ F}$ ($23.0 \pm 1.7^{\circ} \text{ C}$), se agita la muestra inmersa para quitar todo el aire atrapado y se prosiguió a pesar. Se Determinó y se registró el peso de la muestra saturada en agua. Se retira la muestra del agua y se colocó en un sartén. Se seca la muestra a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ} \text{ C}$ ($230 \pm 9^{\circ} \text{ F}$). Se deja enfriar hasta obtener un manejo cómodo de la temperatura. Se pesa y registra nuevamente para obtener el peso de la muestra seca al horno en el aire.

Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 0,0375 m ($1\frac{1}{2}$ ") por medio de la máquina de los Ángeles: El ensayo se realiza a los agregados gruesos hasta de 0,0375 m ($1\frac{1}{2}$ ") para determinar la resistencia a la abrasión o desgaste empleando una máquina con una carga abrasiva. Este ensayo permite conocer la durabilidad y resistencia del agregado. Para el ensayo se utilizó escoria de acería y se utilizaron los tamices $1\frac{1}{2}$ ", 1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{4}$ " y N°4. La muestra se lavó y se secó en horno a una temperatura constante comprendida entre $110 \pm 5^{\circ} \text{ C}$, se preparó 0,5 Kg de escoria de acería.

Imagen 3. Ensayo de desgaste de los agregados. Tamizado y máquina de los Ángeles.



Fuente [14]

La muestra se coloca en la máquina de los Ángeles con una carga abrasiva que corresponden a esferas de acero de diámetro de 0,0046.8 m ($1\frac{27}{32}$ ") y una masa comprendida entre 0,39 Kg y 0,445 Kg. Se gira un cilindro con una velocidad entre 188 y 208 rad/minuto (30 y 33 r.p.m.), hasta completar 500 revoluciones. El cilindro de la máquina de los Ángeles debe girar con una velocidad constante.

Imagen 4. Ensayo de desgaste de los agregados. Esferas de acero y máquina de los Ángeles



Fuente [14]

La muestra se extrae del cilindro y se realiza una separación mediante el empleo de el tamiz de 17⁻⁴ m (N°12), la muestra se lava, se seca en el horno a una temperatura $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, se determina la masa con una precisión de 0,001 Kg. [25].

Se realiza el cálculo del porcentaje de desgaste mediante la siguiente expresión.

$$\% \text{ Desgaste} = (P_1 - P_2) / P_1 * 100$$

Dónde:

P₁: Masa de la muestra antes del ensayo

P₂: Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiza N°12

Porcentaje de Caras Fracturadas en los Agregados: El ensayo se realizó a muestras de escoria de acería para determinar el porcentaje, en masa o por conteo de una muestra de agregado grueso compuesto por partículas fracturadas. La cara fracturada corresponde a una superficie angular o quebrada de una partícula de agregado. Para el ensayo se empleó los siguientes equipos: balanza, tamices 0,375, 0,25, 0,19, 0,125 y 0,95 m (1½", 1", ¾", ½" y 3/8"), cuarteador y una espátula.

Imagen 5. Caras Fracturadas en los Agregados. Determinación de la masa de la muestra.



Fuente [14]

La muestra debe contener una masa mínima por tamiz retenido como se indicada en la Tabla 4.

Tabla 4. Masa mínima en gramos ensayo porcentaje de caras fracturadas

Tamiz, Abertura en Pulgadas	Masa Mínima de la Muestra en Kg
3/8	0,2
1/2	0,5
3/4	1,5
1	3,0
1 1/2	7,5
2	15
2 1/2	30
3	60
3 1/2	90

Fuente: Elaboración del autor

La muestra de Escoria de Acería se lavó y secó hasta obtener una separación limpia de material fino y grueso por medio de tamiz de 4.75×10^{-3} m. ver Imagen 6

Imagen 6. Caras Fracturadas en los Agregados. Lavado de la muestra.



Fuente [6]

Posteriormente se determina la masa de la muestra. Se extiende la muestra seca en una superficie donde se le realiza la inspección a cada partícula para verificar el criterio de fractura que corresponde. Si la partícula tiene un área a proyectada de un cuarto de la máxima área de la sección transversal y la cara tiene bordes cortantes y bien definidos.

Imagen 7. Caras Fracturadas en los Agregados. Tamizado de la muestra.



Fuente: Elaboración del autor

Posteriormente se determinó la masa de partículas fracturadas, la masa de partículas dudosas y la masa de partículas que no cumplen con el criterio de fracturadas.

Con la ecuación $P = ([F+(Q/2) / (F+Q+N)] * 100$

Dónde:

P = Porcentaje de partículas de caras fracturadas

F = Masa o número de partículas fracturadas con al menor el número de caras fracturadas.

Q = Masa o número de partículas dudosas

N = Masa o número de partículas que no cumplen el criterio de fracturadas.

Evaluación de la Resistencia Mecánica de los Agregados Gruesos por el Método de 10% de Finos:

En este ensayo se busca evaluar la resistencia mecánica de los agregados gruesos a la trituración al ser sometidos a esfuerzos de compresión determinada para producir en esta muestra de agregado grueso un 10% de finos que pase por el tamiz No. 8, para luego ser sometido a pruebas. La preparación de la muestra consiste en dejarla secar al aire libre y luego tamizarla entre los tamices 12.7×10^{-2} m (1/2") y 9.5×10^{-3} m (3/8") ya que estos son los establecidos. Una vez seleccionada la muestra se procede a llenar el recipiente cilíndrico en tres capas de a 25 golpes que se le dan con una varilla de sección circular recta, luego se determina con una presión de 0,001 Kg la masa del agregado para después proceder a cargar con el pistón, para penetrar la muestra cuyo indicador dará la naturaleza del material y dicha penetración se determinará según la tabla Tabla 5.

Tabla 5. Penetración Según Tipo de Agregado

Naturaleza del Material	Penetración
Agregados constituidos de partículas redondeadas o sub-redondeadas	0,015 m
Agregados constituidos de partículas angulares.	0,02 m
Agregados ligeros, que presenten vacíos en su interior.	0,024 m

Fuente: Elaboración del autor

Una vez puesta la carga y obtenida la penetración indicada se procede a tomar el dato de la carga en Newton y se saca la muestra del recipiente. El material extraído del cilindro se procede a tamizar en

el tamiz No. 8 y se determina la masa retenida en este para ver el resultado del sometimiento al esfuerzo.

Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el equipo micro-Deval: Este ensayo se utiliza para medir la resistencia de la abrasión de los agregados gruesos. El ensayo de micro-Deval consiste en someter una muestra de agregado grueso para medir la abrasión y durabilidad de los agregados. Lo que se hace en el ensayo es coger una muestra de agregado grueso en un recipiente de acero con 2 litros de agua y una carga abrasiva de 5 Kg de bolas de acero de 9.5×10^3 m de diámetro, estos recipientes acompañados de las bolas se dejan girar dentro del aparato de Micro – Deval a 100 rpm por dos horas luego se lava la muestra y se seca en el horno y por ultimo para determinar la pérdida de material se pasa por el tamiz No 16 y se expresa en porcentaje del total de la muestra original.

5.2.2 Fase 2 Plan de dosificación

Planificar el reemplazo y distribución de la escoria de acería dentro del suelo arcilloso, en cada uno de los tamices analizados.

Para estudiar el comportamiento de la Escoria de Acería al mezclarla con arcilla caolinitica, se estableció una matriz de dosificación de aumento gradual en porcentajes de (25%, 50% y 75%), lo anterior en el tamiz N°4.

Imagen 8. Trituración de Escoria de Acería por Tamizado



Fuente: Elaboración del autor

5.2.3 Fase 3 Ensayos de laboratorio

Para el desarrollo de la presente investigación de acuerdo a los objetivos planteados se evaluará el comportamiento mecánico de la arcilla caolínica, reemplazando el material retenido en el tamiz N°4 en porcentajes del 25%, 50% y 75% del peso de la muestra. Se realizó el siguiente procedimiento:

Una vez conocido los pesos retenidos en cada uno de los tamices analizados se procede a reemplazar la escoria de acería en los porcentajes establecidos en la matriz.

5.2.3.1 Relación de Humedad – Masa Unitaria Seca en los Suelos

Tabla 6. Ensayos para Determinar Comportamiento Mecánico Muestra de suelo arcilloso con Escoria de Acería

ENSAYO	NORMA DEL ENSAYO
Relación de Humedad – Masa Unitaria Seca en los Suelos)	I.N.V. -E – 142 – 07
Relación de Soporte del Suelo en el Laboratorio (CBR de Laboratorio)	I.N.V. -E – 148 – 07
Compresión Inconfinada en Muestras de Suelo	I.N.V. -E – 152 – 07

Fuente: Elaboración del autor

5.2.3.2 Ensayo de Compresión Inconfinada para muestras compactadas – Muestra de arcilla Caolínica.

Se realiza la preparación de las muestras de Caolín mezcladas con escoria de acería en las siguientes dosificaciones 25, 50%, 75%.

Imagen 9. Preparación de la Mezcla



Fuente: Elaboración del autor

Una vez realizada la mezcla con sus diferentes dosificaciones se le agrega agua y se mezcla el Caolín con la escoria, luego a este material resultante se le realiza un ensayo de humedad, después se compacta la muestra en tres capas de 25 golpes cada una con un martillo de 10 libras.

Imagen 10. Ensayo de Compresión Inconfinada – compactación de la muestra



Fuente Elaboración del autor

Después de tener la muestra compactada en las tres capas se procede a enrasar la muestra, para luego desencostrar.

Imagen 11. Ensayo de Compresión Inconfinada – desencostrado de la muestra



Fuente: Elaboración del autor

Posteriormente la muestra se lleva a la máquina de compresión se centra el cilindro o muestra y se coloca en cero el indicador de deformación.

Imagen 12. Ensayo de Compresión Inconfinada – Fallo de la muestra



Fuente: Elaboración del autor

A la muestra se le aplica una carga de tal manera que se genere una deformación axial a razón de 0.05 pulgadas/minuto. Se registran los valores de carga, deformación y tiempo del anillo de

deformaciones y del anillo de cargas a intervalos suficientes para poder definir la curva esfuerzo – deformación.

Imagen 13. Ensayo de Compresión Inconfinada – Fallo de la muestra



Fuente: Elaboración de los autores

En el ensayo se continúa aplicando carga hasta que los valores de carga decrezcan al aumentar la deformación.

Imagen 14. Ensayo de Compresión Inconfinada – Fallo de las muestras según dosificación de la Escoria



Fuente: Elaboración del autor

5.2.4 Fase 4 Análisis de Resultados

Analizar y Comparar los resultados de los ensayos realizados en el material adicionado con escoria de acería con la arcilla Caolínica.



Los resultados de los ensayos realizados se tabulan en tablas y se graficas comparativas que permitan realizar comparaciones de los resultados obtenidos y se pueda dar una descripción en cada una de las variables dependientes.

Los resultados obtenidos en el ensayo de CBR de Laboratorio, de cada una de las muestras adicionadas con escoria, serán comparadas partiendo de los resultados obtenidos de la muestra patrón (sin adición de escoria), y se determinara su comportamiento.

También se realizará una comparación de cada una de las muestras al aumentar el porcentaje de escoria de acería, en cuanto su densidad seca.

En esta fase del proyecto los materiales de investigación corresponden a base Granular (BG-38), Caolín y escoria de Acería.

Tabla 7. Población y muestra de ensayos

MATERIAL	TIPO	ORIGEN	FIGURA
Arcilla Caolínica	Fino	Natural (Floristería: Flores el Futuro, Municipio de Nemocon departamento de Cundinamarca)	
Escoria	Sub - producto de la fabricación del acero.	Planta de Acerías Paz de Rio. Sogamoso departamento de Boyacá	

Fuente: Elaboración del autor

5.3 POBLACIÓN Y MUESTRA:

Para la muestra de arcilla Caolínica se determinó realizar ensayos de compresión inconfiada con la siguiente dosificación 0%, 25%, 50 y 75%, para el ensayo de CBR se establecieron las dosificaciones

25%, 50% y 75%. En la Tabla 8, se indica el tipo de ensayo para la muestra de arcilla caolinita y el número de probetas a realizar.

Tabla 8. Cantidad de Ensayos Muestra de Caolín

TIPO DE ENSAYO	PORCENTAJE A ADICIONAR	NORMA DE REFERENCIA	NUMERO DE VARIABLES	PROBETAS POR VARIABLE	TOTAL, PROBETAS
Compresión in confinada (Material fino ("caolín"))	0%	INV- E -152	1	3	3
	25%		1	3	3
	50%		1	3	3
	75%		1	3	3
CBR (material fino "caolín")	25%	INV - E - 148	2	3	6
	50%		2	3	6
	75%		2	3	6

Fuente: Elaboración del autor

5.4 INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para la investigación del comportamiento mezclas gruesas y finas al ser adicionadas con escoria de acería, se basó principalmente en las siguientes fuentes:

- Consulta de fuentes bibliográficas de aplicaciones de la escoria de acería en sub- bases y bases granulares en Colombia y en el mundo.
- Realización de ensayos de laboratorio adicionando de escoria de acería a una arcilla Caolínica, proveniente de Nemocon - Cundinamarca obteniendo resultados de valores y figuras.
- Análisis y comparación de resultados de las muestras naturales y las muestras adicionando escoria de acería mediante figuras (diagramas, gráficas).
- Muestra de escoria de acería.
- Muestra de Caolín.

- Muestras de Caolín mezclado con escoria de acería con las siguientes dosificaciones 25%, 50%, y 75%.

6 PRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos, con el fin de dar seguimiento a los objetivos descritos en el inicio del proyecto y verificar los alcances de cada una de ellos.

6.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES OBJETO DE INVESTIGACIÓN

La caracterización de los materiales que intervendrán en la presente investigación (Arcilla Caolínica y Escoria de Acería), se realizaron en un laboratorio particular con amplia experiencia, con el fin de tener unos parámetros mecánicos de referencia, y así compararlos con los resultados de las muestras alteradas con escoria de acería.

6.1.1 Caracterización Escoria de Acería

La escoria de acería es un subproducto obtenido en el proceso de fabricación de un material fundido, está constituida por silicatos cálcicos, contiene otras sustancias como alúmina y magnesia. Esta composición química de la escoria de acería depende de la composición del mineral de hierro y de las impurezas oxidadas durante el proceso de refinado del material.

Tabla 9. Caracterización Escoria de Acería

ENSAYO	MÉTODO	VALOR
Gravedad Específica / Absorción (3/4")	INV- E -222	1,91 / 3,75%
Gravedad Específica / Absorción (3/8")	AASHTO 85-91	1,97 / 3,33%
Gravedad Específica / Absorción (N°4)	AASHTO 84-01	2,11 / 2,73%
Gravedad Específica / Absorción (N°40)	INV- E -124	2,26 / 2,65%

ENSAYO	MÉTODO	VALOR
Gravedad Específica / Absorción (N°200)	INV- E -223	2,45 / 1,95%
Abrasión en los Ángeles Machine, 500 revoluciones	E-218	49,20%
Micro-Deval	E-238	29,20%
partículas fracturadas: 1 cara	E-227	92%
partículas fracturadas: 2 cara	E-227	88%
Partículas planas y alargadas	E-230	1%
Índice de plasticidad	E-125 Y E-126	No Plástico
Índice de aplanamiento	E-230	5,62%
CBR (100% de densidad seca máxima y cuatro días de inmersión en agua)	AASHTO T193-99	95,68%

Fuente: [26]

En el ensayo RXF se muestra la composición química de la escoria de acería, como se observa en la tabla 16, esta composición varía de acuerdo a la materia prima que se utiliza y al sistema utilizado para el enfriamiento del acero.

Tabla 10. Composición Química Escoria de Acería

Resultados RXF para la muestra BFS analizada			
Elemento y / o compuesto químico	% En peso de la muestra	Elemento y / o compuesto químico	% En peso de la muestra
SiO ₂	52.03	SO ₃	0.48
CaO	20.83	Ba	0.21
Al ₂ O ₃	13.9	Cr	0.12
Fe ₂ O ₃	6.52	Cl	0.08

Resultados RXF para la muestra BFS analizada			
Elemento y / o compuesto químico	% En peso de la muestra	Elemento y / o compuesto químico	% En peso de la muestra
MnO	2.26	P ₂ O ₅	0.06
TiO ₂	0.98	Ce	0.05
K ₂ O	0.86	Zr	0.05
MgO	0.82	Sr	0.04
Na ₂ O	0.65	Cu	0.02

Fuente: [26]

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, La escoria presenta una estructura interna donde predomina el cuarzo 58.9% y cristobalita 18.1% y su formación proviene de someter a la sílice a altas temperaturas. La estructura cristalina se debe al sistema de enfriamiento empleado en la elaboración del acero.

Tabla 11. Porcentaje de Mineral en el ensayo BFS y XRD

Mineral	%, en Masa
Cuarzo	58.9
Cristobalita	18.1
Bohemita	12.8
Calcita	4.8
Natrolita	5.3

Fuente Propia del autor

La escoria de la acería de Paz de Rio son producidas mediante el empleo de oxígeno, tienen en su composición dióxido de silicio SiO₂ y oxido de calcio y CaO que pueden reaccionar con el agua y generar una reacción expansiva que corresponde a la hidratación de la cal.

6.1.2 Caracterización Caolín

Para simular una subrasante se adopta, como material natural, la arcilla caolinitica, al cual se le realizó la caracterización en su forma natural, a continuación, se muestra los resultados de los ensayos de límites, CBR y humedad óptima.

6.1.2.1 Límites – Muestra Caolín

A continuación, se presentan en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, los límite líquido, límite Plástico y humedad natural obtenida en el laboratorio de la muestra patrón de Caolín.

Tabla 12. Límite Líquido - Muestra Caolín

ENSAYO N°	1	2	3
N° de Golpes	35	25	15
Peso Recipiente + suelo Húmedo (kg)	0,05092	0,04325	0,04316
Peso Recipiente + suelo seco (kg)	0,04369	0,03441	0,03319
Peso Recipiente (kg)	0,02462	0,01249	0,01118
Humedad, %	37,91	40,33	45,3

Fuente Propia del autor

Peso Agua = 0,05092 kg – 0,04369 kg = 0,00723 Kg

Peso Suelo Seco = 0,04369 Kg – 0,02462 Kg = 0,01907 Kg

Humedad = (0,00723 Kg / 0,01907 Kg) * 100 = 37.91%

Se realiza el anterior procedimiento para las tres muestras y después se saca el promedio.

Límite Líquido = (37.91 + 40.33 + 45.3) / 3 = 40.7%

Tabla 13. Limite Plástico y Humedad Natural - Muestra caolín

ENSAYO N°	1	2	Humedad Natural ω_n
Peso Recipiente + suelo Húmedo (Kg)	0,01841	0,01884	0,1624
Peso Recipiente + suelo seco (Kg)	0,0163	0,0166	0,1604
Peso Recipiente (Kg)	0,00791	0,00769	0,0339
Humedad, %	25,14	25,1	1,6

Fuente Propia del autor

Peso Agua = 0,01841 Kg – 0,0163 Kg = 0,00254 Kg

Peso Suelo Seco = 16.30gr – 7.91gr = 0,00839

Humedad = 2.11gr / 8.39gr * 100 = 25.14%

Se realiza el anterior procedimiento para las dos muestras y después se saca el promedio

Limite Plástico = (25.10 + 25.1) / 2 = 25.10%

Limite liquido = 40.7%

Limite Plastico = 25.1%

Indice de plasticidad = 15.5%

El caolin asimila a una arcilla y se puede observar por el alto porcentaje de plasticidad que tiene la muestra analizada.

6.2 PLANIFICAR EL REEMPLAZO Y DISTRIBUCIÓN DE LA ESCORIA DE ACERIA DENTRO DE LA ARCILLA CAOLINITICA.

A continuación, se presenta las matrices de dosificación de las muestras objeto de la investigación.

6.2.1 Matriz de Dosificación – Muestra Caolín.

La cantidad de escoria de acería que se utilizó para mezclar con el caolín es la retenida entre los tamices N°10 y N°100 se considera como material fino. Determinamos el peso que se reemplazara en escoria de acería en cada porcentaje, quedando la matriz de dosificación como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Matriz de Dosificación - Muestra Caolín

Dosificación	Peso Muestra (Kg)	Peso Caolín (Kg)	Peso Escoria (Kg)
0%	2,39	2,39	0
25%	2,331	1,74825	0,58275
50%	2,526	1,263	1,263
75%	2,462	0,6155	1,8465

Fuente Propia del autor

Con este plan de dosificación se hará la comparación de resultados para determinar el comportamiento de la escoria de acería al ser adicionada con la arcilla caolinitica.

6.3 ELABORACIÓN DE ENSAYOS PROCTOR Y CBR

Los ensayos que se realizaron a cada matriz de dosificación, estuvieron regulados bajo las normas INVIAS 2013, para cada muestra se determinó humedad Óptima, densidad seca máxima, CBR, y Compresión inconfiada.

Los resultados de la matriz de arcilla caolinitica obtenidos por el laboratorio NIVIA, se resumen en la Tabla 15.

6.3.1 Humedad y Densidad Seca Máxima - Muestra Arcilla Caolínitica.

Este ensayo es realizado de acuerdo a las recomendaciones de la norma INV - E -142, utilizado principalmente para determinar la humedad óptima de compactación y la densidad seca máxima

Tabla 15. Resultados Humedad Óptima de Compactación y Densidad Seca – arcilla Caolínica

Prueba N°	1	2	3
Numero de Golpes por capas	56	56	56
Molde N°	1	1	1

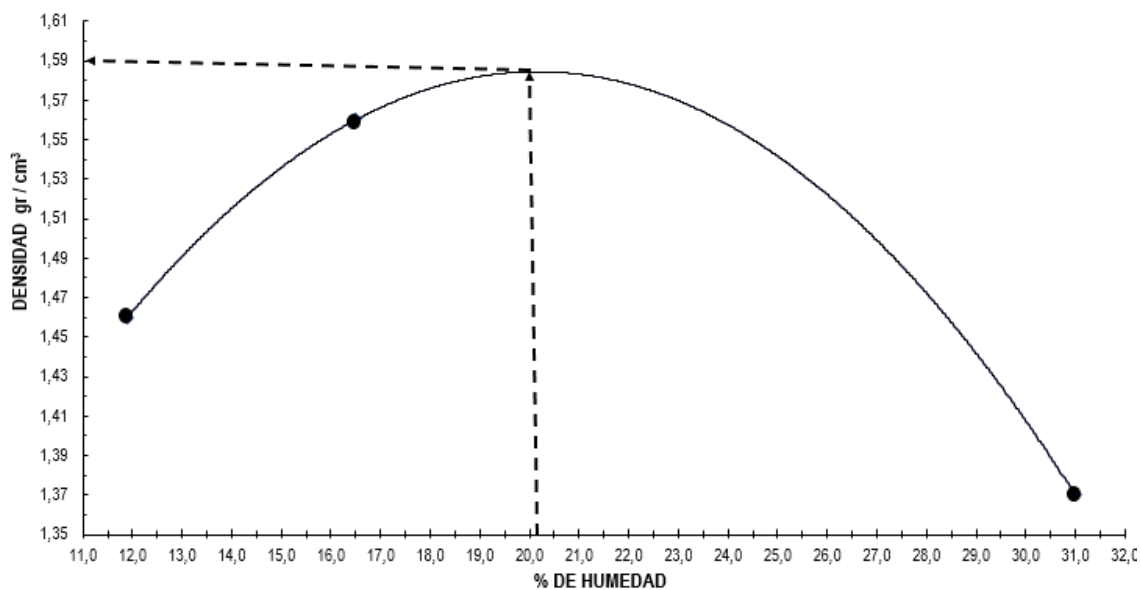
Humedad Adicional %	10	15	30
Peso de la Muestra Seca (Kg)	5	5	5
Agua Adicional, m ³	5	7,5	15
Peso Muestra Húmeda + Molde, Kg	7,893	8,342	8,266
Peso Molde, Kg	4,11	4,11	4,11
Peso Muestra Húmeda, Kg	3,783	4,232	4,156
Peso Muestra Húmeda, Kg	16,68	18,66	18,32
Volumen del Molde, m ³	23,22	23,22	23,22
Densidad Húmeda, Kg/m ³	0,163	0,182	0,179
Humedad, %	11,9	16,5	31
Densidad Seca Kg/m ³	0,146	0,156	0,137

Peso Muestra Húmeda + Molde, Kg	0,3465	0,3341	0,3648
Peso de la Muestra Seca, Kg	0,3131	0,2917	0,2875
Peso Molde, Kg	0,0319	0,0349	0,0378
Humedad de Compactación, %	11,9	16,5	31

Fuente Propia del autor

Una vez se tienen los porcentajes de compactación y densidades, para tres humedades diferentes, se procede a graficar estos valores, como se muestra en la Grafica 2 y se determina la humedad óptima en el punto más alto de la curva.

Grafica 2. Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima – muestra Caolín



Fuente Propia del autor

De la anterior grafica se determina que la Humedad óptima de compactación de la muestra patrón es de 20.2% y la densidad máxima seca es de 1,59 Kg/m³

6.3.2 Ensayo de CBR - Muestra Caolín.

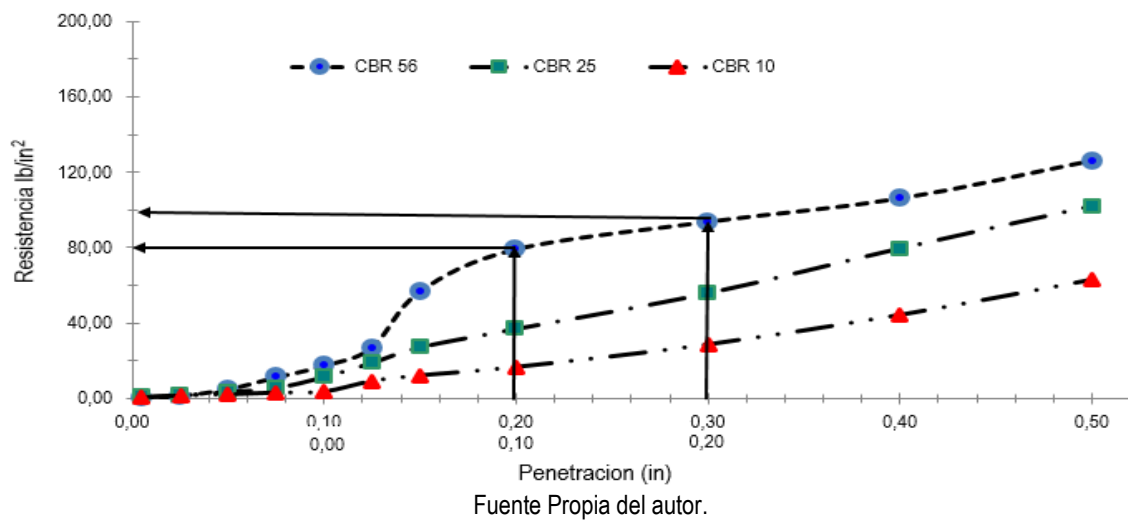
Con el ensayo de CBR se determina la resistencia inicial al corte de la muestra patrón de Caolín, el cual será el punto de partida en el análisis de resultados, al compararlo con mezcla de escoria de acería en distintos porcentajes. A continuación, se muestra en la Tabla **16**, la relación esfuerzo deformación del ensayo CBR obtenidas en el laboratorio.

Tabla 16. Relaciones de esfuerzo deformación en el ensayo CBR – Muestra de Caolín

Molde No.	1		2		3	
Número de Golpes Capa	56		25		10	
Días de Inmersión	4		4		4	
Expansión, %	0,022		0,022		0,022	
Penetración, in	Fuerza de Penetración KN	Esfuerzo lb/in ²	Fuerza de Penetración KN	Esfuerzo lb/in ²	Fuerza de Penetración KN	Esfuerzo lb/in ²
0,005	0.02	1.35	0.01	0.67	0.01	0.37
0,025	0.06	4.8	0.02	1.72	0.02	1.2
0,050	0.15	11.17	0.05	3.37	0.03	1.95
0,075	0.23	17.24	0.07	5.47	0.04	2.85
0,100	0.35	26.08	0.15	11.24	0.05	3.37
0,125	0.76	56.65	0.25	18.73	0.12	8.99
0,150	1.06	79.06	0.36	26.98	0.16	11.99
0,200	1.25	93.67	0.49	36.72	0.22	16.49
0,300	1.42	106.04	0.74	55.68	0.38	28.48
0,400	1.68	126.12	1.06	79.43	0.59	44.21
0,500	1.95	146.35	1.36	101.91	0.84	62.95
CBR Corregido 0,1"	7.97		1.1		0.3	
CBR Corregido 0,2"	10.00		2.4		1.1	
Humedad de penetración %	24.20		25.80		26.50	

Fuente Propia del autor

Grafica 3. CBR Corregido Caolín



De la Grafica 3, ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se busca el esfuerzo corregido a 0.1 pulgadas y hallando un esfuerzo de penetración de 80 lb / in², que equivale a 0.5516 Mpa

$$CBR_{0.1} = (\text{Carga Unitaria del Ensayo} / \text{Carga Unitaria Patrón}) * 100$$

$$CBR_{0.1} = (0.55\text{Mpa} / 6.9 \text{ Mpa}) * 100$$

$$CBR_{0.1} = 7.97\%$$

De la Grafica 3, se busca el esfuerzo de penetración a 0.2 pulgadas corregido de 50 Kg / in², que equivale a 0.69 Mpa.

$$CBR_{0.2} = (\text{Carga Unitaria del Ensayo} / \text{Carga Unitaria Patrón}) * 100$$

$$CBR_{0.2} = (0.69\text{Mpa} / 6.9 \text{ Mpa}) * 100$$

$$CBR_{0.2} = 10.0\%$$

6.3.3 Ensayo Compresión Inconfinada – Muestra de Caolín

En la Tabla 17, se relacionan las humedades para las diferentes dosificaciones de Caolín, para el ensayo de compresión inconfinada.

Tabla 17. Resultados de Humedad para ensayos de Compresión Inconfinada

Descripción	Dosificaciones			
	0%	25%	50%	75%
Peso Recipiente + suelo Húmedo (Kg)	0,2747	0,2873	0,2786	0,27103
Peso Recipiente + suelo seco (Kg)	0,1346	0,2621	0,2475	0,2305
Peso Recipiente (Kg)	0,0336	0,0316	0,0335	0,0328
Humedad, %	20	10,9	14,5	20,5
Peso, (Kg)	2,39	2,331	2,526	2,462
Diámetro, m	0,1	0,1	0,1	0,1
Altura, m	0,191	0,191	0,191	0,191
Área m ²	0,7854	0,7854	0,7854	0,7854
Volumen m ³	15,0011	15,0011	15,0011	15,0011
γ_t , Kg/m ³	0,159	0,168	0,168	0,164

Fuente Propia del autor

Dónde:

γ_t : Densidad húmeda y seca Kg/m³

γ_t : (peso de la probeta/ Volumen de la probeta)

γ_t : (2390 Kg / 1500.11) = 1.59 Kg/m³

En la Tabla 18, se indica la consistencia del suelo, resistencia del suelo de acuerdo a la resistencia a la compresión inconfinada, este valor corresponde a una clasificación de Terzaghi.

Tabla 18. Clasificación de Terzaghi, Para evaluar la consistencia del Suelo.

Consistencia del suelo	Resistencia a la compresión inconfiada Kg/cm ²
Muy Blanda	< 0.25
Blanda	0.25 - 0.50
Mediana	0.50 - 1.00
Firme	1.00 - 2.00
Muy Firme	2.00 - 4.00
Dura	>4.00

En la Tabla 19, se indican los valores obtenidos en laboratorio de esfuerzo vs Deformación de la muestra de Caolín.

Tabla 19. Esfuerzo Vs Deformación - Muestra Caolín

Lectura Deformación x 10-3	Carga kN	Área m ²	Esfuerzo Total Mpa	Deformación Unitaria Axial %
10	0,145	0,7864	0,018	0,13
20	0,241	0,7875	0,031	0,27
30	0,353	0,7885	0,045	0,4
40	0,459	0,7896	0,058	0,53
50	0,626	0,7907	0,079	0,66
60	0,759	0,7917	0,096	0,8
70	0,878	0,7928	0,111	0,93
80	1,002	0,7938	0,126	1,06
90	1,134	0,7949	0,143	1,2
100	1,279	0,796	0,161	1,33
120	1,755	0,7981	0,22	1,6
140	2,648	0,8003	0,331	1,86
160	3,345	0,8025	0,417	2,13
180	3,34	0,8047	0,415	2,39
200	3,222	0,8069	0,399	2,66

Fuente Propia del autor

σ : Esfuerzo total

σ : (carga / Área corregida) = Kg/m²

σ : (0.145kN / 0.007864 m²) = 18.438 Kg/m² o 0.188 Kg/cm² o 0.0184 MPa

La resistencia al corte se obtiene de dividir el esfuerzo Total de compresión en 2, con lo que se obtiene 0.208 MPa de resistencia al corte.

La resistencia al corte (q_c), se determina por la expresión:

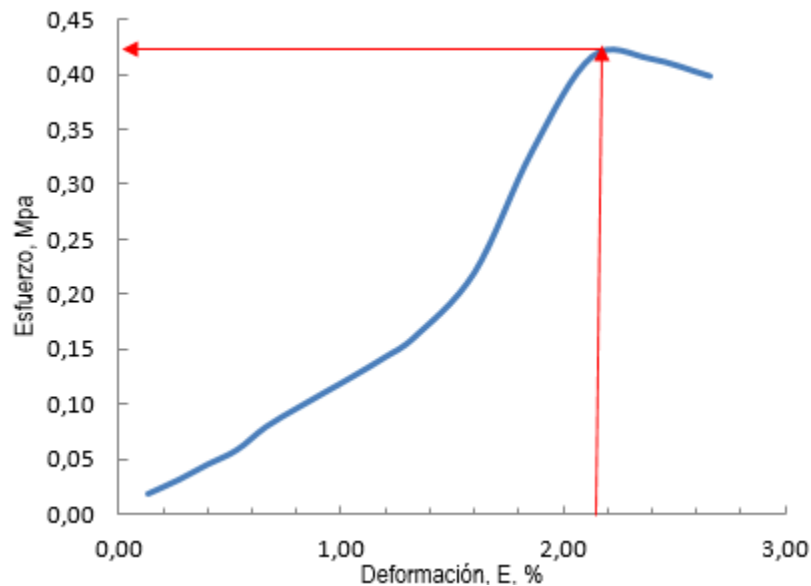
q_c : Resistencia al corte MPa

q_c : $\sigma/2$ MPa

En Grafica 4, la resistencia del suelo o esfuerzo de compresión último corresponde a 0.417 MPa, según la clasificación de Terzaghi, es una arcilla de consistencia muy blanda de acuerdo a la

No se encuentra el origen de la referencia. Tabla 18.

Grafica 4. Compresión inconfiada



Fuente Propia del autor

A continuación, en la Tabla **20**, se relaciona el resumen de resultados obtenidos en laboratorio de Humedad Óptima, CBR de Laboratorio, Densidad Seca, Compresión Inconfinada.

Los resultados de la matriz de Caolín se encuentran resumidos en la Tabla **20**

Tabla 20. Resultados Matriz de Dosificación – Muestra Caolín

Dosificación	Humedad Óptima %	CBR de Laboratorio %	Densidad Seca Kg/m ³	Compresión Inconfinada Mpa	Resistencia al corte (MPa)	Índice de Plasticidad %
Muestra Patrón	20.20	7.97	0,159	0.41	0.20	15.50
25%	20.50	9.13	0,164	0.33	0.16	11.60
50%	14.30	18.57	0,168	0.31	0.15	5.80
75%	10.80	30.20	0,155	0.21	0.10	0.00

Fuente Propia de los Autores.

7 DIAGNÓSTICO

7.1 DIAGNOSTICO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN.

La caracterización de los materiales que intervinieron en la presente investigación (Arcilla Caolínica y escoria de Acería), arrojaron una serie de resultados, los cuales serán analizados, para verificar su

cumplimiento tomando como base las especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS.

7.1.1 Caracterización Escoria de Acería

La caracterización de la escoria de acería fue suministrada por la siderúrgica Acerías paz de Rio, y sus resultados fueron comparados con los requisitos para bases granulares del Instituto Nacional de vías, como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Cumplimiento Normas INVIAS – Muestra Escoria de Acería.

ENSAYO	RESULTADOS LABORATORIO	NORMA INVIAS	CUMPLE
Abrasión en los Ángeles Machine, 500 revoluciones	49,20%	40% (Max)	NO
Micro – Deval	29,20%	30% (Max)	SI
10% de finos (resistencia seca)	123Kn	70 (Min)	SI
Partículas fracturadas: 1 cara	92%	50(Min)	SI
partículas fracturadas: 2 cara	88%	50(min)	SI
Índice de plasticidad	No Plástico	3 (Max)	SI
Índice de aplanamiento	5,62%	35 (Max)	SI
CBR (100% de densidad seca máxima y cuatro días de inmersión en agua)	95,68%	≥ 80%	SI

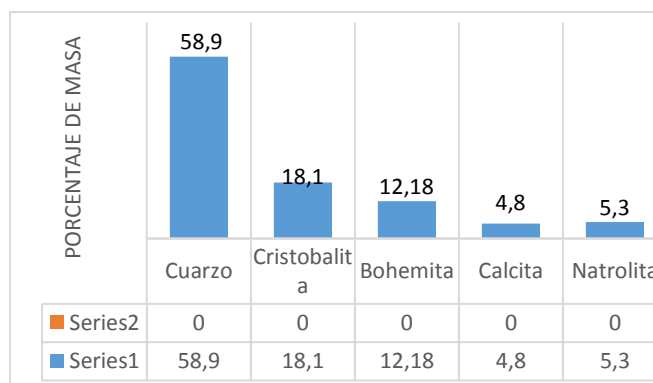
Fuente Propia del autor

Con los parámetros de la Tabla 21, se puede considerar que la escoria de Acería tiene propiedades mecánicas que la clasifican como una base granular, el único parámetro que no cumple es la resistencia al desgaste, luego la escoria utilizada para esta investigación no es lo suficientemente dura y no presentaría buenos resultados al ser sometida a fricción en estructuras.

En la Grafica 5, la escoria presenta una estructura interna donde predomina el cuarzo 58.9% y cristobalita 18.1%. que contienen sílice que al contacto con el agua reacciona expandiéndose

generando daños estructurales debido al desarrollo de presiones internas de la reacción química, el cual podría generar fisuras.

Grafica 5. Porcentajes de Masa Minerales de la escoria.



Fuente Propia del autor

7.1.2 Caracterización Caolín

Como se puede observar en la Tabla 18, Tabla 19, Tabla 20, los resultados obtenidos de caracterización en el laboratorio; esta muestra se asimila a una subrasante típica de las vías de Colombia con altos porcentajes de plasticidad y bajo CBR. Con estas características el suelo presenta sensibilidad a la humedad, cambios de volumen y baja resistencia, ocasionando daños graves en la estructura de la vía, este proyecto sirvió para evaluar el comportamiento de estas variables al ser modificado el caolín con escoria de acería.

7.2 DIAGNOSTICO DE LA MATRIZ DE DOSIFICACION.

Se realizó la investigación de escoria de acería, como un medio de mitigación en la explotación de canteras, se propuso mezclarlo con un material fino, y realizarle unos ensayos específicos como CBR, Proctor y Compresión Inconfinada, y de esta manera, analizar su comportamiento, para lo cual se utilizó una arcilla caolinitica que al hacer su caracterización resultó estar entre los parámetros de una subrasante típica de las vías de Colombia con altos porcentajes de plasticidad y bajo CBR.

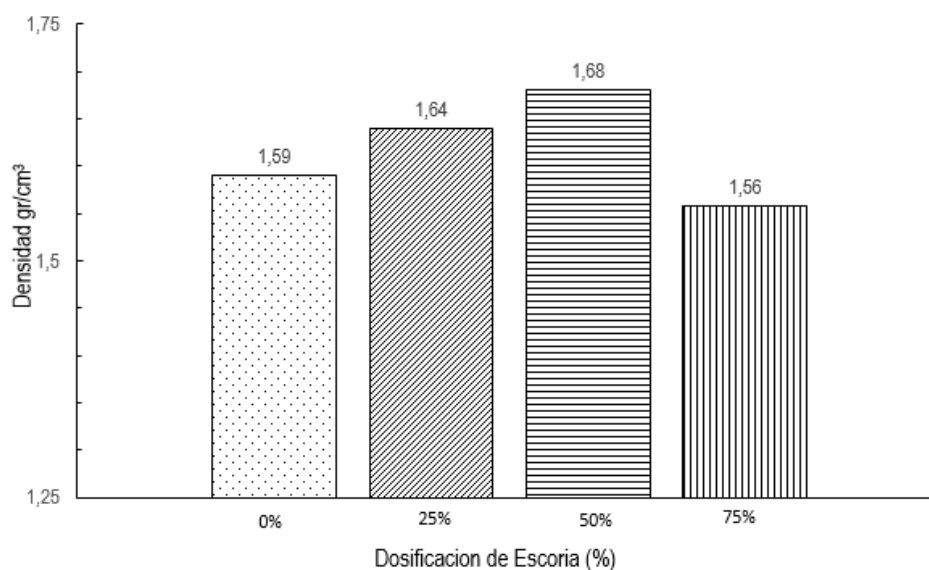
Posteriormente se optó por hacer dosificaciones altas y equitativas de escoria, ya que en las investigaciones hechas por otros autores [4], [12] estos utilizan porcentajes bajos como es el caso de la investigación realizada por Tauta, Reyes y Camacho [4] que utilizaron dosificaciones de 1.5, 2.5, 3.5, 5.0, 6.5 y 8%, y obtuvieron un incremento del 15% en el índice de resistencia (CBR) y entre 0.22 y 3.6% en la densidad del material [4]. El caolín se utilizó para asimilar una subrasante de vía, y se estableció según los resultados, que la escoria de acería se puede utilizar como mejoramiento de subrasante mejorando sus propiedades mecánicas.

7.3 DIAGNÓSTICO DE ENSAYOS DE LABORATORIO.

7.3.1 Comparación Resultados Proctor Muestra de Caolín

De la Grafica 6, se detalla que la densidad al dosificar escoria de acería en 25% y 50% aumenta y al dosificar al 75% presenta una disminución.

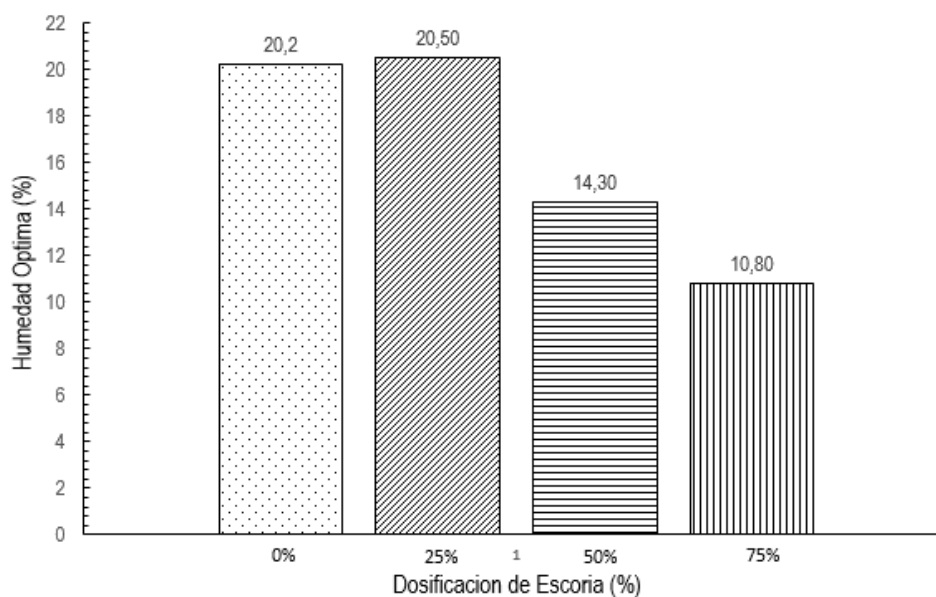
Grafica 6. Comparación en Diagrama de Barras, Proctor – Muestra de arcilla Caolínica



Fuente Propia del autor

En la Grafica 7 , la humedad es inversamente proporcional, a medida que se aumenta la dosificación de escoria disminuye la cantidad de agua necesaria para obtener la humedad óptima. (disminuye la humedad)

Grafica 7. Comparación Diagrama de barras de Humedad Óptima – Muestra de Caolín.

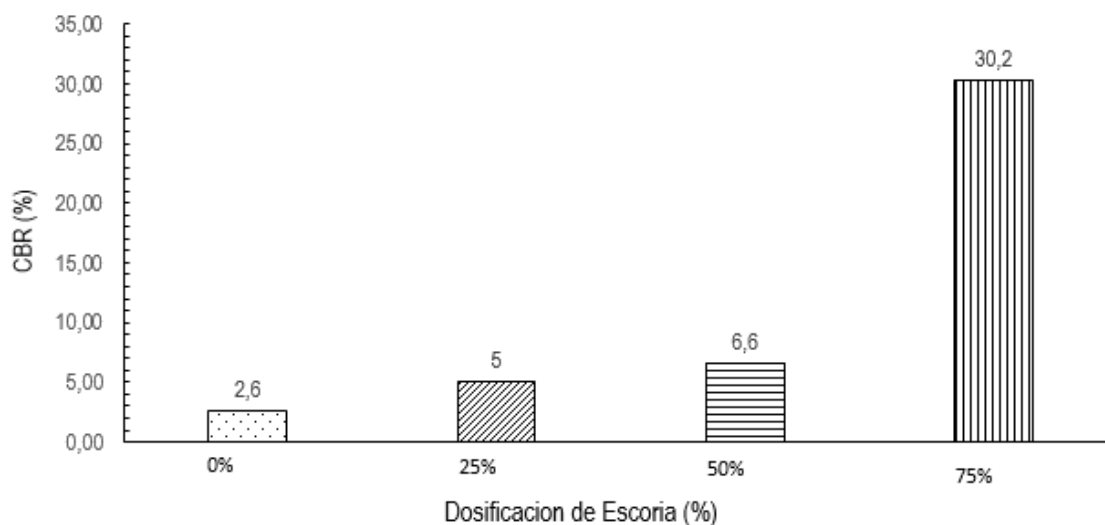


Fuente Propia del autor

7.3.2 Comparación Resultados CBR -Muestra Caolín.

De la Grafica 8, se observa que la resistencia al corte de las muestras analizadas aumenta a medida que se incrementa la dosificación de escoria de acería.

Grafica 8. Comparación en Diagrama de Barras del CBR – Muestra de Caolín



Fuente Propia del autor

En la Grafica 7 y Grafica 8, se tabulan los resultados obtenidos en laboratorio, bajo las normas INVIAS 2013, en cuanto a Humedad Óptima, CBR, y Densidad Seca.

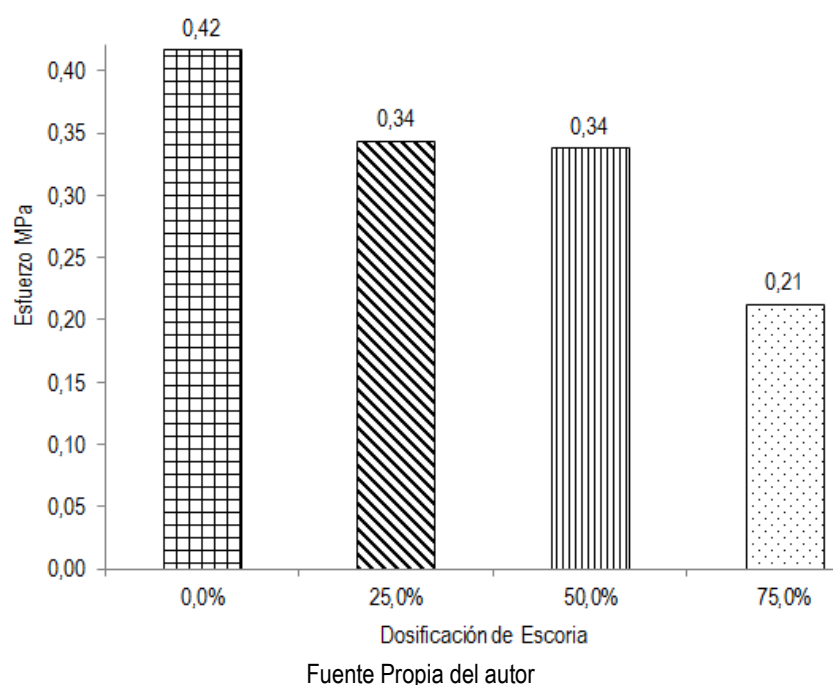
En la muestra de arcilla caolínica se observa que la humedad óptima disminuye a medida que se aumenta la dosificación de escoria, esto se debe a la reducción del índice de plasticidad que sufre la mezcla hasta el punto de llegar a convertirla en no plástica como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** La reducción de plasticidad se debe a la composición de óxido de calcio o cal que presenta la escoria, que hace que funcione como material estabilizante.

En la Tabla **20**, se observa como las densidades secas en la muestra de arcilla caolinitica aumentan al aumentar las dosificaciones en los porcentajes de 25%, 50% y disminuye en el 75%, con respecto a la muestra patrón de caolín. En la arcilla caolínica al momento de compactar las muestras estas se acomodan en los poros de la escoria reduciendo el porcentaje de vacíos.

En los resultados de laboratorio de CBR reflejados en la Tabla **20**, se detalla el aumento de los valores de CBR, cuando se incrementa la dosificación de escoria, esto se debe a la propiedad que tiene la escoria de ser un material cementante que al ser mezclado con un suelo arcilloso lo estabiliza, incrementando sus propiedades mecánicas tales como el índice de resistencia y densidad seca.

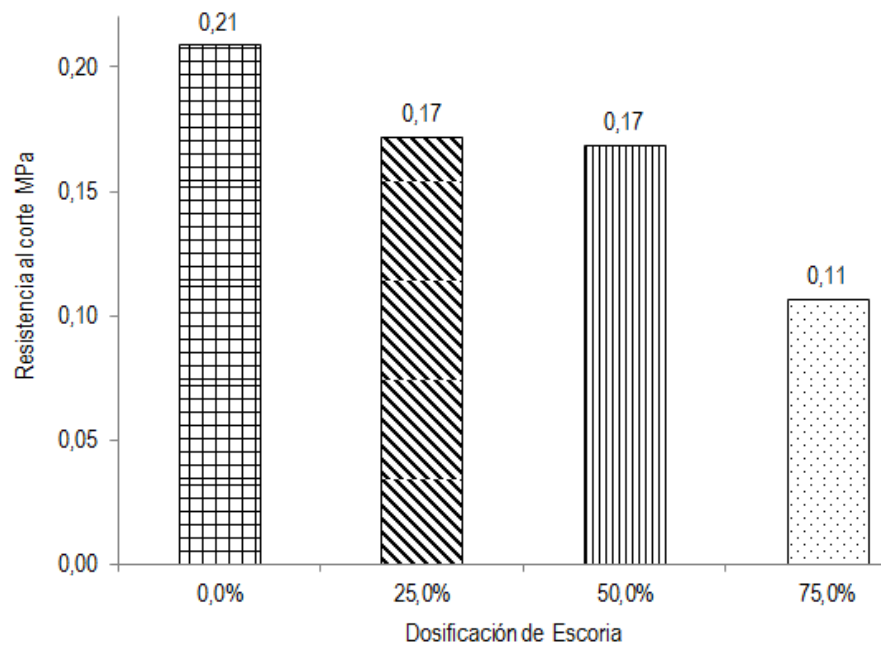
En la Grafica 9, se observa que la resistencia del suelo o esfuerzo de compresión último, disminuye inversamente proporcional a medida que se aumenta la dosificación de escoria de acería, debido a que la consistencia de la arcilla caolinitica es muy blanda y a que el índice de plasticidad se hace no plástico. La composición de la escoria de Acería de Paz de Rio está constituida por silicatos cálcicos que presentan porosidad y se hidratan al estar en contacto con el agua. (LA HIDRATACIÓN QUE SE HABLA ES PARA ENDURECERSE Y SER MÁS FUERTE)

Grafica 9. Comparación en Diagrama de Barras Esfuerzo – Muestra de Caolín



En la Grafica 10, se observa que el esfuerzo total en el Caolín es inversamente proporcional a la dosificación de escoria; es decir a medida que se aumenta la dosificación disminuye los esfuerzos, además disminuye la cohesión entre partículas o resistencia al corte bajo presión.

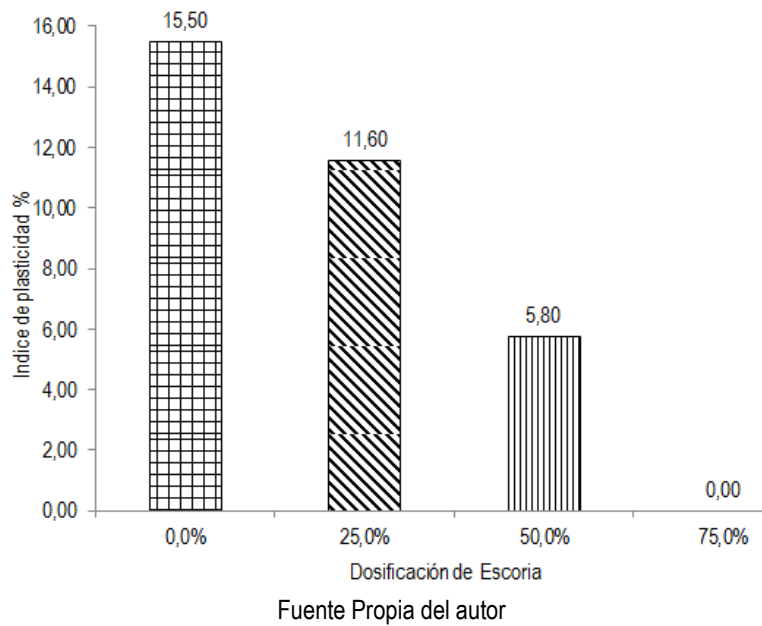
Grafica 10. Comparación en Diagrama de Barras Resistencia al corte – Muestra de Caolín



Fuente Propia del autor

En la Grafica 11, La matriz de dosificación de escoria de acería y Caolín es inversamente proporcional, es decir que a medida que se aumenta la dosificación de escoria disminuye el índice de plasticidad y se comporta la matriz como no plástica. Esto se debe a que la composición de la escoria de acería de Paz de Rio, está constituida por silicatos cálcicos que presentan porosidad y se absorben al estar en contacto con el agua.

Grafica 11. Comparación en Diagrama de Barras Índice de Plasticidad – Muestra de Caolín



7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para determinar la densidad seca en el Caolín, se escogió el ensayo de proctor modificado y no estándar a pesar que la escoria absorbe humedad, como la muestra estaba saturada no había suficiente pérdida considerable de humedad , En la Tabla **22**, se observa que, al aumentar la dosificación de escoria en la muestra de caolín, se aumenta la densidad seca de las muestras analizadas, esto se debe a la buena adherencia que tiene el caolín con la escoria, haciendo que se genere una buena compactación.

Tabla 22. Aumento y Disminución de Densidad Seca en la muestra Patrón de Caolín.

Dosificación	Densidad Seca Gr/cm ³	Aumento y Disminución de Densidad (%)
Muestra Patrón	1.590	
25%	1.640	3,14%
50%	1.683	5,85%
75%	1.558	-2,01%

Fuente propia de los Autores

En la Tabla 23, La escoria de acería tiene un alto potencial en la estabilización de sub-rasantes arcillosas, al aumentar la cantidad de escoria en la muestra patrón de Caolín le otorga propiedades mecánicas favorables como el incremento de índice de resistencia CBR o capacidad portante, disminuyendo su plasticidad y resistencia al corte.

Tabla 23. Aumento de CBR – Muestra Caolín.

Dosificación	CBR de Laboratorio %	Aumento de CBR
Muestra Patrón	7,97	
25%	9,13	114,55%
50%	18,57	233,00%
75%	30,2	378,92%

Fuente propia del autor

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. Tabla 24, La matriz de dosificación de escoria de acería y Caolín es inversamente proporcional, es decir que a medida que se aumenta la dosificación de escoria se disminuye el esfuerzo máximo y la resistencia al corte, debido a que la consistencia del

suelo Arcilla Caolínica es muy blanda, los cilindros presentaron fisuras verticales y se determinó que es un material frágil.

El Caolín es un material plástico muy saturado que al aumentar el porcentaje de escoria de acería pierde la propiedad de plasticidad, lo cual le permite ser deformado sin romperse, sin cambio de volumen, la mezcla Caolín Escoria de acería se torna seca, no plástica.

Tabla 24. Comparación de esfuerzo, resistencia al corte y consistencia del suelo.

Dosificación	Carga (kN)	Esfuerzo Max (MPa)	Resistencia al corte (MPa)	Consistencia suelo	Índice de Plasticidad %
Muestra Patrón	3345	0.41	0.20	Muy Blanda	15.50
25%	2840	0.34	0.17	Muy Blanda	11.60
50%	2780	0.33	0.16	Muy Blanda	5.80
75%	1716	0.21	0.10	Muy Blanda	0.00

Fuente propia del autor

Debido al alto contenido de óxido de calcio (CaO) de la escoria de acería, esta se puede emplear como estabilizante en sub-rasantes, mejorando las propiedades geotécnicas, con la adición de escoria de acería aumenta la capacidad de carga CBR, mejora la compactación del suelo y reduce el índice de plasticidad.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. En cuanto a la caracterización del Caolín se clasifica como una subrasante de consistencia muy blanda, por su baja resistencia al corte y alta plasticidad.
2. De acuerdo a la caracterización realizada a la escoria esta tiene propiedades cementantes, debido a su composición mineralógica y química según **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, que la hace un material estabilizante en materiales arcillosos. La escoria no cumple con el parámetro de desgaste y abrasión según la norma INVIAS 2013 [25], porque es un material frágil y de baja resistencia a la fricción por lo tanto no se puede instalar sin mezclar con un agregado pétreo que disminuya el porcentaje de desgaste. Según [21] la escoria de acería se utiliza como agregado y se determinó que posee una excelente resistencia a la abrasión, dureza y resistencia.
3. En la composición química de la escoria de Acerías Paz de Rio, se observa que está compuesta por dióxido de silicio SiO_2 , y óxido de calcio CaO , que son materiales estabilizantes y los cuales reaccionan con la presencia de agua, generando una reacción expansiva, debido a la hidratación de estos elementos. Según [8] la adición de escoria de acería a materiales de sub-base y base granulares puede generar reacciones de cementación y absorción ocasionando el agrietamiento o deformaciones a la carpeta de rodadura. En el caso de adición a agregados granulares el ensayo ASTM D-4792 permitió evaluar el potencial de expansión y estableció que la escoria es susceptible a hidratarse porque presentan índices de expansión elevados no se recomienda emplear en sub-bases y bases granulares. Se recomienda obras de drenaje para evitar posibles expansiones del material, ya que por las propiedades de absorción la escoria es altamente expansiva. Según [9] afirma que con el 5% de escoria blanca se consiguen excelentes resultados en la estabilización de arcillas, puesto que aumenta su capacidad portante y resistencia a compresión y disminuye su plasticidad e hinchamiento, mientras que la escoria negra debido a su elevada dureza y a su granulometría es de correcto

uso en bases y sub-bases para pavimentos, cumpliendo las solicitudes de la normativa de referencia utilizada para su estudio.

4. Se puede concluir que la escoria de acería funciona en materiales cohesivos, reduciendo la plasticidad hasta un 0% y aumentando el CBR, en un 378.92% de acuerdo a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, esto debido a la buena adherencia que hay entre los dos materiales. Se recomienda la estabilización de subrasantes arcillosas con escoria de acería Paz de Rio. Según [9] afirma que con el 5% de **escoria blanca** se consiguen excelentes resultados en la estabilización de arcillas, puesto que aumenta su capacidad portante y resistencia a compresión y disminuye su plasticidad e hinchamiento, mientras que la **escoria negra** debido a su elevada dureza y a su granulometría es de correcto uso en bases y sub-bases para pavimentos, cumpliendo las solicitudes de la normativa de referencia utilizada para su estudio.
5. Los resultados de compresión inconfiada disminuyen en 0.20 Mpa, según la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, clasificando el caolín como una arcilla de consistencia muy blanda, debido a la propiedad que tiene la escoria de absorción de agua que disminuye el índice de plasticidad a 0% y la resistencia al corte en 0.10 Mpa y por ende disminuye la cohesión entre partículas y no se deforma la muestra volviéndola rígida. Según [22] el material no presenta plasticidad y el porcentaje de humedad óptima es menor que el material granular tradicional, lo que en condiciones de humedad se comporte mejor, su compactación es más rápido formando una capa estructural sólida que resiste el tránsito pesado, proporcionando una mayor durabilidad a los espesores de capas, al no presentar plasticidad su comportamiento frente al agua es mejor y debido a su buena resistencia mejora la estabilidad de las capas estructurales.
6. La investigación tiene como aporte una solución a la problemática de los residuos de escoria que se producen en las siderúrgicas del país, las cuales pueden generar un impacto negativo en el medio ambiente, además de minimizar la explotación de canteras.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. d. d. d. A. Latina, «La Infraestructura en el Desarrollo Integral de América Latina,» PARAGUAY, 2011.
- [2] M. d. t. y. transporte, «Lineamientos de política para la red terciaria,» BOGOTÁ, 2016.
- [3] H. M. S. Abril, «Estado del arte sobre las escorias negras de horno de acero eléctrico y sus aplicaciones en pavimentos».
- [4] O. J. R. O. - J. F. C. Tauta, «Grupo de Investigación Geotecnia Universidad Militar Nueva Granada,» Bogotá.
- [5] M. d. transporte, «Parque automotor de transporte de carga en Colombia,» 2016.
- [6] D. I. A. C. G. - I. E. G. Garcia, «Uso de las escorias de acería de horno eléctrico en obras viales».
- [7] v. y. m. a. Departamento de ordenación del territorio, «Escorias de acerías».
- [8] J. A. Saffirio, «Análisis geomecánico de escorias de acería, posibilidades de uso en obras viales».
- [9] M. B. Vazquez Ramonich E, «Reactividad y expansión de las escorias de acería de horno,» Cataluña.
- [10] O. Vanesa, «Utilización de escoria siderúrgica para construir caminos y estabilizar suelos,» Burgos, España.
- [11] G. W. - Y. W. - Z. Gao, «Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria».
- [12] R. F. F. Bedoya, «Evaluación del comportamiento de mezclas suelo-escoria».
- [13] L. M. P. A. - D. P. S. García, «Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco,» BOGOTÁ, 2010.
- [14] M. A. Marquiena Sierra, «Uso de las escorias obtenidas como sub producto de la elaboración de acero de la planta N°2 de Aceros Arequipa – Pisco para fines de cimentación y pavimentación,» Universidad Ricardo Palma, Lima, Peru, 2008.
- [15] M. B. Regueira, «Utilización de las escorias de acería como material de construcción,» Universidad Holguin, Cuba, 2011.
- [16] R. T. Javier, «Estudio del uso de materiales reciclados en firmes de carreteras,» Universidad de Cantabria, Santander, España, 2013.
- [17] M. F. R. y. S. d. R. M. I. Uria Alejandro, «Estudio de la inestabilidad en escorias negras de horno de arco eléctrico,» Instituto Eduardo Torroja, Madrid ESPAÑA, 2002.
- [18] A. J. T. P. y. M. D. Izco Félix, «Valorización de escorias de acería en la construcción de pistas forestales,» *Agro*, vol. II, nº 70, pp. 52-56, 2004.
- [19] G. L. Olegario, «Empleo de escorias de alto horno en los firmes de carretera,» *OBRAS PÚBLICAS*, vol. I, nº 115, pp. 1189-1197, 1967.

- [20] A. C. E. Rodrigo, «Caracterización de una mezcla asfáltica empleando alquitrán, escoria granulada y agregado de caliza,» Universidad Militar Nueva Granada , BOGOTÁ, 2015.
- [21] M. P. Ana, «Proyecto sobre residuos: Utilización de escorias como sustitutos de áridos,» Escuela de Organización Industrial, ESPAÑA, 2011.
- [22] P. L. A. Alberto, «Evaluación de la escoria de acero de la planta de siderurgica de Guatemala (SIDEGUA), para su uso como agregado en carreteras,» Universidad de San Carlos, GUATEMALA, 2014.
- [23] A. J. Rodriguez Pedro Andrés, «Estabilización de suelos en obras de carreteras,» Universidad de Evora, PORTUGAL, 2015.
- [24] B. A. Iokin, «Análisis de la influencia de residuos metalúrgicos como áridos en las propiedades del hormigón,» BARCELONA 2008, 2008.
- [25] Manual de normas de ensayo de materiales para carreteras (INVIAS 2013), BOGOTÁ, 2013.
- [26] D. F. P. S. H. A. V. G. F. A. R. L. J. C. R. C. Y. M. M. d. F. Hugo Alexander Rondón Quintana, «Use of blast furnace lag as a substitute for the fine fraction of aggregates in an asphalt mixture,» Bogotá, 2017.