ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE UN SUELO COHESIVO Y POSIBLE USO COMO MATERIAL DE TERRAPLÉN; CUANDO SE MODIFICA SU COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA USANDO ESCORIA DE ALTO HORNO.

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL

JENNIFFER ACOSTA SALGADO 20141579086
CESAR AUGUSTO VILLARRAGA MORENO 20141579146



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS FACULTAD TECNOLOGICA
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTA D.C.
2018

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE UN SUELO COHESIVO Y POSIBLE USO COMO MATERIAL DE TERRAPLÉN; CUANDO SE MODIFICA SU COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA USANDO ESCORIA DE ALTO HORNO.

JENNIFFER ACOSTA SALGADO
CESAR AGUSTO VILLARRAGA MORENO

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR DEL PROYECTO
ING. HERNANDO VILLOTA POSSO

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS FACULTAD TECNOLÓGICA
INGENIERÍA CIVIL BOGOTA D.C.
2018

Nota De Aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Director del proyecto

_____

Jurado

_____

Jurado

Bogotá D.C., _____

CONTENIDO

RESUMEN 1

ABSTRACT 2

INTRODUCCIÓN 3

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. 7

JUSTIFICACIÓN 9

HIPOTESIS 11

OBJETIVOS 12

General 12

Específicos 12

MARCO DE REFERENCIA 13

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION. 13

La escoria de acero como material modificador. 13

MARCO LEGAL 18

METODOLOGÍA 19

Fase 1. Recopilación de información. 20

Fase 2. Obtención del material modificador y caracterización del material de estudio. 20

Fase 3. Modificación de granulometría del material usando escoria de alto horno como variable. 21

Fase 4. Análisis de resultados y viabilidad 22

MARCO TEÓRICO 23

Estabilización Mecánica 24

Mejoramiento del suelo a partir de materiales reciclables. 24

Escoria de alto horno – escoria de acero 25

Composición de la escoria de acero de alto horno 26

Terraplenes 27

Ensayos de caracterización material según tabla 220-1, requisitos de los materiales para terraplenes; artículo 220-13 Terraplenes. 31

Granulometría 31

Humedad natural 31

Límites de Atterberg 32

Límite líquido 32

Límite de plástico 33

CBR (California Bearing Ratio) 35

PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS 42

RECOLECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SUELO NATURAL 42

Determinación del límite líquido de los suelos (I.N.V. E – 125 – 07) 43

Límite plástico e índice de plasticidad de suelos (I.N.V. E – 126 – 07) 44

Análisis granulométrico de suelos por tamizado (I.N.V. E – 123 – 07.) 45

Relación de soporte del suelo (CBR) en el laboratorio (INV-148-07) 46

Resultados de análisis de datos para CBR del suelo en su estado natural para un rango de humedades 46

Determinación del valor de CBR de diseño. 47

Mapa de resistencia del suelo 48

Análisis de resultados suelo en estado natural 49

Modificación de suelo con escoria de alto horno 50

ANÁLISIS DE RESULTADOS MATERIAL MODIFICADO 52

Relación de soporte CBR para material modificado. 57

Modificación de suelo natural con escoria de alto horno. 58

Resultados para una variación del suelo natural con el 5% de escoria de alto horno 60

Resultados para una variación del suelo natural con el 10% de escoria de alto horno 63

Resultados para una variación del suelo natural con el 20% de escoria de alto horno 66

Resultados para una variación del suelo natural con el 30% de escoria de alto horno 69
Resultados para una variación del suelo natural con el 40% de escoria de alto horno 72
Resultados para una variación del suelo natural con el 50% de escoria de alto horno 75
Calculo de la expansión 80
CONCLUSIONES 83
RECOMENDACIONES 91
BIBLIOGRAFÍA 93
ANEXOS 95

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Montaje y realización ensayo de límite líquido del material 32
Figura 2: Montaje y realización ensayo de límite plástico del material 34
Figura 3: Carta de plasticidad 34
Figura 4. Preparación de la muestra de suelo, antes de proceder a la compactación 36
Figura 5: Proceso de compactación en diferentes rangos de humedades 37
Figura 6: Preparación de la muestra antes de ser sumergido en el estanque 37
Figura 7: falla de la muestra de material en la prensa Marshall 37
Figura 9: Sondeo profundidad a 1.5 m 42
Figura 10: Material arcilloso en proceso de secado natural. 42
Figura 11: Procedimiento para determinar limite líquido. 43
Figura 12: Procedimiento para determinar limite plástico 44
Figura 13: Proceso para determinar CBR antes de inmersión 46
Figura 14: Proceso para determinar CBR después de inmersión. 46
Figura 14: Muestra de escoria de alto horno y suelo natural antes de mezclar 51
Figura 15: Mezcla del material natural con escoria en estado seco y en estado húmedo. 58
Figura 16: Muestra de material modificado compactado en un rango de humedades con respecto a un numero de golpes, (56, 26, 10 golpes) 59
Figura 17: Proceso de inmersión y penetración de las muestras modificadas 59

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Requisitos para materiales de terraplén tabla 220-1 artículo 220-13 30
Tabla 2: Valores de presión para alcanzar la penetración de 0.1" y 0.2" en una muestra patrón 41
Tabla 3: Límite líquido a 25 golpes para el suelo natural 43
Tabla 4: Resultados laboratorio suelo natural 44
Tabla 5: Datos obtenidos en laboratorio, análisis granulométrico para suelo natural 45
Tabla 6: Resultados obtenidos en el análisis de datos para CBR del suelo natural 46
Tabla 7: Valores comparativos de resultados para suelo en su estado natural vs Especificaciones Técnicas INVIAS tabla 220-1 art 220-13 50
Tabla 8: Composición granulométrica escoria de alto horno. 51
Tabla 9: Variación de límites de Atterberg con respecto a la variación de escoria de alto horno 53
Tabla 10: Comparación de resultados con valores límite artículo 220-13 INVIAS, tabla 220-1; requerimiento de los materiales para terraplenes 54
Tabla 11: Variación de clasificación granulométrica de acuerdo a variación de escoria de alto horno 55
Tabla 12: Comparación de valores máximos permitidos para materiales de terraplén con valores obtenidos según variación de porcentaje de escoria de alto horno. 57
Tabla 13: Resultados obtenidos en el proceso de laboratorio para una muestra de suelo modificada con 5% de escoria de alto horno 60
Tabla 14: Resultados obtenidos en el proceso de laboratorio para una muestra de suelo modificada con 5% de escoria de alto horno 61
Tabla 15: Coordenadas y elevación para mapa de resistencia del suelo modificado al 5% 62
Tabla 16: Resultados obtenidos en el proceso de laboratorio para una muestra de suelo modificada con 10% de escoria de alto horno 63
Tabla 17: Resultado de humedad optima, densidad máxima seca y densidad seca al 95% en una muestra modificada con 10% de escoria 64
Tabla 18: Coordenadas y elevación para mapa de resistencia del suelo modificado al 10% 65
Tabla 19: Resultados obtenidos en el proceso de laboratorio para una muestra de suelo modificada con 20% de escoria de alto horno 66

Tabla 20: Resultado de humedad optima, densidad máxima seca y densidad seca al 95% en una muestra modificada con 20% de escoria 67
Tabla 21: Coordenadas y elevación para mapa de resistencia del suelo modificado al 20% 68
Tabla 22: Resultados obtenidos en el proceso de laboratorio para una muestra de suelo modificada con 30% de escoria de alto horno 69
Tabla 23: Resultado de humedad optima, densidad máxima seca y densidad seca al 95% en una muestra modificada con 30% de escoria 69
Tabla 24: Coordenadas y elevación para mapa de resistencia del suelo modificado al 5% 70
Tabla 25: Resultados obtenidos en el proceso de laboratorio para una muestra de suelo modificada con 40% de escoria de alto horno 72
Tabla 26: Resultado de humedad optima, densidad máxima seca y densidad seca al 95% en una muestra modificada con 40% de escoria 73
Tabla 27: Coordenadas y elevación para mapa de resistencia del suelo modificado al 40% 74
Tabla 28: Resultados obtenidos en el proceso de laboratorio para una muestra de suelo modificada con 50% de escoria de alto horno 75
Tabla 29: Resultado de humedad optima, densidad máxima seca y densidad seca al 95% en una muestra modificada con 50% de escoria 76
Tabla 30: Coordenadas y elevación para mapa de resistencia del suelo modificado al 50% 76
Tabla 31: Resultados obtenidos según variación de escoria de alto horno. 78
Tabla 32: Rango de humedades para CBR según la variación de escoria de alto horno 78
Tabla 33: Variación de valor de CBR según porcentaje de escoria y cumplimento con los requerimientos de material de terraplén, articulo 220-13 INVIAS 79
Tabla 34: Porcentaje de expansión para cada molde ensayado 81
Tabla 35: verificación cumplimiento requisitos para material de terraplenes. Artículo 220-13 INVIAS 82
Tabla 36: Comparación de valores máximos permitidos para materiales de terraplén con valores obtenidos según variación de porcentaje de escoria de alto horno. 85
Tabla 37: Comparación de resultados con valores límite artículo 220-13 INVIAS, tabla 220-1; requerimiento de los materiales para terraplenes 86
Tabla 38: Variación de valor de CBR según porcentaje de escoria y cumplimento con los requerimientos de material de terraplén, articulo 220-13 INVIAS 87
Tabla 39: Rango de humedades para CBR según la variación de escoria de alto horno 88

INDICE DE GRAFICAS

Grafica 1: Curva de fluidez limite líquido suelo en estado natural 43
Grafica 2: Carta de plasticidad para suelo natural 44
Grafica 3: Análisis de resultados curva granulométrica para suelo natural 45
Grafica 4: Calculo de densidad máxima y humedad optima del proctor modificado para suelo natural..... 47
Grafica 5: Variación del CBR con respecto a la humedad para diferente rango de número de golpes, suelo natural..... 48
Grafica 6: determinación de CBR de diseño para suelo en estado natural. 49
Grafica 7: Curva granulométrica escoria de alto horno 52
Grafica 8: Variación grafica de propiedades índice con respecto a la variación de la granulometría por efecto de la escoria de alto horno..... 53
Grafica 9: Carta de plasticidad para cada muestra modificada con escoria de alto horno..... 54
Grafica 10: Curva granulométrica, variación con respecto al contenido de escoria de alto horno 56
Grafica 11: Grafica de variación de la densidad seca con respecto a la humedad para cada serie de golpes con una modificación de escoria de 5%..... 61
Grafica 12: Determinación gráfica del valor de CBR en un rango de humedades para una muestra de suelo modificada con el 5% de escoria de alto horno 62
Grafica 13: Grafica de variación de la densidad seca con respecto a la humedad para cada serie de golpes con una modificación de escoria de 10%..... 64
Grafica 14: Determinación gráfica del valor de CBR en un rango de humedades para una muestra de suelo modificada con el 20% de escoria de alto horno..... 65
Grafica 15: Grafica de variación de la densidad seca con respecto a la humedad para cada serie de golpes con una modificación de escoria de 20%..... 67
Grafica 16: Determinación gráfica del valor de CBR en un rango de humedades para una muestra de suelo modificada con el 20% de escoria de alto horno..... 68
Grafica 17: Grafica de variación de la densidad seca con respecto a la humedad para cada serie de golpes con una modificación de escoria de 30%..... 70
Grafica 18: Determinación gráfica del valor de CBR en un rango de humedades para una muestra de suelo modificada con el 5% de escoria de alto horno 71

Grafica 19: Grafica de variación de la densidad seca con respecto a la humedad para cada serie de golpes con una modificación de escoria de 40%..... 72
Grafica 20: Determinación gráfica del valor de CBR en un rango de humedades para una muestra de suelo modificada con el 40% de escoria de alto horno..... 74
Grafica 21: Grafica de variación de la densidad seca con respecto a la humedad para cada serie de golpes con una modificación de escoria de 50%..... 75
Grafica 22: Determinación gráfica del valor de CBR en un rango de humedades para una muestra de suelo modificada con el 50% de escoria de alto horno..... 77
Grafica 23: Representación gráfica del comportamiento del CBR con respecto al porcentaje de escoria de alto horno adicionado. 79
Grafica 24: Representación gráfica de variación densidad seca respecto al valor de CBR..... 80
Grafica 25: Representación gráfica del comportamiento del CBR con respecto al porcentaje de escoria de alto horno adicionado. 84
Grafica 26: Representación gráfica de variación densidad seca respecto al valor de CBR..... 87

RESUMEN

En el presente trabajo se plantea la utilización de escoria de alto horno como agente modificador de un suelo, de manera que este pueda ser aprovechado como material de terraplén y que además brinde soluciones a impactos ambientales negativos, como la explotación desmedida de canteras y el aumento de desechos industriales en zonas de relleno.

Para la modificación de un suelo usando escoria de alto horno y con relación a su composición granulométrica, se pretende encontrar una dosificación óptima que garantice el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo. La hipótesis es que la escoria de alto horno puede mejorar el rendimiento del índice de resistencia de un material del suelo. El objetivo es cumplir con las especificaciones técnicas del instituto nacional de vías INVIAS en su artículo 220-13, materiales de terraplén.

Se tomaron siete muestras para determinar la dosis más adecuada. La primera muestra se analizó en su estado natural, concluyendo que se trataba de un material arcilloso de baja plasticidad con un CBR del 2%; por lo tanto no óptimo para trabajar como material de terraplén según especificaciones técnicas del INVIAS, las otras seis muestras se modificaron con proporciones de escoria de alto horno de 5%, 10%, 20%, 30%, 40% y 50% respectivamente.

Las propiedades físicas y mecánicas evolucionan efectivamente de acuerdo con las proporciones de las escorias de alto horno introducidas. La primera muestra modificada dio lugar a un aumento del 5% de la CBR. Este aumento alcanza su máximo con la muestra del 50% con una mejora del 14% del CBR. La hipótesis de una mejora del rendimiento del índice de resistencia del material del terraplén sólo se considera válida cuando hay, al menos, un 30% de escoria de alto horno en el suelo. Una proporción superior al 30% de escorias de alto horno permite estar por debajo de los límites máximos establecidos en la tabla 221 del artículo 220-13 de INVIAS.

ABSTRACT

This work proposes to use the blast furnace slag as a soil modifying agent. It can be used as an embankment material that provides solutions to negative environmental impacts, such as the excessive exploitation of quarries and the increase of industrial waste in filling areas.

In order to use the blast furnace slag in regards to the grain size of the soil, it is intended to find an optimal dosage that guarantees the improvement of the physical and mechanical properties of the soil. The hypothesis is that blast furnace slag can improve the resistance index performance of a soil material. The objective is to comply with the technical specifications of the National Institute of Roads INVIAS in its article 220-13, embankment materials.

Seven samples were taken to determine the most adapted dosage. The first sample was the raw soil. It was identified as clayey material of low plasticity with a CBR of 2% that is not suitable for embankment according to INVIAS technical specifications. Six other samples were modified with proportions of blast furnace slag of 5%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50% respectively.

The physical and mechanical properties effectively evolve in accordance to the proportions of blast furnace slag introduced. The first modified sample leaded to an increase of 5% of the CBR. This increase reaches its maximum with the 50% sample with an enhancement of 11% of the CBR. The hypothesis about an improvement of the resistance index performance of the embankment material is only considered valid when there is, at least, 30% of blast furnace slag in the soil. A proportion superior of 30% of blast furnace slag permits to be below the maximum limits established in table 221 of article 220-13 of INVIAS.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo, como medio para sustentar los conocimientos adquiridos en la formación profesional se plasman los resultados de una serie de procesos basados en la investigación experimental para la solución de una problemática puntual planteada como trabajo de grado.

En el capítulo de planteamiento del problema se postula como uno de los grandes inconvenientes para la intervención de la malla vial secundaria y terciaria; la asignación de recursos de manera prioritaria a vías con alto volumen de tráfico, por otro lado se menciona la explotación de canteras desmedida como un factor de impacto ambiental negativo; al ser este material un recurso para mejorar las propiedades mecánicas de suelo.

En aras de disminuir el impacto negativo producto de la explotación desmedida de canteras y por el contrario aumentar el uso de desechos industriales como material modificador, en la justificación se plantea la necesidad de realizar estudios que evalúen las características y el comportamiento de suelos cuando a estos se modifica su composición granulométrica usando escoria de alto horno.

El objetivo general enlazado a la hipótesis en donde se buscaba comprobar si la modificación de un material de suelo usando escoria de alto horno, altera el comportamiento de dicho suelo de manera óptima; está encaminado al análisis de las variaciones en las propiedades mecánicas de las muestras alteradas con diferentes proporciones de escoria de alto horno. En esta sección se encontrara los objetivos específicos que permitirán llegar a l objetivo general.

En el marco de referencia; el lector encontrara una síntesis de algunos estudios en donde se involucra el uso de la escoria siderúrgica, así como la normativa vigente para Colombia en el área de materiales para carreteras que corresponde a las especificaciones técnicas del INVIAS, siendo este instituto quien delimita además las normas para la elaboración de ensayos.

Para el marco teórico se menciona la caracterización de la escoria de alto horno, sus procesos de producción, y su composición química, así como conceptos de mejoramiento de suelos y requerimientos para la aceptación de un suelo como material de terraplén según la normatividad vigente y los ensayos propuestos de caracterización para que estos requerimientos se cumplan.

Tomando como punto de partida que la escoria de alto horno es un subproducto que surge una vez terminado el proceso de fabricación de acero y que además es un producto considerado de desecho; que posee características físicas que pueden asemejar a las características de un material de suelo en cuanto a composición granulométrica; en la metodología se plantea una serie de procesos que llevaran a la validación de los objetivos propuestos inicialmente.

Uno de los factores importantes en la metodología fue plantear la necesidad de un material fino con comportamiento cohesivo, pues de allí el mejoramiento de las propiedades mecánicas estará necesariamente vinculado al aporte de la escoria de alto horno.

En el análisis de resultados se encontrara en primera instancia la caracterización del material de estudio en su estado natural; este muestra se obtuvo de un lote ubicado en el barrio Uval de la localidad quinta de Usme en la ciudad de Bogotá y se caracterizó visualmente como una arcilla habana con presencia de betas cafés, lo que se confirmó en el laboratorio como una arcilla de baja plasticidad.

Para el análisis de los resultados; el capítulo se estructura en tres secciones: la primera señala la caracterización del material en estado natural, la segunda sección muestra los resultados y su posterior análisis en lo que refiere a límites de consistencia y granulometría para cada una de las muestras modificadas, la tercera y última sección determina el índice de resistencia para cada muestra sometida al ensayo de CBR por el método de rango de humedades.

En esta última sección el lector encontrara un resumen de los resultados del laboratorio y seguido de este; un método grafico para el cálculo del valor de CBR de diseño, este método grafico se fundamenta en el mapa de resistencia del suelo; el cual es una gráfica de humedad vs densidad; a la que se le añade los valores de CBR encontrados para cada punto.

Una vez conseguidas las curvas del CBR que representan las elevaciones en una gráfica donde la humedad y densidad son puntos para coordenadas, se establecieron los valores máximos de CBR que se encuentran entre la densidad máxima y el 95% de esta según grado de compactación para coronas de terraplén.

Con los resultados obtenidos para las muestras modificadas usando proporciones de escoria del 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, y 50%; se realizó un análisis comparativo de acuerdo a los requerimientos establecidos por el Instituto Nacional de Vías en su artículo 220-13 materiales de terraplén, encontrando de esta manera y plasmado en las conclusiones; que el suelo pueda ser usado como material que conforma un terraplén a partir de una mezcla preferiblemente mayor o igual al 40% de escoria de alto horno.

Permitiendo de esta manera establecer una nueva alternativa para el uso de suelos cohesivos que compartan condiciones similares al suelo objeto de estudio, la disminución del uso de materiales producto de la explotación de canteras, así como el aprovechamiento de un material considerado como desecho.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La intervención del sistema vial es un proceso que acarrea grandes costos, por lo tanto los recursos destinados a la rehabilitación son encaminados a mejorar la movilidad de vías que poseen un alto volumen de tráfico.

Según el ministerio de transporte en su informe de gestión 2016 publicado en enero de 2017; En Colombia se destinaron para el año 2016 aproximadamente 4.7 billones de pesos dirigidos a las diferentes entidades encargadas del mantenimiento y mejoramiento del sistema vial nacional, gran parte de estos recursos fueron priorizados en la construcción y rehabilitación de vías primarias.

Las vías veredales, vías intermunicipales lejanas de centros de comercio y dentro de las mismas ciudades; las vías en los barrios periféricos, al no poseer un volumen alto de tráfico, junto con los elevados costos de construcción; el disponer de una estructura convencional de pavimento se hace inviable económicamente.

La condición del suelo existente y el uso de determinados materiales para la estructura de pavimento son los factores principales que determinan el costo y por consiguiente el alcance del proyecto. Una subrasante con materiales propensos a grandes deformaciones, con predominancia de suelos expansivos, suelos volcánicos, o baja capacidad portante; obligan a tomar medidas de diseño que involucran el mejoramiento del terreno.

En aras de cumplir con las especificaciones técnicas establecidas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), en lo referente al material granular; se ha acrecentado la sobreexplotación de canteras, generando así una problemática de deforestación, un

aumento en la contaminación del agua y del aíre; que combinado con las características propias del suelo; produce fenómenos de inestabilidad en terrenos circundantes.

Por lo tanto Cuando la subrasante no está en las condiciones óptimas de recibir la estructura de pavimento y genera costos adicionales en materiales, o cuando el volumen de tráfico no amerita una estructura convencional; es necesario un análisis determinado de las propiedades mecánicas de los suelos existentes en el sitio y verificar la conveniencia de mejorar sus características mediante procesos de estabilización basados en la investigación de nuevas técnicas y nuevos aditivos que además de generar las condiciones óptimas, puedan disminuir el uso de materiales habituales y por ende disminuir el impacto ambiental generado por la sobreexplotación de estos recursos.

JUSTIFICACIÓN

La ingeniería civil en el transcurso del tiempo se ha visto en la obligación de evolucionar a la par con la sociedad en cuanto a tecnología y uso de recursos, en los últimos años al igual que otras ramas; la ingeniería se ha enfrentado a la problemática generada por el cambio climático, fomentando así el aprovechamiento de todo tipo de recursos que mediante procesos de innovación y nuevas técnicas; puedan generar alternativas de construcción o mejoramiento de materiales.

En el área de la geotecnia, es común encontrar tipo de suelos que no cumplen con los requerimientos establecidos para determinadas obras, la idea de retirar todo el material inadecuado es una solución que no se puede considerar por los costos que acarrea esta actividad. La necesidad de mejorar la estabilidad de los suelos ha llevado a que la investigación se centre en generar nuevas técnicas usando aditivos que son económicos y de fácil acceso.

El aprovechamiento de materiales producto de determinados procesos de fabricación en las industrias y que generalmente se consideran desechos, ha sido fuente de investigación, como una alternativa para mejorar la calidad de los materiales en la construcción. Los resultados óptimos de estas nuevas prácticas han llevado a la disminución del impacto ambiental negativo.

En el sector de la infraestructura vial; es menester de la ingeniería civil; evaluar el comportamiento del suelo cuando este se somete a un proceso de modificación

partiendo del uso de nuevos aditivos que en teoría puedan brindar nuevas condiciones que mejoren las propiedades físicas del material como recurso de construcción.

Las investigaciones encaminadas al aprovechamiento de materiales de desecho, han sido direccionadas en gran medida a la modificación de materiales granulares. Esta práctica tiene como valor agregado la posibilidad de disminuir el consumo de material de cantera y por ende disminuir la creciente sobrexplotación.

Como alternativa de innovación en los métodos de estabilización del suelo, a manera de investigación experimental, este proyecto propone evaluar el comportamiento de un material de suelo cuando se modifica su composición granulométrica usando escoria de alto horno, y su posible uso como material de terraplén; cumpliendo con las especificaciones técnicas establecidas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en su el artículo 220-13. Teniendo como referente que el uso de la escoria como nuevo producto de la construcción ha sido estudiado en diferentes usos.

Un resultado óptimo de la variación granulométrica en un suelo usando escoria de alto horno, abriría una nueva forma de aprovechamiento de recursos para proyectos de infraestructura vial, ya que se usara un material considerado de desecho y además se podrá aprovechar material del suelo directamente del sitio, generando así una disminución del costo general del determinado proyecto.

HIPOTESIS

¿El uso de la escoria de alto horno como material modificador de la granulometría en un suelo arcilloso; alterara de manera óptima su comportamiento mecánico, de tal forma que pueda ser usado como material de terraplén?

OBJETIVOS

General

Analizar la variación de las propiedades mecánicas de un material de suelo con prevalencia de partículas finas cuando se modifica su composición granulométrica usando escoria de alto horno en diferentes proporciones; y establecer la dosificación óptima para su uso como material de terraplén según las especificaciones técnicas del INVIAS

Específicos

- Identificar las propiedades mecánicas e índices de resistencia; para muestras de un suelo fino en su estado inicial, y cuando parte de su granulometría es reemplazado por escoria de alto horno en diferentes proporciones.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos entre las muestras en estado inicial y las muestras modificadas.
- Interpretar la variación de las propiedades mecánicas del material y su índice de resistencia de acuerdo a los porcentajes de uso de escoria.
- Determinar la dosificación optima a la cual el comportamiento del suelo cumple con los requerimientos establecidos en el artículo 220-13 de las especificaciones técnicas del INVIAS, materiales de terraplén.
- Estimar la viabilidad y pertinencia de un material modificado con escoria de alto horno como material de terraplén.

MARCO DE REFERENCIA

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION.

La escoria de acero como material modificador.

La escoria de alto horno como material modificador en el área de la construcción ha sido evaluada por diferentes investigaciones; que buscan establecer el comportamiento general de un material cuando es modificado con escoria de acero. Las investigaciones experimentales han determinado la viabilidad de la escoria de alto horno en su fase vítrea en la producción de cementos y por ende además en la producción de concreto.

El uso de la escoria como material de construcción se conoce desde el siglo XVIII en Inglaterra, en donde se utilizó como material agregado a los morteros y a las argamasas de cal; pero fue en Alemania donde se conocieron los primeros estudios como materia prima para la fabricación de conglomerantes hidráulicos, de propiedades, comportamientos y empleos específicos relacionados con la durabilidad y resistencia del hormigón (Calleja, 1982)

Al mejorar las características de comportamiento del cemento con un material catalogado como desecho se está generando además de un impacto positivo al medio ambiente, un beneficio económico y tecnológico, ya que ahorra costos de producción y se buscan nuevas técnicas en el aprovechamiento de recursos.

“Las escorias de alto horno son materiales muy utilizados como adición activa para la elaboración de distintos cementos comerciales. Estos cementos siderúrgicos tienen algunas propiedades y características sensiblemente mejores que los cementos Portland ordinarios, tales como menor calor de hidratación, alta resistencia a los

sulfates y al agua de mar, así como una reducción muy apreciable a la reacción árido-álcalis.” (Puertas, 1993)

La aplicación en el proceso de producción del cemento está influenciada en las características específicas de la escoria de alto horno, en función de su composición mineralógica y química, ya que es muy semejante a la del Clinker. (Batic, Sota, & Falcone , 2006)

Para garantizar que estas características se puedan aprovechar de una manera óptima, se han desarrollado procesos estandarizados en donde las variaciones de los compuestos utilizados en la reducción del hierro sean mínimos, obteniendo así; escorias de alto horno en mezclas homogéneas.

Además de su finura y porcentajes utilizados; el desempeño de la escoria de acero como adición en la fabricación de cemento, depende de su proceso de enfriado, el cual debe garantizar la vitrificación.

“Para que la escoria pueda desarrollar realmente su potencial hidráulico necesita que su fase vítrea sea mayoritaria (superior al 70%). Esta presencia de fase vítrea caracteriza el poder hidráulico de la escoria, que no es otro que el de su capacidad para recrear el ‘edificio cristalino’ que proporcionará al hormigón sus propiedades.” (Reino, 2013)

Cuando la escoria se enfría bruscamente al salir del crisol, la microestructura se vitrifica, mediante procesos de granulación se logra un producto de aspecto similar al de una arena y se puede obtener escoria granulada con contenidos en materia vítrea entre el 85-95 % en peso.

Las escorias de alto horno; y más concretamente las granuladas, tienen capacidad hidráulica latente o potencial; es decir, que finamente molidas y amasadas con agua son capaces de fraguar y endurecer. Esta capacidad hidráulica potencial de las escorias está muy atenuada y se manifiesta con lentitud, precisando de ciertos activadores para acelerar sus reacciones de hidratación. (Puertas, 1993)

En cuanto a las investigaciones realizadas para evaluar la viabilidad del uso de la escoria en materiales de construcción se pueden mencionar de acuerdo a su objetivo o finalidad.

Ramonich Vázquez y M. Barra presentaron un estudio titulado “Reactividad y expansión de las escorias de acería de horno de arco eléctrico en relación con sus aplicaciones en la construcción”. Basado en los resultados de laboratorio realizados en la Universidad Politécnica de Cataluña. (Barra & Vazquez, 2001)

En este estudio se analizó la composición química y el posible comportamiento en referente a la expansión cuando se encuentra en contacto con el agua y por ende los factores determinantes en su aplicación en obras de ingeniería.

Se encontró que el contenido de MgO es el principal responsable de las expansiones que afecta de diferente manera dependiendo de la rigidez de las matrices formadas. Estas muestran una hidraulicidad que se traduce en la formación de silicato de calcio hidratado y materia amorfa, la cual actúa como aglomerante. (Sánchez , 2014)

Además del uso de la escoria en procesos de fabricación del cemento, y su comportamiento individual; también se ha evaluado su aplicación en materiales granulares a manera experimental.

En su tesis doctoral titulada *“Utilización de escoria siderúrgica para construir caminos y estabilizar suelos”* Vanesa Ortega, investigadora de la Universidad de Burgos (UBU) postula que la escoria blanca se puede utilizar para cementos tipo portland y morteros, y la escoria negra por su dureza y granulometría se puede usar en bases y sub-bases para pavimentos. (Ortega, 1999)

Por ultimo a nivel internacional, en el estudio llamado “*Uso de la escoria de horno básico de oxígeno, la escoria de alto horno y el desperdicio de vidrio como remplazo de agregados tradicionales de origen natural*” de Los estudiantes Airey G.D, Collop A.C y Thom N.Hen de la Universidad de Nottingham en Reino Unido. (Airey, Collop, & Thom, 2004)

“Se observó un aumento de la densidad, deformación permanente y el módulo de rigidez para las mezclas con escoria en comparación con las mezclas patrón; el aumento de la rigidez es en parte debido a las propiedades superficiales químicas y físicas del agregado de escoria. El efecto del uso de escoria como agregado se tradujo en un aumento de más del 20% en la rigidez en comparación con las mezclas de control.” (Sánchez , 2014)

En Colombia la investigación del uso de la escoria de acero como material de construcción es reducida, y se encuentra centrada en la viabilidad de su aplicación en concretos; según la búsqueda de información bibliográfica con respecto al uso en materiales granulares se puede mencionar la investigación realizada por los ingenieros Oscar J Reyes Ortiz y Javier Fernando Camacho Tauta; del grupo de investigación de geotecnia de la Universidad Militar Nueva Granada.

La investigación llamada "*efecto del desperdicio de una siderúrgica en bases y subbases granulares*"; en donde se usó escoria de acero de alto horno de la siderúrgica del departamento de Boyacá. (Reyes Ortiz & Camacho Tauta, 2003)

En este estudio se tomaron tres tipos de material para modificar; uno de subbase, una base tipo 1 y otra base tipo 2, en el proceso de ejecución experimental se efectuó una caracterización del material granular y se estableció las propiedades mecánicas y físicas del material que sería utilizado como reemplazo.

Las modificaciones se realizaron de dos maneras; la primera usando material de escoria retenido en los tamices No 10, No 40, No 200 y fondo; la segunda la muestras se modificaron con respecto al peso total de la muestra en su estado natural; con variaciones de 1.5%, 2.5%, 3.5%, 5%, 6.5% y 8% (Reyes Ortiz & Camacho Tauta, 2003)

Para la modificación con material retenido en los tamices; solo se vio un aumento en la densidad seca para la base tipo 2 entre el 1% y el 3%, este aumento se refleja en mayor cantidad cuando se usa material del tamiz No 10. La densidad seca decrece en la mediada se aumenta el material de remplazo en partículas finas. En cuanto a la resistencia se observó un aumento en todas las muestras con niveles de compactación de 12 y 26 golpes oscilando entre el 80 y 260%, cuando se usa la escoria en proporciones con respecto al peso total de la muestra; caso contrario ocurrió cuando se el nivel de compactación es a 56 golpes donde la resistencia decrece en un 23%. (Reyes Ortiz & Camacho Tauta, 2003)

MARCO LEGAL

Para determinar el comportamiento del material de estudio se realizaron la siguiente serie de ensayos para cada muestra modificada, estos ensayos siguieron los lineamientos establecidos por las vigentes normas técnicas del Instituto Nacional de Vías.

- Análisis granulométrico de suelos por tamizado I.N.V. E – 123 – 07.
- Determinación del límite líquido de los suelos I.N.V. E – 125 – 07
- Límite plástico e índice de plasticidad de suelos I.N.V. E – 126 – 07
- Relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR) en el laboratorio INV-148-07

Para evaluar la viabilidad del uso del material de suelo modificado con escoria de alto horno, los resultados obtenidos se comparan con los requisitos establecidos en el artículo 220-13: Terraplenes; en donde se especifica las condiciones de los materiales a utilizar para mejoramiento de subrasantes según el artículo 230-13 de las Especificaciones Técnicas del Instituto Nacional de Vías.

METODOLOGÍA

Las actividades que se desarrollaron en el presente proyecto pretenden determinar la viabilidad del uso de la escoria como material modificador de las propiedades mecánicas de un suelo, la veracidad de la hipótesis será verifico mediante el análisis de ensayos ejecutados a determinado número de muestras, por esta razón esta investigación fue calificada como tipo experimental.

"Se presenta mediante la manipulación de una variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin redescubrir de qué modo o porque causa se produce una situación o acontecimiento particular." (Tamayo L, 1955, p.40)

Para la ejecución del proyecto se usó el material de suelo obtenido en un lote del barrio Uval de la localidad quinta de Usme en la ciudad de Bogotá, garantizando que este material tuviese características cohesivas predominantes, la escoria de alto horno será obtenida de la fábrica de acero: Acerías Paz del rio S.A.

Uno de los factores importantes para este proyecto fue determinar el tipo de material a utilizar. Como la idea de la variación es verificar el aporte de la escoria de alto horno al material inicial, se consideró conveniente usar un material de suelo con características propias de un suelo fino y preferiblemente un material arcilloso, destacando así que el aumento de la resistencia estaría vinculado netamente a la proporción de escoria de alto horno.

El desarrollo del proyecto estará dividido en cuatro fases.

Fase 1. Recopilación de información.

Como la escoria de alto horno es un producto residuo de la fabricación de acero; es necesario conocer la información pertinente que detalla las propiedades físicas y químicas, así como las alternativas de uso que se han investigado en el área de la construcción como un material innovador.

Para este punto se realizó una recolección de información sujeta a nuevos resultados obtenidos en el uso de la escoria, estudios de investigación experimentales que soporten nuevas alternativas de uso y que brinden un soporte guía en la investigación a tratar en este trabajo.

La investigación está encaminada a nuevos procesos de mejoramiento de la subrasante; utilizando el material presente en el sitio como material de terraplén; Por tal motivo para el cumplimiento de los objetivos fue necesario conocer la normatividad vigente en Colombia, los parámetros establecidos en el uso de materiales de terraplén en cuanto a comportamiento mecánico y resistencia.

Para este caso el análisis de información se centró en las especificaciones técnicas y las normas conformadas para la elaboración de ensayos del Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

Fase 2. Obtención del material modificador y caracterización del material de estudio.

En el área práctica, al tratarse de una investigación experimental y como se pretende evaluar el comportamiento de un material de suelo cuando se modifica su composición

granulométrica; fue necesario conocer las propiedades físicas del material inicial, esta caracterización es el punto base para la investigación.

Para la caracterización del terreno a evaluar, se realizaran tres sondeos no mayores a 1.5 m de profundidad desde el nivel de subrasante en diferentes periodos de tiempo. Para controlar la variación de la composición del material; los sondeos se realizaron a la misma profundidad y una distancia no mayor a 50 cm, pues era necesario que el material en los diferentes ensayos conservaran las mismas condiciones en cuanto a granulometría y límites de consistencia en estado natural previo a la modificación con escoria de alto horno.

El material de suelo fue extraído de un lote de la localidad de Usme sobre la vía Villavicencio barrio el Uval. Por otro lado la escoria de alto horno proviene de las instalaciones de acerías Paz del Rio en el municipio de Sogamoso.

Fase 3. Modificación de granulometría del material usando escoria de alto horno como variable.

La investigación se centró en el posible aumento de la resistencia con el uso de escoria de alto horno; para esto se propuso una variación de la composición física del material en cuanto a su granulometría, adicionando diferentes porcentajes de escoria en cada muestra.

Estas variaciones fueron del 5%, 10%, 20%, 30%, 40% y 50%, las muestras se sometieron al mismo proceso de ensayos de laboratorio en donde se determinara el cambio de comportamiento en cuanto a resistencia final.

Fase 4. Análisis de resultados y viabilidad

De acuerdo a las proporciones de escoria utilizada; el análisis de los resultados se evaluó individualmente para cada muestra modificada, en comparación con la muestra en estado inicial.

Finalizado el proceso de análisis individual, se realizó una evaluación comparativa; en donde se presentan las variaciones de comportamiento de cada muestra modificada y se determinara que proporción de escoria de alto horno es la adecuada para garantizar que el suelo se pueda utilizar como material de terraplén, además de estipular en que zona de la estructura se puede disponer.

Como la fase 2 y la fase 3 involucro el uso de equipos de laboratorio para la caracterización de los materiales; los equipos a utilizar fueron los facilitados de laboratorios privados, y su uso estará ligado a la normas para la elaboración de ensayos estipuladas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS)

- Análisis granulométrico de suelos por tamizado I.N.V. E – 123 – 07.
- Determinación del límite líquido de los suelos I.N.V. E – 125 – 07
- Límite plástico e índice de plasticidad de suelos I.N.V. E – 126 – 07
- Relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR) en el laboratorio INV-148-07

MARCO TEÓRICO

En la ingeniería civil es común encontrar suelos con características que no cumplen con las especificaciones técnicas estipuladas para cada tipo de construcción, a raíz de este problema se deben consideran alternativas para el aprovechamiento del suelo, evaluando el factor económico y las propiedades físicas de este.

Así como el uso del suelo en su estado inicial puede generar variaciones de diseño; el retiro del material inadecuado es un proceso que puede acarrear grandes costos, por lo tanto una alternativa acertada es mejorar las propiedades del suelo mediante procesos de estabilización que garanticen el comportamiento óptimo del terreno.

“la estabilización es un proceso mediante el cual se trata de modificar un suelo o un agregado procesado para hacerlo apto o mejorar su comportamiento como material constitutivo de un pavimento. El proceso busca, fundamentalmente, aumentar la capacidad portante del material y hacerlo menos sensible a la acción del agua. El objetivo es también que el material alcance alta rigidez y, en consecuencia, tenga capacidad para absorber tensiones de tracción” (Fernadez Loaiza , 1993)

El uso de un proceso de estabilización estará en función al tipo de material y al mejoramiento de características individuales del suelo; por lo tanto no se puede generalizar el uso de un solo método aplicable.

Entre los más utilizados se encuentran la estabilización por medios mecánicos, sobresaliendo la compactación y las mezclas de suelos; y la estabilización por medios

químicos, destinada a la adición de agentes estabilizantes, como el cemento, la cal, el asfalto entre otros.

Estabilización Mecánica

Cuando se habla de estabilización mecánica mediante el uso de mezclas de suelos, se refiere a la técnica que busca a partir de dos o más materiales; diseñar una mezcla que cumpla con los requerimientos de comportamiento.

“Cuando se diseñan mezclas de suelos, para lograr con ellas unas determinadas Propiedades deseables, la granulometría suele ser el requisito más relevante en la fracción gruesa, en tanto que la plasticidad lo es, naturalmente, en la fina.” (Montejo Fonseca, 1997)

“El tamaño máximo de las partículas de la mezcla tiene importancia, puesto que tamaños demasiado grandes son difíciles de trabajar y producen superficies muy rugosas; una proporción demasiado grande de tamaños gruesos Conduce a mezclas muy segregables. La presencia de contenidos importantes de materiales finos, menores que la malla 40, hace difícil lograr buenas características de resistencia y deformabilidad, además de que puede conducir a superficies demasiado lisas y fangosas, cuando están húmedas y pulverulentas, cuando están secas.” (Montejo Fonseca, 1997)

Mejoramiento del suelo a partir de materiales reciclables.

Como una alternativa en el mejoramiento de suelos, se ha implementado el uso de materiales provenientes de procesos de producción industrial, el aprovechamiento de estos recursos, además de brindar un beneficio económico, contribuyen a minimizar el

impacto ambiental ya que permiten una reducción en la explotación masiva de canteras y disminuye la afectación de grandes áreas usadas como lugar de disposición final de estos productos considerados anteriormente como de desecho.

Evaluar el comportamiento de los suelos cuando son modificados con algún tipo de material derivado de un proceso industrial ha sido fuente de investigación en aras de verificar el mejoramiento de sus propiedades mecánicas.

“Dependiendo de la disponibilidad, se puede considerar la factibilidad de usar rellenos construidos con escorias de fondo o con cenizas volantes o con mezclas de estos residuos con material granular. Los residuos mencionados, por su bajo peso unitario y considerable resistencia al corte, resultan adecuados para la construcción de rellenos sobre suelos blandos compresibles.” (Montejo Fonseca, 1997)

A pesar de que su estudio ha sido direccionado en la fabricación de cementos, las escorias siderúrgicas también se han vinculado en procesos de mejoramiento de suelos al ser un material granular con capacidad de fraguado ya que tienen una capacidad hidráulica latente o potencial; es decir que al contacto con agua y al ser amasadas son capaces de fraguar y endurecer por sí mismas. (Calleja, 1982)

Escoria de alto horno – escoria de acero

La escoria de alto horno es un subproducto derivado del arrabio, material fundido obtenido en la reducción del mineral de hierro en el horno alto y que funge como materia prima en la producción de acero.

El arrabio es un material que se reutiliza en la fabricación de acero, pero antes mediante un proceso industrial que involucra un cambio brusco de temperatura se le separa la escoria que se considera un material de desecho.

Las cantidades de escoria varían de acuerdo a la producción y esta generalmente formada por calcio, hierro y silicato de magnesio, mezclados por las reacciones químicas que tienen lugar en los procesos de formación de los metales.

Las escorias siderúrgicas de alto horno son el resultado de la combinación de la ganga acida "arcillosa" del material de hierro y de las cenizas de azufre del coque (igualmente de carácter ácido), con la cal y la magnesia (ambos compuestos básicos) de las calizas más o menos dolomíticas utilizadas como fundentes. (Puertas, 1993)

Composición de la escoria de acero de alto horno

Los elementos químicos que constituyen la escoria son similares a los del Clinker, pero en proporciones diversas, que dependen de los componentes que se introducen en el horno.

“La composición y características de las escorias dependerán de las materias primas empleadas en el horno de la siderurgia (mineral de hierro y material calizo o dolomítico utilizado como fundente, además de las cenizas del combustible utilizado) y del proceso seguido en su enfriamiento/granulación.” (Reino, 2013)

La combinación de los óxidos ácidos (SiOg y AI2O3) y óxidos básicos (CaO y MgO), y la formación de los constituyentes de la escoria tiene lugar por fusión a alta temperatura («1.600°C), y enfriamiento del magma fluido desde 1.400°C hasta temperatura ambiente. (Puertas, 1993)

Los materiales obtenidos como escoria de alto horno se pueden identificar en dos fases; la primera una fase vítrea y la segunda una fase cristalina, las escorias con altos contenidos en material vítreo son de naturaleza más acida, y son las más utilizadas en el área de la construcción al poseer un mejor comportamiento hidráulico, por esta razón se usan técnicas para garantizar que la escoria conserve esta fase.

El uso de tecnología de punta, procesos de producción continuos y materiales constantes, hacen que en la industria siderúrgica; la escoria de alto horno posea características homogéneas garantizando las mismas características de calidad de acuerdo a su respectivo uso.

La forma de conseguir porcentajes elevados de fase vítrea es mediante el enfriamiento brusco de la escoria a la salida del horno, pasando de temperaturas de 1.400ºC a temperaturas por debajo de los 800ºC a fin de evitar la formación de fases cristalinas. Este enfriamiento puede ser realizado mediante la inyección de aire o de agua, siendo mucho más efectivo el enfriamiento con agua. (Reino, 2013)

Terraplenes

Los terraplenes son sistemas constructivos que se usan para de adecuar un terreno y generar un espacio plano que sirva como apoyo a una estructura, consiste en mejorar las condiciones de soporte de carga, elevando el nivel del terreno; usando material adicional de relleno que cumple con especificaciones de compactación.

El terraplén se divide en tres partes; la corona es la parte superior que funcionara como subrasante en donde se apoyara la estructura de pavimento. El núcleo es la parte comprendida entre el cimiento y la corona. El cimiento es el material ubicado por

debajo del nivel de subrasante existente, luego de la escarificación, este último junto con el núcleo forman el cuerpo del terraplén.

Los materiales usados en la construcción de terraplenes como método de mejoramiento de subrasantes; deben cumplir con los criterios establecidos en las especificaciones técnicas del instituto nacional de vías (INVIAS) Artículo 230: mejoramiento de la subrasante con adición de materiales, y en el artículo 220, terraplenes: proceso de ejecución de actividades y selección de materiales de acuerdo al cumplimiento de requerimientos para la construcción de terraplenes; en donde además se menciona las normas para la realización de ensayos a ejecutar con el fin de evaluar las propiedades de los materiales.

- Análisis granulométrico de suelos por tamizado I.N.V. E – 123 – 07.
- Determinación del límite líquido de los suelos I.N.V. E – 125 – 07
- Límite plástico e índice de plasticidad de suelos I.N.V. E – 126 – 07
- Relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR) en el laboratorio INV-148-07

Artículo 230- 13 Mejoramiento de la subrasante con adición de materiales

Especificación técnica del Instituto Nacional de Vías INVIAS en donde se plantea el concepto de mejoramiento de subrasantes, procesos constructivos, materiales y equipos, condiciones de garantía para el producto terminado.

En este artículo se establece la escarificación y retiro del material existente si es necesario previo a la modificación con material de relleno que debe cumplir con los

requerimientos establecidos para materiales de terraplén mencionados en el artículo 220-13 de las especificaciones técnicas INVIAS.

Se menciona además el grado de compactación mínimo para aceptación como producto terminado del 95%. (Instituto Nacional de Vias, 2013).

Artículo 220-13 Terraplenes

Especificación técnica del Instituto Nacional de Vías INVIAS en donde se plantea el concepto terraplenes, partes del terraplén, procesos constructivos, materiales y equipos, condiciones de garantía para el producto terminado y requisitos de los materiales de terraplén.

La tabla No 1 hace referencia a la tabla 220-1 del artículo 220-13 de las especificaciones técnicas del INVIAS; en donde se menciona las condiciones necesarias para que un material de suelo se pueda usar como material de terraplén.

para el grado de compactación solo se aceptan materiales que alcancen un grado de compactación mayor o igual al 90% si se trata de cimiento y núcleo, y del 95% para corona; cuando el material se clasifica como A-1, A-2-4 o A-3, de no ser así el grado mínimo de compactación será de 95% y 100% respectivamente. (Instituto Nacional de Vias, 2013)

Tabla 220 - 1. Requisitos de los materiales para terraplenes

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	SUELOS SELECCIONADOS	SUELOS ADECUADOS	SUELOS TOLERABLES
Partes del terraplén a las que se aplican		Todas	Todas	Cimiento y Núcleo
Tamaño máximo, mm	E-123	75	100	150
Porcentaje que pasa el tamiz de 2 mm (No. 10) en masa, máximo	E-123	80	80	-
Porcentaje que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200) en masa, máximo	E-123	25	35	35
Contenido de materia orgánica, máximo (%)	E-121	0	1.0	1.0
Límite líquido, máximo (%)	E-125	30	40	40
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-126	10	15	-
CBR de laboratorio, mínimo (%) *(Nota 1)*	E-148	10	5	3
Expansión en prueba CBR, máximo (%)	E-148	0.0	2.0	2.0
Índice de colapso, máximo (%) *(Nota 2)*	E-157	2.0	2.0	2.0
Contenido de sales Solubles, máximo (%)	E-158	0.2	0.2	-

Nota 1. Los valores de C.B.R. indicados en la Tabla 220 - 1 están asociados al grado de compactación mínimo especificado (numeral 220.5.2.2.2); el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

Tabla 1: Requisitos para materiales de terraplén tabla 220-1 artículo 220-13
Fuente: especificaciones técnicas INVIAS

Ensayos de caracterización material según tabla 220-1, requisitos de los materiales para terraplenes; artículo 220-13 Terraplenes.

Granulometría

Este ensayo debe se realiza siguiendo los lineamientos de la norma I.N.V.E 123-07 Análisis granulométrico por tamizado en donde se pretende cuantificar la distribución granulométrica de una muestra de suelo en cuanto a tamaño de partículas y determinar el porcentaje de material que pasa por una serie de tamices para su posterior clasificación..

Con base a los resultados obtenidos para el presente proyecto; la clasificación granulométrica se estableció con base al sistema unificado de calcificaciones USCS y al sistema AASHTO.

Humedad natural

La norma I.N.V. E – 122 – 07 Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado; es la que establece los lineamientos para la realización de este ensayo.

El contenido de humedad se define como la relación entre la cantidad en masa de agua presente en los poros del suelo y la cantidad en masa de las partículas sólidas del material.

Límites de Atterberg

Límite líquido

El límite líquido es el contenido de agua que contiene el suelo, expresado en porcentaje con respecto a su peso en seco, que delimita la transición entre el estado líquido y plástico de un suelo remoldeado o amasado.

El procedimiento de ensayo está especificado en la norma I.N.V. E – 125 – 07 Determinación del límite líquido de los suelos.

En donde una muestra de suelo humedecida con agua se moldea en la vasija de porcelana hasta obtener una consistencia pastosa; posterior a esto deposita en la Cuchara de Casagrande una sección de este material emparejándolo en el área del recipiente, para luego realizar una abertura transversal con el Rasurador sobre el material. Se golpea consecutivamente contra la base de la máquina, haciendo girar la manivela, hasta que la ranura se cierre con una longitud aproximada a 1,2 cm (12mm).



Figura 1: Montaje y realización ensayo de límite líquido del material
Fuente Autor

El número de golpes necesarios para cerrar la ranura se registran, se toma una muestra de suelo de la cazuela; se pesa y se lleva al horno para un posterior cálculo de su humedad.

Este proceso se repite sobre la misma muestra esta vez añadiendo o disminuyendo el contenido de agua en aras de obtener un rango de valores en número de golpes que estén entre 15-25-35 golpes.

El limite liquido será el punto de intersección a 25 golpes de la curva de fluidez representada en una gráfica humedad vs número de golpes; y se dará en términos de porcentaje.

Límite de plástico

Es la humedad que se encuentra en un suelo cuando deja de tener un comportamiento sólido para pasar a un estado plástico, es decir, la humedad límite entre el estado sólido y el plástico.

Los lineamientos para la elaboración de este ensayo están establecidos en la norma I.N.V. E – 126 – 07 límite plástico e índice de plasticidad de suelos.

Aproximadamente 15 gr de una muestra seca pasada por el tamiz No. 40 se humedece de tal manera que se pueda hacer con ella una esfera sin que los dedos se adhieran a ella cuando se comprime.

De esta esfera se selecciona una porción de masa, con la que se forman rollos sobre una superficie lisa y seca, de tal manera que su contenido de agua disminuya hasta alcanzar un diámetro de 3mm; cuando la muestra presente desmoronamiento se unen

las porciones de suelo y se colocan en un recipiente previamente pesado y se lleva al horno para determinar su humedad.

El procedimiento se repite una vez más y el limite plástico será el promedio de las humedades obtenidas del material una vez sea sacado del horno.



Figura 2: Montaje y realización ensayo de límite plástico del material
Fuente autor

El índice de plasticidad será la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, para determinar la clasificación de la fracción fina del suelo se usó la carta de plasticidad; ver figura 3.

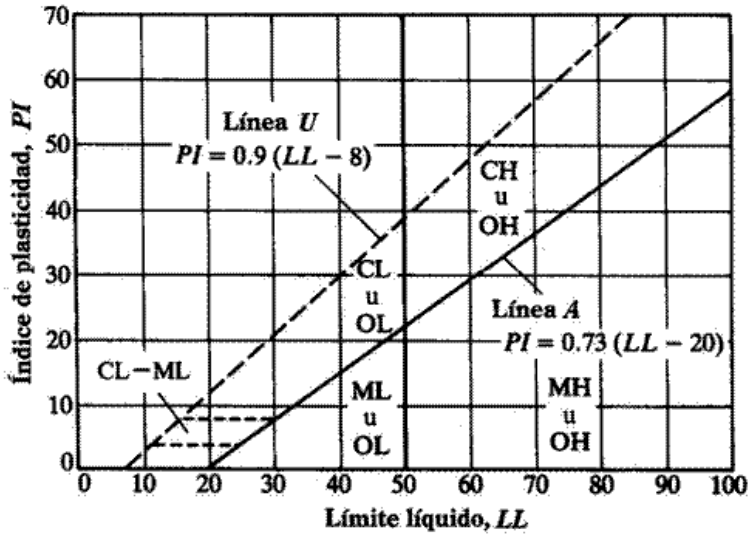


Figura 3: Carta de plasticidad
Fuente http://notasingenierocivil.blogspot.com.co

CBR (California Bearing Ratio)

El ensayo de CBR se utiliza para determinar el índice de resistencia de los suelos, en Colombia la norma que rige la elaboración de este ensayo para suelos es la I.N.V. E – 148 – 07, Relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio). El ensayo permite medir la resistencia al esfuerzo cortante, los resultados obtenidos evaluados en función de los requerimientos establecidos para cada uno de los elementos que componen la estructura de pavimento; `permiten vislumbrar si su comportamiento es adecuado o no y por ende su viabilidad de uso o de lo contrario su rechazo.

Antes de iniciar con la elaboración del ensayo se debe determinar para que tipo de material se va aplicar, para suelos granulares es común usar el método de humedad y densidad seca controlada, estos valores son tomados del ensayo de compactación; humedad optima y densidad seca máxima.

Si el material es considerado fino se debe usar el método para un rango de humedades, la diferencia de uno al otro radica en el número de muestras, para el de densidad controlada el número de moldes con los resultados del proctor modificado son tres, a diferencia del segundo método en donde se usan 9 moldes agrupados en tres secciones de acuerdo al número de golpes; 10 golpes, 26 golpes y 56 golpes.

- Humedad óptima y densidad máxima

Tres muestras de suelo cada una de 7 kilos aproximadamente se humedece hasta alcanzar la humedad óptima hallada en el ensayo de compactación, estas muestras son compactadas en los moldes a diferente cantidad de número de golpes, 10, 26 y 56.

- Rango de humedades.

Se toman 9 muestras de suelo cada una aproximadamente de 7 kilos. Se agrupan en tres secciones de acuerdo al número de golpes, 10, 26, 56; a cada muestra de los diferentes grupos se le adiciona un contenido de agua garantizando que la siguiente muestra aumente en un 1% con respecto a la anterior; de tal manera que la tercera produzca un descenso en un densidad máxima seca, y la segunda alcance un máximo, tal y como ocurre en el ensayo de compactación.

Para las muestras independientemente del método utilizado, Una vez dentro del molde se compactan de acuerdo al número de golpes, son pesadas y enrasadas, por último se dispone de las sobrecargas en cada uno de los moldes, previo a la inmersión se toma una lectura de deformación y se deja las muestras por cuatro días dentro del agua, en los cuales nuevamente se toma las deformaciones para cada día.

Se deben compactar tres especímenes de manera que los límites de sus densidades compactadas sean de 95% (o menos) a 100% (o mayor) de la máxima densidad seca determinada en casa una de las muestras. Una vez finalizado el tiempo de inmersión la muestra se escurre por quince minutos y se falla en la prensa Marshall.



Figura 4. Preparación de la muestra de suelo, antes de proceder a la compactación
Fuente autor



Figura 5: Proceso de compactación en diferentes rangos de humedades
Fuente autor



Figura 6: Preparación de la muestra antes de ser sumergido en el estanque
Fuente autor



Figura 7: falla de la muestra de material en la prensa Marshall
Fuente autor

CALCULOS

Limite líquido y limite plástico

Como el límite líquido y el límite plástico se determinan en función de valores de humedad

Tenemos que

$$w(\%) = \frac{P1 - P2}{P2 - P3}$$

P1: Peso en gramos de la muestra húmeda + peso de la lata
P2: peso en gramos de la muestra seca + peso de la lata
P3: peso de la lata en gramos
W (%): porcentaje de humedad

El valor del límite líquido se determina en la curva de fluidez y corresponde a la humedad que se encuentra a los 25 golpes y se denota como LL

El límite plástico será el promedio del rango de humedades hallados en el ensayo de límite plástico y se denota como LP

El índice de plasticidad será la diferencia entre el límite líquido y límite plástico.

$$IP = LL - LP$$

La clasificación del material fino se determina usando la carta de plasticidad

Material sobre la línea A será material arcilloso
Material debajo de la línea A será material limoso
Material con valor de LL mayor a 50% será de alta plasticidad
Material con valor de LL menor a 50% será de baja plasticidad.

$$IP\ linea\ A = 0.73\ (LL - 20)$$

CBR

- **Volumen del molde**

$$V\ molde = \frac{\pi * D^2 * h}{4}$$

V molde: volumen en centímetros cúbicos
D: diámetro del molde
H: altura del molde descontando altura de disco espaciador

- **Humedad de horno**

$$w(\%) = \frac{P1 - P2}{P2 - P3}$$

P1: Peso en gramos de la muestra húmeda + peso de la lata
P2: peso en gramos de la muestra seca + peso de la lata
P3: peso de la lata en gramos
W (%): porcentaje de humedad

- **Peso seco**

$$Ws = \frac{wh}{1 + w}$$

Ws: peso seco de la muestra compactada en gramos
Wh: peso húmedo de la muestra compactada en gramos – peso del molde
W: humedad de horno

- **Densidad seca**

$$\gamma d = \frac{ws}{V}$$

Ɣd: peso unitario seco en gr/cm^3
Ws: peso seco de la muestra compactada en gramos
V: volumen del molde en cm^3

- **Curva de presión vs penetración:**

Una vez terminado el proceso de penetración se tienen dos grupos de valores, los de penetración dados en pulgadas y lo de carga dados en libras. Se tomaron lecturas de carga a penetraciones de 0.005, 0.025, 0.075, 0.1, 0.125, 0.150, 0.175, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5. (Pulgadas) según lo establece la norma I.N.V.E-148-07.

Para determinar el esfuerzo sobre la muestra las cargas se dividen por el área del pistón de penetración que en este caso es de 3” con un diámetro de 49.63 mm.

Los resultados obtenidos en la penetración de las muestras se graficaron en las curvas de presión-penetración; las cargas están dadas en libra por pulgada cuadrada y la penetración en pulgadas. Los valores de CBR serán los valores de carga para 0.1” y 0.2” en cada muestra fallada y su valor se determina mediante la siguiente expresión.

$$CBR\ (0.1") = \frac{esfuerzo}{1000}\ x\ 100$$

El valor de 1000 lb/pulg^2 corresponde al valor de la carga necesaria para fallar una muestra patrón a una penetración de 0.1”, ver tabla No 2.

$$CBR\ (0.2") = \frac{esfuerzo}{1500}\ x\ 100$$

El valor de 1500 lb/pulg^2 corresponde al valor de la carga necesaria para fallar una muestra patrón a una penetración de 0.2”, ver tabla No 2.

Penetración		Presión		
mm	Pulgadas	MPa	Kg./cm²	lb/plg²
2.54	0.1	6.90	70.31	1.000
5.08	0.2	10.35	105.46	1.500

Tabla 2: Valores de presión para alcanzar la penetración de 0.1" y 0.2" en una muestra patrón Fuente Norma I.N.V.E 148-07 relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio)

- **Expansión**

$$\% \, Expancion = \frac{L2 - L1}{h \, (molde)}$$

L2 y L1 son las lecturas de expansión tomadas al cuarto y primer día respectivamente

h (molde) es la altura del molde

L2- L1 representa el cambio de altura durante la inmersión.

Nota:

El valor final del CBR para cada una de las muestras se obtiene mediante el análisis del mapa de resistencia del suelo, su procedimiento es detallado en los resultados de cada muestra modificada.

Para el caso de la expansión final se tora el dato que corresponda a la densidad máxima a los 56 golpes

PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

RECOLECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SUELO NATURAL

Para evaluar el comportamiento de un material de suelo y su posible uso en el mejoramiento de subrasantes como material de terraplén cuando se modifica su composición granulométrica con escoria de alto horno; era necesario conocer la caracterización del material en estado natural.

Por lo tanto la muestra fue sometida a ensayos de laboratorio para determinar su granulometría, índices de consistencia y relación de soporte CBR, siguiendo los lineamientos de las normas técnicas del instituto nacional de vías INVIAS.

El material de estudio fue tomado de la localidad quinta de Usme, en la ciudad de Bogotá, barrio el Uval; en una primera exploración a una profundidad de 1.5 m.

En un análisis visual y físico se determina que es un material arcilloso blando color habano, libre de materia orgánica, con facilidad de hacer rollos en presencia de agua.

El peso de la muestra fue de 50 Kg aproximadamente, empacada en bolsas y recubiertas de lona para conservar sus propiedades de humedad.



Figura 8: Sondeo profundidad a 1.5 m
Fuente autor



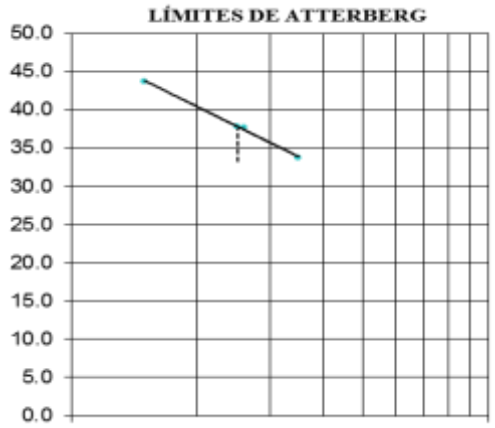
Figura 9: Material arcilloso en proceso de secado natural.
Fuente autor

Determinación del límite líquido de los suelos (I.N.V. E – 125 – 07)



Figura 10: Procedimiento para determinar limite líquido.
Fuente autor

En la gráfica No 1 se presenta la curva de fluidez según los datos obtenidos en el ensayo para límite líquido en estado natural; obteniendo de esta manera un valor de límite liquido de 38% para 25 golpes como se observa en la tabla No 3



Grafica 1: Curva de fluidez limite líquido suelo en estado natural
Fuente autor

25	35	26	15
38.00	33.70	37.63	43.69

Tabla 3: Límite líquido a 25 golpes para el suelo natural
Fuente autor

Límite plástico e índice de plasticidad de suelos (I.N.V. E – 126 – 07)

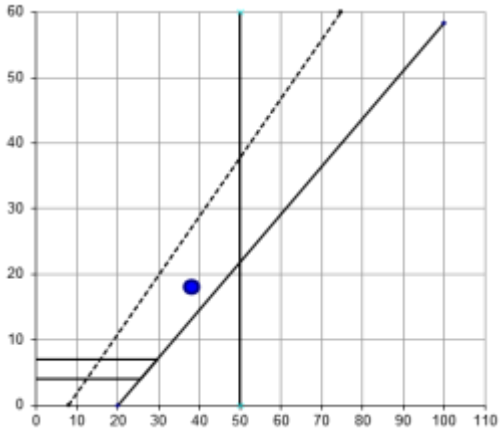


Figura 11: Procedimiento para determinar limite plástico
Fuente autor

Según los resultados obtenidos para la muestra en su estado natural se obtiene un límite plástico con un valor de 20%; según la gráfica No 2 que presenta la carta de plasticidad el material corresponde a una arcilla de baja plasticidad; la tabla No 4 resume as propiedades índices.

LÍMITE LÍQUIDO:	38
LÍMITE PLASTICO:	20
ÍNDICE DE PLASTICIDAD:	18
HUMEDAD NATURAL:	12.1
ÍNDICE DE LIQUIDEZ:	-0.4

Tabla 4: Resultados laboratorio suelo natural
Fuente autor.



Grafica 2: Carta de plasticidad para suelo natural
Fuente autor.

Análisis granulométrico de suelos por tamizado (I.N.V. E – 123 – 07.)

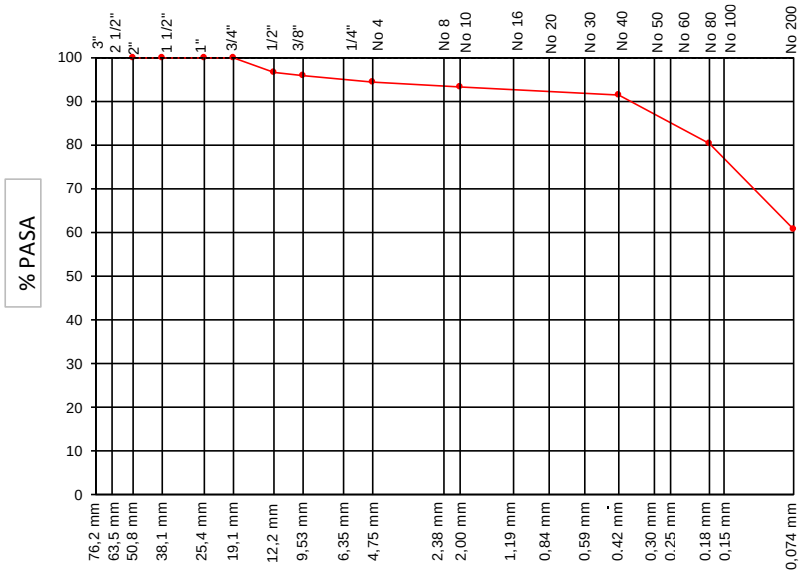
PESO INICIAL (g) :	564.1		
TAMIZ No	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% PASA
2"	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	0.0	0.0	100.0
1"	0.0	0.0	100.0
3/4"	0.0	0.0	100.0
1/2"	19.4	3.4	96.6
3/8"	3.2	0.6	96.0
No 4	8.9	1.6	94.4
10	6.0	1.1	93.4
40	12.0	2.1	91.2
80	61.0	10.8	80.4
200	110.6	19.6	60.8
Fondo	343.0	60.8	0.0
	564.1	100.0	

CLASIFICACIÓN

A A S H T O (I.G.):	**A-6 (9)**
U. S. C. S.:	**CL**

Tabla 5: Datos obtenidos en laboratorio, análisis granulométrico para suelo natural
Fuente autor.

En la gráfica No 3 se presenta la curva granulométrica junto con los porcentajes de material granular y fino correspondientes.



Gravas: 5.6%	Arenas: 33.6%	Finos: 60.8%

Grafica 3: Análisis de resultados curva granulométrica para suelo natural
Fuente autor

Relación de soporte del suelo (CBR) en el laboratorio (INV-148-07)



Figura 12: Proceso para determinar CBR antes de inmersión
Fuente autor.



Figura 13: Proceso para determinar CBR después de inmersión.
Fuente autor.

Resultados de análisis de datos para CBR del suelo en su estado natural para un rango de humedades

Prueba No	No golpes	% humedad (horno)	Densidad seca (gr/cm3)	C. B. R. CORREG. 0,1"	C. B. R. CORREG. 0,2"	% Expansión total	Humedad penetracion (%)
1	56	14.29	1.81	1.32	1.53	4.22	16.84
2	56	17.27	1.83	2.10	2.34	2.94	18.53
3	56	20.29	1.74	0.52	0.63	2.60	20.67
4	26	15.31	1.76	0.69	0.85	2.94	19.46
5	26	18.47	1.77	1.08	1.30	2.00	20.43
6	26	21.59	1.70	0.30	0.36	2.12	21.94
7	10	16.66	1.60	0.44	0.54	2.00	20.38
8	10	19.80	1.67	0.72	0.89	1.80	22.00
9	10	22.90	1.57	0.19	0.24	1.80	24.84

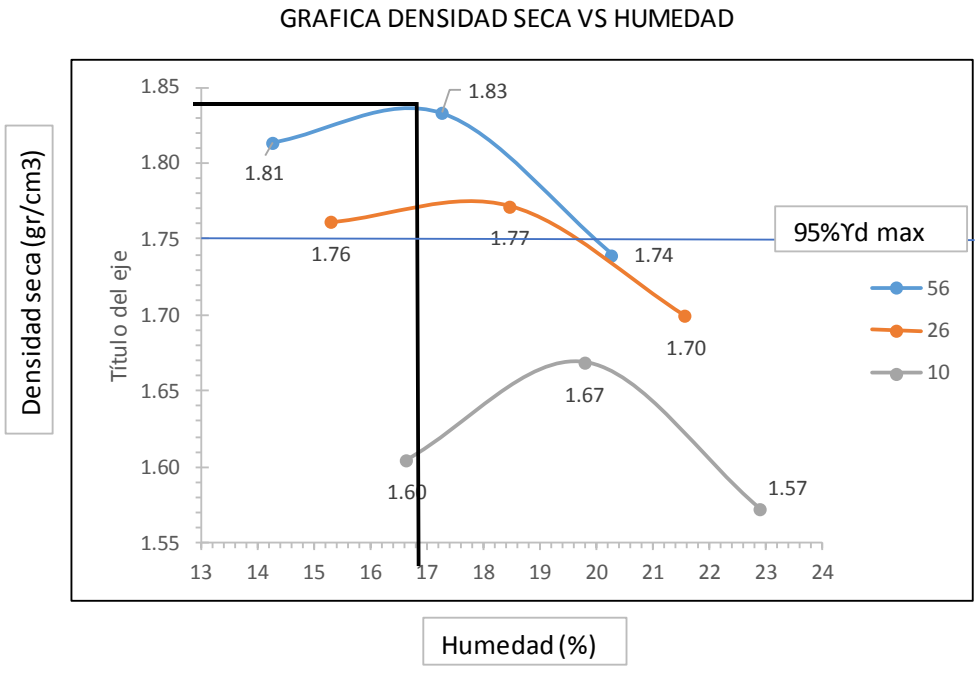
Tabla 6: Resultados obtenidos en el análisis de datos para CBR del suelo natural
Fuente autor

Determinación del valor de CBR de diseño.

La tabla No 6 representa los resultados obtenidos luego del ensayo de CBR para la muestra de suelo en su estado natural para un rango de humedades.

Como la determinación del CBR se realiza para un rango de humedades, es necesario establecer la densidad máxima seca del proctor modificado y su correspondiente humedad óptima. Como el material se pretende usar para conformar la corona del terraplén se debe conocer el valor de la densidad seca al 95%.

En la figura 4 se observa que la densidad máxima seca para el suelo en su estado natural es de 1.84 gr/cc, y su humedad optima corresponde a 16.9 %; por lo que la densidad al 95% será de 1.75 gr/cc



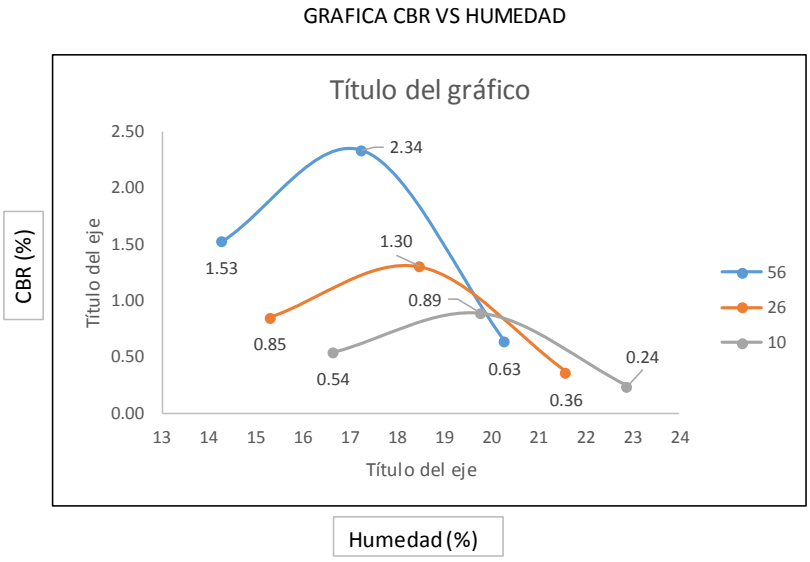
Grafica 4: Calculo de densidad máxima y humedad optima del proctor modificado para suelo natural Fuente autor.

Mapa de resistencia del suelo

Es un método utilizado para encontrar el valor máximo de CBR para un rango de humedades, es una gráfica en donde la densidad seca representa las ordenadas, el contenido de humedad serán las abscisas, y las elevaciones corresponderán a los valores de CBR en estos puntos.

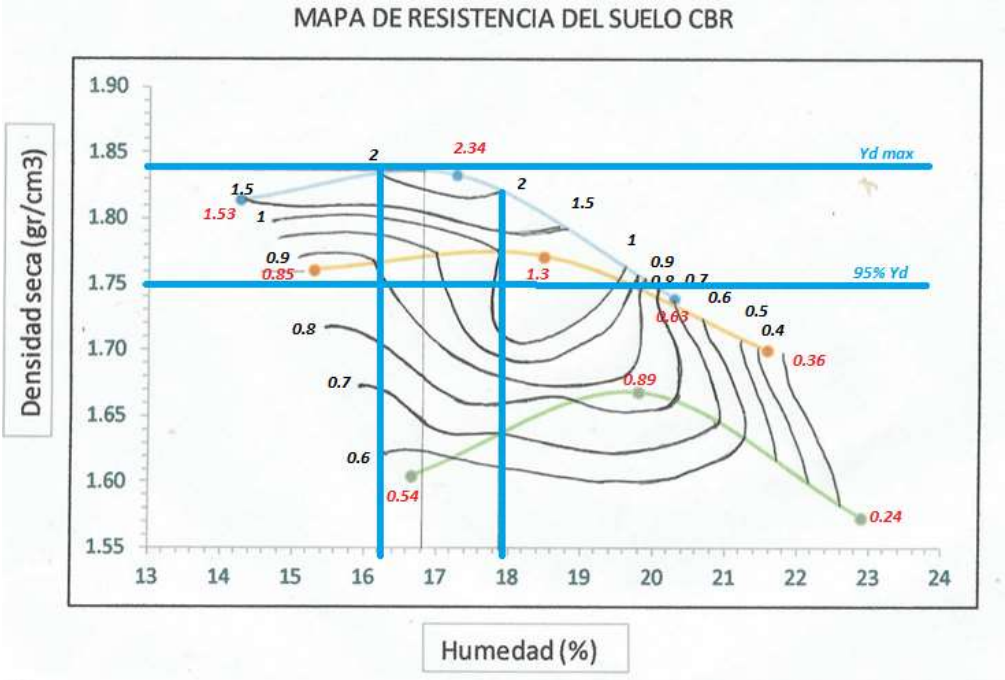
Una vez se establecen los valores de cada coordenada; se procede a realizar las curvas de elevación que representaran la variación del CBR en diferentes puntos. El CBR de diseño será el valor máximo que se encuentre por encima del 95% de la densidad seca y el rango de humedad correspondiente será el contenido de humedad con la que se alcanza este valor.

Para el mapa de resistencia del suelo es necesario conocer la variación del CBR con respecto a la humedad para diferente rango de golpes, la gráfica No 5 muestra esta variación.



Grafica 5: Variación del CBR con respecto a la humedad para diferente rango de número de golpes, suelo natural
Fuente autor.

En la gráfica No.6 se determina un valor de CBR de 2% para la muestra del suelo sin modificar, y este valor se encuentra cuando la humedad esta entre el 16.2% y 18%, este rango de humedades también garantizan el 95 % de la densidad seca.



Grafica 6: determinación de CBR de diseño para suelo en estado natural.
Fuente autor.

Análisis de resultados suelo en estado natural

En tabla No 1 Según las especificaciones técnicas INVIAS del artículo 220-13; se establece una serie de parámetros que el suelo debe cumplir para pueda usarcé en la estructura del terraplén. La tabla No 7 muestra un análisis comparativo de estos rangos con los valores obtenidos del material de estudio en su estado natural; en donde se concluye que el material clasificado como arcilla de baja plasticidad con un valor de CBR de 2% no cumple con las especificaciones estipuladas.

TABLA 220-1 ART 220 INV (valores maximos)		SUELO NATURAL	CUMPLE
TAMAÑO MAXIMO mm	100	12.7	VERDADERO
% PASA TAMIZ N10	80	93.4	FALSO
% PASA TAMIZ N200	35	60.8	FALSO
LL %	40	38	VERDADERO
IP %	15	18	FALSO
CBR (%)	5	2	FALSO

Tabla 7: Valores comparativos de resultados para suelo en su estado natural vs Especificaciones Técnicas INVIAS tabla 220-1 art 220-13
Fuente autor

Un resultado tan bajo del índice de resistencia junto con la clasificación aportado hacen que el material según como se planteó en la metodología; sea un material óptimo para evaluar el mejoramiento de sus propiedades mecánicas cuando se modifica su granulométrica con escoria de alto horno.

Modificación de suelo con escoria de alto horno

Para determinar la variación del comportamiento del material de un suelo modificado con escoria de alto horno, se usaron proporciones del 5%,10%, 20%, 30% 40% y 50%. Las proporciones se establecieron con respecto al peso de la muestra y se evidencio un descenso en la humedad del suelo a razón de que la escoria de alto horno posee poca absorción de agua, la humedad natural no afectaría los procesos de laboratorio ya que los resultados esperados dependen de la variación de la humedad controlada para el caso del proctor y CBR.



Figura 14: Muestra de escoria de alto horno y suelo natural antes de mezclar
Fuente autor

Antes de iniciar con el proceso de modificación se halló la composición granulométrica de la escoria de alto horno, ya que este es el factor determinantes que controlara el comportamiento del nuevo suelo. La tabla No 8 muestra los resultados de la granulometría para la escoria de alto horno como un agregado grueso con una clasificación según el sistema de gradación USCS de grava pobremente gradada GP,

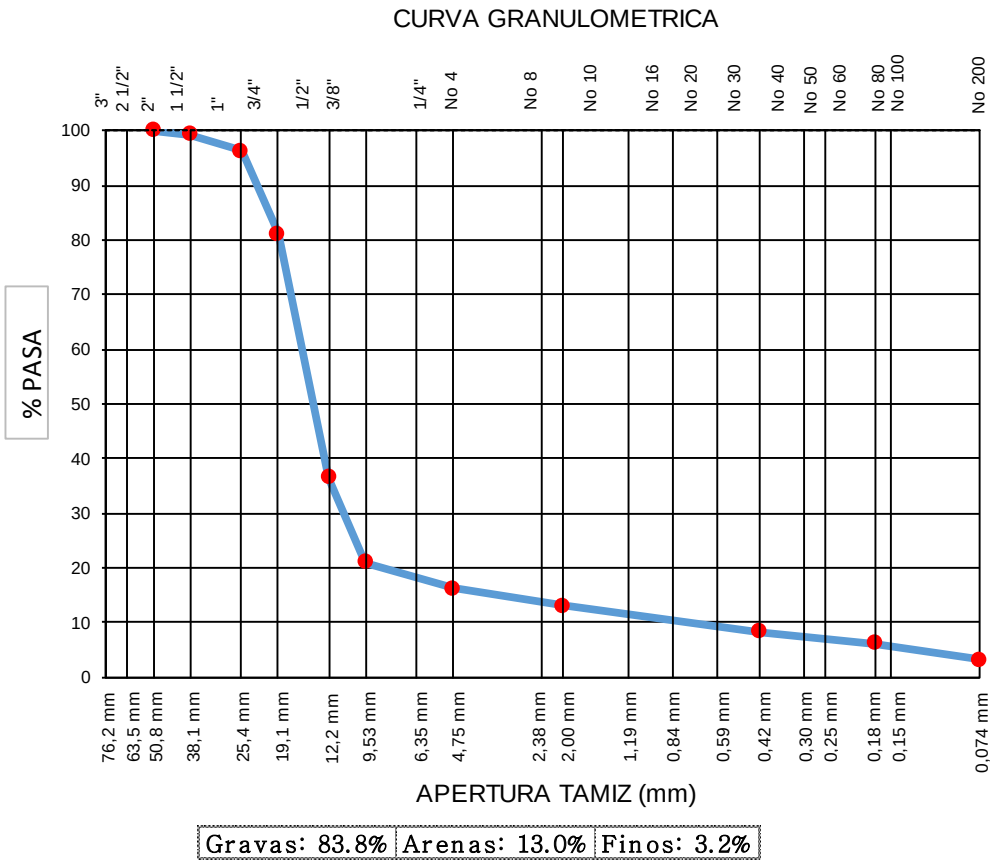
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

PESO INICIAL (g) :	6852.6		
TAMIZ No	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% PASA
2"	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	50.7	0.7	99.3
1"	207.1	3.0	96.2
3/4"	1034.5	15.1	81.1
1/2"	3056.4	44.6	36.5
3/8"	1069.6	15.6	20.9
No 4	326.0	4.8	16.2
10	213.9	3.1	13.1
40	328.7	4.8	8.3
80	139.7	2.0	6.2
200	209.5	3.1	3.2
Fondo	216.6	3.2	0.0
	6852.6	100.0	

CLASIFICACIÓN

U. S. C. S.:	**GP**

Tabla 8: Composición granulométrica escoria de alto horno.
Fuente autor



Grafica 7: Curva granulométrica escoria de alto horno
Fuente autor

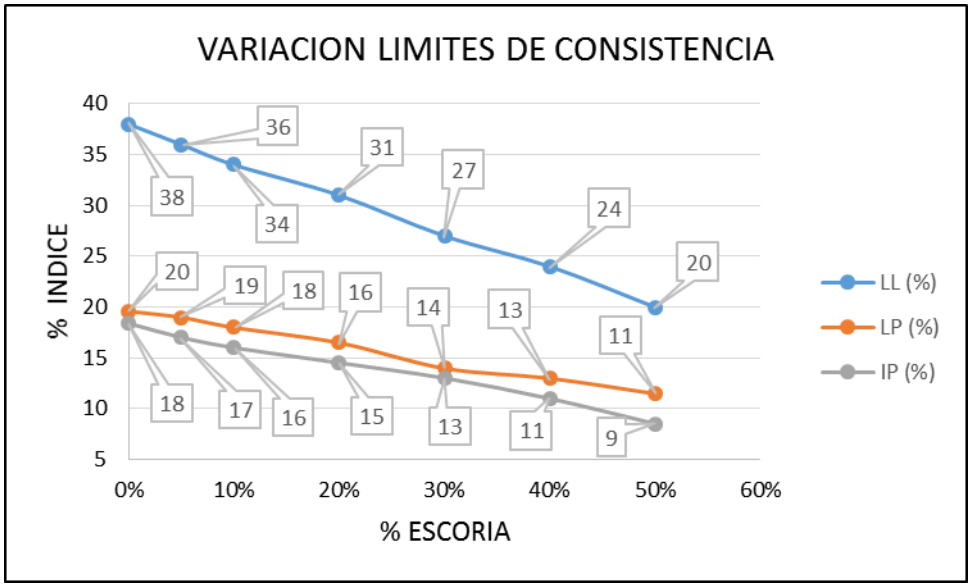
La grafica No 7 muestra la variación de tamaño de las partículas y sus porcentajes predominante, demostrando la ausencia de material fino en comparación con la fracción gruesa.

ANÁLISIS DE RESULTADOS MATERIAL MODIFICADO

En la medida que el suelo es modificado con un porcentaje mayor de escoria de alto horno según la tabla No 9; las propiedades índices disminuyen con una tendencia lineal, la gráfica No 8 muestra el comportamiento del límite líquido, limite plástico e índice de plasticidad conforme a la proporción de material de escoria utilizado.

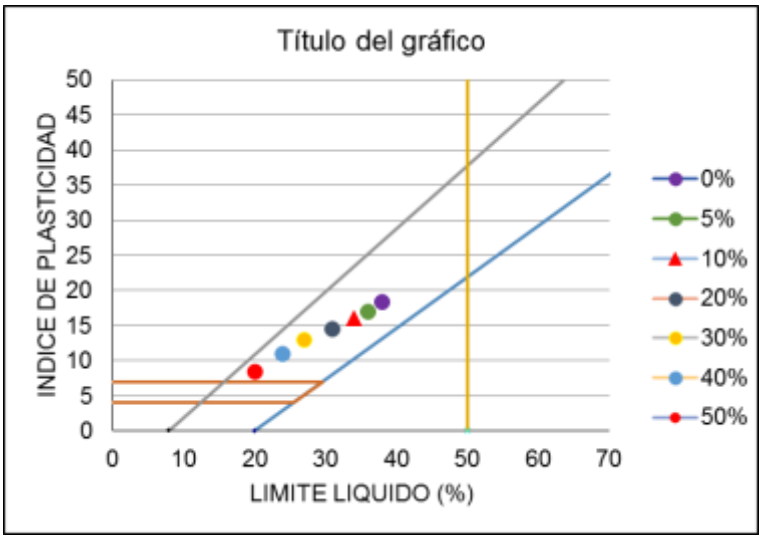
% ESCORIA	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0%	38	20	18
5%	36	19	17
10%	34	18	16
20%	31	16	15
30%	27	14	13
40%	24	13	11
50%	20	11	9

Tabla 9: Variación de límites de Atterberg con respecto a la variación de escoria de alto horno
Fuente autor



Grafica 8: Variación grafica de propiedades índice con respecto a la variación de la granulometría por efecto de la escoria de alto horno
Fuente autor

Según la carta de plasticidad que se presenta en la gráfica No 9, los finos conservan las propiedades de una arcilla de baja plasticidad, reflejando así que el material fino de la escoria aunque modifica las condiciones de plasticidad no lo hace con la caracterización de la arcilla.



Grafica 9: Carta de plasticidad para cada muestra modificada con escoria de alto horno
Fuente autor

Cuando los resultados de las muestras se comparan con los valores máximos requeridos según las especificaciones técnicas del INVIAS del artículo 220-13; se observa el cumplimiento en todos los casos para el limite líquido y solo a partir del 20% de variación con escoria las muestras cumplen con el índice de plasticidad.

Si se observa la tabla No 10 se concluye que el material en el que las proporciones son del 5% y 10% de escoria respectivamente debe ser rechazado en primera instancia para ser usado como material de terraplén.

% ESCORIA	LL (%)	LL < 40%	IP (%)	IP < 15%
0%	38	cumple	18	no cumple
5%	36	cumple	17	no cumple
10%	34	cumple	16	no cumple
20%	31	cumple	15	cumple
30%	27	cumple	13	cumple
40%	24	cumple	11	cumple
50%	20	cumple	9	cumple

Tabla 10: Comparación de resultados con valores límite artículo 220-13 INVIAS, tabla 220-1; requerimiento de los materiales para terraplenes
Fuente autor.

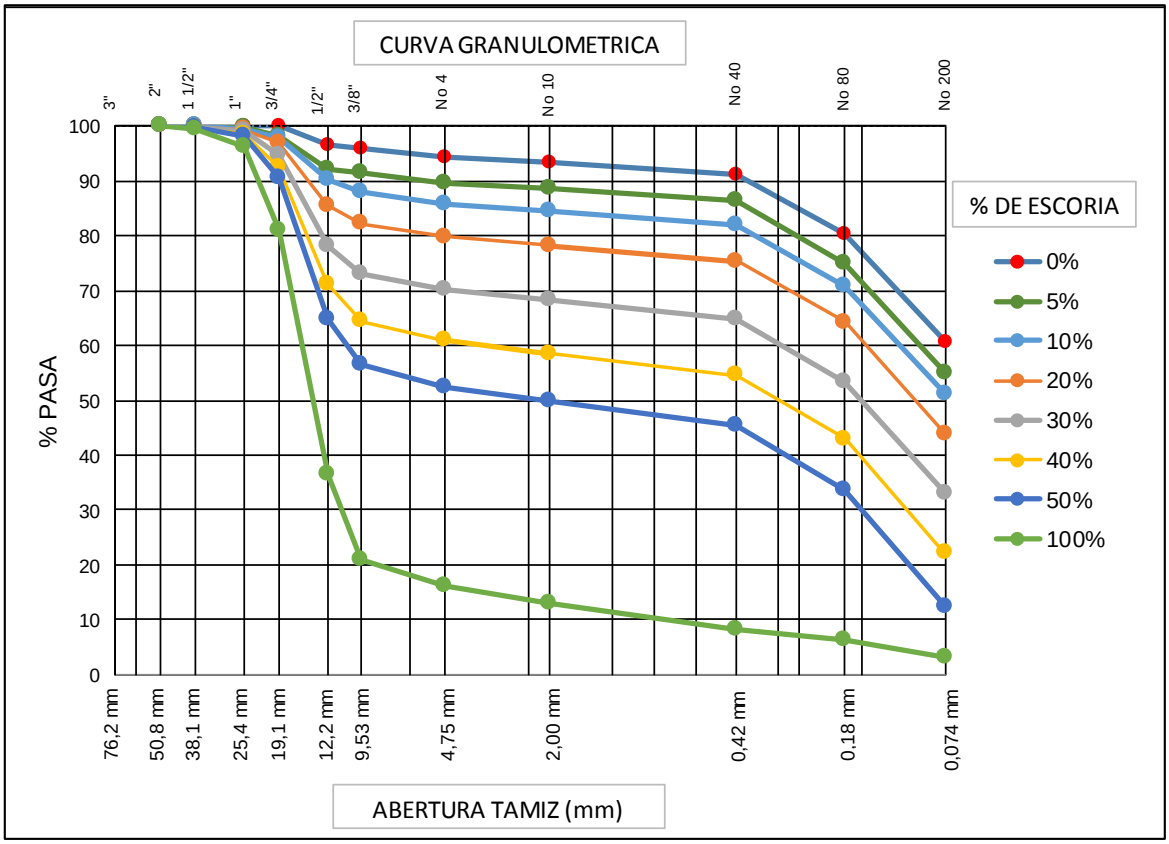
En lo que refiere a granulometría, al ser una grava mal gradada; la escoria de alto horno aporta en mayor cantidad material grueso que el material fino, por lo tanto en cada muestra a medida que aumenta la proporción; la distribución de partículas va cambiando, disminuyendo los finos pero conservando su clasificación hasta la muestra modificada con 20%; en donde su clasificación se define como arena arcillosa. Esta clasificación se mantiene hasta la muestra modificada con el 40% de escoria, en donde pasa a ser una grava arcillosa; pues aún conserva un porcentaje de finos mayor a 12%. En la tabla No 11 se muestra la clasificación de cada muestra modificada según los sistemas USCS y AASHTO incluyendo además las propiedades índices.

% ESCORIA	% GRAVA	% ARENA	% FINOS	LL (%)	IP (%)	USCS	AASHTO
0%	6%	34%	61%	38	18	CL	A-6 (9)
5%	11%	35%	54%	36	17	CL	A-6 (6)
10%	14%	35%	51%	34	16	CL	A-6 (5)
20%	20%	36%	44%	31	15	SC	A-6 (3)
30%	30%	37%	33%	27	13	SC	A-2-6 (0)
40%	39%	39%	22%	24	11	GC	A-2-6 (0)
50%	47%	40%	12%	20	9	GC	A-2-4 (0)
100%	84%	13%	3%			GP	

Tabla 11: Variación de clasificación granulométrica de acuerdo a variación de escoria de alto horno Fuente autor

En la gráfica No 10 se observa la variación del comportamiento de la curva granulométrica conservando una tendencia pero modificando el porcentaje de material grueso en comparación con la dosificación anterior.

Al evaluar la granulometría obtenida en las diferentes muestras con los valores máximos requeridos para materiales de terraplén; según el artículo 220-13 del instituto nacional de vías INVIAS, se observa las siguientes condiciones.



Grafica 10: Curva granulométrica, variación con respecto al contenido de escoria de alto horno
Fuente autor

- En ninguna de las muestras se alcanza el tamaño máximo de las partículas; el valor máximo que se encuentra es de 38 mm y corresponde a las muestras modificadas a partir del 10% y permanece constante.

- Según la tabla No 12, el máximo porcentaje de material permitido que pasa por el tamiz N10 es de 80%, los porcentajes menores a este se observan a partir de las muestras modificadas con un 20% de escoria; pero está dosificación aún conserva un porcentaje mayor al permitido en lo que refiere al pasa tamiz No 200; por lo tanto se descarta en el uso de materiales para terraplén.

Por lo tanto antes de evaluar la resistencia del suelo, las dosificaciones de escoria de alto horno en porcentajes del 30%, 40% y 50% son las que cumplen con los requerimientos para materiales de terraplén; tanto en límites de consistencia, pues es a partir del 30% que el índice de plasticidad llega al 15%; como en sus valores de porcentaje pasa tamiz.

PROPORCION	TAMAÑO MAXIMO mm		% PASA TAMIZ N10		% PASA TAMIZ N200	
TABLA 220-1 ART 220 INV	100	CUMPLE	80	CUMPLE	35	CUMPLE
0%	12.7	VERDADERO	93	FALSO	60.8	FALSO
5%	25.4	VERDADERO	88	FALSO	54.0	FALSO
10%	38.1	VERDADERO	84	FALSO	51.2	FALSO
20%	38.1	VERDADERO	78	VERDADERO	43.9	FALSO
30%	38.1	VERDADERO	68	VERDADERO	33.1	VERDADERO
40%	38.1	VERDADERO	59	VERDADERO	22.1	VERDADERO
50%	38.1	VERDADERO	50	VERDADERO	12.4	VERDADERO

Tabla 12: Comparación de valores máximos permitidos para materiales de terraplén con valores obtenidos según variación de porcentaje de escoria de alto horno.
Fuente autor

Relación de soporte CBR para material modificado.

Para el cálculo del índice de resistencia del suelo modificado de acuerdo a su proporción de escoria de alto horno, se realizaron los ensayos de CBR; cumpliendo con la norma I.N.V.E-148-17, relación del soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio).

Las muestras de escoria de alto horno se tomaron por cuarteo, y su proporción reflejada en peso determinada de acuerdo al peso de la muestra de suelo natural a evaluar.

Como el material de estudio en su estado natural se clasificó como una arcilla de baja plasticidad, y la proporción de escoria de alto horno en las primeras muestras no modificó esta condición; se optó realizar el ensayo de CBR para un rango de humedades en todas las muestras.



Figura 15: Mezcla del material natural con escoria en estado seco y en estado húmedo. Fuente autor

Una vez determinado los datos de laboratorio se procedió a la interpretación de resultados.

Modificación de suelo natural con escoria de alto horno.

Para la determinación del CBR en un rango de humedades se usaron 9 moldes agrupados de acuerdo al número de golpes tal como indica la norma I.N.V.E-148-17, con 56, 26, 10 golpes. Cada molde fue compactado con una humedad mayor al anterior.

Una vez obtenidos los datos respectivos previa a la inmersión se tomaron los pesos para el cálculo de humedad y se tomaron lecturas de expansión al primer día.



Figura 16: Muestra de material modificado compactado en un rango de humedades con respecto a un numero de golpes, (56, 26, 10 golpes)
Fuente autor

Los moldes se dejaron en inmersión por cuatro días en la totalidad de las muestras, una vez cumplido este lapso de tiempo se continuo con el proceso de penetración de acuerdo a los lineamientos de la norma 148 - I.N.V



Figura 17: Proceso de inmersión y penetración de las muestras modificadas
Fuente autor

Con los datos de penetración se calculó el valor de CBR para 0.1 pulgadas y 0.2 pulgadas. Para el proyecto se tomó el valor mayor de estas dos penetraciones, que en todos los casos fue el de 0.2".

Resultados para una variación del suelo natural con el 5% de escoria de alto horno

Prueba No	No golpes	% humedad (horno)	Densidad seca (gr/cm3)	C. B. R. CORREG. 0,1"	C. B. R. CORREG. 0,2"	% Expansión total	Humedad penetracion (%)
1	56	14.8	1.84	1.6	1.8	3.8	17.4
2	56	17.9	1.86	2.5	2.8	2.7	19.3
3	56	20.9	1.79	0.6	0.8	2.4	21.4
4	26	16.1	1.78	0.8	1.0	2.6	20.3
5	26	19.2	1.80	1.3	1.6	1.8	21.2
6	26	22.1	1.72	0.4	0.4	1.9	22.6
7	10	17.0	1.64	0.5	0.7	1.8	21.9
8	10	20.3	1.69	0.9	1.1	1.7	22.6
9	10	23.4	1.62	0.2	0.3	1.6	24.5

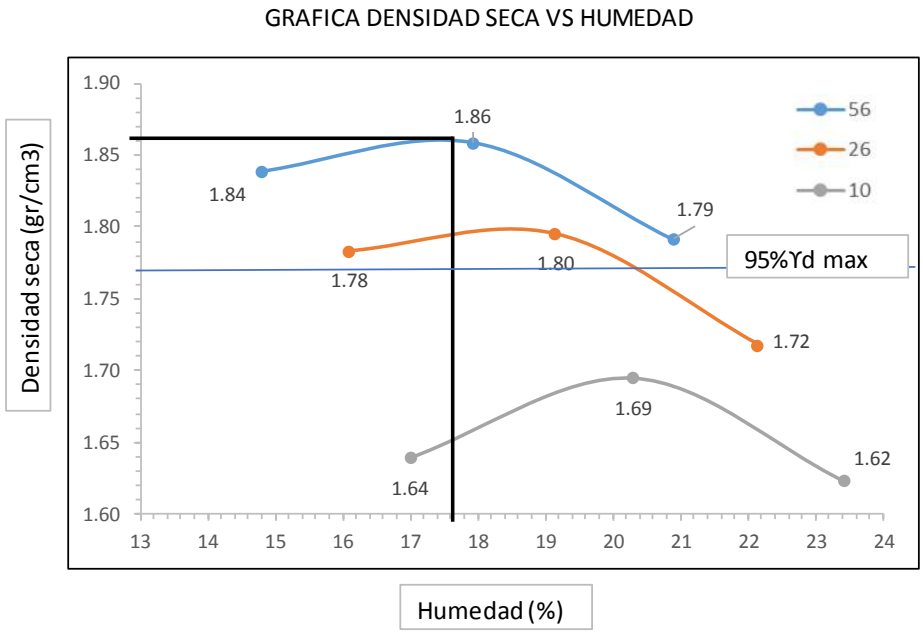
Tabla 13: Resultados obtenidos en el proceso de laboratorio para una muestra de suelo modificada con 5% de escoria de alto horno
Fuente autor

La tabla No 13 muestra los resultados obtenidos una vez terminado el ensayo de CBR para una muestra modificada con el 5% de escoria de alto horno.

- Determinación de densidad seca máxima y humedad óptima para una muestra de suelo modificada con 5% de escoria de alto horno

Con la curva de compactación para cada serie de golpes; se establece que la densidad máxima seca que corresponde al proctor modificado es aquel valor máximo en el grupo de 56 golpes.

De la gráfica No 11 se obtiene una densidad máxima seca de 1.86 gr/cc, con una humedad optima de 17.7%, si se pretende utilizar el material para la corona de un terraplén el grado de compactación debe ser mayor o igual al 95% de la densidad máxima seca.



Grafica 11: Grafica de variación de la densidad seca con respecto a la humedad para cada serie de golpes con una modificación de escoria de 5%
Fuente autor.

W Optima (%)	17.7
Densidad max seca (gr/cm3)	1.86
95% Yd max seca (gr/cm3)	1.77

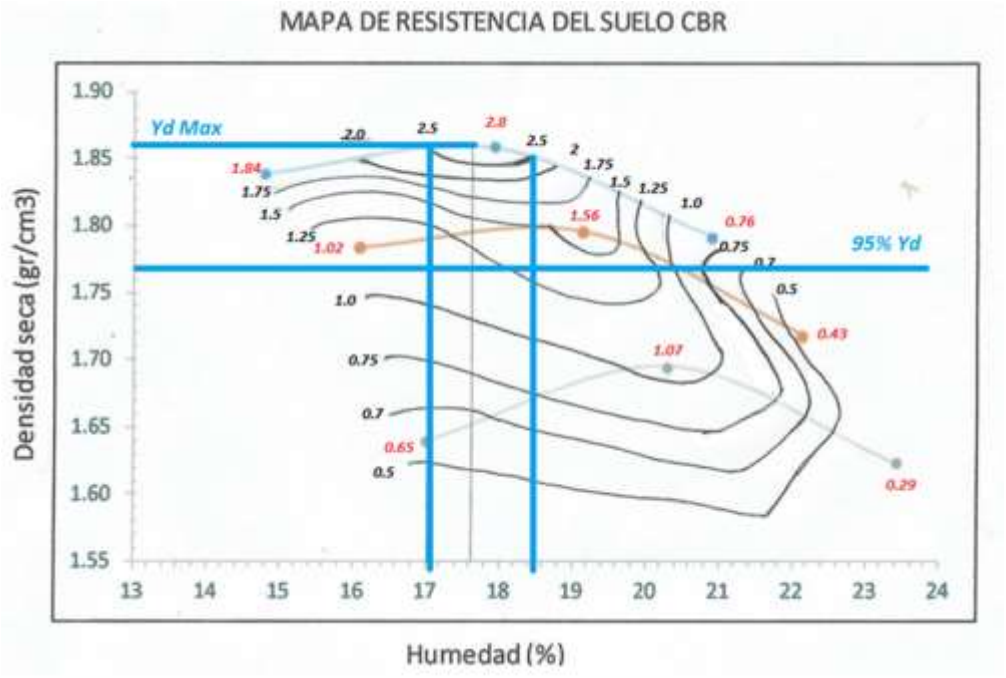
Tabla 14: Resultados obtenidos en el proceso de laboratorio para una muestra de suelo modificada con 5% de escoria de alto horno
Fuente autor

Una vez conocidos los valores límites de la densidad seca según la tabla No 14, se procede a calcular el valor máximo de CBR en un rango de humedades; usando el mapa de resistencia de suelos, en donde las abscisas corresponden a la humedad, las ordenadas son los valores de la densidad seca, y las elevaciones serán los valores de CBR hallados, ver tabla No 15.

% humedad (horno)	Densidad seca (gr/cm3)	C. B. R. CORREG. 0,2"
14.29	1.81	1.53
17.27	1.83	2.34
20.29	1.74	0.63
15.31	1.76	0.85
18.47	1.77	1.30
21.59	1.70	0.36
16.66	1.60	0.54
19.80	1.67	0.89
22.90	1.57	0.24

Tabla 15: Coordenadas y elevación para mapa de resistencia del suelo modificado al 5%
Fuente autor

En la gráfica 12, se observa que el valor máximo de CBR alcanzado para el suelo modificado con una proporción de escoria de alto horno de 5%; es de 2.5 % y que este valor se encuentra en un rango de humedades entre el 17% y 18.6 %,



Grafica 12: Determinación gráfica del valor de CBR en un rango de humedades para una muestra de suelo modificada con el 5% de escoria de alto horno
Fuente autor

Si se compara el valor de CBR obtenido con el suelo en su estado natural que fue del 2%; la variación del CBR cuando se modifica el suelo con el 5% de escoria no es representativa y aun no cumple con los requerimientos del artículo 220-13 de las especificaciones técnicas del INVIAS.

Resultados para una variación del suelo natural con el 10% de escoria de alto horno

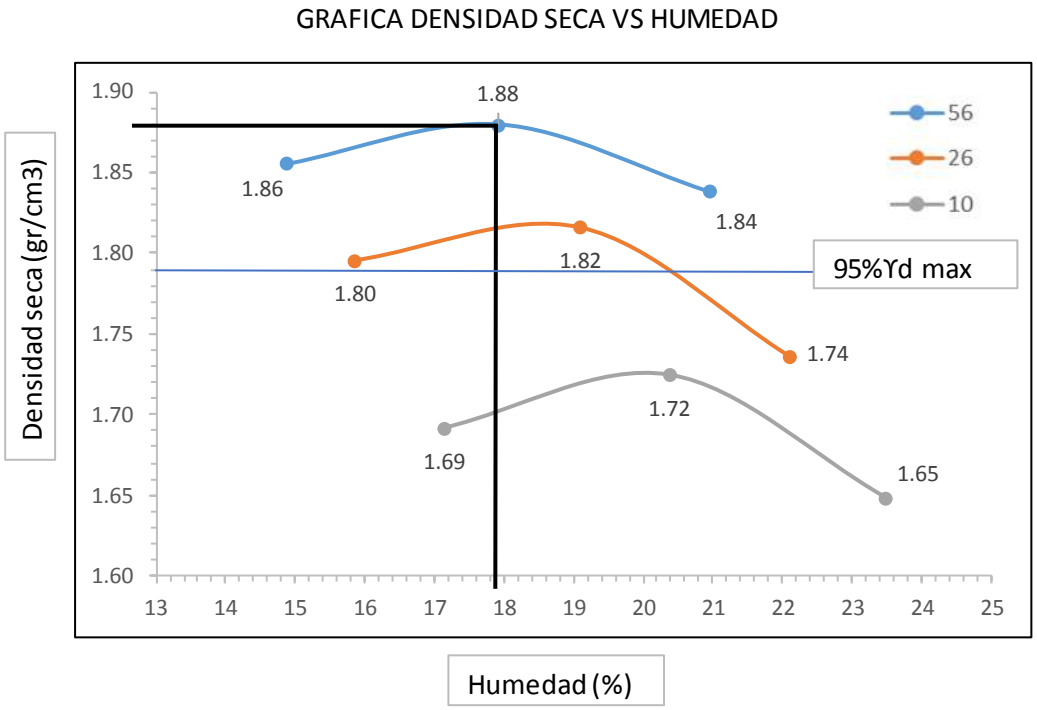
La tabla 16 muestra los resultados obtenidos una vez terminado el ensayo de CBR para una muestra modificada con el 10 % de escoria de alto horno.

Prueba No	No golpes	% humedad (horno)	Densidad seca (gr/cm3)	C. B. R. CORREG. 0,1"	C. B. R. CORREG. 0,2"	% Expansión total	Humedad penetracion (%)
1	56	14.9	1.86	2.7	3.3	3.4	17.6
2	56	17.9	1.88	5.6	6.4	2.3	19.3
3	56	21.0	1.84	1.0	1.2	2.2	21.5
4	26	15.9	1.80	1.6	1.9	2.3	20.2
5	26	19.1	1.82	3.1	3.7	1.6	21.2
6	26	22.1	1.74	0.5	0.6	1.7	22.6
7	10	17.1	1.69	0.7	0.9	1.6	22.1
8	10	20.4	1.72	1.3	1.6	1.4	22.7
9	10	23.5	1.65	0.5	0.4	1.4	24.6

Tabla 16: Resultados obtenidos en el proceso de laboratorio para una muestra de suelo modificada con 10% de escoria de alto horno
Fuente autor

- Determinación de densidad seca máxima y humedad óptima para una muestra de suelo modificada con 10% de escoria de alto horno

De la gráfica No13, se obtiene una densidad máxima seca de 1.88 gr/cc, con una humedad optima de 17.8%, el 95% de la densidad seca se observa en la tabla No 17



Grafica 13: Grafica de variación de la densidad seca con respecto a la humedad para cada serie de golpes con una modificación de escoria de 10%
Fuente autor.

W Optima (%)	17.8
Densidad max seca (gr/cm3)	1.88
95% Yd max seca (gr/cm3)	1.79

Tabla 17: Resultado de humedad optima, densidad máxima seca y densidad seca al 95% en una muestra modificada con 10% de escoria
Fuente autor

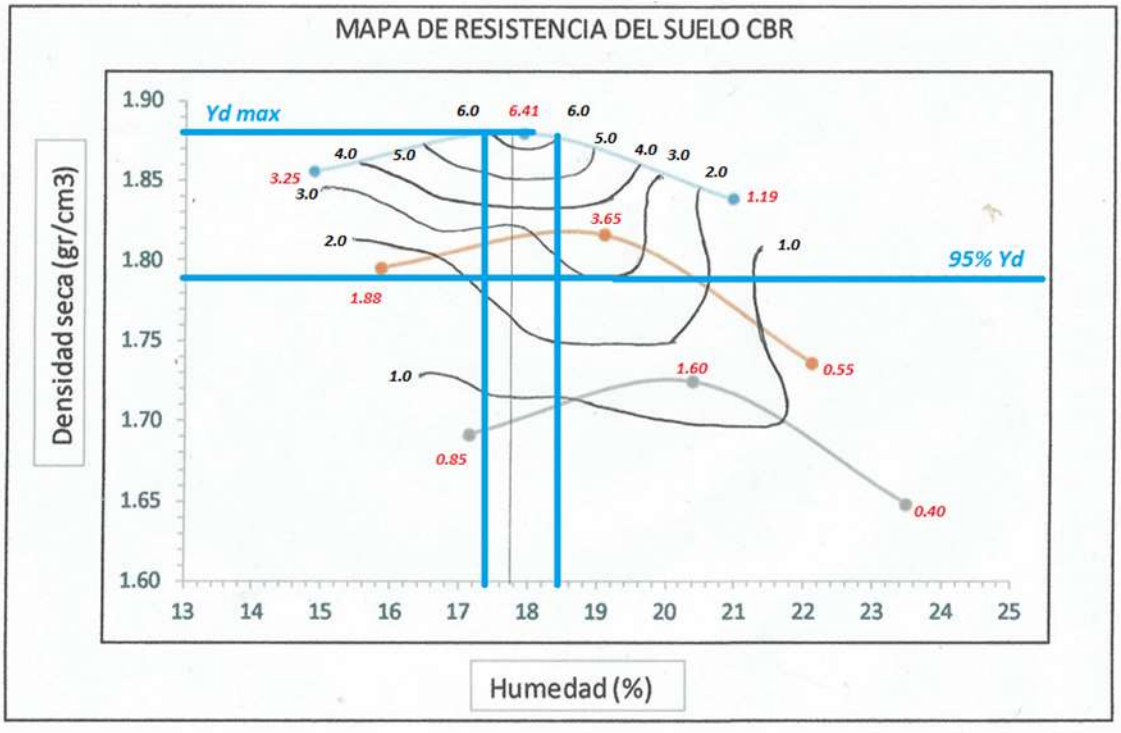
Para el cálculo del valor de CBR de diseño se continúa usando el mapa de resistencia del suelo la tabla No 18 presenta los valores de coordenadas y elevación**.**

En la gráfica 14, se observa que el valor máximo de CBR alcanzado para el suelo modificado con una proporción de escoria de alto horno de 10%; es de 6 % y que este valor se encuentra en un rango de humedades entre el 17.4% y 18.4%.

Al comparar el valor del CBR obtenido son los dos valores correspondientes al suelo natural y a la modificación del 5%, se observa que el valor aumento tres veces aproximadamente.

% humedad (horno)	Densidad seca (gr/cm3)	C. B. R. CORREG. 0,2"
14.88	1.86	3.25
17.91	1.88	6.41
20.95	1.84	1.19
15.87	1.80	1.88
19.10	1.82	3.66
22.11	1.74	0.55
17.15	1.69	0.85
20.37	1.72	1.60
23.48	1.65	0.40

Tabla 18: Coordenadas y elevación para mapa de resistencia del suelo modificado al 10%
Fuente autor



Grafica 14: Determinación gráfica del valor de CBR en un rango de humedades para una muestra de suelo modificada con el 20% de escoria de alto horno
Fuente autor

Con este nuevo índice de resistencia se cumple con los requerimientos establecidos en el artículo 220-13 de las especificaciones técnicas del INVIAS, materiales de terraplén ya que este está por encima de 5%.

A pesar de estos resultados, como se había mencionado anteriormente en lo que refiere a granulometría e índice de plasticidad está por encima de los valores límites establecidos por lo tanto al igual que el suelo natural y el suelo modificado con el 5% de escoria, este suelo con el 10% de escoria también se descarta.

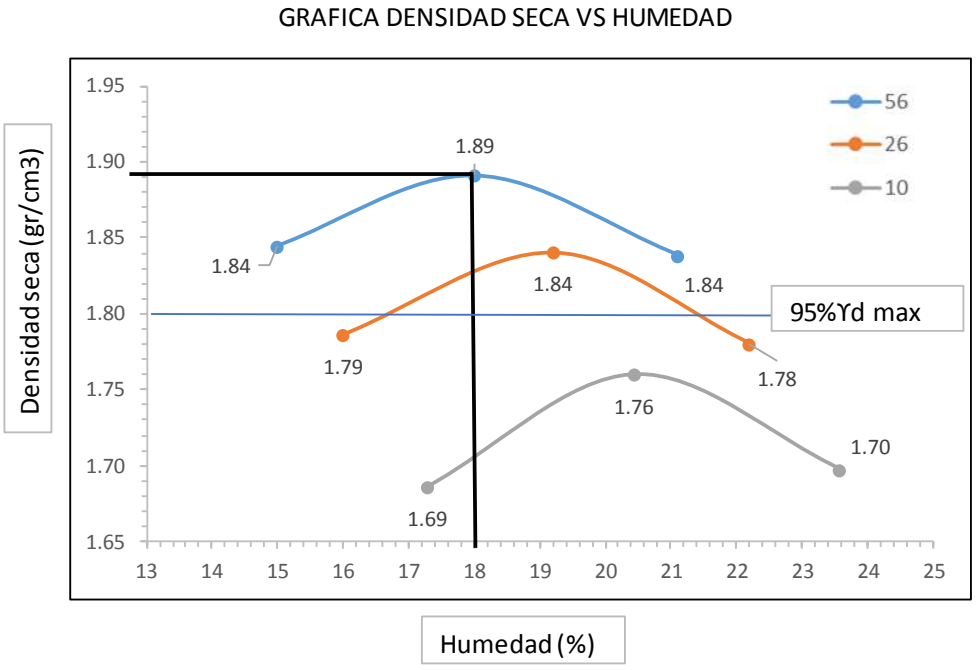
Resultados para una variación del suelo natural con el 20% de escoria de alto horno

Prueba No	No golpes	% humedad (horno)	Densidad seca (gr/cm3)	C. B. R. CORREG. 0,1"	C. B. R. CORREG. 0,2"	% Expansión total	Humedad penetracion (%)
1	56	15.0	1.84	4.1	4.9	3.2	17.8
2	56	18.0	1.89	9.3	10.7	2.3	19.5
3	56	21.1	1.84	1.7	2.0	2.0	21.8
4	26	16.0	1.79	2.4	2.8	2.2	20.4
5	26	19.2	1.84	5.6	6.5	1.7	21.4
6	26	22.2	1.78	1.2	1.3	1.6	22.8
7	10	17.3	1.69	1.5	1.4	1.5	22.3
8	10	20.4	1.76	3.4	3.3	1.4	22.9
9	10	23.6	1.70	0.7	0.6	1.3	24.9

Tabla 19: Resultados obtenidos en el proceso de laboratorio para una muestra de suelo modificada con 20% de escoria de alto horno
Fuente autor

La tabla 19 se muestra los resultados obtenidos una vez terminado el ensayo de CBR para una muestra modificada con el 20% de escoria de alto horno.

De la gráfica 15, se obtiene una densidad máxima seca de 1.89 gr/cc, con una humedad optima de 18%, la tabla No 20 muestra un valor de 1.80 gr/cc para el 95% de la densidad máxima.



Grafica 15: Grafica de variación de la densidad seca con respecto a la humedad para cada serie de golpes con una modificación de escoria de 20%
Fuente autor.

W Optima (%)	18
Densidad max seca (gr/cm3)	1.89
95% Yd max seca (gr/cm3)	1.80

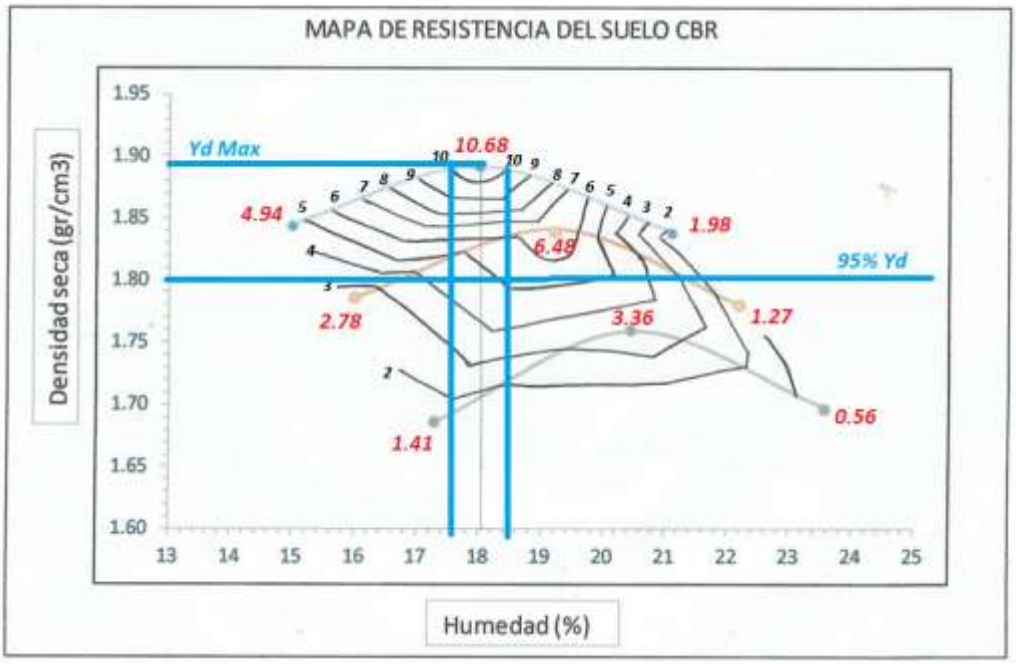
Tabla 20: Resultado de humedad optima, densidad máxima seca y densidad seca al 95% en una muestra modificada con 20% de escoria
Fuente autor

El cálculo del valor de CBR se halla mediante el mapa de resistencia del suelo como se observa en la gráfica No 16; basado en los valores de La tabla No 21.

En la gráfica 16, se observa que el valor máximo de CBR alcanzado para el suelo modificado con una proporción de escoria de alto horno de 20%; es de 10 % y que este valor se encuentra en un rango de humedades entre el 17.6% y 18.5%.

% humedad (horno)	Densidad seca (gr/cm3)	C. B. R. CORREG. 0,2"
14.99	1.84	4.94
18.01	1.89	10.68
21.12	1.84	1.98
16.01	1.79	2.78
19.20	1.84	6.48
22.20	1.78	1.27
17.29	1.69	1.41
20.43	1.76	3.34
23.58	1.70	0.56

Tabla 21: Coordenadas y elevación para mapa de resistencia del suelo modificado al 20%
Fuente autor



Grafica 16: Determinación gráfica del valor de CBR en un rango de humedades para una muestra de suelo modificada con el 20% de escoria de alto horno
Fuente autor

Al igual que ocurrió con el valor del CBR para la muestra modificada con el 10% de escoria; la muestra con 20% continua con la tendencia en aumento. A pesar de que el valor de CBR está por encima del 5%, esta muestra de suelo también se descarta para

su uso como material de terraplén ya que su granulometría aún conserva un porcentaje de tamiz pasa 200 mayor al 30% con un valor de porcentaje pasa de 43.9 %

Resultados para una variación del suelo natural con el 30% de escoria de alto horno

La tabla 22 muestra los resultados obtenidos una vez terminado el ensayo de CBR para una muestra modificada con el 30% de escoria de alto horno.

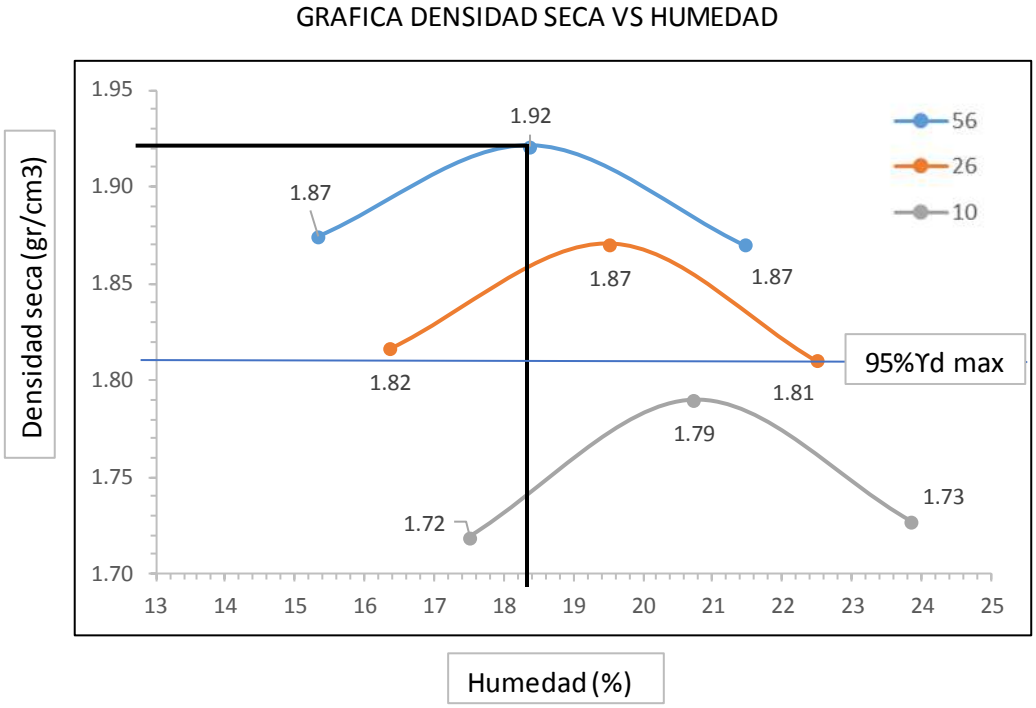
Prueba No	No golpes	% humedad (horno)	Densidad seca (gr/cm3)	C. B. R. CORREG. 0,1"	C. B. R. CORREG. 0,2"	% Expansión total	Humedad penetracion (%)
1	56	15.3	1.87	4.6	5.4	2.7	18.1
2	56	18.4	1.92	11.2	12.8	1.9	19.8
3	56	21.5	1.87	2.0	2.4	1.7	22.0
4	26	16.4	1.82	3.0	3.5	1.8	20.7
5	26	19.5	1.87	6.3	7.3	1.4	21.7
6	26	22.5	1.81	1.5	1.5	1.4	23.0
7	10	17.5	1.72	2.0	1.8	1.3	22.5
8	10	20.7	1.79	3.4	3.4	1.1	23.1
9	10	23.9	1.73	0.9	0.7	1.1	25.1

Tabla 22: Resultados obtenidos en el proceso de laboratorio para una muestra de suelo modificada con 30% de escoria de alto horno
Fuente autor

De la gráfica 17, se obtiene una densidad máxima seca de 1.92 gr/cc, con una humedad optima de 18.3%, como el material se pretende usar para la corona de un terraplén; el grado de compactación debe ser mayor o igual al 95% de la densidad máxima seca; esta corresponde a 1.82 gr/cc, según tabla 23.

W Optima (%)	18.3
Densidad max seca (gr/cm3)	1.92
95% Yd max seca (gr/cm3)	1.82

Tabla 23: Resultado de humedad optima, densidad máxima seca y densidad seca al 95% en una muestra modificada con 30% de escoria
Fuente autor

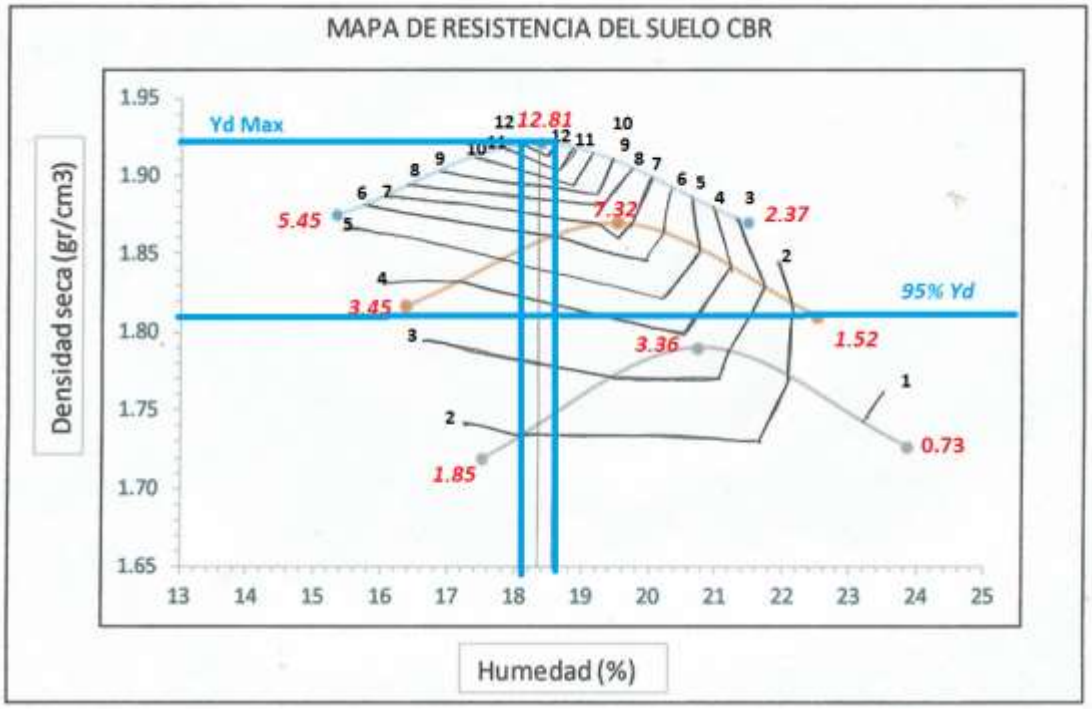


Grafica 17: Grafica de variación de la densidad seca con respecto a la humedad para cada serie de golpes con una modificación de escoria de 30%
Fuente autor.

La tabla No 24 muestra los valores de humedad, densidad seca máxima y CBR corregido obtenidos, datos que se incorporan en el mapa de resistencia del suelo.

% humedad (horno)	Densidad seca (gr/cm3)	C. B. R. CORREG. 0,2"
15.35	1.87	5.45
18.39	1.92	12.81
21.47	1.87	2.37
16.38	1.82	3.45
19.53	1.87	7.32
22.50	1.81	1.52
17.52	1.72	1.85
20.74	1.79	3.36
23.86	1.73	0.73

Tabla 24: Coordenadas y elevación para mapa de resistencia del suelo modificado al 5%
Fuente autor



Grafica 18: Determinación gráfica del valor de CBR en un rango de humedades para una muestra de suelo modificada con el 5% de escoria de alto horno
Fuente autor

En la gráfica 18, se observa que el valor máximo de CBR alcanzado para el suelo modificado con una proporción de escoria de alto horno de 30%; es de 12 % y que este valor se encuentra en un rango de humedades entre el 17.9% y 18.3%,

Revisando los datos de granulometría y propiedades índice anteriormente mencionados, junto con el valor del CBR hallado; se observa que una dosificación del 30% de escoria de alto horno y 70% de suelo natural cumplen con los requerimientos establecidos por el artículo 220-13 materiales de terraplén.

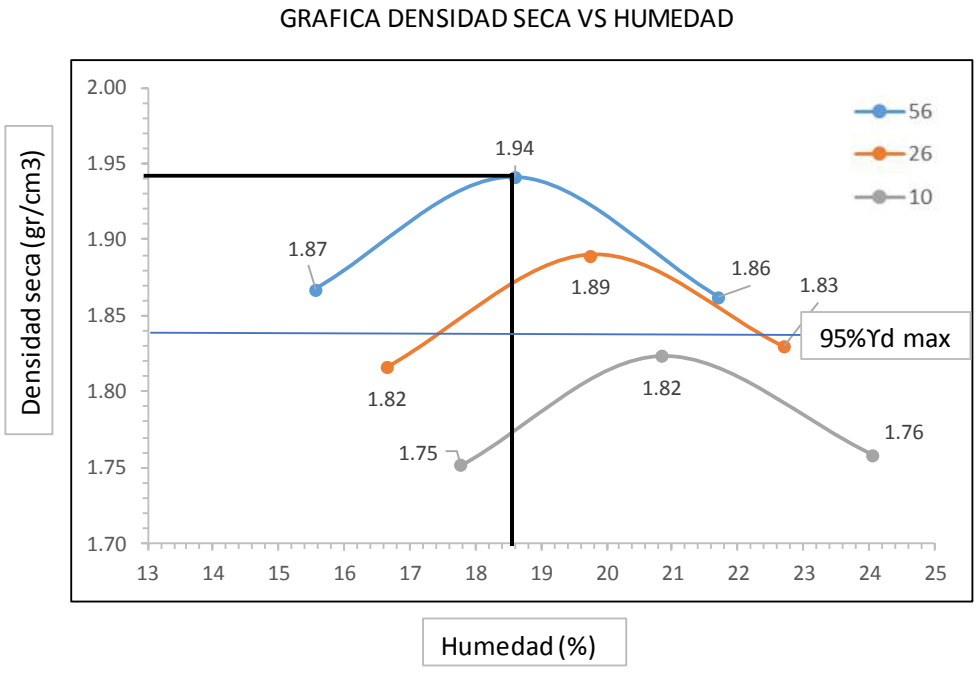
Por esta razón la muestra se considera aceptable según estas características previas a la evaluación de su expansión.

Resultados para una variación del suelo natural con el 40% de escoria de alto horno

Prueba No	No golpes	% humedad (horno)	Densidad seca (gr/cm3)	C. B. R. CORREG. 0,1"	C. B. R. CORREG. 0,2"	% Expansión total	Humedad penetracion (%)
1	56	15.6	1.87	5.9	7.0	2.2	19.5
2	56	18.6	1.94	11.8	13.5	1.6	21.2
3	56	21.7	1.86	2.1	2.5	1.4	23.4
4	26	16.7	1.82	3.4	4.0	1.6	22.2
5	26	19.8	1.89	6.1	7.1	1.3	23.1
6	26	22.7	1.83	1.2	1.2	1.2	24.4
7	10	17.8	1.75	2.0	2.2	1.2	24.0
8	10	20.8	1.82	3.8	3.8	1.1	24.4
9	10	24.1	1.76	0.9	1.0	1.0	26.4

Tabla 25: Resultados obtenidos en el proceso de laboratorio para una muestra de suelo modificada con 40% de escoria de alto horno
Fuente autor

La tabla No 25 muestra los resultados obtenidos una vez terminado el ensayo de CBR para una muestra modificada con el 40% de escoria de alto horno.



Grafica 19: Grafica de variación de la densidad seca con respecto a la humedad para cada serie de golpes con una modificación de escoria de 40%
Fuente autor.

De la gráfica 19, se obtiene una densidad máxima seca de 1.94 gr/cc, con una humedad optima de 18.6%, como el material se pretende usar para la corona de un terraplén; el grado de compactación debe ser mayor o igual al 95% de la densidad máxima seca; este valor corresponde a 1.84 gr/cc, (tabla 26)

W Optima (%)	18.6
Densidad max seca (gr/cm3)	1.94
95% Ɣd max seca (gr/cm3)	1.84

Tabla 26: Resultado de humedad optima, densidad máxima seca y densidad seca al 95% en una muestra modificada con 40% de escoria
Fuente autor

Los valores de humedad, densidad seca máxima y CBR corregido, datos que se incorporan en el mapa de resistencia del suelo se observan en la tabla No 27.

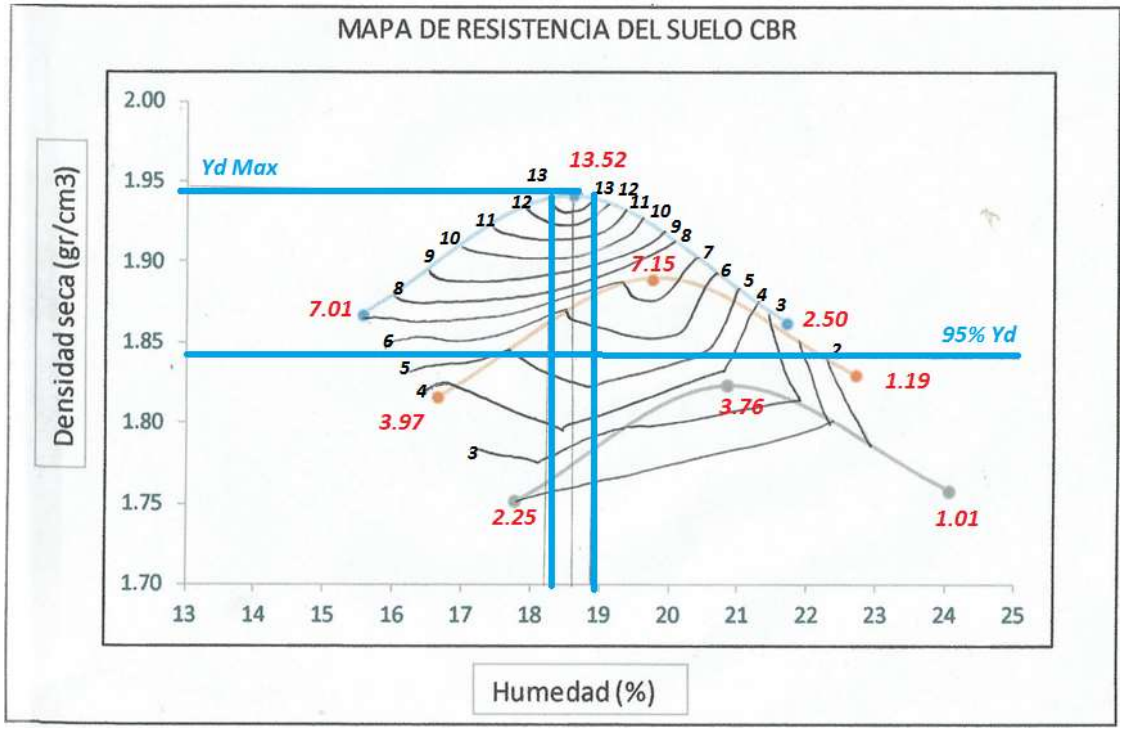
En la gráfica 20, se observa que el valor máximo de CBR alcanzado para el suelo modificado con una proporción de escoria de alto horno de 40%; es de 13 % y que este valor se encuentra en un rango de humedades entre el 18.3% y 18.9%.

Al aumentar el porcentaje de escoria de alto horno se observó un aumento en el valor del CBR después del 10% y su tendencia de aumento se mantuvo hasta la muestra modificada con el 30%; para el 40% de escoria se observa un cambio en la tendencia de aumento el cual ahora no es significativo.

De igual manera que ocurrió con la muestra modificada al 30%, está última muestra también cumple con los requerimientos establecidos para ser usada como material de terraplén y por lo tanto se considera optima previo a la evaluación de su expansión.

% humedad (horno)	Densidad seca (gr/cm3)	C. B. R. CORREG. 0,2"
15.56	1.87	7.01
18.60	1.94	13.52
21.70	1.86	2.50
16.66	1.82	3.97
19.76	1.89	7.15
22.70	1.83	1.19
17.78	1.75	2.25
20.84	1.82	3.76
24.07	1.76	1.01

Tabla 27: Coordenadas y elevación para mapa de resistencia del suelo modificado al 40%
Fuente autor



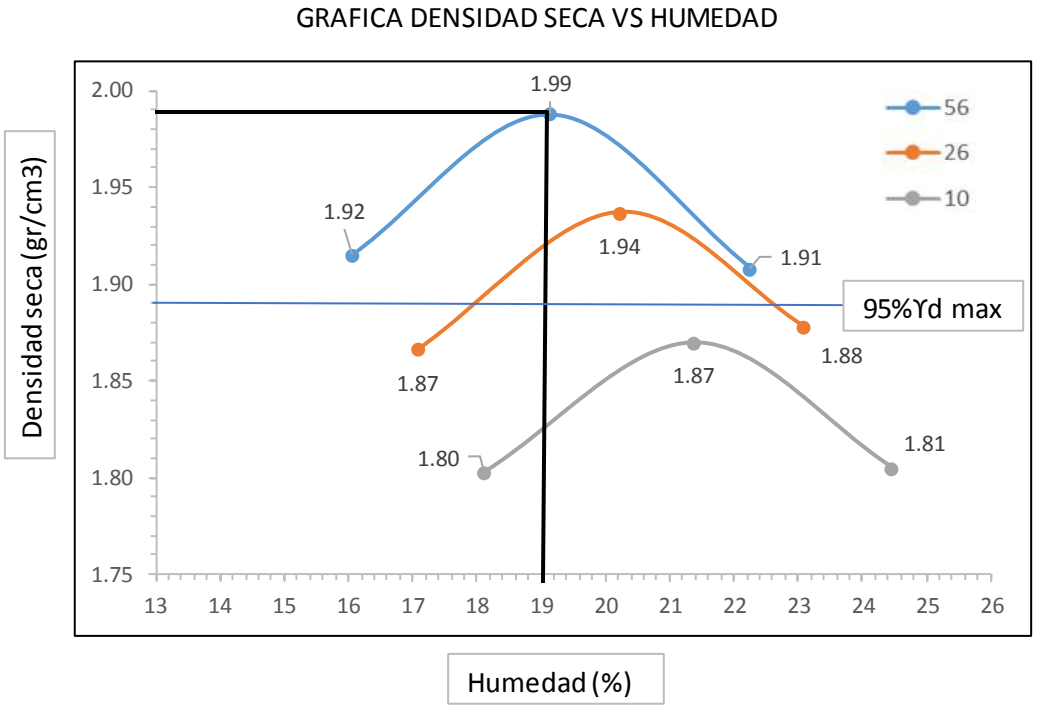
Grafica 20: Determinación gráfica del valor de CBR en un rango de humedades para una muestra de suelo modificada con el 40% de escoria de alto horno
Fuente autor

Resultados para una variación del suelo natural con el 50% de escoria de alto horno

La tabla No 28 muestra los resultados obtenidos una vez terminado el ensayo de CBR para una muestra modificada con el 5% de escoria de alto horno.

Prueba No	No golpes	% humedad (horno)	Densidad seca (gr/cm3)	C. B. R. CORREG. 0,1"	C. B. R. CORREG. 0,2"	% Expansión total	Humedad penetracion (%)
1	56	16.1	1.92	5.1	6.1	1.7	18.8
2	56	19.2	1.99	12.5	14.2	1.2	20.6
3	56	22.3	1.91	2.2	2.6	1.0	22.8
4	26	17.1	1.87	2.8	3.2	1.1	21.4
5	26	20.2	1.94	7.3	8.5	0.9	22.4
6	26	23.1	1.88	1.2	1.3	0.9	23.6
7	10	18.1	1.80	1.5	1.4	0.8	23.1
8	10	21.4	1.87	5.0	5.0	0.7	23.8
9	10	24.5	1.81	1.0	0.8	0.7	25.7

Tabla 28: Resultados obtenidos en el proceso de laboratorio para una muestra de suelo modificada con 50% de escoria de alto horno
Fuente autor



Grafica 21: Grafica de variación de la densidad seca con respecto a la humedad para cada serie de golpes con una modificación de escoria de 50%
Fuente autor.

De la gráfica 21, se obtiene una densidad máxima seca de 1.99 gr/cc, con una humedad optima de 19%, como el material se pretende usar para la corona de un terraplén; el grado de compactación debe ser mayor o igual al 95% de la densidad máxima seca, este valor corresponde a 1.89 gr/cc de la tabla 29.

W Optima (%)	19
Densidad max seca (gr/cm3)	1.99
95% Yd max seca (gr/cm3)	1.89

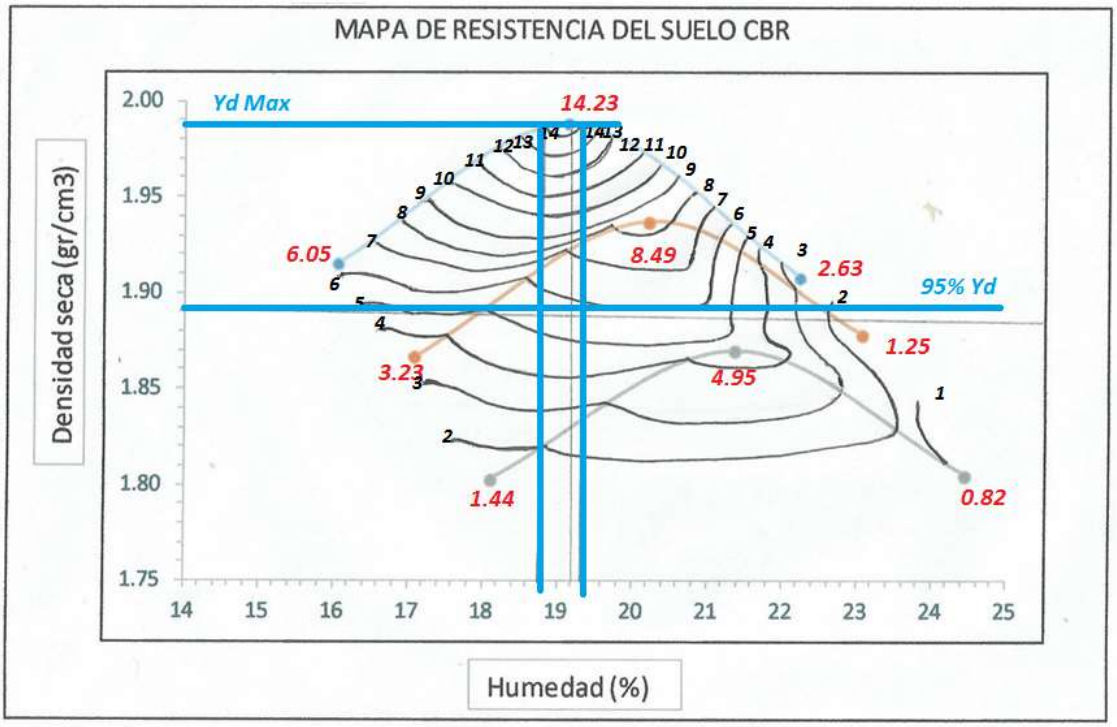
Tabla 29: Resultado de humedad optima, densidad máxima seca y densidad seca al 95% en una muestra modificada con 50% de escoria
Fuente autor

Los valores para establecer el mapa de resistencia del suelo se presentan en la tabla No 30

% humedad (horno)	Densidad seca (gr/cm3)	C. B. R. CORREG. 0,2"
16.07	1.92	6.05
19.15	1.99	14.23
22.25	1.91	2.63
17.08	1.87	3.23
20.22	1.94	8.48
23.09	1.88	1.25
18.11	1.80	1.44
21.37	1.87	4.95
24.46	1.81	0.82

Tabla 30: Coordenadas y elevación para mapa de resistencia del suelo modificado al 50%
Fuente autor

En la gráfica 22, se observa que el valor máximo de CBR alcanzado para el suelo modificado con una proporción de escoria de alto horno de 50%; es de 14% y que este valor se encuentra en un rango de humedades entre el 18.7% y 19.3%,



Grafica 22: Determinación gráfica del valor de CBR en un rango de humedades para una muestra de suelo modificada con el 50% de escoria de alto horno
Fuente autor

Como se mencionó anteriormente, el resultado del valor del CBR para la muestra modificada con el 50% conserva una tendencia de aumento en proporciones menores en comparación a las presentadas con las modificaciones del 10% 20% y 30% como se observa tabla No 31, lo que se presume que con una proporción mayor se llegaría a un valor máximo como límite.

La muestra modificada con el 50% de escoria de alto horno también se considera óptima como material de terraplén según los resultados de CBR y los hallados anteriormente.

ESCORIA	W %	Yd (gr/cm3)	CBR (%)
0%	16.9	1.84	2
5%	17.7	1.86	2.5
10%	17.8	1.87	6
20%	18	1.89	10
30%	18.3	1.92	12
40%	18.6	1.94	13
50%	19	1.99	14

Tabla 31: Resultados obtenidos según variación de escoria de alto horno.
Fuente autor

En la tabla No 32 se observa el rango de humedades para cada proporción de escoria de alto horno, que además de garantizar el 95% de la densidad máxima seca; determinan el valor máximo de CBR según sea la muestra,

ESCORIA	Yd (gr/cm3)	RANGO DE HUMEDAD		95% Yd (gr/cm3)	CBR (%)
		W1 %	W2 %		
0%	1.84	16	18	1.75	2
5%	1.86	17	18.5	1.77	3
10%	1.87	17.4	18.4	1.78	6
20%	1.89	17.6	18.5	1.80	10
30%	1.92	17.9	18.3	1.82	12
40%	1.94	18.3	18.9	1.84	13
50%	1.99	18.7	19.3	1.89	14

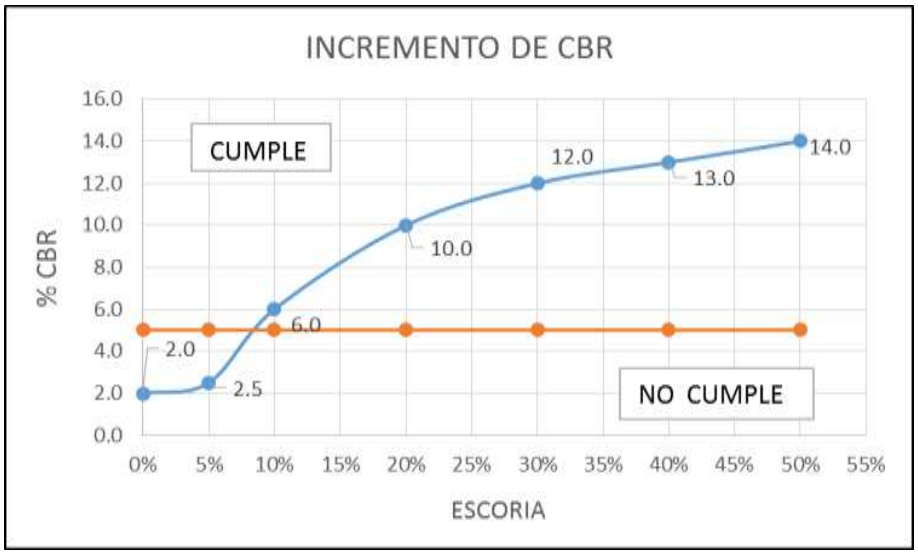
Tabla 32: Rango de humedades para CBR según la variación de escoria de alto horno
Fuente autor.

En la tabla No 33 a pesar que la muestra modificada con el 10% y el 20% de escoria; cumplen con el valor mínimo de CBR, son las siguientes variaciones a estas; las de 30%, 40% y 50%; las que se consideran optimas ya que son estas las que se encuentran por debajo de los rangos establecidos en cuanto a limite líquido, índice de plasticidad y granulometría. (Ver tabla No 10 y No 12)

PROPORCION	CBR (%)	
TABLA 220-1 ART 220 INV	5	CUMPLE
0%	2	FALSO
5%	2.5	FALSO
10%	6	VERDADERO
20%	10	VERDADERO
30%	12	VERDADERO
40%	13	VERDADERO
50%	14	VERDADERO

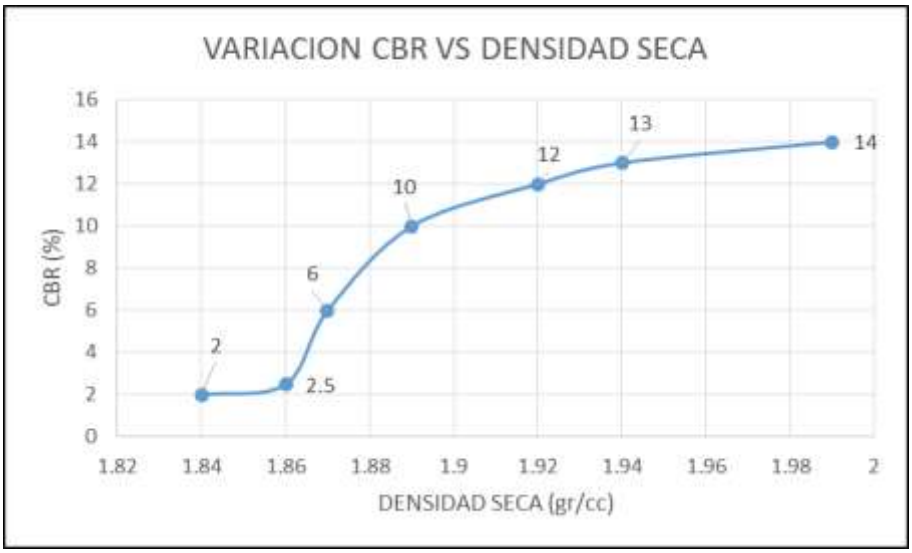
Tabla 33: Variación de valor de CBR según porcentaje de escoria y cumplimento con los requerimientos de material de terraplén, articulo 220-13 INVIAS
Fuente autor

En la gráfica 23, se observa el comportamiento del índice de resistencia en la medida que se modifica la proporción de escoria de alto horno a una muestra de suelo



Grafica 23: Representación gráfica del comportamiento del CBR con respecto al porcentaje de escoria de alto horno adicionado.
Fuente autor

A partir del 10% se observa un aumento significativo que conserva dicha tendencia hasta llegar al 30% de modificación; de allí en adelante existe un aumento conservador y mínimo, lo que presume se está llegando a un límite.



Grafica 24: Representación gráfica de variación densidad seca respecto al valor de CBR
Fuente autor

En la gráfica No 24 se muestra la variación de la densidad seca con respecto al porcentaje de escoria de alto horno que se encuentra intrínseco en el valor del CBR, siendo así; que a mayor contenido de escoria, mayor densidad máxima seca y mayor índice de resistencia.

Calculo de la expansión

El porcentaje de expansión final será el que corresponda al valor de la densidad máxima seca, en la tabla 34 se muestran los resultados obtenidos en cada una de los moldes por cada muestra modificada. El valor final de la expansión será el correspondiente a la fila de la prueba No 2 que será la densidad máxima del proctor modificado. Como el valor de la expansión no debe ser mayor al 2% las muestras que coinciden con este resultado son las modificadas con el 30%, 40% y 50% de escoria.

PRUEBA No	No golpes	EXPANSIÓN CON RESPECTO AL PORCENTAJE DE ESCORIA						
		0%	5%	10%	20%	30%	40%	50%
1	56	4.22	3.8	3.38	3.16	2.66	2.2	1.66
2	56	2.94	2.7	2.34	2.26	1.9	1.56	1.16
3	56	2.6	2.4	2.2	1.98	1.66	1.4	1.04
4	26	2.94	2.6	2.32	2.18	1.84	1.64	1.14
5	26	2	1.8	1.64	1.66	1.4	1.28	0.9
6	26	2.12	1.92	1.68	1.62	1.36	1.24	0.86
7	10	2	1.8	1.64	1.54	1.3	1.18	0.84
8	10	1.8	1.66	1.44	1.36	1.14	1.08	0.7
9	10	1.8	1.6	1.44	1.34	1.12	1	0.66

Tabla 34: Porcentaje de expansión para cada molde ensayado
Fuente autor

Una vez terminado el análisis de resultados, la tabla No 35 presenta un resumen de los resultados según los valores establecidos por el artículo 220-13, materiales de terraplén; en donde se concluye que las dosificaciones superiores al 30% de escoria son óptimas para trabajar como terraplén en el caso de nuestro material de estudio; una arcilla de baja de plasticidad.

PROPORCION	TAMAÑO MAXIMO mm		% PASA TAMIZ N10		% PASA TAMIZ N200		LL %		IP %		CBR (%)	
TABLA 220-1 ART 220 INV	100	CUMPLE	80	CUMPLE	35	CUMPLE	40	CUMPLE	15	CUMPLE	5	CUMPLE
0%	12.7	VERDADERO	93	FALSO	60.8	FALSO	38	VERDADERO	18	FALSO	2.0	FALSO
5%	25.4	VERDADERO	88	FALSO	54.0	FALSO	36	VERDADERO	17	FALSO	2.5	FALSO
10%	38.1	VERDADERO	84	FALSO	51.2	FALSO	34	VERDADERO	16	FALSO	6.0	VERDADERO
20%	38.1	VERDADERO	78	VERDADERO	43.9	FALSO	31	VERDADERO	15	FALSO	10.0	VERDADERO
30%	38.1	VERDADERO	68	VERDADERO	33.1	VERDADERO	27	VERDADERO	13	VERDADERO	12.0	VERDADERO
40%	38.1	VERDADERO	59	VERDADERO	22.1	VERDADERO	24	VERDADERO	11	VERDADERO	13.0	VERDADERO
50%	38.1	VERDADERO	50	VERDADERO	12.4	VERDADERO	20	VERDADERO	9	VERDADERO	14.0	VERDADERO

Tabla 35: verificación cumplimiento requisitos para material de terraplenes. Artículo 220-13 INVIAS
Fuente autor

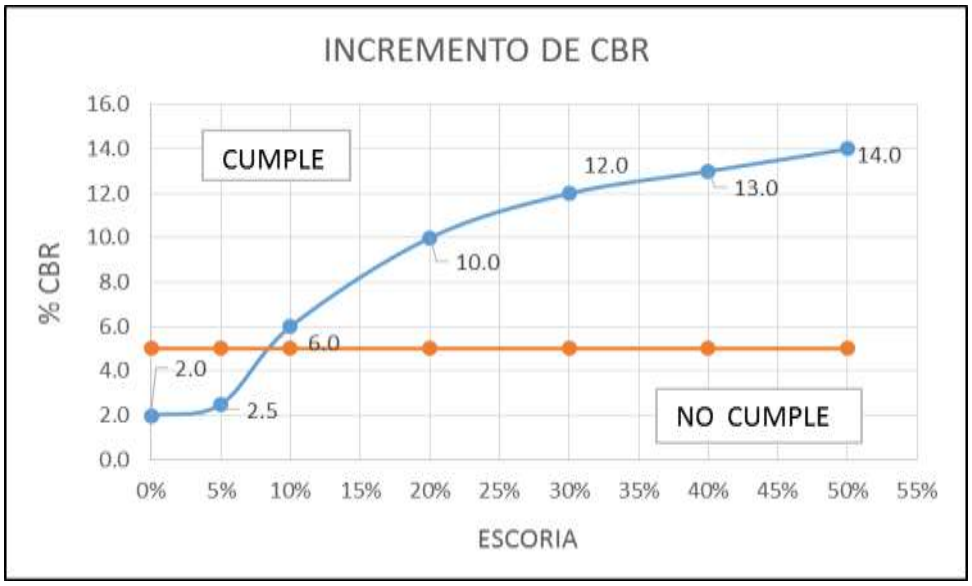
CONCLUSIONES

.

En la caracterización del material de este estudio se clasificó como una arcilla de baja de plasticidad con un índice de resistencia del 2%. Valor que es mucho menor al requerido por las especificaciones técnicas para su uso como material de terraplén, un material cohesivo de estas condiciones fue pertinente para el estudio de variación de comportamiento en la medida que el comportamiento friccionante lo aporta netamente la escoria de alto horno, de allí la importancia de que el material en su estado natural fuese un suelo fino, esto se comprobó a lo largo del proceso de análisis en cada una de las muestras.

Una vez culminadas todas las fases propuesta para el proyecto, y luego del análisis de resultados obtenido para cada una de las muestras sometidas a los diferentes ensayos; se confirmó la hipótesis de que la escoria de alto horno puede mejorar las condiciones de comportamiento de un material de suelo en lo que refiere a su índice de resistencia; de tal manera que este pueda ser usado como material de terraplén

Pero esta hipótesis está condicionada a la cantidad de escoria por añadir al suelo en mención, a pesar de que el aumento en proporciones de escoria mejora el índice de resistencia y disminuye su plasticidad; esto no garantiza su uso como material de mejoramiento que cumpla con los requerimientos establecidos en el artículo 220-13 de las especificaciones técnicas de Instituto Nacional de Vías.



Grafica 25: Representación gráfica del comportamiento del CBR con respecto al porcentaje de escoria de alto horno adicionado.
Fuente autor

Según la gráfica No 25, Si se habla en términos de resistencia se podría concluir que a partir del 10% de escoria añadida al suelo de estudio; se obtienen los parámetros de CBR óptimos para el uso de material como terraplenes según las especificaciones técnicas del INVIAS en donde se habla de un mínimo de 5% para suelos adecuados y dispuestos en la corona del terraplén.

Pero está a aseveración debe ser cuidadosamente analizada en conjunto a los demás requerimientos; en la tabla No 36 se observa que solamente cuando la muestra es modificada con un 30% de escoria de alto horno; se alcanza un porcentaje de material que pasa del tamiz No 200 menor al 35%.

PROPORCION	TAMAÑO MAXIMO mm		% PASA TAMIZ N10		% PASA TAMIZ N200	
TABLA 220-1 ART 220 INV	100	CUMPLE	80	CUMPLE	35	CUMPLE
0%	12.7	VERDADERO	93	FALSO	60.8	FALSO
5%	25.4	VERDADERO	88	FALSO	54.0	FALSO
10%	38.1	VERDADERO	84	FALSO	51.2	FALSO
20%	38.1	VERDADERO	78	VERDADERO	43.9	FALSO
30%	38.1	VERDADERO	68	VERDADERO	33.1	VERDADERO
40%	38.1	VERDADERO	59	VERDADERO	22.1	VERDADERO
50%	38.1	VERDADERO	50	VERDADERO	12.4	VERDADERO

Tabla 36: Comparación de valores máximos permitidos para materiales de terraplén con valores obtenidos según variación de porcentaje de escoria de alto horno.
Fuente autor

Es decir, el material de estudio para este proyecto solo podrá ser utilizado como material de terraplén cuando la composición granulométrica modificada con escoria de alto horno conserve una proporción mayor de 30%.

Por otro lado si se es más riguroso obviando los requerimientos establecidos en el artículo 220-13, y por el contrario no se basa su análisis en el sistema de clasificación USCS, si no en el sistema AASHTO se puede observar que el porcentaje de material fino es mayor al 30% cuando la escoria también alcanza el 30%, por lo tanto su comportamiento será el de un suelo cohesivo y no el de un material friccionante.

La escoria de alto horno al tratarse de un material granular clasificado como grava pobremente gradada, provee la posibilidad de alterar la composición granulométrica de un suelo fino sin modificar en gran medida el comportamiento cohesivo del suelo y esto se observa en el análisis de la fracción fina en donde todas las muestras conservan la clasificación de arcilla de baja plasticidad. A medida que aumenta la proporción en cada muestra; la distribución de partículas va cambiando, disminuyendo los finos pero conservando su clasificación hasta la muestra modificada con 20%; en donde su

clasificación se define como arena arcillosa; descartando de esta manera el uso del material con estas dosificaciones de escoria pues no cumplen con los valores mencionados en la especificaciones técnicas.

Lo que si ocurre es un descenso en el comportamiento de la plasticidad al entrar en contacto con el material fino que posee la escoria y que hace descender los límites de consistencia con una tendencia lineal como lo muestra la tabla No 37

% ESCORIA	LL (%)	LL < 40%	IP (%)	IP < 15%
0%	38	cumple	18	no cumple
5%	36	cumple	17	no cumple
10%	34	cumple	16	no cumple
20%	31	cumple	15	cumple
30%	27	cumple	13	cumple
40%	24	cumple	11	cumple
50%	20	cumple	9	cumple

Tabla 37: Comparación de resultados con valores límite artículo 220-13 INVIAS, tabla 220-1; requerimiento de los materiales para terraplenes
Fuente autor.

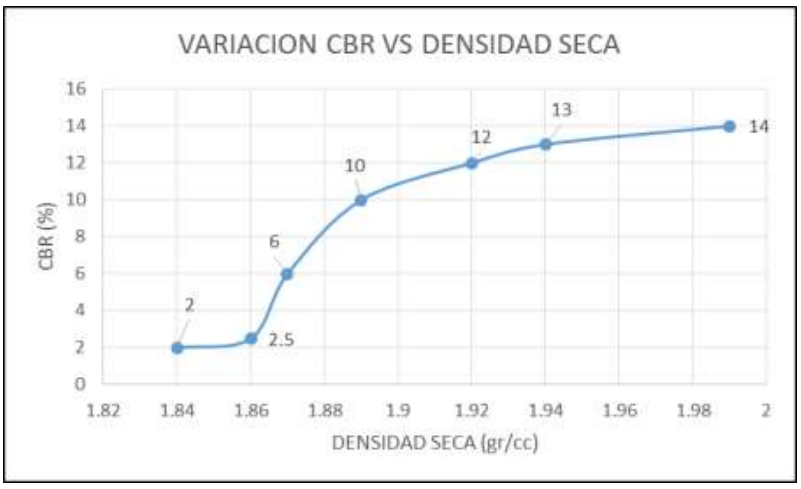
Si se toma nuevamente el tema de la resistencia se puede concluir que el aporte de la escoria de alto horno como material friccionante garantiza un aumento en este índice de una manera considerable en las tres primeras modificaciones, pues es en este intervalo del 0% al 20% de escoria adicionada donde se eleva el CBR de 2% al 10%; como se observa en la tabla No 38.

A partir de la modificación del 30% el CBR sigue aumentando en menor proporción y conserva una tendencia casi lineal; suponiendo así que se encontrara un pico máximo en una proporción más elevada.

PROPORCION	CBR (%)	
TABLA 220-1 ART 220 INV	5	CUMPLE
0%	2	FALSO
5%	2.5	FALSO
10%	6	VERDADERO
20%	10	VERDADERO
30%	12	VERDADERO
40%	13	VERDADERO
50%	14	VERDADERO

Tabla 38: Variación de valor de CBR según porcentaje de escoria y cumplimento con los requerimientos de material de terraplén, articulo 220-13 INVIAS
Fuente autor

Como la densidad máxima seca se encuentra en función del CBR hallado; la gráfica 26 demuestra que a medida en que aumenta el CBR y por ende la composición de escoria; también hay un aumento en la densidad máxima seca.



Grafica 26: Representación gráfica de variación densidad seca respecto al valor de CBR
Fuente autor

De igual forma la humedad óptima para alcanzar la densidad máxima también se encuentra con valores ascendentes con respecto a la modificación anterior, pero no son valores demasiados diferentes si no que oscilan entre el 17% y el 19%, condición que no se esperaba ya que se suponía que el aumento de la escoria requería mayor

cantidad de agua para alcanzar la densidad máxima seca. Caso similar ocurre en el rango de humedades que se necesitan para alcanzar el 95% de la densidad máxima seca, donde los valores son muy similares al punto de que el rango se debe tener en cuenta los decimales para su diferenciación (tabla No 39).

ESCORIA	Yd (gr/cm3)	RANGO DE HUMEDAD		95% Yd (gr/cm3)	CBR (%)
		W1 %	W2 %		
0%	1.84	16	18	1.75	2
5%	1.86	17	18.5	1.77	3
10%	1.87	17.4	18.4	1.78	6
20%	1.89	17.6	18.5	1.80	10
30%	1.92	17.9	18.3	1.82	12
40%	1.94	18.3	18.9	1.84	13
50%	1.99	18.7	19.3	1.89	14

Tabla 39: Rango de humedades para CBR según la variación de escoria de alto horno
Fuente autor.

La última condición para evaluar la viabilidad del uso de la escoria de alto horno como material modificador es la expansión resultante luego de cuatro días de inmersión; en este caso y según la tabla No 35 las muestras que están por debajo del 2% de expansión son las muestras modificadas con el 40% y 50%, pues las del 30% tiene un valor de 1.9% que es un valor muy cercano, a diferencia de los de 1.56% y 1.16% para 40% y 50% respectivamente de la muestra modificada.

Por lo tanto se puede afirmar que la dosificación de escoria de alto horno para un material que conserve características similares al suelo del presente estudio; es decir una arcilla de baja plasticidad será del 40% o mayor a esta. Esta proporción garantiza que los valores de limite líquido, índice de plasticidad, índice de resistencia y expansión están por debajo de los límites establecidos en el artículo 220-13 de las especificaciones técnicas del INVIAS.

Si se comparan los métodos de trabajo y resultados obtenidos en el presente estudio con los alcanzados por los ingenieros Oscar J Reyes Ortiz y Javier Fernando Camacho Tauta; del grupo de investigación de geotecnia de la Universidad Militar Nueva Granada titulado "*efecto del desperdicio de una siderúrgica en bases y subbases granulares*"; (Reyes Ortiz & Camacho Tauta, 2003)

Se pueden mencionar algunas consideraciones:

A pesar de que el estudio en mención se realizó para materiales granulares se menciona un aumento en la densidad seca a medida que aumenta la proporción de escoria en el material; ocurre lo mismo con el material de arcilla del presente informe.

Para el caso de los granulares se evidencia un amento si se modifica en tamaños puntuales con respecto al tamiz No 10, para el caso del material arcilloso tratado en este proyecto la modificación se hizo general con respecto al peso de la muestra y no se evaluó en estas condiciones.

El estudio menciona que a pesar de que la resistencia aumenta para nivel de compactación de 10 golpes y 26 golpes, en el material granular se observa un decrecimiento de la resistencia del 23% cuando se trata de un nivel de compactación de 55 golpes, cuando se modifica en proporciones altos como el 8%; esto no ocurre con el material arcilloso que aumenta en todos los niveles de compactación, presentando un máximo en todos los casos para el de 56 golpes recalcando que las proporciones de escoria fueron mayores en todos los casos.

Con estos resultados el estudio de la universidad Militar concluye que la variación entre el 1.5% y el 8% de escoria de alto horno puede mejorar la resistencia para materiales

de base granular tipo 2, caso contrario ocurre con la base granular tipo 1. Este análisis no se puede realizar en el presente proyecto ya que solo se trabajó con un tipo de suelo y las modificaciones fueron de mayor proporción a las planteadas en el caso del estudio de la universidad Militar.

Si se parte de que el índice de resistencia para el material arcilloso sin modificar era del 2%; y el resultante con una modificación del 50% de escoria de alto horno aumento aun valor de 14%, se estaría hablando de un incremento del 700%. Demostrando así que el material granular de la escoria de alto horno proporciona la mayor parte del índice de resistencia.

En el estudio de la universidad militar también menciona el efecto adverso en la modificación de la densidad seca cuando se usa material modificador retenido en el tamiz 200 ya que se obtienen valores menores al inicial; para el caso de estudio del material arcilloso, al tener una baja concentración de finos del 3%; la escoria no influye en el comportamiento del nuevo suelo salvo en la disminución de la plasticidad.

Una vez analizado los resultados con un estudio externo se puede afirmar que la resistencia aportada por la escoria de alto horno como material granular es elevada, al llegar a un aumento del 700 % con respecto al índice de resistencia inicial cuando se trata de un material arcilloso.

Este material se puede considerar como un agente modificador que además de proveer mejoramiento en las propiedades mecánicas del suelo; se puede convertir en un recurso aprovechable en el mejoramiento de suelos en sitio y disminuir de esta manera la explotación desmedida de canteras.

Si la escoria de alto horno se considera un material de desecho que brinda tales propiedades a los suelos, y se convierte en un agente reparador en lo que refiere a impacto ambiental se estaría hablando también de un mejoramiento en el factor económico ya que se estaría optimizando los recursos que se invierten en la extracción y transporte de materiales productos de cantera; y lo más importante se puede aprovechar materiales cercanos al sitio que mezclados con la escoria de alto horno garantizaran la funcionalidad como estructuras de terraplén.

RECOMENDACIONES

Una vez establecidas las conclusiones se recomienda el uso de la escoria de alto horno como material modificador cuando se trate de suelos cohesivos de baja plasticidad que compartan características similares al suelo objeto de estudio de este proyecto.

Cuando se pretenda usar este producto como material de terraplén; la proporción a utilizar deberá ser mayor o igual a un 40% con respecto a su peso. Siendo este valor quien garantiza el cumplimiento de los requerimientos establecidos en la tabla 221, mencionada en el artículo 220-13, terraplenes según las especificaciones técnicas del Instituto Nacional de Vías en lo referente a límites de consistencia, granulometría e índice de resistencia.

Por otro lado se insta al complemento del estudio realizado, usando otros materiales de que posea condiciones diferentes al presentado en este trabajo, en cuanto a comportamiento cohesivo, pues en este solo se habla de una arcilla de baja plasticidad.

Así como se obtuvieron resultados óptimos de la escoria de alto horno en el mejoramiento de materiales en el área de pavimentos, una nueva línea de investigación puede dirigirse a otras áreas que involucren ensayos en donde se tenga en cuenta la condición de saturación parcial y su comportamiento cuando esta condición aumenta o disminuye.

A pesar de que se encuentran condiciones favorables para el uso de la escoria de alto horno como material modificador de un suelo arcilloso; para que este pueda ser usado como material de terraplén, es conveniente realizar un estudio económico específico para considerar su viabilidad real en términos de costos de adquisición, transporte y otros que no se realizaron en el presente proyecto.

En el presente trajo se evaluó el comportamiento de acuerdo a modificaciones generales con respecto al peso total de la muestra, es conveniente analizar el aporte puntual de la escoria de alto horno cuando se modifica en proporciones con relación a un tamaño único con respecto a un tamiz especifico, de manera similar al estudio que se realizó en la universidad militar mencionado en el marco de referencia.

BIBLIOGRAFÍA

Airey, G., Collop, A., & Thom, N. (2004). Mechanical Performance of asphalt mixtures incorporating slag and glass secondary aggregates. Universidad de Nottingham.

Barra, M., & Vazquez, R. (2001). Reactividad y expansión de las escorias de acería de horno de horno electrico en relacion con sus aplicaciones en la construccion. Materiales de construccion Vol 51 No 263-264, 137-148.

Batic, O., Sota, J., & Falcone , D. (11 y 12 de abril de 2006). lemac.frlp.utn.edu.ar. Obtenido de Influencia de la incorporacion de escoria en las caracteristicas de los cementos resultantes: https://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2011/12/2006_Incorporacion-de-Escorias-en-Cementos_4%C2%B0PROCQMA.pdf

Calleja, J. (1982). Escorias y cementos siderúrgicos. Materiales de construccion No 186, 11-35.

Fernadez Loaiza , C. (1993). Mejoramiento y Estabilización de suelos. Guanajuato, Mexico: Limusa.

Instituto Nacional de Vias. (2013). articulo 220-13.

Instituto Nacional de Vias. (2013). Articulo 230-13 mejormaiento de subrasantes.

Juarez Badillo, E., & Rico, A. (1960). mecanica de suelos, tomo 1 Fundamentos de la mecanica de suelos. Mexico: edicion de la facultad de Ingenieria UNAM de Mexico.

Lambe, T., & Whitman, R. (1979). Mecanica de suelos. Mexico: Limusa-wiley S.A.

Montejo Fonseca, A. (1997). Ingeniería de pavimentos para carreteras. Bogota.

Ortega, V. (1999). Utilización de escoria siderúrgica para construir caminos y estabilizar suelos. Tesis doctoral, Universidad de BUrgos.

Puertas, F. (1993). Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidarulico. Materiales de construccion Vol 43 No 229, 37-48.

Reino, H. G. (2013). Supercem. Experiencia de Holcim (España) con cementos con escoria de alto horno altamente adicionados. Patologia de cimentaciones, estructuras y hormigones, 1-7.

Reyes Ortiz, o., & Camacho Tauta, O. (2003). Efecto del desperdicio de una siderrugica en bases y subbases granulares. Ciencia e ingenieria Neogranadina No 13, 25-30.

Sánchez , H. A. (2014). Estado del arte sobre las escorias negras de horno electrico y su aplicacion en pavimentos. V congreso nacional de ingenieria civil, universidad Santo tomas seccional Tunja, 1-14.

Tamayo, L. (1955). Diseno de la investigacion. Mexico: Limusa.

ANEXOS