

FACTIBILIDAD DEL USO DE POLVILLO DEL ALTO HORNO PARA MEJORAR
MATERIAL TIPO BASE GRANULAR

DIEGO FERNANDO MACÍAS GRANADOS
FRANCISCO JAVIER TORRES GARCÍA

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS
TUNJA
2018

FACTIBILIDAD DEL USO DE POLVILLO DEL ALTO HORNO PARA MEJORAR
MATERIAL TIPO BASE GRANULAR

DIEGO FERNANDO MACÍAS GRANADOS
FRANCISCO JAVIER TORRES GARCÍA

Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO DE TRANSPORTE Y VÍAS

Director
Ing. RICARDO OCHOA DIAZ

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS
TUNJA
2018

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, febrero de 2018.

La autoridad científica de la facultad de ingeniería reside en ella misma, por tanto, no responde por las opiniones expresadas en este proyecto de investigación. Se autoriza su uso y reproducción indicando su origen.

En memoria de Ezequiel Albeiro Rincón Sánchez, el ángel que se nos adelantó en el camino, pero que siempre vivirá en nuestras mentes y corazones.

FRANCISCO JAVIER TORRES GARCÍA

A mis abuelos María Antonia e Ismael, por su amor infinito. Cada triunfo que logre en mi vida siempre será gracias a ustedes.

DIEGO FERNANDO MACÍAS GRANADOS

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la Virgen por ser mi guía y compañía.

A mi familia, mis padres: María Lilia García y Jairo Torres; mis hermanos: Myriam Yaneth Torres García, Lina María Torres García y John Jairo Torres García; mi tía Myriam Janeth García Panche por ser el motor de mi vida y en quienes siempre encuentro apoyo incondicional.

Al ingeniero Ricardo Ochoa Díaz, por el acompañamiento, apoyo, dedicación y compromiso en este proceso.

Al ingeniero Manuel Sierra, por su acompañamiento y dedicación en la realización del proyecto.

A mi amigo Diego Macías, por su compromiso y dedicación en el desarrollo de este proyecto y por su compañía durante este proceso de formación.

A todos mis amigos Team Yakuza (Padri, Cris, Pet, Tommy, Luigi) y demás compañeros que compartieron e hicieron parte de esta importante etapa universitaria.

FRANCISCO JAVIER TORRES GARCÍA

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la Virgen por ser mi guía y compañía.

A mi mamá Yolanda Macías por su apoyo y amor incondicional; a Wilver Pérez por su apoyo; a mis hermanos Sebastián y Laura; a mi tía Himelda por todas sus enseñanzas y especialmente a mis abuelos María Antonia e Ismael por haberme acogido como un hijo y apoyarme incondicionalmente a lo largo de mi vida.

Al ingeniero Ricardo Ochoa Díaz, por el acompañamiento, apoyo, dedicación y compromiso en este proceso.

Al ingeniero Manuel Sierra, por su acompañamiento y dedicación en la realización del proyecto.

A mi compañero y amigo Francisco Torres, por su dedicación y compromiso con el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos de “Los del Sur” por ser parte fundamental de mi vida y estar conmigo en los buenos y malos momentos.

A todos mis amigos Alejandro, David, Javier, Alejandra, Pacho, Yeison, Catherine, Julieth, Cristian, Jonathan, Darío, Carolina, Daniela, Edwin y demás compañeros que compartieron e hicieron parte de esta importante etapa de mi vida.

DIEGO FERNANDO MACÍAS GRANADOS

RESUMEN

En este proyecto de investigación se estudia la factibilidad del uso de polvillo de alto horno para estabilizar bases granulares; el proyecto se encuentra dirigido por el Ingeniero Ricardo Ochoa Díaz, docente de la escuela de Ingeniería de Transporte y Vías de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Para el desarrollo del proyecto se utilizó un agregado proveniente de la cantera San Rafael localizada en la vereda San Isidro del municipio de Cómbita, Boyacá y como estabilizante se usó el polvillo de alto horno proveniente de Acerías Paz del Río S.A., ubicada en el Municipio de Nobsa, Boyacá.

Para caracterizar los materiales, se realizaron los ensayos estipulados en las especificaciones del INVÍAS 2013 y se logró determinar que el agregado no cumplía con los criterios de índice de plasticidad y resistencia (CBR).

Luego se realizaron las mezclas con los diferentes porcentajes de polvillo (2%, 4%, 6%, 8% y 10%); a estas mezclas se les hicieron los ensayos de límites y resistencia (CBR); finalmente se determinó el porcentaje óptimo de polvillo.

Con los resultados obtenidos de las mezclas con los diferentes porcentajes de polvillo, se analizó si el material presentaba alguna mejora en cuanto a resistencia (C BR), expansión y límites. También se realizó la comparación de la mezcla sin polvillo y con polvillo óptimo en el ensayo de estabilidad volumétrica.

Se calcularon los estados tensionales de un modelo estructural, con el fin de comparar el espesor de la capa de base sin estabilizar y la capa de base estabilizada con polvillo.

Por último, se realizó un análisis económico comparando una base sin estabilizar vs una base estabilizada.

Palabras claves: especificaciones de construcción, polvillo de alto horno, base granular, CBR, potencial expansivo.

TABLA DE CONTENIDO

| | pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN | 25 |
| 1. MARCO TEÓRICO | 28 |
| 1.1 PAVIMENTO | 28 |
| 1.1.1 Pavimento Flexible | 28 |
| 1.1.2 Pavimento Rígido | 28 |
| 1.1.3 Pavimento Semirrígido | 28 |
| 1.1.4 Pavimento Articulado | 28 |
| 1.2 CAPAS DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE | 29 |
| 1.2.1 Subrasante | 29 |
| 1.2.2 Subbase | 29 |
| 1.2.3 Base | 29 |
| 1.2.4 Capa Asfáltica | 29 |
| 1.3 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS | 30 |
| 1.3.1 Estabilización mecánica | 30 |
| 1.3.2 Estabilización física. | 30 |
| 1.3.3 Estabilización físico-química | 31 |
| 1.3.4 Estabilización química | 31 |
| 1.4 ALTO HORNO | 31 |
| 1.4.1 Productos obtenidos del alto horno | 31 |
| 1.4.1.1 Humos y gases residuales | 31 |
| 1.4.1.2 Escoria | 32 |
| 1.4.1.3 Arrabio | 32 |
| 1.4.1.4 Lodos | 33 |
| 1.4.1.5 Polvillo | 33 |

| | pág. |
|--|------|
| 1.5 ENSAYO CBR | 33 |
| 1.6 MÓDULO RESILIENTE | 34 |
| 1.6.1 Correlaciones CBR y módulo resiliente | 34 |
| 1.6.1.1 AASHTO 1993 | 34 |
| 1.6.1.2 Shell 1978 | 35 |
| 1.6.1.3 AASHTO ROAD TEST y en la Guía AASHTO-93 | 35 |
| 1.6.1.3 McDowell y Hau 2004 | 36 |
| 1.6.1.4 Programa PAS - Pavement Analysis System de la Asociación de Americana de Pavimentos de Concreto de Estados Unidos. (Subbases y bases granulares) | 36 |
| 1.6.1.5 Ecuación de Barker | 36 |
| 1.7 ENSAYOS CARACTERIZACIÓN BASE GRANULAR | 37 |
| 1.8 PROPIEDADES DE INTERÉS | 37 |
| 1.8.1 Resistencia | 37 |
| 1.8.2 Durabilidad | 37 |
| 1.8.3 Plasticidad | 38 |
| 1.8.4 Estabilidad volumétrica | 38 |
| 1.8.5 Compresibilidad | 39 |
| 1.8.6 Trabajabilidad | 39 |
| 1.8.7 Permanencia de las propiedades adquiridas | 39 |
| 1.9. MECANICA DE PAVIMENTOS. | 39 |
| 1.9.1 Calculo de los valores de servicio | 39 |
| 1.9.2 Calculo de los valores admisibles | 40 |
| 1.9.2.1 Criterio de la Shell determinar la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica. ξ_{radm} | 40 |
| 1.9.2.2 Criterio de la Shell para determinar la deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante, ξ_{zadm} | 41 |

| | pág. |
|--|------|
| 1.9.2.3 Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante, σ_{zadm} . | 41 |
| 1.9.2.4 Deflexión vertical admisible en la superficie, Δ_{adm} | 42 |
| 2. ESTADO DEL ARTE | 43 |
| 2.1 ESTADO DEL ARTE EN EL ÁMBITO INTERNACIONAL | 43 |
| 2.1.1 Estabilización de suelos no aptos con desechos de policloruros de vinilo | 43 |
| 2.1.2 Evaluación de la escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas | 43 |
| 2.1.3 Utilización de escoria siderúrgica para construir caminos y estabilizar suelos | 44 |
| 2.1.4 Análisis geomecánico de escorias de acería, posibilidades de uso en obras viales | 44 |
| 2.1.5. Uso de las escorias obtenidas como sub producto de la elaboración de acero de la planta número 2 de Aceros Arequipa-Pisco para fines de cementación y pavimentación | 45 |
| 2.1.6. Estabilización de suelos con cloruro de sodio (NaCl) para bases y sub bases | 45 |
| 2.1.7. Evaluación experimental del comportamiento de las capas de base de alto rendimiento y de bases de carreteras con escorias de acero de horno de arco eléctrico | 45 |
| 2.1.8. Evaluación de escoria de acero y mezclas de caliza trituradas como material de sub-base en pavimento flexible | 46 |
| 2.1.9. Empleo de agregado siderúrgico (escoria de acería) en base y revestimiento de pavimento en calles de la municipalidad de la ciudad de Río de Janeiro | 46 |
| 2.1.10. Evaluación de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y aplicación en carreteras no pavimentadas | 47 |
| 2.2 ESTADO DEL ARTE EN EL ÁMBITO NACIONAL | 47 |
| 2.2.1 Análisis de uso de lodos de alto horno en el mejoramiento de material granular para pavimentos | 47 |

| | pág. |
|--|------|
| 2.2.2 Análisis del uso de alquitrán de hulla como estabilizante de bases granulares para pavimentos | 47 |
| 2.2.3 Factibilidad del uso de escorias negra, fosfórica y polvillo de alto horno en mezclas asfálticas | 48 |
| 2.2.4 Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco | 48 |
| 2.2.5 Influencia de la inclusión del reciclaje de botellas plásticas como uno de los componentes en la conformación de materiales granulares pétreos para pavimentos | 49 |
| 2.2.6. Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitosos | 49 |
| 2.2.7. Efecto del desperdicio de una siderúrgica en bases y sub-bases granulares | 50 |
| 2.2.8. Caracterización de alquitrán y su aplicación en pavimentos flexibles | 50 |
| 2.2.9. Valoración de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y su uso en vías no pavimentadas | 50 |
| 2.2.10. Reutilización del desecho de PVC como agente estabilizador de sub-bases granulares | 51 |
| 3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL | 56 |
| 3.1 FUENTE DE MATERIALES | 56 |
| 3.1.1 Material Granular | 56 |
| 3.1.2 Polvillo de alto horno | 56 |
| 3.2 ENSAYOS REALIZADOS | 57 |
| 3.2.1 Material Granular. | 57 |
| 3.2.1.1 Granulometría INV E-123-13 | 57 |
| 3.2.1.2 Dureza | 60 |
| 3.2.1.3 Durabilidad | 63 |

| | pág. |
|--|------|
| 3.2.1.4 Limpieza | 65 |
| 3.2.1.5 Gravedad específica de la fracción fina | 69 |
| 3.2.1.6 Geometría de las partículas. | 71 |
| 3.2.1.7 Resistencia del material | 74 |
| 3.2.2 Polvillo de alto horno | 80 |
| 3.2.2.1 Granulometría | 80 |
| 3.2.2.2 Equivalente de arena | 82 |
| 3.2.2.3 Límites de Atterberg | 83 |
| 3.2.2.4 Gravedad específica | 84 |
| 3.2.2.5 Angularidad de la fracción fina | 84 |
| 3.3 RESUMEN CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL | 85 |
| 3.3.1 Material Granular | 85 |
| 3.3.2 Polvillo de alto horno | 86 |
| 4. ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS | 87 |
| 4.1 LÍMITES DE ATTERBERG CON POLVILLO DE ALTO HORNO | 87 |
| 4.1.1 Límite líquido y plástico con 2% de polvillo de alto horno | 88 |
| 4.1.2 Límite líquido y plástico con 4% de polvillo de alto horno | 89 |
| 4.1.3 Límite líquido y plástico con 6%, 8% y 10% de polvillo de alto horno | 90 |
| 4.2 ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN CON POLVILLO DE ALTO HORNO | 90 |
| 4.3 ENSAYO CBR CON POLVILLO DE ALTO HORNO | 91 |
| 4.3.1 CBR con 2% de polvillo de alto horno | 91 |

| | pág. |
|---|------|
| 4.3.2 CBR con 4% de polvillo de alto horno | 95 |
| 4.3.3 CBR con 6% de polvillo de alto horno | 98 |
| 4.3.4 CBR con 8% de polvillo de alto horno | 101 |
| 4.3.5 CBR con 10% de polvillo de alto horno | 105 |
| 4.4 RESUMEN CBR Y EXPANSIONES | 108 |
| 5. DETERMINACIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES POR MEDIO DE CORRELACIONES | 109 |
| 5.1. AASHTO 1993 | 109 |
| 5.2. SHELL 1978 | 109 |
| 5.3. AASHTO ROAD TEST y en la Guía AASHTO-93 | 110 |
| 5.4. MCDOWELL Y HAU 2004 | 110 |
| 5.5. PROGRAMA PAS (PAVEMENT ANALYSIS SYSTEM) DE LA ASOCIACIÓN DE AMERICANA DE PAVIMENTOS DE CONCRETO DE ESTADOS UNIDOS. (SUBBASES Y BASES GRANULARES) | 110 |
| 5.6 ECUACIÓN DE BARKER | 111 |
| 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 112 |
| 6.1 LÍMITES DE ATTERBERG | 112 |
| 6.2 CBR | 113 |
| 6.3 EXPANSIONES | 114 |
| 6.4 ENSAYO ESTABILIDAD HÍDRICA | 114 |
| 7. MECANICA DE PAVIMENTOS | 117 |
| 7.1. CÁLCULO DE ESTRUCTURAS EQUIVALENTES | 117 |
| 7.2 CÁLCULO DE VALORES ADMISIBLES | 117 |

| | pág. |
|---|------|
| 7.3 CÁLCULO DE LOS VALORES DE SERVICIO PARA LA BASE SIN ESTABILIZAR | 119 |
| 7.4 CÁLCULO DE LOS VALORES DE SERVICIO PARA LA BASE ESTABILIZADA | 120 |
| 7.5 CHEQUEO DE LAS ESTRUCTURAS | 121 |
| 8. ANÁLISIS ECONÓMICO | 123 |
| 8.1 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS. | 123 |
| 9. CONCLUSIONES | 126 |
| 10. RECOMENDACIONES | 128 |
| BIBLIOGRAFÍA | 129 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Tipos de estabilización de suelos | 30 |
| Tabla 2. Valores típicos para bases y subbases granulares | 37 |
| Tabla 3. Requisitos de calidad para agregados de bases granulares | 38 |
| Tabla 4. Coeficiente de calage | 40 |
| Tabla 5. Expresiones deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante | 41 |
| Tabla 6. Resumen estado del arte ámbito internacional | 52 |
| Tabla 7. Resumen estado del arte ámbito nacional | 54 |
| Tabla 8. Ensayos para agregados de base granular | 57 |
| Tabla 9. Ensayo de granulometría | 59 |
| Tabla 10. Especificaciones granulométrica base granular BG-38 | 60 |
| Tabla 11. resultados del ensayo de desgaste máquina de Los Ángeles | 61 |
| Tabla 12. Resultados de ensayo de desgaste por degradación en Micro-Deval | 62 |
| Tabla 13. Resultado de ensayo 10% de finos | 63 |
| Tabla 14. Resultado de ensayo de resistencia a los sulfatos de base granular | 64 |
| Tabla 15. Resultado de ensayo de límite líquido con 0% de polvillo de alto horno | 65 |
| Tabla 16. Resultados ensayo de límite plástico | 66 |
| Tabla 17. Resultados de límites de Atterberg con 0% de polvillo de alto horno | 66 |
| Tabla 18. Resultado de ensayo equivalente de arena de base granular | 67 |
| Tabla 19. Resultados del ensayo valor de azul de metileno | 68 |
| Tabla 20. Resultados partículas deleznable para material de base granular | 69 |
| Tabla 21. Resultados de gravedad de finos de base granular | 71 |
| Tabla 22. Índice de alargamiento | 72 |
| Tabla 23. Índice de aplanamiento | 72 |

| | pág. |
|---|------|
| Tabla 24. Resultados de gravedad de la fracción fina | 74 |
| Tabla 25. Métodos de ensayo proctor modificado | 75 |
| Tabla 26. Ensayo de penetración CBR con 0% de polvillo de alto horno | 77 |
| Tabla 27. CBR 0% de polvillo de alto horno por cilindro | 79 |
| Tabla 28. Expansiones CBR 0% de polvillo de alto horno | 80 |
| Tabla 29. Resultados granulometría del polvillo de alto horno | 81 |
| Tabla 30. Resultado de ensayo equivalente de arena para polvillo de alto horno | 83 |
| Tabla 31. Resultado de ensayo límite líquido para polvillo de alto horno | 83 |
| Tabla 32. Resultado de ensayo gravedad específica para polvillo de alto horno | 84 |
| Tabla 33. Angularidad del polvillo de alto horno | 85 |
| Tabla 34. Resumen caracterización material granular | 85 |
| Tabla 35. Resumen caracterización polvillo de alto horno | 86 |
| Tabla 36. Cantidades de material para límites de Atterberg con polvillo de alto horno | 87 |
| Tabla 37. Límite líquido con 2% de polvillo de alto horno | 88 |
| Tabla 38. Límite plástico e índice de plasticidad con 2% de polvillo de alto horno | 88 |
| Tabla 39. Límite líquido con 4% de polvillo de alto horno | 89 |
| Tabla 40. Límite plástico e índice de plasticidad con 4% de polvillo de alto horno | 89 |
| Tabla 41. Cantidades de material para ensayo de CBR con polvillo de alto horno | 91 |
| Tabla 42. Ensayo de penetración CBR con 2% de polvillo de alto horno | 92 |
| Tabla 43. CBR 2% de polvillo de alto horno por cilindro | 94 |
| Tabla 44. Expansiones CBR 2% de polvillo de alto horno | 94 |
| Tabla 45. Ensayo de penetración CBR con 4% de polvillo de alto horno | 95 |
| Tabla 46. CBR 4% de polvillo de alto horno por cilindro | 97 |
| Tabla 47. Expansiones CBR 4% de polvillo de alto horno | 98 |

| | pág. |
|--|------|
| Tabla 48. Ensayo de penetración CBR con 6% de polvillo de alto horno | 98 |
| Tabla 49. CBR 6% de polvillo de alto horno por cilindro | 100 |
| Tabla 50. Expansiones CBR 6% de polvillo de alto horno | 101 |
| Tabla 51. Ensayo de penetración CBR con 8% de polvillo de alto horno | 102 |
| Tabla 52. CBR 8% de polvillo de alto horno por cilindro | 104 |
| Tabla 53. Expansiones CBR 8% de polvillo de alto horno | 104 |
| Tabla 54. Ensayo de penetración CBR con 10% de polvillo de alto horno | 105 |
| Tabla 55. CBR 10% de polvillo de alto horno por cilindro | 107 |
| Tabla 56. Expansiones CBR 10% de polvillo de alto horno | 107 |
| Tabla 57. Resumen valores de CBR variando el % de polvillo de alto horno | 108 |
| Tabla 58. Resumen de expansiones variando el % de polvillo de alto horno | 108 |
| Tabla 59. Módulos resilientes obtenidos por medio de correlaciones | 111 |
| Tabla 60. Límites de Atterberg variando cantidad de polvillo de alto horno | 112 |
| Tabla 61. Ensayo de estabilidad hídrica | 115 |
| Tabla 62. Valores de servicio de la estructura con base granular sin estabilizar | 120 |
| Tabla 63. Valores de servicio de la estructura con base granular estabilizada | 120 |
| Tabla 64. Chequeo de la estructura con base granular sin estabilizar | 121 |
| Tabla 65. Chequeo de la estructura con base granular estabilizada | 122 |
| Tabla 66. Comparación de costos de construcción | 123 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|------|
| Figura 1. Corte típico pavimento flexible | 30 |
| Figura 2. Diagrama de procesamiento del mineral de hierro en Acerías Paz del Río | 32 |
| Figura 3. Cámara triaxial para determinación del módulo resiliente | 35 |
| Figura 4. Localización espacial cantera San Rafael | 56 |
| Figura 5. Lonas de polvillo de alto horno en el laboratorio de pavimentos UPTC | 57 |
| Figura 6. Proceso de cuarteo de la muestra | 57 |
| Figura 7. Tamizadoras mecánicas en el laboratorio de pavimentos UPTC | 58 |
| Figura 8. Franja granulométrica BG-38 | 60 |
| Figura 9. Equipo para ensayo desgaste en máquina de los Ángeles | 61 |
| Figura 10. Preparación de la muestra Micro Deval | 61 |
| Figura 11. Equipo para ensayo desgaste por degradación en Micro-Deval | 61 |
| Figura 12. Equipo 10% de finos | 63 |
| Figura 13. Baño de María | 64 |
| Figura 14. Pesaje de cada una de las fracciones | 64 |
| Figura 15. Ensayo límite líquido | 65 |
| Figura 16. Curva de fluidez | 66 |
| Figura 17. Determinación equivalente de arena | 67 |
| Figura 18. Agitador magnético | 67 |
| Figura 19. Ensayo azul de metileno | 67 |
| Figura 20. Equipo usado para gravedad específica | 69 |

| | pág. |
|---|------|
| Figura 21. Ensayo de alargamiento de las partículas | 71 |
| Figura 22. Soporte de embudo y recipiente cilíndrico | 73 |
| Figura 23. Adición de agua a cada sub-muestra para ensayo modificado de compactación | 75 |
| Figura 24. Curva de compactación proctor modificado | 75 |
| Figura 25. Compactación de la muestra | 76 |
| Figura 26. Especímenes compactados ensayo CBR y toma de lecturas de expansión | 76 |
| Figura 27. Penetración ensayo CBR | 76 |
| Figura 28. Esfuerzo vs penetración a 10 golpes, CBR 0% de polvillo de alto horno | 77 |
| Figura 29. Esfuerzo vs penetración a 25 golpes, CBR 0% de polvillo de alto horno | 78 |
| Figura 30. Esfuerzo vs penetración a 56 golpes, CBR 0% de polvillo de alto horno | 78 |
| Figura 31. CBR con 0% de polvillo de alto horno | 80 |
| Figura 32. Tamizado del polvillo de alto horno | 81 |
| Figura 33. Franja granulométrica del polvillo de alto horno | 82 |
| Figura 34. Ensayo equivalente de arena polvillo de alto horno | 82 |
| Figura 35. Límite líquido para el polvillo de alto horno | 83 |
| Figura 36. Curva de fluidez del polvillo de alto horno | 84 |
| Figura 37. Mezcla de polvillo de alto horno con agregado fino para ensayo de límites de Atterberg | 87 |
| Figura 38. Curva de fluidez con 2% de polvillo de alto horno | 88 |
| Figura 39. Curva de fluidez con 4% de polvillo de alto horno | 89 |

| | pág. |
|--|------|
| Figura 40. Curva de compactación con 10% de polvillo de alto horno | 91 |
| Figura 41. Esfuerzo vs penetración a 10 golpes, CBR 2% de polvillo de alto horno | 92 |
| Figura 42. Esfuerzo vs penetración a 25 golpes, CBR 2% de polvillo de alto horno | 93 |
| Figura 43. Esfuerzo vs penetración a 56 golpes, CBR 2% de polvillo de alto horno | 93 |
| Figura 44. CBR con 2% de polvillo de alto horno | 94 |
| Figura 45. Esfuerzo vs penetración a 10 golpes, CBR 4% de polvillo de alto horno | 95 |
| Figura 46. Esfuerzo vs penetración a 25 golpes, CBR 4% de polvillo de alto horno | 96 |
| Figura 47. Esfuerzo vs penetración a 56 golpes, CBR 4% de polvillo de alto horno | 96 |
| Figura 48. CBR con 4% de polvillo de alto horno | 97 |
| Figura 49. Esfuerzo vs penetración a 10 golpes, CBR 6% de polvillo de alto horno | 99 |
| Figura 50. Esfuerzo vs penetración a 25 golpes, CBR 6% de polvillo de alto horno | 99 |
| Figura 51. Esfuerzo vs penetración a 56 golpes, CBR 6% de polvillo de alto horno | 100 |
| Figura 52. CBR con 6% de polvillo de alto horno | 101 |
| Figura 53. Esfuerzo vs penetración a 10 golpes, CBR 8% de polvillo de alto horno | 102 |
| Figura 54. Esfuerzo vs penetración a 25 golpes, CBR 8% de polvillo de alto horno | 103 |
| Figura 55. Esfuerzo vs penetración a 56 golpes, CBR 8% de polvillo de alto horno | 103 |

| | pág. |
|---|------|
| Figura 56. CBR con 8% de polvillo de alto horno | 104 |
| Figura 57. Esfuerzo vs penetración a 10 golpes, CBR 10% de polvillo de alto horno | 105 |
| Figura 58. Esfuerzo vs penetración a 25 golpes, CBR 10% de polvillo de alto horno | 106 |
| Figura 59. Esfuerzo vs penetración a 56 golpes, CBR 10% de polvillo de alto horno | 106 |
| Figura 60. CBR con 10% de polvillo de alto horno | 107 |
| Figura 61. Variación porcentual límites de Atterberg | 113 |
| Figura 62. CBR vs cantidad de polvillo de alto horno | 113 |
| Figura 63. Expansiones vs % de polvillo de alto horno | 114 |
| Figura 64. Estructura de pavimento con base granular sin estabilizar | 120 |
| Figura 65. Estructura de pavimento con base granular estabilizada | 121 |
| Figura 66. Análisis económico de la base granular sin estabilizar | 124 |
| Figura 67. Análisis económico de la base granular estabilizada | 125 |

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Caracterización del material granular

- A1. Granulometría del material granular
- A2. Desgaste en la máquina de los Ángeles muestra 1
- A3. Desgaste en la máquina de los Ángeles muestra 2
- A4. Desgaste en la máquina de los Ángeles muestra 3
- A5. Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval muestra 1
- A6. Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval muestra 2
- A7. Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval muestra 3
- A8. Determinación del valor del 10% de finos
- A9. Perdidas de solidez en sulfato
- A10. Límite líquido e índice de plasticidad
- A11. Equivalente de arena
- A12. Azul de metileno
- A13. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales
- A14. Índice de aplanamiento
- A15. Índice de alargamiento
- A16. Gravedad específica y absorción agregados finos
- A17. Angularidad de la fracción fina
- A18. Ensayo modificado de compactación
- A19. CBR del material

Anexo B. Caracterización del polvillo de alto horno

- B1. Granulometría
- B2. Límites de consistencia
- B3. Equivalente de arena

B4. Gravedad específica y absorción agregados finos

B5. Angularidad de la fracción fina

Anexo C. Elaboración de las mezclas

C1. Limite liquido e índice de plasticidad con 2% de polvillo de alto horno

C2. Limite liquido e índice de plasticidad con 4% de polvillo de alto horno

C3. Ensayo modificado de compactación con 10% de polvillo de alto horno

C4. CBR con 2% de polvillo de alto horno

C5. CBR con 4% de polvillo de alto horno

C6. CBR con 6% de polvillo de alto horno

C7. CBR con 8% de polvillo de alto horno

C8. CBR con 10% de polvillo de alto horno

Anexo D. Reportes del programa Bisar 3.0

D1. Reporte estructura de pavimento con base sin estabilizar

D2. Reporte estructura de pavimento con base estabilizada

INTRODUCCIÓN

El pavimento es una estructura vial formada por una serie de capas de diferentes propiedades mecánicas. Cada una de estas capas está conformada por materiales y agregados pétreos que deben cumplir las especificaciones de construcción. En algunos casos estos agregados no cumplen con algunas de las especificaciones y es necesario cambiar el material o pensar en mejorar sus propiedades mediante el proceso de estabilización.

En la actualidad, para la ejecución de proyectos de infraestructura vial en Colombia, se encuentran constantemente materiales que no son aptos para el desarrollo de los proyectos y es así como surge la necesidad de explorar nuevas tecnologías.

Por tal razón, el presente proyecto busca determinar la factibilidad del uso de polvillo de alto horno, como alternativa para estabilizar y mejorar las propiedades de bases granulares; el polvillo de alto horno proviene de la producción del acero en la siderúrgica Acerías Paz del Río.

En este trabajo de investigación se presentan los ensayos necesarios para caracterizar el material granular y el polvillo de alto horno de acuerdo con las normas y especificaciones INVIAS-2013, también se presentan los resultados del material estabilizado y sin estabilizar, observando si el uso de polvillo de alto horno mejora las propiedades del material y es factible su utilización.

En el primer capítulo se describen las generalidades y se explican los conceptos básicos que se van a tratar a lo largo del desarrollo de la investigación.

El segundo capítulo hace referencia al estado del arte, donde se presenta una breve compilación de investigaciones realizadas sobre el tema tratado que se han realizado en el ámbito local e internacional.

El tercer capítulo se refiere a la caracterización de los materiales, en este se presenta la descripción de los materiales utilizados, lugar de procedencia y ensayos de laboratorio realizados para la caracterización de estos.

En el cuarto capítulo, se presenta el resumen de los datos obtenidos en la caracterización del agregado, también se muestra el procedimiento de la elaboración de las muestras y presenta la metodología para establecer el porcentaje óptimo de polvillo.

En el quinto capítulo, se presenta la determinación de los módulos resilientes, por medio de correlaciones basadas en los resultados obtenidos en el ensayo de CBR.

En el sexto capítulo, se presenta el análisis de los resultados obtenidos del agregado con los diferentes porcentajes de polvillo, también se presenta una comparación del ensayo de estabilidad hídrica del material sin polvillo y el material con el porcentaje óptimo de polvillo

En el séptimo capítulo, se analizan los estados tensionales de dos modelos estructurales propuestos, haciendo uso de los valores de módulo resiliente de la base estabilizada y sin estabilizar obtenidos en el proyecto de investigación.

En el octavo capítulo, se presenta la comparación de los costos de construir una estructura de pavimento con el material granular para base sin estabilizar y los costos de construcción con el agregado mejorado con polvillo de alto horno.

Para finalizar se presentan las conclusiones a las que se llegaron con el desarrollo de la investigación; así mismo se presentan algunas recomendaciones que pueden llegar a ser de alguna utilidad en el desarrollo de nuevas investigaciones.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 PAVIMENTO

El pavimento es una estructura vial formada por una o varias capas de materiales seleccionados que se construyen técnicamente sobre la subrasante, y es capaz de resistir las cargas impuestas por el tránsito y la acción del medio ambiente, así como transmitir al suelo de apoyo o fundación esfuerzos y deformaciones tolerables, además de proporcionar la circulación de los vehículos con rapidez, comodidad, seguridad y economía¹. Los pavimentos son clasificados en:

1.1.1 Pavimento Flexible. Se denominan pavimentos flexibles todos aquellos que están formados por una capa bituminosa apoyada sobre una o varias capas de gran flexibilidad (base y subbase) que transmiten los esfuerzos al terreno de soporte o fundación mediante un mecanismo de disipación de tensiones, las cuales van disminuyendo con la profundidad².

1.1.2 Pavimento Rígido. Son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto hidráulico de gran rigidez, apoyada sobre la subrasante o una capa de material seleccionado que se denomina subbase del pavimento rígido. Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico, así como su elevado módulo de elasticidad, la distribución de esfuerzos se da en una zona amplia³.

1.1.3 Pavimento Semirrígido. En esencia es un pavimento flexible en el cual a alguna de sus capas se le ha dado una rigidez alta, mediante tratamientos específicos con asfalto, cemento, cal u otros productos. La transmisión de esfuerzos al suelo de soporte o fundación se hace en parte por disipación y otro tanto por repartición, por eso se asume que tienen un comportamiento mixto⁴.

1.1.4 Pavimento Articulado. Es el pavimento por elementos prefabricados (bloques o adoquines) de pequeñas dimensiones, que individualmente son muy rígidos y se asientan sobre una capa de área. Estos van asentados sobre la subbase o directamente sobre la subrasante, dependiendo de la calidad de esta. Transmiten los esfuerzos al suelo mediante un mecanismo de disipación de tensiones⁵.

¹ HIGUERA SANDOVAL, Carlos. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras, Volumen I, p. 14.

² Ibid., p.15.

³ Ibid., p.17.

⁴ Ibid., p.19.

⁵ Ibid., p.19.

1.2 CAPAS DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE

La red vial nacional de Colombia está conformada por 9297.6 km de vía, de los cuales el 74.93% de estos se encuentra pavimentada, donde se encuentra que el tipo de pavimento que más es usado es el flexible⁶. El pavimento flexible se encuentra conformado por las siguientes capas: capa asfáltica, base granular, subbase granular y subrasante.

1.2.1 Subrasante. Superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte o relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado⁷.

1.2.2 Subbase. Es la capa que se encuentra entre la base y la subrasante en un pavimento asfáltico. Debido a que está sometida a menores esfuerzos que la base, su calidad puede ser inferior y generalmente está constituida por materiales locales granulares o marginales. El material que se coloca entre la subrasante y las losas de un pavimento rígido también se denomina subbase. En este caso, debe permitir el drenaje libre o ser altamente resistente a la erosión, con el fin de prevenir el bombeo. En algunas partes, a esta capa la llaman base⁸.

1.2.3 Base. Es la capa que se encuentra bajo la capa de rodadura de un pavimento asfáltico. Debido a su proximidad con la superficie, debe poseer alta resistencia a la deformación, para soportar las altas presiones que recibe. Se construye con materiales granulares procesados o estabilizados y, eventualmente, con algunos materiales marginales⁹.

1.2.4 Capa Asfáltica. Es la parte superior del pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento, es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico dependiendo del tipo de camino que se va a construir¹⁰.

En la figura 1 se presenta la estructura típica de un pavimento flexible.

⁶ INVIAS. Estado de la red vial criterio técnico segundo semestre. Colombia, 2017.

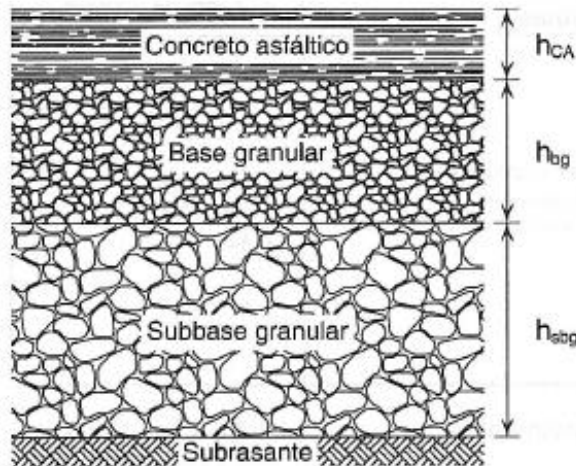
⁷ MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES. Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial. Perú, 2008.

⁸ SANCHEZ SABOGAL, Fernando. Escuela de ingeniería, Módulo 7. Materiales para base y subbase, diapositiva 4.

⁹ Ibid, p. 3.

¹⁰ MOREIRA, Fricson. Apuntes pavimentos. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato, Ambato–Ecuador, 2009. p. 30.

Figura 1. Corte típico pavimento flexible



Fuente: HIGUERA, Carlos. P. 17. Colombia, 2011.

1.3 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

La estabilización de suelos es una serie de procesos en los cuales se busca mejorar las propiedades de los suelos para así obtener un material apto para la utilización en el ámbito de la ingeniería. En la tabla 1 se presentan los 4 tipos de estabilización, así como los efectos que estos ocasionan al ser aplicados al suelo.

Tabla 1. Tipos de estabilización de suelos

| TIPO | ESTABILIZACIÓN | PRODUCE |
|----------------|-------------------------|----------------------------------|
| Mecánica | Proceso de compactación | Densificación |
| Física | Granulométrica | Fricción y cohesión |
| | Suelo betún | Cohesión e impermeabilización |
| Físico-química | Suelo-cal | Intercambio iónico y cementación |
| Química | Suelo-cemento | Intercambio iónico y cementación |

Fuente: DORFMAN, Boris. Estabilización de suelos. Universidad del Cauca. Popayán. 1988.

1.3.1 Estabilización mecánica. Se realiza por medio del proceso de compactación. La compactación mejora las propiedades del suelo y en particular la densificación del suelo, el aumento de resistencia y la capacidad de carga, así mismo ayuda a reducir su compresibilidad y aptitud para absorber agua¹¹.

1.3.2 Estabilización física. Busca aumentar la fricción, la cohesión y la impermeabilidad. Cuando un material se ajusta granulométricamente por medio de adición de material o ajustes a su banda granulométrica, genera en el material resultante mayor fricción entre las partículas y cohesión de la masa del suelo¹².

¹¹ SANDOVAL, Carlos Hernando Higuera; CRISTANCHO, Jenny Carolina Gómez; NARANJO, Óscar Eduardo Pardo. Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. Revista Facultad de Ingeniería, 2013, vol. 21, no 32. p. 21-40.

¹² Ibid., p. 24.

1.3.3 Estabilización físico-química. Se realiza en suelos con gran cantidad de finos plásticos, como limos y arcillas especialmente. Si el suelo es tratado con hidróxido de calcio produce en la masa de suelo resultante un intercambio iónico y cementación. Generalmente, con este tipo de estabilización se busca reducir la plasticidad del suelo, aumentar su resistencia, trabajabilidad y estabilidad volumétrica¹³.

1.3.4 Estabilización química. Se realiza en suelos finos tipo arenas, mediante la adición de un agente hidráulico, como es el caso del cemento Portland, que al mezclarse íntimamente con el suelo y al desarrollar su propiedad hidráulica, produce una reacción química, intercambio iónico y cementación. La resistencia del suelo y su estabilidad aumentan significativamente¹⁴.

Las propiedades del suelo que se busca mejorar con cualquiera de los cuatro métodos mencionados anteriormente son: resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad, estabilidad volumétrica, compresibilidad, trabajabilidad y permanencia de las propiedades adquiridas.

1.4 ALTO HORNO

El horno alto es un reactor vertical que emplea carbono para reducir los óxidos de hierro que se encuentran en la naturaleza. El objetivo del horno alto es producir arrabio, el cual es la materia prima para la producción del acero, de una manera uniforme tanto en composición como en cantidad. El arrabio es hierro líquido con 4-5% C y 0,4-0,8% Si, apto para su transformación posterior en acero. El parámetro operativo más crítico del alto horno es la temperatura de colada, la cual debe ser superior a 1400°C para facilitar la evacuación del arrabio y la escoria, y su posterior tratamiento en la acería.

El alto horno requiere una serie de instalaciones complementarias: tolvas, estufas, tratamiento del gas, inyección de combustibles auxiliares, así como equipos de transporte de arrabio y procesamiento de escoria¹⁵.

1.4.1 Productos obtenidos del alto horno.

1.4.1.1 Humos y gases residuales. Se producen como consecuencia de la combustión del coque y de los gases producidos en la reducción química del mineral de hierro que, en un elevado porcentaje, se recogen en un colector situado en la parte superior del alto horno. Estos gases son, principalmente, dióxido de carbono,

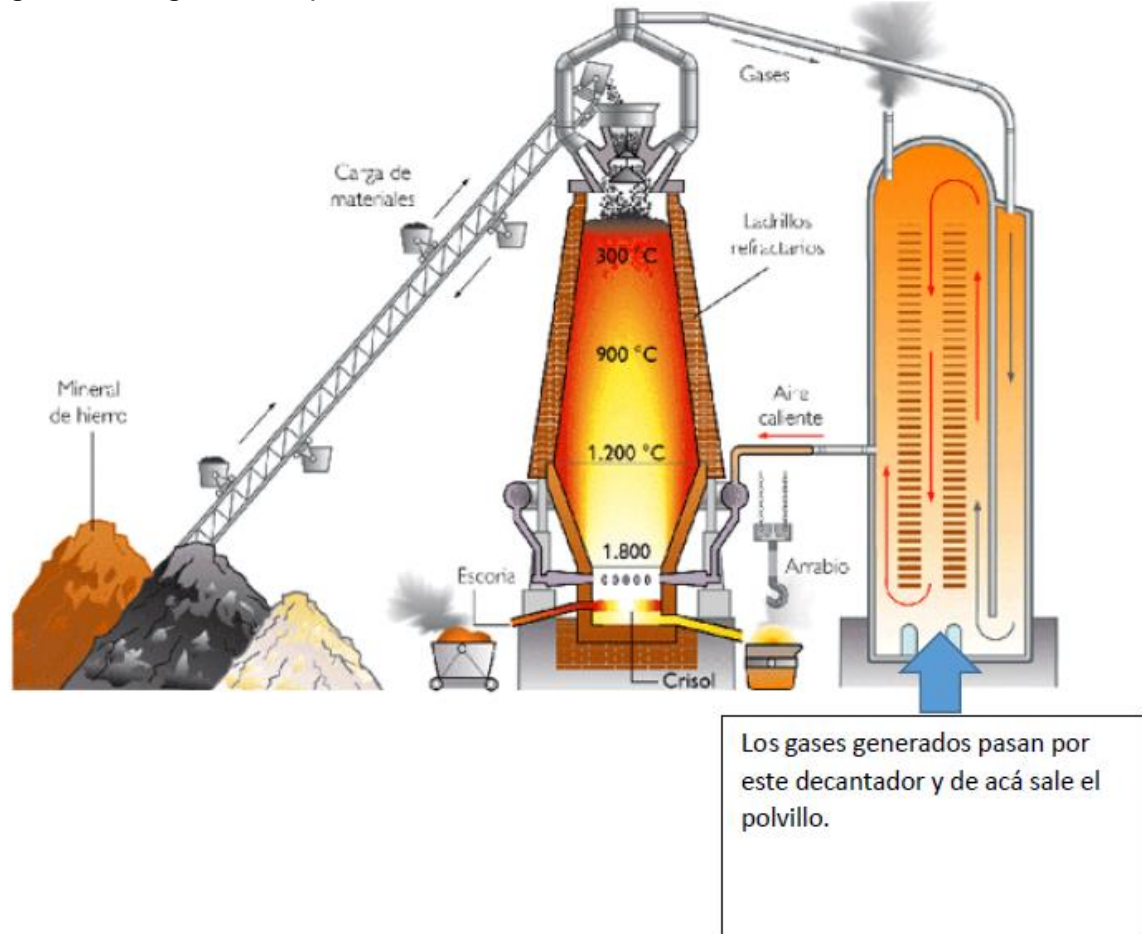
¹³ Ibid., p.24.

¹⁴ Ibid., p.24.

¹⁵ GONZÁLEZ BAQUET, Ignacio. Proceso de alto horno. 2014. p.14.

monóxido de carbono y óxidos de azufre¹⁶.

Figura 2. Diagrama de procesamiento del mineral de hierro en Acerías Paz del Río



Fuente: PASTA, Carlos. Proceso de alto horno, generación del polvillo. 2018.

1.4.1.2 Escoria. Es un residuo metalúrgico que a veces adquiere la categoría de subproducto, ya que se puede utilizar como material de construcción, bloques o como aislante de la humedad y en la fabricación de cemento y vidrio. La escoria, como se comentó anteriormente, se recoge por la parte inferior del alto horno por la piqueta de escoria¹⁷.

1.4.1.3 Arrabio. Producto aprovechable del alto horno y está constituido por hierro con un contenido en carbono. Se presenta en estado líquido a 1800 °C. a este metal se le denomina hierro de primera fusión. A partir de la primera fusión, se obtienen

¹⁶ Ecured. Alto horno. [en línea], 11 de julio de 2011. [revisado 9 Febrero de 2018]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Alto_horno.

¹⁷ Ibid., p. 1.

todos los productos ferrosos restantes: otras fundiciones, hierro dulce, acero¹⁸.

1.4.1.4 Lodos. Procedentes de la depuración por vía húmeda de los gases que pasan al sistema de filtración de la planta de tratamiento de humos, son almacenados en recipientes herméticos especiales. Los lodos de alto horno están compuestos principalmente por hierro (Fe) y óxidos de hierro, además de otros compuestos¹⁹.

1.4.1.5 Polvillo. El polvillo de alto horno son residuos sólidos complejos, que provienen de los sistemas de limpieza de las corrientes gaseosas que se generan durante las operaciones de fusión y afino del acero, alto horno. La química y mineralogía de dichos residuos es variable, y depende, tanto de las condiciones operativas particulares de cada planta siderúrgica, como de las materias primas utilizadas en el proceso. Sin embargo, suelen estar constituidos, fundamentalmente, por partículas discretas de óxidos metálicos simples o complejos. Si bien los componentes mayoritarios del polvillo de alto horno son óxidos de hierro, los mismos se caracterizan por presentar un contenido importante de metales pesados, como Pb, Zn y Cd, lo que los cataloga como residuos peligrosos. El contenido en metales pesados de esta clase de residuos puede resultar particularmente elevado, llegando a rondar un 25 % en peso, en operaciones siderúrgicas basadas, exclusivamente, en fusión de chatarra.

La razón de esto, radica en que la chatarra de acero puede tener múltiples procedencias y, al derivarse de componentes manufacturados desechados, tienden a venir contaminados con metales pesados. Tal es el caso, por ejemplo, de los componentes de acero galvanizado, cuyo contenido en Zn resulta particularmente alto.²⁰

1.5 ENSAYO CBR

La finalidad de este ensayo es determinar la capacidad de soporte (CBR) de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de compactación variables. Es un método desarrollado por la división de carreteras del Estado de California (EE.UU.) y sirve para evaluar la calidad relativa del suelo para subrasante, sub-base y base de pavimentos.

El ensayo mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y

¹⁸ Ibid., p. 2.

¹⁹ ADAME CRUZ, Omar y SANCHEZ AGUILAR, Miguel. Análisis de uso de lodos de alto horno en el mejoramiento de material granular para pavimentos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2016., p.26.

²⁰ CASTELLS, X., Reciclaje de residuos industriales, Ediciones Díaz de Santos, Madrid, 2000., p. 3.

densidad controladas, permitiendo obtener un (%) de la relación de soporte. El (%) CBR, está definido como la fuerza requerida para que un pistón normalizado penetre a una profundidad determinada, expresada en porcentaje de fuerza necesaria para que el pistón penetre a esa misma profundidad y con igual velocidad, en una probeta normalizada constituida por una muestra patrón de material compactado. La ecuación para determinar la relación de soporte es la siguiente:

$$CBR = \frac{\text{Carga unitaria del material de ensayo}}{\text{Carga unitaria muestra patrón}} * 100$$

El valor de CBR se calcula con relación a la carga de dos valores de penetración, para una penetración de 0.1" (2.5 mm) y para una penetración de 0.2" (5 mm); usualmente se adopta el valor de CBR para una penetración de 0.1" que generalmente es el mayor valor; en caso tal que el valor de CBR sea mayor para la penetración de 0.2", es necesario volver a realizar el ensayo. Si en un segundo ensayo se genera nuevamente mayor el valor de CBR mayor para la penetración de 0.2" dicho valor será el aceptado como el valor final del ensayo, es decir la capacidad de soporte del material en estudio²¹.

1.6 MÓDULO RESILIENTE

Es un estimativo del módulo elástico, basado en medidas de esfuerzo y deformación a partir de cargas rápidas repetidas, similares a las que experimentan los materiales del pavimento bajo la acción del tránsito, esta no es una medida de la resistencia, pues el material no se lleva a rotura, sino que retorna a su tamaño y forma originales.

El módulo resiliente de los suelos granulares aumenta con el estado de esfuerzos, debido al aumento de la trabazón entre las partículas individuales (endurecimiento por esfuerzos) y disminuye con el incremento de la humedad del suelo.

1.6.1 Correlaciones CBR y módulo resiliente.

1.6.1.1 AASHTO 1993. La metodología de diseño de pavimentos flexibles de la AASHTO 93 propone la siguiente expresión para estimar el módulo resiliente de una base granular basándose en su valor de CBR.

$$Mr_{BG} = 10^{\left(\frac{0.032 * CBR^{0.32} + 0.977}{0.249}\right)}$$

²¹ SUPO, Quispe; VANESSA, Jessica; PORTUGAL MONTOYA, Álvaro Renato. Diseño de pavimento asfáltico de la vía Paucarpata–Puente de Sabandía. 2015. p. 34.

Donde:

- Mr_{BG} = módulo resiliente de la base granular, lb/pulg².
- CBR = CBR del suelo, %.

Figura 3. Cámara triaxial para determinación del módulo resiliente



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

1.6.1.2 Shell 1978.

$$Mr_{BG} = 0.206(hbg)^{0.45} * Mr_{SBG}$$

Donde:

- Mr_{BG} = módulo resiliente de la base granular, Kg/cm².
- Hbg= espesor base granular, mm.
- Mr_{SBG} = Modulo resiliente subbase granular, Kg/cm².

1.6.1.3 AASHTO ROAD TEST y en la Guía AASHTO-93.

$$Mr = 4326 Ln(CBR) + 241$$

Donde:

- Mr_{BG} = módulo resiliente de la base granular, lb/pulg².
- CBR = CBR del suelo, %.

1.6.1.3 McDowell y Hau 2004.

$$Mr_{BG} = Mrsbg * (8.05 * \log hbg + 0.84 * \log Mrsbg - 2.10 * \log hbg * \log Mrsbg - 2.21)$$

Donde:

- Mr_{BG} = módulo resiliente de la base granular, Kg/cm².
- Hbg= espesor base granular, cm.
- Mr_{SBG} = Modulo resiliente subbase granular, Kg/cm².

1.6.1.4 Programa PAS - Pavement Analysis System de la Asociación de Americana de Pavimentos de Concreto de Estados Unidos. (Subbases y bases granulares).

$$Mrbg = 321.05 * CBR + 13327$$

Donde:

- Mr_{BG} = módulo resiliente de la base granular, lb/pulg².
- CBR = CBR del suelo, %.

1.6.1.5 Ecuación de Barker.

$$Mrbg = Mr_{SBG}(1 + 10.52 * \log hbg - 2.10 * \log Mrsbg * \log hbg)$$

Donde:

- Mr_{BG} = módulo resiliente de la base granular, lb/pulg².
- Hbg= espesor base granular, pulg.
- Mr_{SBG} = Modulo resiliente subbase granular, lb/pulg².

En la tabla 2 se presentan valores típicos calculados para bases y subbases granulares en Colombia.

Tabla 2. Valores típicos para bases y subbases granulares

| Capa | Artículo INVIAS 2013 | CBR (%) | ai/pulg | Módulo resiliente | | | |
|--|----------------------|---------|---------|--------------------|-----|------------------|----------------------|
| | | | | Kg/cm ² | Mpa | N/m ² | Lb/pulg ² |
| Subbase granular, Clase B y C, INVIAS 2013 | 320-13 | 30 | 0.11 | 1061 | 104 | 1.04E+8 | 15157 |
| Subbase granular, Clase A, INVIAS 2013 | 320-13 | 40 | 0.12 | 1147 | 115 | 1.15E+8 | 16775 |
| Base granular, Clase B y C, INVIAS 2013 | 330-13 | 80 | 0.13 | 1954 | 192 | 1.92E+8 | 27911 |
| Base granular, Clase A, INVIAS 2013 | 330-13 | 95 | 0.14 | 2143 | 210 | 2.10E+8 | 30616 |

Fuente: Higuera Sandoval Carlos, presentación de módulos resilientes, 2017.

1.7 ENSAYOS CARACTERIZACIÓN BASE GRANULAR

Los materiales usados para la construcción de una estructura de pavimento deben cumplir con estándares de calidad, estos requisitos son establecidos por la entidad competente, ya sea el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) o el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU).

Los requisitos para base granular se encuentran en la sección 330 de las especificaciones generales de carreteras del INVIAS. En la tabla 3 se presentan los ensayos exigidos para base granular, así como el valor mínimo especificado para cada tipo de base.

1.8 PROPIEDADES DE INTERÉS

En la estabilización de suelos se busca mejorar las propiedades tales como: resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad, estabilidad volumétrica, compresibilidad, trabajabilidad y permanencia de las propiedades adquiridas.²²

1.8.1 Resistencia. La mayoría de métodos de estabilización en la actualidad producen aumentos en la resistencia del material.

1.8.2 Durabilidad. Toda capa estabilizada o no debe ser capaz de soportar los agentes atmosféricos, así como las cargas que le sean impuestas durante el periodo de diseño.

²² HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando. Estabilización de suelos: fundamentos, ajuste granulométrico, estabilización con cal y aditivos químicos. Colombia, 2016. p 1.

Tabla 3. Requisitos de calidad para agregados de bases granulares

| CARACTERÍSTICA | NORMA DE ENSAYO INV | BASE GRANULAR | | | | | |
|--|---------------------|---------------|---------|---------|----|----|----|
| | | CLASE C | CLASE B | CLASE A | | | |
| Dureza (O) | | | | | | | |
| Desgaste en la máquina de los Ángeles (gradación A), máximo % | E-218 | 40 | 40 | 35 | | | |
| - 500 revoluciones | | | | | 8 | 8 | 7 |
| - 100 revoluciones | | | | | | | |
| Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%) | E-238 | - | 30 | 25 | | | |
| Evaluación de la resistencia mecánica por el método del 10% de finos | E-224 | - | 70 | 90 | | | |
| - Valor en seco, mínimo (KN) | | | | | - | 75 | 75 |
| - Relación húmedo/seco, mínimo (%) | | | | | | | |
| Durabilidad (O) | | | | | | | |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) | E-220 | 12 | 12 | 12 | | | |
| - Sulfato de sodio | | | | | 18 | 18 | 18 |
| - Sulfato de magnesio | | | | | | | |
| Limpieza (F) | | | | | | | |
| Limite líquido, máximo (%) | E-125 | 25 | - | - | | | |
| Índice de plasticidad, máximo (%) | E-125 y E-126 | 3 | 0 | 0 | | | |
| Equivalente de arena, mínimo (%) | E-133 | 30 | 30 | 30 | | | |
| Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1) | E-235 | 10 | 10 | 10 | | | |
| Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%) | E-211 | 2 | 2 | 2 | | | |
| Geometría de las partículas (F) | | | | | | | |
| Índices de alargamiento y aplanamiento, máximo (%) | E-230 | 35 | 35 | 35 | | | |
| Caras fracturadas, mínimo (%) | E-227 | 50 | 70 | 100 | | | |
| - Una cara | | | | | - | 50 | 70 |
| - Dos caras | | | | | | | |
| Angularidad de la fracción, mínimo (%) | E-239 | - | 35 | 35 | | | |
| Resistencia del material (F) | | | | | | | |
| CBR (%): porcentaje asociado al grado de compactación mínimo especificado (numeral 350.5.2.2.2); el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de inmersión. | E-148 | ≥80 | ≥80 | ≥95 | | | |

Fuente: INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras, sección 330. 2013

1.8.3 Plasticidad. Los métodos de estabilización comúnmente tienden a reducir la plasticidad del suelo para así tener suelos con una mejor estabilidad volumétrica, los métodos de estabilización más efectivos para esta propiedad son los químicos.

1.8.4 Estabilidad volumétrica. Esta propiedad resulta ser de gran importancia para aquellos suelos que poseen una alta actividad plástica, ya que estos suelos son

potencialmente expansivos, de igual forma que la plasticidad, el mejor método de estabilización para esta es el químico.

1.8.5 Compresibilidad. Prácticamente todos los métodos reducen la compresibilidad del suelo.

1.8.6 Trabajabilidad. El tratamiento de un suelo con un agente estabilizante debe garantizar la trabajabilidad del material, de manera que facilite su aplicación, incorporación, mezclado y control. De esta manera, se garantiza que el agente se incorpora homogéneamente al suelo a tratar y se logre el proceso de estabilización buscado.²³

1.8.7 Permanencia de las propiedades adquiridas. Cualquier método de estabilización deben asegurar que el nuevo comportamiento del suelo permanezca a lo largo del tiempo, por tal motivo es importante experimentar en el laboratorio y posteriormente aplicarlo en campo.

1.9. MECANICA DE PAVIMENTOS

La mecánica de pavimentos es una técnica mediante la cual es posible calcular los estados tensionales (esfuerzos, deformaciones, flexiones y cortantes) de cualquier punto de un modelo estructural. Mediante la aplicación de la mecánica de pavimentos se determinan los valores de servicio a la cual se somete un modelo estructural ante la solicitud de una carga generada por el tránsito.

Haciendo uso de la mecánica de pavimentos es posible calcular y definir los criterios de diseño (fatiga, ahuellamiento y deflexión) de una estructura de pavimento y se constituye como la base para la aplicación y desarrollo del método racional o mecanicista para el diseño y evaluación del comportamiento de un modelo estructural.

1.9.1 Calculo de los valores de servicio. Se define valor de servicio como la magnitud que toan los estados tensionales de un modelo ante la aplicación de las cargas generadas por el transito; también, se define como los valores actuantes en cualquier punto del modelo estructural.

Cuando un modelo estructural no tiene presencia de la carga generada por el tránsito en cualquier punto del modelo se pueden determinar los estados tensionales geostaticos que se generan debido al peso propio de la estructura de pavimento.

Los estados tensionales totales de un modelo estructural son igual a los estados tensionales geostaticos mas los estados tensionales generados por el tránsito.

²³ *Ibíd.*, p. 2.

1.9.2 Cálculo de los valores admisibles. Se define valor admisible como aquel valor máximo que puede soportar los diferentes materiales que integran el modelo estructural antes de la falla y/o fatiga del mismo.

La estructura de pavimento diseñada se debe chequear por medio del método racional, con el propósito de verificar que los esfuerzos, deformaciones y deflexión críticos no superen los valores admisibles²⁴.

1.9.2.1 Criterio de la Shell determinar la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica. $\xi_{r adm}$. La ley de fatiga de la Shell se expresa de la siguiente manera:

$$\xi_{r adm} = (0.856 * Vb + 1.08) * E1^{-0.36} * \left(\frac{N}{K}\right)^{-0.20}$$

Donde:

- ϵ_{radm} = Deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica.
- Vb = Porcentaje en volumen de asfalto de la mezcla, %
- E1 = Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en N/m²
- N = Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.
- K = Coeficiente de Calage.

El modelo de fatiga propuesto por la Shell incorpora el coeficiente de Calage, que relaciona el número de aplicaciones de carga de diseño y el número de aplicaciones de carga en un ensayo dinámico de laboratorio. El factor considera principalmente variaciones laterales de las cargas de tránsito, condiciones de temperatura de trabajo de la mezcla y diferentes estados de tensiones²⁵.

Tabla 4. Coeficiente de calage

| Nivel de confianza, NC% | K |
|-------------------------|------|
| 80 | 2.5 |
| 85 | 2.0 |
| 90 | 1.5 |
| 95 | 1.0 |
| 97.5 | 0.67 |

Fuente: HIGUERA, Carlos. Criterios de diseño de estructuras de pavimentos flexibles. 2015.

²⁴ HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Volumen 2. UPTC. Tunja, 2015. Pág. 35.

²⁵ Ibid., p. 36.

1.9.2.2 Criterio de la Shell para determinar la deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante, ξ_{zadm} . El criterio de la deformación admisible de compresión sobre la subrasante está en función de nivel de confiabilidad y sus expresiones de cálculo para diferentes niveles de confianza son las siguientes:

Tabla 5. Expresiones deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante

| Nivel de confianza | Expresión |
|--------------------|---|
| 50% | $\xi_{z adm} = 2.8 * 10^{-2} * N^{-0.25}$ |
| 85% | $\xi_{z adm} = 2.1 * 10^{-2} * N^{-0.25}$ |
| 95% | $\xi_{z adm} = 1.8 * 10^{-2} * N^{-0.25}$ |

Fuente: elaboración propia.

Donde:

- ε_{zAdm} = Deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante.
- N = Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

1.9.2.3 Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante, σ_{zadm} .

La determinación del esfuerzo admisible de compresión sobre la subrasante se hace según los criterios de Dormon – Kerhoven y de la CRR de Bélgica. Las expresiones de cálculo son las siguientes²⁶:

- DORMON – KERHOVEN

$$\sigma_{z adm} = \frac{0.007 * E_{sub}}{1 + 0.7 * \log N}$$

Donde:

- σ_{zAdm} = Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante, Kg/cm²
- E_{sub} = Módulo resiliente de la subrasante, Kg/cm²
- N = Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.
- CRR de Bélgica.

²⁶ Ibid., p. 37.

$$\sigma_{z \text{ adm}} = \frac{0.9607 * CBR^{1.2}}{N^{0.229}}$$

Donde:

- σ_{zAdm} = Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante, Kg/cm²
- CBR = Capacidad de soporte del suelo de la subrasante, %
- N = Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

1.9.2.4 Deflexión vertical admisible en la superficie, Δ_{adm} . Las medidas de deflexión son un criterio de deformabilidad que permiten evaluar el estado y la capacidad estructural de un pavimento en función del número de aplicaciones de carga que éste es capaz de soportar antes de alcanzar la falla.

La deflexión vertical admisible en la superficie de la estructura de pavimento se calcula con la expresión propuesta por Yang H. Huang²⁷:

$$\Delta_{adm} = 26.32202 * N^{-0.2438}$$

Donde:

- Δ_{adm} = Deflexión admisible de la estructura de referencia, en milímetros.
- N = Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

²⁷ Ibid., p. 37.

2. ESTADO DEL ARTE

Para estabilizar las capas que conforman un pavimento, comúnmente se usan aditivos como el cemento portland, la cal, la ceniza volante y el cloruro de calcio. Se observa que la adición de materiales no convencionales a los agregados destinados a las capas granulares de la estructura de un pavimento suelen aportar características que mejoran sus propiedades mecánicas brindando un comportamiento más eficiente a toda la estructura.

En el ámbito internacional como en el contexto local, se han desarrollado estudios que buscan analizar el uso de residuos industriales que sirvan para mejorar las características mecánicas de las capas que conforman el pavimento. Los estudios son los siguientes:

2.1 ESTADO DEL ARTE EN EL ÁMBITO INTERNACIONAL

2.1.1 Estabilización de suelos no aptos con desechos de policloruros de vinilo.

Es un trabajo de grado que determinó la factibilidad de estabilizar suelos no aptos con desechos de policloruros de vinilo. El objetivo principal fue evaluar las propiedades mecánicas del suelo estabilizado con desecho de policloruro de Vinilo (PVC), para su aplicación en las capas de base y subbase de pavimentos. Se realizó la caracterización de los agregados y se hizo la clasificación del policloruro de vinilo (PVC) a utilizar en el desarrollo de la investigación. Se determinó que el desecho de policloruro de Vinilo como estabilizador de suelos mejora las propiedades mecánicas del material de cantera, también se determinó que el porcentaje más eficiente de desecho de policloruro de Vinilo (PVC), es del 6%²⁸.

2.1.2 Evaluación de la escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas.

Es una investigación que se desarrolló en la Universidad de San Carlos de Guatemala, este trabajo buscaba evaluar el uso de escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas, de acuerdo a procedimientos y especificaciones normalizadas. La escoria utilizada en el desarrollo de la investigación fue proporcionada por la planta de Siderúrgica de Guatemala, (SIDEQUA)²⁹.

En el desarrollo de la investigación se caracterizó la escoria y el agregado tradicional y se evaluaron tres mezclas asfálticas con diferentes combinaciones de escoria y agregado. La mezcla con 0% de escoria se utilizó como parámetro de comparación para conocer las diferencias entre las mezclas con escoria y las que utilizan

²⁸ QUISPE SUPO, Freddy. Estabilización de suelos no aptos con desechos de policloruros de vinilo para uso en la conformación de la capa de base y sub base de pavimentos. Perú. Ingeniería civil. Universidad Nacional del Altiplano-Puno. 2014. p. 1.

²⁹ PÉREZ SIERRA, Edgar Gustavo. Evaluación de la escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas. Trabajo de grado. Guatemala. Ingeniería civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. 2008. p. 1.

agregados tradicionales. Se concluyó que el porcentaje de absorción en la escoria es mayor al de los agregados tradicionales, esto quiere decir que se necesita mayor cantidad de asfalto para la mezcla. También se concluyó que las mezclas con escoria presentan valores más altos de estabilidad en comparación con las mezclas de agregados tradicionales³⁰.

2.1.3 Utilización de escoria siderúrgica para construir caminos y estabilizar suelos. Es un trabajo de investigación realizado en España en el año 2011, esta investigación estudió la posibilidad de aprovechar las escorias blancas y escorias negras de horno eléctrico de arco en la estabilización de suelos arcillosos de mala calidad.

En este proyecto la escoria blanca se utilizó para estabilizar suelos arcillosos y la escoria negra para la construcción de la base granular.

Se determinó que el porcentaje óptimo de contenido de escoria es del 5%, con el uso de la escoria se logró una excelente estabilización de la arcilla, reflejándose en el aumento de la capacidad portante, resistencia a la compresión y reducción de su índice de plasticidad.

Se concluyó que la utilización de estas escorias puede contribuir a la sostenibilidad medioambiental, eliminando acopios de residuos que degradan las zonas productivas y de esta manera se evita la explotación de canteras y recursos naturales³¹.

2.1.4 Análisis geomecánico de escorias de acería, posibilidades de uso en obras viales. Es un artículo de investigación donde se determina la factibilidad de usar escoria de acería en conformación de una sub-base, base granular o carpeta asfáltica.

En el desarrollo de esta investigación, se hizo la caracterización física de los materiales, junto con ello, se realizó una investigación de la composición química del material mediante ensayos de última generación y se estudian las posibles reacciones que ocurrirían in situ.

La investigación determinó que cuando la escoria se pone y se compacta presenta una serie de reacciones de cementación e hidratación que son favorables para las capas de granulares.³²

³⁰ *Ibíd.*, p. 53.

³¹ ORTEGA LÓPEZ, Vanesa. Utilización de escoria siderúrgica para construir caminos y estabilizar suelos. Burgos. España Tesis doctoral. Ingeniera civil. Universidad de Burgos. 2011. p. 13.

³² VALENZUELA, Mario; TOLEDO R. Pedro; HERMOSILLA S, Mauricio. Análisis geomecánico de escorias de acería. Posibilidades de uso en obras viales. Chile. Ingeniería civil y química. Universidad de Concepción., p.1.

2.1.5. Uso de las escorias obtenidas como sub producto de la elaboración de acero de la planta número 2 de Aceros Arequipa-Pisco para fines de cementación y pavimentación. Es un trabajo de investigación realizado en Lima-Perú en el año 2008, esta investigación estudió la posibilidad de usar los sub productos generados por esta planta como agregados para fines de cimentación y pavimentación.

Durante el desarrollo de la investigación se determinaron las propiedades de las escorias, también se determinó cual es el óptimo porcentaje escoria con el cual se obtienen mejores parámetros para fines de cimentación y pavimentación mediante ensayos de granulometría, límites de consistencia, resistencia, equivalente de arena, gravedad específica y corte directo, de manera de poder diseñar estructuras confiables y con el menor costo posible.

De este proyecto se determinó, que las escorias de la elaboración de acero de la planta de Acero Arequipa en pisco son un excelente agregado para fines de Base y Sub. Base cumpliendo con la mayoría de parámetros de las normas ASTM y del manual de diseño AASHTO³³.

2.1.6. Estabilización de suelos con cloruro de sodio (NaCl) para bases y sub bases. Es un trabajo de grado realizado en el 2010, tenía como objetivo desarrollar un método confiable y económico para evitar la pérdida rápida de humedad en los suelos utilizados en bases y subbases, que permita una estabilización adecuada.

En el desarrollo de la investigación los materiales analizados fueron arena limosa color beige (selecto) y arena caliza.

Esta investigación concluyó que las características de compactación de los suelos, la densidad seca máxima aumenta y la humedad óptima de compactación disminuye con cada incremento en porcentaje de cloruro de sodio (NaCl). Las modificaciones en la densidad seca máxima y la humedad óptima se deben al incremento de los cristales de NaCl que se suman a los minerales de los suelos³⁴.

2.1.7. Evaluación experimental del comportamiento de las capas de base de alto rendimiento y de bases de carreteras con escorias de acero de horno de arco eléctrico. Esta investigación realizada en Italia en el 2010, se basa en cuatro diseños de mezcla para asfaltos, de los cuales dos se usaron con 100% de agregados de origen natural y dos usando escoria. Para estas últimas se utilizaron

³³ MARQUINA S, Marcos. Uso de las escorias obtenidas como sub producto de la elaboración de acero de la planta número 2 de Aceros Arequipa-Pisco para fines de cementación y pavimentación. Perú Ingeniería civil. Universidad Ricardo Palma. 2008., p.1.

³⁴ ROLDÁN, Jairo. Estabilización de suelos con cloruro de sodio (NaCl) para bases y sub bases. Guatemala Ingeniería civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. 2010., p.19.

dos tipos diferentes de escoria.

El porcentaje en peso de asfalto para cada una de las dosificaciones se varió desde 4% hasta un máximo de 6% con intervalos de 0.5%, cada una de estas con un total de 4 briquetas.

La investigación determinó que las dos mezclas con escoria de acero obtuvieron mejores resultados en el ensayo Marshall en comparación con las que tenían 100% de agregado tradicional. También se determinó que las briquetas con contenido de escoria obtuvieron resultados satisfactorios en lo que respecta a la resistencia a daños por humedad y deformaciones permanentes³⁵.

2.1.8. Evaluación de escoria de acero y mezclas de caliza trituradas como material de sub-base en pavimento flexible. Este estudio buscaba evaluar el efecto que produce la escoria de acería en las propiedades mecánicas de los pavimentos.

Para el desarrollo de esta investigación se realizaron mezclas con caliza triturada, que es un material que se usa para la conformación de las capas de base y sub-base en los pavimentos en Egipto. Se realizaron algunas pruebas de laboratorio, en las que el pavimento se somete a cargas críticas que reducen la vida útil del mismo.

Esta investigación concluyó, que al adicionar escoria al material de base, aumenta la resistencia del pavimento³⁶.

2.1.9. Empleo de agregado siderúrgico (escoria de acería) en base y revestimiento de pavimento en calles de la municipalidad de la ciudad de Río de Janeiro. Es una investigación realizada en Brasil que buscaba evaluar el uso de escoria de horno de arco eléctrico en construcción, especialmente en pavimentos.

La escoria provenía de la empresa siderúrgica Gerdau Aços Longos S.A., la escoria se sometió a un proceso de separación granulométrica y de curado en patio, con el fin de garantizar su potencial de expansión.

La escoria junto al agregado natural, se utilizó en las capas de base granular y carpeta asfáltica. La escoria presentó buenas características como coeficiente de desgaste inferior al 20% y un índice CBR superior al 100%³⁷.

³⁵ PASETTO, Marco y BALDO, Nicola. Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. Italia. Universidad de Padua. 2010., p.3.

³⁶ EBRAHIM, Ahmed Y BEHIRY, El-Maaty. Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement. Egipto. Minufiya. 2012., p.4.

³⁷ MACHADO, F, et al. Empleo de agregado siderúrgico (escoria de acería) en base y revestimiento de pavimento en calles de la municipalidad de la ciudad de Río de Janeiro. Brasil. Universidad de Bello Horizonte.2009., p. 9.

2.1.10. Evaluación de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y aplicación en carreteras no pavimentadas. Es un trabajo de grado desarrollado en Perú en el año 2016, el objetivo de este proyecto era evaluar la aplicación de las cenizas de carbón (vegetal) para estabilizar suelos mediante activación alcalina en carreteras no pavimentadas.

Para el desarrollo del proyecto, por medio de ensayos se determinaron las propiedades mecánicas y químicas del suelo a estabilizar, también se determinaron las características físicas y químicas de las cenizas de carbón.

La investigación concluyó, que al tratar suelos arcillosos y arenosos con cenizas de carbón, estos mejoran las características de resistencia, esto debido al alto contenido de óxido de silicio (CaO) que están asociados a la producción de cerámicos que poseen porcentajes de formas cementantes y favorecen a la estabilización³⁸.

2.2 ESTADO DEL ARTE EN EL ÁMBITO NACIONAL

2.2.1 Análisis de uso de lodos de alto horno en el mejoramiento de material granular para pavimentos. Es un trabajo de grado dirigido por el Ingeniero Ricardo Ochoa Díaz, desarrollado por Omar Adame y Miguel Sánchez, realizado en el año 2016, en el cual se analizó de uso de lodos de alto horno en el mejoramiento de material granular para pavimentos.

Se realizó la caracterización de los materiales, donde la base granular no cumplió con el índice de plasticidad, también se hizo la caracterización del lodo de alto horno y se estableció que el material no presenta límites de Atterberg, ya que al entrar en contacto con el agua se modifica su textura.

En esta investigación se determinó que el material de lodo de alto horno contribuye en la reducción de la expansión de los suelos, alcanzando una reducción en la expansión de 0.8% para el material de base granular³⁹.

2.2.2 Análisis del uso de alquitrán de hulla como estabilizante de bases granulares para pavimentos. Es un trabajo de grado dirigido por el Ingeniero Ricardo Ochoa Díaz, desarrollado por Adriana Montañez y Cristian Cuentas, realizado en el año 2014, en el cual se analizó del uso de alquitrán de hulla como estabilizante de bases granulares para pavimentos.

³⁸ Cubas Benavides, Kevin y Falen Chávez Arroyo, José Carlos. Evaluación de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y aplicación en carreteras no pavimentadas. Perú. Universidad Señor de Sipan. 2016., p.1.

³⁹ ADAME CRUZ, Omar y SANCHEZ AGUILAR, Miguel. Análisis de uso de lodos de alto horno en el mejoramiento de material granular para pavimentos. Tesis de grado Ingeniero(a) de Transporte y Vías. Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2016., p.2.

En este proyecto se utilizó un agregado proveniente de la firma Solarte y Solarte, para evaluar las características del material se realizaron los ensayos de caracterización estipulados en las normas INVÍAS 2013 e IDU 2005, el agregado no cumplió con algunas de las especificaciones mínimas para ser usado en la construcción de una base granular, por lo cual se buscó estabilizarlo con alquitrán de hulla proveniente del municipio de Belencito.

Al realizar la variación porcentual del alquitrán se estableció que el valor óptimo es del 3%, se determinó que al estabilizar el material con alquitrán de huella se logra reducir la expansión de este en un 80%. También se determinó que al usar el alquitrán de hulla como estabilizante se mejora la resistencia del material en un 33%⁴⁰.

2.2.3 Factibilidad del uso de escorias negra, fosfórica y polvillo de alto horno en mezclas asfálticas. Es un trabajo de grado dirigido por el Ingeniero Ricardo Ochoa Díaz, desarrollado por Mayerli Silva y Sergio Vega, realizado en el año 2017, en el cual se analizó el uso de escorias negra, fosfórica y polvillo de alto horno en mezclas asfálticas.

Para este estudio se diseñaron las mezclas asfálticas, según las normas colombianas (INVÍAS, 2013) para una mezcla densa en caliente (MDC-19) mediante el método RAMCODES. Se hizo una comparación entre mezclas sin adición de escoria y mezclas con adición de escoria al 100% de la mezcla, así mismo se determinó el porcentaje óptimo de asfalto que optimizó las características mecánicas de la mezcla.

Con el desarrollo de este proyecto se concluyó que las mezclas diseñadas a partir de materiales siderúrgicos (escoria negra, escoria fosfórica y polvillo de alto horno) son aceptadas para su utilización en niveles de tránsito alto ya que cumplen las exigencias establecidas en las especificaciones de construcción INVÍAS-2013. Otra conclusión es que la escoria negra, fosfórica y polvillo de alto horno son materiales que pueden ser sustituidos por agregados gruesos y finos tradicionales de una mezcla asfáltica NT3⁴¹.

2.2.4 Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco. Este proyecto buscaba analizar la valorización de las escorias negras como material agregado en mezclas de concreto. En el desarrollo de la investigación se definieron las condiciones y proporciones de las escorias negras como material agregado para

⁴⁰ MONTAÑEZ SÁENZ, Adriana y CUENTAS PERALTA, Cristian. Análisis del uso de alquitrán de hulla como estabilizante de bases granulares para pavimentos. Tesis de grado Ingeniero(a) de Transporte y Vías. Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2015., p.2

⁴¹ SILVA, Mayerli y VEGA, Sergio. Factibilidad del uso de escorias negra, fosfórica y polvillo de alto horno en mezclas asfálticas. Tesis de grado Ingeniero(a) de Transporte y Vías. Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2017. p.2.

mezclas de concreto. También se estableció la viabilidad técnica del aprovechamiento de las escorias negras.

Se concluyó que el uso de las escorias negras como agregado grueso dentro de la mezcla de concreto, le otorga al material endurecido propiedades mecánicas. También que la valorización de las escorias negras como agregado para concreto es una alternativa viable desde el punto de vista técnico ya que la Siderúrgica Diaco cuenta con los recursos técnicos y humanos necesarios para el procesamiento de las escorias negras⁴².

2.2.5 Influencia de la inclusión del reciclaje de botellas plásticas como uno de los componentes en la conformación de materiales granulares pétreos para pavimentos. Es un artículo de investigación que para su desarrollo utilizó desecho de botellas plásticas como material de adición, para modificar el comportamiento de una base y una subbase granular.

El estudio se centró en la propiedad de resistencia del material granular, con muestras en estado natural y muestras estabilizadas. Mediante los ensayos de proctor y CBR se comparó el comportamiento del material natural y el mezclado.

Los resultados de la investigación muestran que el CBR de una mezcla de materiales granulares, base y sub base, con material de desecho, presenta un incremento notable. Además, la mezcla modificada, cambia el peso unitario del material, obteniéndose una mezcla con mayor resistencia y menor peso⁴³.

2.2.6. Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitosos. Es un trabajo de grado dirigido por el Ingeniero José Rodrigo Alarcón Dallos, desarrollado por Manuel Antonio Jiménez Caro y Richard Andrés Benítez Galindo, realizado en el año 2011, esta investigación se desarrolla como un estudio para la posible utilización de este residuo de la extracción del petróleo, en el mejoramiento de capas de material granular y subrasante, teniendo como principal objetivo determinar la viabilidad técnica y económica de implementar este tipo de estabilización.

Durante el desarrollo del proyecto se determinó que el material granular en estudio tiene deficiencias en los requisitos de limpieza exigidos para material de afirmado, caracterizado el material se procedió a realizar mezclas de material granular con

⁴² PARRA, Lina María y SANCHEZ, Diana Pilar. Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica DIACO. Proyecto de investigación. Bogotá D.C. Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Universidad de la Salle. 2010. p.9.

⁴³ PINZÓN CORTÉS, Eduardo; MORA ARCINIEGAS, Luis Carlos; MENDIETA SALINAS, Yamid. Influencia de la inclusión del reciclaje de botellas plásticas como uno de los componentes en la conformación de materiales granulares pétreos para pavimentos. Colombia. Ingeniería civil. Universidad del Cauca. 2016. p.1.

lodo aceitoso, para evaluar la resistencia que diferentes porcentajes de estabilizante le aportan al material.

Con esta investigación se concluyó que se determinó que el porcentaje óptimo de lodo aceitoso para estabilizar el material granular es de 6%, encontrándose para este porcentaje de lodo un aumento en el módulo resiliente de aproximadamente el 50% con relación al módulo resiliente determinado para el material granular sin estabilizar. Lo anterior tomando los valores de módulo calculados para los 7 días de curado de las probetas⁴⁴.

2.2.7. Efecto del desperdicio de una siderúrgica en bases y sub-bases granulares. Es un estudio realizado por los ingenieros Oscar J Reyes Ortiz y Javier Fernando Camacho pertenecientes al grupo de investigación de geotecnia de la Universidad Militar Nueva Granada. El estudio tenía como finalidad determinar la viabilidad del empleo del desperdicio de alto horno generada por la siderúrgica de Boyacá en la mejora de las propiedades mecánicas de las bases y sub-bases granulares empleadas para la construcción de una estructura de pavimentos.

Dicho estudio se realizó utilizando escoria de alto horno de la siderúrgica del departamento de Boyacá. Este estudio determinó que al introducir desperdicio de alto horno, se incrementó la densidad seca y la resistencia de las bases y sub-bases⁴⁵.

2.2.8. Caracterización de alquitrán y su aplicación en pavimentos flexibles. Es un proyecto de grado desarrollado por los estudiantes Florelba Castro Moreno y Mary Estela Guerrero de la escuela de Ingeniería de Transporte y Vías. El objetivo de este proyecto era hacer una revisión bibliográfica de lo relacionado con el alquitrán, su obtención, clases, usos, propiedades y diferencias de este con otros ligantes bituminosos. Con el desarrollo de esta investigación se concluyó que el alquitrán tiene buena viabilidad económica en el diseño de imprimaciones sobre una base⁴⁶.

2.2.9. Valoración de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y su uso en vías no pavimentadas. Es un proyecto de grado que tenía como objetivo evaluar el efecto del método de curado en el comportamiento mecánico de mezclas de suelo adicionadas con ceniza de

⁴⁴ JIMENEZ CARO, Manuel y BENITEZ GALINDO, Richard. Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitosos. Tesis de grado Ingeniero(a) de Transporte y Vías. Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2017. p.2.

⁴⁵ REYES, Oscar y CAMACHO, Javier. Efecto del desperdicio de una siderúrgica en bases y sub-bases granulares. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada., p.1.

⁴⁶ CASTRO MORENO, Florelbar y GUERRERO, Mary Estela. Caracterización de alquitrán y su aplicación en pavimentos flexibles. Tesis de grado Ingeniero(a) de Transporte y Vías. Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. p.12.

carbón y activadas alcalinamente; con el fin de determinar las mejores condiciones para su uso en vías no pavimentadas.

Para el desarrollo de proyecto se analizó el efecto que tiene una ceniza de carbón activada alcalinamente en diferentes tipos de suelos mediante el ensayo de resistencia a la compresión no confinada. Los diferentes tipos de suelo fueron adicionados con ceniza de carbón en porcentajes de 7%, 14% y 21%, fallados y curados a la edad de 7 días.

Esta investigación concluyó que la ceniza de carbón para mezclarse con los suelos de arenilla, arcilla y Urrao debe ser tamizada por malla N°100 o mayor y usar hidróxido de sodio en solución como activador alcalino a una concentración cercana a 8 MOLAR para obtener un material cementante con características comparables con la norma INVIAS Artículo - 350.4.1. También que las mezclas de Arcilla con cenizas de carbón con concentraciones de NaOH de 3.5 M obtuvieron las mejores condiciones a una humedad mayor al 95% cuando se someten a una temperatura entre 40°C y 50°C, llegando al orden de 270 kPa⁴⁷.

2.2.10. Reutilización del desecho de PVC como agente estabilizador de sub-bases granulares. Es un proyecto de tesis que buscaba un proceso metodológico para lograr la estabilización de sub-bases granulares utilizando el PVC reciclado en porcentajes como agente estabilizador.

Para el desarrollo del proyecto se determinaron las propiedades del material granular de sub-base, también se analizó la capacidad portante del material granular de sub-base y se comparó con la capacidad portante de la mezcla de sub-base granular y material reciclado de PVC.

Con el desarrollo de esta investigación se concluyó, que al incluir es desecho de PVC se cataloga como un producto resistente que no se ve afectado por humus, líquidos corrosivos, soluciones ácidas, soluciones básicas, soluciones salinas, solventes y productos químicos; además, es resistente a las agresiones producidas por el ambiente, a diferencia de otros estabilizadores la impermeabilidad del PVC es una ventaja ya que en nuestra Sub-base no se presentaran infiltraciones ni absorción de humedad y de llegar a presentarse, el tiempo necesario para que esta sea evacuada será muy corto⁴⁸.

⁴⁷ ZULUAGA, Daniel Morales. Valoración de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y su uso den vías no pavimentadas. Bogotá. Universidad de Medellín. 2015., p.2.

⁴⁸ BLANCO DIAZ, Tatiana, BRANGO NEGRETE, Yiseth Paola y RIVERA GONZALEZ, José. Reutilización del desecho de PVC como agente estabilizador de sub-bases granulares. Barranquilla. Universidad de la Costa. 2012., p.1.

Del material polvillo de alto horno no se encontraron referencias, esto debido que la utilización de este material hasta ahora se está investigando en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

2.2.11. Análisis del uso del alquitrán de hulla como estabilizante de subbases granulares. Es un trabajo de grado dirigido por el Ingeniero Miguel Ángel Romero Farfán, desarrollado por Hander Esleyder Murillo y Fausto Andrés Trujillo, realizado en el año 2014, en el cual se analizó el uso de alquitrán de hulla como estabilizante de subbases granulares para pavimentos.

Para el desarrollo del proyecto se utilizó alquitrán de hulla proveniente de la siderúrgica Acerías Paz del Río, se diseñaron y elaboraron mezclas de subbase con diferentes porcentajes de alquitrán (3%, 5%, 7% y 9%), a las cuales se les determinó el CBR, para poder compararlo con el valor de CBR inalterado.⁴⁹

Se concluyó que el porcentaje óptimo de alquitrán de hulla es del 6,5%, al evaluar la mezcla con el porcentaje óptimo de polvillo la resistencia aumenta en un 3%.⁵⁰

En la tabla 6 y tabla 7 se presenta el resumen de las referencias teóricas a nivel internacional y nacional respectivamente.

Tabla 6. Resumen estado del arte ámbito internacional

| Titulo | Objetivo | Conclusión |
|---|---|---|
| Estabilización de suelos no aptos con desechos de policloruros de vinilo | Evaluar las propiedades mecánicas del suelo estabilizado con desecho de policloruro de Vinilo | Se determinó que el desecho de policloruro de Vinilo como estabilizador de suelos mejora las propiedades mecánicas del material de cantera |
| Evaluación de la escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas. | Evaluar el uso de escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas | Se concluyó que las mezclas con escoria presentan valores más altos de estabilidad en comparación con las mezclas de agregados tradicionales |
| Utilización de escoria siderúrgica para construir caminos y estabilizar suelos. | Aprovechar las escorias blancas y escorias negras de horno eléctrico de arco en la estabilización de suelos arcillosos de mala calidad. | Se concluyó que la utilización de estas escorias puede contribuir a la sostenibilidad medioambiental, eliminando acopios de residuos que degradan las zonas productivas y de esta manera se evita la explotación de canteras y recursos naturales |

⁴⁹ MURILLO VEGA, Hander Esleyder y TRUJILLO PINTO, Fausto. Análisis del uso de alquitrán de hulla como estabilizante de subbases granulares. Tesis de grado Ingeniero(a) de Transporte y Vías. Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2015., p.8

⁵⁰ Ibid., p. 102.

| | | |
|--|---|--|
| Análisis geomecánico de escorias de acería, posibilidades de uso en obras viales | Determinar la factibilidad de usar escoria de acería en conformación de una sub-base, base granular o carpeta asfáltica. | Cuando la escoria se pone y se compacta presenta una serie de reacciones de cementación e hidratación que son favorables para las capas de granulares. |
| Uso de las escorias obtenidas como sub producto de la elaboración de acero para fines de cementación y pavimentación | Usar los sub productos generados por esta planta como agregados para fines de cimentación y pavimentación. | Las escorias de la elaboración de acero de la planta de Acero Arequipa en pisco son un excelente agregado para fines de Base y Sub. Base |
| Estabilización de suelos con cloruro de sodio (NaCl) para bases y sub bases. | Desarrollar un método confiable y económico para evitar la pérdida rápida de humedad en los suelos utilizados en bases y sub-bases | Las características de compactación de los suelos, la densidad seca máxima aumenta y la humedad óptima de compactación disminuye con cada incremento en porcentaje de cloruro de sodio (NaCl). |
| Evaluación experimental del comportamiento de las capas de base de alto rendimiento y de bases de carreteras con escorias de acero de horno de arco eléctrico. | Evaluar el comportamiento de las capas de base de alto rendimiento y de bases de carreteras con escorias de acero de horno de arco eléctrico. | Se determinó que las briquetas con contenido de escoria obtuvieron resultados satisfactorios en lo que respecta a la resistencia a daños por humedad y deformaciones permanentes |
| Evaluación de escoria de acero y mezclas de caliza trituradas como material de sub-base en pavimento flexible. | Evaluar el efecto que produce la escoria de acería en las propiedades mecánicas de los pavimentos. | Esta investigación concluyó, que al adicionarle escoria al material de base, aumenta la resistencia del pavimento |
| Empleo de agregado siderúrgico (escoria de acería) en base y revestimiento de pavimento en calles de la municipalidad de la ciudad de Río de Janeiro. | Evaluar el uso de escoria de horno de arco eléctrico en construcción, especialmente en pavimentos | La escoria presentó buenas características como coeficiente de desgaste inferior al 20% y un índice CBR superior al 100%. |
| Evaluación de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y aplicación en carreteras no pavimentadas. | Evaluar la aplicación de las cenizas de carbón (vegetal) para estabilizar suelos mediante activación alcalina en carreteras no pavimentadas. | Al tratar suelos arcillosos y arenosos con cenizas de carbón, estos mejoran las características de resistencia, esto debido al alto contenido de óxido de silicio (CaO) |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Resumen estado del arte ámbito nacional

| Titulo | Objetivo | Conclusión |
|---|--|---|
| Análisis de uso de lodos de alto horno en el mejoramiento de material granular para pavimentos | Analizar el uso de lodos de alto horno en el mejoramiento de material granular para pavimentos | Se determinó que el material de lodo de alto horno contribuye en la reducción de la expansión de los suelos, alcanzando una reducción en la expansión de 0.8% para el material de base granular |
| Análisis del uso de alquitrán de hulla como estabilizante de bases granulares para pavimentos. | Analizar el uso de alquitrán de hulla como estabilizante de bases granulares para pavimentos. | Se determinó que al estabilizar el material con alquitrán de huella se logra reducir la expansión de este en un 80%. También se determinó que al usar el alquitrán de hulla como estabilizante se mejora la resistencia del material en un 33% . |
| Factibilidad del uso de escorias negra, fosfórica y polvillo de alto horno en mezclas asfálticas. | Analizar el uso de escorias negra, fosfórica y polvillo de alto horno en mezclas asfálticas | Las mezclas diseñadas a partir de materiales siderúrgicos (escoria negra, escoria fosfórica y polvillo de alto horno) son aceptadas para su utilización en niveles de tránsito |
| Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco. | Analizar la valorización de las escorias negras como material agregado en mezclas de concreto | Se concluyó que el uso de las escorias negras como agregado grueso dentro de la mezcla de concreto, le otorga al material endurecido propiedades mecánicas |
| Influencia de la inclusión del reciclaje de botellas plásticas como uno de los componentes en la conformación de materiales granulares pétreos para pavimentos. | Utilizar desecho de botellas plásticas como material de adición, para modificar el comportamiento de una base y una sub base granular. | Los resultados de la investigación muestran que el CBR de una mezcla de materiales granulares, base y sub base, con material de desecho, presenta un incremento notable. |
| Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitosos. | utilizar el residuo de la extracción del petróleo, en el mejoramiento de capas de material granular y subrasante, | Con esta investigación se concluyó que se determinó que el porcentaje óptimo de lodo aceitoso para estabilizar el material granular es de 6%, encontrándose para este porcentaje de lodo un aumento en el módulo resiliente de aproximadamente el 50% con relación al módulo resiliente determinado para el material granular sin estabilizar |
| | | |

| | | |
|--|--|--|
| Efecto del desperdicio de una siderúrgica en bases y sub-bases granulares | Determinar la viabilidad del empleo del desperdicio de alto horno generada por la siderúrgica de Boyacá en la mejora de las propiedades mecánicas de las bases y sub-bases | Este estudio determino que al introducir desperdicio de alto horno, se incrementó la densidad seca y la resistencia de las bases y sub-bases |
| Caracterización de alquitrán y su aplicación en pavimentos flexibles. | Hacer una revisión bibliográfica de lo relacionado con el alquitrán, su obtención, clases, usos, propiedades y diferencias de este con otros ligantes bituminosos | Se concluyó que el alquitrán tiene buena viabilidad económica en el diseño de imprimaciones sobre una base |
| Valoración de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y su uso en vías no pavimentadas | Evaluar el efecto del método de curado en el comportamiento mecánico de mezclas de suelo adicionadas con ceniza de carbón | Las mezclas de Arcilla con cenizas de carbón con concentraciones de NaOH de 3.5 M obtuvieron las mejores condiciones a una humedad mayor al 95% cuando se someten a una temperatura entre 40°C y 50°C, llegando al orden de 270 kPa. |
| Reutilización del desecho de PVC como agente estabilizador de sub-bases granulares. | Realizar un proceso metodológico para lograr la estabilización de sub-bases granulares utilizando el PVC reciclado en porcentajes como agente estabilizador. | Al incluir desecho de PVC se cataloga como un producto resistente que no se ve afectado por humus, líquidos corrosivos, soluciones ácidas, soluciones básicas, soluciones salinas, solventes y productos químicos |
| Análisis del uso del alquitrán de hulla como estabilizante de subbases granulares. | Analizar del uso del alquitrán de hulla como estabilizante de subbases granulares. | El porcentaje óptimo de alquitrán de hulla es del 6,5%, al evaluar la mezcla con el porcentaje óptimo de polvillo la resistencia aumenta en un 3%. [1] |

Fuente: elaboración propia.

3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Con el propósito de cumplir el objetivo final establecido para la investigación es necesario realizar la caracterización tanto del material granular como del polvillo de alto horno, para finalmente comparar los resultados obtenidos con las especificaciones de calidad del INVIAS y así verificar la idoneidad de los materiales.

3.1 FUENTE DE MATERIALES

3.1.1 Material Granular. El agregado usado para el desarrollo de la investigación proviene de la cantera San Rafael localizada en la vereda san isidro del municipio de Cóbbita con coordenadas geográficas $5^{\circ}38'55.77''\text{N}-73^{\circ}20'12.02''$, donde se solicitaron aproximadamente 400 kg de material tipo base granular y fueron trasladados al laboratorio de pavimentos de la UPTC, para así poder iniciar la caracterización de este.

Figura 4. Localización espacial cantera San Rafael



Fuente: elaboración propia.

3.1.2 Polvillo de alto horno. El polvillo de alto horno fue suministrado por la empresa siderúrgica Acerías paz del río localizada en el municipio de Nobsa; el material se encuentra en el laboratorio de pavimentos de la UPTC de donde fue tomado para realizar la caracterización y los posteriores ensayos en los que se requería.

Figura 5. Lonas de polvillo de alto horno en el laboratorio de pavimentos UPTC



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

3.2 ENSAYOS REALIZADOS

En esta etapa se tiene como finalidad conocer las características físicas y mecánicas de los materiales que se emplearon para el desarrollo del proyecto.

Los ensayos realizados se presentan en la tabla 8.

3.2.1 Material Granular.

3.2.1.1 Granulometría INV E-123-13. Con este ensayo se determina de manera cuantitativa la gradación de las partículas del material utilizado. La serie de tamices usada fue seleccionada de acuerdo a la tabla 330-3 de las especificaciones de construcción del INVIAS para bases granulares; para así poder verificar si esta gradación se ajusta a una de las curvas granulométricas.

Figura 6. Proceso de cuarteo de la muestra



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

Tabla 8. Ensayos para agregados de base granular

| DUREZA | |
|---|--------------|
| Desgaste en la máquina de los Ángeles (gradación A) | INV-E-218-13 |
| Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval | INV-E-238-13 |
| Evaluación de la resistencia mecánica por el método de 10% de finos | INV-E-224-13 |
| DURABILIDAD | |
| Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos | INV-E-220-13 |
| LIMPIEZA | |
| Limite liquido | INV-E-125-13 |
| Índice de plasticidad | INV-E-126-13 |
| Equivalente de arena de suelos y agregados finos | INV-E-133-13 |
| Valor de azul de metileno | INV-E-235-13 |
| Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales | INV-E-211-13 |
| GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS | |
| Índice de alargamiento y aplanamiento | INV-E-230-13 |
| Caras fracturadas | INV-E-227-13 |
| Angularidad de la fracción fina | INV-E-239-13 |
| RESISTENCIA EL MATERIAL | |
| CBR (%) | INV-E-148-13 |
| OTROS | |
| Granulometría | INV-E-123-13 |
| Módulo resiliente de suelos | INV-E-156-13 |

Fuente: elaboración propia basado en especificaciones de construcción de carreteras INVIAS 2013.

Figura 7. Tamizadoras mecánicas en el laboratorio de pavimentos UPTC.



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC

El porcentaje de peso retenido en cada tamiz se calcula usando la siguiente expresión:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso retenido en cada tamiz}}{\text{Peso total}} * 100$$

Luego de tener el % retenido se procede a calcular el porcentaje que pasa en cada tamiz usando la siguiente expresión:

$$\% \text{ Pasa} = 100 - \% \text{ retenido}$$

En la tabla 9 se presenta los resultados obtenidos.

Tabla 9. Ensayo de granulometría

| Tamiz | Diámetro | Peso retenido | Retenido | Retenido acumulado | Pasa |
|-------|----------|---------------|----------|--------------------|-------|
| No | Mm | gr | % | | % |
| 1 ½ | 37.5 | 0.00 | 0.00% | 0.00% | 100% |
| 1 | 25 | 1862.92 | 9.81% | 9.8% | 90.2% |
| ¾ | 19 | 581.10 | 3.06% | 12.9% | 87.1% |
| 3/8 | 9.5 | 2886.49 | 15.20% | 28.1% | 71.9% |
| 4 | 4.75 | 3080.18 | 16.22% | 44.3% | 55.7% |
| 10 | 2 | 2749.76 | 14.48% | 58.8% | 41.2% |
| 40 | 0.425 | 1965.47 | 10.35% | 69.1% | 30.9% |
| 200 | 0.075 | 3712.55 | 19.55% | 88.7% | 11.3% |
| Fondo | 0 | 2149.67 | 11.32% | 100.0% | 0.0% |
| | Σ | 18990.04 | 100.0% | | |

Fuente: elaboración propia.

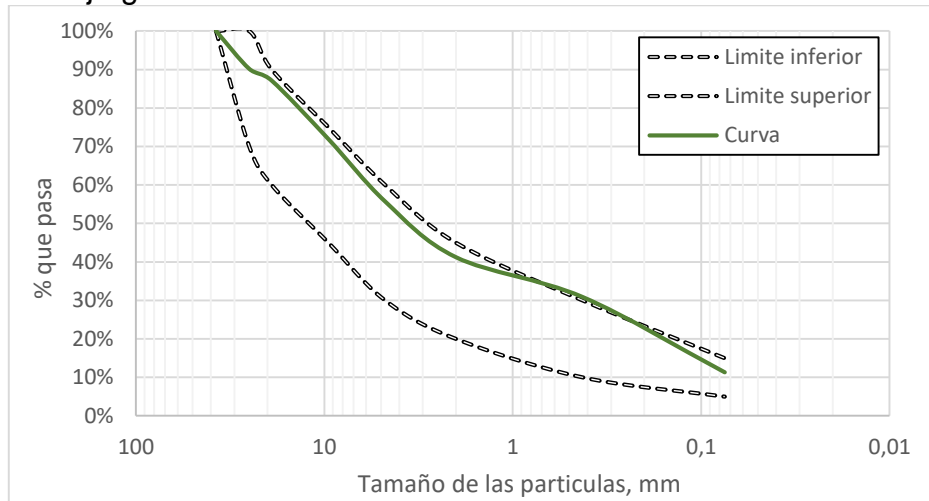
Con la curva granulométrica obtenida se realiza la comparación con las franjas granulométricas de base granular, obteniendo como resultado que la gradación del material usado se ajusta a una base granular de gradación fina BG-38. En la tabla 10 se presenta la gradación del agregado, así como los límites establecidos en la especificación 330-13; en la figura 8 se presenta la gradación del agregado.

Tabla 10. Especificaciones granulométrica base granular BG-38

| Tamiz | Diámetro | Peso retenido | Retenido | Retenido acumulado | Pasa | Norma | |
|-------|----------|---------------|----------|--------------------|-------|-------|------|
| No | Mm | gr | % | | % | BG-38 | |
| 1 1/2 | 37.5 | 0.00 | 0.00% | 0.00% | 100% | 100% | 100% |
| 1 | 25 | 1862.92 | 9.81% | 9.8% | 90.2% | 70% | 100% |
| 3/4 | 19 | 581.10 | 3.06% | 12.9% | 87.1% | 60% | 90% |
| 3/8 | 9.5 | 2886.49 | 15.20% | 28.1% | 71.9% | 45% | 75% |
| 4 | 4.75 | 3080.18 | 16.22% | 44.3% | 55.7% | 30% | 60% |
| 10 | 2 | 2749.76 | 14.48% | 58.8% | 41.2% | 20% | 45% |
| 40 | 0.425 | 1965.47 | 10.35% | 69.1% | 30.9% | 10% | 30% |
| 200 | 0.075 | 3712.55 | 19.55% | 88.7% | 11.3% | 5% | 15% |
| Fondo | 0 | 2149.67 | 11.32% | 100.0% | 0.0% | | |
| | Σ | 18990.04 | 100.0% | | | | |

Fuente: elaboración propia

Figura 8. Franja granulométrica BG-38



Fuente: elaboración propia.

3.2.1.2 Dureza. Las especificaciones de construcción de carreteras para bases granulares exigen que se realicen tres ensayos de dureza sobre el agregado grueso, los cuales son: desgaste en máquina de Los Ángeles INV E-218-13, degradación abrasión en el equipo Micro-Deval INV E-238-13 y evaluación de la resistencia mecánica por el método de 10% de finos INV-E-224-13.

- **Desgaste en máquina de Los Ángeles INV E-218-13.**

Este ensayo se usa para determinar la calidad relativa del agregado por medio de la máquina de los ángeles, para un base granular el desgaste del material no debe ser mayor a 35%.

Figura 9. Equipo para ensayo desgaste en máquina de los Ángeles



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

Se realizaron tres ensayos con el fin de hacer un promedio y obtener una mejor precisión y un menor sesgo en los resultados.

En la tabla 11 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de desgaste en máquina de Los Ángeles.

Tabla 11. Resultados del ensayo de desgaste máquina de Los Ángeles

| Gradación clase A | Ensayo | | |
|---|--------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Peso muestra seca antes del ensayo, gr | 5008 | 5000 | 4993 |
| Peso muestra seca después del ensayo, gr | 3889 | 3845 | 3769 |
| Perdida, gr | 1119 | 1155 | 1224 |
| % de desgaste | 22% | 23% | 25% |
| Promedio | 23% | | |

Fuente: elaboración propia, con base en normas INVIAS-2013

- **Desgaste por degradación en Micro-Deval INV E-238-13.**

Algunos agregados son más débiles en estado húmedo que en estado seco, por esta razón este ensayo aparte de la carga abrasiva incluye la presencia de agua. El desgaste máximo que puede presentar el material para cumplir con la norma de ser del 25%.

Figura 10. Preparación de la muestra Micro Deval



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

Figura 11. Equipo para ensayo desgaste por degradación en Micro-Deval



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

Se realizaron tres ensayos con el fin de hacer un promedio y obtener una mejor precisión y un menor sesgo en los resultados.

En la tabla 12 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de desgaste por degradación en Micro-Deval.

Tabla 12. Resultados de ensayo de desgaste por degradación en Micro-Deval

| Gradación 7.2 | Ensayo | | |
|---|---------------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Peso muestra seca antes del ensayo, gr | 1500 | 1500 | 1500 |
| Peso muestra seca después del ensayo, gr | 1125,3 | 1142,5 | 1135,9 |
| Perdida, gr | 374,7 | 357,5 | 364,1 |
| % de desgaste | 24,98% | 23,83% | 24,27% |
| Promedio | 24,36% | | |

Fuente: elaboración propia.

- **Evaluación de la resistencia mecánica por el método de 10% de finos INV E-224-13.**

Las capas que constituyen la estructura del pavimento deben soportar los esfuerzos que reciben y disiparlos de forma apropiada, este ensayo evalúa el comportamiento del agregado cuando se somete a degradación mecánica. El valor que debe soportar el material debe ser mínimo de 90 KN.

En la tabla 13 se presentan los resultados del ensayo.

Figura 12. Equipo 10% de finos



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

Tabla 13. Resultado de ensayo 10% de finos

| | |
|----------------|------|
| M1 (gr) | 3085 |
| M2 (gr) | 237 |
| M3 (gr) | 2841 |
| f (Kn) | 82.2 |
| M2/M1 | 8.3 |

Fuente: elaboración propia.

Se calculó la fuerza F en kN redondeada al entero mediante la expresión:

$$F = \frac{14f}{m+4}$$

Donde:

F = Máxima fuerza, kN

m = % material pasa tamiz No. 8 a la máxima fuerza ($m=100M2/M1$)

El valor de obtenido de la fuerza del material es de 93 kN, este valor cumple con el criterio de calidad del INVIAS ya que el mínimo es de 90Kn.

3.2.1.3 Durabilidad. Es importante contar con información para juzgar la resistencia de los agregados a la acción de los agentes atmosféricos, por esta razón se realizó el ensayo de pérdida de solidez en sulfatos

- **Perdida en ensayo de solidez en sulfatos INV-220-13.**

Este ensayo da una valoración de la solidez del que tiene el agregado. Para este ensayo se utilizó una solución de agua con sulfato de sodio, la pérdida que debe

presentar el agregado por la acción del sulfato debe ser máximo del 12%.

Figura 13. Baño de María



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

Figura 14. Pesaje de cada una de las fracciones



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

En la tabla 14 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a los sulfatos.

Tabla 14. Resultado de ensayo de resistencia a los sulfatos de base granular

| Tamiz | | Peso muestra inicial | No. Ciclos | | | | | % de pérdida de masa |
|--------------|---------|----------------------|------------|--------|--------------|--------|--------|----------------------|
| Pasa | Retiene | | 1 (gr) | 2 (gr) | 3 (gr) | 4 (gr) | 5 (gr) | |
| 1 1/2 " | 1 " | 1025 | 1012.83 | 1003.4 | 985 | 972.3 | 967.2 | 5.64 |
| 1 " | 3/4 " | 511 | 503.2 | 500.1 | 497.6 | 494.2 | 491.8 | 3.76 |
| 3/4 " | 1/2 " | 708 | 703.5 | 698.1 | 693.6 | 689.4 | 683.4 | 3.47 |
| 1/2 " | 3/8 " | 417 | 403.2 | 388.6 | 375.4 | 368.2 | 362.3 | 13.12 |
| 3/8 " | No. 4 | 100 | 96.3 | 96.1 | 95.4 | 94.7 | 94.2 | 5.80 |
| No. 4 | No. 8 | 100 | 92.1 | 89.8 | 87.8 | 86.9 | 85.9 | 14.10 |
| No. 8 | No. 16 | 100 | 85.4 | 83.1 | 80.4 | 78.2 | 77.4 | 22.60 |
| No. 16 | No. 30 | 100 | 83.8 | 80.5 | 75.7 | 72.6 | 70.5 | 29.50 |
| No. 30 | No. 50 | 100 | 92.3 | 85.7 | 78.6 | 70.3 | 68.8 | 31.20 |
| Total | | 3161 | | | Total | 2901.5 | | 8.21 |

Fuente: elaboración propia.

3.2.1.4 Limpieza. Esta propiedad se determina mediante los ensayos de límites de Atterberg, equivalente de arena, contenido de arcillas y partículas deleznales. Según las especificaciones del INVIAS si el valor del ensayo de equivalente de arena esta entre el 25% y 30%, se debe realizar el ensayo de valor de azul de metileno para determinar la cantidad de arcilla nociva que presenta el agregado.

- **Límite líquido INV E-125-13**

La determinación del límite líquido contribuye a la caracterización de la fracción fina del agregado. Para la realización del ensayo se utilizó el método multipunto, ya que este método es más preciso y tiene poca variabilidad de los resultados.

Figura 15. Ensayo límite líquido



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

En la tabla 15 se observan los resultados obtenidos en la realización del ensayo, donde el valor de límite líquido del material es del 11%.

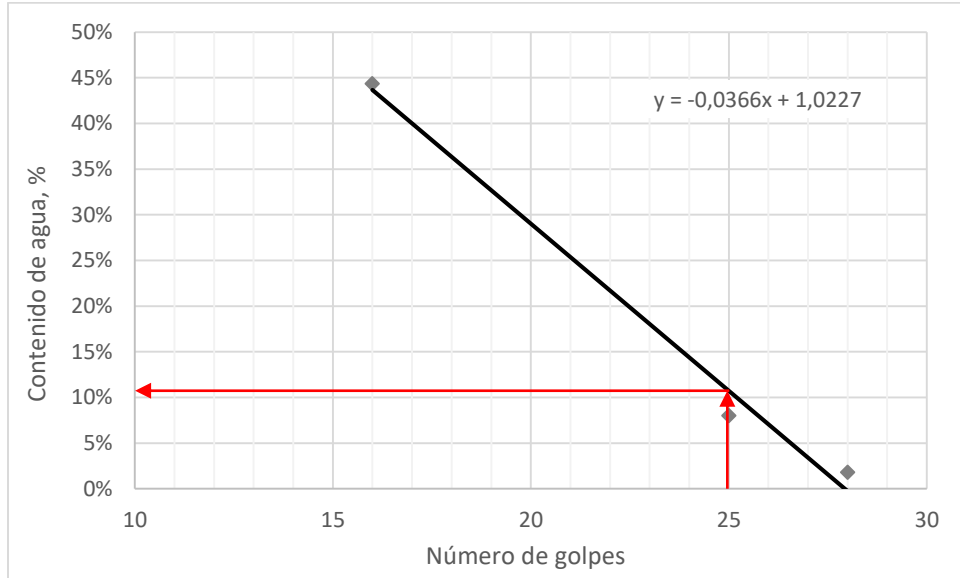
Tabla 15. Resultado de ensayo de límite líquido con 0% de polvillo de alto horno

| Cápsula | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------|----------|----------|----------|
| Número de golpes | 28 | 25 | 16 |
| Peso suelo húmedo | 29.62 | 31.64 | 32.02 |
| Peso suelo seco | 29.1 | 29.3 | 22.18 |
| Contenido de agua | 2% | 8% | 44% |

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta la curva de fluidez de la cual se determinó el límite líquido del agregado.

Figura 16. Curva de fluidez



Fuente: elaboración propia.

- **Límite plástico INV E-126-13**

La determinación del límite plástico contribuye a la caracterización de la fracción fina del agregado.

En la tabla 16 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de límite plástico para el material de base granular.

Tabla 16. Resultados ensayo de límite plástico

| Límite plástico | |
|------------------------------|--------|
| Peso suelo húmedo | 24.029 |
| Peso suelo seco | 22.74 |
| Contenido de agua, LP | 6% |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 17. Resultados de límites de Atterberg con 0% de polvillo de alto horno

| Límite | Resultado de ensayo | Norma |
|------------------------------|----------------------------|--------------|
| Límite líquido | 11% | --- |
| Límite plástico | 6% | --- |
| índice de plasticidad | 5% | 0% |

Fuente: elaboración propia.

- **Equivalente de arena INV E-133-13**

El ensayo de equivalente de arena se realiza para determinar de manera cuantitativa las proporciones relativas de polvo y material de apariencia arcillosa.

Figura 17. Determinación equivalente de arena



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de equivalente de arena para el material granular.

Tabla 18. Resultado de ensayo equivalente de arena de base granular

| Muestra | Lectura de Arena (pulg) | Lectura de Arcilla (pulg) | Equivalente de Arena (%) |
|---------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|
| No. 1 | 1,6 | 5,7 | 28,07 |
| No. 2 | 1,7 | 5,9 | 28,81 |
| No. 3 | 1,6 | 5,8 | 27,59 |
| | | Promedio | 28,16 |

Fuente: elaboración propia.

- **Valor de azul de metileno en agregados finos INV E-235-13**

Este ensayo se utiliza para estimar la cantidad de arcilla nociva que tiene un agregado.

Figura 18. Agitador magnético



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

Figura 19. Ensayo azul de metileno



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

Realizado el ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 19. Resultados del ensayo valor de azul de metileno

| | |
|---|-------|
| Masa Inicial que paso por el tamiz N° 4 (M1) | 10 gr |
| Volumen del agua utilizada | 30 ml |
| Volumen de solución de Azul de metileno (V1) | 8 ml |

Fuente: elaboración propia.

Se calculó el valor de azul de metileno mediante la siguiente expresión:

$$VA = \left(\frac{V1}{M1} \right) * 10$$

Dónde:

- VA = Valor de azul de metileno
- V1 = Volumen total añadido de solución Azul de metileno (ml)
- M1 = Masa de la muestra (gr)

$$VA = \frac{8}{10} * 10$$

$$VA = 8 \text{ ml/gr}$$

- **Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados INV - E - 211 - 13**

Este ensayo es importante puesto que permite aprobar el uso de los agregados en la elaboración de concretos hidráulicos.

En la tabla 20 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de partículas delezables para el material de base granular.

Tabla 20. Resultados partículas delezables para material de base granular

| Tamiz | | Masa de la muestra, g | Masa de las partículas retenidas, g | % p |
|-------------------|---------|-----------------------|-------------------------------------|------|
| Pasa | Retiene | | | |
| 1 1/2 | 3/4 | 3085 | 3035 | 1.62 |
| 3/4 | 3/8 | 2175 | 2127 | 2.21 |
| 3/8 | 4 | 1081 | 1055 | 2.41 |
| 4 | 16 | 545 | 533 | 2.20 |
| % Desgaste | | | | 1.98 |

Fuente: elaboración propia.

3.2.1.5 Gravedad específica de la fracción fina.

- **Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino INV E-222-13.**

Este ensayo se realiza para obtener los valores de absorción que se usan para calcular el cambio de masa del agregado a causa del agua absorbida, en relación con la masa en condición seca.

Figura 20. Equipo usado para gravedad específica



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

Para realizar los cálculos del correspondiente ensayo se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Gravedad específica en condición seca:

$$G_{sb} = \frac{A}{B+S-C}$$

Donde:

- A = Masa al aire de la muestra seca al horno, gr.
- B = Masa del picnómetro aforado lleno de agua, gr.
- C = Masa total del picnómetro aforado con la muestra lleno de agua, gr.
- S = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, gr.

Gravedad específica en condición superficialmente seca saturada.

$$G_{ss} = \frac{S}{B+S-C}$$

Donde:

- A = Masa al aire de la muestra seca al horno, gr.
- B = Masa del picnómetro aforado lleno de agua, gr.
- C = Masa total del picnómetro aforado con la muestra lleno de agua, gr.
- S = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, gr.

Gravedad específica aparente:

$$G_a = \frac{A}{B+A-C}$$

Donde:

- A = Masa al aire de la muestra seca al horno, gr.
- B = Masa del picnómetro aforado lleno de agua, gr.
- C = Masa total del picnómetro aforado con la muestra lleno de agua, gr.
- S = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, gr.

$$\text{Absorción} = \frac{S-A}{A} * 100$$

Donde:

- A = Masa al aire de la muestra seca al horno, gr.
- B = Masa del picnómetro aforado lleno de agua, gr.
- C = Masa total del picnómetro aforado con la muestra lleno de agua, gr.
- S = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, gr.

En la tabla 21 se encuentran los resultados obtenidos del ensayo.

Tabla 21. Resultados de gravedad de finos de base granular

| | Base granular |
|----------------|----------------------|
| Gsb | 2,753 |
| Gsb sss | 2,758 |
| Gsa | 2,767 |
| %Abs | 0,258 |

Fuente: elaboración propia.

3.2.1.6 Geometría de las partículas.

- **Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras INV E-230-13**

La forma de las partículas que conforman el agregado es importante en la construcción de las capas del pavimento, las partículas son propensas a rotura y desintegración durante el proceso de compactación y esto afecta de manera adversa el comportamiento del agregado.

Figura 21. Ensayo de alargamiento de las partículas



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

Los cálculos realizados en el ensayo se realizaron mediante las siguientes expresiones:

$$IA_i = \frac{m_i}{R_i} * 100$$

Donde:

- IA_i = Índice de alargamiento/aplanamiento de cada fracción, %.
- m_i = Masa de las partículas alargadas/aplanadas de la fracción, gr.
- R_i = Masa de la fracción, gr.

$$IA = \frac{M_2}{M_1} * 100$$

Donde:

- IA = Índice de alargamiento/aplanamiento global, %.
- M_1 = Masa total de muestra empleada en la determinación del índice de alargamiento/aplanamiento, gr.
- M_2 = Masa de todas las partículas que pasaron las ranuras del calibrador de alargamiento/aplanamiento, gr.

En la tabla 22 se presentan los resultados del índice de alargamiento, y en la tabla 23 se presentan los resultados del índice de aplanamiento.

Tabla 22. Índice de alargamiento

| Tamiz | Peso total | Partículas largas | Índice alargamiento | Índice alargamiento global |
|-------|------------|-------------------|---------------------|----------------------------|
| 1 1/2 | 1888.5 | 276 | 15% | 25% |
| 1 | 2754.6 | 788.6 | 29% | |
| 3/4 | 2767.6 | 725.1 | 26% | |
| 1/2 | 4131 | 890.9 | 22% | |
| 3/8 | 3572.7 | 1086.4 | 30% | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 23. Índice de aplanamiento

| Tamiz | Peso total | Partículas planas | Índice aplanamiento | Índice aplanamiento global |
|-------|------------|-------------------|---------------------|----------------------------|
| 1 1/2 | 1888.5 | 653.4 | 35% | 32% |
| 1 | 2754.6 | 926.4 | 34% | |
| 3/4 | 2767.6 | 901.9 | 33% | |
| 1/2 | 4131 | 1218.4 | 29% | |
| 3/8 | 3572.7 | 1180.9 | 33% | |

Fuente: elaboración propia.

- **Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso INV-E-227-13**

El ensayo tiene por objetivo determinar el porcentaje de partículas de agregado grueso que tienen caras fracturadas.

El material utilizado en el desarrollo de la investigación fue sometido a un proceso de trituración en la cantera, por tanto, todo el agregado grueso presenta caras fracturadas lo cual pudo ser comprobado mediante inspección visual cuando se realizaban los ensayos anteriores.

- **Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría) INV – E 239 – 13**

Este ensayo provee información sobre el contenido de vacíos que posee el agregado, este contenido de vacíos depende de la forma y la textura de las partículas del agregado fino.

Figura 22. Soporte de embudo y recipiente cilíndrico



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

Para determinar el porcentaje de vacíos en el agregado se utiliza la siguiente expresión.

$$U = \frac{V - \frac{F}{G}}{V} * 100$$

Donde:

- U = Porcentaje de vacíos en el agregado fino sin compactar, %.
- V = Volumen del medidor cilíndrico, gr.
- F = Masa neta del agregado fino en el medidor, gr.
- G = Densidad relativa (gravedad específica) del agregado fino.

En la tabla 24 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de angularidad de la fracción fina.

Tabla 24. Resultados de gravedad de la fracción fina

| No. | V | F | G | U % |
|-----------------|-----|-------|-------|-------|
| 1 | 100 | 138,6 | 2,753 | 49,65 |
| 2 | 100 | 139,4 | 2,753 | 49,36 |
| 3 | 100 | 137,2 | 2,753 | 50,16 |
| Promedio | | | | 49,73 |

Fuente: elaboración propia.

3.2.1.7 Resistencia del material. Dentro de los requerimientos de calidad del material granular usado para la construcción de bases granulares exigidos por el INVIAS, se encuentra como ultimo la evaluación de la resistencia potencial del material, en la cual se exige el desarrollo del ensayo de CBR que a su vez necesita del ensayo modificado de compactación (proctor). La importancia de la precisión con la que se realiza el ensayo de CBR radica en que este valor es usado en todos los métodos de diseño de pavimentos.

- **Ensayo modificado de compactación INV E-142.**

El objetivo de este ensayo es determinar la humedad óptima de compactación y la densidad máxima seca que puede ser obtenida al compactar el suelo con una energía específica. La norma contempla 3 métodos de ensayo, los cuales están en función de la granulometría del material, en la tabla 25 se presenta una breve descripción de cada uno de los métodos ya mencionados.

El método usado para el ensayo es el C, debido a que la cantidad de material retenido en el tamiz $\frac{3}{4}$ " es menor del 30% (Ver tabla 9). La obtención de la curva de compactación se realizó compactando 4 cilindros de 6" de diámetro a diferentes humedades deseadas (7%, 7.5%, 8% y 9%), teniendo como humedad inicial 4.4%.

En la figura 24, se observa la curva de compactación obtenida, donde se indica que la humedad óptima de compactación es 8.1% y la densidad seca máxima obtenida es 1.84 gr/cm³.

Tabla 25. Métodos de ensayo proctor modificado

| Método | | A | B | C |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------|------------------|------------------|
| Material | | Pasa No. 4 | Pasa No. 3/8" | Pasa No. 3/4" |
| Características del martillo | Peso del martillo W, Lb | 10 | 10 | 10 |
| | Altura de caída h, pie | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| Numero de capas | N | 5 | 5 | 5 |
| Numero de golpes por capa | n | 25 | 25 | 56 |
| Molde de compactación | Diámetro, pulg | 4 | 4 | 6 |
| | Altura del molde, pulg | 4.59 | 4.59 | 4.59 |
| | Volumen del molde, pie ³ | 1/30 | 1/30 | 1/13.33 |
| Energía de compactación | Ec, Lb pie/pie ³ | 56250 | 56250 | 55986 |

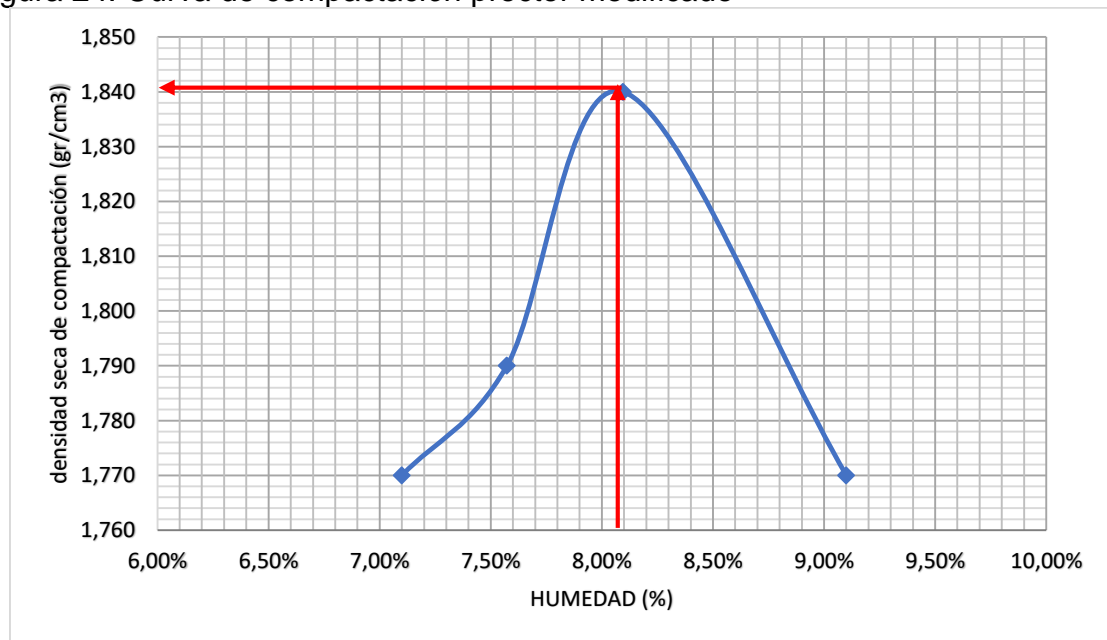
Fuente: elaboración propia a partir de HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando. Presentación energía de compactación. Tunja, 2016.

Figura 23. Adición de agua a cada sub-muestra para ensayo modificado de compactación



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

Figura 24. Curva de compactación proctor modificado



Fuente: elaboración propia.

- **CBR INV E-148-13.**

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia potencial de los suelos denominada CBR, los cuales serán usados para el diseño de pavimentos.

Figura 25. Compactación de la muestra



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

Figura 26. Especímenes compactados ensayo CBR y toma de lecturas de expansión



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

Figura 27. Penetración ensayo CBR



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

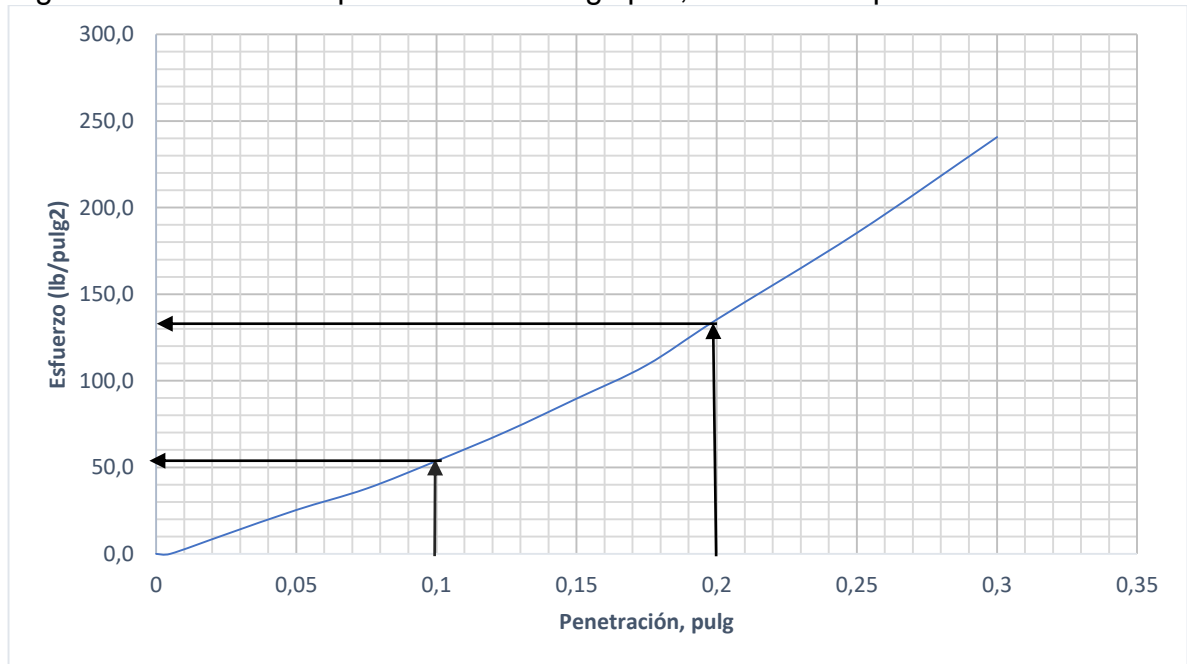
Tabla 26. Ensayo de penetración CBR con 0% de polvillo de alto horno

| Parámetros | 56 golpes/cara | | 25 golpes/cara | | 10 golpes/cara | | |
|------------|--------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|
| | Penetración (pulg) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) |
| 0 | - | 0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.005 | - | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.025 | - | 329 | 109.7 | 179 | 59.7 | 34 | 11.3 |
| 0.05 | - | 725 | 241.7 | 340 | 113.3 | 76 | 25.3 |
| 0.075 | - | 1178 | 392.7 | 535 | 178.3 | 113 | 37.7 |
| 0.1 | - | 1640 | 546.7 | 718 | 239.3 | 161 | 53.7 |
| 0.125 | - | 2236 | 745.3 | 895 | 298.3 | 212 | 70.7 |
| 0.15 | - | 2845 | 948.3 | 1113 | 371.0 | 269 | 89.7 |
| 0.175 | - | 3483 | 1161.0 | 1319 | 439.7 | 327 | 109.0 |
| 0.2 | - | 4042 | 1347.3 | 1538 | 512.7 | 406 | 135.3 |
| 0.25 | - | 5175 | 1725.0 | 1970 | 656.7 | 556 | 185.3 |
| 0.3 | - | 6260 | 2086.7 | 2423 | 807.7 | 722 | 240.7 |

Fuente: elaboración propia

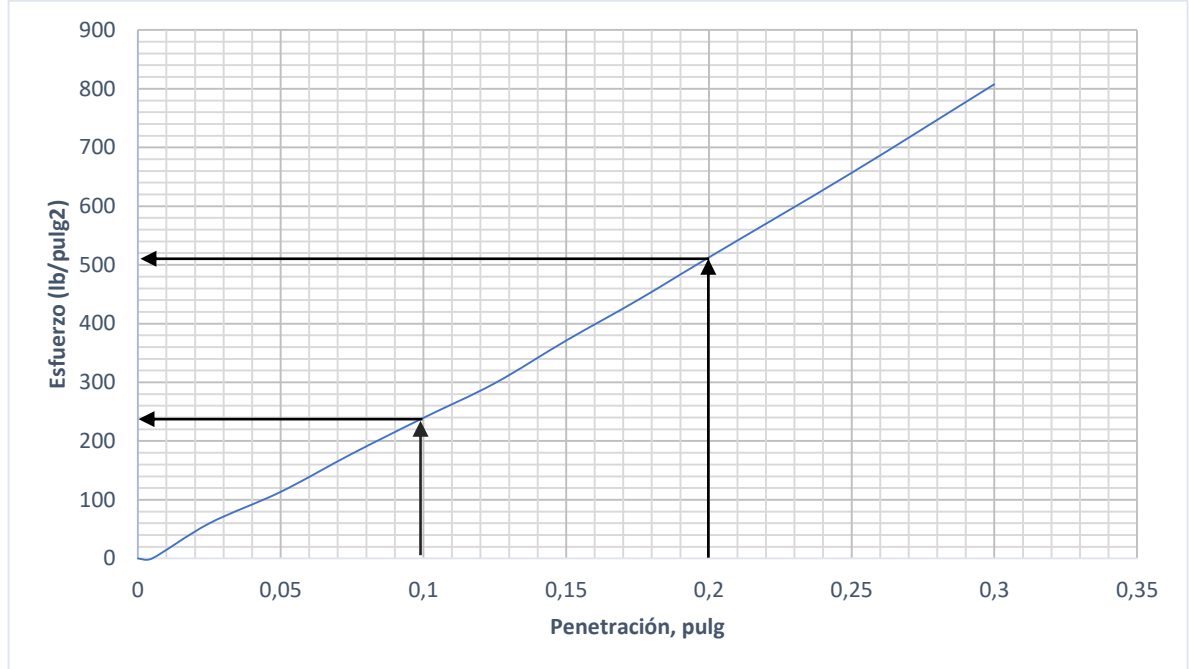
A continuación, se presentan las gráficas esfuerzo vs penetración para cada cilindro.

Figura 28. Esfuerzo vs penetración a 10 golpes, CBR 0% de polvillo de alto horno



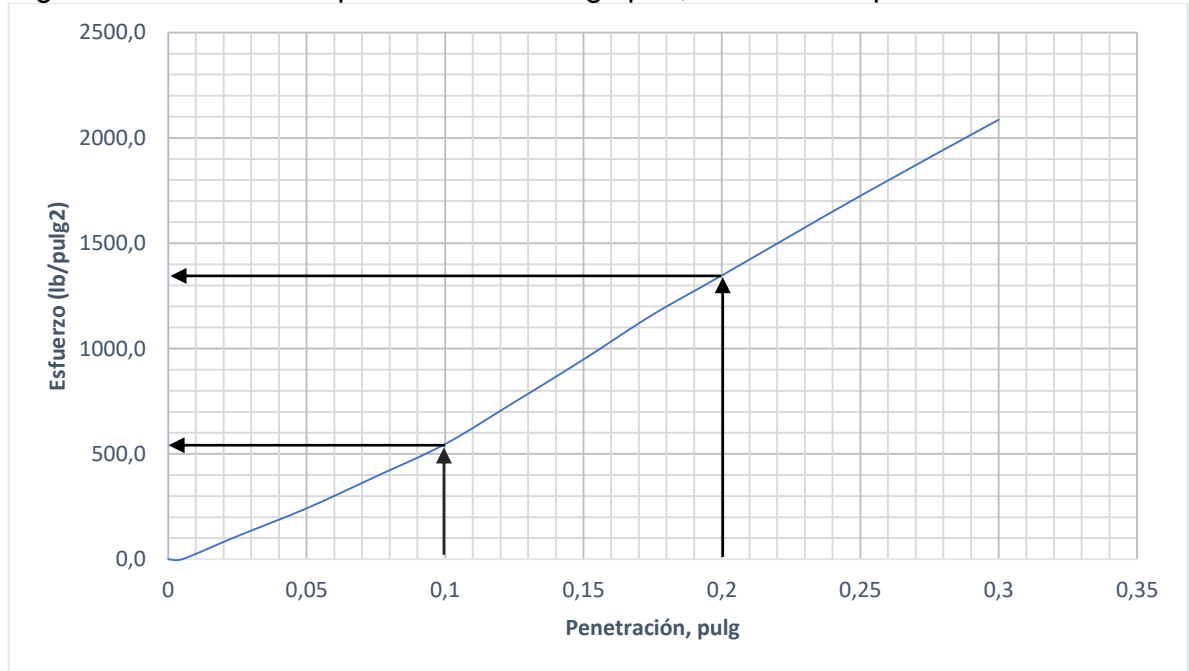
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. Esfuerzo vs penetración a 25 golpes, CBR 0% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Esfuerzo vs penetración a 56 golpes, CBR 0% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenidas las 3 gráficas esfuerzo vs penetración se calcula el CBR a 0.1 y 0.2 pulgadas de penetración, usando la siguiente expresión.

$$CBR_{0.1} = \frac{\text{Esfuerzo a 0.1"}, lb/pulg^2}{1000 lb/pulg^2} * 100$$

$$CBR_{0.2} = \frac{\text{Esfuerzo a 0.2"}, lb/pulg^2}{1500 lb/pulg^2}$$

Luego de calcular el valor del CBR para 0.1" y 0.2" de penetración se toma el mayor valor obtenido para cada cilindro compactado, en la tabla 27 se presenta el esfuerzo, CBR y densidad seca.

Tabla 27. CBR 0% de polvillo de alto horno por cilindro

| Golpes/capa | 10 | | 25 | | 56 | |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 0.1" | 0.2" | 0.1" | 0.2" | 0.1" | 0.2" |
| Penetración | | | | | | |
| Esfuerzo | 53 | 135 | 239 | 512 | 546 | 1347 |
| CBR | 5 | 9 | 23 | 34 | 54 | 89 |
| CBR (Mayor) | 9 | | 34 | | 89 | |
| Densidad (g/cm ³) | 1.58 | | 1.6 | | 1.83 | |

Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenidos los valores de CBR para cada cilindro se dibuja la gráfica densidad vs CBR; la curva obtenida en esta grafica se corta con el valor del 100% de la densidad seca máxima obtenida en el ensayo de proctor modificado (1.84 gr/cm³), siendo este valor el CBR del material utilizado. Adicionalmente se obtiene el valor del CBR del material con el 95% ya que este valor es el porcentaje mínimo especificado para el control de la compactación en obra, este valor del CBR al 95% también es conocido como CBR de diseño⁵¹.

En la figura 31 se observa que el valor del CBR obtenido para el 100% de la densidad máxima seca es del 90% y el valor del CBR para el 95% de la densidad máxima seca es del 60%.

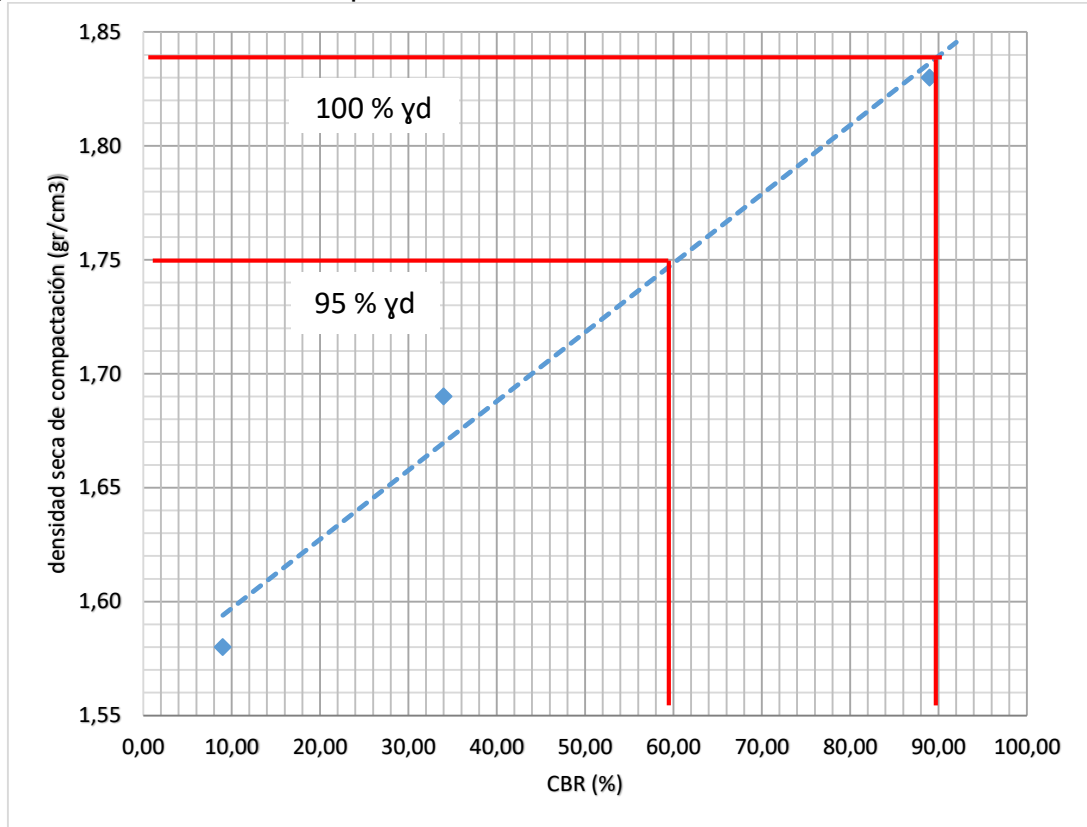
Finalmente es necesario calcular la expansión de la muestra durante el periodo de sumergimiento, esta es igual a la diferencia entre las lecturas inicial y final tomadas del deformimetro, la expresión que se debe usar es la siguiente:

$$\text{Expansión} = \frac{\text{Lectura final} - \text{Lectura inicial}}{\text{Altura inicial de la muestra}} * 100$$

En la tabla 28 se presentan los valores de las expansiones para cada cilindro de ensayo, donde es posible observar que el espécimen que posee un mayor porcentaje de expansión es el correspondiente a 56 golpes, esto se debe a que está en un mayor estado de compactación mientras que los otros 2 se encuentran más sueltos o menos compactados.

⁵¹ INVIAS. Normas de ensayo de materiales para carreteras. Sección 100. INV E-148. Bogotá. 2013.

Figura 31. CBR con 0% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia.

Tabla 28. Expansiones CBR 0% de polvillo de alto horno

| No de golpes | Lectura | | Altura inicial | % Expansión |
|--------------|---------|-------|----------------|-------------|
| | Inicial | Final | | |
| 56 | 163 | 168 | 126 | 3.8% |
| 25 | 152 | 155 | 127 | 2.0% |
| 10 | 124 | 125 | 123 | 1.2% |

Fuente: elaboración propia.

3.2.2 Polvillo de alto horno. En el proceso de realizar una caracterización del polvillo se realizaron cinco ensayos.

3.2.2.1 Granulometría. Este ensayo se hizo de acuerdo con la norma del INVIAS INV E-123-13.

En la tabla 29 se muestra los resultados obtenidos en el ensayo de análisis granulométrico del polvillo de alto horno.

Figura 32. Tamizado del polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

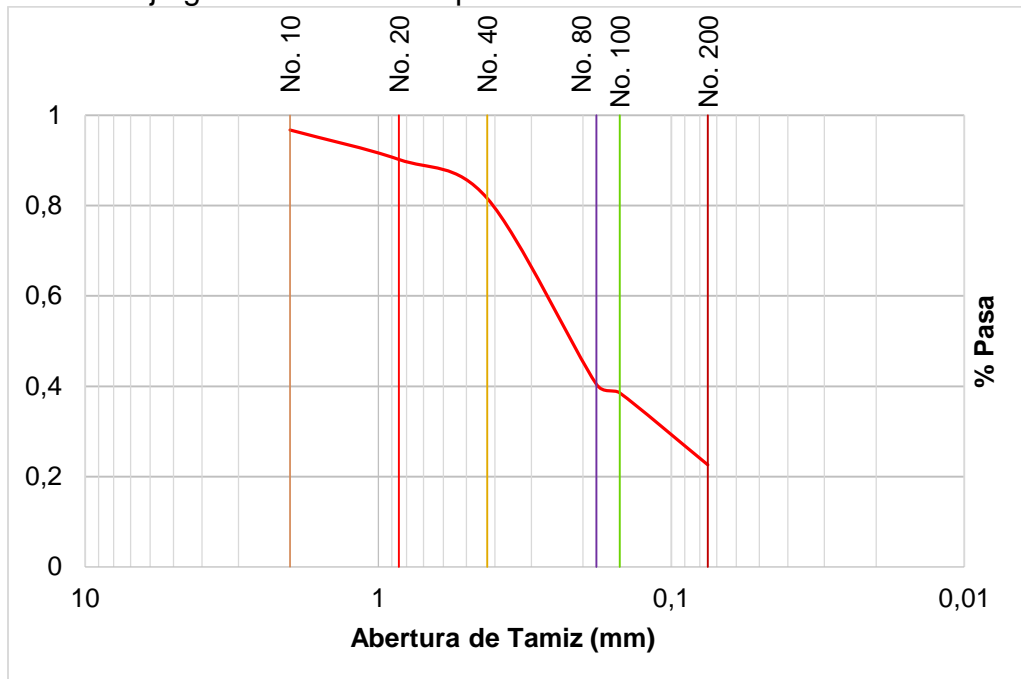
Tabla 29. Resultados granulometría del polvillo de alto horno

| Tamiz | Diámetro | Peso retenido | Retenido | Retenido acumulado | Pasa |
|-------|----------|---------------|----------|--------------------|------|
| No | mm | gr | % | | % |
| 10 | 2 | 2.66 | 0.7 | 0.7 | 99.3 |
| 20 | 0.85 | 18.98 | 4.7 | 5.3 | 94.7 |
| 40 | 0.425 | 132.3 | 32.7 | 38.0 | 62.0 |
| 80 | 0.18 | 192.68 | 47.6 | 85.6 | 14.4 |
| 100 | 0.15 | 10.68 | 2.6 | 88.3 | 11.7 |
| 200 | 0.075 | 35.12 | 8.7 | 97.0 | 3.0 |
| FONDO | | 12.32 | 3.0 | 100.0 | 0.0 |
| | Σ | 404.74 | 100.0 | | |

Fuente: elaboración propia.

En la figura 33 se observa la gráfica de la granulometría del polvillo de alto horno obtenida en la realización del ensayo de análisis granulométrico.

Figura 33. Franja granulométrica del polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia, con base en normas INVIAS-2013.

3.2.2.2 Equivalente de arena. Este ensayo se realizó de acuerdo con la norma del INVIAS INV E- 133-13.

Figura 34. Ensayo equivalente de arena polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

En la tabla 30 se observan los resultados obtenidos en la realización del ensayo de equivalente de arena para polvillo de alto horno.

Tabla 30. Resultado de ensayo equivalente de arena para polvillo de alto horno

| Muestra | Lectura de Arena (pulg) | Lectura de Arcilla (pulg) | Equivalente de Arena (%) |
|---------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|
| No. 1 | 3,0 | 3,4 | 89,0 |
| No. 2 | 2,9 | 3,5 | 85,0 |
| No. 3 | 2,9 | 3,5 | 85,0 |
| | | Promedio | 86,3 |

Fuente: elaboración propia.

3.2.2.3 Límites de Atterberg. Este ensayo se realizó de acuerdo con las normas del INVIAS INV E-125-13 y E-126-13.

Figura 35. Límite líquido para el polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

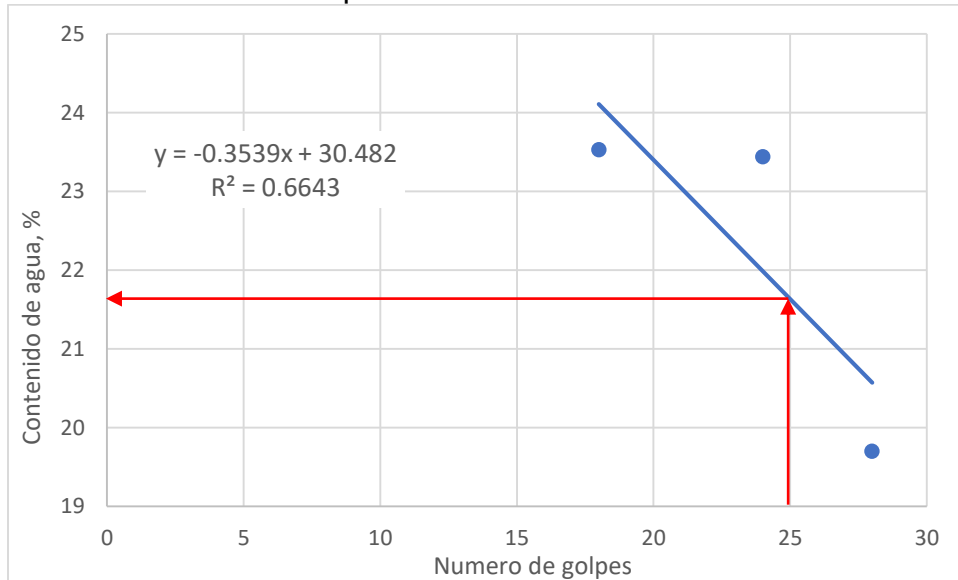
Tabla 31. Resultado de ensayo límite líquido para polvillo de alto horno

| Límite Líquido | | | |
|---|-------|-------|-------|
| Numero de golpes | 28 | 24 | 18 |
| Recipiente N° | 1 | 2 | 3 |
| Masa del recipiente+suelo húmedo (g) | 31,1 | 25,8 | 28,7 |
| Masa del recipiente+suelo seco (g) | 29,6 | 24,5 | 26,7 |
| Masa del recipiente (g) | 1,5 | 1,3 | 2 |
| Peso del agua (g) | 23,2 | 17,9 | 18,2 |
| Masa suelo seco (g) | 6,4 | 6,6 | 8,5 |
| Contenido de agua, w, (%) | 23,44 | 19,70 | 23,53 |

Fuente: elaboración propia.

Con los datos registrados en la tabla 31 se realiza la curva de fluidez del material para determinar el límite líquido, de la cual se obtiene un valor de 22%.

Figura 36. Curva de fluidez del polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia.

Al realizar el ensayo de límite plástico se determinó que el material no presenta plasticidad.

3.2.2.4 Gravedad específica. Este ensayo se hizo de acuerdo con la norma del INVIAS INV E-222-13., que describe como se determina la gravedad específica del agregado fino.

En la tabla 32 se observa los resultados obtenidos en la realización del ensayo de gravedad específica.

Tabla 32. Resultado de ensayo gravedad específica para polvillo de alto horno

| A 23°C | 1 | 2 | Diferencia | Promedio |
|----------------|-------|-------|------------|----------|
| Gsb | 2.53 | 2.373 | 0.0195 | 2.363 |
| Gsb sss | 2.48 | 2.504 | 0.0153 | 2.496 |
| Gsa | 2.722 | 2.732 | 0.0094 | 2.727 |
| %Abs | 5.764 | 5.41 | 0.2232 | 5.653 |

Fuente: elaboración propia.

3.2.2.5 Angularidad de la fracción fina. Este ensayo se hizo de acuerdo con la norma del INVIAS INV E-239-13.

En la tabla 33 se observa los resultados obtenidos en la realización del ensayo de angularidad de la fracción fina para el material de polvillo de alto horno.

Tabla 33. Angularidad del polvillo de alto horno

| No. | V | F | G | U |
|-----------------|--------|-------|------|--------------|
| 1 | 100.10 | 109,3 | 2,36 | 53 |
| 2 | 100,1 | 111,3 | 2,36 | 52,95 |
| 3 | 100,1 | 112,4 | 2,36 | 52,48 |
| Promedio | | | | 53,07 |

Fuente: elaboración propia.

3.3 RESUMEN CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

3.3.1 Material Granular. En la tabla 34 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización que se le realizó al material granular, y estos son comparados con las especificaciones exigidas por el INVIAS en su artículo 330 para verificar la idoneidad del material.

Tabla 34. Resumen caracterización material granular

| Ensayo | Norma | Valor ensayo | Valor norma | Cumple |
|---|-----------|--------------|-------------|--------|
| Desgaste en la máquina de los Ángeles (gradación A) | INV-E-218 | 23 | ≤35% | Si |
| Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval | INV-E-238 | 24.36 | ≤25% | Si |
| Evaluación de la resistencia mecánica por el método de 10% de finos | INV-E-224 | 93 | ≥90 KN | Si |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos | INV-E-220 | 8.21 | ≤12% | Si |
| Límite líquido | INV-E-125 | 11 | NA | No |
| Índice de plasticidad | INV-E-126 | 5 | 0 | No |
| Equivalente de arena de suelos y agregados finos | INV-E-133 | 28.16 | ≥30% | No |
| Valor de azul de metileno | INV-E-235 | 8 | ≤10 | Si |
| Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable | INV-E-211 | 2 | ≤2% | Si |
| Índice de alargamiento y aplanamiento | INV-E-230 | 25/32 | ≤35% | Si |
| Caras fracturadas | INV-E-227 | 100 | 100 | Si |
| Angularidad de la fracción fina | INV-E-239 | 49.73 | ≥35% | Si |
| CBR (%) | INV-E-148 | 90 | ≥95% | No |

Fuente: elaboración propia.

Al realizar la caracterización del material de base granular, mediante los ensayos que se exigen por INVIAS como criterio de calidad, se determinó que el agregado cumple con todos los parámetros de dureza, durabilidad y geometría. En cuanto a los parámetros de limpieza el material no cumple con el índice de plasticidad donde el material se encuentra 5% por encima de lo establecido por la norma, los demás parámetros de limpieza si los cumple el agregado. En cuanto a la resistencia el

material granular cumple con la norma establecida para bases granulares de tipo B y C, pero para una base de clase A que el CBR debe ser mínimo de 95% no cumple, ya que el material presenta un CBR de 90%.

3.3.2 Polvillo de alto horno. En la tabla 35 se presentan los resultados obtenidas al realizar la caracterización del polvillo de alto horno.

Tabla 35. Resumen caracterización polvillo de alto horno

| Ensayo | Norma | Valor ensayo |
|--|--------------|---------------------|
| Límite líquido | INV-E-125-13 | 22 |
| Índice de plasticidad | INV-E-126-13 | NP |
| Equivalente de arena | INV-E-133-13 | 86.6 |
| Angularidad de la fracción fina | INV-E-239-13 | 53,07 |

Fuente: elaboración propia.

Se estableció que el polvillo cumple con los parámetros de calidad para ser parte del agregado de base granular.

Ya que el material no cumple con los parámetros de plasticidad y resistencia, se agregará polvillo en diferentes porcentajes con el fin de evaluar si el uso de polvillo sirve como estabilizante y así mejorar el material granular para que cumpla todos los parámetros de calidad.

4. ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS

La cantidad de polvillo que será agregado a la mezcla varía en los siguientes porcentajes 2%, 4%, 6%, 8% y 10%. Estos porcentajes serán reemplazados por la fracción fina del agregado con la finalidad de no alterar la granulometría del agregado. A partir de este reemplazo de material fino por polvillo se observará el nuevo comportamiento del material.

De la caracterización realizada se obtuvo que el material granular no cumple con plasticidad ni con el porcentaje mínimo de CBR; sin embargo, se continúa trabajando con este material, ya que el objetivo del proyecto es verificar si estos dos criterios de calidad del agregado pueden ser mejorados con el polvillo de alto horno.

4.1 LÍMITES DE ATTERBERG CON POLVILLO DE ALTO HORNO

La realización de las mezclas para determinar los límites de Atterberg se inicia tamizando 1 kg de material pasa tamiz 40, es decir 200 gr para cada porcentaje de polvillo con el que será reemplazado parte de ese peso inicial. En la tabla 36 se presentan las cantidades con las que se realizó cada una de las mezclas.

Tabla 36. Cantidades de material para límites de Atterberg con polvillo de alto horno

| % polvillo | 2% | 4% | 6% | 8% | 10% |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| Peso agregado fino inicial (gr) | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Peso polvillo (gr) | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 |
| Peso agregado fino final (gr) | 196 | 192 | 188 | 184 | 180 |
| Peso total de la mezcla (gr) | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 37. Mezcla de polvillo de alto horno con agregado fino para ensayo de límites de Atterberg



Fuente: elaboración propia con base en equipos del LSP-UPTC.

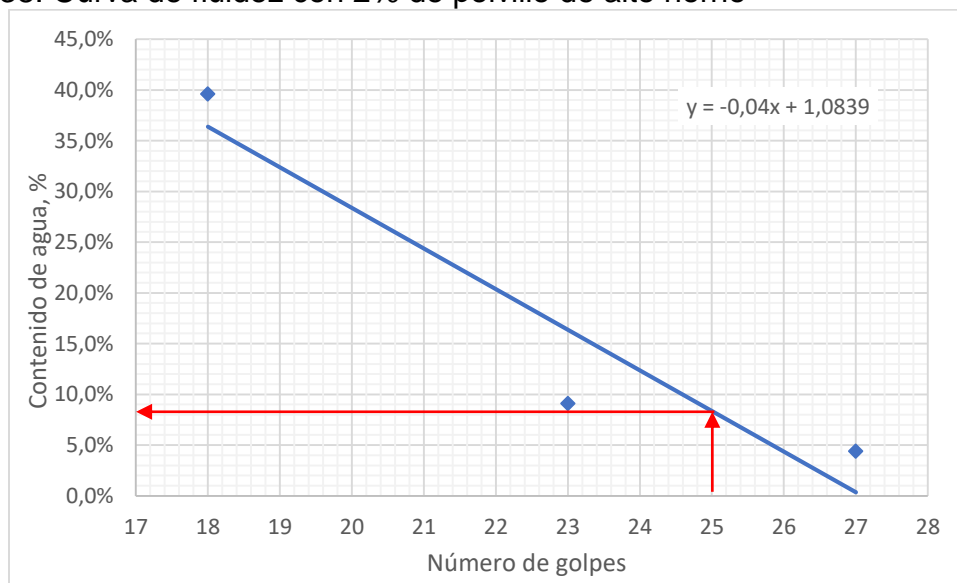
4.1.1 Límite líquido y plástico con 2% de polvillo de ato horno. En la tabla 37 se presentan los valores obtenidos del ensayo de limite líquido, y posteriormente se presenta la curva de fluidez en la figura 38, donde se obtiene como resultado que el limite líquido para la muestra es de 8%.

Tabla 37. Límite líquido con 2% de polvillo de alto horno

| Cápsula | 1 | 2 | 3 |
|-------------------|-------|-------|-------|
| Número de golpes | 27 | 23 | 18 |
| Peso suelo húmedo | 38.13 | 32.6 | 31.47 |
| Peso suelo seco | 36.51 | 29.84 | 22.45 |
| Contenido de agua | 4.4% | 9.2% | 40% |

Fuente: elaboración propia

Figura 38. Curva de fluidez con 2% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia.

Los datos obtenidos del límite plástico e índice de plasticidad se presentan en la tabla 38, donde se obtuvo un índice de plasticidad del 4%.

Tabla 38. Límite plástico e índice de plasticidad con 2% de polvillo de alto horno

| LP e IP | |
|-----------------------|-------|
| Peso suelo húmedo | 22.69 |
| Peso suelo seco | 21.74 |
| Contenido de agua, LP | 4% |
| IP= LL-LP | 4% |

Fuente: elaboración propia.

4.1.2 Límite líquido y plástico con 4% de polvillo de ato horno. En la tabla 39 se presentan los valores obtenidos del ensayo de límite líquido, y posteriormente se presenta la curva de fluidez en la figura 39, donde se obtiene como resultado que el límite líquido para la muestra es de 3%.

Tabla 39. Límite líquido con 4% de polvillo de alto horno

| Cápsula | 1 | 2 | 3 |
|-------------------|------|-------|-------|
| Número de golpes | 26 | 20 | 15 |
| Peso suelo húmedo | 28.5 | 36.42 | 31.47 |
| Peso suelo seco | 27.1 | 33.79 | 22.45 |
| Contenido de agua | 5.2% | 7.8% | 40% |

Fuente: elaboración propia.

Figura 39. Curva de fluidez con 4% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia.

Los datos obtenidos del límite plástico e índice de plasticidad se presentan en la tabla 40, donde se obtuvo un índice de plasticidad del 1%.

Tabla 40. Límite plástico e índice de plasticidad con 4% de polvillo de alto horno

| LP e IP | |
|-----------------------|-------|
| Peso suelo húmedo | 28.61 |
| Peso suelo seco | 28.14 |
| Contenido de agua, LP | 2% |
| IP= LL-LP | 1% |

Fuente: elaboración propia.

4.1.3 Límite líquido y plástico con 6%, 8% y 10% de polvillo de alto horno. Al momento de realizar el ensayo de límite líquido con el 6% de polvillo de alto horno, no se logró superar la barrera de los 23 golpes para que la pasta de suelo se cerrara, es decir las dos partes en las que se dividían con el ranurador se juntaban antes de los 25 golpes, y de acuerdo con la norma de ensayo⁵² cuando sucede esto luego de varios intentos variando la cantidad de agua, se debe informar que no es posible determinar su límite líquido y que por ende la mezcla es no plástica sin ser necesaria la realización del ensayo de límite plástico.

Igualmente, que el caso de la mezcla con 6% de polvillo de alto horno sucedió con el 8% y 10%, por lo cual se dedujo que la mezcla con esos porcentajes era no plástica, se da por finalizado el ensayo ya que no fue posible determinar el límite líquido.

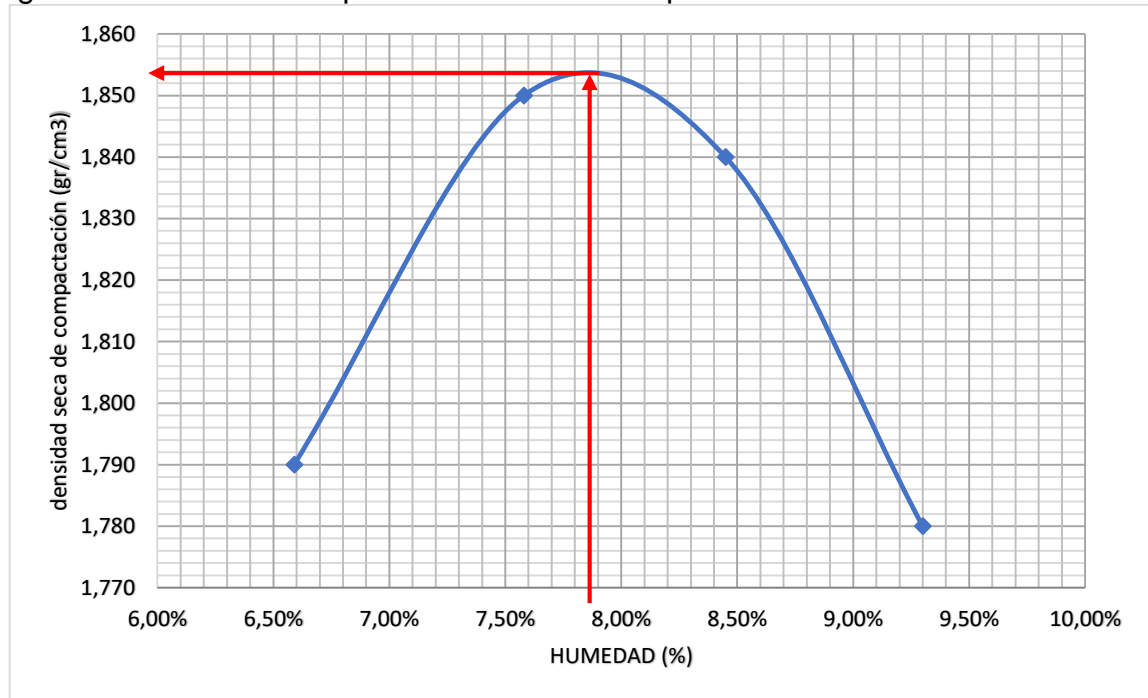
4.2 ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN CON POLVILLO DE ALTO HORNO

La mezcla necesaria para realizar el ensayo modificado de compactación se inicia tamizando 5 kg de material granular pasa tamiz $\frac{3}{4}$ ". Luego de esto se le reemplaza parte de su fracción fina por 500 gr de polvillo de alto horno, ya que el ensayo de compactación se realizará con el 10% de polvillo para así poder tener un punto de comparación y observar si los valores de densidad seca máxima y humedad óptima varían en un alto porcentaje respecto al ensayo ya realizado para el material sin estabilizar. El procedimiento a seguir se describió en la sección 3.2.7.1.

En la figura 40 se tiene la curva de compactación resultante del ensayo realizado, donde es posible observar que la densidad seca máxima obtenida es de 1.853 gr/cm³ y la humedad óptima de compactación es de 7.89%. Estos valores se encuentran muy cercanos a los obtenidos del ensayo de compactación del material sin estabilizar; por tal motivo el ensayo de CBR con polvillo de alto horno se realizará usando los valores de densidad seca máxima y humedad óptima obtenidos del proctor modificado sin polvillo de alto horno, ya que el porcentaje de variación de estos valores es poco apreciable.

⁵² INVIAS. Op. cit., p. 221.

Figura 40. Curva de compactación con 10% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia.

4.3 ENSAYO CBR CON POLVILLO DE ALTO HORNO

La realización de las mezclas para el ensayo de CBR se inicia tamizando aproximadamente 110 kg de material tipo base granular que pase el tamiz $\frac{3}{4}$ ", y posteriormente reemplazando parte de su fracción fina por el polvillo de alto horno, esto con el objetivo de no alterar la granulometría del agregado. En la tabla 44 se presentan las cantidades que se deberán agregar a cada sub muestra.

Tabla 41. Cantidades de material para ensayo de CBR con polvillo de alto horno

| Porcentaje de polvillo | 2% | 4% | 6% | 8% | 10% |
|--------------------------------|-------|------|------|------|------|
| Peso inicial del agregado (gr) | 7000 | 7000 | 7000 | 7000 | 7000 |
| Peso del polvillo (gr) | 140 | 280 | 420 | 560 | 700 |
| Peso final del agregado (gr) | 6860 | 6720 | 6580 | 6440 | 6300 |
| Peso de la mezcla (gr) | 7000 | 7000 | 7000 | 7000 | 7000 |
| Peso total agregado (gr) | 98700 | | | | |
| Peso total polvillo (gr) | 6300 | | | | |

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del ensayo CBR variando los porcentajes de polvillo de alto horno.

4.3.1 CBR con 2% de polvillo de alto horno. En la tabla 42 se presentan los resultados obtenidos de la penetración.

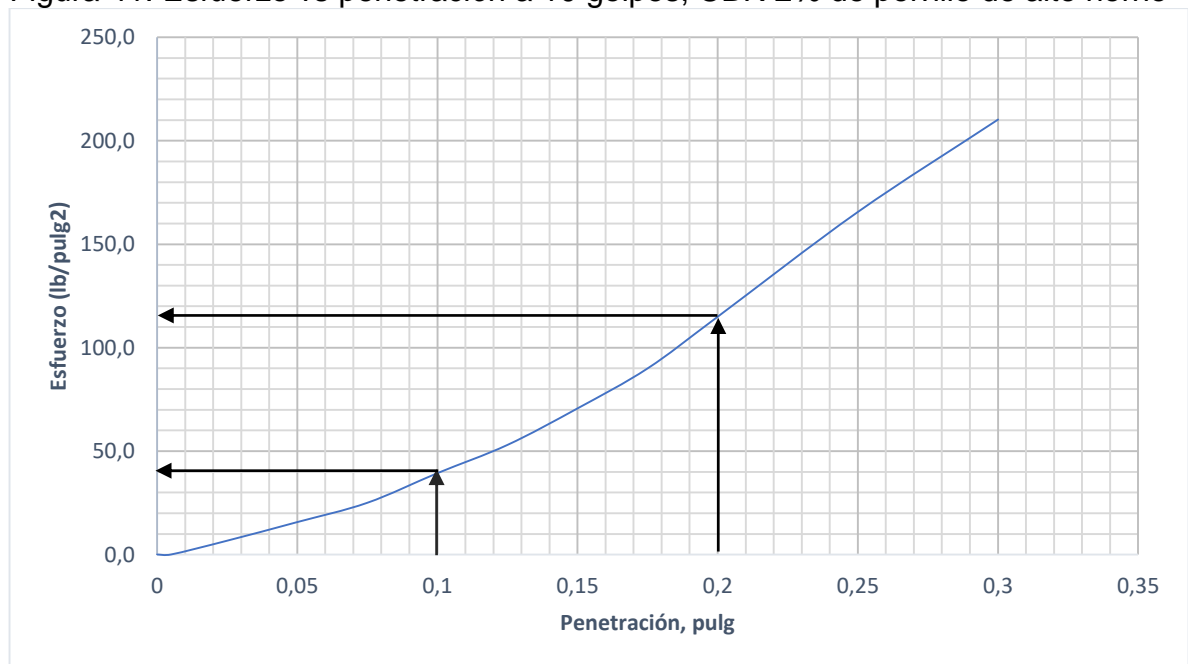
Tabla 42. Ensayo de penetración CBR con 2% de polvillo de alto horno

| Parámetros | 56 golpes/cara | | 25 golpes/cara | | 10 golpes/cara | | |
|------------|--------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|
| | Penetración (pulg) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) |
| 0 | - | 0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.005 | - | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.025 | - | 239 | 79.7 | 129 | 43.0 | 20 | 6.7 |
| 0.05 | - | 555 | 185.0 | 255 | 85.0 | 47 | 15.7 |
| 0.075 | - | 930 | 310.0 | 382 | 127.3 | 75 | 25.0 |
| 0.1 | - | 1426 | 475.3 | 548 | 182.7 | 118 | 39.3 |
| 0.125 | - | 2033 | 677.7 | 717 | 239.0 | 159 | 53.0 |
| 0.15 | - | 2618 | 872.7 | 900 | 300.0 | 212 | 70.7 |
| 0.175 | - | 3240 | 1080.0 | 1113 | 371.0 | 270 | 90.0 |
| 0.2 | - | 3841 | 1280.3 | 1350 | 450.0 | 362 | 120.7 |
| 0.25 | - | 5037 | 1679.0 | 1783 | 594.3 | 515 | 171.7 |
| 0.3 | - | 6262 | 2087.3 | 2226 | 742.0 | 614 | 204.7 |

Fuente: elaboración propia.

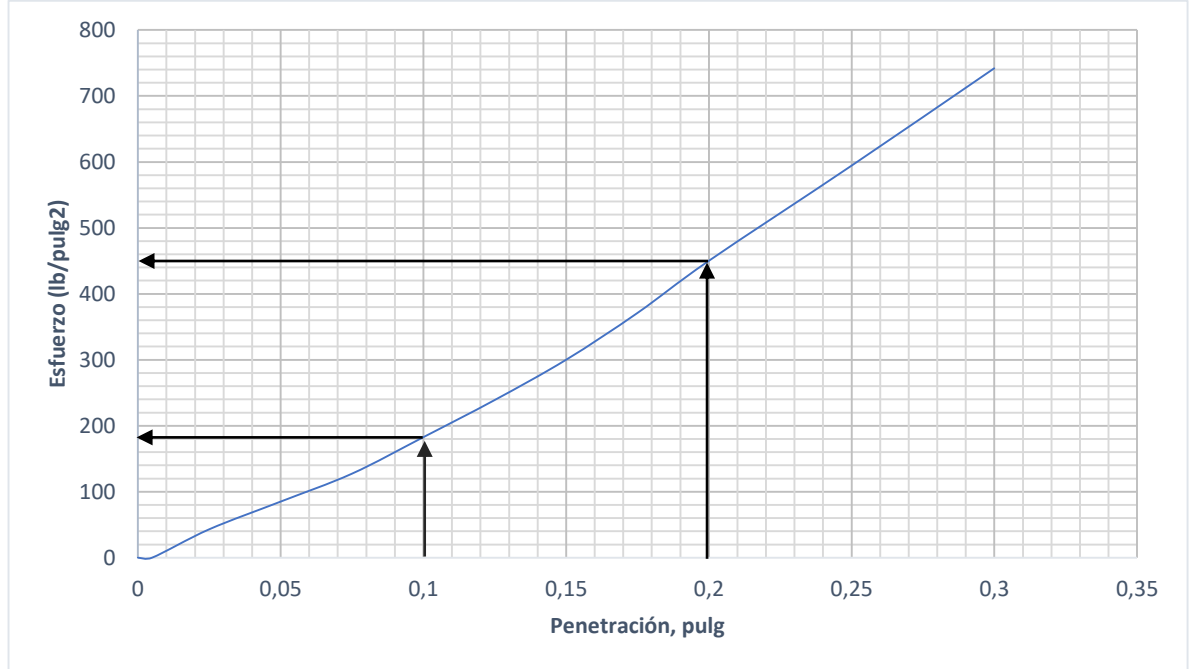
A continuación, se presentan las gráficas esfuerzo vs penetración para cada cilindro.

Figura 41. Esfuerzo vs penetración a 10 golpes, CBR 2% de polvillo de alto horno



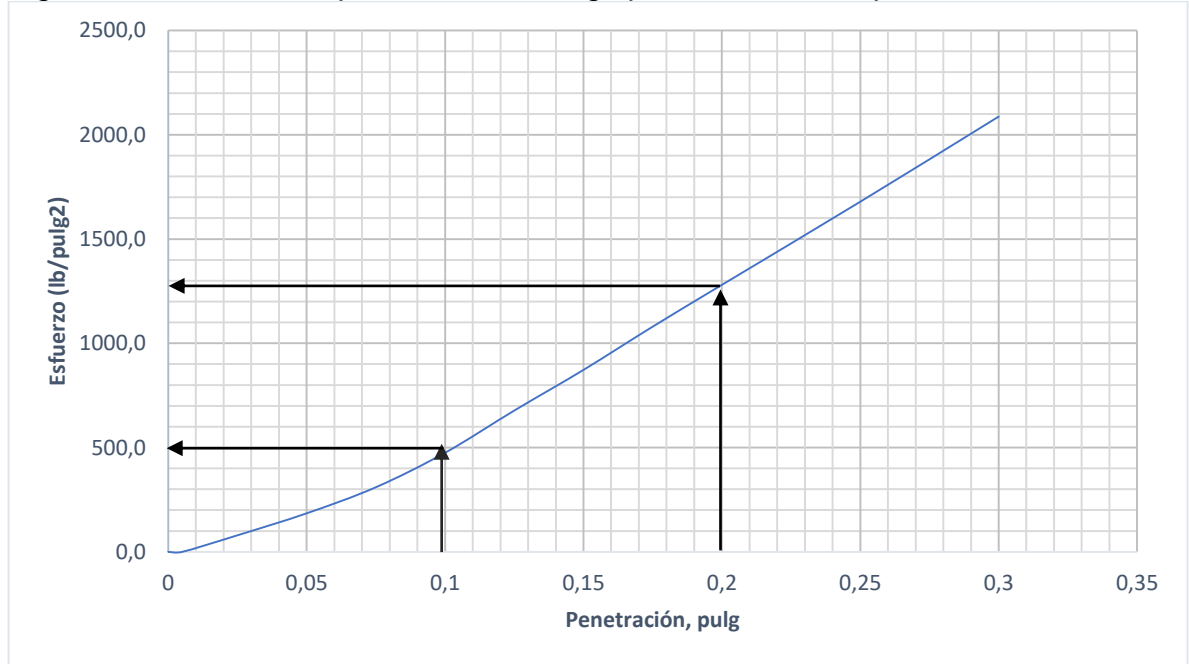
Fuente: elaboración propia

Figura 42. Esfuerzo vs penetración a 25 golpes, CBR 2% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia.

Figura 43. Esfuerzo vs penetración a 56 golpes, CBR 2% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia.

En la tabla 43 se presenta el esfuerzo, CBR y densidad seca.

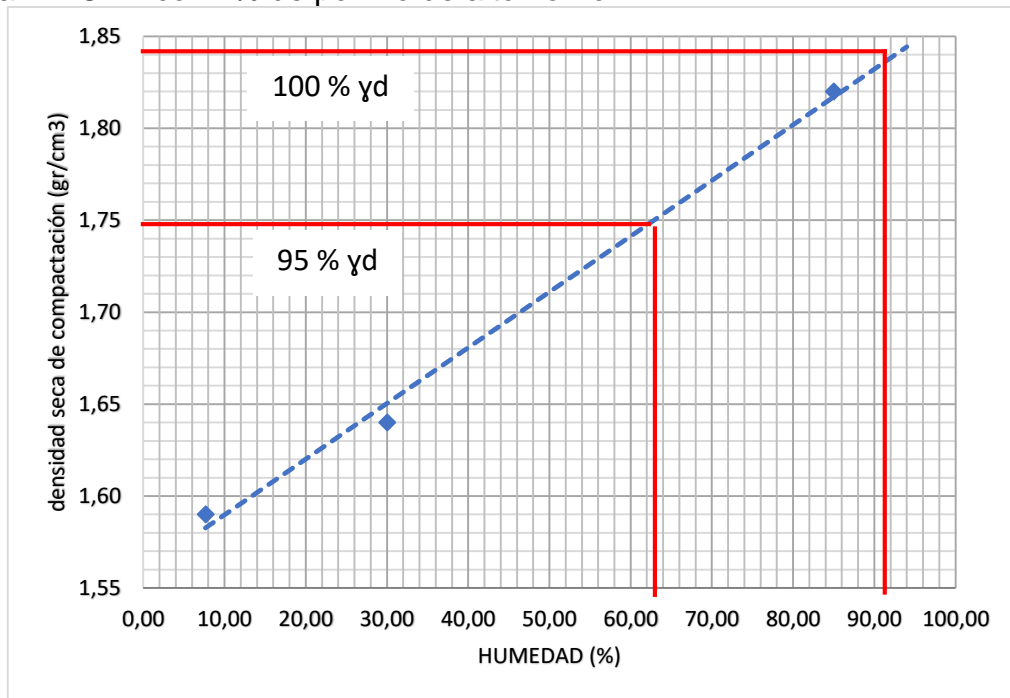
Tabla 43. CBR 2% de polvillo de alto horno por cilindro

| Golpes/capa | 10 | | 25 | | 56 | |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Penetración | 0.1" | 0.2" | 0.1" | 0.2" | 0.1" | 0.2" |
| Esfuerzo | 39 | 115 | 183 | 450 | 475 | 1280 |
| CBR | 4 | 8 | 18 | 30 | 48 | 85 |
| CBR (Mayor) | 8 | | 30 | | 85 | |
| Densidad (g/cm³) | 1.59 | | 1.64 | | 1.82 | |

Fuente: elaboración propia.

En la figura 44 se observa que el valor del CBR obtenido para el 100% de la densidad máxima seca es del 91% y el valor del CBR para el 95% de la densidad máxima seca es del 63%.

Figura 44. CBR con 2% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia.

En la tabla 44 se presentan los valores de las expansiones para cada espécimen de ensayo.

Tabla 44. Expansiones CBR 2% de polvillo de alto horno

| No de golpes | Lectura | | Altura inicial | % Expansión |
|---------------------|----------------|--------------|-----------------------|--------------------|
| | Inicial | Final | | |
| 56 | 184 | 189 | 129 | 3.7% |
| 25 | 115 | 117 | 126 | 1.7% |
| 10 | 163 | 164 | 127 | 1.1% |

Fuente: elaboración propia.

4.3.2 CBR con 4% de polvillo de alto horno. En la tabla 45 se presentan los resultados obtenidos de la penetración.

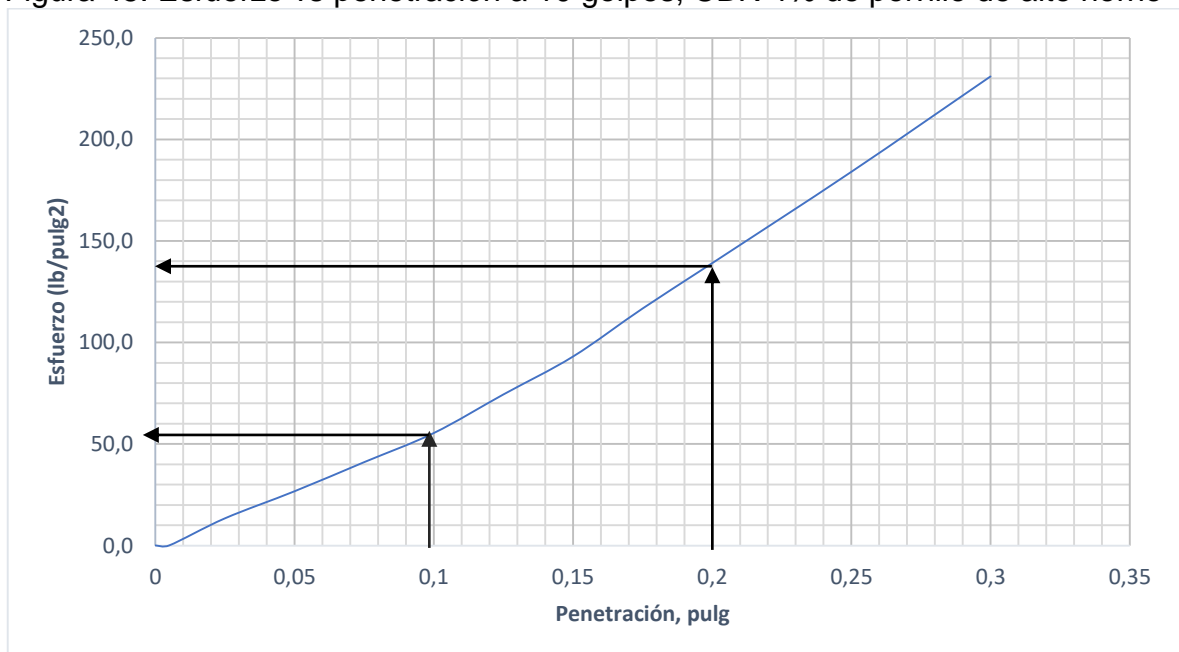
Tabla 45. Ensayo de penetración CBR con 4% de polvillo de alto horno

| Parámetros | 56 golpes/cara | | 25 golpes/cara | | 10 golpes/cara | | |
|------------|--------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|
| | Penetración (pulg) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) |
| 0 | - | 0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.005 | - | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.025 | - | 304 | 101.3 | 191 | 60.0 | 40 | 13.3 |
| 0.05 | - | 673 | 224.3 | 337 | 112.3 | 80 | 26.7 |
| 0.075 | - | 1170 | 390.0 | 482 | 160.7 | 123 | 41.0 |
| 0.1 | - | 1722 | 574.0 | 634 | 211.3 | 166 | 55.3 |
| 0.125 | - | 2428 | 809.3 | 798 | 266.0 | 223 | 74.3 |
| 0.15 | - | 3032 | 1010.7 | 992 | 330.7 | 279 | 93.0 |
| 0.175 | - | 3599 | 1199.7 | 1235 | 411.7 | 350 | 116.7 |
| 0.2 | - | 4110 | 1370.0 | 1480 | 493.3 | 417 | 139.0 |
| 0.25 | - | 5030 | 1676.7 | 1974 | 658.0 | 552 | 184.0 |
| 0.3 | - | 5885 | 1961.7 | 2523 | 841.0 | 693 | 231.0 |

Fuente: elaboración propia

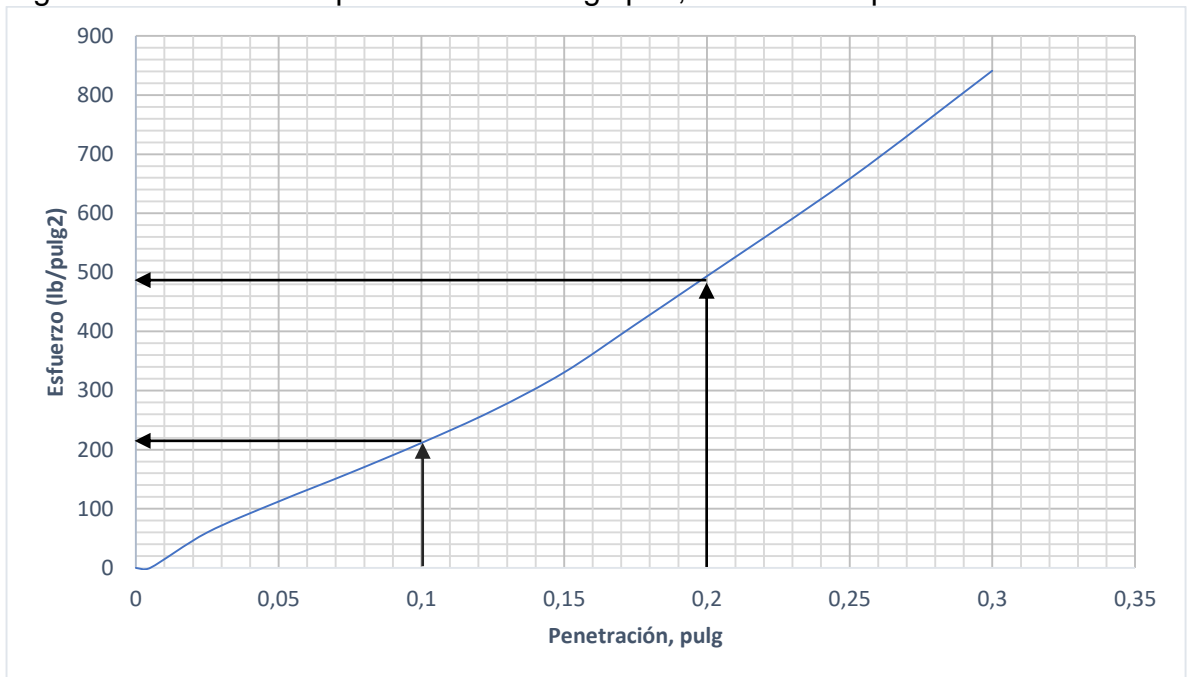
A continuación, se presentan las gráficas esfuerzo vs penetración para cada cilindro.

Figura 45. Esfuerzo vs penetración a 10 golpes, CBR 4% de polvillo de alto horno



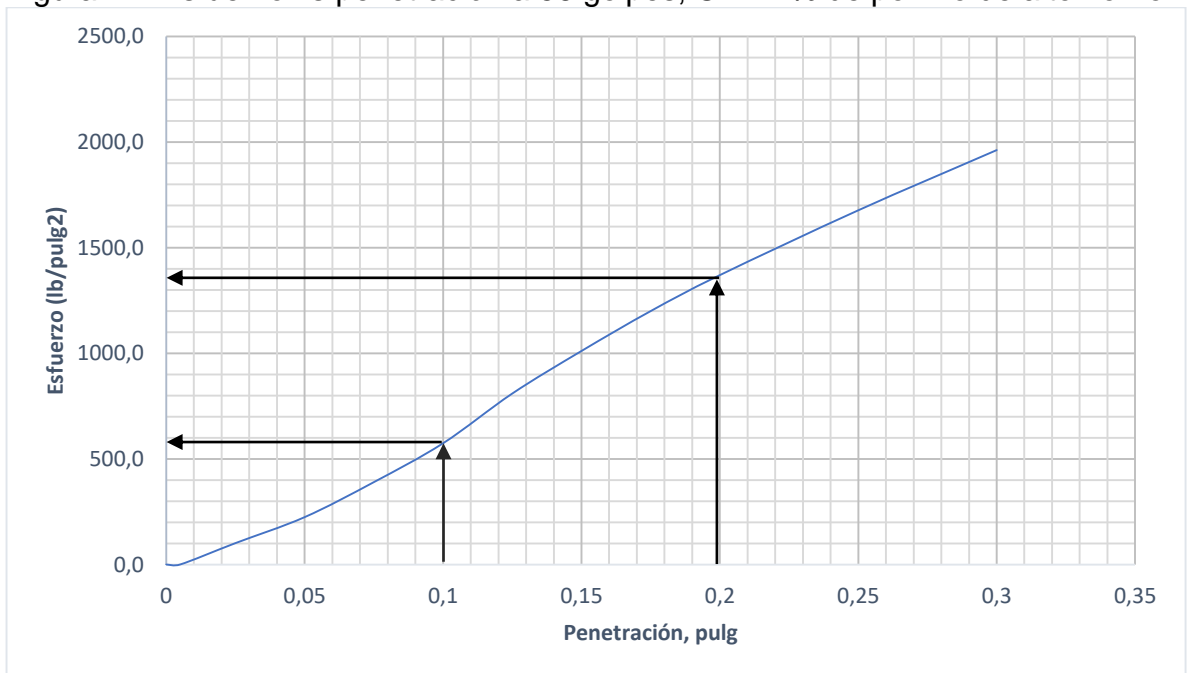
Fuente: elaboración propia

Figura 46. Esfuerzo vs penetración a 25 golpes, CBR 4% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia

Figura 47. Esfuerzo vs penetración a 56 golpes, CBR 4% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia

En la tabla 46 se presenta el esfuerzo, CBR y densidad seca.

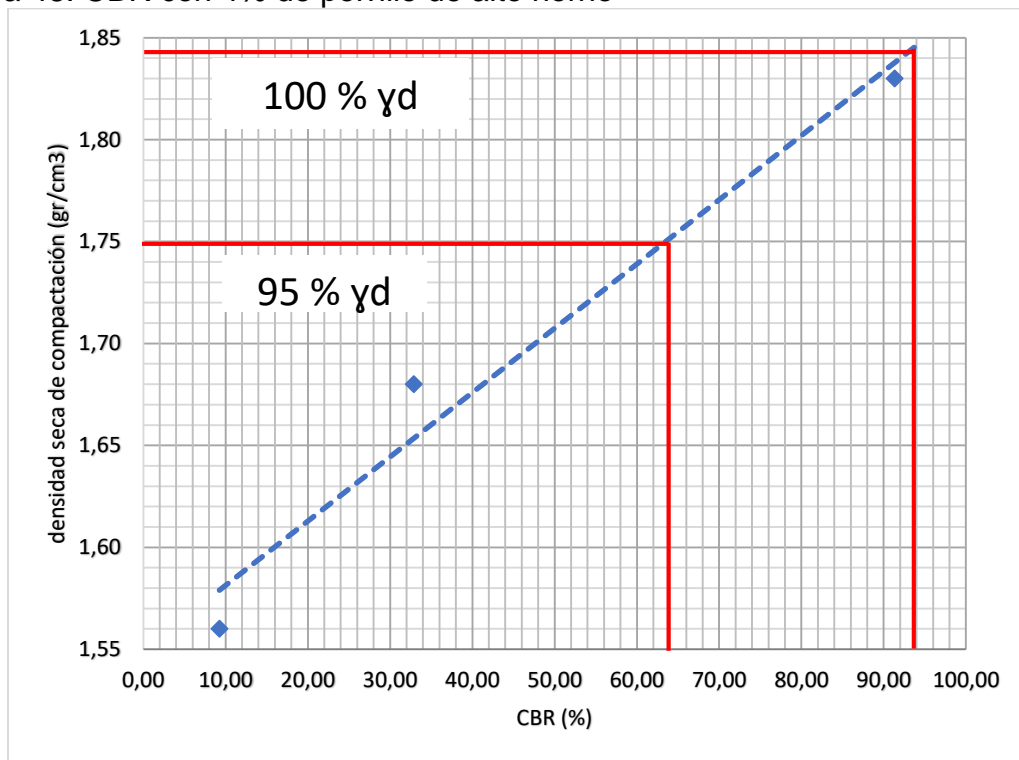
Tabla 46. CBR 4% de polvillo de alto horno por cilindro

| Golpes/capa | 10 | | 25 | | 56 | |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Penetración | 0.1'' | 0.2'' | 0.1'' | 0.2'' | 0.1'' | 0.2'' |
| Esfuerzo | 55 | 140 | 210 | 490 | 810 | 1370 |
| CBR | 6 | 9 | 21 | 33 | 81 | 91 |
| CBR (Mayor) | 9 | | 33 | | 91 | |
| Densidad (g/cm³) | 1.56 | | 1.68 | | 1.83 | |

Fuente: elaboración propia.

En la figura 48 se observa que el valor del CBR obtenido para el 100% de la densidad máxima seca es del 93% y el valor del CBR para el 95% de la densidad máxima seca es del 64%.

Figura 48. CBR con 4% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia.

En la tabla 47 se presentan los valores de las expansiones para cada espécimen de ensayo.

Tabla 47. Expansiones CBR 4% de polvillo de alto horno

| No de golpes | Lectura | | Altura inicial | % Expansión |
|--------------|---------|-------|----------------|-------------|
| | Inicial | Final | | |
| 56 | 98 | 102 | 127 | 3.4% |
| 25 | 152 | 154 | 127 | 1.5% |
| 10 | 79 | 80 | 126 | 1.0% |

Fuente: elaboración propia.

4.3.3 CBR con 6% de polvillo de alto horno. En la tabla 48 se presentan los resultados obtenidos de la penetración.

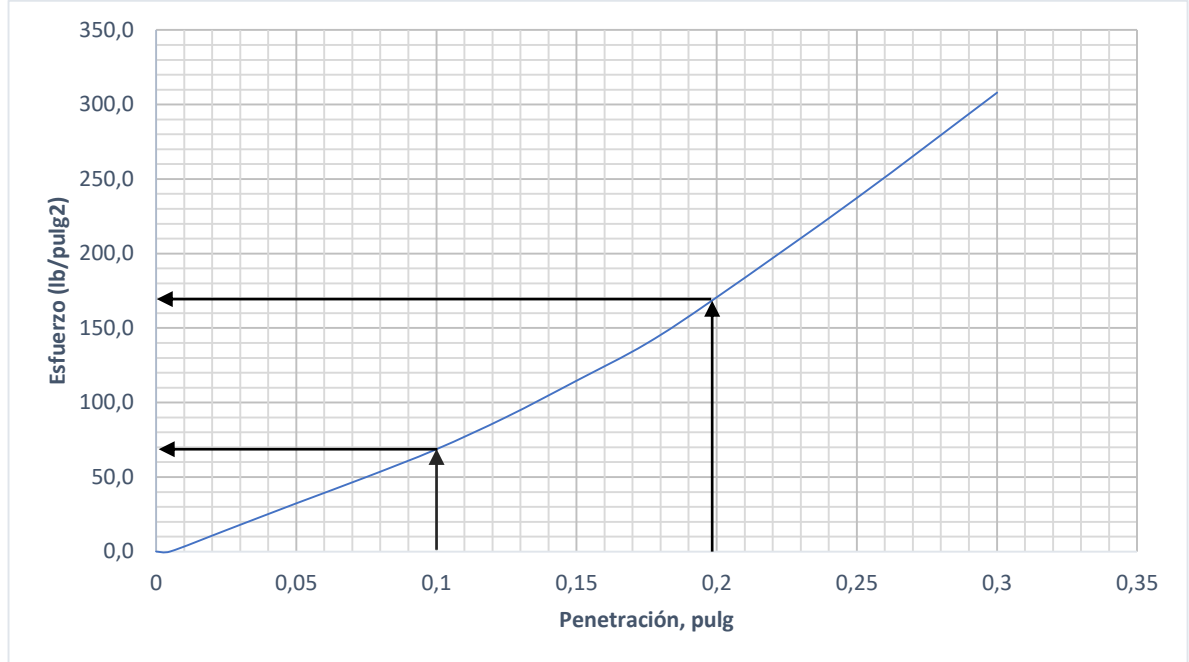
Tabla 48. Ensayo de penetración CBR con 6% de polvillo de alto horno

| Parámetros | | 56 golpes/cara | | 25 golpes/cara | | 10 golpes/cara | |
|--------------------|---|----------------|---------------------------------|----------------|---------------------------------|----------------|---------------------------------|
| Penetración (pulg) | | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) |
| 0 | - | 0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.005 | - | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.025 | - | 385 | 128.3 | 259 | 86.3 | 43 | 14.3 |
| 0.05 | - | 848 | 282.7 | 540 | 180.0 | 97 | 32.3 |
| 0.075 | - | 1378 | 459.3 | 850 | 283.3 | 150 | 50.0 |
| 0.1 | - | 1956 | 652.0 | 1141 | 380.3 | 206 | 68.7 |
| 0.125 | - | 2616 | 872.0 | 1423 | 474.3 | 271 | 90.3 |
| 0.15 | - | 3329 | 1109.7 | 1770 | 590.0 | 344 | 114.7 |
| 0.175 | - | 4075 | 1358.3 | 2097 | 699.0 | 419 | 139.7 |
| 0.2 | - | 4730 | 1576.7 | 2446 | 815.3 | 512 | 170.7 |
| 0.25 | - | 6055 | 2018.3 | 3132 | 1044.0 | 712 | 237.3 |
| 0.3 | - | 7324 | 2441.3 | 3853 | 1284.3 | 924 | 308.0 |

Fuente: elaboración propia

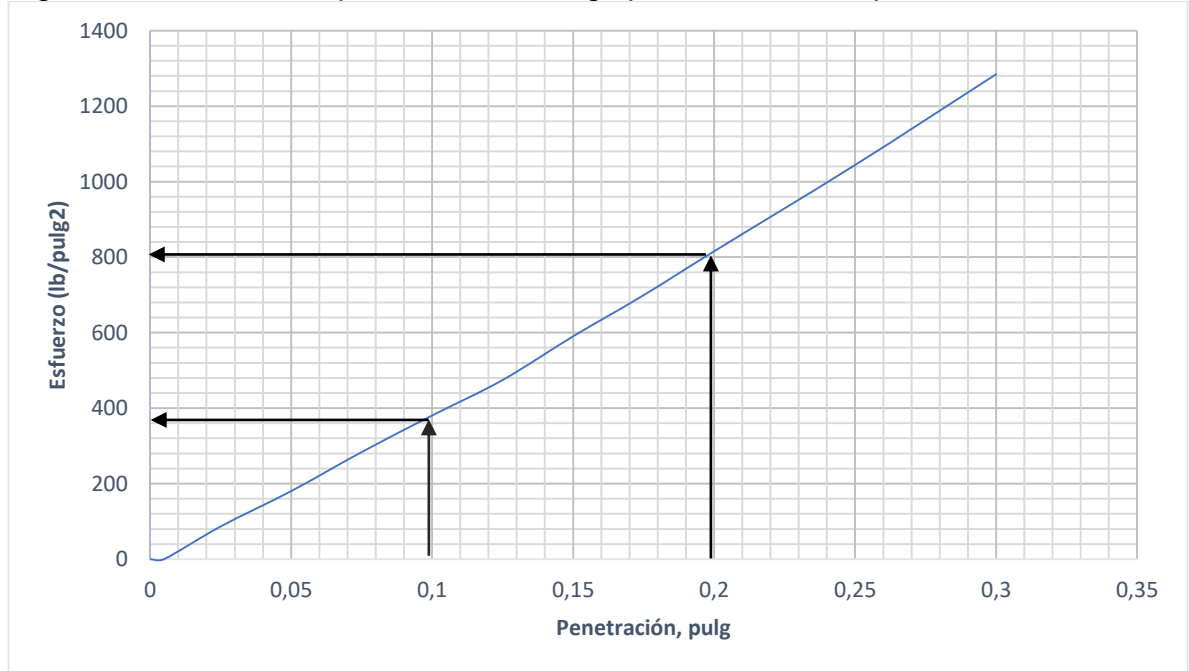
A continuación, se presentan las gráficas esfuerzo vs penetración para cada cilindro.

Figura 49. Esfuerzo vs penetración a 10 golpes, CBR 6% de polvillo de alto horno



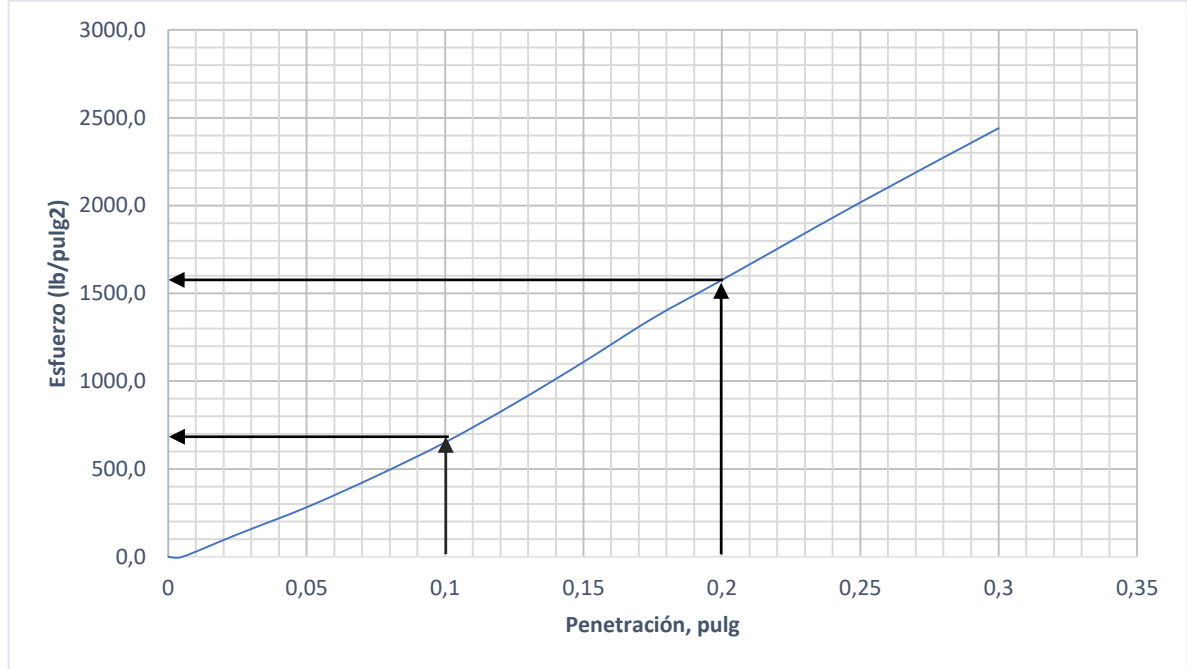
Fuente: elaboración propia.

Figura 50. Esfuerzo vs penetración a 25 golpes, CBR 6% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia

Figura 51. Esfuerzo vs penetración a 56 golpes, CBR 6% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia

En la tabla 49 se presenta el esfuerzo, CBR y densidad seca.

Tabla 49. CBR 6% de polvillo de alto horno por cilindro

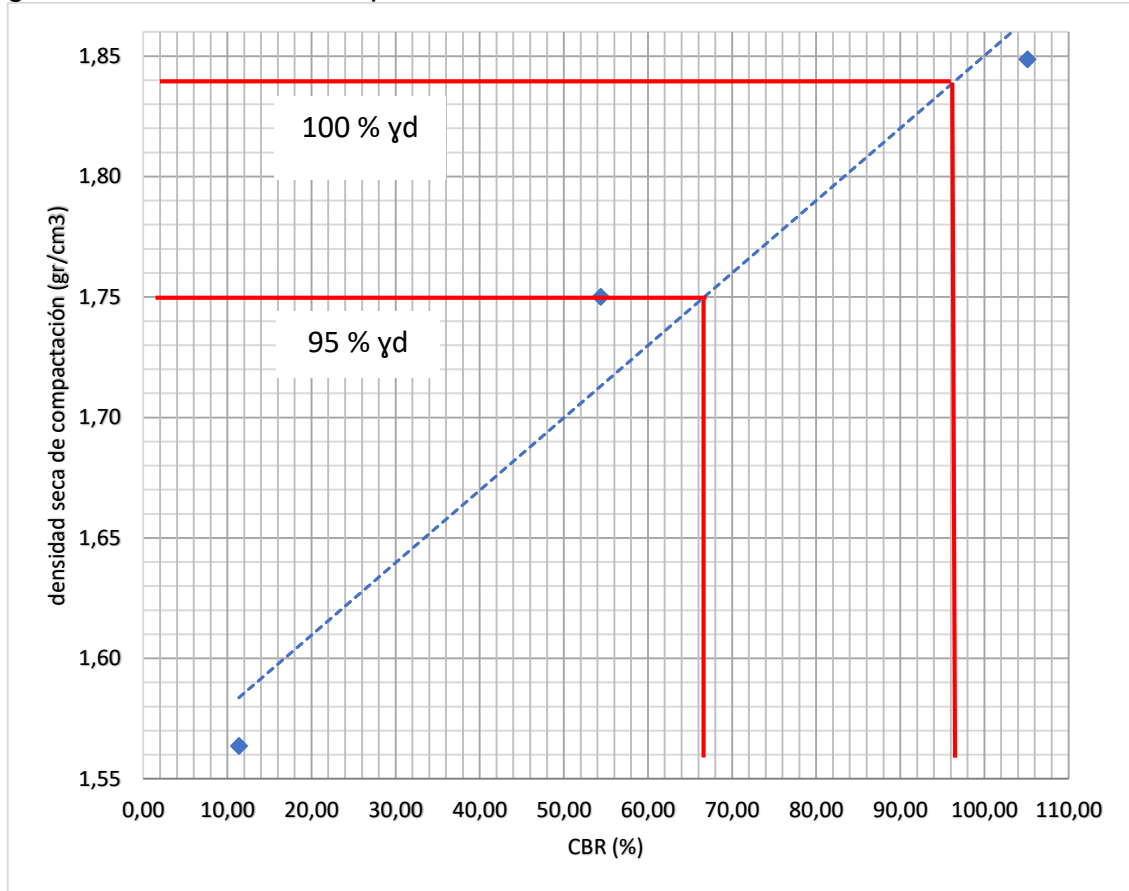
| Golpes/capa | 10 | | 25 | | 56 | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Penetración | 0.1" | 0.2" | 0.1" | 0.2" | 0.1" | 0.2" |
| Esfuerzo | 70 | 170 | 380 | 815 | 650 | 1570 |
| CBR | 7 | 11 | 38 | 54 | 65 | 105 |
| CBR (Mayor) | 11 | | 54 | | 105 | |
| Densidad (g/cm³) | 1.56 | | 1.75 | | 1.85 | |

Fuente: elaboración propia.

En la figura 52 se observa que el valor del CBR obtenido para el 100% de la densidad máxima seca es del 96% y el valor del CBR para el 95% de la densidad máxima seca es del 67%.

En la tabla 50 se presentan los valores de las expansiones para cada espécimen de ensayo.

Figura 52. CBR con 6% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia.

Tabla 50. Expansiones CBR 6% de polvillo de alto horno

| No de golpes | Lectura | | Altura inicial | % Expansión |
|--------------|---------|-------|----------------|-------------|
| | Inicial | Final | | |
| 56 | 99 | 103 | 124 | 3.2% |
| 25 | 131 | 133 | 126 | 1.4% |
| 10 | 182 | 183 | 127 | 0.9% |

Fuente: elaboración propia.

4.3.4 CBR con 8% de polvillo de alto horno. En la tabla 51 se presentan los resultados obtenidos de la penetración.

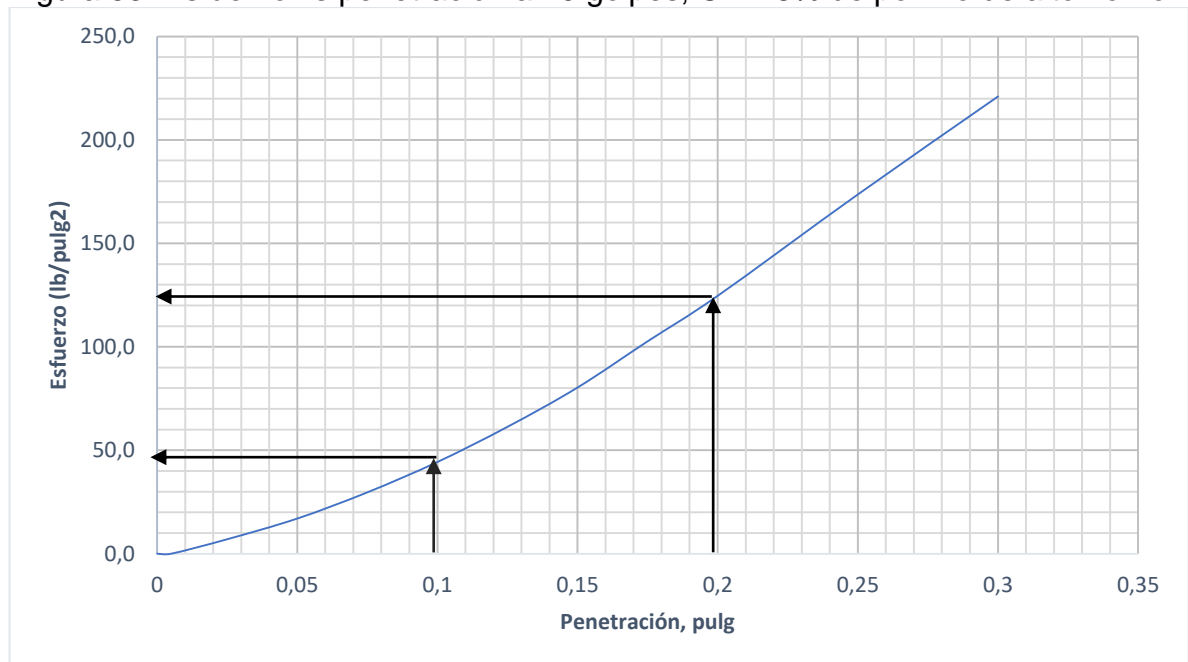
Tabla 51. Ensayo de penetración CBR con 8% de polvillo de alto horno

| Parámetros | 56 golpes/cara | | 25 golpes/cara | | 10 golpes/cara | | |
|------------|--------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|
| | Penetración (pulg) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) |
| 0 | - | 0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.005 | - | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.025 | - | 237 | 79.0 | 120 | 40.0 | 21 | 7.0 |
| 0.05 | - | 500 | 166.7 | 237 | 79.0 | 51 | 17.0 |
| 0.075 | - | 901 | 300.3 | 356 | 118.7 | 89 | 29.7 |
| 0.1 | - | 1362 | 454.0 | 510 | 170.0 | 133 | 44.3 |
| 0.125 | - | 2015 | 671.7 | 668 | 222.7 | 184 | 61.3 |
| 0.15 | - | 2594 | 864.7 | 838 | 279.3 | 241 | 80.3 |
| 0.175 | - | 3211 | 1070.3 | 1036 | 345.3 | 308 | 102.7 |
| 0.2 | - | 3808 | 1269.3 | 1257 | 419.0 | 374 | 124.7 |
| 0.25 | - | 4993 | 1664.3 | 1660 | 553.3 | 521 | 173.7 |
| 0.3 | - | 6207 | 2069.0 | 2073 | 691.0 | 663 | 221.0 |

Fuente: elaboración propia

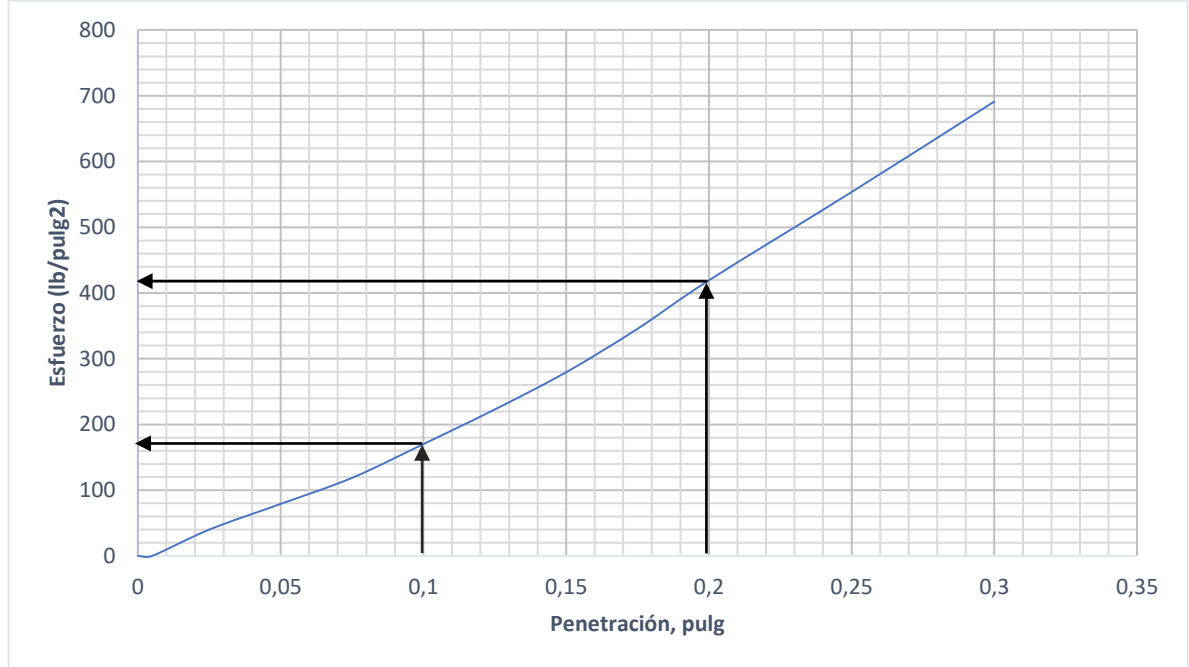
A continuación, se presentan las gráficas esfuerzo vs penetración para cada cilindro.

Figura 53. Esfuerzo vs penetración a 10 golpes, CBR 8% de polvillo de alto horno



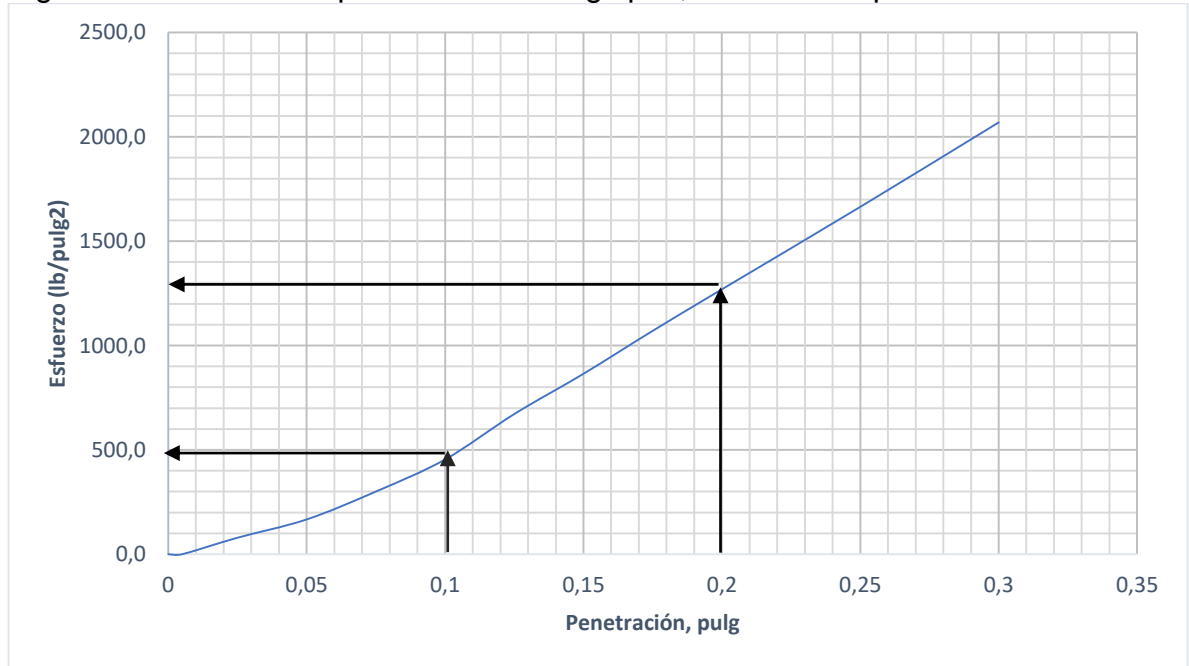
Fuente: elaboración propia.

Figura 54. Esfuerzo vs penetración a 25 golpes, CBR 8% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia

Figura 55. Esfuerzo vs penetración a 56 golpes, CBR 8% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia

En la tabla 52 se presenta el esfuerzo, CBR y densidad seca.

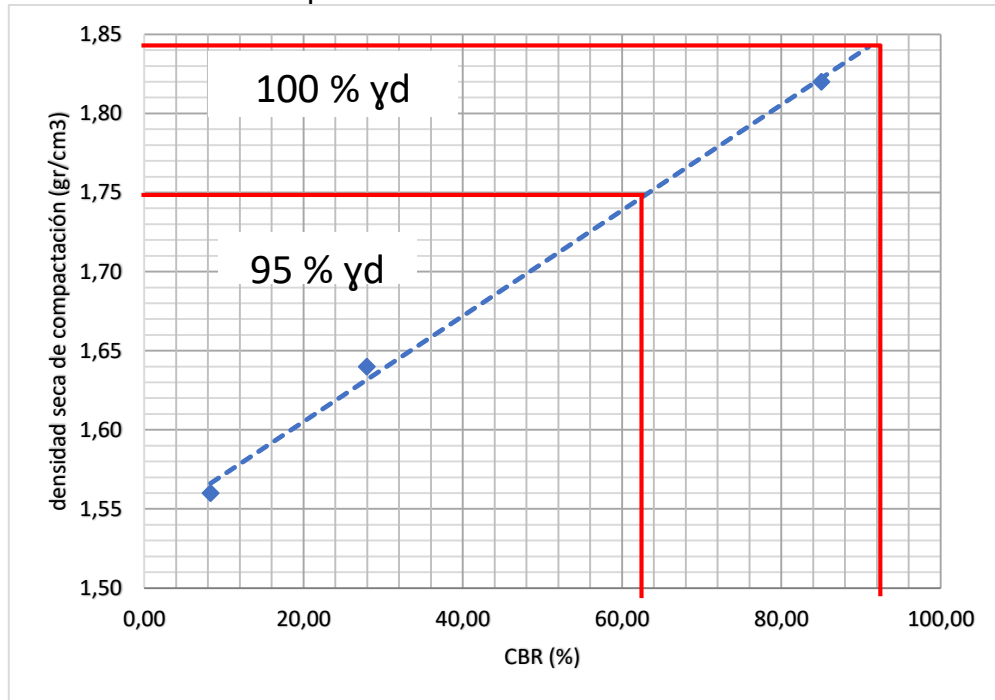
Tabla 52. CBR 8% de polvillo de alto horno por cilindro

| Golpes/capa | 10 | | 25 | | 56 | |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Penetración | 0.1" | 0.2" | 0.1" | 0.2" | 0.1" | 0.2" |
| Esfuerzo | 44 | 125 | 170 | 420 | 450 | 1270 |
| CBR | 4 | 8 | 17 | 28 | 45 | 85 |
| CBR (Mayor) | 8 | | 28 | | 85 | |
| Densidad (g/cm³) | 1.58 | | 1.64 | | 1.82 | |

Fuente: elaboración propia.

En la figura 56 se observa que el valor del CBR obtenido para el 100% de la densidad máxima seca es del 92% y el valor del CBR para el 95% de la densidad máxima seca es del 63%.

Figura 56. CBR con 8% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia.

En la tabla 53 se presentan los valores de las expansiones para cada espécimen de ensayo.

Tabla 53. Expansiones CBR 8% de polvillo de alto horno

| No de golpes | Lectura | | Altura inicial | % Expansión |
|---------------------|----------------|--------------|-----------------------|--------------------|
| | Inicial | Final | | |
| 56 | 171 | 174 | 129 | 2.7% |
| 25 | 196 | 198 | 126 | 1.2% |
| 10 | 110 | 111 | 127 | 0.8% |

Fuente: elaboración propia.

4.3.5 CBR con 10% de polvillo de alto horno. En la tabla 54 se presentan los resultados obtenidos de la penetración.

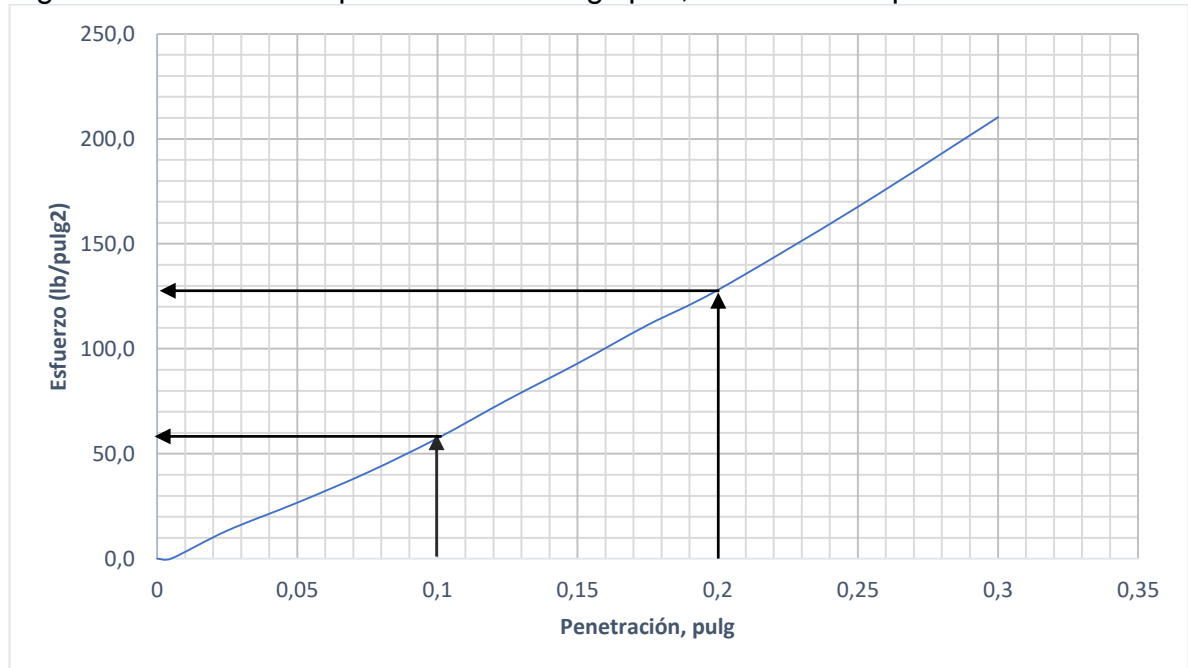
Tabla 54. Ensayo de penetración CBR con 10% de polvillo de alto horno

| Parámetros | 56 golpes/cara | | 25 golpes/cara | | 10 golpes/cara | | |
|------------|--------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|
| | Penetración (pulg) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) | Carga(Lb) | Esfuerzo(lb/pulg ²) |
| 0 | - | 0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.005 | - | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.025 | - | 230 | 76.7 | 133 | 44.3 | 40 | 13.3 |
| 0.05 | - | 566 | 188.7 | 262 | 87.3 | 80 | 26.7 |
| 0.075 | - | 936 | 312.0 | 394 | 131.3 | 123 | 41.0 |
| 0.1 | - | 1439 | 479.7 | 564 | 188.0 | 172 | 57.3 |
| 0.125 | - | 1953 | 651.0 | 739 | 246.3 | 227 | 75.7 |
| 0.15 | - | 2514 | 838.0 | 927 | 309.0 | 279 | 93.0 |
| 0.175 | - | 3112 | 1037.3 | 1146 | 382.0 | 334 | 111.3 |
| 0.2 | - | 3690 | 1230.0 | 1391 | 463.7 | 384 | 128.0 |
| 0.25 | - | 4839 | 1613.0 | 1837 | 612.3 | 503 | 167.7 |
| 0.3 | - | 6016 | 2005.3 | 2294 | 764.7 | 631 | 210.3 |

Fuente: elaboración propia

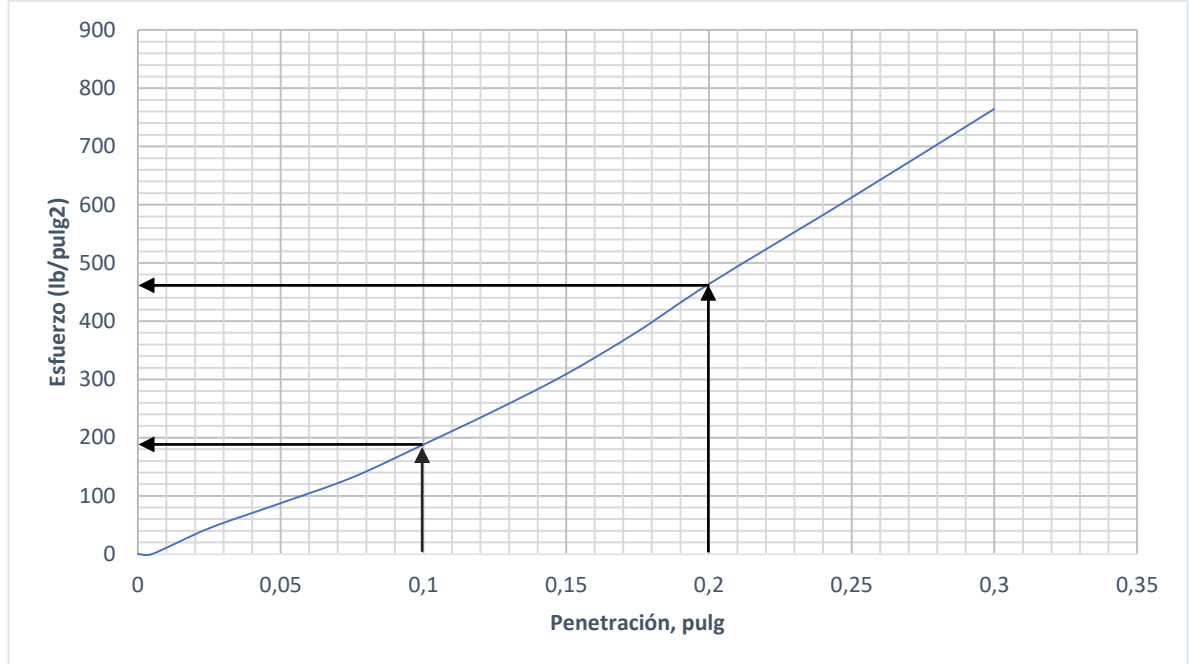
A continuación, se presentan las gráficas esfuerzo vs penetración para cada cilindro.

Figura 57. Esfuerzo vs penetración a 10 golpes, CBR 10% de polvillo de alto horno



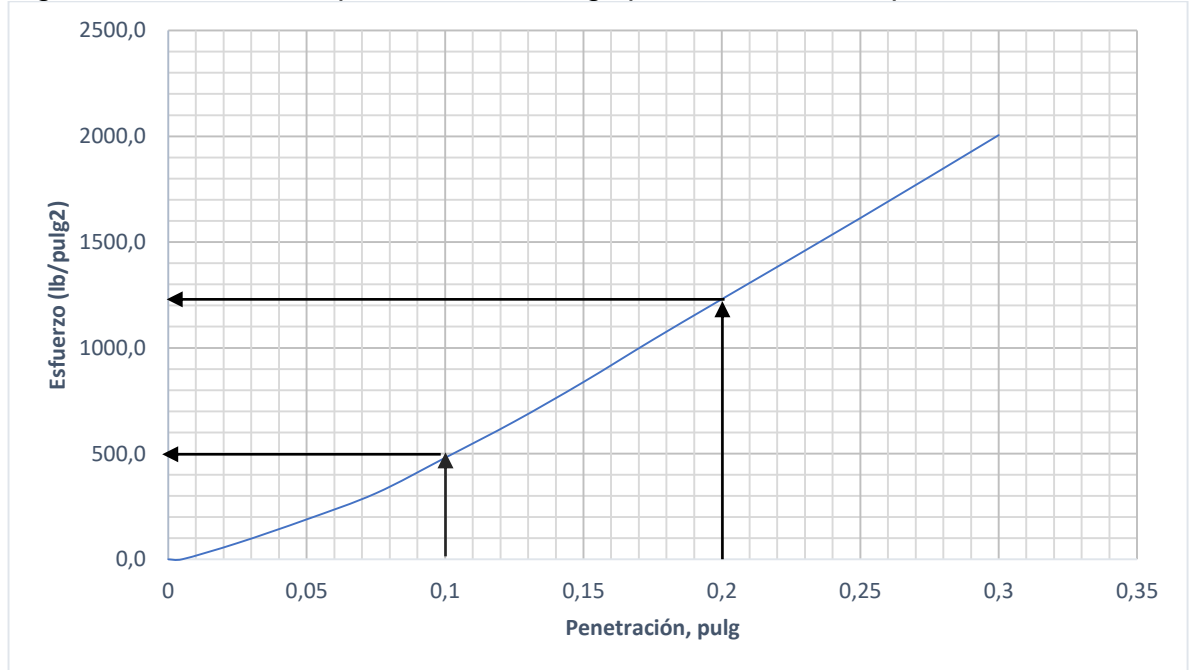
Fuente: elaboración propia.

Figura 58. Esfuerzo vs penetración a 25 golpes, CBR 10% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia

Figura 59. Esfuerzo vs penetración a 56 golpes, CBR 10% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia

En la tabla 55 se presenta el esfuerzo, CBR y densidad seca.

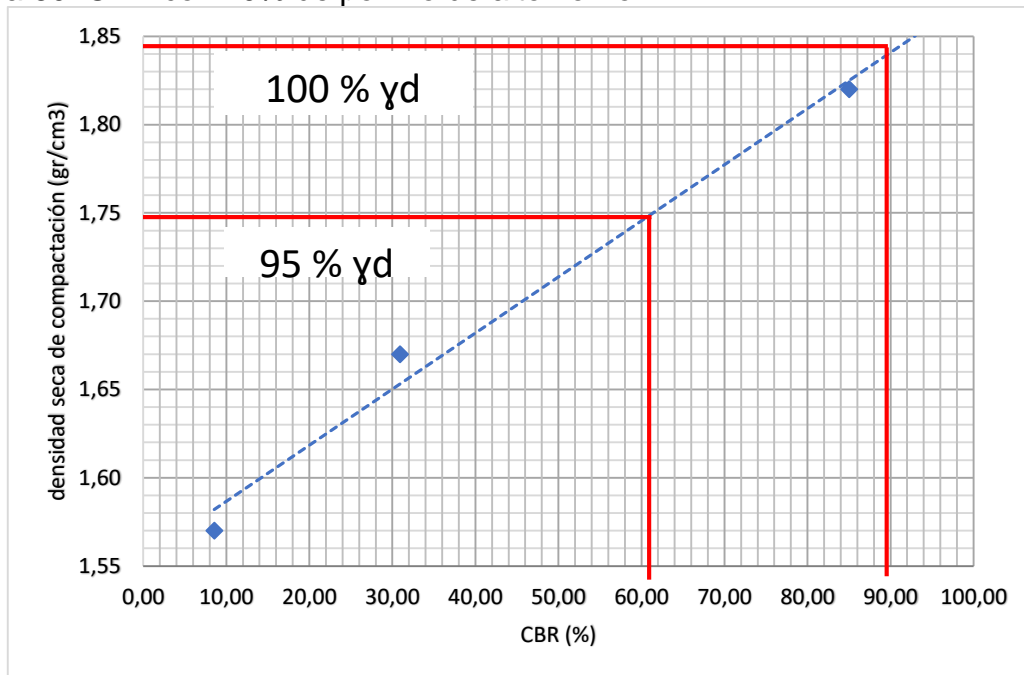
Tabla 55. CBR 10% de polvillo de alto horno por cilindro

| Golpes/capa | 10 | | 25 | | 56 | |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 0.1" | 0.2" | 0.1" | 0.2" | 0.1" | 0.2" |
| Penetración | 55 | 130 | 190 | 460 | 480 | 1250 |
| Esfuerzo | 6 | | 19 | 31 | 48 | 82 |
| CBR | 9 | | 31 | | 82 | |
| CBR (Mayor) | 9 | | 31 | | 82 | |
| Densidad (g/cm ³) | 1.57 | | 1.67 | | 1.82 | |

Fuente: elaboración propia.

En la figura 60 se observa que el valor del CBR obtenido para el 100% de la densidad máxima seca es del 89% y el valor del CBR para el 95% de la densidad máxima seca es del 61%.

Figura 60. CBR con 10% de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia.

En la tabla 56 se presentan los valores de las expansiones para cada espécimen de ensayo.

Tabla 56. Expansiones CBR 10% de polvillo de alto horno

| No de golpes | Lectura | | Altura inicial | % Expansión |
|--------------|---------|-------|----------------|-------------|
| | Inicial | Final | | |
| 56 | 129 | 132 | 129 | 2.5% |
| 25 | 91 | 92 | 127 | 1.0% |
| 10 | 79 | 80 | 126 | 0.8% |

Fuente: elaboración propia.

4.4 RESUMEN CBR Y EXPANSIONES

Los valores de CBR obtenidos para cada mezcla variando el porcentaje de polvillo se presentan en la tabla 57.

Tabla 57. Resumen valores de CBR variando el % de polvillo de alto horno

| % de polvillo de alto horno | CBR (%) |
|------------------------------------|----------------|
| 0 | 90 |
| 2 | 91 |
| 4 | 93 |
| 6 | 96 |
| 8 | 92 |
| 10 | 89 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores de las expansiones obtenidas para cada mezcla variando el porcentaje de polvillo se presentan en la tabla 58.

Tabla 58. Resumen de expansiones variando el % de polvillo de alto horno.

| No de golpes | Expansiones | | | | |
|---------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| | 2% | 4% | 6% | 8% | 10% |
| 56 | 3.70% | 3.40% | 3.20% | 2.70% | 2.50% |
| 25 | 1.70% | 1.50% | 1.40% | 1.20% | 1.00% |
| 10 | 1.10% | 1.00% | 0.90% | 0.80% | 0.80% |

Fuente: elaboración propia.

5. DETERMINACIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES POR MEDIO DE CORRELACIONES

A continuación, se presenta el ejemplo de cálculo del módulo resiliente para el valor del CBR correspondiente al material sin polvillo de alto horno usando las ecuaciones presentadas en el numeral 1.6.

5.1. AASHTO 1993

La ecuación a utilizar es:

$$Mr_{BG} = 10^{\left(\frac{0.032 * CBR^{0.32} + 0.977}{0.249}\right)}$$

Donde:

- Mr_{BG} = módulo resiliente de la base granular, lb/pulg².
- CBR = CBR del suelo, %.

$$Mr_{BG} = 10^{\left(\frac{0.032 * 90^{0.32} + 0.977}{0.249}\right)}$$

$$Mr_{BG} = 29247 \text{ lb/pulg}^2$$

5.2. SHELL 1978

$$Mr_{BG} = 0.206(hbg)^{0.45} * Mr_{SBG}$$

Donde:

- Mr_{BG} = módulo resiliente de la base granular, Kg/cm².
- Hbg= espesor base granular, mm.
- Mr_{SBG} = Modulo resiliente subbase granular, Kg/cm².

$$Mr_{BG} = 0.206(250)^{0.45} * 1147$$

$$Mr_{BG} = 2835 \text{ Kg/cm}^2$$

5.3. AASHTO ROAD TEST y en la Guía AASHTO-93

$$Mr = 4326 \ln(CBR) + 241$$

Donde:

- Mr_{BG} = módulo resiliente de la base granular, lb/pulg².
- CBR = CBR del suelo, %.

$$Mr = 4326 \ln(90) + 241$$

$$Mr = 19707 \text{ Lb/pulg}^2$$

5.4. MCDOWELL Y HAU 2004

$$Mr_{BG} = Mrsbg * (8.05 * \log hbg + 0.84 * \log Mrsbg - 2.10 * \log hbg * \log Mrsbg - 2.21)$$

Donde:

- Mr_{BG} = módulo resiliente de la base granular, Kg/cm².
- Hbg= espesor base granular, cm.
- Mr_{SBG} = Modulo resiliente subbase granular, Kg/cm².

$$Mr_{BG} = 1147 * (8.05 * \log 25 + 0.84 * \log 1147 - 2.10 * \log 25 * \log 1147 - 2.21)$$

$$Mr_{BG} = 3018 \text{ Kg/cm}^2$$

5.5. PROGRAMA PAS (PAVEMENT ANALYSIS SYSTEM) DE LA ASOCIACIÓN DE AMERICANA DE PAVIMENTOS DE CONCRETO DE ESTADOS UNIDOS. (SUBBASES Y BASES GRANULARES)

$$Mrbg = 321.05 * CBR + 13327$$

Donde:

- Mr_{BG} = módulo resiliente de la base granular, lb/pulg².
- CBR = CBR del suelo, %.

$$Mrbg = 321.05 * 90 + 13327$$

$$Mr_{BG} = 2970 \text{ Kg/cm}^2$$

5.6 ECUACIÓN DE BARKER.

$$Mrbg = Mr_{SBG}(1 + 10.52 * \log hbg - 2.10 * \log Mrsbg * \log hbg)$$

Donde:

- Mr_{BG} = módulo resiliente de la base granular, lb/pulg².
- Hbg = espesor base granular, pulg.
- Mr_{SBG} = Modulo resiliente subbase granular, lb/pulg².

$$Mrbg = 16305(1 + 10.52 * \log 9.8 - 2.10 * \log 16305 * \log 9.8)$$

$$Mr_{BG} = 43414 \text{ Lb/pulg}^2$$

En la tabla 59 se presentan los resultados obtenidos de módulo resiliente para las distintas variaciones de polvillo de alto horno.

Tabla 59. Módulos resilientes obtenidos por medio de correlaciones

| % de polvillo | CBR | MODULO RESILIENTE, Kg/cm ² | | | | | |
|---------------|-----|---------------------------------------|-------|------------------|----------|------|--------|
| | | AASHTO | SHELL | AASHTO ROAD TEST | MCDOWELL | PAS | BARKER |
| 0 | 90 | 2057 | 2835 | 1386 | 3018 | 2970 | 3054 |
| 2 | 91 | 2066 | 2835 | 1390 | 3018 | 2993 | 3054 |
| 4 | 93 | 2085 | 2835 | 1396 | 3018 | 3038 | 3054 |
| 6 | 96 | 2112 | 2835 | 1406 | 3018 | 3106 | 3054 |
| 8 | 92 | 2076 | 2835 | 1393 | 3018 | 3015 | 3054 |
| 10 | 89 | 2048 | 2835 | 1383 | 3018 | 2947 | 3054 |

Fuente: elaboración propia.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para verificar la idoneidad del polvillo de alto horno como estabilizante de bases granulares se presenta la comparación de los resultados obtenidos del material sin polvillo y el material con las mezclas realizadas, se evaluarán aspectos como: la plasticidad, el CBR y el potencial de expansión de las mezclas.

6.1 LÍMITES DE ATTERBERG

En la tabla 60 se presentan los resultados tanto del límite líquido como del límite plástico, donde es posible determinar que a más cantidad de polvillo va disminuyendo el valor de los límites, teniendo como resultado final una mezcla no plástica, la cual satisface los criterios exigidos por el INVIAS.

Tabla 60. Límites de Atterberg variando cantidad de polvillo de alto horno

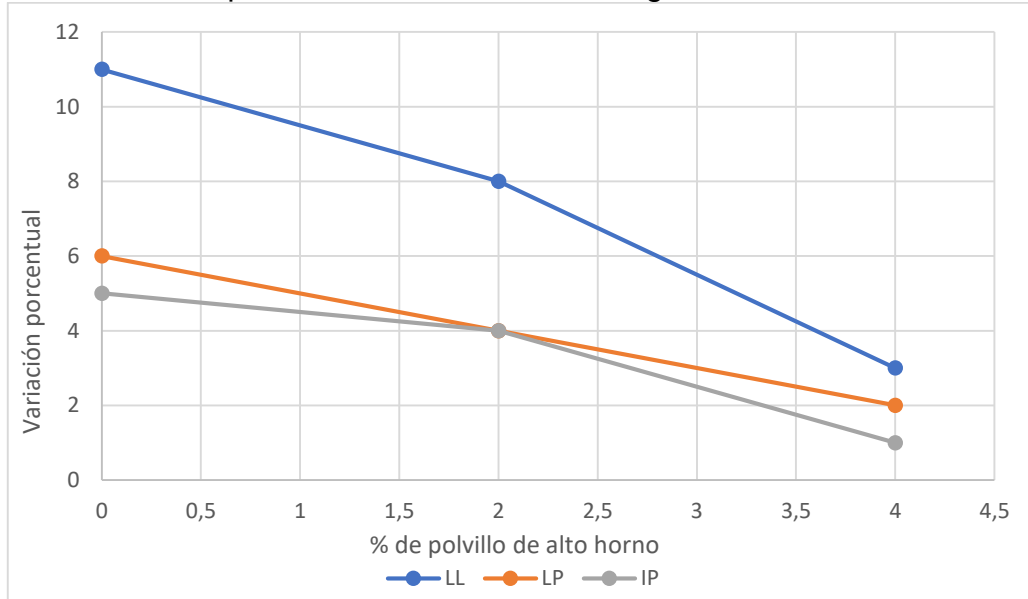
| % de polvillo de alto horno | Límites | | |
|-----------------------------|------------|-------------|-------|
| | Líquido, % | Plástico, % | IP, % |
| 0 | 11 | 6 | 5 |
| 2 | 8 | 4 | 4 |
| 4 | 3 | 2 | 1 |
| 6 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 |

Fuente: elaboración propia.

En la figura 61 se observa la variación de los límites (líquido y plástico) y del índice de plasticidad de las mezclas; de acuerdo a la tabla 63 fue posible determinar los límites de la mezcla hasta el 4% de polvillo de alto horno.

El polvillo de alto horno mejoró de manera notable la plasticidad del material, el cual dejó de ser un material plástico a medida que se aumentó el porcentaje de polvillo.

Figura 61. Variación porcentual límites de Atterberg

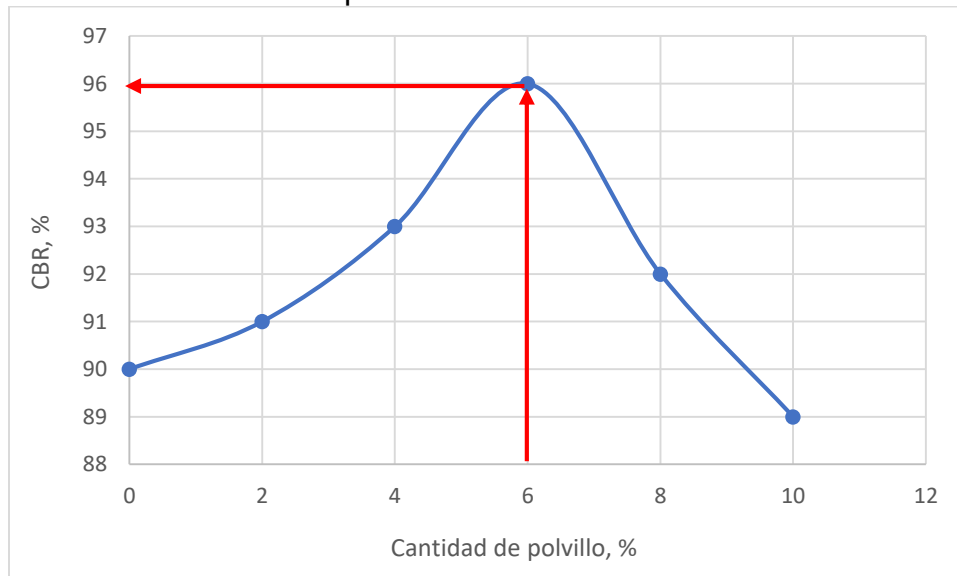


Fuente: elaboración propia.

6.2 CBR

En la figura 62 se observa el comportamiento de los valores de CBR al variar la cantidad de polvillo. Es posible determinar que al aumentar la cantidad de polvillo aumenta el valor del CBR hasta un punto de quiebre, donde a partir de este, el valor de CBR comienza a decaer, es decir el polvillo deja de producir un efecto positivo y comienza a ser nocivo para la mezcla.

Figura 62. CBR vs cantidad de polvillo de alto horno



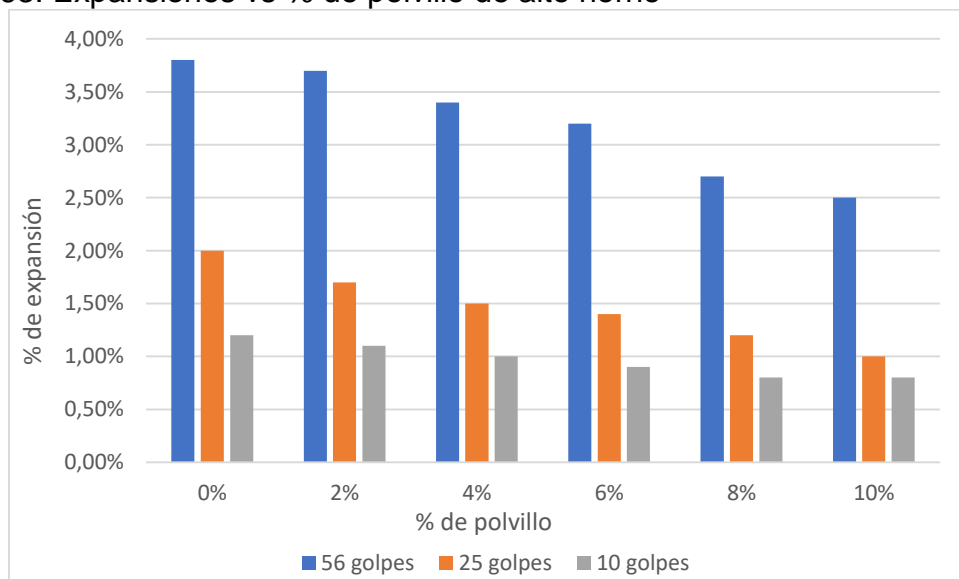
Fuente: elaboración propia.

De la figura 62 es posible deducir que el 6% de polvillo es el valor óptimo a usar para agregado, ya que produce el máximo valor de CBR, siendo este valor el único en cumplir con los requisitos del INVIAS.

6.3 EXPANSIONES

En la figura 63 se observa la variación de las expansiones medidas durante el tiempo de inmersión en el ensayo de CBR. De donde es posible apreciar la disminución de las expansiones ocasionadas por la infiltración del agua en el cilindro de CBR.

Figura 63. Expansiones vs % de polvillo de alto horno



Fuente: elaboración propia.




De lo anterior se puede decir que el polvillo de alto horno mejora el potencial expansivo del material, mejorando así la estabilidad volumétrica de la mezcla al momento de ser compactada.





6.4 ENSAYO ESTABILIDAD HÍDRICA

El objetivo del ensayo es determinar el comportamiento mediante la observación directa de la probeta de material al estar gran parte de ésta (2/3 partes de la probeta) sumergida en el agua. La comparación se hizo entre una probeta con 0% de polvillo y otra con el porcentaje óptimo es decir con el 6% de polvillo de alto horno.

En la tabla 61 se presenta la descripción visual de cada una de las probetas.

Tabla 61. Ensayo de estabilidad hídrica

| Foto | Descripción |
|---|---|
|  | <p>Las probetas utilizadas para el ensayo fueron elaboradas en el compactador giratorio, las cuales tienen una altura aproximada de 20 cm</p> |
|  | <p>Las muestras se dejaron 24 horas en curado. Con el objetivo de que la humedad al momento de realizar el ensayo fuera la menor posible y evitar un colapso prematuro de estas.</p> |
|  | <p>Al lado derecho de la imagen se observa la probeta sin polvillo de alto horno, y al lado izquierdo la probeta con 6% de polvillo. Estas fueron sumergidas luego de las 24 horas de curado. La altura del agua era de 13 cm aproximadamente, es decir 2/3 de la altura de las muestras.</p> |

| | |
|---|--|
|  | <p>Luego de la inmersión se comienza a observar el desprendimiento de material de las probetas en especial de la que no tiene polvillo, ya que el agua comienza a penetrar los vacíos de la probeta.</p> |
|  | <p>Luego de 30 minutos de sumergimiento se empieza a observar de una manera más notoria la pérdida de agregado de la probeta.</p> |
|  | <p>Al transcurrir 1 hora la probeta sin polvillo fallo totalmente y en la probeta con 6% de polvillo comienza a presentar pérdida de agregado.</p> |
|  | <p>A las 2 horas de haber iniciado el ensayo se produce el fallo total de la probeta con polvillo de alto horno. Dando por finalizado el ensayo.</p> |

Fuente: elaboración propia.

7. MECANICA DE PAVIMENTOS

Una vez determinado el porcentaje óptimo de polvillo de alto horno, se realizó la comparación de estados tensionales en una estructura de pavimento utilizando el módulo resiliente obtenido de la base granular sin polvillo de alto horno y un modelo estructural donde fue usado el módulo resiliente de la base granular con 6% de polvillo.

En el capítulo 5 fue calculado el módulo resiliente de la base granular usando 6 diferentes correlaciones; de los módulos calculados se tomaron los obtenidos por la ecuación propuesta por la AASHTO; debido a que estos valores son los que más se aproximan a los valores típicos en Colombia presentados en la tabla 2.

7.1. CÁLCULO DE ESTRUCTURAS EQUIVALENTES

El dimensionamiento de las estructuras debe ser tal que los valores de servicio sean similares para así poder compararlas, ya que, si los valores de servicio varían en gran medida, la estructura se podría considerar sobredimensionada y por ende el costo de esa estructura aumentaría notoriamente.

Los valores supuestos para el diseño de la estructura son los siguientes:

- Tránsito de diseño: $N = 5.0 \times 10^6$ ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño, NT2.
- Porcentaje del volumen de asfalto de la mezcla: $V_b = 11 \%$
- Factor de Calage: $K = 2$
- Nivel de confianza: $NC = 85\%$

7.2 CÁLCULO DE VALORES ADMISIBLES

Los valores admisibles de la estructura de pavimento son calculados con las siguientes expresiones.

- Deformación radial admisible de tracción en la base de la carpeta asfáltica, ξ_{radm} :

$$\xi_r \text{ adm} = (0.856 * V_b + 1.08) * E1^{-0.36} * \left(\frac{N}{K}\right)^{-0.20}$$

Donde:

- ϵ_{radm} = Deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica.
- V_b = Porcentaje en volumen de asfalto de la mezcla, %
- E_1 = Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en N/m^2
- N = Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.
- K = Coeficiente de Calage.

$$\xi_r adm = (0.856 * 11 + 1.08) * 1.96E09^{-0.36} * \left(\frac{5 * 10^6}{2}\right)^{-0.20} = 2.49 * 10^{-4}$$

- Deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante, ξ_{zadm} :

$$\xi_z adm = 2.1 * 10^{-2} * N^{-0.25}$$

Donde:

- ϵ_{zAdm} = Deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante.
- N = Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

$$\xi_z adm = 2.1 * 10^{-2} * (5 * 10^6)^{-0.25} = 4.44 * 10^{-4}$$

- Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante, σ_{zadm} :

DORMON – KERHOVEN

$$\sigma_z adm = \frac{0.007 * E_{sub}}{1 + 0.7 * \log N}$$

Donde:

- σ_{zAdm} = Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante, Kg/cm^2
- E_{sub} = Módulo resiliente de la subrasante, Kg/cm^2
- N = Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

$$\sigma_{z \text{ adm}} = \frac{0.007 * 500}{1 + 0.7 * \log 5 * 10^6} = 0.6152 \text{ Kg/cm}^2$$

CRR

$$\sigma_{z \text{ adm}} = \frac{0.9607 * CBR^{1.2}}{N^{0.229}}$$

Donde:

- σ_{zAdm} = Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante, Kg/cm²
- CBR = Capacidad de soporte del suelo de la subrasante, %
- N = Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

$$\sigma_{z \text{ adm}} = \frac{0.9607 * 5^{1.2}}{(5 * 10^6)^{0.229}} = 0.241 \text{ Kg/cm}^2$$

- Deflexión del modelo estructural:

$$\Delta_{adm} = 26.32202 * N^{-0.2438}$$

Donde:

- Δ_{adm} = Deflexión admisible de la estructura de referencia, en milímetros.
- N = Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

$$\Delta_{adm} = 26.32202 * (5 * 10^6)^{-0.2438} = 0.613 \text{ mm}$$

Para la verificación de las estructuras diseñadas se tomó en cuenta los valores de servicio (deformación radial de tracción en la base de la carpeta asfáltica, deformación vertical de compresión sobre la subrasante, esfuerzo vertical de compresión sobre la subrasante y deflexión en la superficie del pavimento), y compararlos con los valores admisibles calculados.

7.3 CÁLCULO DE LOS VALORES DE SERVICIO PARA LA BASE SIN ESTABILIZAR

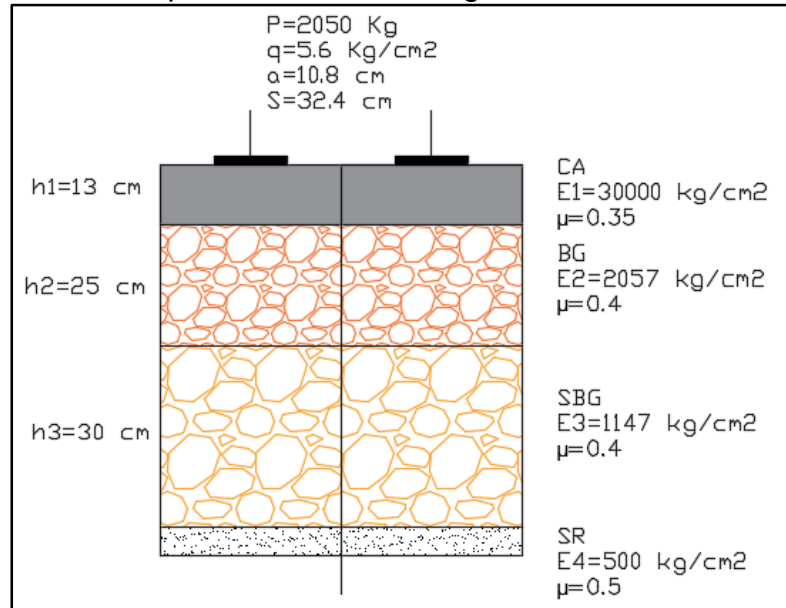
Utilizando el programa de cálculo “Bisar 3.0”, se obtienen los valores de servicio mostrados en la tabla 62 al modelar la estructura mostrada en la figura 64.

Tabla 62. Valores de servicio de la estructura con base granular sin estabilizar

| CAPA | PARÁMETRO | VALOR DE SERVICIO |
|--------------------|---------------------------------|-------------------|
| CAPA ASFÁLTICA | ϵ_r | 2.21E-04 |
| SUBRASANTE | ϵ_z | 2.95E-04 |
| | σ_z , kg/cm ² | 0.1599 |
| MODELO ESTRUCTURAL | Δ_{max} | 0.5266 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 64. Estructura de pavimento con base granular sin estabilizar



Fuente: elaboración propia.

7.4 CÁLCULO DE LOS VALORES DE SERVICIO PARA LA BASE ESTABILIZADA

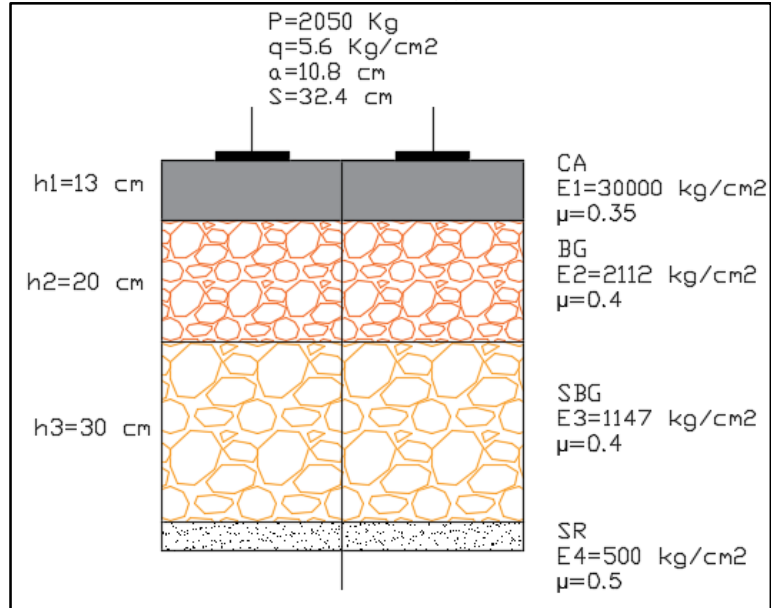
Utilizando el programa de cálculo "Bisar 3.0", se obtienen los valores de servicio mostrados en la tabla 63 al modelar la estructura mostrada en la figura 65.

Tabla 63. Valores de servicio de la estructura con base granular estabilizada

| CAPA | PARÁMETRO | VALOR DE SERVICIO |
|--------------------|---------------------------------|-------------------|
| CAPA ASFÁLTICA | ϵ_r | 2.23E-04 |
| SUBRASANTE | ϵ_z | 2.99E-04 |
| | σ_z , kg/cm ² | 0.1635 |
| MODELO ESTRUCTURAL | Δ_{max} | 0.544 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 65. Estructura de pavimento con base granular estabilizada



Fuente: elaboración propia.

7.5 CHEQUEO DE LAS ESTRUCTURA

En la tabla 64 se presenta el chequeo de la estructura obtenida usando el módulo resiliente de la base granular sin estabilizar. Se observa que la estructura cumple con los criterios de ahuellamiento, fatiga, deflexión y % de reserva crítica.

Tabla 64. Chequeo de la estructura con base granular sin estabilizar

| CAPA | PARÁMETRO | VALOR DE SERVICIO | VALOR ADMISIBLE | % DE CONSUMO | % DE RESERVA |
|--------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------|--------------|--------------|
| CAPA ASFÁLTICA | ϵ_r | 2.21E-04 | 2.49E-04 | 89% | 11% |
| | ϵ_z | 2.95E-04 | 4.44E-04 | 66% | 34% |
| SUBRASANTE | σ_z , kg/cm ² | 0.1599 | 0.615 | 26% | 74% |
| | | | 0.241 | 66% | 34% |
| MODELO ESTRUCTURAL | Δ_{max} | 0.5266 | 0.613 | 86% | 14% |
| % RESERVA CRÍTICÓ | | | | | 11% |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 65 se presenta el chequeo de la estructura obtenida usando el módulo resiliente de la base granular estabilizada con 6% de polvillo de alto horno. Se observa que la estructura cumple con los criterios de ahuellamiento, fatiga, deflexión y % de reserva crítica.

Tabla 65. Chequeo de la estructura con base granular estabilizada

| CAPA | PARÁMETRO | VALOR DE SERVICIO | VALOR ADMISIBLE | % DE CONSUMO | % DE RESERVA |
|--------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------------|--------------|
| CAPA ASFÁLTICA | ϵ_r | 2.23E-04 | 2.49E-04 | 90% | 10% |
| | ϵ_z | 2.99E-04 | 4.44E-04 | 67% | 33% |
| SUBRASANTE | σ_z , kg/cm ² | 0.1635 | 0.615 | 27% | 73% |
| | | | 0.241 | 68% | 32% |
| MODELO ESTRUCTURAL | Δ_{max} | 0.544 | 0.613 | 89% | 11% |
| | | | | % RESERVA CRÍTICO | 10% |

Fuente: elaboración propia.

De los resultados obtenidos en el chequeo se observa que el porcentaje crítico de reserva de las dos estructuras analizadas se encuentra entre el 10% y 15%, el cual corresponde a vías primarias para soportar el nivel de tránsito 1. Con ese resultado es posible afirmar que las estructuras diseñadas son equivalentes.

8. ANÁLISIS ECONÓMICO

De acuerdo con las especificaciones de construcción del INVIAS y el análisis de precios unitarios (APUS) 2017-2 para el departamento de Boyacá se realizó el análisis económico para una base granular clase A sin estabilizar y una base granular clase A estabilizada con polvillo de alto horno. La comparación de los costos de construcción de la base granular se realizó en base a los espesores obtenidos en el numeral 7.

8.1 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

La vía supuesta para el análisis económico fue localizada a 15 km del municipio de Cómbita y a 45 km de Acerías Paz del Río, esto para estimar las distancias de acarreo de cada uno de los materiales. La vía tendrá una longitud de 2 km y un ancho de 7.3 m.

En el análisis económico el precio del polvillo de alto horno se consideró de \$0. En la figura 66 se presenta el análisis económico de la base granular sin estabilizar; en la figura 67 se presenta el análisis económico de la base granular estabilizada con 6% de polvillo de alto horno.

En la tabla 66 se presenta la comparación de los costos de construir una base granular sin estabilizar y estabilizada con polvillo de alto horno. La diferencia de precios se genera debido al cambio de espesor de la base granular en cada una de las estructuras; ya que con la base estabilizada se requirieron 5 cm menos que en la base sin estabilizar.

Tabla 66. Comparación de costos de construcción

| Estructura | Espesor (m) | Ancho (m) | Longitud (m) | Costo (\$/m3) | Costo total |
|------------------------|-------------|-----------|--------------|---------------|-------------------|
| Sin estabilizar | 0.25 | 7.3 | 2000 | \$ 128,799.32 | \$ 470,117,518.00 |
| Estabilizada | 0.2 | 7.3 | 2000 | \$ 134,162.65 | \$ 391,754,923.40 |

Fuente: elaboración propia.

El costo total de construir 2 km de base granular sin estabilizar es de \$470,117,518.00 y la base estabilizada con polvillo de alto horno costaría \$391,754,923.40 por lo cual se tendría un ahorro de \$78,362,594.60; con lo cual se observa que los beneficios del uso de polvillo de alto horno no solo se ven reflejados en el mejoramiento de las características del material, sino además en el beneficio económico.

De acuerdo a los resultados obtenidos del chequeo de las estructuras se observaron mayores porcentajes de reserva en la estructura de la base estabilizada, lo cual

indica que esta estructura tendrá mejor comportamiento en el tiempo de vida útil de la estructura.

Figura 66. Análisis económico de la base granular sin estabilizar

MATERIAL BASE GRANULAR CLASE A

Unidad: m3

I. EQUIPO

| Descripción | Tarifa/hora | Rendimiento | Valor |
|---|--------------|-------------|--------------|
| CARROTANQUE DE AGUA 10000 LITROS | \$ 66,937.00 | 30 | \$ 2,231.23 |
| VIBROCOMPACTADOR DYNAPAC (10 TONELADAS) | \$144,200.00 | 30 | \$ 4,806.67 |
| MOTONIVELADORA CAT-120 EQUIVALENTE | \$156,200.00 | 30 | \$ 5,206.67 |
| | | Sub-total | \$ 12,244.57 |

II. MATERIALES DE OBRA

| Descripción | Unidad | Precio-unit | Cantidad | Valor |
|------------------|--------|--------------|-----------|--------------|
| MATERIAL DE BASE | m3 | \$ 56,970.00 | 1.3 | \$ 74,061.00 |
| | | | Sub-total | \$ 74,061.00 |

III. TRANSPORTE

| Material | Cantidad | Distancia | m3-Km | Tarifa | Valor |
|------------------|----------|-----------|-------|-----------|--------------|
| MATERIAL DE BASE | 1.3 | 15 | 19.5 | 985 | \$ 19,207.50 |
| | | | | Sub-total | \$ 19,207.50 |

IV. MANO DE OBRA

| Trabajador | Jornal | Prestaciones | Total jornal | Rendimiento | Valor |
|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| OBREROS (4) | \$181,970.00 | 1.5 | \$272,955.00 | 150 | \$ 1,819.70 |
| | | | | Sub-total | \$ 1,819.70 |

| | |
|---------------------|---------------|
| Total costo directo | \$ 107,332.77 |
|---------------------|---------------|

V. COSTOS INDIRECTOS

| Descripción | PORCENTAJE | VALOR |
|----------------|------------|--------------|
| ADMINISTRACION | 10% | \$ 10,733.28 |
| IMPREVISTOS | 5% | \$ 5,366.64 |
| UTILIDADES | 5% | \$ 5,366.64 |
| | Sub-total | \$ 21,466.55 |

| | |
|-----------------------|---------------|
| Precio unitario total | \$ 128,799.32 |
|-----------------------|---------------|

Fuente: elaboración propia.

Figura 67. Análisis económico de la base granular estabilizada
MATERIAL BASE GRANULAR CLASE A CON 6% DE POLVILLO DE ALTO HORNO
Unidad: m3

I. EQUIPO

| Descripción | Tarifa/hora | Rendimiento | Valor |
|---|--------------|-------------|--------------|
| CARROTANQUE DE AGUA 10000 LITROS | \$ 66,937.00 | 30 | \$ 2,231.23 |
| VIBROCOMPACTADOR DYNAPAC (10 TONELADAS) | \$144,200.00 | 30 | \$ 4,806.67 |
| MOTONIVELADORA CAT-120 EQUIVALENTE | \$156,200.00 | 30 | \$ 5,206.67 |
| | | Sub-total | \$ 12,244.57 |

II. MATERIALES DE OBRA

| Descripción | Unidad | Precio-unit | Cantidad | Valor |
|------------------------|--------|--------------|-----------|--------------|
| MATERIAL DE BASE | m3 | \$ 56,970.00 | 1.3 | \$ 74,061.00 |
| POLVILLO DE ALTO HORNO | ton | \$ - | 0.121 | \$ - |
| | | | Sub-total | \$ 74,061.00 |

III. TRANSPORTE

| Material | Cantidad | Distancia | m3-Km | Tarifa | Valor |
|------------------------|----------|-----------|-------|-----------|--------------|
| MATERIAL DE BASE | 1.3 | 15 | 19.5 | 985 | \$ 19,207.50 |
| POLVILLO DE ALTO HORNO | 0.121 | 45 | 5.445 | 985 | \$ 5,363.33 |
| | | | | Sub-total | \$ 24,570.83 |

IV. MANO DE OBRA

| Trabajador | Jornal | Prestaciones | Total jornal | Rendimiento | Valor |
|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| OBREROS (4) | \$181,970.00 | 1.5 | \$272,955.00 | 150 | \$ 1,819.70 |
| | | | | Sub-total | \$ 1,819.70 |

| | |
|---------------------|---------------|
| Total costo directo | \$ 112,696.09 |
|---------------------|---------------|

V. COSTOS INDIRECTOS

| Descripción | PORCENTAJE | VALOR |
|----------------|------------|--------------|
| ADMINISTRACION | 10% | \$ 10,733.28 |
| IMPREVISTOS | 5% | \$ 5,366.64 |
| UTILIDADES | 5% | \$ 5,366.64 |
| | Sub-total | \$ 21,466.55 |

| | |
|-----------------------|--------------|
| Precio unitario total | \$134,162.65 |
|-----------------------|--------------|

Fuente: elaboración propia.

9. CONCLUSIONES

- Se realizó la caracterización del material de base granular, mediante los ensayos que se exigen por INVIAS como criterio de calidad. Este agregado satisface gran parte de estos parámetros exceptuando el índice de plasticidad donde el material se encuentra 5% por encima de lo establecido en el artículo 330 y el parámetro de resistencia para una base granular de clase A, ya que se obtuvo un CBR de 90% estando 5% por debajo del valor mínimo exigido por la norma.
- Del ensayo de granulometría se tiene que el material granular usado se ajusta a una base granular de gradación fina BG-38.
- Se realizó la caracterización del polvillo de alto horno, obteniéndose como resultado que el polvillo cumple con los parámetros de calidad para ser parte del agregado de base granular.
- De las mezclas realizadas para el ensayo CBR se logró determinar que el porcentaje de polvillo óptimo es del 6%, ya que este fue el que obtuvo el mayor valor de este parámetro siendo igual al 96%, lo cual generó a su vez que este cumpliera con el valor mínimo especificado por el INVIAS para base granular clase A. Además, se determinó que en un determinado punto el uso de polvillo de alto horno comienza a ser nocivo para la mezcla, ya que reduce la resistencia del material, provocando que el valor del CBR con polvillo sea incluso menor que el obtenido para el material sin estabilizar, por tanto, es importante determinar este punto de quiebre.
- Como el aumento de CBR de la base granular producido por la estabilización con polvillo de alto horno no es muy grande, puede ser considerado como método de estabilización para materiales cuyo CBR no cumpla con lo especificado por el INVIAS pero que esté muy cercano al límite de aceptación.
- Del ensayo de CBR fue también posible determinar que el uso de polvillo de alto horno contribuye a la reducción del potencial expansivo de las muestras mejorando de esta manera la estabilidad volumétrica, ya que las expansiones se vieron reducidas en un 1.52% comparando el valor obtenido del material sin estabilizar y la mezcla con 10% de polvillo de alto horno.
- Los límites de consistencia del agregado también se vieron beneficiados por el uso de polvillo ya que al adicionar polvillo se veía la disminución del valor de los límites y por ende del índice plástico, llevando la muestra a presentar un comportamiento no plástico, lo cual generó que el material granular utilizado en conjunto con el polvillo de alto horno lograran cumplir el parámetro de no plasticidad para una base granular clase A.

- Del ensayo de estabilidad hídrica es posible verificar de manera visual que el polvillo de alto horno mejora el comportamiento del agregado al entrar al contacto con el agua ya que la probeta con 6% de polvillo de alto horno duro casi 2 horas adicionales respecto al momento de falla de la probeta sin polvillo.
- Es importante resaltar que el uso de polvillo de alto horno como estabilizante de base granular en la construcción de carreteras se reduce a proyectos relativamente cercanos a la empresa Acerías Paz del Río S.A., ya que para grandes distancias el costo del transporte sería muy alto y esto generaría mayores costos de construcción, favoreciendo otras alternativas de mejoramiento del material como cal o cemento.

10.RECOMENDACIONES

- La posible composición química del polvillo de alto horno indica que no es un material apto para el contacto directo con la piel ni con las vías respiratorias, ya que estos pueden generar afectaciones a la salud cuando se manipula, por esto es necesario el uso de los implementos de seguridad en el laboratorio tales como: gafas, guantes, tapabocas y bata.
- El lugar de almacenamiento de polvillo de alto horno debe ser uno en el cual no tenga contacto con fuentes hídricas para el consumo, adicionalmente se debe guardar de una manera que no haya corrientes de aire que puedan levantar el polvillo debido a su composición granulométrica.
- Al polvillo de alto horno en esta investigación solo se le realizaron ensayos de caracterización mecánica, sería recomendable realizar ensayos de caracterización química para así determinar su verdadera composición, ya que como fue mencionado anteriormente su composición depende principalmente de las fuentes primarias de los materiales usados en el alto horno, lo cual genera cambios en su composición.
- El ensayo de módulo resiliente no fue posible realizarlo debido a que el equipo se encontraba dañado al momento que se quiso hacer. Se recomienda la realización de este ensayo para determinar precisamente el valor del agregado usado, y así diseñar la estructura de pavimento con datos reales y no con datos determinados por correlaciones, que en ocasiones resultan arrojar datos que no representan la realidad del material.
- Las aplicaciones de los resultados obtenidos en laboratorio a experimentos en campo se deben realizar minuciosamente debido a que pueden variar las condiciones ambientales, el mezclado entre otras. Adicionalmente al momento de mezclar se debe tener cuidado que no haya riesgo de afectar la salud de las personas que se encuentran alrededor del sitio de aplicación.
- Comparando los beneficios obtenidos en la estabilización con polvillo de alto horno y estabilizantes convencionales, se observa que el grado de mejora del polvillo no es tan significativo como el que se obtiene con otros estabilizantes. Por tal motivo su uso se ve restringido a materiales que se encuentren muy cercanos a cumplir con las especificaciones de construcción del INVIAS, y en sitios cercanos a industrias siderúrgicas para obtener también beneficios económicos.

BIBLIOGRAFÍA

ACERÍAS PAZ DEL RÍO S.A.

ADAME CRUZ, Omar y SANCHEZ AGUILAR, Miguel. Análisis de uso de lodos de alto horno en el mejoramiento de material granular para pavimentos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2016.

CASTELLS, X., Reciclaje de residuos industriales, Ediciones Díaz de Santos, Madrid, 2000.

CHANG CHANG, Luis. CBR. California Bearing Ratio. Universidad Nacional de Ingeniería. FIC. Laboratorio geotécnico. Centro Peruano de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. CISMID, 2009.

DORFMAN, Boris. Estabilización de suelos. Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 1988.

GONZÁLEZ BAQUET, Ignacio. Proceso de alto horno, 2014.

HIGUERA SANDOVAL, Carlos Higuera. Manejo de suelos expansivos en carreteras. Grupo de investigación y desarrollo en infraestructura vial. GRINFRAVIAL. Tunja, 2008.

----- . Nociones sobre Métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras, Volumen I., 2008.

----- . Estabilización de suelos, ajustes granulométricos, estabilización con cal y aditivos químicos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Guías de clase. Tunja, 2004.

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares, 2012.

INVÍAS (Instituto Nacional de Vías). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá, 2013.

----- . Normas de ensayos de materiales. Bogotá. 2013.

----- . Análisis de precios unitarios. APU-Boyacá – 2017 - 2. Disponible en www.invias.gov.co.

MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES. Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial. Perú, 2008.

MONTAÑEZ SÁENZ, Adriana y CUENTAS PERALTA, Cristian. Análisis del uso de alquitrán de hulla como estabilizante de bases granulares para pavimentos. Tesis de grado Ingeniero(a) de Transporte y Vías. Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2015.

MOREIRA, Fricson. Apuntes pavimentos. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato, Ambato–Ecuador, 2009.

OCHOA DÍAZ, Ricardo. Análisis de la utilización de escoria y alquitrán en fabricación de mezclas bituminosas para pavimentos, Tesis de Maestría, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería, 2012.

ORTEGA LÓPEZ, Vanesa. Utilización de escoria siderúrgica para construir caminos y estabilizar suelos. Burgos. España Tesis doctoral. Ingeniera civil. Universidad de Burgos, 2011.

PARRA, Lina María y SANCHEZ, Diana Pilar. Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica DIACO. Proyecto de investigación. Bogotá D.C. Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Universidad de la Salle, 2010.

PÉREZ SIERRA, Edgar Gustavo. Evaluación de la escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas. Trabajo de grado. Guatemala. Ingeniería civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008.

PINZÓN CORTÉS, Eduardo; MORA ARCINIEGAS, Luis Carlos; MENDIETA SALINAS, Yamid. Influencia de la inclusión del reciclaje de botellas plásticas como uno de los componentes en la conformación de materiales granulares pétreos para pavimentos. Colombia. Ingeniería civil. Universidad del Cauca, 2016.

QUISPE SUPO, Freddy. Estabilización de suelos no aptos con desechos de policloruros de vinilo para uso en la conformación de la capa de base y sub base de pavimentos. Perú. Ingeniería civil. Universidad Nacional del Altiplano-Puno, 2014.

SANCHEZ SABOGAL, Fernando. Escuela de ingeniería, Módulo 7, materiales para base y subbase, 2010.


SANDOVAL, Carlos Hernando Higuera; CRISTANCHO, Jenny Carolina Gómez; NARANJO, Óscar Eduardo Pardo. Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. Revista Facultad de Ingeniería, 2013.

SILVA, Mayerli y VEGA, Sergio. Factibilidad del uso de escorias negra, fosfórica y polvillo de alto horno en mezclas asfálticas. Tesis de grado Ingeniero(a) de Transporte y Vías. Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2017.

ANEXOS

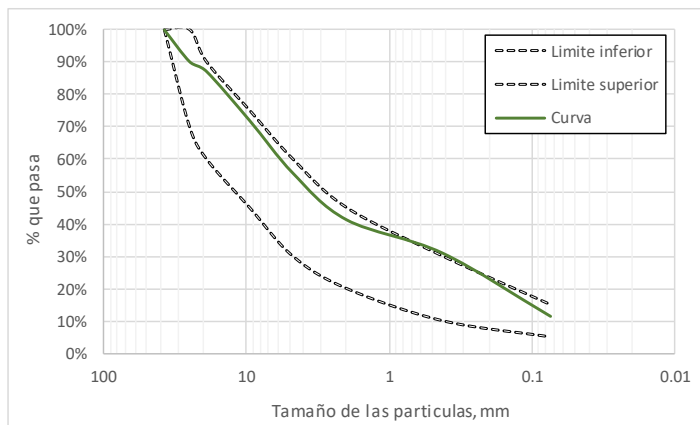
Anexo A. Caracterización del material granular

A1. Granulometría del material granular.

| | | |
|--|---|--|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS NORMA I.N.V. E- 213 -13 CORRESPONDENCIAS ASTM C-136-01 AASHTO T-27-99 |
|--|---|--|


OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno
FECHA: Semestre II-2017
MUESTRA N°: 1
PROPÓSITO: Caracterización de material
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Material para base granular

| TAMIZ | | Masa ensayo, g | Masa muestra, g | % Retenido | % Retenid acumulado | Norma BG-38 | | % Pasa |
|--------------|-------------|----------------|-----------------|------------|---------------------|-------------|----------|--------|
| Estandar | Alternativo | | | | | Lim. Inf | Lim. Sup | |
| 37,5 mm | 1 1/2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100% | 100% | 100.00 |
| 25,0 mm | 1 | 1,862.92 | 1862.92 | 9.8 | 9.8 | 70% | 100% | 90.19 |
| 19,0 mm | 3/4 | 581.10 | 581.10 | 3.1 | 12.9 | 60% | 90% | 87.13 |
| 9,5 mm | 3/8 | 2,886.49 | 2886.49 | 15.2 | 28.1 | 45% | 75% | 71.93 |
| 4,75 mm | No. 4 | 3,080.18 | 3080.18 | 16.2 | 44.3 | 30% | 60% | 55.71 |
| 2,0 mm | No. 10 | 2,749.76 | 2749.76 | 14.5 | 58.8 | 20% | 45% | 41.23 |
| 425.00 | No. 40 | 1,965.47 | 1965.47 | 10.4 | 69.1 | 10% | 30% | 30.88 |
| 75 | No. 200 | 3,712.55 | 3712.55 | 19.6 | 88.7 | 5% | 15% | 11.33 |
| FONDO | | 2,149.67 | 2149.67 | 11.3 | 100.0 | | | 0.00 |
| TOTAL | | 18990.04 | 18990.04 | 100.0 | | | | |




Observaciones: _____
Laborarista(s): Diego Macias y Francisco Torres **Director:** Ing. Ricardo Ochoa
Revisó: Ing. Manuel Sierra


A2. Desgaste en la máquina de los Ángeles muestra 1.

| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS MÁQUINA DE LAS ÁNGELES NORMA INV E - 218 - 13 CORRESPONDENCIAS ASTM C-131-01 AASHTO T-96-02 UNE EN 1097-02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|--|--------|--|-----------|-----------|--|--------|--|--|----|--------|----|--------|---|---|---|---|------|--------|------|----|-----------|-----|-----|-----|------|----|------|------|-----------|-----|-----|-----|------|------|------|------|-----------|-----------|-----|-----|------|------|-----|------|-----------|-----------|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----------|-----|-----|------|------|-------|-----|-----|-----------|-----|------|-------|------|-------|-----|-----|-----|-----------|----------------|--|--|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno FECHA: Semestre II-2017 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA N°: 1 PROPÓSITO: Caracterización de material | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Base Granular | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $\% \text{ DESGASTE} = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100$ <p> P1 : Masa de la muestra seca antes del ensayo P2 : Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre el tamiz de 1.70 mm (No. 12) </p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Pasa</th> <th colspan="2">Retenido</th> <th colspan="4">Granulometrías, Masa de la muestra para ensayo (g)</th> </tr> <tr> <th>mm</th> <th>(pulg)</th> <th>mm</th> <th>(pulg)</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>37.5</td> <td>1 1/2"</td> <td>25.0</td> <td>1"</td> <td>1250 ± 25</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>25.0</td> <td>1"</td> <td>19.0</td> <td>3/4"</td> <td>1250 ± 25</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>19.0</td> <td>3/4"</td> <td>12.5</td> <td>1/2"</td> <td>1250 ± 10</td> <td>2500 ± 10</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>12.5</td> <td>1/2"</td> <td>9.5</td> <td>3/8"</td> <td>1250 ± 10</td> <td>2500 ± 10</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>9.5</td> <td>3/8"</td> <td>6.3</td> <td>1/4"</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>2500 ± 10</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>6.3</td> <td>1/4"</td> <td>4.75</td> <td>No. 4</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>2500 ± 10</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>4.75</td> <td>No. 4</td> <td>2.36</td> <td>No. 8</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>5000 ± 10</td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;">TOTALES</td> <td>5000 ± 10</td> <td>5000 ± 10</td> <td>5000 ± 10</td> <td>5000 ± 10</td> </tr> </tbody> </table> | | | Pasa | | Retenido | | Granulometrías, Masa de la muestra para ensayo (g) | | | | mm | (pulg) | mm | (pulg) | A | B | C | D | 37.5 | 1 1/2" | 25.0 | 1" | 1250 ± 25 | --- | --- | --- | 25.0 | 1" | 19.0 | 3/4" | 1250 ± 25 | --- | --- | --- | 19.0 | 3/4" | 12.5 | 1/2" | 1250 ± 10 | 2500 ± 10 | --- | --- | 12.5 | 1/2" | 9.5 | 3/8" | 1250 ± 10 | 2500 ± 10 | --- | --- | 9.5 | 3/8" | 6.3 | 1/4" | --- | --- | 2500 ± 10 | --- | 6.3 | 1/4" | 4.75 | No. 4 | --- | --- | 2500 ± 10 | --- | 4.75 | No. 4 | 2.36 | No. 8 | --- | --- | --- | 5000 ± 10 | TOTALES | | | | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 |
| Pasa | | Retenido | | Granulometrías, Masa de la muestra para ensayo (g) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| mm | (pulg) | mm | (pulg) | A | B | C | D | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37.5 | 1 1/2" | 25.0 | 1" | 1250 ± 25 | --- | --- | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25.0 | 1" | 19.0 | 3/4" | 1250 ± 25 | --- | --- | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19.0 | 3/4" | 12.5 | 1/2" | 1250 ± 10 | 2500 ± 10 | --- | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12.5 | 1/2" | 9.5 | 3/8" | 1250 ± 10 | 2500 ± 10 | --- | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9.5 | 3/8" | 6.3 | 1/4" | --- | --- | 2500 ± 10 | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.3 | 1/4" | 4.75 | No. 4 | --- | --- | 2500 ± 10 | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.75 | No. 4 | 2.36 | No. 8 | --- | --- | --- | 5000 ± 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TOTALES | | | | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1" style="width: 50%; margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">P1 (g)</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">5,008.0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">P2 (g)</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">3,889.0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">% Desgaste (i)</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">22.34%</td> </tr> </table> | | | P1 (g) | 5,008.0 | P2 (g) | 3,889.0 | % Desgaste (i) | 22.34% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P1 (g) | 5,008.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P2 (g) | 3,889.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| % Desgaste (i) | 22.34% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| % DESGASTE = 22% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Observaciones: _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Laboradorista(s): Diego Macías y Francisco Torres Director: Ing. Ricardo Ochoa | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Revisó: Ing. Manuel Sierra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |


A3. Desgaste en la máquina de los Ángeles muestra 2.

| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS MÁQUINA DE LAS ÁNGELES NORMA INV E - 218 - 13 CORRESPONDENCIAS ASTM C-131-01 AASHTO T-96-02 UNE EN 1097-02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|--------|--|-----------|-----------|--|--|--|--|----|--------|----|--------|---|---|---|---|------|--------|------|----|-----------|-----|-----|-----|------|----|------|------|-----------|-----|-----|-----|------|------|------|------|-----------|-----------|-----|-----|------|------|-----|------|-----------|-----------|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----------|-----|-----|------|------|-------|-----|-----|-----------|-----|------|-------|------|-------|-----|-----|-----|-----------|----------------|--|--|--|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|---------|--------|-------|----------------|--------|
| OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno | | FECHA: Semestre II-2017 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA N°: 2 | | PROPÓSITO: Caracterización de material | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Base Granular | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $\% \text{ DESGASTE} = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100$ <p> P1 : Masa de la muestra seca antes del ensayo P2 : Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre el tamiz de 1.70 mm (No. 12) </p> <table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Pasa</th> <th colspan="2">Retenido</th> <th colspan="4">Granulometrías, Masa de la muestra para ensayo (g)</th> </tr> <tr> <th>mm</th> <th>(pulg)</th> <th>mm</th> <th>(pulg)</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>37.5</td> <td>1 1/2"</td> <td>25.0</td> <td>1"</td> <td>1250 ± 25</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>25.0</td> <td>1"</td> <td>19.0</td> <td>3/4"</td> <td>1250 ± 25</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>19.0</td> <td>3/4"</td> <td>12.5</td> <td>1/2"</td> <td>1250 ± 10</td> <td>2500 ± 10</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>12.5</td> <td>1/2"</td> <td>9.5</td> <td>3/8"</td> <td>1250 ± 10</td> <td>2500 ± 10</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>9.5</td> <td>3/8"</td> <td>6.3</td> <td>1/4"</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>2500 ± 10</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>6.3</td> <td>1/4"</td> <td>4.75</td> <td>No. 4</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>2500 ± 10</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>4.75</td> <td>No. 4</td> <td>2.36</td> <td>No. 8</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>5000 ± 10</td> </tr> <tr> <td colspan="4">TOTALES</td> <td>5000 ± 10</td> <td>5000 ± 10</td> <td>5000 ± 10</td> <td>5000 ± 10</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td>P1 (g)</td> <td>5,000.0</td> </tr> <tr> <td>P2 (g)</td> <td>3,845</td> </tr> <tr> <td>% Desgaste (i)</td> <td>23.10%</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"> <u>% DESGASTE = 23%</u> </p> | | | Pasa | | Retenido | | Granulometrías, Masa de la muestra para ensayo (g) | | | | mm | (pulg) | mm | (pulg) | A | B | C | D | 37.5 | 1 1/2" | 25.0 | 1" | 1250 ± 25 | --- | --- | --- | 25.0 | 1" | 19.0 | 3/4" | 1250 ± 25 | --- | --- | --- | 19.0 | 3/4" | 12.5 | 1/2" | 1250 ± 10 | 2500 ± 10 | --- | --- | 12.5 | 1/2" | 9.5 | 3/8" | 1250 ± 10 | 2500 ± 10 | --- | --- | 9.5 | 3/8" | 6.3 | 1/4" | --- | --- | 2500 ± 10 | --- | 6.3 | 1/4" | 4.75 | No. 4 | --- | --- | 2500 ± 10 | --- | 4.75 | No. 4 | 2.36 | No. 8 | --- | --- | --- | 5000 ± 10 | TOTALES | | | | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | P1 (g) | 5,000.0 | P2 (g) | 3,845 | % Desgaste (i) | 23.10% |
| Pasa | | Retenido | | Granulometrías, Masa de la muestra para ensayo (g) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| mm | (pulg) | mm | (pulg) | A | B | C | D | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37.5 | 1 1/2" | 25.0 | 1" | 1250 ± 25 | --- | --- | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25.0 | 1" | 19.0 | 3/4" | 1250 ± 25 | --- | --- | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19.0 | 3/4" | 12.5 | 1/2" | 1250 ± 10 | 2500 ± 10 | --- | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12.5 | 1/2" | 9.5 | 3/8" | 1250 ± 10 | 2500 ± 10 | --- | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9.5 | 3/8" | 6.3 | 1/4" | --- | --- | 2500 ± 10 | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.3 | 1/4" | 4.75 | No. 4 | --- | --- | 2500 ± 10 | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.75 | No. 4 | 2.36 | No. 8 | --- | --- | --- | 5000 ± 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TOTALES | | | | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P1 (g) | 5,000.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P2 (g) | 3,845 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| % Desgaste (i) | 23.10% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Observaciones: _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Laboradorista(s): Diego Macías y Francisco Torres | | Director: Ing. Ricardo Ochoa | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Revisó: Ing. Manuel Sierra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |


A4. Desgaste en la máquina de los Ángeles muestra 3.

| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS MÁQUINA DE LAS ÁNGELES NORMA INV E - 218 - 13 CORRESPONDENCIAS ASTM C-131-01 AASHTO T-96-02 UNE EN 1097-02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|--------|--|-----------|-----------|--|--|--|--|----|--------|----|--------|---|---|---|---|------|--------|------|----|-----------|-----|-----|-----|------|----|------|------|-----------|-----|-----|-----|------|------|------|------|-----------|-----------|-----|-----|------|------|-----|------|-----------|-----------|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----------|-----|-----|------|------|-------|-----|-----|-----------|-----|------|-------|------|-------|-----|-----|-----|-----------|----------------|--|--|--|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|---------|--------|-------|----------------|--------|
| OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno FECHA: Semestre II-2017 MUESTRA N°: 3 PROPÓSITO: Caracterización de material DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Base Granular | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $\% \text{ DESGASTE} = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100$ <p> P1 : Masa de la muestra seca antes del ensayo P2 : Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre el tamiz de 1.70 mm (No. 12) </p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Pasa</th> <th colspan="2">Retenido</th> <th colspan="4">Granulometrías, Masa de la muestra para ensayo (g)</th> </tr> <tr> <th>mm</th> <th>(pulg)</th> <th>mm</th> <th>(pulg)</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>37.5</td> <td>1 1/2"</td> <td>25.0</td> <td>1"</td> <td>1250 ± 25</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>25.0</td> <td>1"</td> <td>19.0</td> <td>3/4"</td> <td>1250 ± 25</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>19.0</td> <td>3/4"</td> <td>12.5</td> <td>1/2"</td> <td>1250 ± 10</td> <td>2500 ± 10</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>12.5</td> <td>1/2"</td> <td>9.5</td> <td>3/8"</td> <td>1250 ± 10</td> <td>2500 ± 10</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>9.5</td> <td>3/8"</td> <td>6.3</td> <td>1/4"</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>2500 ± 10</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>6.3</td> <td>1/4"</td> <td>4.75</td> <td>No. 4</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>2500 ± 10</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>4.75</td> <td>No. 4</td> <td>2.36</td> <td>No. 8</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>5000 ± 10</td> </tr> <tr> <td colspan="4">TOTALES</td> <td>5000 ± 10</td> <td>5000 ± 10</td> <td>5000 ± 10</td> <td>5000 ± 10</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 50%; margin: auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td>P1 (g)</td> <td>4,993.0</td> </tr> <tr> <td>P2 (g)</td> <td>3,769</td> </tr> <tr> <td>% Desgaste (i)</td> <td>24.51%</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">% DESGASTE = 25%</p> | | | Pasa | | Retenido | | Granulometrías, Masa de la muestra para ensayo (g) | | | | mm | (pulg) | mm | (pulg) | A | B | C | D | 37.5 | 1 1/2" | 25.0 | 1" | 1250 ± 25 | --- | --- | --- | 25.0 | 1" | 19.0 | 3/4" | 1250 ± 25 | --- | --- | --- | 19.0 | 3/4" | 12.5 | 1/2" | 1250 ± 10 | 2500 ± 10 | --- | --- | 12.5 | 1/2" | 9.5 | 3/8" | 1250 ± 10 | 2500 ± 10 | --- | --- | 9.5 | 3/8" | 6.3 | 1/4" | --- | --- | 2500 ± 10 | --- | 6.3 | 1/4" | 4.75 | No. 4 | --- | --- | 2500 ± 10 | --- | 4.75 | No. 4 | 2.36 | No. 8 | --- | --- | --- | 5000 ± 10 | TOTALES | | | | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | P1 (g) | 4,993.0 | P2 (g) | 3,769 | % Desgaste (i) | 24.51% |
| Pasa | | Retenido | | Granulometrías, Masa de la muestra para ensayo (g) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| mm | (pulg) | mm | (pulg) | A | B | C | D | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37.5 | 1 1/2" | 25.0 | 1" | 1250 ± 25 | --- | --- | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25.0 | 1" | 19.0 | 3/4" | 1250 ± 25 | --- | --- | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19.0 | 3/4" | 12.5 | 1/2" | 1250 ± 10 | 2500 ± 10 | --- | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12.5 | 1/2" | 9.5 | 3/8" | 1250 ± 10 | 2500 ± 10 | --- | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9.5 | 3/8" | 6.3 | 1/4" | --- | --- | 2500 ± 10 | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.3 | 1/4" | 4.75 | No. 4 | --- | --- | 2500 ± 10 | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.75 | No. 4 | 2.36 | No. 8 | --- | --- | --- | 5000 ± 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TOTALES | | | | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P1 (g) | 4,993.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P2 (g) | 3,769 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| % Desgaste (i) | 24.51% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Observaciones: _____ Laboratorista(s): Diego Macias y Francisco Torres Director: Ing. Ricardo Ochoa Revisó: Ing. Manuel Sierra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |


A5. Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval muestra 1.

| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS A LA DEGRADACION POR ABRASION - MICRO DEVAL NORMA INV E- 238 - 13 CORRESPONDENCIAS ASTM C-131-01 AASHTO T-96-02 UNE EN 1097-02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---|--------|-------------|--------|--|-----------|----|--------|----|--------|------|------|-----|------|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|------|------|-------|-----|--------------|--|--|--|-------------|--------|---------|--------|---------|---------------|--------|
| OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno | | FECHA: Semestre II-2017 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA N°: 1 | | PROPÓSITO: Caracterización de material | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Base Granular | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $\% \text{ PERDIDA} = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100$ <p> P1 : Masa de la muestra seca antes del ensayo P2 : Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre el tamiz de 4,75 (No. 4) y 1.18 mm (No. 16) </p> <table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">PASA</th> <th colspan="2">REIENE</th> <th rowspan="2">MASA (gr)</th> </tr> <tr> <th>mm</th> <th>(pulg)</th> <th>mm</th> <th>(pulg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>12.5</td> <td>1/2"</td> <td>9.5</td> <td>3/8"</td> <td>750</td> </tr> <tr> <td>9.5</td> <td>3/8"</td> <td>6.3</td> <td>1/4"</td> <td>375</td> </tr> <tr> <td>6.3</td> <td>1/4"</td> <td>4.75</td> <td>No. 4</td> <td>375</td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;">TOTAL</td> <td style="text-align: center;">1500</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td>P1 (g)</td> <td style="text-align: center;">1,500.0</td> </tr> <tr> <td>P2 (g)</td> <td style="text-align: center;">1,125.3</td> </tr> <tr> <td>% Perdida (i)</td> <td style="text-align: center;">24.98%</td> </tr> </tbody> </table> $\% \text{ PERDIDA} = \underline{\underline{25\%}}$ | | | PASA | | REIENE | | MASA (gr) | mm | (pulg) | mm | (pulg) | 12.5 | 1/2" | 9.5 | 3/8" | 750 | 9.5 | 3/8" | 6.3 | 1/4" | 375 | 6.3 | 1/4" | 4.75 | No. 4 | 375 | TOTAL | | | | 1500 | P1 (g) | 1,500.0 | P2 (g) | 1,125.3 | % Perdida (i) | 24.98% |
| PASA | | REIENE | | MASA (gr) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| mm | (pulg) | mm | (pulg) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12.5 | 1/2" | 9.5 | 3/8" | 750 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9.5 | 3/8" | 6.3 | 1/4" | 375 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.3 | 1/4" | 4.75 | No. 4 | 375 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TOTAL | | | | 1500 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P1 (g) | 1,500.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P2 (g) | 1,125.3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| % Perdida (i) | 24.98% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Observaciones: _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Laboradorista(s): Diego Macias y Francisco Torres | | Director: Ing. Ricardo Ochoa | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Revisó: Ing. Manuel Sierra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |


A6. Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval muestra 2.

| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|----------------|----------------|--------|---------|--------|---------|---------------|--------|--------|----|--------|------|------|-----|------|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|------|------|-------|-----|--------------|--|--|--|-------------|
| | | A LA DEGRADACION POR ABRASION - MICRO DEVAL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | NORMA INVEN - 238 - 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | CORRESPONDENCIAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | ASTM C-131-01 | AASHTO T-96-02 | UNE EN 1097-02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno | | FECHA: Semestre II-2017 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA N°: 2 | | PROPÓSITO: Caracterización de material | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Base Granular | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p> $\% \text{ PERDIDA} = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100$ </p> <p> P1 : Masa de la muestra seca antes del ensayo P2 : Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre el tamiz de 4,75 (No. 4) y 1.18 mm (No. 16) </p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">PASA</th> <th colspan="2">REIENE</th> <th rowspan="2">MASA (gr)</th> </tr> <tr> <th>mm</th> <th>(pulg)</th> <th>mm</th> <th>(pulg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>12.5</td> <td>1/2"</td> <td>9.5</td> <td>3/8"</td> <td>750</td> </tr> <tr> <td>9.5</td> <td>3/8"</td> <td>6.3</td> <td>1/4"</td> <td>375</td> </tr> <tr> <td>6.3</td> <td>1/4"</td> <td>4.75</td> <td>No. 4</td> <td>375</td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;">TOTAL</td> <td>1500</td> </tr> </tbody> </table> | | | | | PASA | | REIENE | | MASA (gr) | mm | (pulg) | mm | (pulg) | 12.5 | 1/2" | 9.5 | 3/8" | 750 | 9.5 | 3/8" | 6.3 | 1/4" | 375 | 6.3 | 1/4" | 4.75 | No. 4 | 375 | TOTAL | | | | 1500 |
| PASA | | REIENE | | MASA (gr) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| mm | (pulg) | mm | (pulg) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12.5 | 1/2" | 9.5 | 3/8" | 750 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9.5 | 3/8" | 6.3 | 1/4" | 375 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.3 | 1/4" | 4.75 | No. 4 | 375 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TOTAL | | | | 1500 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <tbody> <tr> <td>P1 (g)</td> <td>1,500.0</td> </tr> <tr> <td>P2 (g)</td> <td>1,142.5</td> </tr> <tr> <td>% Perdida (i)</td> <td>23.83%</td> </tr> </tbody> </table> | | | | | P1 (g) | 1,500.0 | P2 (g) | 1,142.5 | % Perdida (i) | 23.83% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P1 (g) | 1,500.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P2 (g) | 1,142.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| % Perdida (i) | 23.83% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p style="text-align: center;">% PERDIDA= 24%</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Observaciones: _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Laboratorista(s): Diego Macias y Francisco Torres | | Director: Ing. Ricardo Ochoa | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Revisó: Ing. Manuel Sierra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

A7. Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval muestra 3.

| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS A LA DEGRADACION POR ABRASION - MICRO DEVAL NORMA INV E- 238 - 13 CORRESPONDENCIAS ASTM C-131-01 AASHTO T-96-02 UNE EN 1097-02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---|--------|-------------|--------|--|-----------|----|--------|----|--------|------|------|-----|------|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|------|------|-------|-----|--------------|--|--|--|-------------|--------|---------|--------|---------|---------------|--------|
| OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno FECHA: Semestre II-2017 MUESTRA N°: 3 PROPÓSITO: Caracterización de material DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Base Granular | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $\% \text{ PERDIDA} = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100$ <p>P1 : Masa de la muestra seca antes del ensayo P2 : Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre el tamiz de 4,75 (No. 4) y 1.18 mm (No. 16)</p> <table border="1" style="margin: 20px auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">PASA</th> <th colspan="2">REIENE</th> <th rowspan="2">MASA (gr)</th> </tr> <tr> <th>mm</th> <th>(pulg)</th> <th>mm</th> <th>(pulg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>12.5</td> <td>1/2"</td> <td>9.5</td> <td>3/8"</td> <td>750</td> </tr> <tr> <td>9.5</td> <td>3/8"</td> <td>6.3</td> <td>1/4"</td> <td>375</td> </tr> <tr> <td>6.3</td> <td>1/4"</td> <td>4.75</td> <td>No. 4</td> <td>375</td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;">TOTAL</td> <td>1500</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="margin: 20px auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>P1 (g)</td> <td>1,500.0</td> </tr> <tr> <td>P2 (g)</td> <td>1,135.9</td> </tr> <tr> <td>% Perdida (i)</td> <td>24.27%</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">% PERDIDA= 24%</p> | | | PASA | | REIENE | | MASA (gr) | mm | (pulg) | mm | (pulg) | 12.5 | 1/2" | 9.5 | 3/8" | 750 | 9.5 | 3/8" | 6.3 | 1/4" | 375 | 6.3 | 1/4" | 4.75 | No. 4 | 375 | TOTAL | | | | 1500 | P1 (g) | 1,500.0 | P2 (g) | 1,135.9 | % Perdida (i) | 24.27% |
| PASA | | REIENE | | MASA (gr) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| mm | (pulg) | mm | (pulg) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12.5 | 1/2" | 9.5 | 3/8" | 750 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9.5 | 3/8" | 6.3 | 1/4" | 375 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.3 | 1/4" | 4.75 | No. 4 | 375 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TOTAL | | | | 1500 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P1 (g) | 1,500.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P2 (g) | 1,135.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| % Perdida (i) | 24.27% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Observaciones: _____ Laboratorista(s): Diego Macias y Francisco Torres Director: Ing. Ricardo Ochoa Revisó: Ing. Manuel Sierra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

A8. Determinación del valor del 10% de finos.

| | | |
|--------------------------------------|---|-----------------------------|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA |  | DETERMINACION DEL VALOR DEL |
| DE COLOMBIA | | 10% DE FINOS |
| FACULTAD DE INGENIERÍA | | NORMA INVE - 224 - 13 |
| ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS | | CORRESPONDENCIAS |
| LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS | | BS 812 - Part 110 - 1990 |

| | |
|--|---|
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno</u> | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> |
| MUESTRA N°: <u>1</u> | PROPÓSITO: <u>CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL</u> |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: <u>Material para base granular</u> | |

$$F = \frac{14 * f}{m + 4}$$

f: Maxima fuerza, kN

m: Porcentaje del material que pasa el tamiz No.8 a la maxima fuerza

(m = 100M2/M1)

| | |
|---------|--------------|
| M1 (gr) | 3085.00 |
| M2 (gr) | 237.00 |
| M3 (gr) | 2,841.00 |
| f (Kn) | 82.20 |
| M2/M3 | 8.34% |


$$f \text{ (kN)} = \frac{14 * 82.20}{7.68 + 4} = 93 \text{ kN}$$

Observaciones: _____

Laboratorista: Diego Macias y Francisco Torres

Revisó: Ing Ricardo Ochoa

A9. Perdidas de solidez en sulfato

| | | | |
|--|---|--|----------------------|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | SOLIDEZ DE LOS AGREGADOS FRENTE A LAS SOLUCIONES | |
| | | DE SULFATO DE SODIO O MAGNESIO | |
| | | NORMA INV E-220-13 | |
| | | CORRESPONDENCIAS | |
| | | ASTM C - 88 - 99a | AASHTO T - 104-99 03 |

| | |
|--|--------------------------------------|
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno</u> | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> |
| MUESTRA Nº: <u>1</u> | PROPÓSITO: <u>CARACTERIZACIÓN DE</u> |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: <u>Material para base granular</u> | <u>MATERIAL</u> |

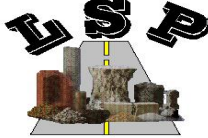
| Tamiz | | Peso muestra | No. Ciclos | | | | | % de perdida de |
|--------------|---------|--------------|------------|--------|--------------|--------|--------|-----------------|
| Pasa | Retiene | | 1 (gr) | 2 (gr) | 3 (gr) | 4 (gr) | 5 (gr) | |
| 1 1/2 " | 1" | 1025 | 1012.83 | 1003.4 | 985 | 972.3 | 967.2 | 5.64 |
| 1" | 3/4" | 511 | 503.2 | 500.1 | 497.6 | 494.2 | 491.8 | 3.76 |
| 3/4" | 1/2" | 708 | 703.5 | 698.1 | 693.6 | 689.4 | 683.4 | 3.47 |
| 1/2" | 3/8" | 417 | 403.2 | 388.6 | 375.4 | 368.2 | 362.3 | 13.12 |
| 3/8" | No. 4 | 100 | 96.3 | 96.1 | 95.4 | 94.7 | 94.2 | 5.80 |
| No. 4 | No. 8 | 100 | 92.1 | 89.8 | 87.8 | 86.9 | 85.9 | 14.10 |
| No. 8 | No. 16 | 100 | 85.4 | 83.1 | 80.4 | 78.2 | 77.4 | 22.60 |
| No. 16 | No. 30 | 100 | 83.8 | 80.5 | 75.7 | 72.6 | 70.5 | 29.50 |
| No. 30 | No. 50 | 100 | 92.3 | 85.7 | 78.6 | 70.3 | 68.8 | 31.20 |
| Total | | 3161 | | | Total | 2901.5 | | 8.21 |

Observaciones: _____

Laboratorista: Diego Macias y Francisco Torres

Revisó: Ing Ricardo Ochoa

A10. Límite líquido e índice de plasticidad

| | | | | |
|---|---|----------------------------------|---------|------------------|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO | | |
| | | NORMA INV E- 125 - 13 y E-126 | | |
| | | CORRESPONDENCIAS | | |
| | | NLT105 | NLT 106 | AASHTO T89 Y T90 |

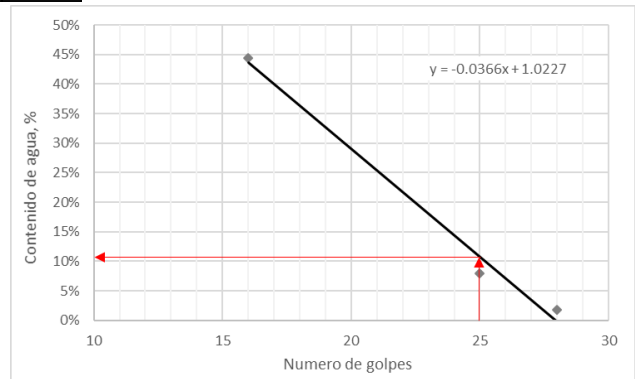
| | |
|--|---|
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno</u> | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> |
| MUESTRA Nº: <u>1</u> | PROPÓSITO: <u>CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL</u> |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: <u>Material para base granular</u> | |

| Límite Líquido | | | | Límite plástico | |
|-------------------|-------|-------|-------|-----------------------|--------|
| Capsula | 1 | 2 | 3 | Peso suelo húmedo | 24,029 |
| Número de golpes | 28 | 25 | 16 | Peso suelo seco | 22.74 |
| Peso suelo húmedo | 29.62 | 31.64 | 32.02 | Contenido de agua, LP | 6% |
| Peso suelo seco | 29.1 | 29.3 | 22.18 | | |
| Contenido de agua | 2% | 8% | 44% | | |


| Resultados | |
|-----------------------|-----|
| Límite Líquido | 11% |
| Límite Plástico | 6% |
| Índice de plasticidad | 5% |

Observaciones: _____


Laboratorista: Diego Macias y Francisco Torres Revisó: Ing Ricardo Ochoa



A11. Equivalente de arena.

| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS NORMA INV E - 133 - 13 CORRESPONDENCIAS ASTM D - 2419 - 95 AASHTO T-107 - 02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|---|--------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|-----|-----|------|-------|-----|-----|------|-------|-----|-----|------|-----------------|--|--|-------------|
| OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno | | FECHA: Semestre II-2017 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA N°: 1 | | PROPÓSITO: Caracterización de material | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Base Granular | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $\text{Equivalente de Arena EA} = \frac{\text{Lectura de Arena}}{\text{Lectura de Arcilla}} \times 100$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;">Muestra</th> <th style="padding: 5px;">Lectura de Arena (pulg)</th> <th style="padding: 5px;">Lectura de Arcilla (pulg)</th> <th style="padding: 5px;">Equivalente de Arena (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;">No. 1</td> <td style="padding: 5px;">1.6</td> <td style="padding: 5px;">5.7</td> <td style="padding: 5px;">28.1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">No. 2</td> <td style="padding: 5px;">1.7</td> <td style="padding: 5px;">5.9</td> <td style="padding: 5px;">28.8</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">No. 3</td> <td style="padding: 5px;">1.6</td> <td style="padding: 5px;">5.8</td> <td style="padding: 5px;">27.6</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="padding: 5px; text-align: center;">Promedio</td> <td style="padding: 5px; text-align: center;">28.2</td> </tr> </tbody> </table> | | | Muestra | Lectura de Arena (pulg) | Lectura de Arcilla (pulg) | Equivalente de Arena (%) | No. 1 | 1.6 | 5.7 | 28.1 | No. 2 | 1.7 | 5.9 | 28.8 | No. 3 | 1.6 | 5.8 | 27.6 | Promedio | | | 28.2 |
| Muestra | Lectura de Arena (pulg) | Lectura de Arcilla (pulg) | Equivalente de Arena (%) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| No. 1 | 1.6 | 5.7 | 28.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| No. 2 | 1.7 | 5.9 | 28.8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| No. 3 | 1.6 | 5.8 | 27.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | | | 28.2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Observaciones: _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Laboratorista(s): Diego Macias y Francisco Torres | | Director: Ing. Ricardo Ochoa | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Revisó: Ing. Manuel Sierra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

A12. Azul de metileno.

| | | | | | | | | | |
|--|--|---|-------------------|--|-------|----------------------------|-------|--|------|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | AZUL DE METILENO | | | | | | | |
| | | SUELOS Y AGREGADOS FINOS | | | | | | | |
| | | NORMA INV E - 235 - 13 | | | | | | | |
| | | CORRESPONDENCIAS | | | | | | | |
| | | ASTM D - 2419 - 95 | AASHTO T-107 - 02 | | | | | | |
| OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno | | FECHA: Semestre II-2017 | | | | | | | |
| MUESTRA N°: 1 | | PROPÓSITO: Caracterización de material | | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Base Granular | | | | | | | | | |
| <table border="1" data-bbox="407 800 834 999"> <tr> <td>Masa Inicial que paso por el tamiz N° 4 (M1)</td> <td>10 gr</td> </tr> <tr> <td>Volumen del agua utilizada</td> <td>30 ml</td> </tr> <tr> <td>Volumen de solución de Azul de metileno (V1)</td> <td>8 ml</td> </tr> </table> | | | | Masa Inicial que paso por el tamiz N° 4 (M1) | 10 gr | Volumen del agua utilizada | 30 ml | Volumen de solución de Azul de metileno (V1) | 8 ml |
| Masa Inicial que paso por el tamiz N° 4 (M1) | 10 gr | | | | | | | | |
| Volumen del agua utilizada | 30 ml | | | | | | | | |
| Volumen de solución de Azul de metileno (V1) | 8 ml | | | | | | | | |
| $VA = \left(\frac{V1}{M1} \right) * 10$ <table border="1" data-bbox="945 894 1151 982"> <tr> <td>Valor azul de metileno</td> <td>8</td> </tr> </table> | | | | Valor azul de metileno | 8 | | | | |
| Valor azul de metileno | 8 | | | | | | | | |
| Observaciones: _____ | | | | | | | | | |
| Laboratorista(s): Diego Macias y Francisco Torres | | Director: Ing. Ricardo Ochoa | | | | | | | |
| Revisó: Ing. Manuel Sierra | | | | | | | | | |

A13. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales.

| | | | |
|---|---|--------------------------------------|------------|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | DETERMINACIÓN DE TERRONES DE ARCILLA | |
| | | Y PARTÍCULAS DELEZNABLES | |
| | | NORMA INVE-211-13 | |
| | | CORRESPONDENCIAS | |
| | | ASTM C142 | AASHTOT112 |

| | |
|--|---|
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno</u> | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> |
| MUESTRA N°: <u>1</u> | PROPÓSITO: <u>Caracterización de Material</u> |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: <u>Material para base granular</u> | |

| TAMIZ | | | | Masa de la muestra, g | Masa de las partículas retenidas, g | % p |
|---------------------|-------------|----------|-------------|-----------------------|-------------------------------------|------|
| PASA | | RETIENE | | | | |
| ESTANDAR | ALTERNATIVO | ESTANDAR | ALTERNATIVO | | | |
| 37,5 mm | 1 1/2 | 19 mm | 3/4 | 3085 | 3002 | 2.69 |
| 19 mm | 3/4 | 9,5 mm | 3/8 | 2143 | 2117 | 1.21 |
| 6,3 mm | | 1/4 | | 1078 | 1059 | 1.76 |
| FINO RETENIDO N° 16 | | | | 540 | 533 | 1.30 |

$$P = \frac{M - R}{M} \times 100$$

p = porcentajede terrones de arcilla y partículas deleznales

M = Masa de la muestra de ensayo

R = Masa de las partículas retenidas


$$\% \text{ Desgaste} = 1.98$$

Observaciones: _____

Laboratorista: Diego Macias y Francisco Torres

Revisó: Ing. Ricardo Ochoa

A14. Índice de aplanamiento.

| | | | |
|---|---|---|---------------------|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA |  | ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO | |
| FACULTAD DE INGENIERÍA | | DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS | |
| ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS | | NORMA INVE - 230 - 13 | |
| LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS | | CORRESPONDENCIAS | |
| | | UNE EN 933-3 1997 | NTL 354 - 91 |

| | |
|---|--|
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno</u> | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> |
| MUESTRA N°: <u>1</u> | PROPÓSITO: <u>CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL</u> |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: <u>Material para base granular</u> | |

Índice de Aplanamiento Global

$$ILi = \frac{m_i}{R_i} \times 100 \qquad IL = \frac{M_2}{M_1} \times 100$$

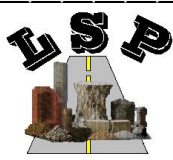
| Tamiz retiene | Masa (R1) de la Fracción Granulométrica di/Di (gr) | Ancho Nominal de las Ranuras del Calibrador | Masa de las partículas que pasan por el calibrador (mi) (gr) | Índice de Aplanamiento Ia=(mi/Ri) x 100 |
|------------------|---|---|---|---|
| 1" | 1888.50 | 18.8 | 653.40 | 35% |
| 3/4" | 2754.60 | 13.2 | 926.40 | 34% |
| 1/2" | 2767.60 | 9.5 | 901.90 | 33% |
| 3/8" | 4,131.00 | 6.6 | 1218.40 | 29% |
| 1/4" | 3,572.70 | 4.7 | 1180.90 | 33% |
| Σ (M1) | 15114.4 | Σ (M2) | 4881.00 | |

Índice de Aplanamiento Global = $\frac{4881.00}{15114.4} \times 100 = 32\%$


Observaciones: _____

Laboratorista: Diego Macias y Francisco Torres **Revisó:** Ing Ricardo Ochoa

A15. Índice de alargamiento.

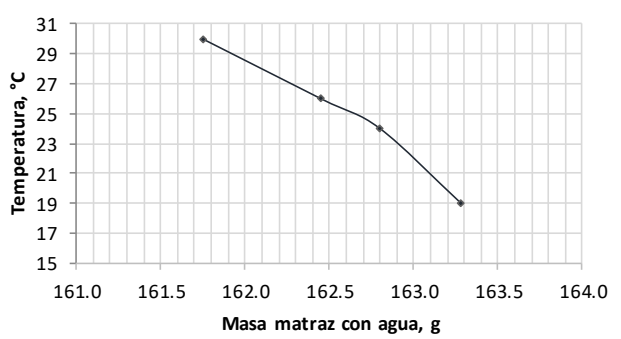
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA |  | ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|---|---|------------------|---|---|---|---|----|---------|------|--------|-----|------|---------|------|--------|-----|------|---------|------|--------|-----|------|----------|------|--------|-----|------|----------|------|---------|-----|---------------|---------|---------------|---------|--|
| FACULTAD DE INGENIERÍA | | NORMA INVE - 230 - 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS | | CORRESPONDENCIAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS | | UNE EN 933-3 1997 NTL 354 - 91 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <hr/> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno</u> | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA N°: <u>1</u> | PROPÓSITO: <u>CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL</u> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: <u>Material para base granular</u> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Índice de Alargamiento Global</p> $ILi = \frac{m_i}{R_i} \times 100 \qquad IL = \frac{M_2}{M_1} \times 100$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">Tamiz retiene</th> <th style="width: 20%;">Masa (R1) de la Fracción Granulométrica di/Di (gr)</th> <th style="width: 15%;">Ancho Nominal de las Ranuras del Calibrador</th> <th style="width: 20%;">Masa de las partículas que pasan por el calibrador (mi) (gr)</th> <th style="width: 30%;">Índice de Aplanamiento Ia=(mi/Ri) x 100</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1"</td> <td style="text-align: center;">1888.50</td> <td style="text-align: center;">56.3</td> <td style="text-align: center;">276.00</td> <td style="text-align: center;">15%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3/4"</td> <td style="text-align: center;">2754.60</td> <td style="text-align: center;">39.6</td> <td style="text-align: center;">788.60</td> <td style="text-align: center;">29%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1/2"</td> <td style="text-align: center;">2767.60</td> <td style="text-align: center;">28.4</td> <td style="text-align: center;">725.10</td> <td style="text-align: center;">26%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3/8"</td> <td style="text-align: center;">4,131.00</td> <td style="text-align: center;">19.8</td> <td style="text-align: center;">890.90</td> <td style="text-align: center;">22%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1/4"</td> <td style="text-align: center;">3,572.70</td> <td style="text-align: center;">14.2</td> <td style="text-align: center;">1086.40</td> <td style="text-align: center;">30%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Σ (M1)</td> <td style="text-align: center;">15114.4</td> <td style="text-align: center;">Σ (M2)</td> <td style="text-align: center;">3767.00</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> | | | | | Tamiz retiene | Masa (R1) de la Fracción Granulométrica di/Di (gr) | Ancho Nominal de las Ranuras del Calibrador | Masa de las partículas que pasan por el calibrador (mi) (gr) | Índice de Aplanamiento Ia=(mi/Ri) x 100 | 1" | 1888.50 | 56.3 | 276.00 | 15% | 3/4" | 2754.60 | 39.6 | 788.60 | 29% | 1/2" | 2767.60 | 28.4 | 725.10 | 26% | 3/8" | 4,131.00 | 19.8 | 890.90 | 22% | 1/4" | 3,572.70 | 14.2 | 1086.40 | 30% | Σ (M1) | 15114.4 | Σ (M2) | 3767.00 | |
| Tamiz retiene | Masa (R1) de la Fracción Granulométrica di/Di (gr) | Ancho Nominal de las Ranuras del Calibrador | Masa de las partículas que pasan por el calibrador (mi) (gr) | Índice de Aplanamiento Ia=(mi/Ri) x 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1" | 1888.50 | 56.3 | 276.00 | 15% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3/4" | 2754.60 | 39.6 | 788.60 | 29% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1/2" | 2767.60 | 28.4 | 725.10 | 26% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3/8" | 4,131.00 | 19.8 | 890.90 | 22% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1/4" | 3,572.70 | 14.2 | 1086.40 | 30% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Σ (M1) | 15114.4 | Σ (M2) | 3767.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Índice de Alargamiento Global = $\frac{3767.00}{15114.4} \times 100 = 25\%$</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Observaciones: _____ _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Laboratorista: <u>Diego Macias y Francisco Torres</u> | | | Revisó: <u>Ing Ricardo Ochoa</u> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

A16. Gravedad específica y absorción agregados finos.

| | | |
|--|--|---|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADOS FINOS NORMA LN.V. E - 222 - 13 CORRESPONDENCIAS ASTM C-128-97 AASHTO T-84-04 |
| OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno | | FECHA: Semestre II-2017 |
| MUESTRA N°: 1 | | PROPÓSITO: Caracterización de material |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Base Granular | | |

CALIBRACIÓN MATRAZ

| No. | Masa, g | Temp, °C |
|-----|---------|----------|
| 1 | 663.40 | 19.0 |
| 2 | 662.70 | 24.0 |
| 3 | 662.20 | 26.0 |
| 4 | 661.50 | 30.0 |



A: masa al aire de la muestra seca al horno, g
 B: masa del picnómetro aforado lleno de agua, g
 C: masa total de picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua, g
 S: masa de la muestra saturada y superficialmente seca, g

$$k = \frac{d_{Tx}}{d_{23^{\circ}C}}$$

| No. | Tem °C | A | B | C | S | k |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 1 | 20.0 | 286.50 | 617.10 | 800.23 | 287.24 | 1.000 |

$d_{23^{\circ}C}$: densidad agua temperatura especificada
 d_{Tx} : densidad agua temperatura de ensayo

$$G_{sb} = \frac{A}{B+S-C} \cdot k$$

$$G_{sa} = \frac{A}{B + A - C} \cdot k$$


$$G_{sb\ sss} = \frac{S}{B+S-C} \cdot k$$

$$\% \text{ Abs} = \frac{S - A}{A}$$

| | |
|---------------------|-------|
| A 23°C | 1 |
| G _{sb} | 2.753 |
| G _{sb sss} | 2.760 |
| G _{sa} | 2.767 |
| % Abs | 0.258 |

Observaciones: _____
Laboradorista(s): Diego Macias y Francisco Torres **Director:** Ing. Ricardo Ochoa
Revisó: Ing. Manuel Sierra

A17. Angularidad de la fracción fina.

| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA |  | DETERMINACION DEL CONTENIDO DE VACIOS EN AGREGADOS NO COMPACTADOS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|--|-------|-------|---|---|---|---|-----|-------|-------|-------|---|-----|-------|-------|-------|---|-----|-------|-------|-------|
| FACULTAD DE INGENIERÍA | | NORMA INV E - 239- 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS | | CORRESPONDENCIAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS | | ASTM C - 1252 - 06 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno</u> | | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA N°: <u>1</u> | | PROPÓSITO: <u>CARACTERIZACIÓN DE</u> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: <u>Material para base granular</u> | | <u>MATERIAL</u> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $U = \frac{V - \frac{F}{G}}{V} \times 100$ <p>U : Porcentaje de vacios en el agregado fino sin compactar. F : Masa neta del agregado fino en el medidor, gr. G : Densidad relativa seca (gravedad especifica) del agregado fino. V : Volumen del medidor cilindrico, ml.</p> <table border="1" data-bbox="618 957 935 1083"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>V</th> <th>F</th> <th>G</th> <th>U</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>100</td> <td>162.7</td> <td>2.753</td> <td>40.9%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>100</td> <td>161.5</td> <td>2.753</td> <td>41.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>100</td> <td>161.8</td> <td>2.753</td> <td>41.2%</td> </tr> </tbody> </table> <p>% Vacios del agregado fino = 41.2%</p> <p>Observaciones: _____</p> <p>_____</p> <p>Laboratorista: <u>Diego Macias y Francisco Torres</u> Revisó: <u>Ing Ricardo Ochoa</u></p> | | | No. | V | F | G | U | 1 | 100 | 162.7 | 2.753 | 40.9% | 2 | 100 | 161.5 | 2.753 | 41.3% | 3 | 100 | 161.8 | 2.753 | 41.2% |
| No. | V | F | G | U | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 100 | 162.7 | 2.753 | 40.9% | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 100 | 161.5 | 2.753 | 41.3% | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 100 | 161.8 | 2.753 | 41.2% | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

A18. Ensayo modificado de compactación.

| | | | |
|--|--|-----------------------------------|-------------------|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS | | ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN | |
| | | NORMA I.N.V. E - 142 -13 | |
| | | CORRESPONDENCIAS | |
| | | ASTM D - 1557 - 00 | AASHTO T-180 - 01 |

| | |
|--|--------------------------------------|
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno</u> | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> |
| MUESTRA Nº: <u>1</u> | PROPÓSITO: <u>Caracterización de</u> |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: <u>Material para base granular</u> | <u>Material</u> |

| PRUEBA No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| No. Golpes/capa | 56 | 56 | 56 | 56 |
| Humedad deseada, % | 7 | 7.5 | 8 | 9 |
| Humedad de la muestra, % | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.4 |
| Humedad adicional, % | 2.6 | 3.1 | 3.6 | 4.6 |
| Masa muestra húmeda, kg | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Masa muestra seca, kg | 4.789 | 4.789 | 4.789 | 4.789 |
| Agua adicional, cm ³ | 124.5 | 148.5 | 172.4 | 220.3 |

| Molde No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Volumen molde, m ³ | 0.0021 | 0.0021 | 0.0021 | 0.0021 |
| Masa molde, kg | 5.98 | 6.238 | 6.172 | 5.995 |

| | | | | |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Masa molde+muestra húmeda compacta, k | 9.997 | 10.319 | 10.387 | 10.067 |
| Masa muestra húmeda compacta, kg | 4.017 | 4.081 | 4.215 | 4.072 |
| Humedad al horno, % | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 |
| Masa muestra seca compacta, kg | 3.7542 | 3.7963 | 3.9028 | 3.753 |

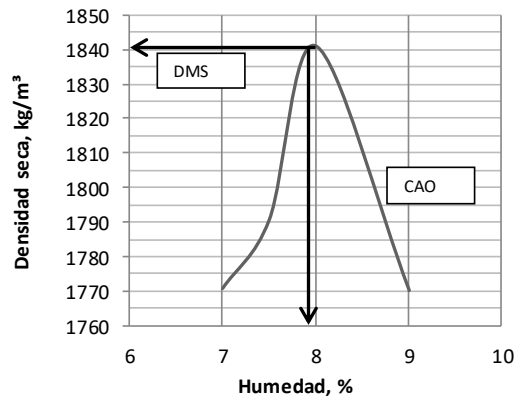
| | | | | |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Densidad seca, kg/m ³ | 1770.9 | 1790.7 | 1840.9 | 1770.3 |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|

| PRUEBA No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------------|------|------|------|------|
| Capsula No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Masa capsula, g | 21.6 | 32.4 | 13.4 | 23.7 |
| M. capsula+muestra húmeda | 69.4 | 88.6 | 53.1 | 94.6 |
| M. capsula+muestra seca | 66.2 | 84.7 | 50.2 | 88.7 |
| Humedad, % | 7.08 | 7.5 | 8.05 | 9.08 |

HUMEDAD NATURAL

| PRUEBA No. | 1 |
|---------------------------|-------|
| Capsula No. | 1 |
| Masa capsula, g | 16 |
| M. capsula+muestra húmeda | 69.7 |
| M. capsula+muestra seca | 67.45 |
| Humedad, % | 4.4 |

| | Valor |
|-----|-------|
| DMS | 1840 |
| CAO | 8.1 |



DMS: densidad máxima seca, kg/m³
 CAO: contenido de agua óptimo, %


Observaciones: La humedad óptima y la densidad seca máxima dan muy cercanas al ensayo del 3er cilindro

Laborarista: Diego Macias y Francisco Torres

Revisó: _____

Ing. Ricardo Ochoa

A19. CBR del material.

| | | |
|--|--|--|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | ENSAYO DE CBR NORMA I.N.V. E - 148 -13 CORRESPONDENCIAS ASTM D-1557-00 AASHTO T-180-01 |
|--|--|--|

| | |
|--|--|
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno</u> | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> |
| MUESTRA N°: <u>1</u> | PROPOSITO: <u>Determinación de resistencia del suelo</u> |
| DESCRIPCION DEL MATERIAL: <u>Material base granular - 0% polvillo</u> | |

| Ensayo | 1 | 2 | 3 |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Humedad natural (%) | 4.4 | 4.4 | 4.4 |
| Humedad deseada (%) | 8.1 | 8.1 | 8.1 |
| Humedad adicional (%) | 3.7 | 3.7 | 3.7 |
| Masa muestra húmeda (g) | 7000 | 7000 | 7000 |
| Masa muestra seca (g) | 6475.5 | 6475.5 | 6475.5 |
| Masa agua adicional (g) | 239.6 | 239.6 | 239.6 |
| Masa molde (g) | 4400.5 | 4281.5 | 4225.8 |
| Masa molde + muestra húmeda compacta (g) | 8946.3 | 8506.4 | 8049.3 |
| Masa muestra húmeda compacta (g) | 4545.8 | 4224.9 | 3823.5 |
| Volumen molde (cm3) | 2292.4 | 2315.6 | 2233.9 |
| Masa muestra seca compacta (g) | 4205.2 | 3908.3 | 3537.0 |
| Densidad compacta seca (Kg/m3) | 1.83 | 1.69 | 1.58 |
| Numero de golpes | 56 | 25 | 10 |

| | | | |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|
| Masa recipiente (g) | 21.2 | 22.6 | 15.4 |
| Masa recipiente + muestra húmeda (g) | 91.14 | 74.41 | 83.44 |
| Masa recipiente + muestra seca (g) | 85.9 | 70.5 | 78.4 |
| Humedad horno (%) | 8.1 | 8.2 | 8.0 |


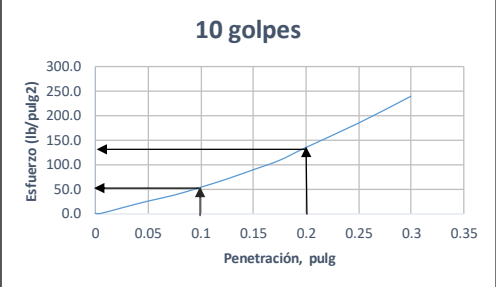
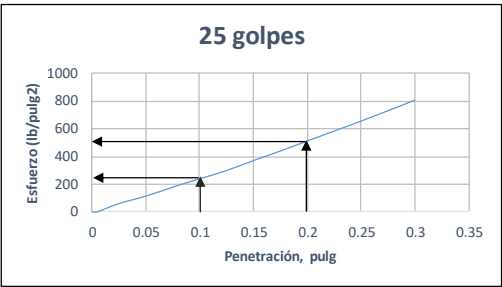
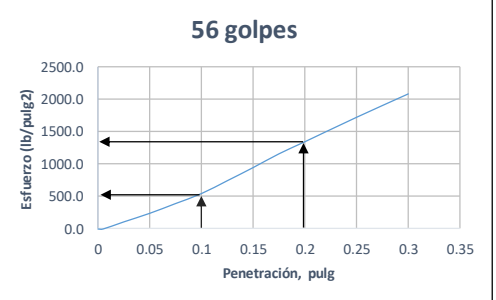
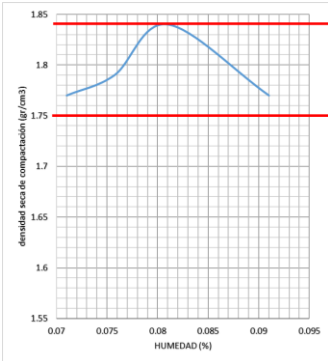
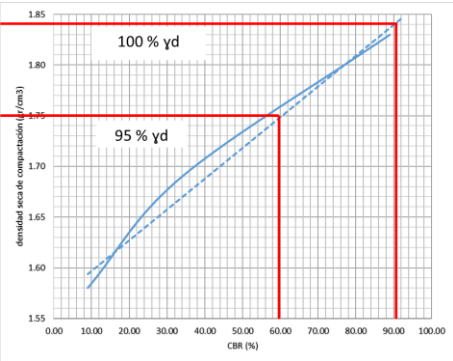
| | | | |
|-------------------|-----|-----|-----|
| Expansión inicial | 163 | 152 | 124 |
| Expansión final | 168 | 155 | 125 |

| Área del pistón = 3.0 pulg2 Penetra. (pulg) | 10 golpes | | 25 golpes | | 56 golpes | |
|--|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|
| | Carga (Lb) | Esf. (lb/pulg2) | Carga (Lb) | Esf. (lb/pulg2) | Carga (Lb) | Esf. (lb/pulg2) |
| 0.000 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.005 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.025 | 34 | 11.3 | 179 | 59.7 | 329 | 109.7 |
| 0.050 | 76 | 25.3 | 340 | 113.3 | 725 | 241.7 |
| 0.075 | 113 | 37.7 | 535 | 178.3 | 1178 | 392.7 |
| 0.100 | 161 | 53.7 | 718 | 239.3 | 1640 | 546.7 |
| 0.125 | 212 | 70.7 | 895 | 298.3 | 2236 | 745.3 |
| 0.150 | 269 | 89.7 | 1113 | 371.0 | 2845 | 948.3 |
| 0.175 | 327 | 109.0 | 1319 | 439.7 | 3483 | 1161.0 |
| 0.200 | 406 | 135.3 | 1538 | 512.7 | 4042 | 1347.3 |
| 0.250 | 556 | 185.3 | 1970 | 656.7 | 5175 | 1725.0 |
| 0.300 | 722 | 240.7 | 2423 | 807.7 | 6260 | 2086.7 |

Observaciones: Únicamente se registraron las lecturas inicial y final durante el periodo de inmersión.


Laboratorista: Diego Macías y Francisco Torres Revisó: Ing. Ricardo Ochoa / Ing. Manuel Sierra

A19. Continuación.

| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | ENSAYO DE CBR <hr/> NORMA I.N.V. E - 148 -13 CORRESPONDENCIAS ASTM D-1557-00 AASHTO T-180-01 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|----------|----------|------------------|------|------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|--|-------------|----|------------------|------|-----|------------------|-------|-----|------------------|-------|-----|
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Análisis del uso de lodos de alto horno...</u> FECHA: <u>Semestre II-2017</u> MUESTRA N°: <u>1</u> PROPOSITO: <u>Determinación de resistencia</u> DESCRIPCION DEL MATERIAL: <u>Material base granular - 0% polvillo</u> <u>del suelo</u> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <h3>10 golpes</h3>  | <h3>25 golpes</h3>  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <h3>56 golpes</h3>  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>CBR 0.1"</th> <th>CBR 0.2"</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10 golpes</td> <td>5.37</td> <td>9.02</td> </tr> <tr> <td>25 golpes</td> <td>23.93</td> <td>34.18</td> </tr> <tr> <td>56 golpes</td> <td>54.67</td> <td>89.82</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>CBR selecc.</th> <th>yd</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10 golpes</td> <td>9.02</td> <td>1.6</td> </tr> <tr> <td>25 golpes</td> <td>34.18</td> <td>1.7</td> </tr> <tr> <td>56 golpes</td> <td>89.82</td> <td>1.8</td> </tr> </tbody> </table> | | CBR 0.1" | CBR 0.2" | 10 golpes | 5.37 | 9.02 | 25 golpes | 23.93 | 34.18 | 56 golpes | 54.67 | 89.82 | | CBR selecc. | yd | 10 golpes | 9.02 | 1.6 | 25 golpes | 34.18 | 1.7 | 56 golpes | 89.82 | 1.8 |
| | CBR 0.1" | CBR 0.2" | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 golpes | 5.37 | 9.02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 golpes | 23.93 | 34.18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 56 golpes | 54.67 | 89.82 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | CBR selecc. | yd | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 golpes | 9.02 | 1.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 golpes | 34.18 | 1.7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 56 golpes | 89.82 | 1.8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Observaciones: Únicamente se registraron las lecturas inicial y final durante el periodo de inmersión. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Laborarista: <u>Diego Macias y Francisco Torres</u> Revisó: <u>Ing. Ricardo Ochoa / Ing. Manuel Sierra</u> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

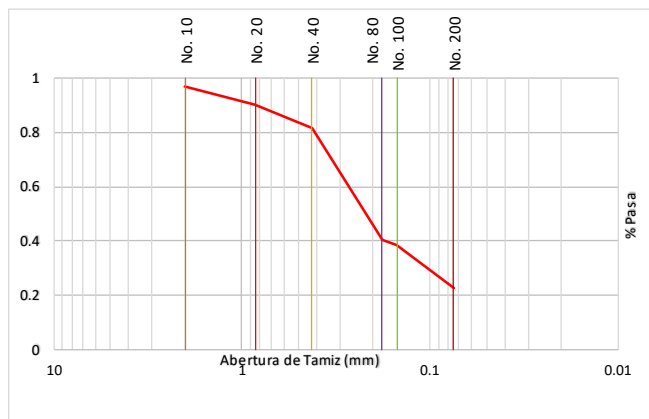
Anexo B. Caracterización del polvillo de alto horno

B1. Granulometría.

| | | |
|--|---|---|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS <hr/> NORMA L.N.V. E- 213 -13 <hr/> CORRESPONDENCIAS <hr/> ASTM C-136-01 AASHTO T-27-99 |
|--|---|---|


| | |
|--|--|
| OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad del uso de polvillo de alto horno | FECHA: Semestre II-2017 |
| MUESTRA N°: 1 | PROPÓSITO: Caracterización de material |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Polvillo del alto horno | |

| TAMIZ | | Masa ensayo, g | Masa muestra, g | % Retenido | % Retenido acumulado | % Pasa |
|----------|-------------|----------------|-----------------|------------|----------------------|--------|
| Estandar | Alternativo | | | | | |
| 2.00 | 10 | 2.66 | 2.66 | 0.7 | 0.7 | 99.34% |
| 0.85 | 20 | 18.98 | 18.98 | 4.7 | 5.3 | 94.65% |
| 0.43 | 40 | 132.3 | 132.30 | 32.7 | 38.0 | 61.97% |
| 0.18 | 80 | 192.68 | 192.68 | 47.6 | 85.6 | 14.36% |
| 0.15 | 100 | 10.68 | 10.68 | 2.6 | 88.3 | 11.72% |
| 0.08 | 200 | 35.12 | 35.12 | 8.7 | 97.0 | 3.04% |
| FONDO | | 12.32 | 12.32 | 3.0 | 100.0 | 0.00% |
| TOTAL | | 404.74 | 404.74 | 100 | | |



Observaciones: _____
 Laboratorista(s): Diego Macias y Francisco Torres Director: Ing. Ricardo Ochoa

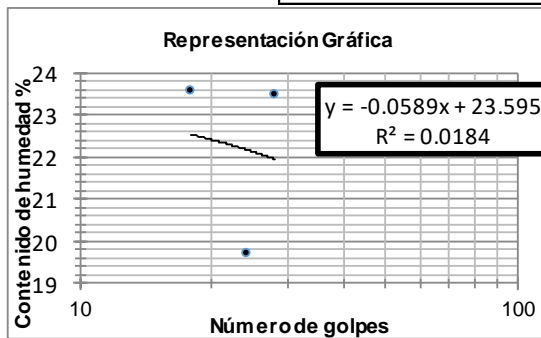
B2. Límites de consistencia.

| | | | | |
|--|---|---|----------------|-------------------------|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO | | |
| | | NORMA INVE - 125 - 07 Y E-126 | | |
| | | CORRESPONDENCIAS | | |
| | | NLT105 | NLT 106 | AASTHO T89 Y T90 |

| | |
|---|---|
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Factibilidad del uso de polvillo de alto hor</u> | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> |
| MUESTRA Nº: <u>1</u> | PROPÓSITO: <u>Caracterización de polvillo</u> |
| <u>polvo del alto horno acerías paz del</u> | |

| Límite Líquido | | | |
|--------------------------------------|------|------|------|
| Número de golpes | 28 | 24 | 18 |
| Recipiente Nº | 1 | 2 | 3 |
| Masa del recipiente+suelo húmedo (g) | 31.1 | 25.8 | 28.7 |
| Masa del recipiente+suelo seco (g) | 29.6 | 24.5 | 26.7 |
| Peso del agua (g) | 1.5 | 1.3 | 2 |
| Masa del recipiente (g) | 23.2 | 17.9 | 18.2 |
| Masa suelo seco (g) | 6.4 | 6.6 | 8.5 |
| Contenido de agua, w, (%) | 23 | 20 | 24 |

| Límite Plástico | | |
|------------------------------------|----------|----------|
| Recipiente Nº | | |
| Masa recipiente+suelo húmedo (g) | | |
| Masa del recipiente+suelo seco (g) | | |
| Peso del agua (g) | | |
| Masa del recipiente (g) | | |
| Masa suelo seco (g) | | |
| Contenido de agua, w, (%) | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! |



Resultados


| | | |
|------------------------------|-----------|---|
| Límite Líquido | <u>22</u> | % |
| Límite Plástico | <u>0</u> | % |
| Índice de plasticidad | <u>0</u> | % |

Observaciones: No fue posible determinarle índice plástico, por lo cual se dice que es un material no plas

Laboratoristas: Diego Macias y Francisco Torres

Revisó: Ing. Ricardo Ochoa

B3. Equivalente de arena.

| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTES Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS NORMA INV E - 133 - 13 CORRESPONDENCIAS ASTM D - 2419 - 95 AASHTO T-107 - 02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|---|--------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|-----|-----|------|-------|-----|-----|------|-------|-----|-----|------|-----------------|--|--|-------------|
| OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad del uso de polvillo de alto horno FECHA: Semestre II-2017 MUESTRA N°: 1 PROPÓSITO: Caracterización de material DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: polvillo del alto horno | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $\text{Equivalente de Arena EA} = \frac{\text{Lectura de Arena}}{\text{Lectura de Arcilla}} \times 100$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;">Muestra</th> <th style="padding: 5px;">Lectura de Arena (pulg)</th> <th style="padding: 5px;">Lectura de Arcilla (pulg)</th> <th style="padding: 5px;">Equivalente de Arena (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;">No. 1</td> <td style="padding: 5px;">3.0</td> <td style="padding: 5px;">3.4</td> <td style="padding: 5px;">89.0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">No. 2</td> <td style="padding: 5px;">2.9</td> <td style="padding: 5px;">3.5</td> <td style="padding: 5px;">85.0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">No. 3</td> <td style="padding: 5px;">2.9</td> <td style="padding: 5px;">3.5</td> <td style="padding: 5px;">85.0</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="padding: 5px; text-align: center;">Promedio</td> <td style="padding: 5px; text-align: center;">86.3</td> </tr> </tbody> </table> | | | Muestra | Lectura de Arena (pulg) | Lectura de Arcilla (pulg) | Equivalente de Arena (%) | No. 1 | 3.0 | 3.4 | 89.0 | No. 2 | 2.9 | 3.5 | 85.0 | No. 3 | 2.9 | 3.5 | 85.0 | Promedio | | | 86.3 |
| Muestra | Lectura de Arena (pulg) | Lectura de Arcilla (pulg) | Equivalente de Arena (%) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| No. 1 | 3.0 | 3.4 | 89.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| No. 2 | 2.9 | 3.5 | 85.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| No. 3 | 2.9 | 3.5 | 85.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | | | 86.3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Observaciones: _____ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Laboratorista(s): <u>Diego Macias y Francisco Torres</u> Director: <u>Ing. Ricardo Ochoa</u> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Revisó: <u>Ing. Manuel Sierra</u> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

B4. Gravedad específica y absorción agregados finos.

| | | | |
|---|--|---|----------------|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTES Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADOS FINOS | |
| | | NORMA L.N.V. E- 222 -13 | |
| | | CORRESPONDENCIAS | |
| | | ASTM C-128-97 | AASHTO T-84-04 |

OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno

FECHA: Semestre II-2017

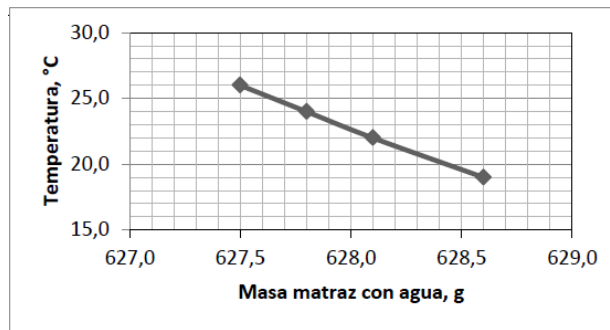
MUESTRA N°: 1

PROPÓSITO: Caracterización de material

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: polvillo de alto horno

CALIBRACIÓN MATRAZ

| No. | Masa, g | Temp, °C |
|-----|---------|----------|
| 1 | 628.60 | 19.0 |
| 2 | 628.10 | 24.0 |
| 3 | 627.80 | 26.0 |
| 4 | 627.50 | 30.0 |



A: masa al aire de la muestra seca al horno, g

B: masa del picnómetro aforado lleno de agua, g

C: masa total de picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua, g

S: masa de la muestra saturada y superficialmente seca, g

$$k = \frac{d_{T_x}}{d_{23^{\circ}\text{C}}}$$

| No. | Tem °C | A | B | C | S | k |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 1 | 20.0 | 189.50 | 628.40 | 748.50 | 200.00 | 1.000 |

$d_{23^{\circ}\text{C}}$: densidad agua temperatura especificada

d_{T_x} : densidad agua temperatura de ensayo

$$G_{sb} = \frac{A}{B+S-C} \cdot k$$

$$G_{sa} = \frac{A}{B + A - C} \cdot k$$

$$G_{sb\ sss} = \frac{S}{B+S-C} \cdot k$$

$$\% \text{ Abs} = \frac{S - A}{A}$$

| | |
|---------|-------|
| A 23°C | 1 |
| Gsb | 2.363 |
| Gsb sss | 2.496 |
| Gsa | 2.727 |
| % Abs | 5.653 |


Observaciones:

Laboratorista(s): Diego Macías y Francisco Torres

Director: Ing. Ricardo Ochoa


Revisó: Ing. Manuel Sierra

B5. Angularidad de la fracción fina.

| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA |  | DETERMINACION DEL CONTENIDO DE VACIOS EN AGREGADOS NO COMPACTADOS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|------|-------|---|---|---|---|-------|-------|------|-------|---|-------|-------|------|-------|---|-------|-------|------|-------|
| FACULTAD DE INGENIERÍA | | NORMA INV E - 239- 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS | | CORRESPONDENCIAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS | | ASTM C - 1252 - 06 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno</u> | | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA N°: <u>1</u> | | PROPÓSITO: <u>CARACTERIZACIÓN DE</u> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: <u>polvillo de alto horno</u> | | <u>MATERIAL</u> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $U = \frac{V - \frac{F}{G}}{V} \times 100$ <p>U : Porcentaje de vacios en el agregado fino sin compactar. F : Masa neta del agregado fino en el medidor, gr. G : Densidad relativa seca (gravedad especifica) del agregado fino. V : Volumen del medidor cilindrico, ml.</p> <table border="1" data-bbox="615 957 933 1085"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>V</th> <th>F</th> <th>G</th> <th>U</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>100.1</td> <td>109.3</td> <td>2.36</td> <td>53.7%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>100.1</td> <td>111.3</td> <td>2.36</td> <td>52.9%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>100.1</td> <td>112.4</td> <td>2.36</td> <td>52.4%</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">% Vacios del agregado fino = 53.0%</p> <p>Observaciones: _____</p> <p>_____</p> <p>Laboratorista: <u>Diego Macias y Francisco Torres</u> Revisó: <u>Ing Ricardo Ochoa</u></p> | | | No. | V | F | G | U | 1 | 100.1 | 109.3 | 2.36 | 53.7% | 2 | 100.1 | 111.3 | 2.36 | 52.9% | 3 | 100.1 | 112.4 | 2.36 | 52.4% |
| No. | V | F | G | U | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 100.1 | 109.3 | 2.36 | 53.7% | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 100.1 | 111.3 | 2.36 | 52.9% | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 100.1 | 112.4 | 2.36 | 52.4% | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Anexo C. Elaboración de las mezclas.

C1. Limite líquido e índice de plasticidad con 2% de polvillo de alto horno.

| | | |
|---|---|---|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO NORMA INV E - 125 - 13 y E-126 CORRESPONDENCIAS NLT105 NLT106 AASTHO T89 Y T90 |
|---|---|---|

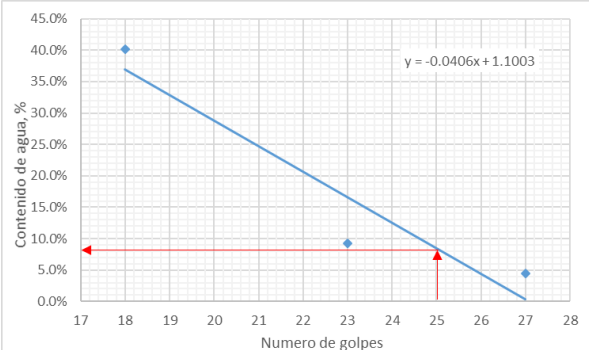
| | |
|--|---|
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno</u> MUESTRA Nº: <u>1</u> DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: <u>Material para base granular</u> | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> PROPÓSITO: <u>Limites de la mezcla.</u> |
|--|---|

| LIMITE LIQUIDO | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|
| Capsula | 1 | 2 | 3 |
| Numero de golpes | 27 | 23 | 18 |
| Peso suelo humedo | 38.13 | 32.6 | 31.47 |
| Peso suelo seco | 36.51 | 29.84 | 22.45 |
| Contenido de agua | 4.4% | 9.2% | 40% |

| LIMITE PLASTICO | |
|-----------------------|-------|
| Peso suelo humedo | 22.69 |
| Peso suelo seco | 21.74 |
| Contenido de agua, LP | 4% |

Resultados

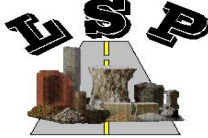
| | |
|-----------------------|----|
| Limite liquido | 8% |
| Limite plastico | 4% |
| Indice de plasticidad | 4% |



Observaciones: _____

| | |
|---|----------------------------------|
| Laboratorista: <u>Diego Macias y Francisco Torres</u> | Revisó: <u>Ing Ricardo Ochoa</u> |
|---|----------------------------------|

C2. Limite líquido e índice de plasticidad con 4% de polvillo de alto horno.

| | | | | |
|---|---|----------------------------------|---------|------------------|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO | | |
| | | NORMA INV E- 125 - 13 y E-126 | | |
| | | CORRESPONDENCIAS | | |
| | | NLT105 | NLT 106 | AASHTO T89 Y T90 |

| | |
|--|---|
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno</u> | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> |
| MUESTRA Nº: <u>1</u> | PROPÓSITO: <u>Limites de la mezcla.</u> |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: <u>Material para base granular</u> | |

| LIMITE LIQUIDO | | | |
|-------------------|------|-------|-------|
| Capsula | 1 | 2 | 3 |
| Numero de golpes | 26 | 20 | 15 |
| Peso suelo humedo | 28.5 | 36.42 | 31.47 |
| Peso suelo seco | 27.1 | 33.79 | 22.45 |
| Contenido de agua | 5.2% | 7.8% | 40% |

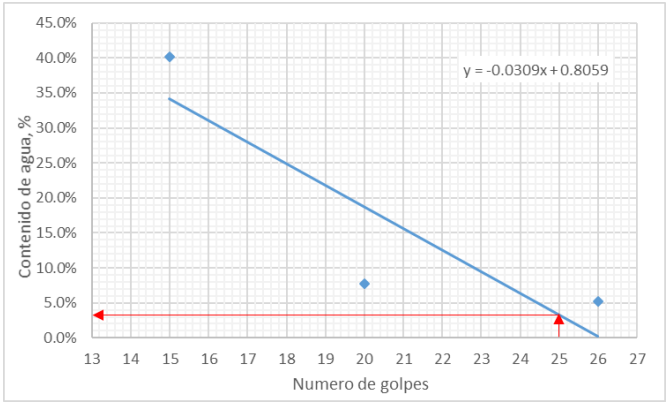
| LIMITE PLASTICO | |
|-----------------------|-------|
| Peso suelo humedo | 28.61 |
| Peso suelo seco | 28.14 |
| Contenido de agua, LP | 2% |

Resultados

Limite liquido 3%

Limite plastico 2%

Indice de plasticidad 1%



Observaciones: _____

Laboratorista: Diego Macias y Francisco Torres **Revisó:** Ing Ricardo Ochoa

C3. Ensayo modificado de compactación con 10% de polvillo de alto horno.

| | | | |
|--|--|-----------------------------------|-------------------|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS | | ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN | |
| | | NORMA I.N.V. E - 142 -13 | |
| | | CORRESPONDENCIAS | |
| | | ASTM D - 1557 - 00 | AASHTO T-180 - 01 |

| | |
|--|--|
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno</u> | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> |
| MUESTRA Nº: <u>1</u> | PROPÓSITO: <u>Ensayos de las mezclas</u> |
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: <u>Material para base granular</u> | |

| PRUEBA No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| No. Golpes/capa | 56 | 56 | 56 | 56 |
| Humedad deseada, % | 6.5 | 7.5 | 8.5 | 9.5 |
| Humedad de la muestra, % | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 4.2 |
| Humedad adicional, % | 2.3 | 3.3 | 4.3 | 5.3 |
| Masa muestra húmeda, kg | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Masa muestra seca, kg | 4.798 | 4.798 | 4.798 | 4.798 |
| Agua adicional, cm ³ | 110.4 | 158.3 | 206.3 | 254.3 |

| Molde No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Volumen molde, m ³ | 0.0021 | 0.0021 | 0.0021 | 0.0021 |
| Masa molde, kg | 6.152 | 5.947 | 6.015 | 5.991 |

| | | | | |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Masa molde+muestra húmeda compacta, k | 10.214 | 10.162 | 10.227 | 10.085 |
| Masa muestra húmeda compacta, kg | 4.062 | 4.215 | 4.212 | 4.094 |
| Humedad al horno, % | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 |
| Masa muestra seca compacta, kg | 3.7963 | 3.9209 | 3.9 | 3.7733 |

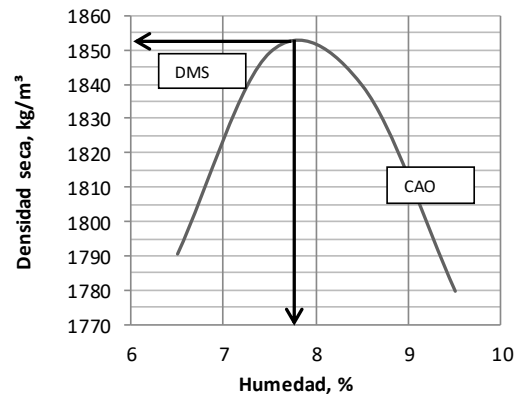
| | | | | |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Densidad seca, kg/m ³ | 1790.7 | 1849.5 | 1839.6 | 1779.8 |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|

| PRUEBA No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------------|------|------|------|------|
| Capsula No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Masa capsula, g | 23.5 | 15.4 | 19.4 | 21.2 |
| M. capsula+muestra húmeda | 61.4 | 34.8 | 37.7 | 61.5 |
| M. capsula+muestra seca | 59.1 | 33.5 | 36.3 | 58 |
| Humedad, % | 6.5 | 7.4 | 8.5 | 9.5 |

HUMEDAD NATURAL

| | |
|---------------------------|-------|
| PRUEBA No. | 1 |
| Capsula No. | 1 |
| Masa capsula, g | 17.4 |
| M. capsula+muestra húmeda | 71 |
| M. capsula+muestra seca | 68.83 |
| Humedad, % | 4.2 |

| | Valor |
|-----|-------|
| DMS | 1852 |
| CAO | 7.9 |



DMS: densidad máxima seca, kg/m³
 CAO: contenido de agua óptimo, %


Observaciones: La humedad optima y la densidad seca maxima dan muy cercanas al ensayo del 3er cilindro

Laborarista: Diego Macias y Francisco Torres

Revisó: _____

Ing. Ricardo Ochoa

C4. CBR con 2% de polvillo de alto horno.

| | | | |
|--|--|--------------------------|-----------------|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | ENSAYO DE CBR | |
| | | NORMA I.N.V. E - 148 -13 | |
| | | CORRESPONDENCIAS | |
| | | ASTM D-1557-00 | AASHTO T-180-01 |

OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno FECHA: Semestre II-2017
 MUESTRA N°: 1 PROPOSITO: Determinación de resistencia del suelo
 DESCRIPCION DEL MATERIAL: Material base granular - 0% polvillo

| Ensayo | 1 | 2 | 3 |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Humedad natural (%) | 4.4 | 4.4 | 4.4 |
| Humedad deseada (%) | 8.1 | 8.1 | 8.1 |
| Humedad adicional (%) | 3.7 | 3.7 | 3.7 |
| Masa muestra húmeda (g) | 7000 | 7000 | 7000 |
| Masa muestra seca (g) | 6475.5 | 6475.5 | 6475.5 |
| Masa agua adicional (g) | 239.6 | 239.6 | 239.6 |
| Masa molde (g) | 3383.4 | 3346.7 | 3507.6 |
| Masa molde + muestra húmeda compacta (g) | 7989.4 | 7399.6 | 7459.4 |
| Masa muestra húmeda compacta (g) | 4606.0 | 4052.9 | 3951.8 |
| Volumen molde (cm ³) | 2340.8 | 2291.4 | 2304.5 |
| Masa muestra seca compacta (g) | 4260.9 | 3749.2 | 3655.7 |
| Densidad compacta seca (Kg/m³) | 1.82 | 1.64 | 1.59 |
| Numero de golpes | 56 | 25 | 10 |

| | | | |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|
| Masa recipiente (g) | 21.2 | 22.6 | 15.4 |
| Masa recipiente + muestra húmeda (g) | 93.14 | 72.13 | 83.70 |
| Masa recipiente + muestra seca (g) | 87.8 | 68.5 | 78.6 |
| Humedad horno (%) | 8.1 | 8.0 | 8.1 |


| | | | |
|-------------------|-----|-----|-----|
| Expansión inicial | 184 | 115 | 163 |
| Expansión final | 189 | 117 | 164 |

| Área del pistón = 3.0 pulg ² | 10 golpes | | 25 golpes | | 56 golpes | |
|---|-----------------|------------|------------------------------|------------|------------------------------|------------|
| | Penetra. (pulg) | Carga (Lb) | Esf. (lb/pulg ²) | Carga (Lb) | Esf. (lb/pulg ²) | Carga (Lb) |
| 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.005 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.025 | 20 | 6.7 | 129 | 43.0 | 239 | 79.7 |
| 0.05 | 47 | 15.7 | 255 | 85.0 | 555 | 185.0 |
| 0.075 | 75 | 25.0 | 382 | 127.3 | 930 | 310.0 |
| 0.1 | 118 | 39.3 | 548 | 182.7 | 1426 | 475.3 |
| 0.125 | 159 | 53.0 | 717 | 239.0 | 2033 | 677.7 |
| 0.15 | 212 | 70.7 | 900 | 300.0 | 2618 | 872.7 |
| 0.175 | 270 | 90.0 | 1113 | 371.0 | 3240 | 1080.0 |
| 0.2 | 345 | 115.0 | 1350 | 450.0 | 3841 | 1280.3 |
| 0.25 | 497 | 165.7 | 1783 | 594.3 | 5037 | 1679.0 |
| 0.3 | 631 | 210.3 | 2226 | 742.0 | 6262 | 2087.3 |

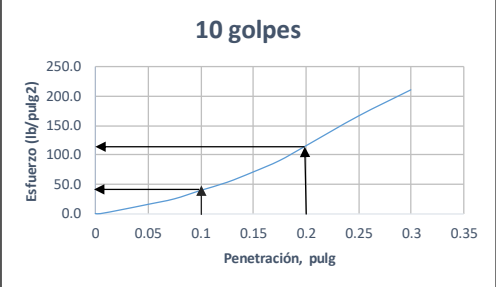
Observaciones: Únicamente se registraron las lecturas inicial y final durante el periodo de inmersión.

Laboratorista: Diego Macías y Francisco Torres Revisó: Ing. Ricardo Ochoa / Ing. Manuel Sierra

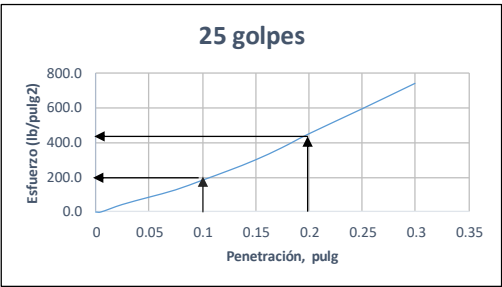
C4. Continuación.

| | | |
|--|--|--|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | ENSAYO DE CBR NORMA I.N.V. E - 148 -13 CORRESPONDENCIAS ASTM D-1557-00 AASHTO T-180-01 |
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Análisis del uso de lodos de alto horno...</u> FECHA: <u>Semestre II-2017</u> | | MUESTRA N°: <u>1</u> PROPOSITO: <u>Determinación de resistencia</u> |
| DESCRIPCION DEL MATERIAL: <u>Material base granular - 0% polvillo</u> | | <u>del suelo</u> |

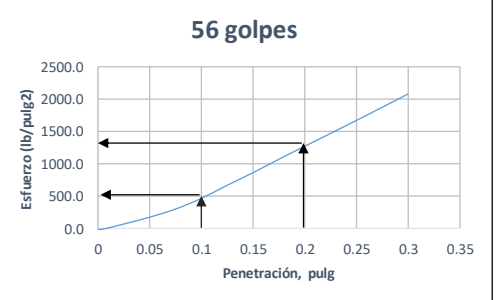
10 golpes



25 golpes

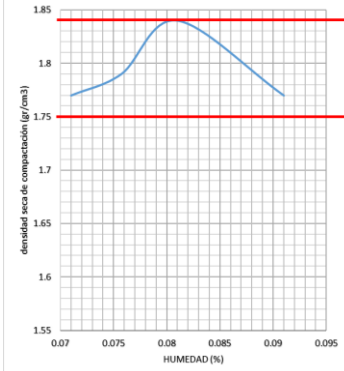


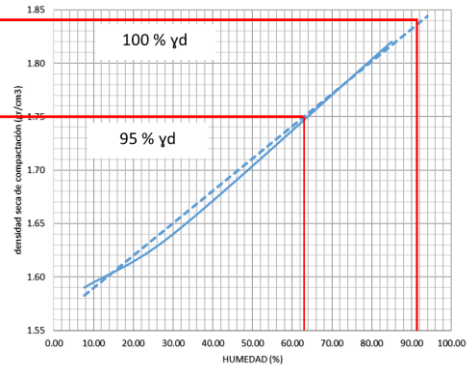
56 golpes



| | CBR 0.1" | CBR 0.2" |
|------------------|----------|----------|
| 10 golpes | 3.93 | 7.67 |
| 25 golpes | 18.27 | 30.00 |
| 56 golpes | 47.53 | 85.36 |

| | CBR selecc. | yd |
|------------------|-------------|------|
| 10 golpes | 7.67 | 1.59 |
| 25 golpes | 30.00 | 1.64 |
| 56 golpes | 85.36 | 1.82 |






Observaciones: Únicamente se registraron las lecturas inicial y final durante el periodo de inmersión.

Laborarista: Diego Macias y Francisco Torres **Revisó:** Ing. Ricardo Ochoa / Ing. Manuel Sierra

C5. CBR con 4% de polvillo de alto horno.

| | | | |
|--|--|--------------------------|-----------------|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | ENSAYO DE CBR | |
| | | NORMA I.N.V. E - 148 -13 | |
| | | CORRESPONDENCIAS | |
| | | ASTM D-1557-00 | AASHTO T-180-01 |

OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno FECHA: Semestre II-2017
 MUESTRA N°: 1 PROPOSITO: Determinación de resistencia del suelo
 DESCRIPCION DEL MATERIAL: Material base granular - 0% polvillo

| Ensayo | 1 | 2 | 3 |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Humedad natural (%) | 4.4 | 4.4 | 4.4 |
| Humedad deseada (%) | 8.1 | 8.1 | 8.1 |
| Humedad adicional (%) | 3.7 | 3.7 | 3.7 |
| Masa muestra húmeda (g) | 7000 | 7000 | 7000 |
| Masa muestra seca (g) | 6475.5 | 6475.5 | 6475.5 |
| Masa agua adicional (g) | 239.6 | 239.6 | 239.6 |
| Masa molde (g) | 3384.3 | 3384.6 | 3379.4 |
| Masa molde + muestra húmeda compacta (g) | 7910.6 | 7590.3 | 7240.1 |
| Masa muestra húmeda compacta (g) | 4526.3 | 4205.7 | 3860.7 |
| Volumen molde (cm ³) | 2292.4 | 2309.6 | 2286.4 |
| Masa muestra seca compacta (g) | 4187.1 | 3890.6 | 3571.4 |
| Densidad compacta seca (Kg/m³) | 1.83 | 1.68 | 1.56 |
| Numero de golpes | 56 | 25 | 10 |

| | | | |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|
| Masa recipiente (g) | 17.46 | 34.7 | 29.1 |
| Masa recipiente + muestra húmeda (g) | 79.1 | 91.2 | 85.30 |
| Masa recipiente + muestra seca (g) | 74.6 | 86.9 | 81.1 |
| Humedad horno (%) | 7.9 | 8.2 | 8.1 |


| | | | |
|-------------------|-----|-----|----|
| Expansión inicial | 98 | 152 | 79 |
| Expansión final | 102 | 154 | 80 |

| Área del pistón = 3.0 pulg ² | 10 golpes | | 25 golpes | | 56 golpes | |
|---|-----------------|------------|------------------------------|------------|------------------------------|------------|
| | Penetra. (pulg) | Carga (Lb) | Esf. (lb/pulg ²) | Carga (Lb) | Esf. (lb/pulg ²) | Carga (Lb) |
| 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.005 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.025 | 40 | 13.3 | 191 | 60.0 | 304 | 101.3 |
| 0.05 | 80 | 26.7 | 337 | 112.3 | 673 | 224.3 |
| 0.075 | 123 | 41.0 | 482 | 160.7 | 1170 | 390.0 |
| 0.1 | 166 | 55.3 | 634 | 211.3 | 1722 | 574.0 |
| 0.125 | 223 | 74.3 | 798 | 266.0 | 2428 | 809.3 |
| 0.15 | 279 | 93.0 | 992 | 330.7 | 3032 | 1010.7 |
| 0.175 | 350 | 116.7 | 1235 | 411.7 | 3599 | 1199.7 |
| 0.2 | 417 | 139.0 | 1480 | 493.3 | 4110 | 1370.0 |
| 0.25 | 552 | 184.0 | 1974 | 658.0 | 5030 | 1676.7 |
| 0.3 | 693 | 231.0 | 2523 | 841.0 | 5885 | 1961.7 |

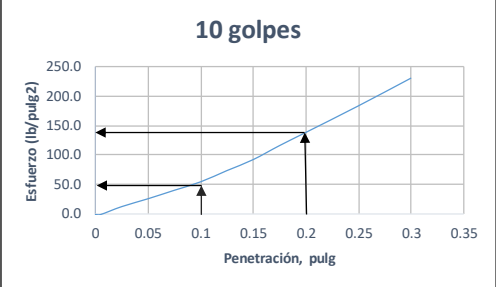
Observaciones: Únicamente se registraron las lecturas inicial y final durante el periodo de inmersión.

Laboratorista: Diego Macías y Francisco Torres Revisó: Ing. Ricardo Ochoa / Ing. Manuel Sierra

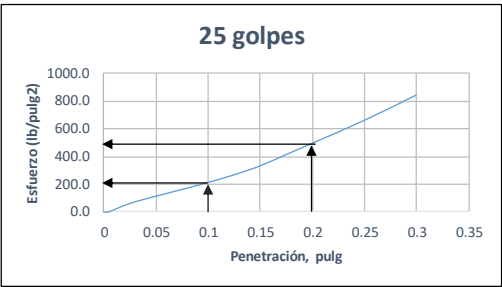
C5. Continuación.

| | | |
|---|--|--|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | ENSAYO DE CBR NORMA I.N.V. E - 148 -13 CORRESPONDENCIAS ASTM D-1557-00 AASHTO T-180-01 |
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Análisis del uso de lodos de alto horno...</u> MUESTRA N°: <u>1</u> DESCRIPCION DEL MATERIAL: <u>Material base granular - 0% polvillo</u> | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> PROPOSITO: <u>Determinación de resistencia del suelo</u> | |

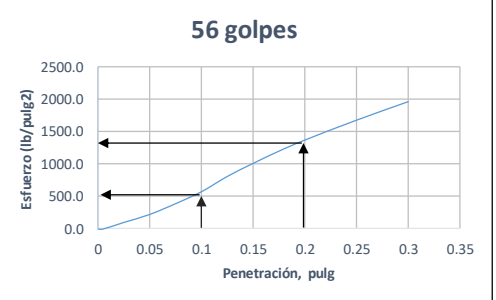
10 golpes



25 golpes

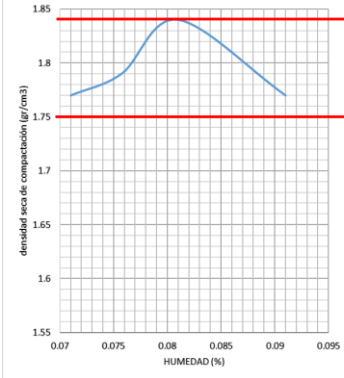


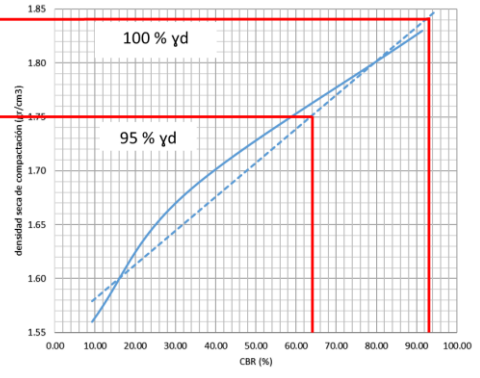
56 golpes



| | CBR 0.1" | CBR 0.2" |
|------------------|----------|----------|
| 10 golpes | 5.53 | 9.27 |
| 25 golpes | 21.13 | 32.89 |
| 56 golpes | 80.93 | 91.33 |

| | CBR selecc. | yd |
|------------------|-------------|------|
| 10 golpes | 9.27 | 1.56 |
| 25 golpes | 32.89 | 1.68 |
| 56 golpes | 91.33 | 1.83 |






Observaciones: Únicamente se registraron las lecturas inicial y final durante el periodo de inmersión.

Laboratorista: Diego Macias y Francisco Torres **Revisó:** Ing. Ricardo Ochoa / Ing. Manuel Sierra

C6. CBR con 6% de polvillo de alto horno.

| | | |
|--|--|--|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | ENSAYO DE CBR NORMA I.N.V. E - 148 -13 CORRESPONDENCIAS ASTM D-1557-00 AASHTO T-180-01 |
|--|--|--|

| | |
|--|--|
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno</u> | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> |
| MUESTRA N°: <u>1</u> | PROPOSITO: <u>Determinación de resistencia del suelo</u> |
| DESCRIPCION DEL MATERIAL: <u>Material base granular - 0% polvillo</u> | |

| Ensayo | 1 | 2 | 3 |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Humedad natural (%) | 4.4 | 4.4 | 4.4 |
| Humedad deseada (%) | 8.1 | 8.1 | 8.1 |
| Humedad adicional (%) | 3.7 | 3.7 | 3.7 |
| Masa muestra húmeda (g) | 7000 | 7000 | 7000 |
| Masa muestra seca (g) | 6475.5 | 6475.5 | 6475.5 |
| Masa agua adicional (g) | 239.6 | 239.6 | 239.6 |
| Masa molde (g) | 3405.3 | 3384.1 | 3840.7 |
| Masa molde + muestra húmeda compacta (g) | 7853.4 | 7718.6 | 7736 |
| Masa muestra húmeda compacta (g) | 4448.1 | 4334.5 | 3895.3 |
| Volumen molde (cm ³) | 2225.9 | 2291.4 | 2304.5 |
| Masa muestra seca compacta (g) | 4114.8 | 4009.7 | 3603.4 |
| Densidad compacta seca (Kg/m³) | 1.85 | 1.75 | 1.56 |
| Numero de golpes | 56 | 25 | 10 |

| | | | |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|
| Masa recipiente (g) | 25.4 | 18.9 | 31.2 |
| Masa recipiente + muestra húmeda (g) | 77.6 | 59 | 83.20 |
| Masa recipiente + muestra seca (g) | 73.7 | 56.0 | 79.4 |
| Humedad horno (%) | 8.1 | 8.1 | 7.9 |


| | | | |
|-------------------|-----|-----|-----|
| Expansión inicial | 99 | 131 | 182 |
| Expansión final | 103 | 133 | 183 |

| Área del pistón = 3.0 pulg ² Penetra. (pulg) | 10 golpes | | 25 golpes | | 56 golpes | |
|--|------------|------------------------------|------------|------------------------------|------------|------------------------------|
| | Carga (Lb) | Esf. (lb/pulg ²) | Carga (Lb) | Esf. (lb/pulg ²) | Carga (Lb) | Esf. (lb/pulg ²) |
| 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.005 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.025 | 43 | 14.3 | 259 | 86.3 | 385 | 128.3 |
| 0.05 | 97 | 32.3 | 540 | 180.0 | 848 | 282.7 |
| 0.075 | 150 | 50.0 | 850 | 283.3 | 1378 | 459.3 |
| 0.1 | 206 | 68.7 | 1141 | 380.3 | 1956 | 652.0 |
| 0.125 | 271 | 90.3 | 1423 | 474.3 | 2616 | 872.0 |
| 0.15 | 344 | 114.7 | 1770 | 590.0 | 3329 | 1109.7 |
| 0.175 | 419 | 139.7 | 2097 | 699.0 | 4075 | 1358.3 |
| 0.2 | 512 | 170.7 | 2446 | 815.3 | 4730 | 1576.7 |
| 0.25 | 712 | 237.3 | 3132 | 1044.0 | 6055 | 2018.3 |
| 0.3 | 924 | 308.0 | 3853 | 1284.3 | 7324 | 2441.3 |

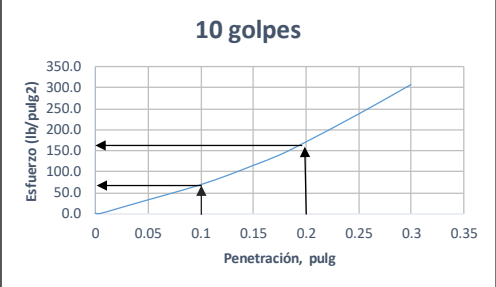
Observaciones: Únicamente se registraron las lecturas inicial y final durante el periodo de inmersión.

Laboratorista: Diego Macías y Francisco Torres Revisó: Ing. Ricardo Ochoa / Ing. Manuel Sierra

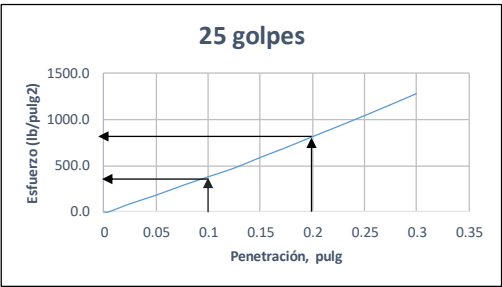
C6. Continuación.

| | | |
|--|--|--|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | ENSAYO DE CBR NORMA I.N.V. E - 148 -13 CORRESPONDENCIAS ASTM D-1557-00 AASHTO T-180-01 |
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Análisis del uso de lodos de alto horno...</u> FECHA: <u>Semestre II-2017</u> | | MUESTRA N°: <u>1</u> PROPOSITO: <u>Determinación de resistencia</u> |
| DESCRIPCION DEL MATERIAL: <u>Material base granular - 0% polvillo</u> | | <u>del suelo</u> |

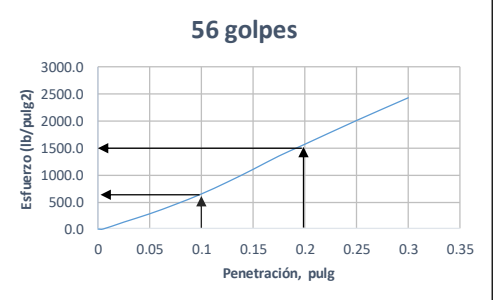
10 golpes



25 golpes

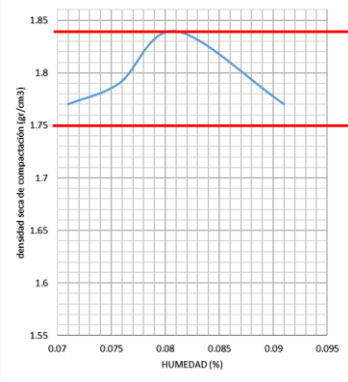


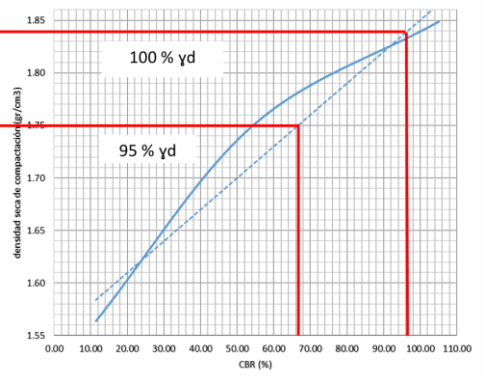
56 golpes



| | CBR 0.1" | CBR 0.2" |
|------------------|----------|----------|
| 10 golpes | 7.00 | 11.00 |
| 25 golpes | 38.00 | 54.00 |
| 56 golpes | 65.00 | 105.00 |

| | CBR selecc. | yd |
|------------------|-------------|------|
| 10 golpes | 11.00 | 1.56 |
| 25 golpes | 54.00 | 1.75 |
| 56 golpes | 105.00 | 1.85 |






Observaciones: Únicamente se registraron las lecturas inicial y final durante el periodo de inmersión.

Laborarista: Diego Macias y Francisco Torres **Revisó:** Ing. Ricardo Ochoa / Ing. Manuel Sierra

C7. CBR con 8% de polvillo de alto horno.

| | | | |
|--|--|--------------------------|-----------------|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | ENSAYO DE CBR | |
| | | NORMA I.N.V. E - 148 -13 | |
| | | CORRESPONDENCIAS | |
| | | ASTM D-1557-00 | AASHTO T-180-01 |

OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno FECHA: Semestre II-2017
 MUESTRA N°: 1 PROPOSITO: Determinación de resistencia del suelo
 DESCRIPCION DEL MATERIAL: Material base granular - 0% polvillo

| Ensayo | 1 | 2 | 3 |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Humedad natural (%) | 4.4 | 4.4 | 4.4 |
| Humedad deseada (%) | 8.1 | 8.1 | 8.1 |
| Humedad adicional (%) | 3.7 | 3.7 | 3.7 |
| Masa muestra húmeda (g) | 7000 | 7000 | 7000 |
| Masa muestra seca (g) | 6475.5 | 6475.5 | 6475.5 |
| Masa agua adicional (g) | 239.6 | 239.6 | 239.6 |
| Masa molde (g) | 3385.6 | 3324.6 | 4848.7 |
| Masa molde + muestra húmeda compacta (g) | 7981.3 | 7397 | 8727 |
| Masa muestra húmeda compacta (g) | 4595.7 | 4072.4 | 3878.3 |
| Volumen molde (cm ³) | 2340.8 | 2291.4 | 2304.5 |
| Masa muestra seca compacta (g) | 4251.3 | 3767.3 | 3587.7 |
| Densidad compacta seca (Kg/m³) | 1.82 | 1.64 | 1.56 |
| Numero de golpes | 56 | 25 | 10 |

| | | | |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|
| Masa recipiente (g) | 15.7 | 27.9 | 33.6 |
| Masa recipiente + muestra húmeda (g) | 64.4 | 85.9 | 85.60 |
| Masa recipiente + muestra seca (g) | 60.7 | 81.6 | 81.7 |
| Humedad horno (%) | 8.2 | 8.0 | 8.1 |


| | | | |
|-------------------|-----|-----|-----|
| Expansión inicial | 171 | 196 | 110 |
| Expansión final | 174 | 198 | 111 |

| Área del pistón = 3.0 pulg ² | 10 golpes | | 25 golpes | | 56 golpes | |
|---|-----------------|------------|------------------------------|------------|------------------------------|------------|
| | Penetra. (pulg) | Carga (Lb) | Esf. (lb/pulg ²) | Carga (Lb) | Esf. (lb/pulg ²) | Carga (Lb) |
| 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.005 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.025 | 21 | 7.0 | 120 | 40.0 | 237 | 79.0 |
| 0.05 | 51 | 17.0 | 237 | 79.0 | 500 | 166.7 |
| 0.075 | 89 | 29.7 | 356 | 118.7 | 901 | 300.3 |
| 0.1 | 133 | 44.3 | 510 | 170.0 | 1362 | 454.0 |
| 0.125 | 184 | 61.3 | 668 | 222.7 | 2015 | 671.7 |
| 0.15 | 241 | 80.3 | 838 | 279.3 | 2594 | 864.7 |
| 0.175 | 308 | 102.7 | 1036 | 345.3 | 3211 | 1070.3 |
| 0.2 | 374 | 124.7 | 1257 | 419.0 | 3808 | 1269.3 |
| 0.25 | 521 | 173.7 | 1660 | 553.3 | 4993 | 1664.3 |
| 0.3 | 663 | 221.0 | 2073 | 691.0 | 6207 | 2069.0 |

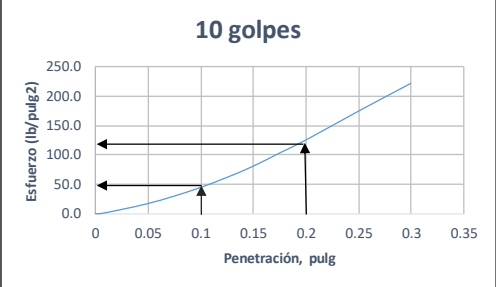
Observaciones: Únicamente se registraron las lecturas inicial y final durante el periodo de inmersión.

Laboratorista: Diego Macías y Francisco Torres Revisó: Ing. Ricardo Ochoa / Ing. Manuel Sierra

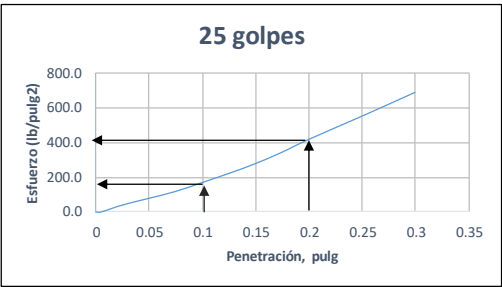
C7. Continuación.

| | | |
|--|--|--|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | ENSAYO DE CBR NORMA I.N.V. E - 148 -13 CORRESPONDENCIAS ASTM D-1557-00 AASHTO T-180-01 |
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Análisis del uso de lodos de alto horno...</u> | | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> |
| MUESTRA N°: <u>1</u> | | PROPOSITO: <u>Determinación de resistencia del suelo</u> |
| DESCRIPCION DEL MATERIAL: <u>Material base granular - 0% polvillo</u> | | |

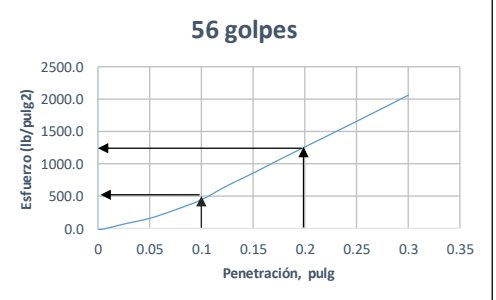
10 golpes



25 golpes

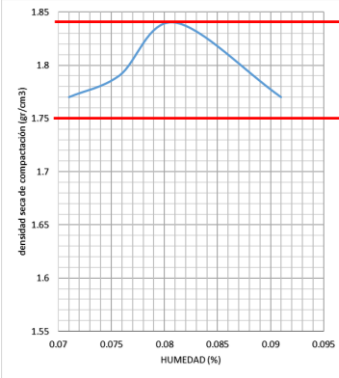


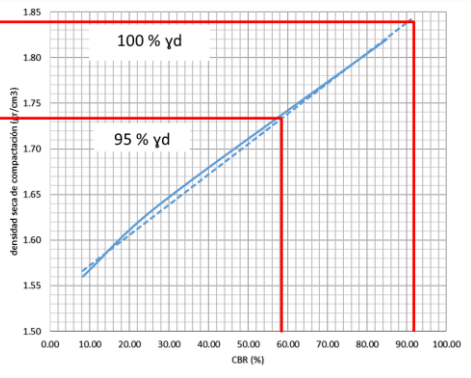
56 golpes



| | CBR 0.1" | CBR 0.2" |
|------------------|----------|----------|
| 10 golpes | 4.00 | 8.00 |
| 25 golpes | 17.00 | 28.00 |
| 56 golpes | 45.00 | 85.00 |

| | CBR selecc. | γd |
|------------------|-------------|------|
| 10 golpes | 8.00 | 1.56 |
| 25 golpes | 28.00 | 1.64 |
| 56 golpes | 85.00 | 1.82 |






Observaciones: Únicamente se registraron las lecturas inicial y final durante el periodo de inmersión.

Laborarista: Diego Macias y Francisco Torres **Revisó:** Ing. Ricardo Ochoa / Ing. Manuel Sierra

C8. CBR con 10% de polvillo de alto horno.

| | | | |
|--|--|--------------------------|-----------------|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | ENSAYO DE CBR | |
| | | NORMA I.N.V. E - 148 -13 | |
| | | CORRESPONDENCIAS | |
| | | ASTM D-1557-00 | AASHTO T-180-01 |

OBRA: Trabajo de grado: Factibilidad de uso de polvillo de alto horno

FECHA: Semestre II-2017

MUESTRA N°: 1

PROPOSITO: Determinación de resistencia

DESCRIPCION DEL MATERIAL: Material base granular - 0% polvillo

del suelo

| Ensayo | 1 | 2 | 3 |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Humedad natural (%) | 4.4 | 4.4 | 4.4 |
| Humedad deseada (%) | 8.1 | 8.1 | 8.1 |
| Humedad adicional (%) | 3.7 | 3.7 | 3.7 |
| Masa muestra húmeda (g) | 7000 | 7000 | 7000 |
| Masa muestra seca (g) | 6475.5 | 6475.5 | 6475.5 |
| Masa agua adicional (g) | 239.6 | 239.6 | 239.6 |
| Masa molde (g) | 3386.0 | 3215.4 | 3422.6 |
| Masa molde + muestra húmeda compacta (g) | 7981.5 | 7345.6 | 7337.5 |
| Masa muestra húmeda compacta (g) | 4595.5 | 4130.2 | 3914.9 |
| Volumen molde (cm ³) | 2340.8 | 2291.4 | 2304.5 |
| Masa muestra seca compacta (g) | 4251.2 | 3820.7 | 3621.6 |
| Densidad compacta seca (Kg/m³) | 1.82 | 1.67 | 1.57 |
| Numero de golpes | 56 | 25 | 10 |

| | | | |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|
| Masa recipiente (g) | 16.3 | 15.7 | 27.4 |
| Masa recipiente + muestra húmeda (g) | 58.6 | 79.8 | 75.90 |
| Masa recipiente + muestra seca (g) | 55.4 | 75.0 | 72.3 |
| Humedad horno (%) | 8.2 | 8.1 | 8.0 |

| | | | |
|-------------------|-----|----|----|
| Expansión inicial | 129 | 91 | 79 |
| Expansión final | 132 | 92 | 80 |


| Área del pistón = 3.0 pulg ² Penetra. (pulg) | 10 golpes | | 25 golpes | | 56 golpes | |
|--|------------|------------------------------|------------|------------------------------|------------|------------------------------|
| | Carga (Lb) | Esf. (lb/pulg ²) | Carga (Lb) | Esf. (lb/pulg ²) | Carga (Lb) | Esf. (lb/pulg ²) |
| 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.005 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 0.025 | 40 | 13.3 | 133 | 44.3 | 230 | 76.7 |
| 0.05 | 80 | 26.7 | 262 | 87.3 | 566 | 188.7 |
| 0.075 | 123 | 41.0 | 394 | 131.3 | 936 | 312.0 |
| 0.1 | 172 | 57.3 | 564 | 188.0 | 1439 | 479.7 |
| 0.125 | 227 | 75.7 | 739 | 246.3 | 1953 | 651.0 |
| 0.15 | 279 | 93.0 | 927 | 309.0 | 2514 | 838.0 |
| 0.175 | 334 | 111.3 | 1146 | 382.0 | 3112 | 1037.3 |
| 0.2 | 384 | 128.0 | 1391 | 463.7 | 3690 | 1230.0 |
| 0.25 | 503 | 167.7 | 1837 | 612.3 | 4839 | 1613.0 |
| 0.3 | 631 | 210.3 | 2294 | 764.7 | 6016 | 2005.3 |

Observaciones: Únicamente se registraron las lecturas inicial y final durante el periodo de inmersión.

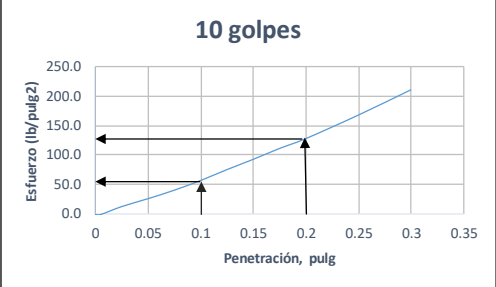
Laboratorista: Diego Macías y Francisco Torres

Revisó: Ing. Ricardo Ochoa / Ing. Manuel Sierra

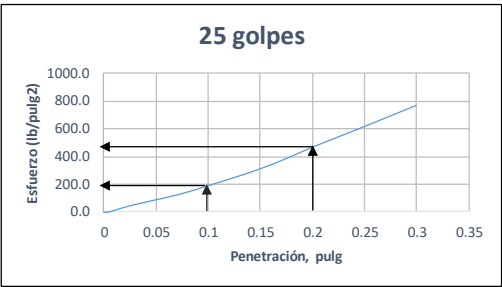
C8. Continuación.

| | | |
|--|--|--|
| UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS |  | ENSAYO DE CBR NORMA I.N.V. E - 148 -13 CORRESPONDENCIAS ASTM D-1557-00 AASHTO T-180-01 |
| OBRA: <u>Trabajo de grado: Análisis del uso de lodos de alto horno...</u> | | FECHA: <u>Semestre II-2017</u> |
| MUESTRA N°: <u>1</u> | | PROPOSITO: <u>Determinación de resistencia del suelo</u> |
| DESCRIPCION DEL MATERIAL: <u>Material base granular - 0% polvillo</u> | | |

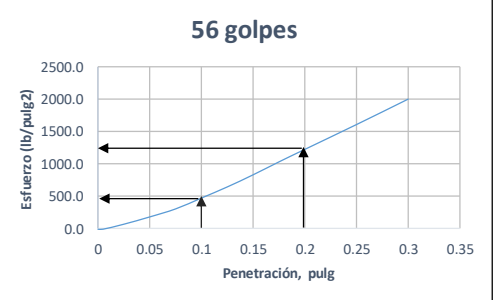
10 golpes



25 golpes

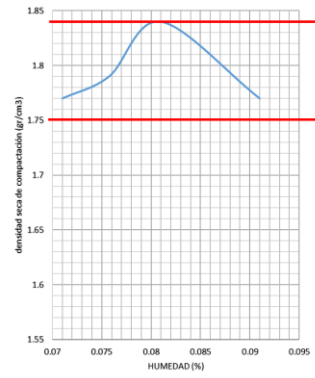


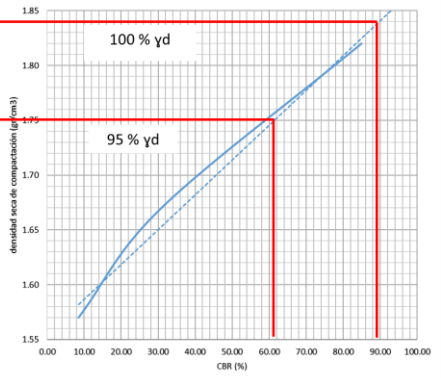
56 golpes



| | CBR 0.1" | CBR 0.2" |
|------------------|----------|----------|
| 10 golpes | 6.00 | 9.00 |
| 25 golpes | 19.00 | 31.00 |
| 56 golpes | 48.00 | 82.00 |

| | CBR selecc. | yd |
|------------------|-------------|------|
| 10 golpes | 9.00 | 1.57 |
| 25 golpes | 31.00 | 1.67 |
| 56 golpes | 82.00 | 1.82 |



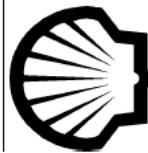


Observaciones: Únicamente se registraron las lecturas inicial y final durante el periodo de inmersión.

Laborarista: Diego Macias y Francisco Torres **Revisó:** Ing. Ricardo Ochoa / Ing. Manuel Sierra

Anexo D. Reportes del programa Bisar 3.0.

D1. Reporte estructura de pavimento con base sin estabilizar.



BISAR 3.0 - Block Report

Tesis sin estabilizar

System 1: Tesis sin estabilizar

Structure

Loads

| Layer Number | Thickness (m) | Modulus of Elasticity (MPa) | Poisson's Ratio | Load Number | Load (kN) | Vertical Stress (MPa) | Horizontal (Shear) Load (kN) | Horizontal (Shear) Stress (MPa) | Radius (m) | X-Coord (m) | Y-Coord (m) | Shear Angle (Degrees) |
|--------------|---------------|-----------------------------|-----------------|-------------|-----------|-----------------------|------------------------------|---------------------------------|------------|-------------|-------------|-----------------------|
| 1 | 0.130 | 2.940E+03 | 0.35 | 1 | 2.000E+01 | 5.458E-01 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 1.080E-01 | 0.000E+00 | 1.620E-01 | 0.000E+00 |
| 2 | 0.250 | 2.020E+02 | 0.40 | 2 | 2.000E+01 | 5.458E-01 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 1.080E-01 | 0.000E+00 | -1.620E-01 | 0.000E+00 |
| 3 | 0.300 | 1.150E+02 | 0.40 | | | | | | | | | |
| 4 | | 4.900E+01 | 0.50 | | | | | | | | | |

| Position Number | Layer Number | X-Coord (m) | Y-Coord (m) | Depth (m) | Stresses (MPa) | | | Strains (µstrain) | | | Displacements (µm) | | |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-----------|----------------|------------|------------|-------------------|------------|------------|--------------------|------------|-----------|
| | | | | | XX | YY | ZZ | XX | YY | ZZ | UX | UY | UZ |
| 1 | 1 | 0.000E+00 | 1.620E-01 | 0.000E+00 | -1.224E+00 | -1.066E+00 | -5.458E-01 | -2.245E+02 | -1.518E+02 | 8.696E+01 | 0.000E+00 | -1.804E+01 | 5.266E+02 |
| 2 | 1 | 0.000E+00 | 1.620E-01 | 1.300E-01 | 8.476E-01 | 6.861E-01 | -1.172E-01 | 2.206E+02 | 1.464E+02 | -2.224E+02 | 0.000E+00 | 1.466E+01 | 5.158E+02 |
| 3 | 4 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 6.801E-01 | -1.307E-03 | -1.764E-03 | -1.599E-02 | 1.545E+02 | 1.405E+02 | -2.850E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 3.543E+02 |

D2. Reporte estructura de pavimento con base estabilizada.



BISR 3.0 - Block Report

Tesis estabilizada

System 1: Tesis sin estabilizar

Structure

| Layer Number | Thickness (m) | Modulus of Elasticity (MPa) | Poisson's Ratio | Load Number | Load (kN) | Vertical Stress (MPa) | Horizontal (Shear) Load (kN) | Stress (MPa) | Radius (m) | X-Coord (m) | Y-Coord (m) | Shear Angle (Degrees) |
|--------------|---------------|-----------------------------|-----------------|-------------|-----------|-----------------------|------------------------------|--------------|------------|-------------|-------------|-----------------------|
| 1 | 0.130 | 2.940E+03 | 0.35 | 1 | 2.000E+01 | 5.458E-01 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 1.080E-01 | 0.000E+00 | 1.620E-01 | 0.000E+00 |
| 2 | 0.200 | 2.070E+02 | 0.40 | 2 | 2.000E+01 | 5.458E-01 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 1.080E-01 | 0.000E+00 | -1.620E-01 | 0.000E+00 |
| 3 | 0.300 | 1.150E+02 | 0.40 | | | | | | | | | |
| 4 | 0.300 | 4.900E+01 | 0.50 | | | | | | | | | |

Loads

| Position Number | Layer Number | X-Coord (m) | Y-Coord (m) | Depth (m) | XX (MPa) | YY (MPa) | ZZ (MPa) | XX (μstrain) | YY (μstrain) | ZZ (μstrain) | UX (μm) | UY (μm) | UZ (μm) |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-----------|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|-----------|------------|-----------|
| 1 | 1 | 0.000E+00 | 1.620E-01 | 0.000E+00 | -1.243E+00 | -1.063E+00 | -5.458E-01 | -2.250E+02 | -1.553E+02 | 9.125E+01 | 0.000E+00 | -1.870E+01 | 5.444E+02 |
| 2 | 1 | 0.000E+00 | 1.620E-01 | 1.300E-01 | 8.622E-01 | 6.998E-01 | -1.157E-01 | 2.237E+02 | 1.491E+02 | -2.253E+02 | 0.000E+00 | 1.519E+01 | 5.337E+02 |
| 3 | 4 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 6.801E-01 | -1.444E-03 | -1.898E-03 | -1.635E-02 | 1.567E+02 | 1.428E+02 | -2.996E+02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 3.617E+02 |