



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA
Y CONSTRUCCIÓN.**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DISEÑO DE
PAVIMENTOS FLEXIBLES CONSIDERANDO LA ESTABILIZACIÓN
CON CAL EN BASES GRANULARES**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: BRYAM GERARDO MOROCHO ENCALADA

DIRECTOR: ING. CÉSAR HUMBERTO MALDONADO NOBOA MSC.

CUENCA-ECUADOR

2025

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA
Y CONSTRUCCIÓN.**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DISEÑO DE
PAVIMENTOS FLEXIBLES CONSIDERANDO LA ESTABILIZACIÓN
CON CAL EN BASES GRANULARES**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: BRYAM GERARDO MOROCHO ENCALADA

DIRECTOR: ING. CÉSAR HUMBERTO MALDONADO NOBOA MSC.

CUENCA-ECUADOR

2025

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Bryam Gerardo Morocho Encalada portador de la cédula de ciudadanía N° **0105848196**. Declaro ser el autor de la obra: **"ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CONSIDERANDO LA ESTABILIZACIÓN CON CAL EN BASES GRANULARES"**, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 07 de agosto de 2025

F: 
Bryam Gerardo Morocho Encalada
0105848196

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Yo, Ing. MSc. César Humberto Maldonado Noboa, certifico que el presente trabajo de titulación realizado por el Sr. Bryam Gerardo Morocho Encalada, egresado de la UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN, fue desarrollado bajo mi supervisión y tutoría con el tema "ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CONSIDERANDO LA ESTABILIZACIÓN CON CAL EN BASES GRANULARES".

Atentamente,

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

F: 

Ing. MSc. César Humberto Maldonado Noboa

C.I.: 0102260916

DOCENTE-TUTOR

DEDICATORIA

Dedico este logro a Dios y a la Virgen, por permitirme culminar esta etapa universitaria, por darme la fortaleza, la fe y la salud necesaria para seguir adelante, y por su amor incondicional que siempre me ha acompañado.

A mis padres, Gerardo y Elena, por estar siempre a mi lado, por sus sabios consejos, los valores que me inculcaron y su apoyo incondicional. Gracias por motivarme cada día a ser una mejor persona y por enseñarme a mantener siempre mi fe en Dios.

A mis hermanos, por su apoyo incondicional a lo largo de mi formación académica, por compartir momentos de alegría y tristeza, y por recordarme siempre que puedo contar con ustedes.

Con todo mi cariño,

Gerardo Morocho Encalada.

AGRADECIMIENTO

Mi más profunda gratitud a Dios, quien ha sido mi fortaleza y refugio en cada etapa de este camino. A la Virgen María, por su amor maternal y ejemplo de fe.

Agradezco profundamente a mis padres, Gerardo y Elena, por educarme con amor y valores, y por enseñarme el verdadero significado del esfuerzo y la perseverancia. A mis hermanos, por su apoyo incondicional, su compañía constante y por ser mis grandes aliados en cada etapa.

A mi tutor, Ing. Mgs César Maldonado Noboa, por su experiencia y compromiso que fueron pilares fundamentales para el desarrollo y culminación de esta tesis. Ha sido un honor y un privilegio contar con su guía durante este proceso académico.

Al Ing. Marcos González, al Ing. Juan Monge y a la Ing. Daniela Ortiz, por su valioso apoyo y guía técnica durante la elaboración de este trabajo. También quiero extender mi agradecimiento a todos mis docentes por su dedicación y por compartir sus conocimientos a lo largo de mi formación académica.

Con profundo agradecimiento y aprecio,

Gerardo Morocho Encalada.

RESUMEN

La presente investigación, desarrolla un análisis comparativo entre los métodos de diseño de pavimentos flexibles propuestos por AASHTO e INVIAS, incorporando la estabilización con cal en materiales granulares de base. El objetivo principal fue evaluar cómo la adición de cal influye en el comportamiento estructural de las bases granulares, mediante el análisis de la variación del CBR y su impacto en el coeficiente estructural. Para ello, se realizaron ensayos de laboratorio y se aplicaron ambos métodos de diseño con el fin de optimizar la estructura del pavimento.

Los materiales utilizados provinieron de las canteras Áridos y Agregados del Sur, y Rookaazul, se llevaron a cabo ensayos de granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado, abrasión y CBR, tanto en estado natural como estabilizados con 2.5%, 3.5% y 5% de cal. Los materiales fueron clasificados como Clase 1, Tipo A y B, respectivamente.

Los resultados evidenciaron mejoras significativas en la resistencia de las bases estabilizadas, con incrementos del CBR de hasta 116% y 118% según la cantera y el porcentaje de cal aplicado. Esto significa la mejora de los materiales con adición de cal. El análisis comparativo entre AASHTO e INVIAS mostró diferencias en los espesores de capas, el método AASHTO contempló menores espesores de las capas de base. Para un tránsito de 1.000.000 ejes equivalentes, la metodología INVIAS prevé espesores de base menores bajo condiciones estructurales más exigentes, contribuyendo igualmente a una mayor eficiencia estructural del pavimento flexible.

Palabras clave: bases granulares, estabilización, pavimentos flexibles, cal, coeficiente estructural

ABSTRACT

This research develops a comparative analysis between the flexible pavement design methods proposed by AASHTO and INVIAS, incorporating lime stabilization in granular base materials. The main objective was to evaluate how the addition of lime influences the structural behavior of the granular bases by analyzing the variation of the CBR and its impact on the structural coefficient. To achieve this, laboratory tests were carried out, and both design methods were applied to optimize the pavement structure.

The materials used came from the Áridos y Agregados del Sur and Rookaazul quarries. Granulometry, Atterberg limits, modified Proctor, abrasion, and CBR tests were performed on the materials in their natural state and stabilized with 2.5%, 3.5%, and 5% lime. The materials were classified as Class 1, Type A and B, respectively.

The results showed significant improvements in the strength of the stabilized bases, with CBR increases of up to 116% and 118% depending on the quarry and the percentage of lime applied. This demonstrates the enhancement of the materials with the addition of lime. The comparative analysis between AASHTO and INVIAS showed differences in layer thicknesses, with the AASHTO method requiring thinner base layers. For a traffic volume of 1,000,000 equivalent single axle loads, the INVIAS methodology provides for thinner base thicknesses under more demanding structural conditions, also contributing to a higher structural efficiency of the flexible pavement.

Keywords: granular bases, stabilization, flexible pavements, lime, structural coefficient

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| ÍNDICE GENERAL | 9 |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | 15 |
| ÍNDICE DE TABLAS | 19 |
| CAPÍTULO I: GENERALIDADES | 23 |
| 1.1. Introducción | 23 |
| 1.2. El problema | 24 |
| 1.2.1. Planteamiento del problema | 24 |
| 1.2.2. Delimitación del problema | 24 |
| 1.2.3. Justificación del problema..... | 25 |
| 1.2.4. Definición de la zona de estudio | 26 |
| 1.3. Objetivos | 28 |
| 1.3.1. Objetivo general | 28 |
| 1.3.2. Objetivos específicos..... | 28 |
| CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO | 29 |
| 2.1. Estado del Arte | 29 |
| 2.2. Base granular..... | 30 |
| 2.2.1. Clasificación de la Base granular..... | 31 |
| 2.3. <i>Caracterización</i> y clasificación de Bases Granulares | 33 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.3.1. | Granulometría | 33 |
| 2.3.2. | Límites de Atterberg | 34 |
| 2.3.3. | Ensayo Proctor Modificado | 36 |
| 2.3.4. | Ensayo de Abrasión | 38 |
| 2.3.5. | CBR (California Bearing Ratio / Índice portante de California) | 40 |
| 2.4. | Pavimento..... | 41 |
| 2.4.1. | Tipos de Pavimentos..... | 41 |
| 2.5. | Pavimento flexible..... | 42 |
| 2.5.1. | Estructura de un Pavimento flexible..... | 42 |
| 2.5.1.1. | Capa de rodadura..... | 42 |
| 2.5.1.2. | Base | 43 |
| 2.5.1.3. | Subbase..... | 43 |
| 2.5.1.4. | Subrasante..... | 43 |
| 2.6. | Funciones de las partes que conforman un pavimento flexible | 43 |
| 2.6.1. | Funciones de la capa de rodadura | 44 |
| 2.6.2. | Función de la imprimación | 44 |
| 2.6.3. | Funciones de la base granular | 44 |
| 2.6.4. | Funciones de la subbase granular | 44 |
| 2.6.5. | Función de la subrasante..... | 45 |

| | |
|---|----|
| 2.7. Métodos de diseño de los Pavimentos Flexibles..... | 45 |
| 2.7.1. Método AASHTO..... | 45 |
| 2.7.1.1. Nivel de confianza, R (%) | 46 |
| 2.7.1.2. Desviación normal estándar, Zr..... | 47 |
| 2.7.1.3. Error normal combinado para pavimentos flexibles, So | 47 |
| 2.7.1.4. Módulo de resiliencia en función del CBR de la subrasante | 48 |
| 2.7.1.5. Coeficientes estructurales de las capas..... | 48 |
| 2.7.1.6. Selección del espesor de las capas del pavimento..... | 49 |
| 2.7.1.7. Coeficientes de drenaje, mi | 50 |
| 2.7.2. Método INVIAS (Instituto Nacional de Vías)..... | 51 |
| 2.7.2.1. Error normal combinado So, desviación normal estándar Zr, pérdida de serviciabilidad Δ IPS | 52 |
| 2.7.2.2. Módulo Resiliente, Mr..... | 52 |
| 2.7.2.3. Coeficiente de drenaje, mi | 53 |
| 2.8. Aditivo Cal | 53 |
| 2.8.1. Tipos de Cal | 55 |
| 2.9. Coeficiente Estructural de la Base (ai)..... | 55 |
| CAPÍTULO III: METODOLOGÍA | 58 |
| 3.1. Ensayos de laboratorio para materiales granulares | 58 |

| | |
|---|-----|
| 3.1.1. Ensayos Físicos..... | 58 |
| 3.1.1.1 Ensayo granulométrico | 58 |
| 3.1.1.2 Ensayo limite líquido (LL)..... | 61 |
| 3.1.1.3 Ensayo limite plástico (LP)..... | 69 |
| 3.1.1.4 Índice plástico (IP)..... | 74 |
| 3.1.2. Ensayos de compactación | 77 |
| 3.1.2.1 Ensayo Proctor modificado (PM) | 77 |
| 3.1.3. Ensayos de resistencia mecánica | 86 |
| 3.1.3.1 Ensayo de Abrasión | 86 |
| 3.1.3.2 Ensayo CBR..... | 89 |
| 3.1.3.3 CBR de las bases granulares en estado natural | 91 |
| 3.1.3.4 CBR de las bases granulares mejoradas con 2,5% de Cal | 93 |
| 3.1.3.5 CBR de las bases granulares mejoradas con 3,5% de Cal | 95 |
| 3.1.3.6 CBR de las bases granulares mejoradas con 5% de Cal | 97 |
| 3.2. Clasificación de las Bases granulares..... | 99 |
| 3.3. Diseño del pavimento flexible..... | 99 |
| 3.3.1. Datos iniciales para el diseño..... | 100 |
| 3.3.2. Según la normativa AASHTO | 102 |
| 3.3.3. Según la normativa INVIAS..... | 103 |

| | |
|--|-----|
| CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS | 105 |
| 4.1. Análisis de las Bases granulares..... | 105 |
| 4.1.1. Tipo de bases granulares en función de la curva granulométrica | 105 |
| 4.1.2. Límite líquido de las bases granulares | 108 |
| 4.1.3. Índice Plástico de las bases granulares | 108 |
| 4.1.4. Porcentajes de desgaste por abrasión de las bases granulares | 109 |
| 4.1.5. CBR de las bases granulares | 109 |
| 4.2. Efecto de la adición de cal en los valores de los Límites de Atterberg..... | 110 |
| 4.2.1. Efecto de la adición de cal sobre el Límite Líquido (LL)..... | 110 |
| 4.2.2. Efecto de la adición de cal sobre el Límite Plástico (LP)..... | 111 |
| 4.2.3. Efecto de la adición de cal sobre el Índice Plástico (IP)..... | 112 |
| 4.3. Efecto de la adición de cal en los valores del Proctor Modificado | 113 |
| 4.4. Efecto de la adición de cal en los valores del CBR..... | 115 |
| 4.5. Cálculo de coeficiente estructural (a ₂) de las bases granulares | 118 |
| 4.5.1. Coeficiente estructural (a ₂) por el método AASTHO | 118 |
| 4.5.2. Coeficiente estructural (a ₂) por el método INVÍAS | 118 |
| 4.6. Diseño de los pavimentos flexibles por AASHTO e INVÍAS, a partir de los coeficientes estructurales obtenidos de las bases granulares, para los W18 o Nt de 500000 y 1'000000..... | 119 |

| | |
|--|-----|
| 4.6.1. Diseño del pavimento flexible, de la base en estado natural según los métodos de diseño AASHTO e INVIAS | 119 |
| 4.6.2. Diseño del pavimento flexible, de la base estabilizada con 2.5% de Cal, según los métodos de diseño AASHTO e INVIAS | 122 |
| 4.6.3. Diseño del pavimento flexible, de la base estabilizada con 3.5% de Cal, según los métodos de diseño AASHTO e INVIAS | 124 |
| 4.6.4. Diseño del pavimento flexible, de la base estabilizada con 5% de Cal, según los métodos de diseño AASHTO e INVIAS | 126 |
| CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 130 |
| 5.1. Conclusiones | 130 |
| 5.2. Recomendaciones..... | 131 |
| BIBLIOGRAFÍA | 133 |
| ANEXOS | 138 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Ubicación Geográfica de la Empresa Áridos y Agregados del Sur..... | 27 |
| Figura 2 Ubicación Geográfica de la Empresa Minera Rookaazul Cia. Ltda..... | 27 |
| Figura 3 Estructura de un Pavimento Flexible..... | 42 |
| Figura 4 Ábaco para obtener el ai. | 56 |
| Figura 5 Tendido de la base granular y tamización de los agregados grueso y finos de las bases | 59 |
| Figura 6 Ensayo en el laboratorio para la obtener el LL..... | 61 |
| Figura 7 Gráfica del ensayo del LL de la base en estado natural de la mina Áridos y Agregados del Sur | 63 |
| Figura 8 Gráfica del ensayo del LL de la base en estado natural de la mina Rookaazul..... | 63 |
| Figura 9 Gráfica del ensayo LL de la base con Cal al 2,5% de la mina Áridos y Agregados del Sur | 65 |
| Figura 10 Gráfica del ensayo LL de la base con Cal al 2,5% de la mina Rookaazul | 65 |
| Figura 11 Gráfica del ensayo LL de la base con Cal al 3,5% de la mina Áridos y Agregados del Sur | 66 |
| Figura 12 Gráfica del ensayo LL de la base con Cal al 3,5% de la mina Rookaazul | 67 |
| Figura 13 Gráfica del ensayo límite líquido de la base con Cal al 5% de la mina Áridos y Agregados del Sur..... | 69 |
| Figura 14 Gráfica del ensayo límite líquido de la base con Cal al 5% de la mina Rookaazul | 69 |
| Figura 15 Ensayo en el laboratorio para la obtener el LP..... | 70 |
| Figura 16 Homogenización del material en el laboratorio y compactación de la base granular .. | 78 |

| | |
|--|----|
| Figura 17 Obtención de la W óptima y Yd máxima de la base en estado natural, de la mina Áridos y Agregados del Sur..... | 79 |
| Figura 18 Obtención de la W óptima y Yd máxima de la base en estado natural, de la mina Rookaazul | 80 |
| Figura 19 Obtención de la W óptima y Yd máxima de la base mejorada con 2,5% de Cal, de la mina Áridos y Agregados del Sur..... | 81 |
| Figura 20 Obtención de la W óptima y Yd máxima de la base mejorada con 2,5% de Cal, de la mina Rookaazul. | 82 |
| Figura 21 Obtención de la W óptima y Yd máxima de la base mejorada con 3,5% de Cal, de la mina Áridos y Agregados del Sur..... | 83 |
| Figura 22 Obtención de la W óptima y Yd máxima de la base mejorada con 3,5% de Cal, de la mina Rookaazul | 84 |
| Figura 23 Obtención de la W óptima y Yd máxima de la base mejorada con 5% de Cal, de la mina Áridos y Agregados del Sur..... | 85 |
| Figura 24 Obtención de la W óptima y Yd máxima de la base mejorada con 5% de Cal, de la mina Rookaazul | 86 |
| Figura 25 Lavado del material y Colocación del material en la máquina de los Ángeles | 88 |
| Figura 26 Proceso de colocación, compactación de la base y obtención del CBR..... | 90 |
| Figura 27 Curva Densidad seca vs. CBR..... | 91 |
| Figura 28 Curva Densidad seca vs. CBR..... | 92 |
| Figura 29 Curva Densidad seca vs. CBR..... | 93 |
| Figura 30 Curva Densidad seca vs. CBR..... | 94 |

| | |
|---|-----|
| Figura 31 Curva Densidad seca vs. CBR..... | 95 |
| Figura 32 Curva Densidad seca vs. CBR..... | 96 |
| Figura 33 Curva Densidad seca vs. CBR..... | 97 |
| Figura 34 Curva Densidad seca vs. CBR..... | 98 |
| Figura 35 Verificación del cumplimiento granulométrico de la base granular de la minera Áridos y Agregados del Sur según especificaciones de la Base..... | 105 |
| Figura 36 Verificación del cumplimiento granulométrico de la base granular de la minera Rookaazul según especificaciones de la Base | 107 |
| Figura 37 Comparación de los Límites líquidos con la adición de Cal | 111 |
| Figura 38 Comparación de los Límites Plástico con la adición de Cal | 112 |
| Figura 39 Comparación de los Índices Plástico con la adición de Cal | 113 |
| Figura 40 Comparación de los valores del CBR con la adición de Cal..... | 116 |
| Figura 41 Comparación de los valores del CBR con la adición de Cal..... | 117 |
| Figura 42 Diseño de pavimentos asfálticos con bases en estado natural para un número de ejes equivalentes de 500000..... | 120 |
| Figura 43 Diseño de pavimentos asfálticos con bases en estado natural para un número de ejes equivalentes de 1'000000 | 121 |
| Figura 44 Diseño de pavimentos asfálticos con bases estabilizadas con 2,5% de Cal, para un número de ejes equivalentes de 500000..... | 122 |
| Figura 45 Diseño de pavimentos asfálticos con bases estabilizadas con 2,5% de Cal, para un número de ejes equivalentes de 1'000000..... | 123 |

| | |
|---|-----|
| Figura 46 Diseño de pavimentos asfálticos con bases estabilizadas con 3,5% de Cal, para un número de ejes equivalentes de 500000..... | 124 |
| Figura 47 Diseño de pavimentos asfálticos con bases estabilizadas con 3,5% de Cal, para un número de ejes equivalentes de 1'000000..... | 125 |
| Figura 48 Diseño de pavimentos asfálticos con bases estabilizadas con 5% de Cal, para un número de ejes equivalentes de 500000..... | 126 |
| Figura 49 Diseño de los pavimentos asfálticos con bases estabilizadas con 5% de Cal, para un número de ejes equivalentes de 1'000000..... | 127 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Límites granulométricos para base granular Clase 1 | 31 |
| Tabla 2 Límites granulométricos para base granular Clase 2 | 32 |
| Tabla 3 Límites granulométricos para base granular Clase 3 | 32 |
| Tabla 4 Límites granulométricos para base granular Clase 4 | 33 |
| Tabla 5 Especificaciones para el ensayo PM | 37 |
| Tabla 6 Granulometría de las muestras de ensayo | 39 |
| Tabla 7 Número de esferas dependiendo método de la granulometría | 39 |
| Tabla 8 Clasificaciones típicas del CBR | 40 |
| Tabla 9 Niveles de confiabilidad sugeridos para varios tipos de carreteras | 46 |
| Tabla 10 Desviación normal estándar, Zr | 47 |
| Tabla 11 So, para pavimentos flexibles | 48 |
| Tabla 12 Módulo de resiliencia en función del valor del CBR de la subrasante | 48 |
| Tabla 13 Coeficientes estructurales de las capas de los pavimentos flexibles - Método AASHTO | 49 |
| Tabla 14 Espesores mínimos (di), recomendados por la AASHTO | 50 |
| Tabla 15 Coeficientes de drenaje por la AASHTO, mi | 51 |
| Tabla 16 Valores de coeficiente de drenaje (mi) | 53 |
| Tabla 17 Valores de coeficientes estructurales, (ai/pulg) | 57 |
| Tabla 18 Resultados del análisis granulométrico de la base granular de la mina Áridos y Agregados del Sur | 60 |
| Tabla 19 Resultados del análisis granulométrico de la base granular de la mina Rookaazul | 60 |

| | |
|--|----|
| Tabla 20 Resultado del ensayo del límite líquido de la base en estado natural de la mina Áridos y Agregados del Sur..... | 62 |
| Tabla 21 Resultado del ensayo del límite líquido de la base en estado natural de la mina Rookaazul. | 62 |
| Tabla 22 Resultado del ensayo del LL de la base con Cal al 2,5%, de la mina Áridos y Agregados del Sur..... | 64 |
| Tabla 23 Resultado del ensayo del LL de la base con Cal al 2,5%, de la mina Rookaazul..... | 64 |
| Tabla 24 Resultado del ensayo del LL de la base con Cal al 3,5%, de la mina Áridos y Agregados del Sur..... | 66 |
| Tabla 25 Resultado del ensayo del LL de la base con Cal al 3,5%, de la mina Rookaazul..... | 66 |
| Tabla 26 Resultado del ensayo del LL de la base con Cal al 5%, de la mina Áridos y Agregados del Sur. | 68 |
| Tabla 27 Resultado del ensayo del LL de la base con Cal al 5%, de la mina Rookaazul..... | 68 |
| Tabla 28 Resultado del ensayo del LP de la base en estado natural, de la mina Áridos y Agregados del Sur..... | 71 |
| Tabla 29 Resultado del ensayo del LP de la base en estado natural, de la mina Rookaazul. | 71 |
| Tabla 30 Resultado del ensayo del LP de la base estabilizada con Cal al 2,5%, de la mina Áridos y Agregados del Sur..... | 72 |
| Tabla 31 Resultado del ensayo del LP de la base estabilizada con Cal al 2,5%, de la mina Rookaazul. | 72 |
| Tabla 32 Resultado del ensayo del LP de la base estabilizada con Cal al 3,5%, de la mina Áridos y Agregados del Sur..... | 73 |

| | |
|---|----|
| Tabla 33 Resultado del ensayo del LP de la base estabilizada con Cal al 3,5%, de la mina Rookaazul. | 73 |
| Tabla 34 Resultado del ensayo del LP de la base estabilizada con Cal al 5%, de la mina Áridos y Agregados del Sur..... | 74 |
| Tabla 35 Resultado del ensayo del LP de la base estabilizada con Cal al 5%, de la mina Rookaazul. | 74 |
| Tabla 36 Resultados de los ensayos del IP de la base en su estado natural, de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul..... | 75 |
| Tabla 37 Resultados de los ensayos del IP de la base estabilizada con Cal al 2,5%, de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul..... | 75 |
| Tabla 38 Resultados de los ensayos del IP de la base estabilizada con Cal al 3,5%, de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul..... | 76 |
| Tabla 39 Resultados de los ensayos del IP de la base estabilizada con Cal al 5%, de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul..... | 76 |
| Tabla 40 Cantidades de material para el ensayo de Abrasión, de la mina Áridos y Agregados del Sur..... | 88 |
| Tabla 41 Cantidades de material para el ensayo de Abrasión, de la mina Rookaazul..... | 89 |
| Tabla 42 Resultados del ensayo CBR en estado natural..... | 91 |
| Tabla 43 Resultados del ensayo CBR en estado natural..... | 92 |
| Tabla 44 Resultados del ensayo CBR mejora con Cal al 2.5%. | 93 |
| Tabla 45 Resultados del ensayo CBR mejora con Cal al 2,5%. | 94 |
| Tabla 46. Resultados del ensayo CBR mejora con Cal al 3,5%. | 95 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 47 Resultados del ensayo CBR mejora con Cal al 3,5%. | 96 |
| Tabla 48 Resultados del ensayo CBR mejora con Cal al 5%. | 97 |
| Tabla 49 Resultados del ensayo CBR mejora con Cal al 5% | 98 |
| Tabla 50 Precipitación promedio mensual anual | 101 |
| Tabla 51 Verificación del cumplimiento del LL de las bases granulares. | 108 |
| Tabla 52 Verificación del cumplimiento del IP de las bases granulares. | 109 |
| Tabla 53 Verificación del cumplimiento del porcentaje de desgaste por abrasión de las bases granulares. | 109 |
| Tabla 54 Verificación de los valores del CBR de las bases granulares. | 110 |
| Tabla 55 Resultados del ensayo Proctor Modificado según el aumento del porcentaje de cal. . | 114 |
| Tabla 56. Resultados del ensayo Proctor Modificado según el aumento del porcentaje de cal. | 114 |
| Tabla 57 Resultados del ensayo CBR según el aumento del porcentaje de cal. | 115 |
| Tabla 58 Resultados del ensayo CBR según el aumento del porcentaje de cal. | 117 |
| Tabla 59 Coeficientes estructurales de las bases por el método AASHTO. | 118 |
| Tabla 60 Coeficientes estructurales de las bases por el método INVIAS. | 119 |
| Tabla 61 Espesores de las bases granulares por el método AASHTO e INVÍAS. | 128 |

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1. Introducción

Un aspecto esencial en la construcción vial es el diseño de pavimentos, dado que influye directamente en la durabilidad, el confort y el costo de las carreteras. En el caso de las bases granulares, su mejoramiento con aditivos como la cal, puede mejorar notablemente sus propiedades mecánicas, así como aumentar la resistencia a la deformación y a la humedad. Este estudio se centra en realizar un análisis comparativo de los métodos de diseño de pavimentos flexibles establecidos por las normas AASHTO y la normativa INVIAS considerando el mejoramiento con cal en diferentes porcentajes

Un aspecto clave de este análisis es observar cómo el coeficiente estructural de la base granular varía con la adición de cal, ya que este coeficiente determina el aporte estructural de cada capa en el pavimento y, por lo tanto, influye en el espesor. La comparación de estos métodos, permitirá evaluar la viabilidad de incorporar nuevos componentes para optimizar los recursos disponibles, cumpliendo las diferentes normas ya mencionadas, procurando una mayor durabilidad de la infraestructura del pavimento flexible o asfáltico. Asimismo, se espera que este estudio contribuya a definir recomendaciones sobre el uso de la cal en bases granulares.

La investigación se centró en analizar el comportamiento de bases granulares estabilizadas con diferentes porcentajes de cal, aplicando los métodos de diseño de pavimentos flexibles AASHTO e INVIAS. Para ello, se empleará material granular de las empresas mineras Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul Cia. Ltda.

1.2. El problema

1.2.1. Planteamiento del problema

En la provincia del Azuay, los materiales granulares utilizados en obras civiles provienen de los lechos de ríos y canteras de la región. Debido al crecimiento poblacional, la demanda de estos materiales granulares ha aumentado, lo que ha provocado su progresivo agotamiento, ya que no son renovables. Por esta razón, se ha vuelto necesario encontrar soluciones que ayuden a reducir su consumo y mitigar el impacto ambiental (Ramírez Rojas, 2008).

El diseño de pavimentos asfálticos, analiza la capacidad de soporte que un pavimento requiere, para absorber las cargas producidas por el tráfico, la estructura del pavimento se cimentará sobre una sub rasante, en muchos casos condicionada por la mala calidad de los suelos. La utilización de materiales no convencionales, reciclados o modificados con polímeros u otros aditivos permite un manejo más responsable y sostenible de los recursos. Lograr la utilización menor de materiales de la corteza terrestre es aportar y sustentar un mejor manejo ambiental (Ramírez Rojas, 2008).

1.2.2. Delimitación del problema

Los materiales pétreos extraídos de la corteza terrestre, se obtienen de canteras o ríos, la ciudad de Cuenca se abastece de materiales del río Paute, del río Jubones, entre otros, algunos de los sitios de producción son de la empresa Vipesa Construcciones Cia. Ltda., Hormicrete Cia. Ltda., Áridos y Agregados del Sur y de la empresa minera Rookaazul Cia. Ltda. Ubicada en la

Vía Panamericana Norte, además de minas del cantón Santa Isabel, como Minería La Milagrosa, Agregados Santa Isabel. Esta investigación se centró en el estudio de la base granular que comercializa la empresa Áridos y Agregados del Sur y la empresa minera Rookaazul Cia. Ltda. A través de los resultados obtenidos en laboratorio, se determinó la calidad y el tipo de base que entregan en el mercado local.

Esta investigación se centró en el análisis comparativo de los métodos de diseño de pavimentos asfálticos AASHTO e INVIAS, considerando el mejoramiento con Cal en las bases granulares. Se evaluó cómo la adición de diferentes porcentajes de cal influye en el coeficiente estructural de la base granular y, en consecuencia, en el diseño del pavimento, utilizando criterios normativos de AASHTO e INVIAS. En términos espaciales, el estudio tomo como referencias materiales y condiciones representativas de suelos granulares estabilizados con cal en entornos viales. Temporalmente, se centró en un análisis experimental y comparativo dentro del período de desarrollo de la investigación.

1.2.3. Justificación del problema

En la provincia del Azuay se presenta una grave problemática en torno a materiales para la construcción, la extracción de estos recursos provoca impactos ambientales irreversibles, buscar mitigar los impactos generados por la explotación de recursos es una tarea a enfrentar en los próximos años (Tepán Vele, 2022)

Como ingenieros civiles, se requiere que los materiales cumplan las especificaciones técnicas y garanticen una estructura duradera.

Por todo lo indicado anteriormente, esta investigación busca analizar comparativamente los métodos de diseño de pavimentos asfálticos AASHTO e INVIAS, considerando el mejoramiento con cal en bases granulares y su impacto en el coeficiente estructural. La importancia del estudio radica en la optimización del diseño de pavimentos, permitiendo reducir costos y mejorar la durabilidad de las carreteras. Además, proporcionará información clave para ingenieros y tomadores de decisiones, contribuyendo a la construcción de infraestructura vial más eficiente y sostenible. La viabilidad del estudio está respaldada por el acceso a metodologías de diseño establecidas, normativas, técnicas y herramientas de análisis adecuadas dentro del marco temporal del proyecto.

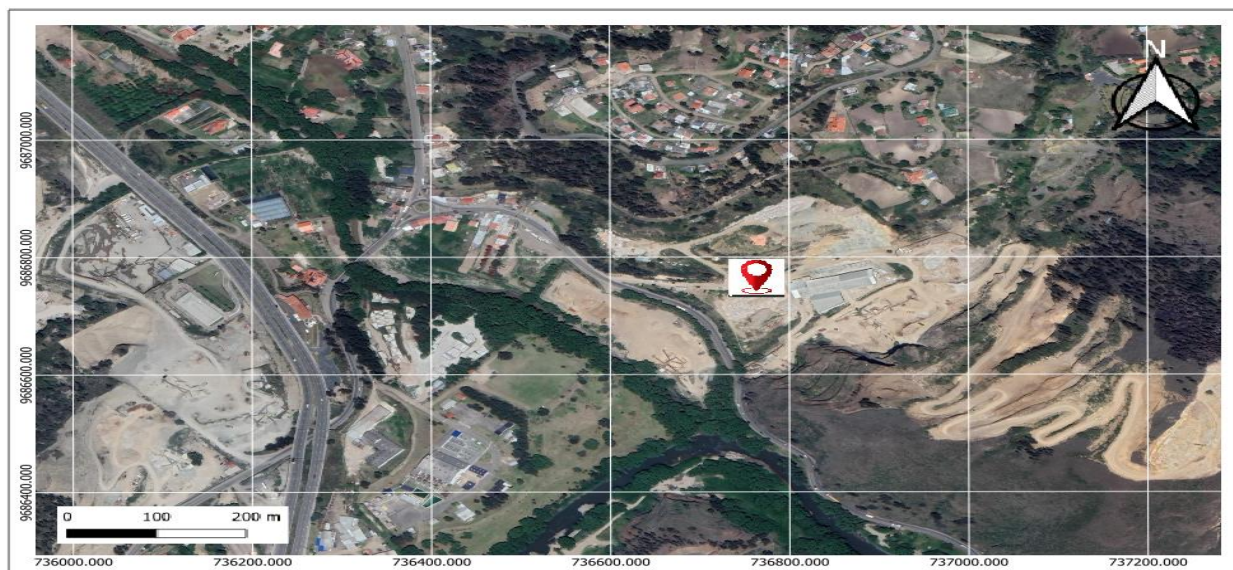
1.2.4. Definición de la zona de estudio

Los materiales de tipo, base granular a ser estudiadas provienen de la empresa Áridos y Agregados del Sur, que se encuentra ubicada en la provincia del Azuay, sector El Descanso, Panamericana Norte, en las coordenadas (705399.41 m E; 9686371.22 m N). Su nivel de producción es alto, produce materiales como mejoramiento, base, subbase, pedraplén, piedra muro, piedra escollera, lastre, ripio, arena y material de cribado. La empresa minera Rookaazul Cia. Ltda., está ubicada en la Provincia del Azuay, Sector El Descanso, Panamericana Norte, del cantón Cuenca, en las coordenadas (736423.89 m E; 968598.2 m N). La materia prima se obtiene principalmente del río Paute.

A continuación, en la **Figura 1** y **Figura 2**, se detallan las ubicaciones de la empresa Áridos y Agregados del Sur y de la empresa minera Rookaazul Cia. Ltda.

Figura 1

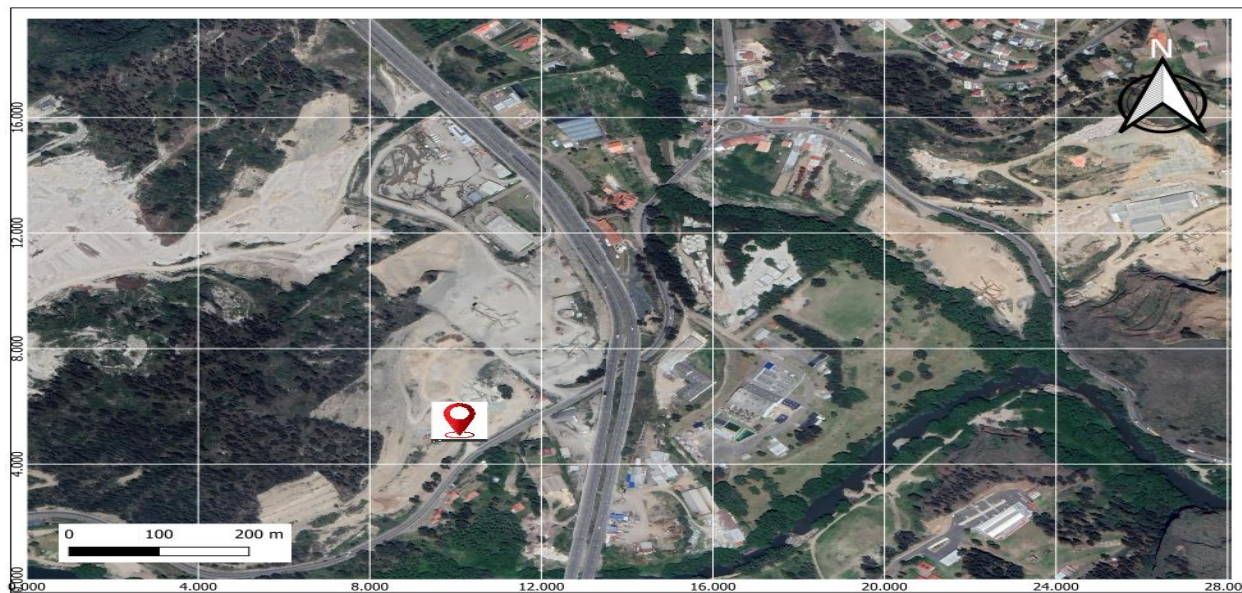
Ubicación Geográfica de la Empresa Áridos y Agregados del Sur



Nota. Fuente (Autor)

Figura 2

Ubicación Geográfica de la Empresa Minera Rookaazul Cia. Ltda



Nota. Fuente (Autor)

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Evaluar la influencia del tratamiento con cal, en el comportamiento estructural de bases granulares, a través de ensayos de laboratorio y de la comparación de los métodos de diseño AASHTO e INVÍAS, para optimizar el diseño de pavimentos flexibles.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar, a través de una revisión bibliográfica, los criterios de cálculo y las variables empleadas en los métodos de diseño AASHTO e INVÍAS para pavimentos flexibles.
- Determinar las características del material a través de ensayos en muestras de base granular en estado natural y con adición de cal en diferentes porcentajes.
- Analizar como la variabilidad de la propiedad mecánica de la base granular influye en su coeficiente estructural y, por ende, en el comportamiento del pavimento.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del Arte

Como antecedentes se tiene varios estudios con materiales similares, pero con diferentes proporciones. Tal como Martínez Najar (2014) se centró en los diferentes porcentajes de cal hidratada, que necesita un determinado suelo para lograr su estabilización para el diseño del espesor de las capas de subrasante y subbase, las mismas diseñadas por método AASHTO tuvieron como resultado de 25 cm sin estabilizar con cal y de 20 cm estabilizadas con cal en las capas anteriormente mencionadas.

Balbuena Flores & Clavo Rimarachin (2022), en su investigación se centraron en el mejoramiento de bases granulares con cal y cemento porland para mejorar las propiedades físico mecánicas del suelo de cantera, determinaron que al estabilizar el suelo con cal, en las dosificaciones 2.5%, 5% y 7.5%, los índices de plasticidad disminuyen, el IP 5.08%, que solo las dosificaciones 5% y 7.5% cumplen con las normativas generales para la construcción EG-2013 y el CBR de las dosificaciones de cal 85.30%, 92.50%, 101%, incrementan a más del 80%.

Pineda Rodríguez & Riaño Gaitán (2019), en su investigación pretende determinar la cantidad óptima de la mezcla de base con cemento y solid soil para una f_c de 2.5 Mpa, Determinaron que el contenido óptimo de mezcla para un metro cúbico de material granular es: de 89.5 kilos de cemento un 4.6% y 1.3 kilos de aditivo solid soil.

Pacheco Rodríguez (2018), se centró encontrar los coeficientes estructurales de los materiales granulares utilizados en pavimentos flexibles en la ciudad de Cuenca-Ecuador. El

estudio evidenció la necesidad de establecer relaciones entre el CBR, el módulo resiliente y el número estructural, aplicando la metodología AASHTO. Entre sus principales conclusiones, se identificó que algunos materiales granulares superaron los valores normativos establecidos por AASHTO. Asimismo, se observó que los coeficientes estructurales obtenidos para materiales tipo base y subbase presentaron diferencias respecto a los sugeridos por dicha normativa. Por ejemplo, los valores del coeficiente estructural (a_i) fueron menores cuando se utilizó únicamente el CBR, en comparación con el uso combinado del CBR y el módulo resiliente.

2.2. Base granular

Es un agregado granular de granulometría gruesa, conformado por piedra triturada, arena y partículas finas. Destaca principalmente por su notable resistencia frente a procesos de deformación bajo cargas elevadas, lo que lo convierte en un material granular ideal para la conformación de capas estructurales en sistemas de pavimentación (Pineda Rodríguez & Riaño Gaitán, 2019).

La clase y tipo al que pertenezca la base granular esta especificada en las tablas de la clasificación de la base granular, asimismo el material debe cumplir con ciertos requisitos clave: la parte que pasa por el tamiz N.º 40 debe tener un Límite Líquido inferior al 25% y un Índice de Plasticidad menor a 6%. Los agregados no deben mostrar un desgaste por abrasión superior al 40%, y el valor de soporte CBR debe ser igual o mayor al 80% (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2002).

2.2.1. Clasificación de la Base granular

Según el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador (2002), las clases de bases granulares se clasifican según los criterios que se detallan a continuación, dependiendo del tipo de material:

- **Base granular Clase 1:** Están constituidas por una mezcla de fragmentos de rocas grandes y finas, los cuales han sido completamente triturados en un 100%. El tamaño de estos fragmentos se distribuye de manera uniforme dentro de los rangos establecidos para los Tipos A y B, según lo indicado en la **Tabla 1**, referente a la granulometría de una base clase 1.

Tabla 1

Límites granulométricos para base granular Clase 1.

| TAMIZ | Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada | |
|-----------------|---|--------|
| | Tipo A | Tipo B |
| 2" (50,8mm) | 100 | - |
| 1 1/2" (38,1mm) | 70 - 100 | 100 |
| 1" (25,4mm) | 55 - 85 | 70-100 |
| 3/4" (19,0mm) | 50 - 80 | 60-90 |
| 3/8" (9,5mm) | 35 - 60 | 45-75 |
| Nº4 (4,76mm) | 25 - 50 | 30-60 |
| Nº10 (2,00mm) | 20 - 40 | 20-50 |
| Nº40 (0,425mm) | 10-25 | 10.-25 |
| Nº200 (0,075mm) | 2.-12 | 2.-12 |

Nota. *Fuente* (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2002)

- **Base granular Clase 2:** Compuesta por fragmentos de roca o grava triturada, en la que al menos el 50% del material más grueso ha sido triturado. Este tipo de base debe

cumplir con los requisitos específicos que se establecen en la **Tabla 2**, referente a la granulometría de una base clase 2.

Tabla 2

Límites granulométricos para base granular Clase 2.

| TAMIZ | Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada |
|-----------------|---|
| 1" (25,4mm) | 100 |
| 3/4" (19,0mm) | 70 - 100 |
| 3/8" (9,5mm) | 50 - 80 |
| Nº4 (4,76mm) | 35 - 65 |
| Nº10 (2,00mm) | 25 - 50 |
| Nº40 (0,425mm) | 15 - 30 |
| Nº200 (0,075mm) | 3.- 15 |

Nota. Fuente (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2002).

- **Base granular Clase 3:** Formada por fragmentos de roca o grava triturada, en la cual al menos el 25% del material más grueso ha sido triturado. Esta base debe cumplir con los requisitos específicos establecidos en la **Tabla 3**, referente a la granulometría de una base clase 3.

Tabla 3

Límites granulométricos para base granular Clase 3.

| TAMIZ | Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada |
|-----------------|---|
| 3/4" (19,0mm) | 100 |
| Nº4 (4,76mm) | 45 - 80 |
| Nº10 (2,00mm) | 30 - 60 |
| Nº40 (0,425mm) | 20 - 35 |
| Nº200 (0,075mm) | 3.- 15 |

Nota. Fuente (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2002)

- **Base granular Clase 4:** Conformada por agregados que se obtenidos a través de la trituración o el cribado de rocas que ya se han fragmentado de forma natural, o bien, a partir de gravas. Esta base debe cumplir con los requisitos específicos detallados en la **Tabla 4**, referente a la granulometría de una base clase 4.

Tabla 4

Límites granulométricos para base granular Clase 4.

| TAMIZ | Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada |
|-----------------|---|
| 2" (50,8mm) | 100 |
| 1" (25,4mm) | 60 - 90 |
| Nº4 (4,76mm) | 20 - 50 |
| Nº200 (0,075mm) | 0 - 15 |

Nota. *Fuente* (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2002)

2.3. Caracterización y clasificación de Bases Granulares

2.3.1. Granulometría

El análisis granulométrico tiene como propósito identificar cómo se reparten las partículas de distinto tamaño dentro del suelo, separándolas en grupos según su tamaño, utilizando una serie de tamices dispuestos de mayor a menor tamaño de abertura (Aguirre Mejía & Yépez Andino, 2019).

- **Normas aplicables al ensayo**

La clasificación de suelos granulares mediante análisis granulométrico por tamizado se realiza en laboratorio de acuerdo con las normas ASTM D422, AASHTO T88, y las normativas

ecuatorianas INEN 696 e INEN 697. Estas permiten analizar la variación en el tamaño de las partículas del suelo, lo cual es clave para entender su comportamiento y determinar su utilidad en proyectos de infraestructura.

2.3.2. Límites de Atterberg

Los Límites de Atterberg son ensayos de laboratorio normalizados que permiten identificar los contenidos de humedad críticos en los que el suelo cambia su comportamiento plástico y transita entre diferentes estados de consistencia. Con base en estos límites, es posible clasificar el suelo según el Unified Soil Classification System (Gavilanes Bayas, 2015).

a) Límite Líquidos (LL):

Según la ASTM International D4318-17 (2017), “el límite líquido se define como el contenido de humedad en el que un surco de 12.7 mm de ancho se cierra tras aplicar 25 golpes desde una altura de 10mm”. Este valor marca la transición del suelo del estado líquido al estado plástico y se determina utilizando el dispositivo conocido como Cuchara de Casagrande.

Según el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador (2002), el Límite líquido del material que pasa por el tamiz N.º 40 debe ser inferior al 25%.

- **Normas aplicables al ensayo**

La determinación del límite líquido en laboratorio se lleva a cabo conforme a lo establecido en las normas ASTM D4318 y AASHTO T89, que establecen los procedimientos para identificar el contenido de humedad a partir del cual el suelo pierde su consistencia plástica

y adquiere un comportamiento más líquido, siendo este un parámetro fundamental en la caracterización y clasificación de suelos finos.

b) Límite Plástico (LP):

Este límite representa el punto de transición en el contenido de humedad en el que el suelo deja de comportarse de forma plástica, es decir, moldeable y pasa a un estado semisólido, caracterizado por una mayor rigidez y fragilidad. Este límite se determina en laboratorio encontrando la cantidad de agua precisa para que una muestra de material, al ser enrollada hasta alcanzar un diámetro de 3 milímetros, comience a agrietarse (Gavilanes Bayas, 2015).

- **Normas aplicables al ensayo**

La determinación del límite plástico en laboratorio se rige por lo establecido en las normas ASTM D4318 y AASHTO T90, las cuales describen los procedimientos para evaluar la plasticidad de los suelos mediante los límites de Atterberg, parámetros fundamentales para la clasificación y comportamiento mecánico del material.

c) Índice de plasticidad (IP):

Es un parámetro fundamental en la mecánica de suelos que indica el rango de contenido de humedad en el cual un suelo fino se comporta de manera plástica. Se calcula como la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP) del suelo. El IP proporciona información valiosa sobre la compresibilidad, expansividad y trabajabilidad de los suelos finos, lo cual es crucial para el diseño de estructuras geotécnicas y la construcción de terraplenes,

presas y cimentaciones. Un IP alto indica una mayor plasticidad y, por lo general, una mayor compresibilidad y expansividad del suelo (Das, 2015).

Según el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador (2002), el Índice de plasticidad menor de 6.

2.3.3. Ensayo Proctor Modificado

El ensayo Proctor constituye un procedimiento estándar empleado para encontrar el peso específico seco máximo ($Y_d \text{ máx}$) y el contenido óptimo de humedad ($w \text{ opt}$) característicos de diversos tipos de suelo. Su propósito fundamental radica en evaluar el grado de densificación o compactación alcanzado en una muestra de suelo al aplicarle una energía de compactación específica en condiciones de humedad controlada. La finalidad es aumentar la capacidad del suelo para resistir esfuerzos cortantes y evitar deformaciones. Al compactar una muestra de suelo seca totalmente dentro de un molde de volumen definido y bajo una energía de compactación preestablecida, se obtiene un peso específico, al continuar subiendo el porcentaje de humedad con la misma energía de compactación se obtiene el peso específico seco máximo y la humedad óptima (Gavilanes Bayas, 2015).

Según la granulometría de la base, se puede optar por utilizar el método A, B o C, para la ejecución del ensayo Proctor modificado, conforme a los criterios establecidos por la norma ASTM D1557-91. La **Tabla 5**, presenta la clasificación de los métodos a emplear, en función del porcentaje de material retenido en tamices específicos, lo cual permite seleccionar adecuadamente el procedimiento de compactación según las características granulométricas de la base granular.

Tabla 5*Especificaciones para el ensayo PM.*

| Concepto | Método A | Método B | Método C |
|---|--|--|--|
| Diámetro del molde | 101.6 mm | 101.6 mm | 152.4 mm |
| Volumen del molde | 943.3 cm ³ | 943.3 cm ³ | 2124 cm ³ |
| Peso del pisón | 44.5 N | 44.5 N | 44.5 N |
| Altura de caída del pisón | 457.2 mm | 457.2 mm | 457.2 mm |
| Número de golpes del pisón por capa de suelo | 25 | 25 | 56 |
| Número de capas de compactación | 5 | 5 | 5 |
| Energía de compactación | 2696 kN·m/m ³ | 2696 kN·m/m ³ | 2696 kN·m/m ³ |
| Tipo de suelo por usarse | Porción que pasa la malla No. 4 (4.75 mm). Se usa si el 20 % o menos del material es retenido en la malla No. 4. | Porción que pasa la malla de 9.5 mm. Se usa si el suelo retenido en la malla No. 4 es mayor al 20 %, y 20 % o menos es retenido en la malla de 9.5 mm. | Porción que pasa la malla de 19 mm. Se usa si más del 20 % del material es retenido en la malla de 9.5 mm y menos del 30 % es retenido en la malla de 19 mm. |

Nota. *Fuente* (Das, 2015)

- **Normas aplicables al ensayo**

La determinación en laboratorio de la humedad óptima y del peso específico seco máximo del suelo se realiza conforme a los lineamientos establecidos en las normativas ASTM D1557 y AASHTO T180, las cuales definen los procedimientos de compactación mediante energía modificada, comúnmente utilizados en obras de infraestructura vial.

2.3.4. Ensayo de Abrasión

La abrasión es el desgaste que sufren los materiales debido al roce constante. En el caso de los agregados gruesos, esta es una propiedad física clave, esta propiedad resulta determinante, ya que tiene un impacto directo en cómo se diseñan y comportan las mezclas. Es fundamental que estos agregados sean duros y resistentes para evitar que se rompan, deterioren o se desintegren cuando soportan el paso continuo de los vehículos (Vanegas Jáuregui & Wilches Aguilar, 2023).

La resistencia al desgaste de un material, está determinada por diversos factores, entre ellos sus características físicas y las condiciones a las que se expone. Cuando se observa un deterioro superficial, puede concluirse que la resistencia de los agregados guarda una relación directa con su calidad. Por ello, es fundamental que los materiales empleados presenten una alta resistencia para garantizar un buen desempeño (Vanegas Jáuregui & Wilches Aguilar, 2023)

Según el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador (2002), establece que, para una base granular, el desgaste por abrasión de los agregados no debe superar el 40%.

Según los pesos y granulometría de la muestra, se puede optar por utilizar el método A, B, C o D, para la ejecución del ensayo de Abrasión máquina de los Ángeles, conforme a los criterios establecidos por la norma ASTM C131-01. La **Tabla 6**, presenta la clasificación de los métodos a emplear, en función de la granulometría del material.

Tabla 6

Granulometría de las muestras de ensayo.

| Tamaño del tamiz (Aberturas cuadradas) | | Masa de los tamaños indicados (gr) | | | |
|--|---------------|------------------------------------|---------|---------|---------|
| Pasante | Retenido | Granulometría | | | |
| | | A | B | C | D |
| 37,5mm (1 1/2") | 25mm (1") | 1250±25 | – | – | – |
| 25mm (1") | 19mm (3/4") | 1250±25 | – | – | – |
| 19mm (3/4") | 12,5mm (1/2") | 1250±10 | 2500±10 | – | – |
| 12,5mm (1/2") | 9,5mm (3/8") | 1250±10 | 2500±10 | – | – |
| 9,5mm (3/8") | 6,3mm (1/4") | – | – | 2500±10 | – |
| 6,3mm (1/4") | 4,75mm (N.4) | – | – | 2500±10 | – |
| 4,75mm (N.4) | 2,36mm (N.8) | – | – | – | 5000±10 |
| TOTAL | | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 |

Nota. *Fuente* (ASTM International, 2001)

La **Tabla 7**, muestra el número de esferas de acero utilizadas según el método de ensayo aplicado. Estas esferas tienen un peso aproximado entre 400 gr y 440 gr, y diámetros de 46 mm y 47.6 mm, respectivamente.

Tabla 7

Número de esferas dependiendo método de la granulometría.

| Granulometría | N. de esferas | Masa de la carga (gr) |
|---------------|---------------|-----------------------|
| A | 12 | 5,000±25 |
| B | 11 | 4,584±25 |
| C | 8 | 3,330±20 |
| D | 6 | 2,500±15 |

Nota. *Fuente* (ASTM International, 2001)

- **Normas aplicables al ensayo**

Para la determinación del porcentaje de desgaste en agregados con tamaños menores a 37.5 mm (1½"), se aplica lo establecido en la normativa ASTM C 131, la cual regula el procedimiento de ensayo mediante la Máquina de Los Ángeles. En el caso de agregados gruesos

con tamaños superiores a 19 mm (3/4”), se sigue la normativa ASTM C 535, que contempla los lineamientos para evaluar la resistencia al desgaste de materiales de mayor tamaño.

2.3.5. CBR (California Bearing Ratio / Índice portante de California)

Es un ensayo de laboratorio que mide la resistencia al corte, de un suelo en el estado en el que este se encuentra en ese momento, bajo condiciones de humedad y densidad controlada. En el diseño de pavimentos flexibles, el método CBR es fundamental para evaluar la resistencia de los materiales de base y subbase, así como para estimar la expansión del suelo y la pérdida de resistencia cuando este se encuentra saturado (Huanca Conde, 2018).

Según (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2002) sugiere definir la clase de base a emplear según el Tránsito Pesado Diario Anual (TPDA), además de requerir que el valor del CBR sea mayor o igual al 80% para la capa de la base granular.

A continuación, se presenta la **Tabla 8**, donde se describe los valores CBR de una subrasante, subbase y base.

Tabla 8

Clasificaciones típicas del CBR.

| No. CBR | Clasificación General | Usos | SISTEMA DE CLASIFICACIÓN | |
|---------|-----------------------|---------------|--------------------------|------------------|
| | | | Unificado | AASHTO |
| 0-3 | Muy pobre | Subrasante | OH,CH,MH,OL | A5,A6,A7 |
| 3_7 | Pobre a regular | Subrasante | OH,CH,MH,OL | A4,A5,A6,A7 |
| 7_20 | Regular | Sub-base | OL,CL,ML,SC,SM,SP | A2,A4,A6,A7 |
| 20-50 | Bueno | Base,sub-base | GM,GC,SW,SM,SP,GP | A1b,A2-5,A3,A2-6 |
| >50 | Excelente | Base | GW,GM | A1a,A2-4,A3 |

Nota. *Fuente* (Bowles, 1980)

- **Normas aplicables al ensayo**

La determinación del valor CBR en suelos granulares se realiza según la norma ASTM D1883, la cual establece el procedimiento para evaluar su capacidad de soporte mediante penetración controlada.

2.4. Pavimento

El pavimento está formado por varias horizontalmente superpuestas, compuestas de materiales adecuados y correctamente compactados, que se apoyan en la subrasante de una carretera. Está diseñado para resistir eficazmente los esfuerzos producidos por las cargas constantes del tráfico, a lo largo de todo el periodo para el que fue diseñado (Monsalve Escobar et al., 2012).

Según Monsalve Escobar et al. (2012), un pavimento debe cumplir con parámetros como resistente a las cargas del tránsito, resistencia a los agentes externos, textura superficial adecuada resistente al desgaste de las llantas de los vehículos, tener una regularidad superficial longitudinal y transversal, ser durable, ser económico, tener un color adecuado, impermeable, rugosidad, coeficiente de fricción.

2.4.1. Tipos de Pavimentos

De acuerdo con Pilamunga Pandi (2023), los pavimentos pueden clasificarse en cuatro categorías fundamentales: pavimentos flexibles, pavimentos semirrígidos, pavimentos articulados y pavimentos rígidos.

2.5. Pavimento flexible

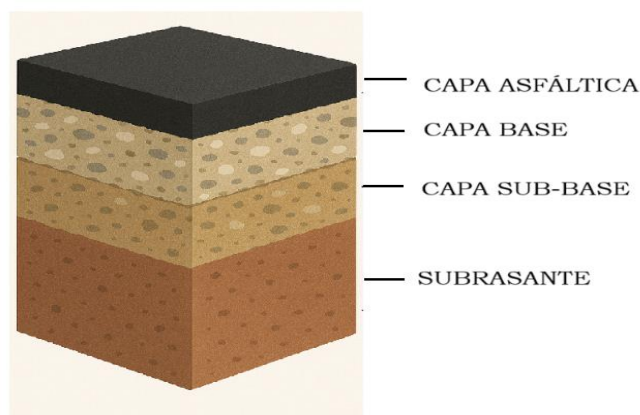
El pavimento flexible, está conformado por una estructura de varias capas, entre ellas la subbase, base y una capa de rodadura que es una carpeta asfáltica constituida por materiales bituminosos, aglomerantes, agregados y de ser el caso aditivo (Ministerio de Transporte y Comunicaciones del Perú, 2014).

2.5.1. Estructura de un Pavimento flexible

En la **Figura 3**, se representa a través de una gráfica, la composición interna de un pavimento flexible, caracterizado por la superposición de varias capas.

Figura 3

Estructura de un Pavimento Flexible



Nota. Fuente (Autor)

2.5.1.1. Capa de rodadura

Esta capa está compuesta de una carpeta de asfalto, que funciona como superficie de rodadura, además esta capa actúa como una barrera que protege las capas que se encuentran

debajo de las misma, de la humedad y del desgaste causado por el tráfico (Gomez Vallejos, 2014).

2.5.1.2. Base

Esta capa está compuesta por base granular y tiene la función de distribuir los esfuerzos generados por el tránsito vehicular, los cuales son transmitidas por la superficie de rodadura (Ramos Silva, 2013).

2.5.1.3. Subbase

Esta capa tiene como propósito recibir los esfuerzos transmitidos desde la base a causa del tránsito vehicular y distribuir los esfuerzos transmitidos por la base debido al tránsito vehicular, transfiriéndolos hacia la subrasante. Además, en muchos casos, actúa como capa de drenaje frente a la infiltración de agua en el pavimento y contribuye al control de la capilaridad del suelo (Celi Yanchapanta, 2021).

2.5.1.4. Subrasante

Esta capa se encarga de distribuir las cargas generadas por el tránsito hacia las capas inferiores del terreno, evitando que se sobrepasen los límites establecidos en el diseño, asegurando la estabilidad y durabilidad de la carretera (Gomez Vallejos, 2014).

2.6. Funciones de las partes que conforman un pavimento flexible

2.6.1. Funciones de la capa de rodadura

Ofrece una superficie uniforme, segura y capaz de soportar el paso constante de vehículos.

Conforme a Malo Gutierrez (2024), las funciones principales de esta capa son:

- Superficie de rodadura: la capa asfáltica debe ofrecer una superficie uniforme, estable y adecuada para el tránsito.
- Impermeabilidad: la carpeta asfáltica debe impedir, en la mayor medida posible, la filtración de agua hacia las capas internas del pavimento flexible.

2.6.2. Función de la imprimación

El rol principal de la imprimación es de adherir, la base granular a la carpeta asfáltica y sellar los materiales granulares evitando la disgregación (Gomez Huanca, 2017).

2.6.3. Funciones de la base granular

Distribuir las cargas del tránsito hacia la subbase o subrasante.

Según Malo Gutierrez (2024), el propósito de esta capa es brindar resistencia las cargas aplicadas por el tránsito, garantizando estabilidad estructural.

2.6.4. Funciones de la subbase granular

Proporciona soporte adicional y mejorar el drenaje.

De acuerdo con Malo Gutierrez (2024), las funciones principales de esta capa son:

- Función económica.
- Capa de transición: impide el paso y posteriormente la mezcla de los materiales de los materiales finos de la capa base con los materiales de la subrasante.
- Disminución de las deformaciones: los cambios volumétricos de la subrasante asociados a la humedad o a cambios extremos de temperatura.
- Drenaje: evacua el agua y también evita la subida por capilaridad desde el subsuelo.

2.6.5. Función de la subrasante

Esta no es una capa artificial, pero es fundamental, ya que corresponde al suelo natural sobre el cual se apoya toda la estructura del pavimento asfáltico y debe resistir el peso total del pavimento y del tráfico. La granulometría de esta, determina el espesor necesario de las capas superiores. Por lo tanto, la función principal de la subrasante, es actuar como una capa de cimentación del pavimento flexible (Moreira, 2018).

2.7. Métodos de diseño de los Pavimentos Flexibles

2.7.1. Método AASHTO

El procedimiento propuesto por AASHTO consiste en encontrar un número estructural (SN) que expresa la capacidad de soporte del pavimento, considerando diversos factores, entre estos se incluyen el W_{18} , el R, el Zr, el So, la ΔIPS , el MR, el SN, la calidad del drenaje que esta función de la precipitación, la temperatura (Higuera Sandoval, 2011).

La American Association of State Highway and Transportation Officials (1993), proporciona la ecuación 1, para determinar el número estructural:

$$\log(W_{18}) = Z_r * S_o + 9,36 * \log(SN + 1) - 0,20 + \left[\frac{\log\left(\frac{\Delta IPS}{4,2-1,5}\right)}{0,40 + \left(\frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}\right)} \right] + 2,32 * \text{Log}(MR) - 8,07 \quad (1)$$

Donde:

W_{18} : Número de ejes equivalentes

Z_r : Desviación normal estándar

S_o : Error normal combinado

ΔIPS : Pérdida de serviciabilidad

MR : Módulo resiliente de la subrasante (lb/pulg²)

SN : Número estructural

2.7.1.1. Nivel de confianza, R (%)

Es un parámetro que introduce un nivel de seguridad en el diseño, asegurando que la solución propuesta funcione durante el período de análisis. La **Tabla 9**, presenta los niveles de confiabilidad recomendados según el tipo de vía (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993).

Tabla 9

Niveles de confiabilidad sugeridos para varios tipos de carreteras.

| TIPO DE CARRETERA | NIVEL DE CONFIABILIDAD, R(%) | |
|-------------------------------------|------------------------------|-------------|
| | Urbana | Interurbana |
| Autopistas y carreteras importantes | 85 - 99,9 | 80 - 99,9 |
| Arterias principales | 80 - 99 | 75 - 96 |
| Colectoras | 80 - 95 | 65 - 90 |
| Locales | 50 - 80 | 50 - 80 |

Nota. *Fuente* (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

2.7.1.2. Desviación normal estándar, Z_r

Es un parámetro que se obtiene en función del nivel de confiabilidad R . La **Tabla 10**, expresa los valores de la desviación normal estándar (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993).

Tabla 10

Desviación normal estándar, Z_r .

| Confiabilidad, % | Desviación normal estándar, Z_r |
|------------------|-----------------------------------|
| 50 | 0.000 |
| 60 | -0.253 |
| 70 | -0.524 |
| 75 | -0.674 |
| 80 | -0.841 |
| 85 | -1.037 |
| 90 | -1.282 |
| 91 | -1.340 |
| 92 | -1.405 |
| 93 | -1.476 |
| 94 | -1.555 |
| 95 | -1.645 |
| 96 | -1.751 |
| 97 | -1.881 |
| 98 | -2.054 |
| 99 | -2.327 |
| 99.9 | -3.090 |
| 99.99 | -3.750 |

Nota. *Fuente* (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

2.7.1.3. Error normal combinado para pavimentos flexibles, S_o

Se trata de un valor que refleja la variabilidad e incertidumbre del diseño, tomando en cuenta aspectos como las características de los materiales, las condiciones de la subrasante, el volumen de tránsito, el clima de la zona y la calidad constructiva. Los valores sugeridos para este

parámetro en la **Tabla 11** (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993).

Tabla 11

So, para pavimentos flexibles.

| Proyecto de pavimento | Desviación estándar, So |
|----------------------------------|-------------------------|
| Rangos para pavimentos flexibles | 0,40 - 0,50 |
| Contrucción nueva | 0,45 |
| Sobrecapas | 0,50 |

Nota. *Fuente* (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

2.7.1.4. Módulo de resiliencia en función del CBR de la subrasante

Cuando no se pueda determinar el Módulo de resiliencia en el laboratorio, se puede usar las siguientes formulas en función del CBR de la subrasante, proporcionada por la AASTHO

Tabla 12 (Torres Espinoza, 2010).

Tabla 12

Módulo de resiliencia en función del valor del CBR de la subrasante.

| | |
|-----------------------------------|-------------------|
| $MR = 1500 \times (CBR)$ | CBR < 10% |
| $MR = 3000 \times (CBR)$ | 10% < CBR < 20% |
| $MR = 1500 \times \ln(CBR) + 241$ | Suelos granulares |

Nota. *Fuente* (Torres Espinoza, 2010)

2.7.1.5. Coeficientes estructurales de las capas

En la **Tabla 13**, se detallan los coeficientes de la capa de superficie, capa de base, capa de subbase, mejoramiento de subrasante y el tratamiento superficial bituminoso.

Tabla 13

Coefficientes estructurales de las capas de los pavimentos flexibles - Método AASHTO.

| Coefficiente de capas – Diseño estructural de pavimentos flexibles - Método AASHTO 93 | | |
|--|---|--------------------------|
| CLASE DE MATERIAL | NORMAS | Coefficiente (cm) |
| CAPA DE SUPERFICIE | | |
| Concreto Asfáltico | Estabilidad Marshall 1000–1800 lbs | 0.134 – 0.173 |
| Arena Asfáltica | Estabilidad Marshall 500–800 lbs | 0.079 – 0.118 |
| Carpeta Bituminosa mezclada en el camino | Estabilidad Marshall 300–600 lbs | 0.059 – 0.098 |
| CAPA DE BASE | | |
| Agregados triturados, graduados uniformemente | PI 0–4, CBR >100% | 0.047 – 0.055 |
| Grava graduada uniformemente | PI 0–4, CBR 30-80% | 0.028 – 0.051 |
| Concreto Asfáltico | Estabilidad de Marshall 1000-1800 lbs | 0.098 – 0.138 |
| Arena Asfáltica | Estabilidad de Marshall 500-800 lbs | 0.059 – 0.098 |
| Relleno grueso estabilizado con cemento | Resistencia a la compresión: 28–46 kg/cm ² | 0.079– 0.136 |
| Agregado grueso estabilizado con cal | Resistencia a la compresión: 28–46 kg/cm ² | 0.059 – 0.118 |
| Suelo-cemento | Resistencia a la compresión: 18–32 kg/cm ² | 0.047 – 0.079 |
| CAPA DE SUB-BASE | | |
| Arena – Grava graduada uniformemente | PI 0–6, CBR > 30% | 0.035 – 0.043 |
| Suelo – Cemento | Resistencia a la compresión: 18–32 kg/cm ² | 0.059 – 0.071 |
| Suelo – Cal | Resistencia a la compresión: 7 kg/cm ² | 0.059 – 0.071 |
| MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE | | |
| Arena o suelo seleccionado | PI 0–10 | 0.020 – 0.035 |
| Suelo con cal | 3% mínimo de cal en peso del suelo | 0.028 – 0.039 |
| TRATAMIENTO SUPERFICIAL BITUMINOSO | | |
| Triple riego | | *0.40 |
| Doble riego | | *0.25 |
| Simple riego | | *0.15 |
| | *=-Usar estos valores para los diferentes tipos de tratamientos bituminosos, sin calcular espesores | |

Nota. *Fuente* (Torres Espinoza, 2010)

2.7.1.6. Selección del espesor de las capas del pavimento

Para la selección de los espesores de las capas del pavimento La American Association of State Highway and Transportation Officials (1993) generó la siguiente Ecuación 2.

$$SN = a_1 * d_1 + a_2 * d_2 * m_2 + a_3 * d_3 * m_3 \quad (2)$$

Donde:

SN: Número estructural de la estructura del pavimento

ai: Coeficiente estructural

di: Espesor de la capa

mi: Coeficiente de drenaje

El número estructural del tránsito (SN tránsito), deberá de ser menor o igual al número estructural del pavimento (SN estructura), para que el diseño del pavimento sea adecuado. En la siguiente ecuación 3, se detalla la condición que deberá cumplir el número estructural del tránsito y del pavimento, para que el diseño sea el correcto.

$$SN \text{ tránsito} \leq SN \text{ estructura} \quad (3)$$

La metodología AASHTO sugiere aplicar espesores mínimos establecidos para las capa del asfalto y capa de la base, los mismo que se encuentran detallados en la **Tabla 14**.

Tabla 14

Espesores mínimos (di), recomendados por la AASHTO.

| Tránsito de diseño (Ejes equivalentes de 18,000 lb) | Concreto Asfáltico (pulgadas) | Base Granular (pulgadas) |
|---|-------------------------------|--------------------------|
| Menor a 50,000 | 1.0 o tratamiento superficial | 4.0 |
| 50,001 – 150,000 | 2.0 | 4.0 |
| 150,001 – 500,000 | 2.5 | 4.0 |
| 500,001 – 2,000,000 | 3.0 | 6.0 |
| 2,000,001 – 7,000,000 | 3.5 | 6.0 |
| Mayor a 7,000,000 | 4.0 | 6.0 |

Nota. *Fuente* (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

2.7.1.7. Coeficientes de drenaje, mi

En la **Tabla 15**, se detallan los coeficientes de drenaje según el método AASHTO.

Tabla 15

Coeficientes de drenaje por la AASHTO, mi.

| Características del drenaje | Porcentaje de tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a grados de humedad próximos a la saturación | | | |
|-----------------------------|---|-------------|-------------|------------|
| | Menos del 1% | 1 – 5% | 5 – 25% | Más de 25% |
| Excelente | 1.40 – 1.35 | 1.35 – 1.30 | 1.30 – 1.20 | 1.20 |
| Bueno | 1.35 – 1.25 | 1.25 – 1.15 | 1.15 – 1.00 | 1.00 |
| Regular | 1.25 – 1.15 | 1.15 – 1.00 | 1.00 – 0.80 | 0.80 |
| Pobre | 1.15 – 1.05 | 1.05 – 0.80 | 0.80 – 0.60 | 0.60 |
| Muy malo | 1.05 – 0.95 | 0.95 – 0.75 | 0.75 – 0.40 | 0.40 |

Nota. *Fuente* (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

2.7.2. Método INVIAS (Instituto Nacional de Vías)

El método desarrollado por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), consiste en un conjunto de procedimientos destinados al diseño de estructuras viales, con el objetivo de estandarizar los estudios de pavimentación en todo el país de Colombia y así asegurar soluciones que garanticen la calidad de dichas estructuras. Este método se basa en un catálogo compuesto por cartas de diseño, las cuales ofrecen distintas opciones con variaciones en los espesores de las capas, en función de la relación entre variables como el tránsito, el CBR o el módulo resiliente de la subrasante, considerando las condiciones específicas del sitio del proyecto. Es importante señalar que este enfoque se apoya en la metodología AASHTO, diferenciándose en que los espesores propuestos en las cartas se fundamentan en la experiencia práctica en la construcción y mantenimiento de pavimentos flexibles en Colombia (López Jaspe, 2020).

En resumen, el método INVIAS puede considerarse como una manual de diseño que utiliza los datos específicos del proyecto. Estos datos se correlacionan con categorías predefinidas dentro del método, tales como T_i , que clasifica el tránsito; S_i , que clasifica la subrasante según su capacidad portante, y R_i , que clasifica la región donde se prevé construir el pavimento. Una vez determinadas estas clasificaciones, se selecciona la carta de diseño de acuerdo a las características del proyecto, a partir de la cual se obtienen las alternativas recomendadas por el método (Instituto Nacional de Vías, 1998).

Según Higuera Sandoval (2011), el método INVIAS adopta el modelo propuesto por AASHTO, como base para el diseño estructural de pavimentos. En este contexto, las ecuaciones desarrolladas por AASHTO constituye la parte más importante del procedimiento, siendo especialmente relevantes para esta investigación la Ecuación 1 y la Ecuación 2.

2.7.2.1. Error normal combinado S_o , desviación normal estándar Z_r , pérdida de serviciabilidad ΔIPS

Para el método de diseño INVIAS, el valor del error normal combinado (S_o) se asigna un valor de 0.44, para el valor de la desviación normal estándar (Z_r) se asume un valor del 90% y para la pérdida de serviciabilidad (ΔIPS) se asume un valor de 2.2, correspondiente a una serviciabilidad inicial (P_o) de 4.2 y un índice de serviciabilidad final (P_t) de 2 (Higuera Sandoval, 2011).

2.7.2.2. Módulo Resiliente, M_r

Según el método del Instituto Nacional de Vías (1998), se debe utilizar la siguiente ecuación 4, que se encuentra en función del CBR de la Subrasante.

$$MR \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = 100 * CBR \quad (4)$$

2.7.2.3. Coeficiente de drenaje, m_i

Los coeficientes de drenaje (m_i) empleados para las capas, fueron establecidos en función de los niveles de precipitación y la eficiencia del drenaje, en la **Tabla 16**, se detalla los coeficientes de drenaje según la precipitación anual (Instituto Nacional de Vías, 1998).

Tabla 16

Valores de coeficiente de drenaje (m_i).

| Precipitación (mm/año) | Coeficientes de drenaje (m_i) |
|------------------------|-----------------------------------|
| < 2000 | 1.00 |
| 2000 – 4000 | 0.90 |
| > 4000 | 0.80 |

Nota. *Fuente* (Instituto Nacional de Vías, 1998)

2.8. Aditivo Cal

La cal es un material obtenido por la calcinación de rocas calcáreas, principalmente carbonato de calcio. La cal viva se obtiene a través de la conversión química del carbonato de calcio (piedra caliza – $CaCO_3$) a óxido de calcio. Posteriormente, la adición de agua a la cal viva produce la cal hidratada (hidróxido de calcio). Esta última es crucial, ya que reacciona con los componentes arcillosos, transformándolos irreversiblemente en una matriz cementante resistente (National Lime Association, 2004).

De acuerdo con lo establecido en el manual de Estabilización de Suelo Tratado con Cal de la National Lime Association (2004), en el presente estudio se evaluarán dosificaciones de cal del 2.5 %, 3.5 % y 5 % para suelos finos. La inclusión del 5 %, que excede el rango recomendado en la literatura del manual, tiene como propósito analizar si una mayor adición de cal puede generar mejoras estructurales adicionales, particularmente en el valor CBR, sin afectar negativamente la viabilidad técnica y económica del diseño de pavimentos flexibles.

- **Estabilización de suelos con Cal**

Estabilizar un suelo implica modificar o mejorar sus características físicas, como la resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad y densidad, utilizando algún tipo de método o tratamiento específico (Montejo Fonseca et al., 2018).

La estabilización de suelos no implica necesariamente que todas sus propiedades mejorarán. Montejo Fonseca et al. (2018, pg. 16) advierte que “utilizar tratamientos que mejoren simultáneamente varias de esas propiedades, pero también se debe estar preparado para encontrar evoluciones contradictorias en la lista, de manera que el mejoramiento de una propiedad signifique el deterioro de otra u otras”.

La cal puede mejorar de forma permanente materiales que no cumplen los requisitos mínimos para ser base como grava arcillosa o contaminada, que contengan al menos un 50% de material grueso retenido en la malla N°4. Esta estabilización se usa en la construcción y reconstrucción de caminos, generalmente con una adición de 2% a 4% de cal, respecto al peso

seco del suelo. Comúnmente se mezcla en el lugar, aunque también se puede hacer en planta. Además, la cal mejora las mezclas de suelo y agregados (National Lime Association, 2004).

2.8.1. Tipos de Cal

- **Cal hidráulica**

Se obtiene al calcinar rocas calizas que contienen más del 5 % de arcilla, lo que da como resultado un material que combina las características de las cales aéreas con la capacidad de endurecer en ambientes húmedos e incluso bajo el agua. En la estabilización de suelos con cal, el material más empleado es la cal hidráulica (Montejo Fonseca et al., 2018).

- **Cal viva o cal no hidratada**

La cal viva, o óxido de calcio (CaO), es un sólido blanco de apariencia amorfa, con un peso específico que oscila entre 3,18 y 3,40. Se trata de un material inestable debido a su alta afinidad por el agua, con la que reacciona generando hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), también conocido como cal apagada, acompañado de una liberación considerable de calor. El uso de la cal viva se ha visto restringido debido a los riesgos que implica su manipulación (Montejo Fonseca et al., 2018).

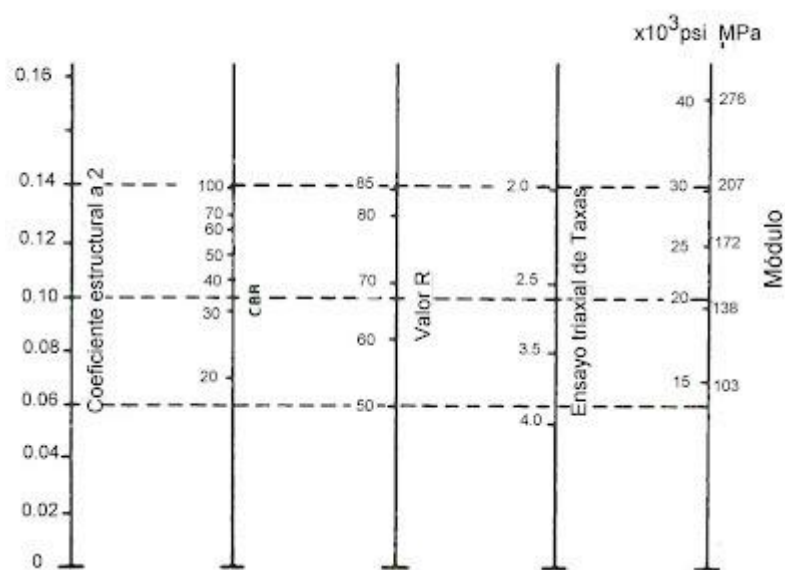
2.9. Coeficiente Estructural de la Base (ai)

- **Coeficiente Estructural de la Base (ai) relacionado con el CBR, por el método AASHTO**

Para obtener el (ai), se emplea la **Figura 4** propuesto por la AASHTO, a continuación, se detalla a continuación.

Figura 4

Ábaco para obtener el ai.



Nota. Fuente (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Alternativamente, el (ai) puede determinarse mediante la siguiente ecuación 5, establecida en el libro (Higuera Sandoval, 2011).

$$ai = 0.032 * CBR^{0.32} \quad (5)$$

Donde:

ai: Coeficiente estructural de la base granular (dato en pulgadas)

CBR: Capacidad en soporte del material de base granular

- **Coefficiente Estructural de la Base (a_i), por el método INVIAS**

La metodología INVIAS, el (a_i), no se determina mediante una fórmula matemática, sino que se asigna con base en valores tabulados según el tipo de material, tal como se muestra en la

Tabla 17.

Tabla 17

Valores de coeficientes estructurales, (a_i /pulg).

| Valores de coeficiente estructurales, (a_i /pulg) | | |
|---|-----------------------------|-------------------------|
| Mezcla Densa en Caliente (MDC) | MDC $a_i = 0.44$ | TMAP < 13 °C |
| | MDC $a_i = 0.37$ | 13 °C ≤ TMAP < 20 °C |
| | MDC $a_i = 0.30$ | 20 °C ≤ TMAP ≤ 30 °C |
| Mezcla Densa en Frío (MDF) | MDF $a_i = 0.8 \times 0.44$ | TMAP < 13 °C |
| | MDF $a_i = 0.8 \times 0.37$ | 13 °C ≤ TMAP < 20 °C |
| | MDF $a_i = 0.8 \times 0.33$ | 20 °C ≤ TMAP ≤ 30 °C |
| Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica (BEE) | BEE-1 $a_i = 0.20$ | Agregado grueso |
| | BEE-2 $a_i = 0.20$ | Agregado medio |
| | BEE-3 $a_i = 0.14$ | Suelo |
| | BEC-1 $a_i = 0.16$ | A-1-a; A-1-b |
| Base Estabilizada con Cemento (BEC) | BEC-2 $a_i = 0.14$ | A-3; A-2-4; A-2-5 |
| | BEC-3 $a_i = 0.13$ | A-2-6; A-2-7; A-4; A-5; |
| | | A-6; A-7 |
| Base Granular (BG) | BG-1, BG-2 $a_i=0,14$ | — |
| Subbase Granular (SG) | SBG-1, SBG-2 $a_i=0,12$ | — |

Nota. *Fuente* (Instituto Nacional de Vías, 1998)

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Ensayos de laboratorio para materiales granulares

En el campo de la ingeniería civil, los materiales constituyen la base fundamental para el diseño y la ejecución de obras seguras y duraderas. Dentro de estos, los materiales granulares como arenas, gravas y suelos no cohesivos, juegan un papel esencial en estructuras como cimentaciones, rellenos y capas de pavimento. Debido a su función estructural, es indispensable que estos materiales cumplan con normativas técnicas establecidas, las cuales garantizan su calidad, resistencia y comportamiento adecuado bajo diferentes condiciones de carga. Para verificar estas propiedades, se realizan diversos ensayos de laboratorio que permiten evaluar parámetros físicos y mecánicos, tales como la granulometría, la densidad, la humedad y la resistencia al corte. Estas pruebas resultan esenciales para orientar decisiones importantes en las etapas de diseño y ejecución de obras de ingeniería.

3.1.1. Ensayos Físicos

3.1.1.1 Ensayo granulométrico

Tomando como referencia el método ASTM D422, para el análisis granulométrico de la base granular, se procedió al cuarteo del material con el fin de obtener una muestra representativa. Esta muestra fue colocada en la máquina tamizadora para efectuar el análisis de la fracción gruesa, utilizando tamices desde 3 in hasta el N.º 4, conforme a las normas establecidas. Posteriormente, para determinar la fracción fina, se realizó un lavado de las partículas más pequeñas contenidas en el fondo del conjunto de material. Este procedimiento se repitió hasta

que el agua del lavado se volvió clara, lo que indicó, que la remoción adecuada de las partículas coloidales. El material fino obtenido fue secado en horno y luego tamizado en seco, empleando tamices desde el N.º 10 hasta el N.º 200. Finalmente, se elaboró la curva granulométrica compuesta, uniendo los resultados de ambos procesos (en seco y por lavado), con lo cual se obtuvo la distribución completa de tamaños de partícula correspondiente a la base granular evaluada. A continuación, se detallan la serie de tamices para las muestras gruesas y finas respectivamente las series de tamices de las muestras gruesas son 3in (76.2 mm), 2 ½ in (63.5 mm), 2in (50.8 mm), 1 ½ in (38.1mm), 1in (25.4mm), ¾ in (19.1mm), ½ in (12.7mm), 3/8in (9.52 mm) y N°4 (4.76 mm) y fondo. Y los tamices para las muestras finas son N°10 (2 mm), N°40 (0.42 mm), N°200 (0.074 mm) y fondo.

La **Figura 5**, muestra el tendido del material de base granular para su secado a la intemperie, y su posterior cuarteo, también, se representa la tamización de los agregados finos y gruesos, respectivamente.

Figura 5

Tendido de la base granular y tamización de los agregados grueso y finos de las bases



Nota: Proceso de secado y determinación de la granulometría de los agregados gruesos y finos en el Laboratorio de Suelos CITT. Nota. *Fuente* (Autor)

En la siguiente, **Tabla 18** y **Tabla 19**, se detallan los resultados granulométricos de la base granular de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, respectivamente.

Tabla 18

Resultados del análisis granulométrico de la base granular de la mina Áridos y Agregados del Sur.

| Tamiz N° | Abertura (mm) | Peso Retenido (gr) | Peso retenido acumulado (gr) | % Retenido | % Pasa |
|----------|---------------|--------------------|------------------------------|------------|---------|
| 3" | 76,2 | 0,00 | 0,00 | 0,00% | 100,00% |
| 2 1/2" | 63,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00% | 100,00% |
| 2" | 50,80 | 0,00 | 0,00 | 0,00% | 100,00% |
| 1 1/2" | 38,10 | 275,40 | 275,40 | 3,10% | 96,90% |
| 1" | 25,40 | 985,00 | 1260,40 | 14,18% | 85,82% |
| 3/4" | 19,10 | 1342,50 | 2602,90 | 29,28% | 70,72% |
| 1/2" | 12,70 | 1514,00 | 4116,90 | 46,31% | 53,69% |
| 3/8" | 9,52 | 830,50 | 4947,40 | 55,65% | 44,35% |
| N° 4 | 4,76 | 1583,00 | 6530,40 | 73,46% | 26,54% |
| N° 10 | 2,00 | 279,70 | 279,70 | 82,99% | 17,01% |
| N° 40 | 0,42 | 183,10 | 462,80 | 89,23% | 10,77% |
| N° 200 | 0,074 | 147,60 | 610,40 | 94,26% | 5,74% |

Nota. Fuente (Autor)

Tabla 19

Resultados del análisis granulométrico de la base granular de la mina Rookaazul.

| Tamiz N° | Abertura (mm) | Peso Retenido (gr) | Peso retenido acumulado (gr) | % Retenido | % Pasa |
|----------|---------------|--------------------|------------------------------|------------|---------|
| 3" | 76,2 | 0,00 | 0,00 | 0,00% | 100,00% |
| 2 1/2" | 63,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00% | 100,00% |
| 2" | 50,80 | 0,00 | 0,00 | 0,00% | 100,00% |
| 1 1/2" | 38,10 | 0,00 | 0,00 | 0,00% | 100,00% |
| 1" | 25,40 | 251,00 | 251,00 | 3,18% | 96,82% |
| 3/4" | 19,10 | 571,50 | 822,50 | 10,41% | 89,59% |
| 1/2" | 12,70 | 1052,00 | 1874,50 | 23,72% | 76,28% |
| 3/8" | 9,52 | 599,50 | 2474,00 | 31,31% | 68,69% |
| N° 4 | 4,54 | 2149,00 | 4623,00 | 58,50% | 41,50% |
| N° 10 | 2,00 | 265,20 | 265,20 | 74,79% | 25,21% |
| N° 40 | 0,42 | 173,20 | 438,40 | 85,43% | 14,57% |
| N° 200 | 0,074 | 86,10 | 524,50 | 90,72% | 9,28% |

Nota. Fuente (Autor)

3.1.1.2 Ensayo limite líquido (LL)

Tomando como referencia el método ASTM D4318, se preparó material que pasa por el tamiz N°40 y se utiliza la Cuchara de Casagrande, donde se coloca una pasta de material y se crea una ranura. Al golpear la cuchara de casa grande, la ranura se cierra y la cantidad de golpes se relaciona con la humedad del suelo. Se repite el proceso variando la humedad, obteniendo una curva de flujo.

En la siguiente **Figura 6**, se representa el ensayo de Cuchara de casa grande, para obtener el LL.

Figura 6

Ensayo en el laboratorio para la obtener el LL



Nota: Representación del ensayo de Cuchara de casa grande para obtener el LL, en el Laboratorio de Suelos CITT. Nota. *Fuente* (Autor)

a) Límite líquido de las bases granulares en su estado natural

Para la obtención del LL en las gráficas, se construyó una línea de tendencia correspondiente a 25 golpes, utilizando los datos obtenidos en cuatro ensayos por cada muestra. Este procedimiento permitió definir los puntos de influencia sobre la curva de cada material

En las siguiente **Tabla 20** y **Tabla 21**, representan los datos obtenidos del Limite líquido de las bases granulares en estado natural de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, respectivamente.

Tabla 20

Resultado del ensayo del límite líquido de la base en estado natural de la mina Áridos y Agregados del Sur.

| | Límite Líquido | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| N° Golpes | 39 | 35 | 27 | 22 |
| Recipiente N° | #A2 | #C3 | #4 | #C5 |
| Recipiente + M.Húmeda | 44,9 | 35,13 | 34,43 | 38,05 |
| Recipiente + M. Seca | 40,29 | 32,41 | 31,8 | 34,65 |
| Peso Recipiente | 21,09 | 21,25 | 21,16 | 21,05 |
| % Humedad | 24,010 | 24,373 | 24,718 | 25,000 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Tabla 21

Resultado del ensayo del límite líquido de la base en estado natural de la mina Rookaazul.

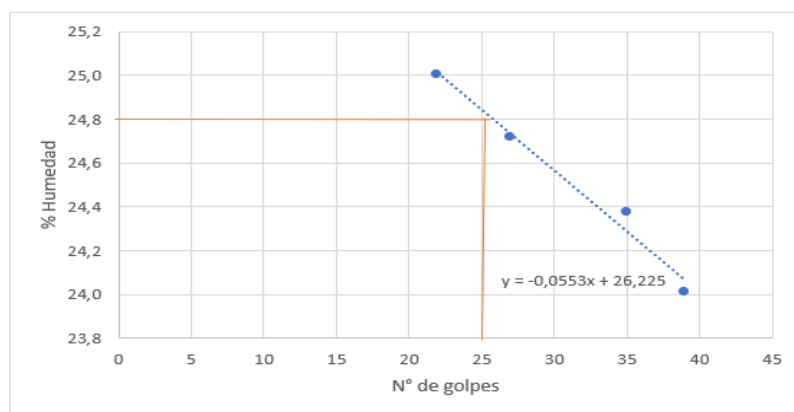
| | Límite Líquido | | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|
| N° Golpes | 36 | 31 | 27 | 23 |
| Recipiente N° | #B10 | #AV | #P110 | #05 |
| Recipiente + M.Húmeda | 18,33 | 23,63 | 25,9 | 33,36 |
| Recipiente + M. Seca | 17,02 | 22,12 | 23,41 | 29,99 |
| Peso Recipiente | 10,33 | 14,55 | 11,79 | 15,14 |
| % Humedad | 19,58 | 19,95 | 21,43 | 22,69 |

Nota. *Fuente* (Autor)

El límite líquido del material en su estado natural, proveniente de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, se determinó a partir de la **Figura 7** y **Figura 8**, respectivamente, obteniéndose valores de 24,8 % para Áridos y Agregados del Sur y 21,9 % para Rookaazul.

Figura 7

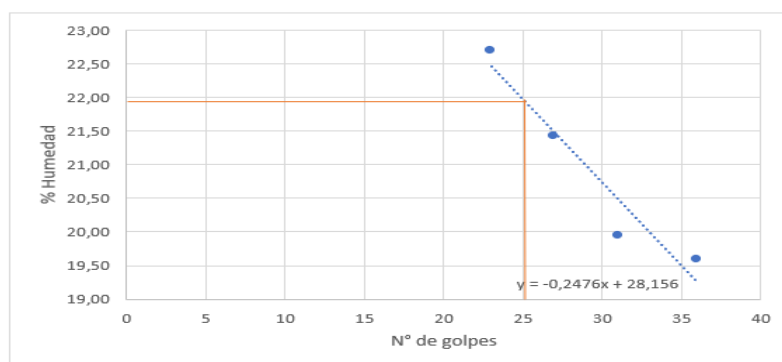
Gráfica del ensayo del LL de la base en estado natural de la mina Áridos y Agregados del Sur



Nota. Fuente (Autor)

Figura 8

Gráfica del ensayo del LL de la base en estado natural de la mina Rookaazul



Nota. Fuente (Autor)

b) Límite líquido de las bases granulares estabilizadas con Cal al 2,5%

La siguiente **Tabla 22** y **Tabla 23**, representa los resultados del Límite Líquido de las bases granulares con Cal al 2.5%, de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, respectivamente.

Tabla 22

Resultado del ensayo del LL de la base con Cal al 2,5%, de la mina Áridos y Agregados del Sur.

| | Límite Líquido | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| Nº Golpes | 40 | 32 | 26 | 20 |
| Recipiente Nº | #4 | #L2 | #P2 | #P110 |
| Recipiente + M.Húmeda | 44,2 | 45,26 | 36,5 | 36,45 |
| Recipiente + M. Seca | 40,01 | 40,74 | 31,95 | 31,55 |
| Peso Recipiente | 21,15 | 21,13 | 12,92 | 11,75 |
| % Humedad | 22,216 | 23,049 | 23,910 | 24,747 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Tabla 23

Resultado del ensayo del LL de la base con Cal al 2,5%, de la mina Rookaazul.

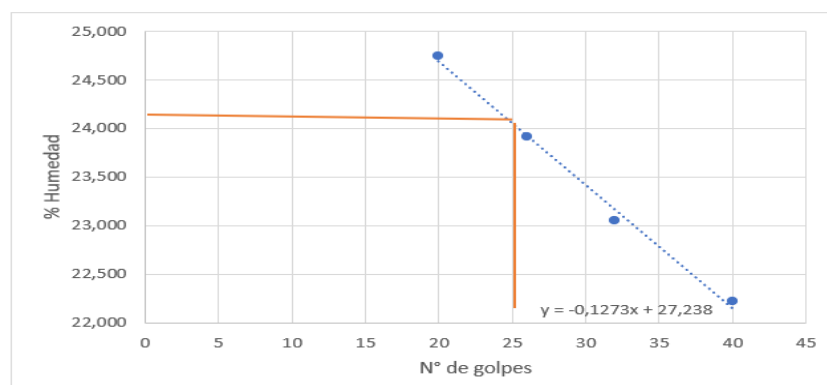
| | Límite Líquido | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| Nº Golpes | 36 | 31 | 24 | 20 |
| Recipiente Nº | #84 | #C8 | #D | #B2 |
| Recipiente + M.Húmeda | 42,14 | 35,55 | 30,81 | 37,84 |
| Recipiente + M. Seca | 38,77 | 33,11 | 29,08 | 34,82 |
| Peso Recipiente | 21,93 | 21,1 | 20,95 | 21,68 |
| % Humedad | 20,012 | 20,316 | 21,279 | 22,983 |

Nota. *Fuente* (Autor)

El límite líquido del material con Cal al 2,5%, proveniente de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, se determinó a partir de la **Figura 9** y **Figura 10**, respectivamente, obteniéndose valores de 24,2 % para Áridos y Agregados del Sur y 21,7 % para Rookaazul.

Figura 9

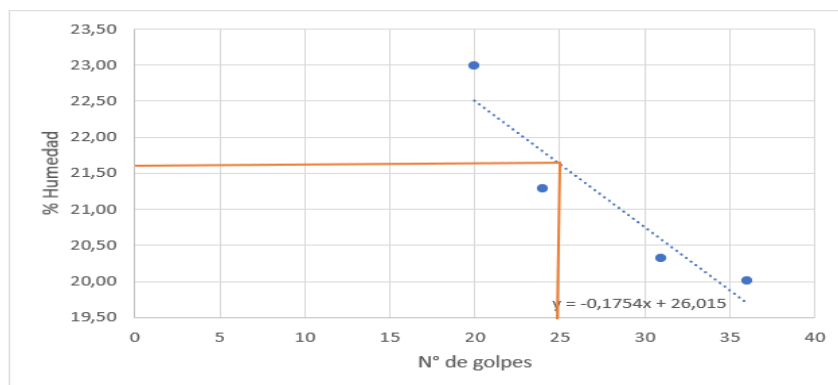
Gráfica del ensayo LL de la base con Cal al 2,5% de la mina Áridos y Agregados del Sur



Nota. Fuente (Autor)

Figura 10

Gráfica del ensayo LL de la base con Cal al 2,5% de la mina Rookaazul



Nota. Fuente (Autor)

c) Límite líquido de las bases granulares estabilizada con Cal al 3,5%

La siguiente **Tabla 24** y **Tabla 25**, representa los datos obtenidos del Límite Líquido de las bases granulares con Cal al 3,5%, de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, respectivamente.

Tabla 24

Resultado del ensayo del LL de la base con Cal al 3,5%, de la mina Áridos y Agregados del Sur.

| | Límite Líquido | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| N° Golpes | 39 | 33 | 25 | 21 |
| Recipiente N° | #89 | #149 | #R1 | #4 |
| Recipiente + M.Húmeda | 33,56 | 32,82 | 40,67 | 36,96 |
| Recipiente + M. Seca | 30,13 | 29,62 | 35,6 | 32,59 |
| Peso Recipiente | 14,45 | 15,31 | 14,63 | 15,17 |
| % Humedad | 21,875 | 22,362 | 24,177 | 25,086 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Tabla 25

Resultado del ensayo del LL de la base con Cal al 3,5%, de la mina Rookaazul.

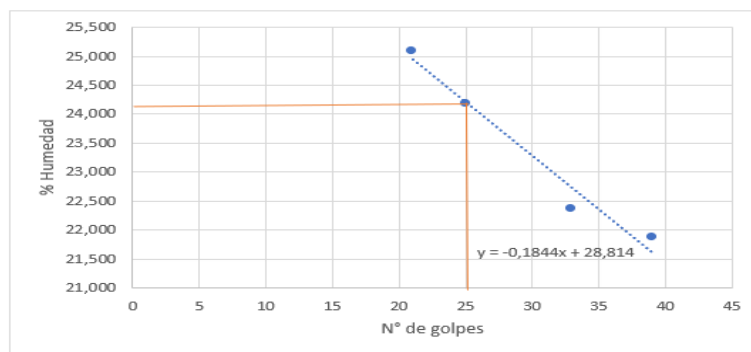
| | Límite Líquido | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| N° Golpes | 40 | 36 | 31 | 23 |
| Recipiente N° | #4 | #86 | #149 | #R1 |
| Recipiente + M.Húmeda | 27,5 | 28,97 | 26,72 | 25,25 |
| Recipiente + M. Seca | 25,35 | 26,43 | 24,71 | 23,35 |
| Peso Recipiente | 15,2 | 14,49 | 15,32 | 14,63 |
| % Humedad | 21,182 | 21,273 | 21,406 | 21,789 |

Nota. *Fuente* (Autor)

El límite líquido del material con Cal al 3,5%, proveniente de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, se determinó a partir de la **Figura 11** y **Figura 12**, respectivamente, obteniéndose valores de 24,18 % para Áridos y Agregados del Sur y 21,67 % para Rookaazul.

Figura 11

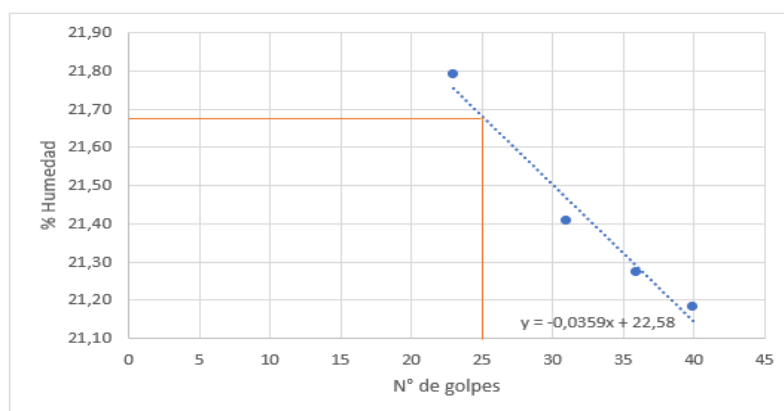
Gráfica del ensayo LL de la base con Cal al 3,5% de la mina Áridos y Agregados del Sur



Nota. Fuente (Autor)

Figura 12

Gráfica del ensayo LL de la base con Cal al 3,5% de la mina Rookaazul



Nota. Fuente (Autor)

d) Límite líquido de las bases granulares estabilizada con Cal al 5%

La siguiente **Tabla 26** y **Tabla 27**, se representa los datos obtenidos del Limite Líquido de las bases granulares con Cal al 5%, de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, respectivamente.

Tabla 26

Resultado del ensayo del LL de la base con Cal al 5%, de la mina Áridos y Agregados del Sur.

| | Límite Líquido | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| Nº Golpes | 38 | 34 | 29 | 24 |
| Recipiente Nº | #84 | #D | #A | #E |
| Recipiente + M.Húmeda | 36,59 | 36,62 | 43,29 | 39,64 |
| Recipiente + M. Seca | 34,04 | 33,78 | 39,14 | 36,13 |
| Peso Recipiente | 21,93 | 20,95 | 21,08 | 21,11 |
| % Humedad | 21,057 | 22,136 | 22,979 | 23,369 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Tabla 27

Resultado del ensayo del LL de la base con Cal al 5%, de la mina Rookaazul.

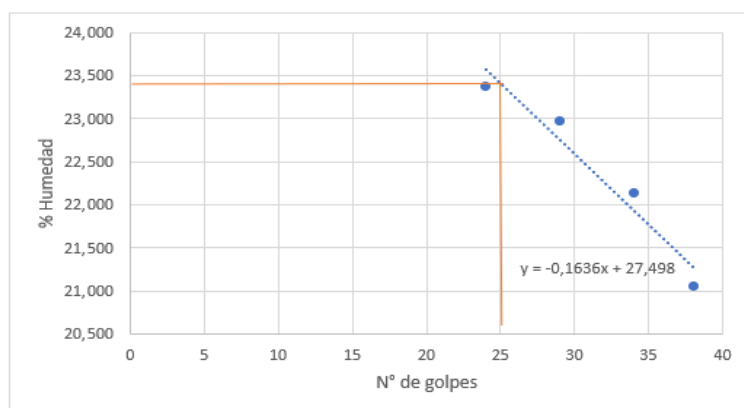
| | Límite Líquido | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| Nº Golpes | 36 | 32 | 27 | 23 |
| Recipiente Nº | #P2 | #4 | #L4 | #A |
| Recipiente + M.Húmeda | 32,11 | 24,58 | 18,46 | 25,8 |
| Recipiente + M. Seca | 28,9 | 22,47 | 17,27 | 23,41 |
| Peso Recipiente | 12,92 | 12,09 | 11,56 | 12,33 |
| % Humedad | 20,088 | 20,328 | 20,841 | 21,570 |

Nota. *Fuente* (Autor)

El límite líquido del material con Cal al 5%, proveniente de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, se determinó a partir de la **Figura 13** y **Figura 14**, respectivamente, obteniéndose valores de 23,40 % para Áridos y Agregados del Sur y 21,20 % para Rookaazul.

Figura 13

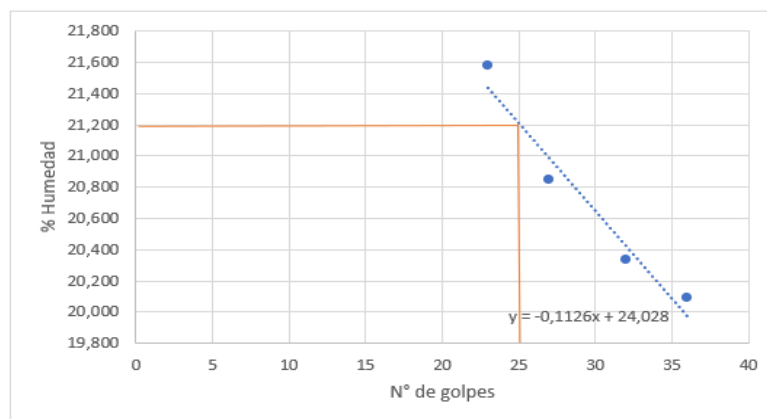
Gráfica del ensayo límite líquido de la base con Cal al 5% de la mina Áridos y Agregados del Sur



Nota. *Fuente* (Autor)

Figura 14

Gráfica del ensayo límite líquido de la base con Cal al 5% de la mina Rookaazul



Nota. *Fuente* (Autor)

3.1.1.3 Ensayo límite plástico (LP)

Para la realización del ensayo del límite plástico, se utilizó el material pasante por el tamiz N.º 40, conforme con lo establecido en la norma ASTM D4318. La base granular fue

humedecida cuidadosamente hasta obtener una masa maleable y uniforme. Posteriormente, se procedió a moldear pequeños rollos cilíndricos sobre una superficie lisa y no porosa, con un diámetro aproximado de 3 mm y una longitud cercana a 5 cm. El procedimiento consistió en enrollar el suelo manualmente hasta observar la formación de grietas o hasta que el rollo comenzara a desintegrarse. El contenido de humedad correspondiente a ese estado del material fue considerado como el límite plástico. El proceso completo se repitió cuatro veces con nuevas porciones de la muestra, y los datos obtenidos de contenido de humedad fueron promediados, a fin de obtener un valor representativo y preciso del límite plástico del suelo analizado.

Figura 15

Ensayo en el laboratorio para la obtención del LP



Nota: Representación de los rollos de aproximadamente 3 mm de radio para obtener el LP, en el Laboratorio de Suelos CITT. Nota. *Fuente* (Autor)

La **Figura 15**, detalla la formación de rollos de base granular en el laboratorio para la determinación del límite plástico.

a) Límite plástico de las bases granulares en estado natural

El límite plástico del material en su estado natural, proveniente de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, se determinó a partir de los datos presentados en la siguiente **Tabla 28** y **Tabla 29**, obteniéndose valores de 20,61 % y 18,45 %, respectivamente.

Tabla 28

Resultado del ensayo del LP de la base en estado natural, de la mina Áridos y Agregados del Sur.

| | Límite Plástico | | | |
|-----------------------|------------------------|-------|-------|-------|
| | #Z1 | #P3 | #2 | #4B |
| Recipiente N° | | | | |
| Recipiente + M.Húmeda | 8,96 | 7,69 | 8,72 | 9,16 |
| Recipiente + M. Seca | 8,12 | 7,07 | 7,930 | 8,31 |
| Peso Recipiente | 4,1 | 4,09 | 4,1 | 4,08 |
| % Humedad | 20,90 | 20,81 | 20,63 | 20,09 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Tabla 29

Resultado del ensayo del LP de la base en estado natural, de la mina Rookaazul.

| | Límite Plástico | | | |
|-----------------------|------------------------|-------|-------|-------|
| | #92 | #202 | #A3 | #69 |
| Recipiente N° | | | | |
| Recipiente + M.Húmeda | 8,6 | 9,85 | 7,84 | 7,57 |
| Recipiente + M. Seca | 7,87 | 8,98 | 7,260 | 7,08 |
| Peso Recipiente | 4,11 | 4,28 | 4,09 | 4,29 |
| % Humedad | 19,41 | 18,51 | 18,30 | 17,56 |

Nota. *Fuente* (Autor)

b) Límite plástico de las bases granulares estabilizada con Cal al 2,5%

El límite plástico del material estabilizada con Cal al 2.5%, proveniente de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, se determinó a partir de los datos presentados en la siguiente **Tabla 30** y **Tabla 31**, obteniéndose valores de 20,48% y 18,16 %, respectivamente.

Tabla 30

Resultado del ensayo del LP de la base estabilizada con Cal al 2,5%, de la mina Áridos y Agregados del Sur.

| Recipiente N° | Límite Plástico | | | |
|-----------------------|-----------------|-------|--------|-------|
| | #981 | #A3 | #5 | #6 |
| Recipiente + M.Húmeda | 12,22 | 10,59 | 13,89 | 7,66 |
| Recipiente + M. Seca | 11,23 | 9,48 | 12,620 | 7,06 |
| Peso Recipiente | 6,47 | 4,09 | 6,37 | 4,09 |
| % Humedad | 20,80 | 20,59 | 20,32 | 20,20 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Tabla 31

Resultado del ensayo del LP de la base estabilizada con Cal al 2,5%, de la mina Rookaazul.

| Recipiente N° | Límite Plástico | | | |
|-----------------------|-----------------|-------|--------|-------|
| | #E6 | #P3 | #19 | #P2 |
| Recipiente + M.Húmeda | 13,4 | 13,19 | 12,44 | 15,79 |
| Recipiente + M. Seca | 12,98 | 12,78 | 12,140 | 15,37 |
| Peso Recipiente | 10,75 | 10,5 | 10,49 | 12,99 |
| % Humedad | 18,83 | 17,98 | 18,18 | 17,65 |

Nota. *Fuente* (Autor)

c) Límite plástico de las bases granulares estabilizada con Cal al 3,5%

El límite plástico del material estabilizada con Cal al 3,5%, proveniente de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, se determinó a partir de los datos presentados en la siguiente **Tabla 32** y **Tabla 33**, obteniéndose valores de 20,28% y 18,05 %, respectivamente.

Tabla 32

Resultado del ensayo del LP de la base estabilizada con Cal al 3,5%, de la mina Áridos y Agregados del Sur.

| Recipiente N° | Límite Plástico | | | |
|-----------------------|-----------------|-------|--------|--------|
| | #E6 | #P3 | #E7 | #E2 |
| Recipiente + M.Húmeda | 11,86 | 13,17 | 11,43 | 12,04 |
| Recipiente + M. Seca | 11,65 | 12,72 | 11,210 | 11,75 |
| Peso Recipiente | 10,7 | 10,48 | 10,1 | 10,232 |
| % Humedad | 22,11 | 20,09 | 19,82 | 19,10 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Tabla 33

Resultado del ensayo del LP de la base estabilizada con Cal al 3,5%, de la mina Rookaazul.

| Recipiente N° | Límite Plástico | | | |
|-----------------------|-----------------|-------|-------|-------|
| | #S | #6 | #A4 | #90 |
| Recipiente + M.Húmeda | 10,39 | 8,44 | 9,29 | 7,82 |
| Recipiente + M. Seca | 9,79 | 7,76 | 8,480 | 7,26 |
| Peso Recipiente | 6,54 | 4,07 | 4,01 | 4 |
| % Humedad | 18,46 | 18,43 | 18,12 | 17,18 |

Nota. *Fuente* (Autor)

d) Límite plástico de las bases granulares estabilizada con Cal al 5%

El límite plástico del material estabilizado con Cal al 5%, proveniente de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, se determinó a partir de los datos presentados en la siguiente **Tabla 34** y **Tabla 35**, obteniéndose valores de 19.40% y 17.36 %, respectivamente.

Tabla 34

Resultado del ensayo del LP de la base estabilizada con Cal al 5%, de la mina Áridos y Agregados del Sur.

| Recipiente N° | Límite Plástico | | | |
|-----------------------|-----------------|-------|--------|-------|
| | #7 | #P11 | #E7 | #2 |
| Recipiente + M.Húmeda | 17,82 | 15,45 | 14,44 | 13,66 |
| Recipiente + M. Seca | 16,51 | 14,57 | 13,730 | 13,08 |
| Peso Recipiente | 10,02 | 10 | 10,02 | 10,03 |
| % Humedad | 20,18 | 19,26 | 19,14 | 19,02 |

Nota. Fuente (Autor)

Tabla 35

Resultado del ensayo del LP de la base estabilizada con Cal al 5%, de la mina Rookaazul.

| Recipiente N° | Límite Plástico | | | |
|-----------------------|-----------------|-------|--------|-------|
| | #S10 | #1 | #M3 | #12K |
| Recipiente + M.Húmeda | 66,01 | 34,7 | 55,15 | 44,81 |
| Recipiente + M. Seca | 65,81 | 34,42 | 55,020 | 44,59 |
| Peso Recipiente | 64,64 | 32,78 | 54,29 | 43,33 |
| % Humedad | 17,09 | 17,07 | 17,81 | 17,46 |

Nota. Fuente (Autor)

3.1.1.4 Índice plástico (IP)

El IP, es la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo granular. Representa el rango de contenido de humedad dentro del cual un suelo se comporta de manera plástica, es decir, puede ser moldeado sin desintegrarse ni fluir.

a) Índice plástico de las bases granulares en su estado natural

En la siguiente **Tabla 36**, se representa los resultados del Índice Plástico de las bases granulares en estado natural, de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, respectivamente, las mismas que son de 4,19% y 3.45%, respectivamente.

Tabla 36

Resultados de los ensayos del IP de la base en su estado natural, de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul.

| Índice Plástico (IP) | |
|-----------------------------|------|
| Áridos y Agregados del Sur | 4,19 |
| Rookaazul | 3,45 |

Nota. *Fuente* (Autor)

b) Índice plástico de las bases granulares estabilizada con Cal al 2,5%

En la siguiente **Tabla 37**, se representa los resultados del Índice Plástico de las bases granulares estabilizadas con Cal al 2,5%, de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, respectivamente, las mismas que son de 3.72% y 3.54%, respectivamente.

Tabla 37

Resultados de los ensayos del IP de la base estabilizada con Cal al 2,5%, de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul.

| Índice Plástico (IP) | |
|-----------------------------|------|
| Áridos y Agregados del Sur | 3,72 |
| Rookaazul | 3,54 |

Nota. *Fuente* (Autor)

c) Índice plástico de las bases granulares estabilizada con Cal al 3,5%

En la siguiente **Tabla 38**, se representa los resultados del Índice Plástico de las bases granulares estabilizadas con Cal al 3,5%, de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, respectivamente, las mismas que son de 3,9% y 3.62%, respectivamente.

Tabla 38

Resultados de los ensayos del IP de la base estabilizada con Cal al 3,5%, de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul.

| Índice Plástico (IP) | |
|-----------------------------|------|
| Áridos y Agregados del Sur | 3,9 |
| Rookaazul | 3,62 |

Nota. *Fuente* (Autor)

d) Índice plástico de las bases granulares estabilizada con Cal al 5%

En la siguiente **Tabla 39**, se representa los resultados del Índice Plástico de las bases granulares estabilizadas con Cal al 5%, de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, respectivamente, las mismas que son de 4% y 3,82%, respectivamente.

Tabla 39

Resultados de los ensayos del IP de la base estabilizada con Cal al 5%, de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul.

| Índice Plástico (IP) | |
|-----------------------------|------|
| Áridos y Agregados del Sur | 4 |
| Rookaazul | 3,84 |

Nota. *Fuente* (Autor)

3.1.2. Ensayos de compactación

3.1.2.1 Ensayo Proctor modificado (PM)

Como parte de la metodología para la determinación de la densidad seca máxima (Y_d máxima) y la humedad óptima (W óptima) de la base granular, se llevó a cabo el ensayo Proctor Modificado en W óptima laboratorio. Con base al método ASTM D1557, se utilizó base granular que pasa por el tamiz de $\frac{3}{4}$ " (19,1 mm) y es retenido en el tamiz N.º 4 (4.75mm), al igual que material que pasa el tamiz N.º 4(4.75mm). La dosificación del material se realizó en función de la granulometría previamente obtenida, con el fin de reproducir en laboratorio las proporciones reales de la base. Se preparó una muestra de 5.500 gramos, cantidad suficiente para completar las cinco capas exigidas para este ensayo. Posteriormente, se determinó el contenido de humedad del material y se establecieron diferentes niveles de humedad para elaborar la curva de compactación. Esto permitió identificar la humedad óptima y la densidad seca máxima del material, tanto en su estado natural como con los distintos porcentajes de cal evaluados. De acuerdo con la granulometría de la base granular, se seleccionó el método de compactación aplicable (A, B o C), lo que definió el volumen del molde y el número de golpes por capa necesarios para simular en laboratorio la energía del Proctor Modificado. En esta investigación, se aplicó el método C, para las bases granulares provenientes de las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, conforme a lo estipulado en la Tabla 5, en función de la granulometría de las bases.

La **Figura 16**, detalla cómo se homogenizó y humedeció el material antes de colocarlo en el molde Proctor en cinco capas. Se aplicaron 56 golpes por capa, con el fin de obtener tanto la humedad óptima como la densidad seca máxima del material granular.

Figura 16

Homogenización del material en el laboratorio y compactación de la base granular



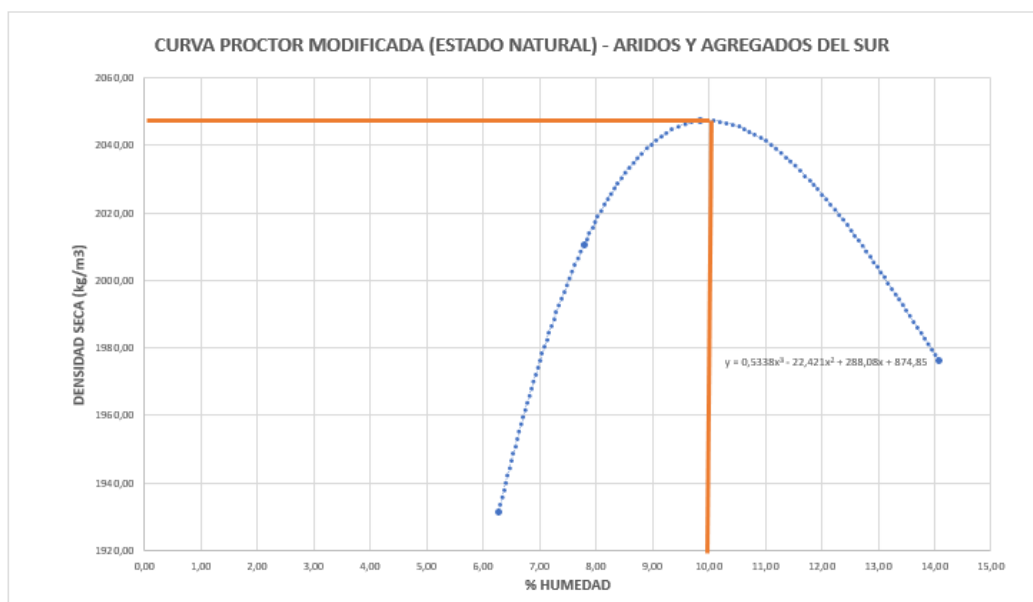
Nota. *Fuente* (Autor)

a) Humedad óptima y densidad seca máxima de las bases granulares en estado natural

La **Figura 17** y **Figura 18**, muestran la determinación de las humedades óptimas y densidades secas máximas, obtenidas mediante el trazado de líneas perpendiculares desde los valores de humedad y densidad seca hasta el punto más alto de la curva de compactación del Proctor Modificado.

Figura 17

Obtención de la W óptima y Y_d máxima de la base en estado natural, de la mina Áridos y Agregados del Sur

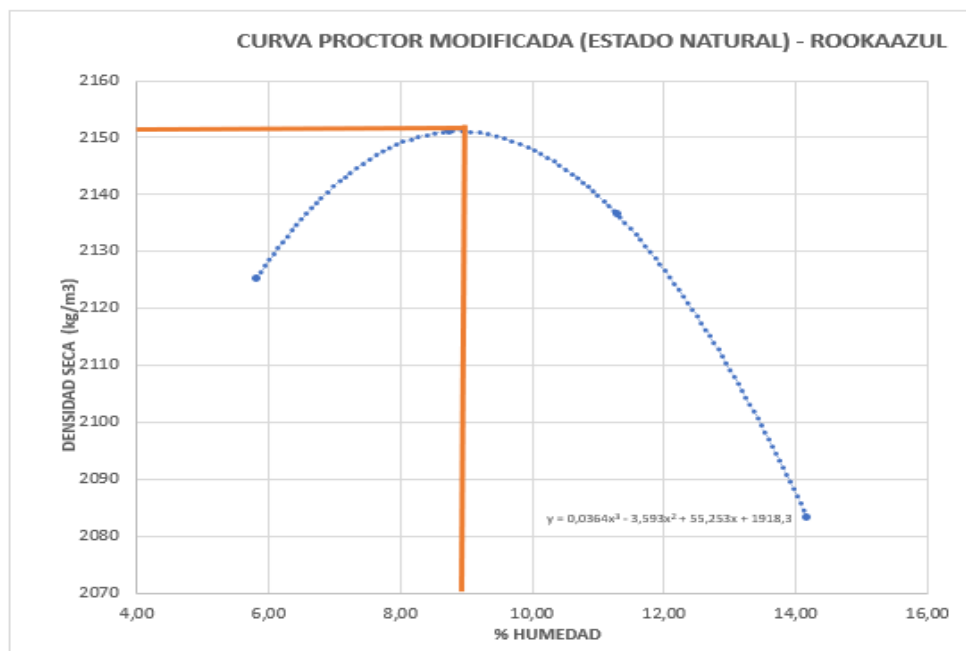


Nota. Fuente (Autor)

En la **Figura 17**, se observa que la W óptima de la base granular corresponde al 10 %, mientras que la Y_d máxima alcanzada es de 2046 kg/m³.

Figura 18

Obtención de la W óptima y Y_d máxima de la base en estado natural, de la mina Rookaazul



Nota. Fuente (Autor)

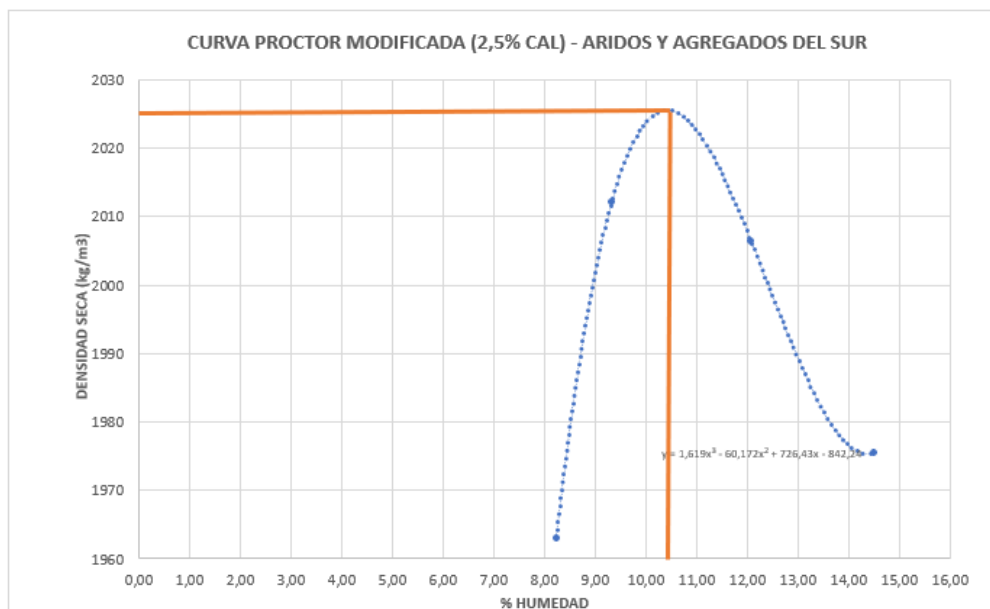
En la **Figura 18**, se observa que la W óptima de la base granular corresponde al 9 %, mientras que la Y_d máxima alcanzada es de 2152 kg/m³.

b) Humedad óptima y densidad seca máxima de las bases granulares estabilizada con Cal al 2,5%

La **Figura 19** y **Figura 20**, muestran la determinación de las humedades óptimas y densidades secas máximas, obtenidas mediante el trazado de líneas perpendiculares desde los valores de humedad y densidad seca hasta el punto más alto de la curva de compactación del Proctor Modificado.

Figura 19

Obtención de la W óptima y Y_d máxima de la base mejorada con 2,5% de Cal, de la mina Áridos y Agregados del Sur

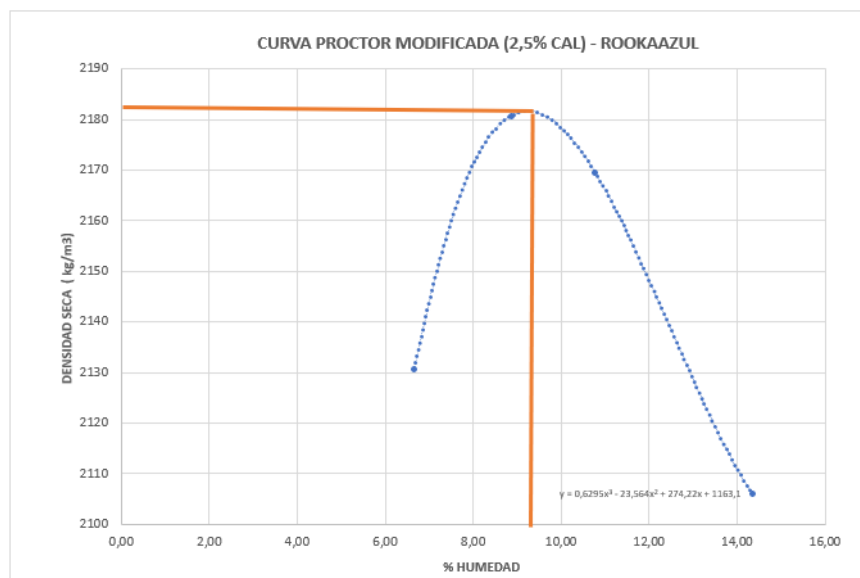


Nota. Fuente (Autor)

En la **Figura 19**, se observa que la W óptima de la base granular corresponde al 10,4 %, mientras que la Y_d máxima alcanzada es de 2025 kg/m³.

Figura 20

Obtención de la W óptima y Y_d máxima de la base mejorada con 2,5% de Cal, de la mina Rookaazul.



Nota. Fuente (Autor)

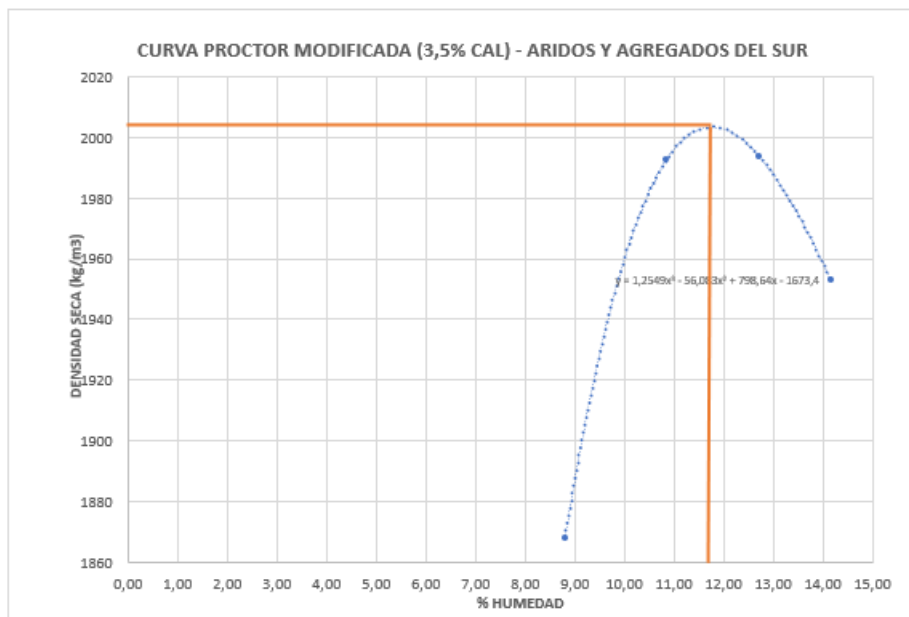
En la **Figura 20**, se observa que la W óptima de la base granular corresponde al 9,5 %, mientras que la Y_d máxima alcanzada es de 2183 kg/m³.

c) Humedad óptima y densidad seca máxima de las bases granulares estabilizada con Cal al 3,5%

La **Figura 21** y **Figura 22**, muestran la determinación de las humedades óptimas y densidades secas máximas, obtenidas mediante el trazado de líneas perpendiculares desde los valores de humedad y densidad seca hasta el punto más alto de la curva de compactación del Proctor Modificado.

Figura 21

Obtención de la W óptima y Y_d máxima de la base mejorada con 3,5% de Cal, de la mina Áridos y Agregados del Sur

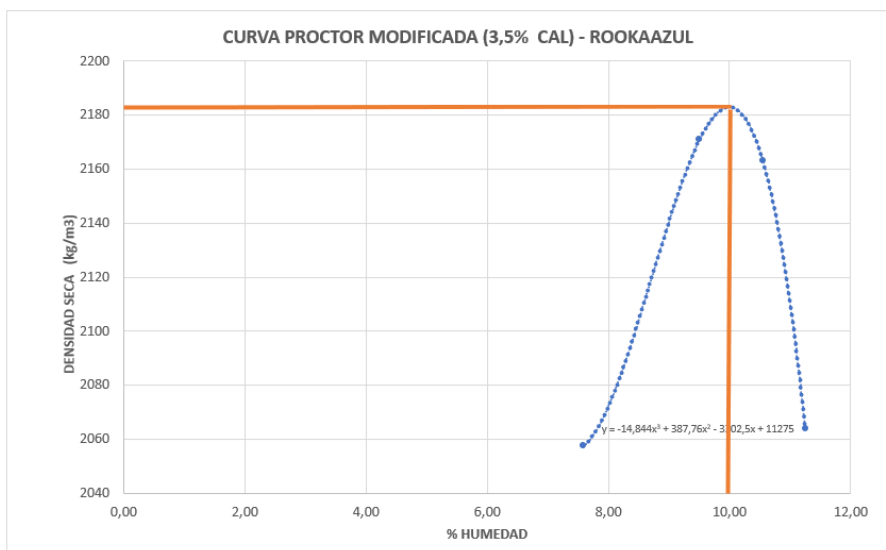


Nota. Fuente (Autor)

En la **Figura 21**, se observa que la W óptima de la base granular corresponde al 11,7 %, mientras que la Y_d máxima alcanzada es de 2005 kg/m³.

Figura 22

Obtención de la W óptima y Y_d máxima de la base mejorada con 3,5% de Cal, de la mina Rookaazul



Nota. Fuente (Autor)

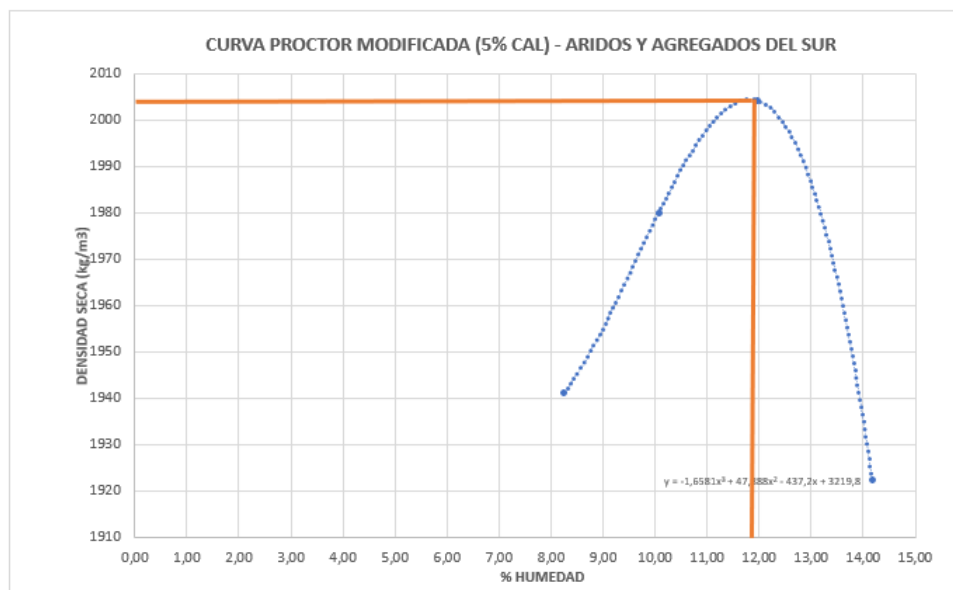
En la **Figura 22**, se observa que la W óptima de la base granular corresponde al 10 %, mientras que la Y_d máxima alcanzada es de 2181 kg/m³.

d) Humedad óptima y densidad seca máxima de las bases granulares estabilizada con Cal al 5%

La **Figura 23** y **Figura 24**, muestran la determinación de las humedades óptimas y densidades secas máximas, obtenidas mediante el trazado de líneas perpendiculares desde los valores de humedad y densidad seca hasta el punto más alto de la curva de compactación del Proctor Modificado.

Figura 23

Obtención de la W óptima y Yd máxima de la base mejorada con 5% de Cal, de la mina Áridos y Agregados del Sur

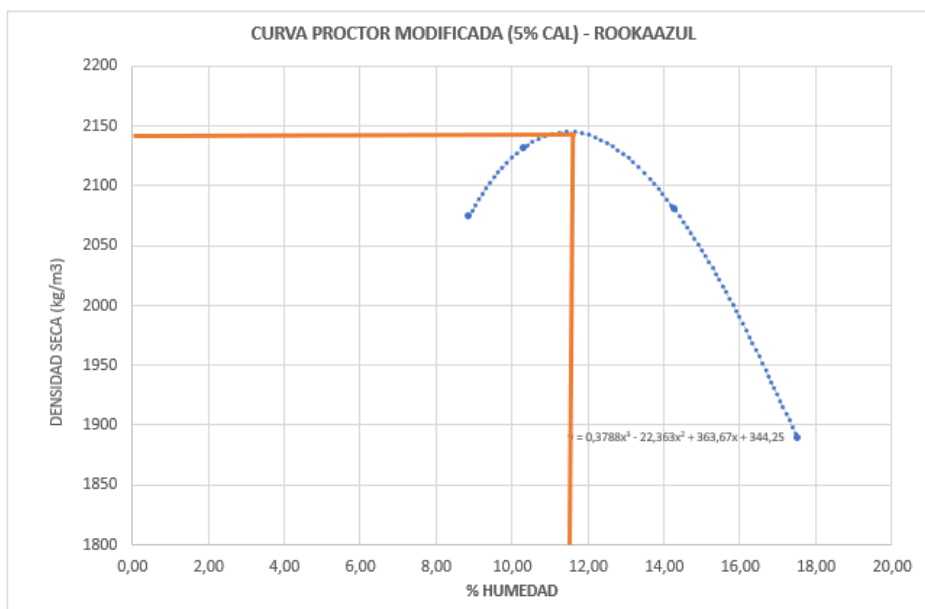


Nota. Fuente (Autor)

En la **Figura 23**, se observa que la W óptima de la base granular corresponde al 11,9 %, mientras que la Yd máxima alcanzada es de 2004 kg/m³.

Figura 24

Obtención de la W óptima y Y_d máxima de la base mejorada con 5% de Cal, de la mina Rookaazul



Nota. Fuente (Autor)

En la **Figura 24**, se observa que la W óptima de la base granular corresponde al 11,8 %, mientras que la Y_d máxima alcanzada es de 2145 kg/m³.

3.1.3. Ensayos de resistencia mecánica

3.1.3.1 Ensayo de Abrasión

Para la ejecución del ensayo de Abrasión en la Máquina de los Ángeles, se verificó la granulometría de la base granular a partir del análisis por tamizado, con el fin de determinar el método aplicable (A, B o C), según lo establecido en la norma ASTM C131. En este caso, se utilizó el Método A, correspondiente a agregados con tamaño máximo nominal de 37.5 mm

(1½"). Con base en dicho método, se prepararon las fracciones requeridas, considerando los rangos de masa y tamaño de partícula indicados por la normativa.

Posteriormente, se lavó la muestra para eliminar partículas finas adheridas y se procedió a su secado en horno a 110 ± 5 °C durante 24 horas. Una vez seca, la muestra se dejó enfriar a temperatura ambiente. A continuación, se introdujo el material en la Máquina de Los Ángeles, junto con 12 esferas de acero, de acuerdo con el método seleccionado. La máquina se hizo girar a una velocidad de 30 a 33 revoluciones por minuto, durante un total de 500 revoluciones.

Finalizado el ensayo, se descargó el contenido de la máquina y se realizó una separación preliminar del material mediante el tamiz N.º 12 (1.70 mm). El material que pasó por el tamiz fue pesado para calcular el porcentaje de desgaste.

El cálculo se realizó mediante la siguiente Ecuación 6.

$$\text{Abrasión \%} = \left(\frac{B-A}{B} \right) * 100 \quad (6)$$

Donde:

A: Peso del material tamizado en el tamiz N.º 12 (1.70 mm)

B: Peso total de la muestra según la gradación (mm)

La **Figura 25**, demuestra el proceso de lavado de las muestras de material luego del tamizado con los tamices previamente descritos, así como la posterior colocación del material en la Máquina de Los Ángeles para la determinación del porcentaje de abrasión.

Figura 25

Lavado del material y Colocación del material en la máquina de los Ángeles



Nota. Fuente (Autor)

La **Tabla 40** y **Tabla 41**, presentan las diferentes cantidades de material tamizadas según el método A y posteriormente lavadas, correspondientes a las minas Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, respectivamente. Asimismo, se muestra el peso del material remanente luego de haber sido sometido a 500 revoluciones en la Máquina de Los Ángeles.

Tabla 40

Cantidades de material para el ensayo de Abrasión, de la mina Áridos y Agregados del Sur.

| Tamaño del tamiz (mm) | | Peso del material según el tipo de gradación (gr) | Masa de los tamaños indicados (gr) | | | |
|-----------------------|----------|---|------------------------------------|---------------|---------|---------|
| Pasante | Retenido | | A | Granulometría | | |
| | | | | B | C | D |
| 37,5 | 25 | 1254 | 1250±25 | – | – | – |
| 25 | 19 | 1243,5 | 1250±25 | – | – | – |
| 19 | 12,5 | 1250,5 | 1250±10 | 2500±10 | – | – |
| 12,5 | 9,5 | 1249,5 | 1250±10 | 2500±10 | – | – |
| 9,5 | 6,3 | 0 | – | – | 2500±10 | – |
| 6,3 | 4,75 | 0 | – | – | 2500±10 | – |
| 4,75 | 2,36 | 0 | – | – | – | 5000±10 |
| TOTAL | | 4997,5 | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 |

A: Masa correspondiente al material retenido en tamiz N° 12 (gr) 4129,5

B: Masa total del materia según la gradación (gr) 4997,5

Nota. Fuente (Autor)

Según los datos presentados en la Tabla 40, y aplicando la Ecuación 6, se obtuvo un porcentaje de desgaste del material del 17,37 %, para el material de base proveniente de la mina Áridos y Agregados del Sur.

Tabla 41

Cantidades de material para el ensayo de Abrasión, de la mina Rookaazul.

| Tamaño del tamiz (mm) | | Peso del material según el tipo de gradación (gr) | Masa de los tamaños indicados (gr) | | | |
|-----------------------|----------|---|------------------------------------|---------|---------|---------|
| Pasante | Retenido | | A | B | C | D |
| 37,5 | 25 | 1231 | 1250±25 | – | – | – |
| 25 | 19 | 1248 | 1250±25 | – | – | – |
| 19 | 12,5 | 1259,5 | 1250±10 | 2500±10 | – | – |
| 12,5 | 9,5 | 1256,5 | 1250±10 | 2500±10 | – | – |
| 9,5 | 6,3 | 0 | – | – | 2500±10 | – |
| 6,3 | 4,75 | 0 | – | – | 2500±10 | – |
| 4,75 | 2,36 | 0 | – | – | – | 5000±10 |
| TOTAL | | 4995 | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 |

| | |
|---|--------|
| A: Masa correspondiente al material retenido en tamiz N°12 (gr) | 4206,5 |
| B: Masa total del materia según la gradación (gr) | 4995 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Según los datos presentados en la Tabla 41, y aplicando la Ecuación 6, se obtuvo un porcentaje de desgaste del material del 15,79 %, para el material de base proveniente de la mina Rookaazul.

3.1.3.2 Ensayo CBR

Para este ensayo, se utilizó material pasante por el tamiz de ¾” (19.1 mm) y retenido en el tamiz N.º 40, así como material pasante por el tamiz N.º 40, dosificados según la curva granulométrica previamente obtenida del material granular, con el fin de replicar su composición representativa. El ensayo fue realizado sobre muestras compactadas al contenido de humedad

óptimo, determinado previamente mediante el ensayo Proctor Modificado. Cada cilindro fue conformado con cinco capas compactadas, aplicando 12, 25 y 56 golpes por capa. Una vez compactada las muestras de material, el molde fue colocado en inmersión durante 4 días dentro de una piscina o tanque con agua, con el objetivo de simular condiciones de saturación del suelo. Finalizado el proceso de inmersión, se realizó el ensayo de penetración en la prensa CBR, tomando lecturas de carga frente a la penetración en intervalos de 0.5 mm hasta alcanzar los 5 mm. Desde ese momento, las mediciones se realizaron en intervalos de 2.5 mm, hasta alcanzar una penetración de 12.7 mm, obteniendo así los datos necesarios para determinar el valor del índice de soporte California CBR, correspondiente a la muestra de base granular evaluada.

La **Figura 26**, detalla el proceso de colocación y compactación de las muestras previamente homogenizadas y humedecidas en el molde CBR, así como el ajuste del trípode de expansión del equipo CBR y, finalmente, la toma de datos mediante la prensa utilizada para los ensayos CBR.

Figura 26

Proceso de colocación, compactación de la base y obtención del CBR



Nota. Fuente (Autor)

3.1.3.3 CBR de las bases granulares en estado natural

La **Tabla 42** y **Figura 27**, presentan los resultados del ensayo CBR en estado natural para el material proveniente de la mina Áridos y Agregados del Sur, evaluado bajo diferentes niveles de energía de compactación.

Tabla 42

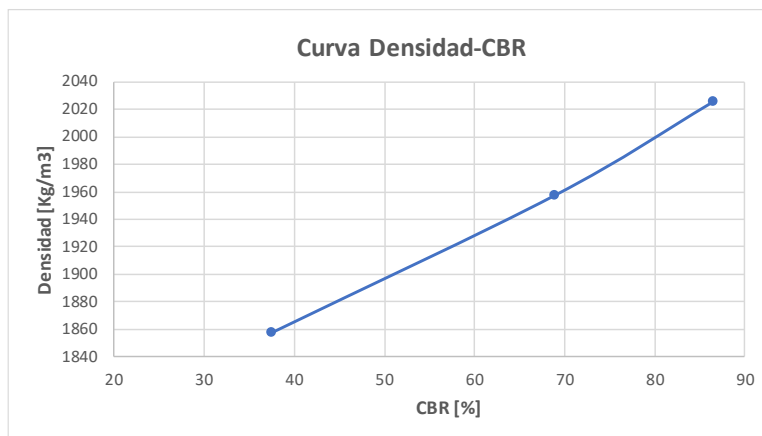
Resultados del ensayo CBR en estado natural.

| CBR - Áridos y Agregados del Sur (Estado natural) | | |
|---|------------------------------------|-------|
| Golpes | Densidad Seca (kg/m ³) | CBR % |
| 56 | 2025,52 | 86 |
| 25 | 1957,26 | 69 |
| 12 | 1856,70 | 37 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Figura 27

Curva Densidad seca vs. CBR



Nota. *Fuente* (Autor)

Según los datos presentados en la **Tabla 42**, para la base granular en estado natural proveniente de la mina Áridos y Agregados del Sur, alcanzó un de CBR del 86 % y una densidad seca de 2025,52 kg/m³.

La **Tabla 43** y **Figura 28**, presentan los resultados del ensayo CBR en estado natural para el material proveniente de la mina Rookaazul, evaluado bajo diferentes niveles de energía de compactación.

Tabla 43

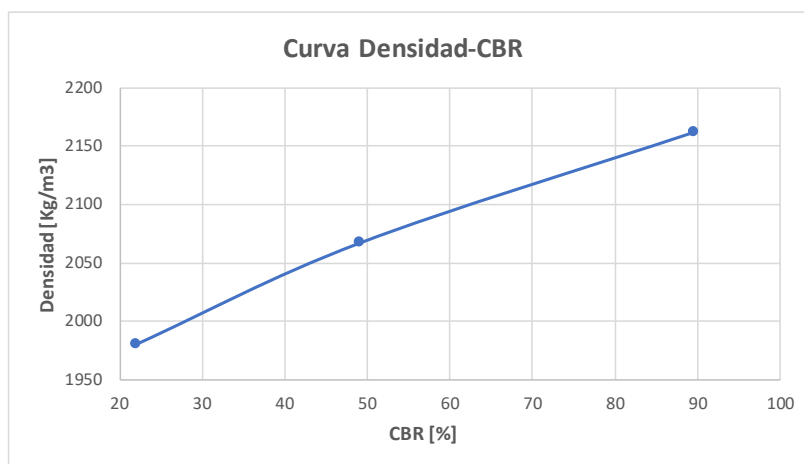
Resultados del ensayo CBR en estado natural.

| CBR - Rookaazul (Estado natural) | | |
|----------------------------------|------------------------------------|-------|
| Golpes | Densidad Seca (kg/m ³) | CBR % |
| 56 | 2162,47 | 90 |
| 25 | 2067,29 | 49 |
| 12 | 1980,22 | 22 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Figura 28

Curva Densidad seca vs. CBR



Nota. *Fuente* (Autor)

Según los datos presentados en la **Tabla 43**, para la base granular en estado natural, proveniente de la mina Rookaazul, alcanzó un CBR del 90 % y una densidad seca de 2162,5 kg/m³.

3.1.3.4 CBR de las bases granulares mejoradas con 2,5% de Cal

La **Tabla 44** y **Figura 29**, presentan los resultados del ensayo CBR mejorada con Cal al 2,5%, para el material proveniente de la mina Áridos y Agregados del Sur, evaluado bajo diferentes niveles de energía de compactación.

Tabla 44

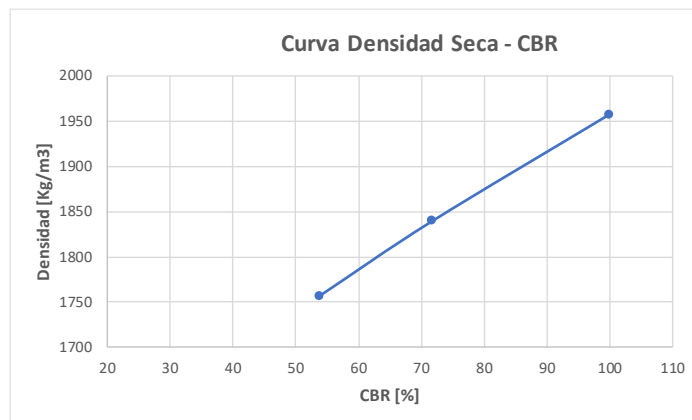
Resultados del ensayo CBR mejora con Cal al 2.5%.

| CBR - Áridos y Agregados del Sur (2,5% de Cal) | | |
|--|------------------------------------|-------|
| Golpes | Densidad Seca (kg/m ³) | CBR % |
| 56 | 1957,44 | 100 |
| 25 | 1839,67 | 72 |
| 12 | 1757,10 | 54 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Figura 29

Curva Densidad seca vs. CBR



Nota. *Fuente* (Autor)

Según los datos presentados en la **Tabla 44**, para la base granular mejorada con Cal al 2,5%, proveniente de la mina Áridos y Agregados del Sur, alcanzó un CBR del 100 % y una densidad seca de 1957,4 kg/m³.

La **Tabla 45** y **Figura 30**, presentan los resultados del ensayo CBR mejorada con Cal al 2,5%, para el material proveniente de la mina Rookaazul, evaluado bajo diferentes niveles de energía de compactación.

Tabla 45

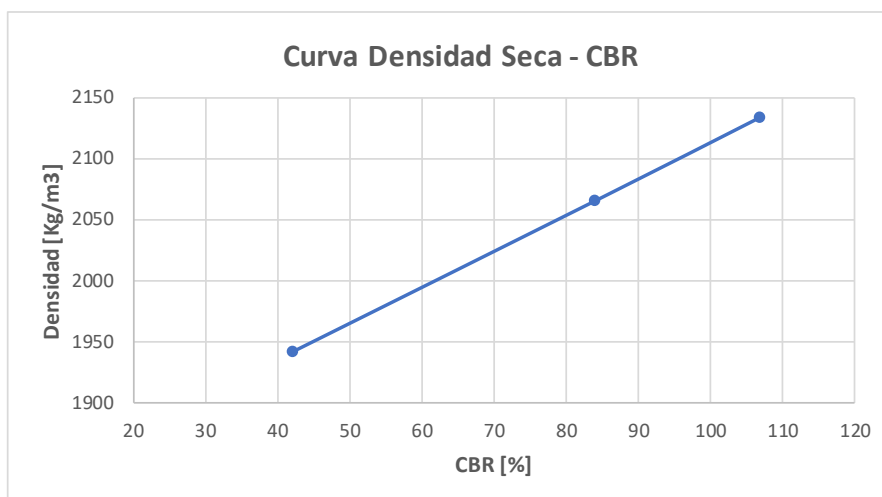
Resultados del ensayo CBR mejora con Cal al 2,5%.

| CBR - Rookaazul (2,5% de Cal) | | |
|-------------------------------|------------------------------------|-------|
| Golpes | Densidad Seca (kg/m ³) | CBR % |
| 56 | 2134,16 | 107 |
| 25 | 2065,86 | 84 |
| 12 | 1942,12 | 42 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Figura 30

Curva Densidad seca vs. CBR



Nota. *Fuente* (Autor)

Según los datos presentados en la **Tabla 45**, para la base granular mejorada con Cal al 2,5%, proveniente de la mina Rookaazul, alcanzó un CBR del 107 % y una densidad seca de 2134,2 kg/m³.

3.1.3.5 CBR de las bases granulares mejoradas con 3,5% de Cal

La **Tabla 46** y **Figura 31**, presentan los resultados del ensayo CBR mejorada con Cal al 3,5%, para el material proveniente de la mina Áridos y Agregados del Sur, evaluado bajo diferentes niveles de energía de compactación.

Tabla 46.

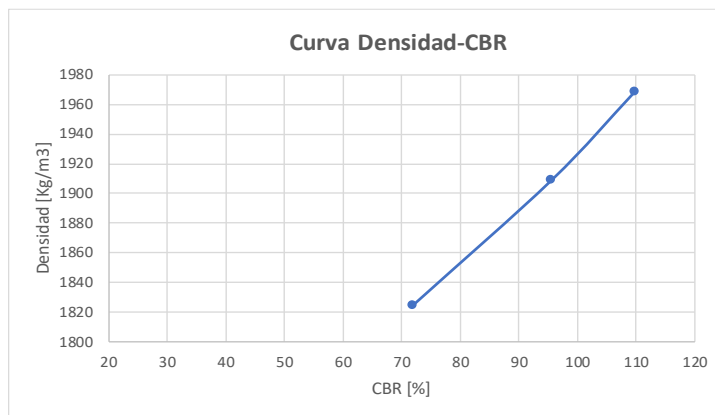
Resultados del ensayo CBR mejora con Cal al 3,5%.

| CBR - Áridos y Agregados del Sur (3,5% de Cal) | | |
|--|------------------------------------|-------|
| Golpes | Densidad Seca (kg/m ³) | CBR % |
| 56 | 1968,39 | 110 |
| 25 | 1908,92 | 95 |
| 12 | 1824,28 | 72 |

Nota. Fuente (Autor)

Figura 31

Curva Densidad seca vs. CBR



Nota. Fuente (Autor)

Según los datos presentados en la **Tabla 46**, para la base granular mejorada con Cal al 3,5%, proveniente de la mina Áridos y Agregados del Sur, alcanzó un CBR del 110 % y una densidad seca de 1968,4 kg/m³.

La **Tabla 47** y **Figura 32**, presentan los resultados del ensayo CBR mejorada con Cal al 3,5%, para el material proveniente de la mina Rookaazul, evaluado bajo diferentes niveles de energía de compactación.

Tabla 47

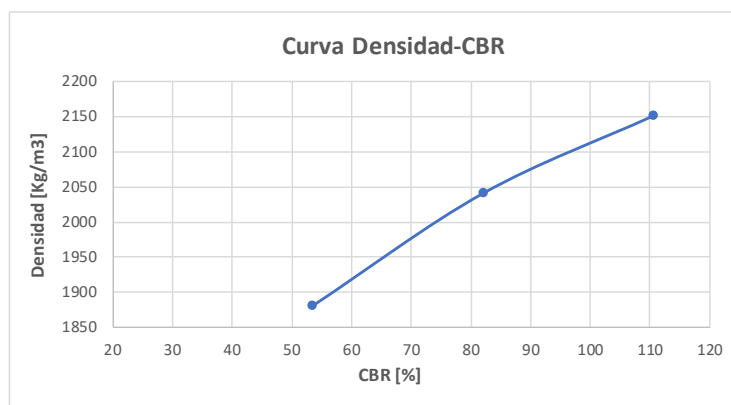
Resultados del ensayo CBR mejora con Cal al 3,5%.

| CBR - Rookaazul (3,5% de Cal) | | |
|-------------------------------|------------------------------------|-------|
| Golpes | Densidad Seca (kg/m ³) | CBR % |
| 56 | 2151,63 | 111 |
| 25 | 2040,88 | 82 |
| 12 | 1880,24 | 54 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Figura 32

Curva Densidad seca vs. CBR



Nota. *Fuente* (Autor)

Según los datos presentados en la **Tabla 47**, para la base granular mejorada con Cal al 3,5%, proveniente de la mina Rookaazul, alcanzó un CBR del 111 % y una densidad seca de 2151,6 kg/m³

3.1.3.6 CBR de las bases granulares mejoradas con 5% de Cal

La **Tabla 48** y **Figura 33**, presentan los resultados del ensayo CBR mejorada con Cal al 5%, para el material proveniente de la mina Áridos y Agregados del Sur, evaluado bajo diferentes niveles de energía de compactación.

Tabla 48

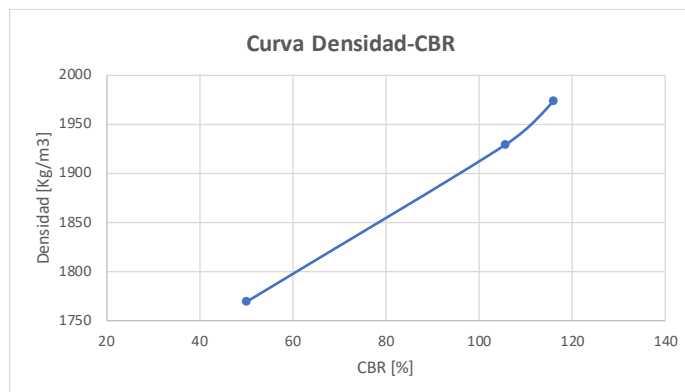
Resultados del ensayo CBR mejora con Cal al 5%.

| CBR - Áridos y Agregados del Sur (5% de Cal) | | |
|--|------------------------------------|-------|
| Golpes | Densidad Seca (kg/m ³) | CBR % |
| 56 | 1973,15 | 116 |
| 25 | 1929,09 | 106 |
| 12 | 1769,23 | 50 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Figura 33

Curva Densidad seca vs. CBR



Nota. *Fuente* (Autor)

Según los datos presentados en la **Tabla 48**, para la base granular mejorada con Cal al 5%, proveniente de la mina Áridos y Agregados del Sur, alcanzó un CBR del 116 % y una densidad seca de 1973,15 kg/m³.

La **Tabla 49** y **Figura 34**, presentan los resultados del ensayo CBR mejorada con Cal al 5%, para el material proveniente de la mina Rookaazul, evaluado bajo diferentes niveles de energía de compactación.

Tabla 49

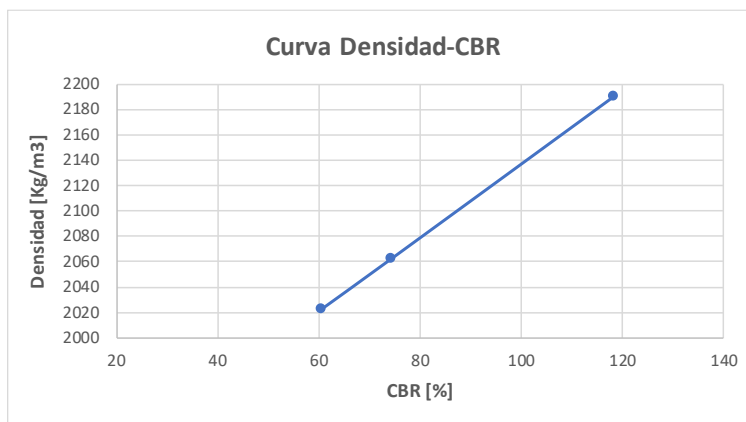
Resultados del ensayo CBR mejora con Cal al 5%

| CBR - Rookaazul (5% de Cal) | | |
|-----------------------------|------------------------------------|-------|
| Golpes | Densidad Seca (kg/m ³) | CBR % |
| 56 | 2190,92 | 118 |
| 25 | 2062,04 | 74 |
| 12 | 2022,06 | 60 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Figura 34

Curva Densidad seca vs. CBR.



Nota. *Fuente* (Autor)

Según los datos presentados en la **Tabla 49**, para la base granular mejorada con Cal al 5%, proveniente de la mina Rookaazul, alcanzó un CBR del 118 % y una densidad seca de 2190,92 kg/m³.

3.2. Clasificación de las Bases granulares

Para la clasificación del material correspondiente a la base granular, se utilizó la normativa Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador (2002), del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. Esta normativa establece franjas granulométricas específicas que permiten determinar la clase del material en función de su distribución de tamaño de partículas. El procedimiento consistió en comparar la curva granulométrica obtenida en laboratorio con las franjas límite mínimas y máximas definidas por dicha norma. Si la curva del material analizado se encuentra completamente contenida dentro de una de las franjas especificadas, es posible asignar una clase correspondiente a la Clase A, B o C, al material granular evaluado. Esta clasificación es fundamental para verificar si el material cumple con los requisitos técnicos exigidos para su uso en capas estructurales de pavimentos.

3.3. Diseño del pavimento flexible

Los pavimentos flexibles son estructuras diseñadas para soportar y distribuir las cargas del tránsito vehicular hacia las capas inferiores del suelo, manteniendo condiciones de servicio aceptables durante su vida útil. Su correcta concepción resulta esencial para garantizar el desempeño funcional y estructural de las vías. El diseño de este tipo de pavimentos debe ajustarse a normativas técnicas específicas tales como la normativa AASHTO, INVIAS, las cuales definen parámetros como la resistencia de materiales, las condiciones de carga, y los criterios de durabilidad. El cumplimiento de dichas normativas asegura la integridad estructural del pavimento, optimiza los recursos constructivos y facilita la planificación de actividades de mantenimiento y rehabilitación.

3.3.1. Datos iniciales para el diseño

El diseño estructural de pavimentos flexibles tiene como finalidad determinar los espesores adecuados de una combinación de capas que lo conforman: carpeta asfáltica, base y subbase, etc, de manera que el sistema soporte las cargas del tránsito durante su vida útil, sin fallas estructurales prematuras.

En un procedimiento convencional, el diseño parte del análisis del TPDA, el cual se proyecta para el período de diseño y se convierte en el número acumulado de ejes equivalentes (W_{18}) nomenclatura que usa el diseño AASHTO y (N_t) nomenclatura que usa el diseño INVIAS, considerando factores como tipo de vehículo, número de ejes y condiciones de carga. Una vez calculado se utiliza la ecuación 1, de diseño de la Guía AASHTO, para obtener el Número Estructural de tránsito requerido (SN tránsito). Este cálculo considera variables como la confiabilidad del diseño (Z_r), el error normal combinado (S_o), para este estudio será una construcción nueva, la pérdida de serviciabilidad (ΔPSI) y el módulo resiliente (MR), estimado a partir del valor CBR de la subrasante. Posteriormente, se determina el Número Estructural del pavimento (SN de la estructura) con la ecuación 2, ya detalla anteriormente, donde a_1 , a_2 , a_3 , son los coeficientes estructurales de la carpeta asfáltica, base y subbase, respectivamente; d representa los espesores de la capas y m los coeficientes de drenaje. Finalmente, el diseño estructural del pavimento flexible, es aceptable cuando se cumple la condición de la ecuación 3.

En este trabajo de titulación, se parte de los Números de ejes equivalentes de:

- W_{18} o N_t de 500000
- W_{18} o N_t de 1'000000

Para los parámetros climáticos de temperatura y precipitación, se toma como fuente principal la tesis de Genovez Muñoz (2018), que tiene como título “Análisis de precipitaciones y elaboración de hietogramas de diseño para la ciudad de Cuenca”. Dicha investigación señala que, debido a la ubicación geográfica de Cuenca, se presentan variaciones térmicas diurnas y nocturnas entre los 7 °C y 25 °C, con una temperatura promedio aproximada de 15 °C. En cuanto a la precipitación, se utilizará como referencia la estación meteorológica de Totoracocha, la cual registra un valor promedio anual de 551.14 mm, detallado en la **Tabla 50** del citado estudio

Tabla 50

Precipitación promedio mensual anual

| Estación | PRECIPITACIÓN PROMEDIO MENSUAL ANUAL | | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| P (mm) | | | | | | | | | | | | |
| Narancay | 65,38 | 44,14 | 156,6 | 97,77 | 63,4 | 57,25 | 25,71 | 11,23 | 43,71 | 51,67 | 52,04 | 39,14 |
| P (mm) | | | | | | | | | | | | |
| Huizhil | 74,05 | 47,45 | 159,3 | 99,78 | 71,89 | 59,54 | 25,4 | 11,56 | 40,13 | 55,85 | 60,61 | 40,95 |
| P (mm) | | | | | | | | | | | | |
| Totoracocha | 60,19 | 22,82 | 113,3 | 86,29 | 44,35 | 33,72 | 14,24 | 10,43 | 27,79 | 51,62 | 43,72 | 42,7 |
| P (mm) EI | | | | | | | | | | | | |
| Valle | 70,69 | 24,29 | 140,9 | 78,69 | 56,41 | 43,75 | 13,77 | 14,16 | 26,42 | 51,54 | 45,79 | 52,73 |
| P (mm) | | | | | | | | | | | | |
| Ricaurte | 50,16 | 30,54 | 150,3 | 89,22 | 48,47 | 41,65 | 18,87 | 8,99 | 30,53 | 62,55 | 46,95 | 73,3 |
| P (mm) | | | | | | | | | | | | |
| Challuabamba | 47,84 | 34,33 | 126,3 | 84,32 | 44,4 | 42,88 | 14,3 | 9,19 | 30,56 | 53,64 | 46,12 | 70,08 |

Nota. Recuperado de: (Genovez Muñoz, 2018)

Para la estimación del valor de CBR de la subrasante, se toma como referencia la tesis de Arévalo Toledo & Cabrera Cabrera (2022), que tiene como título “Correlación de CBR aplicando el cono dinámico en campo, el CBR de laboratorio y CBR in situ, de subrasantes naturales en la ciudad de Cuenca”. En dicho estudio se reportan valores de CBR para diversas zonas de Cuenca: en el sector San Sebastián, entre 1.64 y 1.75; en Sucre, entre 3.65 y 3.70; en

Narancay, entre 1.00 y 1.15; en Totoracocha, entre 8.30 y 8.40; y en El Vecino, entre 6.80 y 7.20.

Considerando los resultados obtenidos en estas zonas y con base en condiciones representativas para el área de estudio, se adopta un valor de CBR subrasante igual a 6, para el presente análisis.

3.3.2. Según la normativa AASHTO

- Nivel de Confiabilidad (R%), en base a la Tabla 9, obtenida de la AASHTO, se tomará como valor para el diseño del pavimento un R de 80%.
- Desviación normal estándar (Z_r), en base a la Tabla 10, obtenida de la AASHTO, se tomará el valor Z_r de -0,841.
- Error normal combinado (S_o), en base a la Tabla 11, obtenida de la AASHTO, se asumirá un proyecto de pavimento de contrición nueva, por lo tanto, el valor será S_o de 0,45.
- Pérdida de serviciabilidad (ΔIPS), AASTHO sugiere un valor ΔIPS de 2.
- Módulo de resiliencia (MR), en base a la Tabla 12, para este estudio se asumió un CBR de la subrasante de 6, por ende, la ecuación a emplearse será:

$$MR = 1500 * CBR \text{ subrasante}$$

- Coeficientes estructurales de las capas (a_i), en base a la Tabla 13, para este estudio se asumió los valores siguientes un a_1 de 0,14; un a_3 de 0,040.
Un a_2 de $((0.032 * (\%CBR \text{ de la base})^{0.32}) / 2.54)$. Los valores de CBR, irán modificándose de acuerdo al valor obtenido con la adición de cal.

- Para la obtención de los espesores de las capas del pavimento (d_i), se tomará como referencia la Tabla 14, que nos da espesores mínimos recomendados por la AASHTO.
- Coeficiente de drenaje (m_i), en base a la Tabla 15, obtenida de AASHTO, para este estudio se asume un buen drenaje, con un 15% en el que nuestro pavimento se encontrará expuesta a la humedad, los coeficientes serán para m_2 de 1 y m_3 de 1.

3.3.3. Según la normativa INVIAS

- Nivel de Confiabilidad ($R\%$), INVIAS asume un valor de 90%.
- Desviación normal estándar (Z_r), en base a la Tabla 10, se tomará un Z_r de -1,282.
- Error normal combinado (S_o), INVIAS asume un valor S_o de 0,44.
- Perdida de serviciabilidad (ΔIPS), INVIAS sugiere un valor ΔIPS de 2,2.
- Módulo de resiliencia (MR), INVIAS proporciona la Ecuación 4, para obtener este valor.
- Coeficientes estructurales de las capas (a_i), en la metodología INVIAS, no se establecen rangos de valores del coeficiente estructural de capa, en función directa del CBR del material. En su lugar, la normativa proporciona valores estandarizados para los coeficientes estructurales de las distintas capas del pavimento. Estos valores han sido definidos previamente por la metodología y pueden consultarse en la Tabla 17, a continuación, se detallan dichos valores, para las capas asfáltica a_1 de 0,37, base a_2 de 0,14 y subbase a_3 de 0,12.
- Para la determinación de los espesores de las capas del pavimento flexible (d_i), el método INVIAS no establece valores específicos, sino que estos deben definirse previamente por el proyectista, generalmente de forma estimada o con base en experiencias previas. Es

importante respetar la jerarquía estructural del sistema, en la cual el espesor de la carpeta asfáltica (d_1) debe ser menor que el de la base granular (d_2), y este, a su vez, menor o igual al de la subbase (d_3).

- El coeficiente de drenaje (m_i), se asigna en función de la precipitación por año, tomando como referencia la Tabla 16, cabe mencionar que el método de diseño INVIAS, no tiene varios coeficientes de drenaje en función de la precipitación, como si lo tiene el otro método. Los coeficientes de drenaje que se emplearan en este diseño son m_2 de 1 y un m_3 de 1.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se analizará los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio de suelos del CIITT, con las bases granulares de las empresas mineras Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul. Según lo dispuesto en la especificación técnica del Ministerio de Obras Públicas del Ecuador y Comunicaciones.

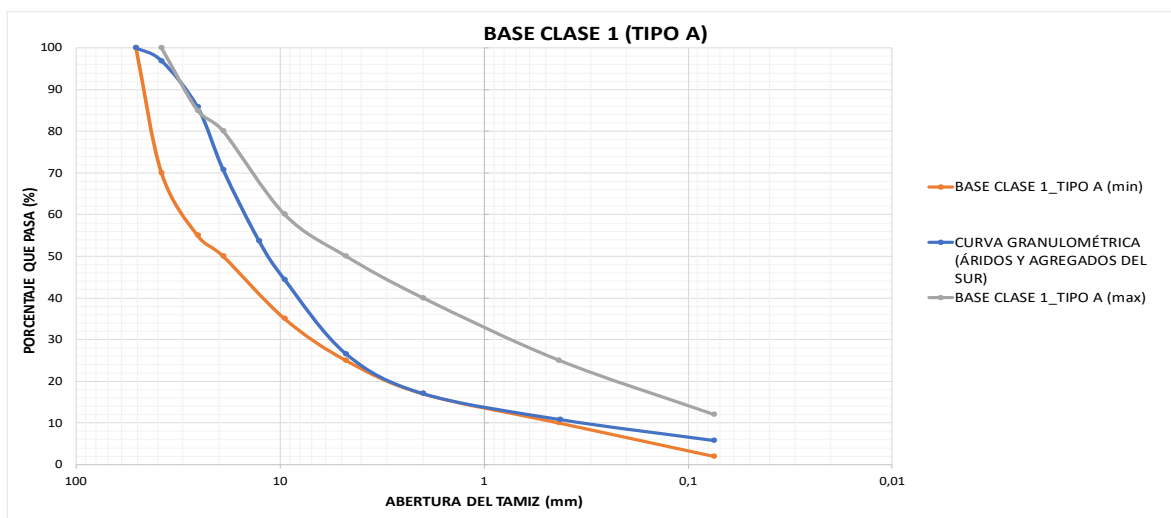
4.1. Análisis de las Bases granulares

4.1.1. Tipo de bases granulares en función de la curva granulométrica

- Curva granulométrica de la base de Áridos y Agregados del Sur

Figura 35

Verificación del cumplimiento granulométrico de la base granular de la minera Áridos y Agregados del Sur según especificaciones de la Base



Nota. Fuente (Autor)

La clasificación del material de base granular proveniente de la minera Áridos y Agregados del Sur se realizó mediante el análisis de su franja granulométrica, lo que permitió obtener los resultados presentados en la **Figura 35**.

La curva granulométrica presenta una tendencia hacia una ligera proporción de gravas. Esto se observa especialmente en la zona de los tamices de material grueso, como el tamiz 2 in (50,8 mm), 1 ½ in (38,1 mm) y 1 in (25.4 mm), donde la curva se aproxima e incluso intercepta la franja máxima establecida por el MOP.

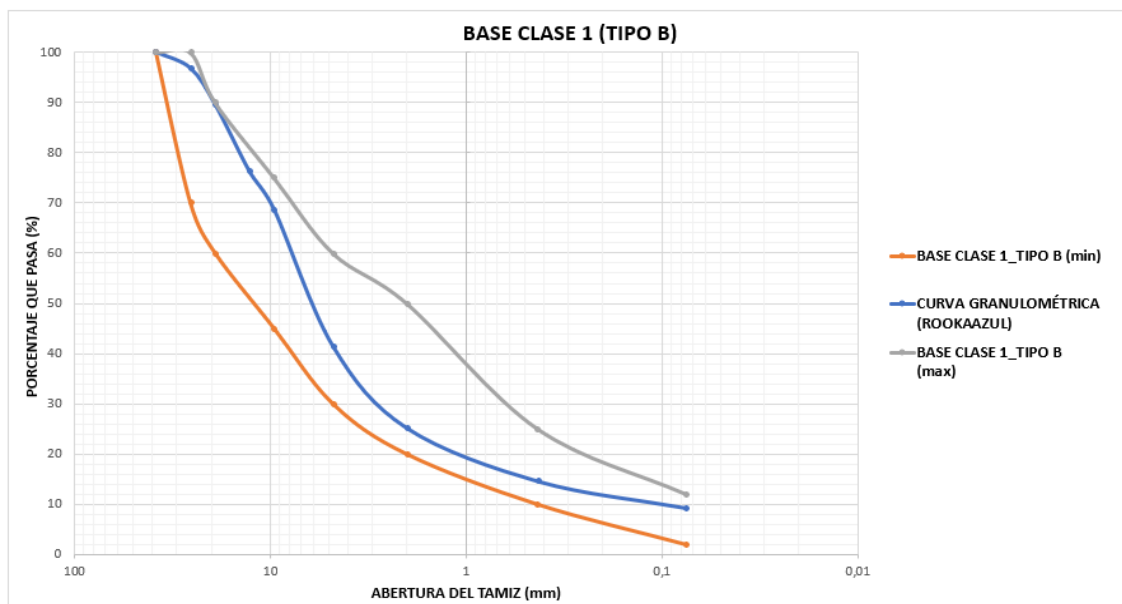
En el rango intermedio correspondiente a los tamices ½ in (12.7 mm), ¾ in (9,52 mm) y N° 4 (4,76 mm), la curva desciende y tiende hacia la franja inferior. Finalmente, en la zona de material fino, correspondiente a los tamices N° 10 (2 mm), N° 40 (0,42 mm) y N° 200 (0,074 mm), se puede evidenciar que la curva granulométrica se acerca e intercepta al límite inferior de la franja.

De acuerdo con lo establecido en la especificación técnica MOP, se verifica que el material granular proveniente de la cantera Áridos y Agregados del Sur, cumple con los requisitos técnicos correspondientes a una base granular Clase 1, Tipo A.

- **Curva granulométrica de la base de la minera Rookaazul**

Figura 36

Verificación del cumplimiento granulométrico de la base granular de la minera Rookaazul según especificaciones de la Base



Nota. Fuente (Autor)

La clasificación del material de base granular proveniente de la minera Rookaazul, se realizó mediante el análisis de su franja granulométrica, lo que permitió obtener los resultados presentados en la **Figura 36**.

En los tamices más gruesos, 2 in (50.8 mm), 1½ in (38.1 mm) y 1 in (25.4 mm), de la curva granulométrica, se evidencia una ligera presencia de gravas, además se puede observar, que la curva granulométrica se intercepta con la franja superior. De acuerdo con lo establecido en la especificación técnica MOP, se verifica que el material granular proveniente de la cantera Rookaazul, cumple con los requisitos técnicos correspondientes a una base granular Clase 1, Tipo B.

4.1.2. Límite líquido de las bases granulares

Según la especificación técnica MOP, el límite líquido (LL) del material granular debe ser inferior a 25. La **Tabla 51**, presenta los valores obtenidos de las bases granulares en estado natural de las empresas mineras Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, los cuales se encuentran por debajo de dicho umbral, lo que indica que ambos materiales granulares cumplen con lo establecido en la mencionada especificación.

Tabla 51

Verificación del cumplimiento del LL de las bases granulares.

| Límite Líquido (Estado Natural) | | |
|--|--|-------------|
| MOP | Base | menor de 25 |
| Estudiada | Base granular (Áridos y Agregados del Sur) | 24,8 |
| | Base granular (Rookaazul) | 21,9 |

Nota. *Fuente* (Autor)

4.1.3. Índice Plástico de las bases granulares

Conforme a la especificación técnica MOP, el índice plástico (IP) del material granular debe ser menor a 6. En la **Tabla 52**, se presentan los valores obtenidos para las bases granulares en estado natural provenientes de las empresas mineras Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, los cuales están por debajo de lo establecido, lo que confirma que ambos materiales cumplen con este requisito técnico.

Tabla 52

Verificación del cumplimiento del IP de las bases granulares.

| Índice Plástico (Estado Natural) | | |
|---|--|------------|
| MOP | Base | manor de 6 |
| Estudiada | Base granular (Áridos y Agregados del Sur) | 4,19 |
| | Base granular (Rookaazul) | 3,45 |

Nota. *Fuente* (Autor)

4.1.4. Porcentajes de desgaste por abrasión de las bases granulares

De acuerdo con la especificación técnica MOP, el porcentaje de desgaste por abrasión en materiales granulares debe ser inferior al 40 %. La **Tabla 53**, muestra los resultados obtenidos para las bases granulares en estado natural de las empresas mineras Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul, cuyos valores se encuentran dentro del límite permitido, lo que indica que ambos materiales satisfacen este criterio técnico.

Tabla 53

Verificación del cumplimiento del porcentaje de desgaste por abrasión de las bases granulares.

| Porcentaje de desgaste por Abrasión | | |
|--|--|---------------|
| MOP | Base | menor del 40% |
| Estudiada | Base granular (Áridos y Agregados del Sur) | 17,37% |
| | Base granular (Rookaazul) | 15,79% |

Nota. *Fuente* (Autor)

4.1.5. CBR de las bases granulares

Conforme a la especificación técnica MOP, el valor del CBR para materiales granulares destinados a capas de base debe ser mayor o igual al 80 %. La **Tabla 54**, presenta los resultados obtenidos para las bases granulares en estado natural de las empresas mineras Áridos y

Agregados del Sur y Rookaazul, cuyos valores se encuentran dentro del rango exigido, lo que indica que ambos materiales cumplen con este requisito técnico.

Tabla 54

Verificación de los valores del CBR de las bases granulares.

| CBR (Estado Natural) | | |
|-----------------------------|--|-----------------------------|
| MOP | Base | mayor o igual al 80% |
| Estudiada | Base granular (Áridos y Agregados del Sur) | 86% |
| | Base granular (Rookaazul) | 90% |

Nota. Fuente (Autor)

A partir de los ensayos realizados como granulometría, límite líquido, índice plástico, abrasión y CBR, se evidencia que las bases granulares evaluadas cumplen los lineamientos dispuesto por la especificación técnica MOP. En función de los resultados obtenidos, se concluye que el material proveniente de la minera Áridos y Agregados del Sur se clasifica como una base granular Clase 1, Tipo A, mientras que el material de la minera Rookaazul corresponde a una base granular Clase 1, Tipo B.

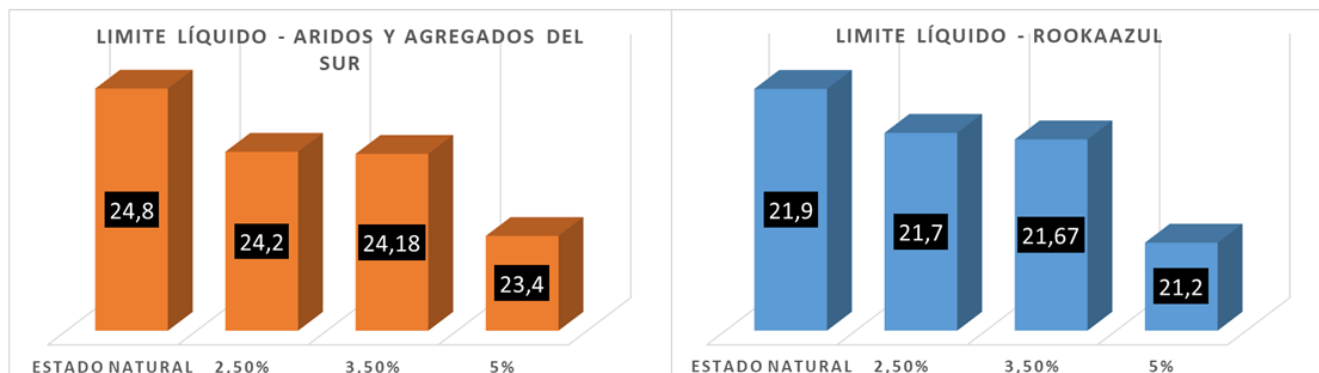
4.2. Efecto de la adición de cal en los valores de los Límites de Atterberg

4.2.1. Efecto de la adición de cal sobre el Límite Líquido (LL)

En la **Figura 37**, se observa una ligera disminución del límite líquido al estabilizar los materiales con diferentes porcentajes de cal, tanto para bases de la minera Áridos y Agregados del Sur como para la minera Rookaazul. De acuerdo con la especificación técnica MOP, del Ministerio de Obras Públicas del Ecuador, el límite líquido (LL) de un material granular debe ser inferior a 25, condición que se sigue cumpliendo tras la el mejoramiento de las bases.

Figura 37

Comparación de los Límites líquidos con la adición de Cal



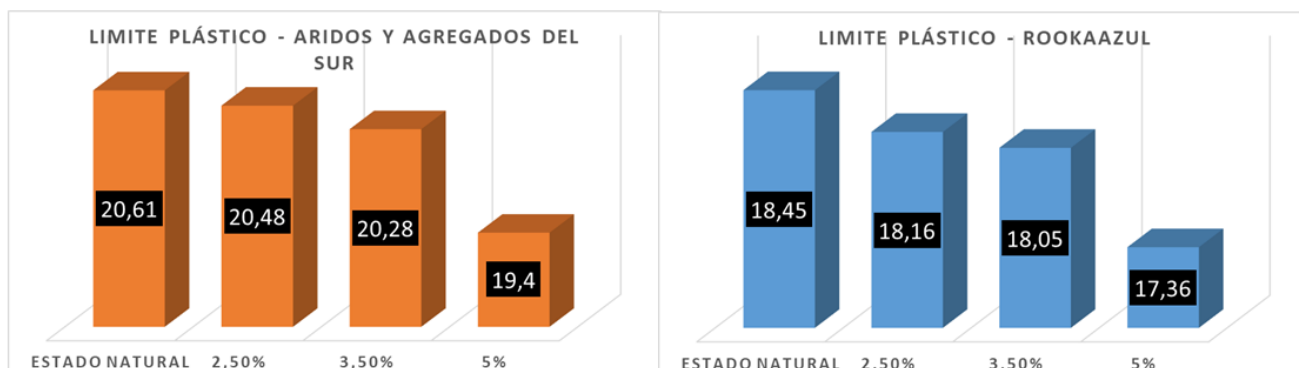
Nota. *Fuente* (Autor)

4.2.2. Efecto de la adición de cal sobre el Límite Plástico (LP)

En la **Figura 38**, se puede observar que al añadir cal a los materiales granulares, el límite plástico tiende a disminuir ligeramente. Este comportamiento se presenta tanto en la base de la minera Áridos y Agregados del Sur como en la de Rookaazul. Esta reducción sugiere que la cal ayuda a disminuir la plasticidad del material, lo cual es beneficioso para mejorar su comportamiento como base en estructuras de pavimento. En términos generales, los resultados evidencian que la estabilización con cal produce mejoras significativas en las propiedades del material granular.

Figura 38

Comparación de los Límites Plástico con la adición de Cal



Nota. *Fuente* (Autor)

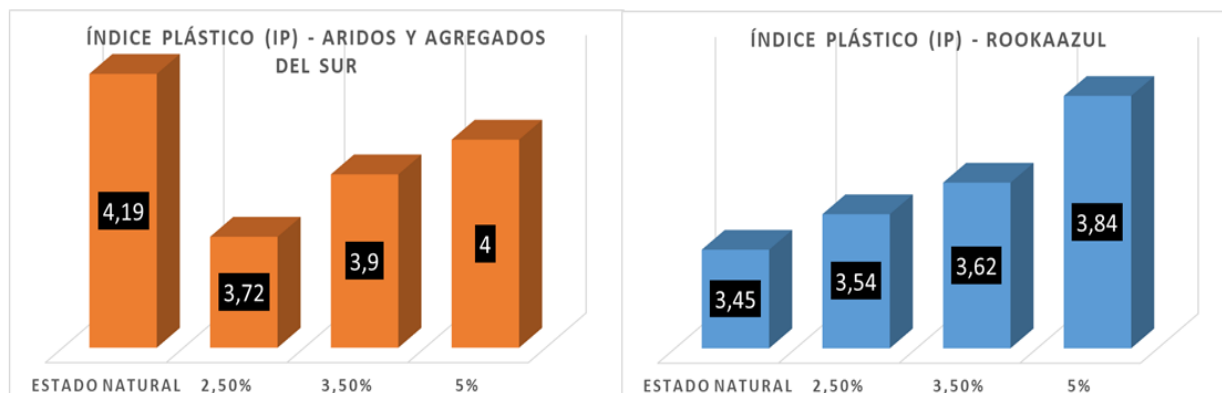
4.2.3. Efecto de la adición de cal sobre el Índice Plástico (IP)

De acuerdo con la especificación técnica MOP, el índice plástico (IP) de base granular debe ser inferior a 6. El IP del material de base granular de Áridos y Agregados del Sur en estado natural es de 4,19; mientras que el índice plástico del material estabilizado con 2,5 %, 3,5 % y 5 % de cal es de 3,72; 3,9 y 4, respectivamente, condición que cumple con lo establecido por la especificación técnica MOP.

De igual manera, el IP de la base granular de Rookaazul en estado natural es de 3,45; mientras que el índice plástico del material estabilizado con 2,5 %, 3,5 % y 5 % de cal es de 3,54; 3,62 y 3,84, respectivamente, lo cual también se encuentra dentro del límite permitido por dicha normativa. Todo lo mencionado anteriormente se puede constatar en la **Figura 39**.

Figura 39

Comparación de los Índices Plástico con la adición de Cal



Nota. Fuente (Autor)

4.3. Efecto de la adición de cal en los valores del Proctor Modificado

La **Tabla 55**, presenta los resultados del ensayo Proctor Modificado para la base granular de minera Áridos y Agregados del Sur, tanto en su estado natural como estabilizada con diferentes porcentajes de cal 2.5%, 3.5% y 5%. Se observa un incremento progresivo de la humedad óptima conforme aumenta el contenido de cal, esto se debe a que la cal consume parte del agua en la reacción química y necesita más para lubricar y compactar. En cuanto a la densidad seca máxima, esta disminuye ligeramente conforme aumento el contenido de cal, esto se explica por el aumento de la floculación y la formación de estructuras más sueltas, lo que sugiere que la adición de cal influye en la estructura del material y su capacidad de compactación.

Tabla 55

Resultados del ensayo Proctor Modificado según el aumento del porcentaje de cal.

| Proctor Modificado (Áridos y Agregados del Sur) | | |
|--|-------------------------|--|
| Material granular | % Humedad Óptima | Densidad seca máxima (kg/m³) |
| Base granular en estado natural | 10 | 2046 |
| Base granular tratada con Cal al 2,5% | 10,4 | 2025 |
| Base granular tratada con Cal al 3,5% | 11,7 | 2005 |
| Base granular tratada con Cal al 5% | 11,9 | 2004 |

Nota. *Fuente* (Autor)

La **Tabla 56**, presenta los resultados del ensayo Proctor Modificado aplicado a la base granular proveniente de la minera Rookaazul, tanto en su estado natural como estabilizada con diferentes porcentajes de cal 2.5 %, 3.5 % y 5 %. Se observa un incremento progresivo de la humedad óptima conforme se incrementa el contenido de cal. En cuanto a la densidad seca máxima, esta tiende a incrementarse ligeramente hasta un contenido de cal del 3.5 %, mostrando luego una leve disminución con el 5 %, lo que sugiere que existe un punto óptimo de mejoramiento con cal, a partir del cual el exceso de cal puede afectar negativamente la compactibilidad del material.

Tabla 56.

Resultados del ensayo Proctor Modificado según el aumento del porcentaje de cal.

| Proctor Modificado (Rookaazul) | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|
| Material granular | % Humedad Óptima | Densidad seca máxima (kg/m³) |
| Base granular en estado natural | 9 | 2152 |
| Base granular tratada con Cal al 2,5% | 9,5 | 2183 |
| Base granular tratada con Cal al 3,5% | 10 | 2181 |
| Base granular tratada con Cal al 5% | 11,8 | 2145 |

Nota. *Fuente* (Autor)

4.4. Efecto de la adición de cal en los valores del CBR

La **Tabla 57**, muestra los resultados del ensayo CBR para el material granular proveniente de la minera Áridos y Agregados del Sur, tanto en su estado natural como tratado con diferentes porcentajes de cal 2,5%, 3,5% y 5%. Se observa un incremento progresivo del valor del CBR conforme se incrementa el porcentaje de cal en la mezcla, pasando de 86 % en estado natural a 116 % con 5 % de cal, esto también se puede evidenciar en la **Figura 40**, este comportamiento indica una mejora significativa en la capacidad de soporte de la base granular. En cuanto a la densidad seca, se registra una ligera disminución conforme aumenta la dosificación de cal, lo cual es común debido a cambios en la estructura del material inducidos por el mejoramiento con la cal.

Tabla 57

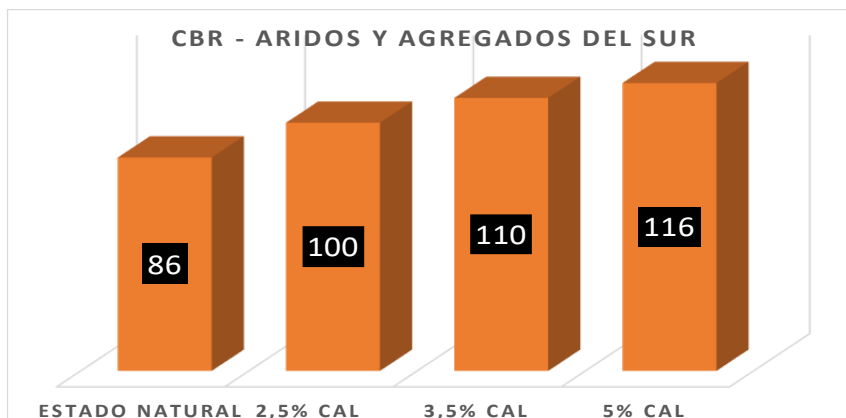
Resultados del ensayo CBR según el aumento del porcentaje de cal.

| CBR (Áridos y Agregados del Sur) | | |
|---------------------------------------|-----|------------------------------------|
| Material granular | CBR | Densidad seca (kg/m ³) |
| Base granular en estado natural | 86 | 2025,5 |
| Base granular tratada con Cal al 2,5% | 100 | 1957,4 |
| Base granular tratada con Cal al 3,5% | 110 | 1968,4 |
| Base granular tratada con Cal al 5% | 116 | 1973,15 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Figura 40

Comparación de los valores del CBR con la adición de Cal



Nota. Fuente (Autor)

La **Tabla 58**, presenta los resultados del ensayo CBR para la base granular de la mina Áridos y Agregados del Sur, tanto en su condición natural como con la incorporación de cal en proporciones del 2,5 %, 3,5 % y 5 %. Se evidencia un aumento progresivo en la resistencia del material, alcanzando un CBR de 118 % con 5 % de cal, en comparación con el 90 % registrado en su estado natural, lo cual también se refleja gráficamente en la **Figura 41**. Este comportamiento confirma una mejora sustancial en la capacidad portante del suelo tratado. Por otro lado, se observa una leve disminución en la densidad seca máxima con el incremento del contenido de cal, un fenómeno habitual atribuido a las modificaciones estructurales del material producto del proceso de mejoramiento.

Tabla 58

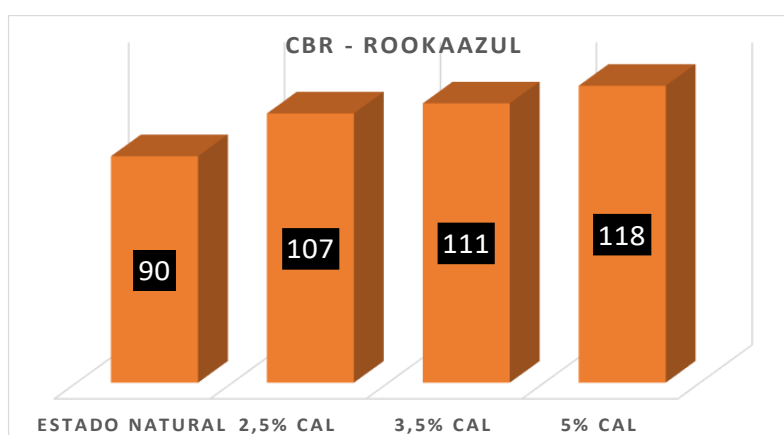
Resultados del ensayo CBR según el aumento del porcentaje de cal.

| Material granular | CBR (Rookaazul) | |
|---------------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| | CBR | Densidad seca (kg/m ³) |
| Base granular en estado natural | 90 | 2162,5 |
| Base granular tratada con Cal al 2,5% | 107 | 2134,2 |
| Base granular tratada con Cal al 3,5% | 111 | 2151,6 |
| Base granular tratada con Cal al 5% | 118 | 2190,9 |

Nota. *Fuente* (Autor)

Figura 41

Comparación de los valores del CBR con la adición de Cal



Nota. *Fuente* (Autor)

4.5. Cálculo de coeficiente estructural (a2) de las bases granulares

4.5.1. Coeficiente estructural (a2) por el método AASTHO

A través de la aplicación de la Ecuación 5, se calcularon los coeficientes estructurales correspondientes a los distintos porcentajes de cal, conforme a la ecuación del método propuesto por la AASTHO. Los resultados obtenidos para las bases granulares provenientes de las mineras Áridos y Agregados del Sur y Rookaazul se detallan en la **Tabla 59**.

Tabla 59

Coefficientes estructurales de las bases por el método AASTHO.

| Coeficiente Estructural de la Base (a2) en función del CBR de la base granular | | | | | |
|---|-----|---------------|----------------------------------|-----|---------------|
| Base granular (Áridos y Agregados del Sur) | | | Base granular (Rookaazul) | | |
| CBR | | a2 | CBR | | a2 |
| Estado natural | 86 | 0,0524 | Estado natural | 90 | 0,0532 |
| 2,5% de Cal | 100 | 0,0550 | 2,5% de Cal | 107 | 0,0562 |
| 3,5% de Cal | 110 | 0,0567 | 3,5% de Cal | 111 | 0,0569 |
| 5% de Cal | 116 | 0,0577 | 5% de Cal | 118 | 0,0580 |

Nota. *Fuente* (Autor)

4.5.2. Coeficiente estructural (a2) por el método INVÍAS

El método INVÍAS, desarrollado a partir de investigaciones y análisis del comportamiento de pavimentos en Colombia, no establece una fórmula específica que relacione el coeficiente estructural de la base granular con su valor de CBR. Por tal motivo, se adopta el valor del coeficiente estructural propuesto en la **Tabla 60**, del manual INVÍAS, cuyos valores han sido estandarizados con base en estudios realizados a nivel nacional. En la Tabla 60, se

presenta el coeficiente estructural seleccionado, el cual será utilizado para el dimensionamiento de la capa de base granular del pavimento flexible.

Tabla 60

Coefficientes estructurales de las bases por el método INVIAS.

| Coefficiente Estructural de la Base (a2) en función del CBR de la base granular | | | |
|--|--------------|----------------------------------|--------------|
| Base granular (Áridos y Agregados del Sur) | | Base granular (Rookaazul) | |
| a2 | 0,055 | a2 | 0,055 |

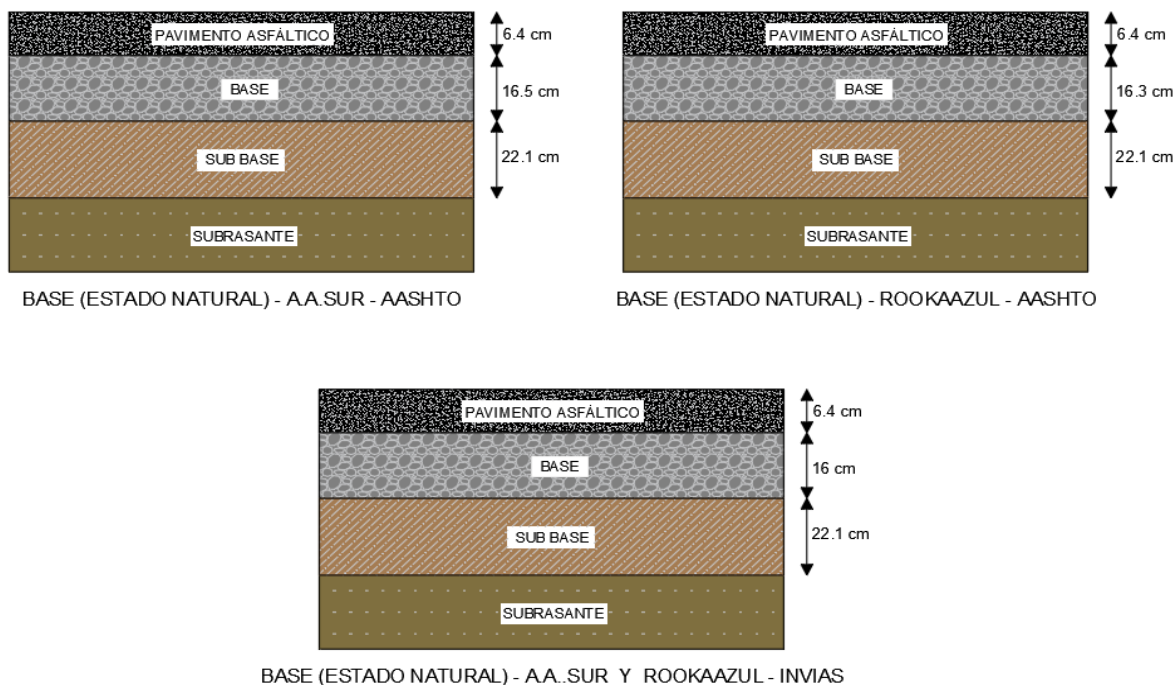
Nota. *Fuente* (Autor)

4.6. Diseño de los pavimentos flexibles por AASHTO e INVIAS, a partir de los coeficientes estructurales obtenidos de las bases granulares, para los W18 o Nt de 500000 y 1'000000.

4.6.1. Diseño del pavimento flexible, de la base en estado natural según los métodos de diseño AASHTO e INVIAS

Figura 42

Diseño de pavimentos asfálticos con bases en estado natural para un número de ejes equivalentes de 500000

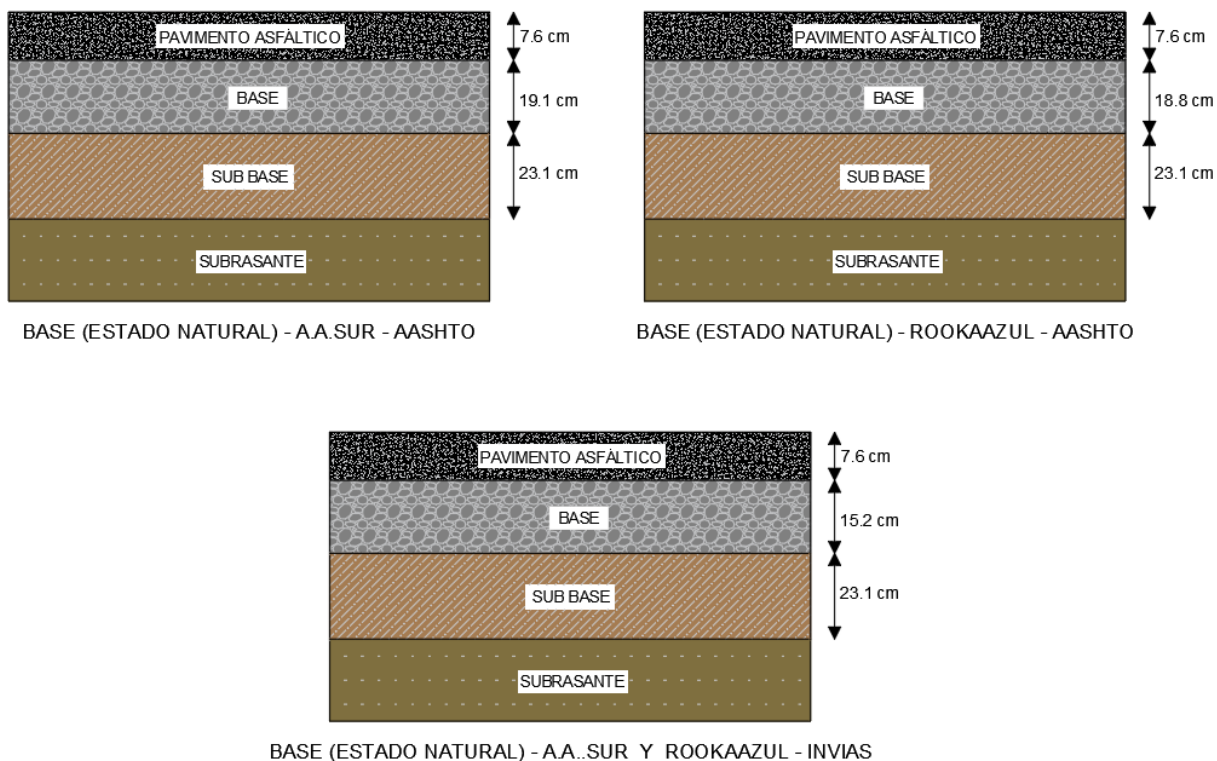


Nota. Fuente (Autor)

En la **Figura 42**, se muestran los espesores del diseño de pavimentos asfálticos con bases en estado natural para un W18 o Nt de 500000. Los espesores de las capas tanto del pavimento asfáltico y subbase, se mantienen constantes en los tres diseños, por lo que la diferencia se enfoca en el espesor de la base granular. El método AASHTO arroja espesores de base de 16,5 cm para el material de base de Áridos y Agregados del Sur y 16,3 cm para el de Rookaazul. Por su parte, el diseño INVIAS el espesor de la base es de 16 cm para los materiales de ambas mineras. Estas variaciones inciden directamente en el volumen de material necesario para la construcción, siendo INVIAS el más eficiente desde el punto de vista estructural.

Figura 43

Diseño de pavimentos asfálticos con bases en estado natural para un número de ejes equivalentes de 1'000000



Nota. Fuente (Autor)

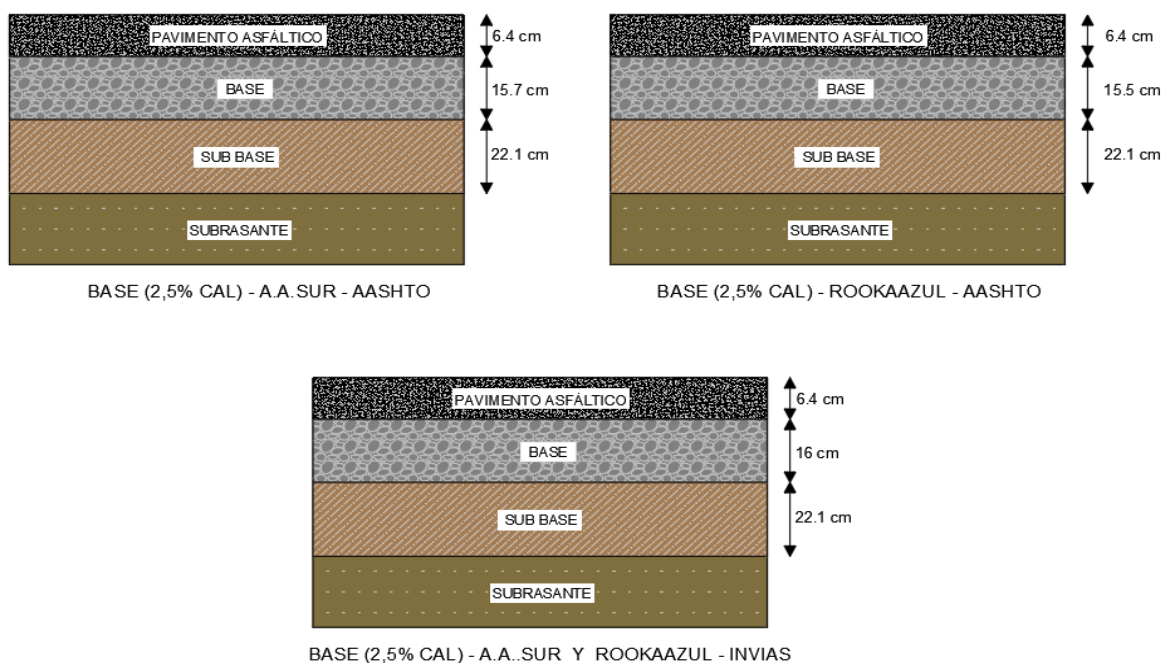
En la **Figura 43**, se presentan los diseños de pavimento asfáltico con bases en estado natural para un tránsito equivalente a un W18 o Nt de 1'000000. De igual manera los espesores de las capas tanto del pavimento asfáltico y subbase, se mantienen constantes en los tres diseños por lo que la diferencia se enfoca en el espesor de la base granular. El método AASHTO, con el material de Áridos y Agregados del Sur, requiere una base de 19,1 cm, mientras que con Rookaazul esta se reduce a 18,8 cm. En contraste, el método INVIAS propone un espesor de

15,2 cm. Estas variaciones inciden directamente en el volumen de material necesario para la construcción, siendo INVIAS el más eficiente desde el punto de vista estructural.

4.6.2. Diseño del pavimento flexible, de la base estabilizada con 2.5% de Cal, según los métodos de diseño AASHTO e INVIAS

Figura 44

Diseño de pavimentos asfálticos con bases estabilizadas con 2,5% de Cal, para un número de ejes equivalentes de 500000



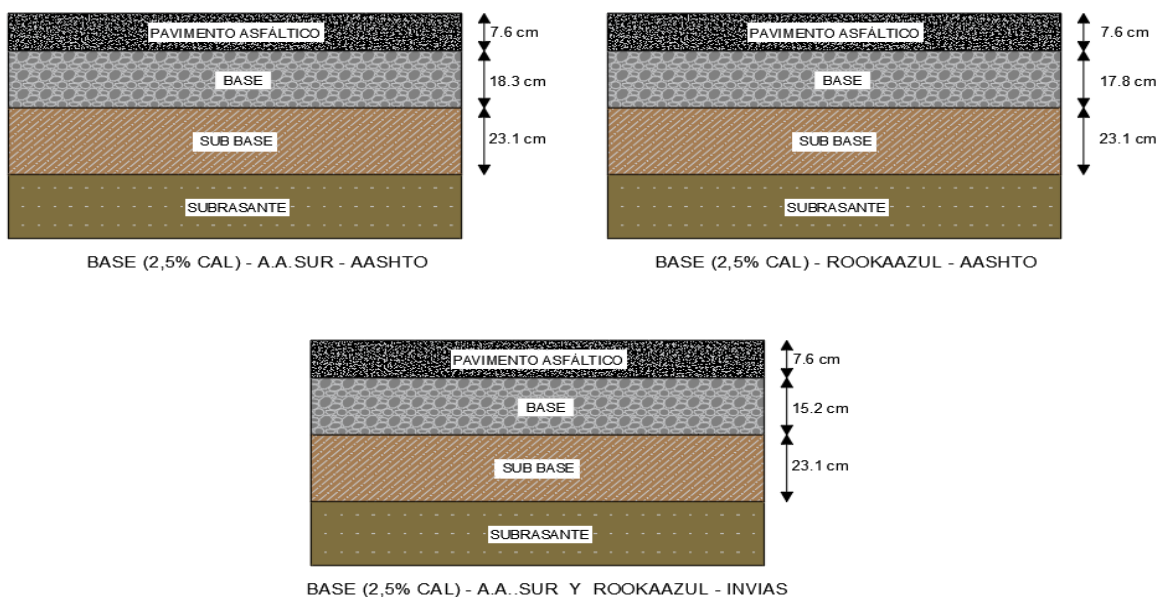
Nota. Fuente (Autor)

En la **Figura 44**, se presentan los espesores de diseño para pavimentos con bases estabilizadas con 2,5 % de cal, bajo un tránsito equivalente a un W18 o Nt 500000. De igual manera los espesores de las capas tanto del pavimento asfáltico y subbase, se mantienen

constantes en los tres diseños por lo que la diferencia se enfoca en el espesor de la base granular. Los espesores de la base granular son similares entre los tres diseños 15,7 cm con el material de Áridos y Agregados del Sur y 15,5 cm con Rookaazul, ambos mediante el método AASHTO. Por su parte, el diseño con el método INVIAS establece un espesor de 16 cm. Por lo tanto, el diseño AASHTO es el más eficiente desde el punto de vista estructural.

Figura 45

Diseño de pavimentos asfálticos con bases estabilizadas con 2,5% de Cal, para un número de ejes equivalentes de 1'000000



Nota. Fuente (Autor)

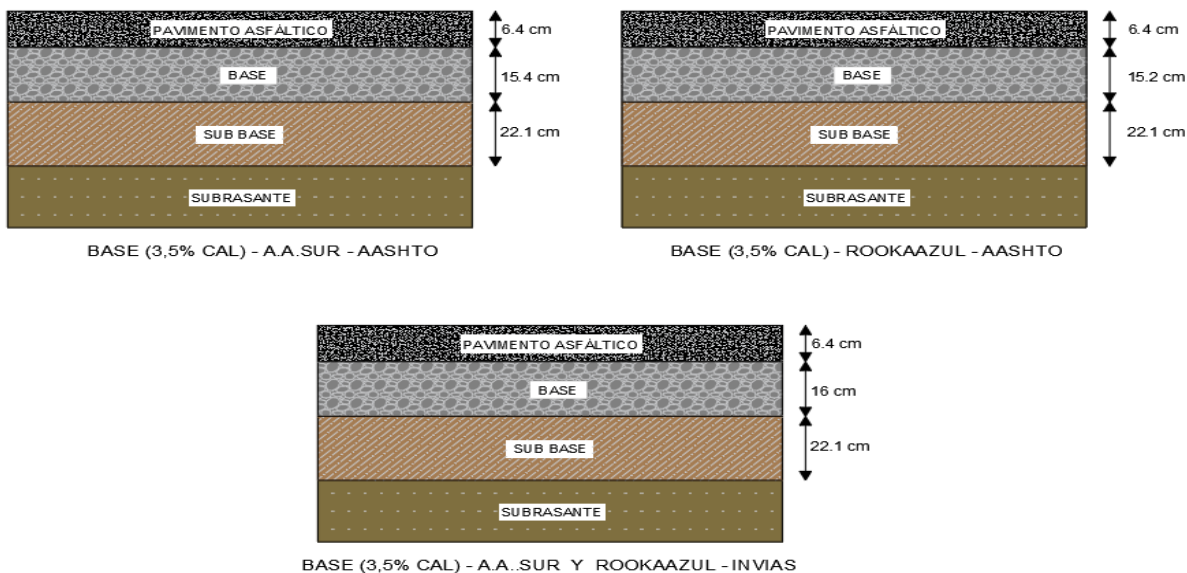
En la **Figura 45**, se presentan los espesores de diseño para pavimentos con bases estabilizadas con 2,5 % de cal, bajo un tránsito equivalente un W18 o Nt de 1'000000. De igual manera los espesores de las capas tanto del pavimento asfáltico y subbase, se mantienen

constantes en los tres diseños por lo que la diferencia se enfoca en el espesor de la base granular. Los diseños AASHTO presentan espesores de base de 18,3 cm para Áridos y Agregados del Sur y 17,8 cm para Rookaazul. En contraste, el método INVIAS asigna un espesor menor de 15,2 cm para la base, manteniendo constantes las capas restantes. Esta diferencia evidencia cómo la estabilización con cal permite optimizar el diseño estructural, y resalta que el diseño INVIAS, es el más eficiente desde el punto de vista estructural.

4.6.3. Diseño del pavimento flexible, de la base estabilizada con 3.5% de Cal, según los métodos de diseño AASHTO e INVIAS

Figura 46

Diseño de pavimentos asfálticos con bases estabilizadas con 3,5% de Cal, para un número de ejes equivalentes de 500000

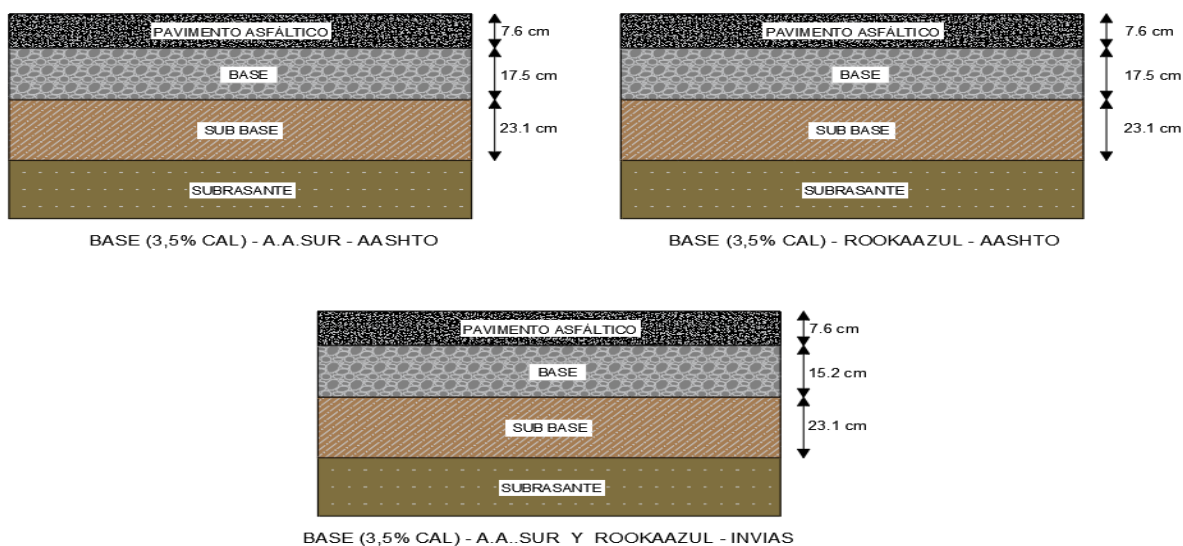


Nota. Fuente (Autor)

En la **Figura 46**, se presentan los espesores de diseño para un W18 o Nt de 500000. De igual manera los espesores de las capas tanto del pavimento asfáltico y subbase, se mantienen constantes en los tres diseños por lo que la diferencia se enfoca en el espesor de la base granular. Utilizando bases estabilizadas con 3,5 % de cal. Con el método AASHTO, los espesores de la capa base son de 15,4 cm con material de Áridos y Agregados del Sur y 15,2 cm con material de Rookaazul. En contraste, el diseño según el método INVIAS considera un espesor de 16 cm para la base, siendo este el mayor entre los tres. Estas variaciones evidencian que el diseño AASHTO, es el más eficiente desde el punto de vista estructural.

Figura 47

Diseño de pavimentos asfálticos con bases estabilizadas con 3,5% de Cal, para un número de ejes equivalentes de 1'000000



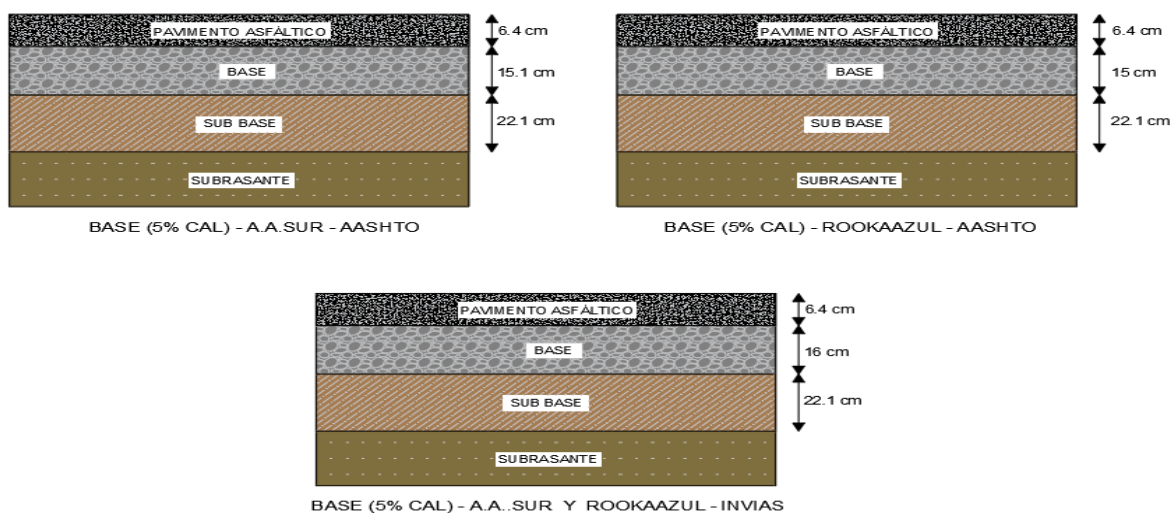
Nota. Fuente (Autor)

En la **Figura 47**, se comparan los espesores de diseño de la capa base estabilizada con 3,5 % de cal para un W18 o Nt de 1'000000. De igual manera los espesores de las capas tanto del pavimento asfáltico y subbase, se mantienen constantes en los tres diseños por lo que la diferencia se enfoca en el espesor de la base granular. Tanto el método AASHTO con material de Áridos y Agregados del Sur como con Rookaazul presentan un mismo espesor de base siendo de 17,5 cm. En contraste, el método INVIAS requiere un espesor menor de 15,2 cm. Aunque AASHTO impone una mayor base, el diseño INVIAS muestra mayor eficiencia en el uso de material, ya que reduce el espesor sin sacrificar estabilidad estructural.

4.6.4. Diseño del pavimento flexible, de la base estabilizada con 5% de Cal, según los métodos de diseño AASHTO e INVIAS

Figura 48

Diseño de pavimentos asfálticos con bases estabilizadas con 5% de Cal, para un número de ejes equivalentes de 500000

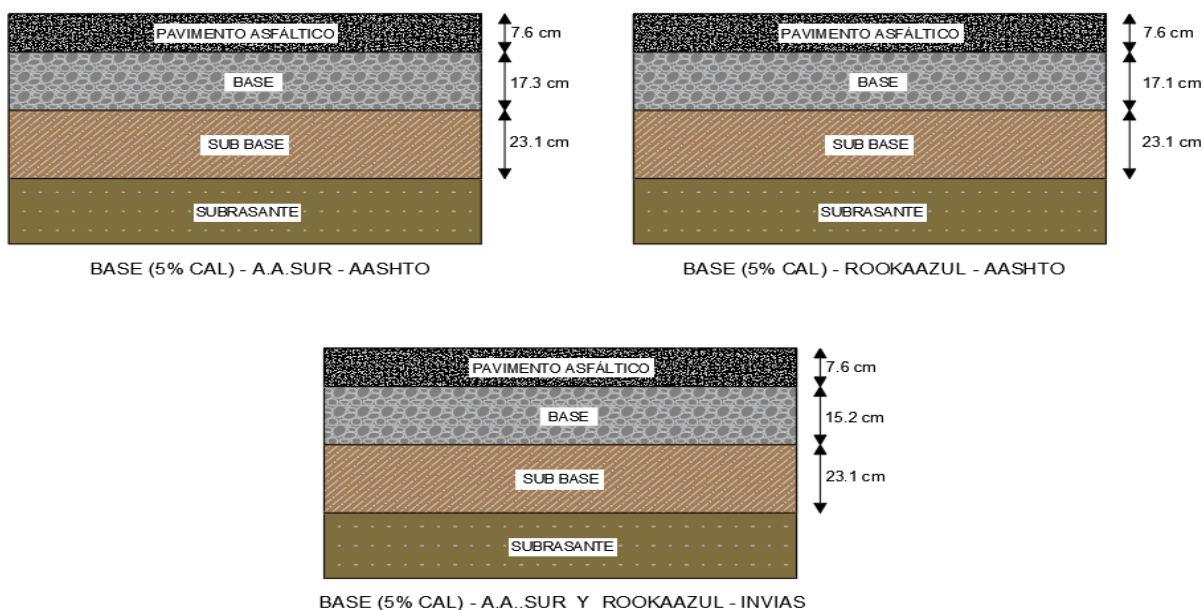


Nota. Fuente (Autor)

En la **Figura 48**, se presentan los espesores de la base para un diseño con 5 % de cal para un W18 o Nt de 500000. De igual manera los espesores de las capas tanto del pavimento asfáltico y subbase, se mantienen constantes en los tres diseños por lo que la diferencia se enfoca en el espesor de la base granular. El método AASHTO establece espesores de 15,1 cm con material de Áridos y Agregados del Sur y 15 cm con material de Rookaazul. Por su parte, el diseño con el método INVIAS mantiene un espesor mayor de 16 cm para la base. Aunque la diferencia es leve, el uso de la metodología AASHTO permite reducir ligeramente el volumen de base granular requerida, frente a INVIAS.

Figura 49

Diseño de los pavimentos asfálticos con bases estabilizadas con 5% de Cal, para un número de ejes equivalentes de 1'000000



Nota. Fuente (Autor)

En la **Figura 49**, se observan los espesores de base en diseños estabilizados con 5 % de cal para un W18 o Nt de 1'000000. De igual manera los espesores de las capas tanto del pavimento asfáltico y subbase, se mantienen constantes en los tres diseños por lo que la diferencia se enfoca en el espesor de la base granular. El método AASHTO propone espesores de 17,3 cm con material de Áridos y Agregados del Sur y 17,1 cm con Rookaazul. En comparación, el método INVÍAS mantiene un espesor mayor de 15,2 cm. Aunque INVÍAS plantea una base ligeramente más delgada, la metodología de diseño AASHTO muestra mayor eficiencia en el uso de material, ya que reduce el espesor sin sacrificar estabilidad estructural, lo que implica un beneficio económico.

- **Tabla de resultados de las bases granulares del diseño de pavimentos.**

Tabla 61

Espesores de las bases granulares por el método AASHTO e INVÍAS.

| BASES GRANURALES | ESPESORES DE LAS BASES GRANURALES (cm) | | | | | | | |
|-------------------------------|--|--------|------------|--------|---|--------|------------|--------|
| | Número de ejes equivalentes de 500000 | | | | Número de ejes equivalentes de 1'000000 | | | |
| | A.A. DEL SUR | | ROOKAAZUL | | A.A. DEL SUR | | ROOKAAZUL | |
| | METDOLOGÍA | | METDOLOGÍA | | METDOLOGÍA | | METDOLOGÍA | |
| | AASHTO | INVÍAS | AASHTO | INVÍAS | AASHTO | INVÍAS | AASHTO | INVÍAS |
| Estado Natural | 16,5 | 16 | 16,3 | 16 | 19,1 | 15,2 | 18,8 | 15,2 |
| Estabilizadas con 2,5% de Cal | 15,7 | 16 | 15,5 | 16 | 18,3 | 15,2 | 17,8 | 15,2 |
| Estabilizadas con 3,5% de Cal | 15,4 | 16 | 15,2 | 16 | 17,5 | 15,2 | 17,5 | 15,2 |
| Estabilizadas con 5% de Cal | 15,1 | 16 | 15 | 16 | 17,3 | 15,2 | 17,1 | 15,2 |

Nota. *Fuente* (Autor)

En base a la **Tabla 61**, se observa que al incorporar cal en diferentes proporciones a las bases granulares, los espesores de las capas de la base de pavimentos los pavimentos flexibles varían según el método aplicado. Con la metodología AASHTO, se evidencia que a medida que

se incrementa el porcentaje de cal, los espesores de las capas de bases tienden a reducirse para un número de ejes equivalentes de 500000 y 1'000000, lo que refleja una mejora en las propiedades mecánicas del material. Por otro lado, bajo la metodología INVIAS, los espesores de las capas de base permanecen constantes para ambos números de ejes equivalentes, debido a que esta metodología asigna coeficientes estructurales fijos, definidos directamente por la normativa.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La base granular de Áridos y Agregados del Sur se clasifica como Clase 1, Tipo A y la base de Rookaazul se clasifica como Clase 1, Tipo B.

Los análisis en laboratorio del material granular, arrojaron los siguientes valores de CBR para el material de base granular de la cantera Áridos y Agregados del Sur 86 % en estado natural, y 100 %, 110 % y 116 % al ser estabilizado con 2,5 %, 3,5 % y 5 % de cal, respectivamente. En cuanto al material de base granular de la cantera Rookaazul, los resultados fueron de 90 % en estado natural, y 107 %, 111 % y 118 % para los mismos porcentajes de estabilización. Estos resultados evidencian que, en ambos casos, el aumento del contenido de cal mejora significativamente la resistencia del material, lo que se traduce en un mejor comportamiento estructural del pavimento.

Del análisis comparativo entre los métodos de diseño AASHTO e INVIAS, se concluye que, para un número de ejes equivalentes de 500.000, la metodología INVIAS, permite obtener un espesor ligeramente menor en la capa de base, únicamente cuando se emplea base granular en estado natural, con una reducción del 2,5% en comparación con AASHTO. Sin embargo, al utilizar bases granulares estabilizadas con 2,5%, 3,5% y 5% de cal, respectivamente, el método AASHTO resulta más eficiente, al generar espesores de las capas de base más reducidos, con ahorros del 2,6%, 4,6% y 6,3% respectivamente, frente a los valores obtenidos con la metodología INVIAS.

Para un tránsito de 1.000.000 de ejes equivalentes, la metodología INVIAS permite diseñar capas de base más delgadas, tanto con base granular en estado natural como con bases estabilizadas con 2.5%, 3.5% y 5% de cal. En comparación con AASHTO, los espesores resultan hasta un 19,8% menores para la base sin estabilizar, y se reducen en un 15,8%, 13,1% y 11,6% respectivamente, para las bases estabilizadas. Esta diferencia se debe a que INVIAS emplea coeficientes estructurales constantes, lo que influye en el espesor de la base.

El uso de cal como estabilizante en las bases granulares mostró resultados positivos, ya que permitió mantener e incluso reducir los espesores del pavimento sin afectar su capacidad de soporte, las bases tratadas con cal, mejora la resistencia del material (coeficiente estructural de la base) con las bases estabilizadas con 2.5%, 3.5% y 5% de cal, mejora en un 5%, 8.2% y 10.1%, respectivamente, respecto al coeficiente estructural en estado natural, y optimiza el diseño del pavimento en lo referente a espesores.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda que en futuras investigaciones se consideren adición de diferentes materiales, como cemento, materiales bituminosos, fibras PET (tereftalato de polietileno), entre otras, con el fin de ampliar el enfoque y determinar cuál resulta el más eficiente en las bases granulares.

Se recomienda que futuros estudios incluyan el ensayo de sedimentación, con el fin de analizar la distribución de las partículas finas presentes en las bases granulares, por lo cual esto permitirá identificar más detalladamente el tipo de material predominante sean estos arcillas o

limos, lo que facilitará la selección del estabilizante más adecuado en investigaciones posteriores y permitirá evaluar cuál ofrece un mejor desempeño en la mejora del material granular.

Se recomienda continuar estudiando la adición de cal, en diferentes tipos de materiales granulares, que permita medir la variabilidad de incidencia de estas adiciones.

BIBLIOGRAFÍA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimentos* (Instituto para el Desarrollo de los Pavimentos en el Perú (IDPP), Trad.; 1993a ed.). AASHTO.
- Aguirre Mejía, V. A., & Yépez Andino, S. E. (2019). *Manual de laboratorio para los ensayos de propiedades físicas y mecánicas de los suelos*. Universidad Politécnica Salesianas.
- Arévalo Toledo, N. A., & Cabrera Cabrera, R. D. (2022). *Correlación de CBR aplicando el cono dinámico en campo, el CBR de laboratorio y CBR in situ, de subrasantes naturales en la ciudad de Cuenca*. Universidad Católica de Cuenca.
- ASTM D 4318-17. (2017). *Método de Ensayo Estándar para Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos*.
- ASTM International. (2001). *ASTM C131-01: Método de ensayo normalizado para la resistencia a la degradación de los áridos gruesos de tamaño pequeño por el método de abrasión e impacto en la Máquina Los Ángeles*. ASTM International.
- Balbuena Flores, D. A., & Clavo Rimarachin, E. Y. (2022). *Estabilización de bases granulares con cal y con cemento portland para mejorar las propiedades físico mecánicas en carreteras*. Universidad Ricardo Palma.
- Bowles, J. E. (1980). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil* (A. Arrieta G., Trad.; 2da.). Editorial McGraw-Hill Latinoamericana, S. A.

Celi Yanchapanta, K. A. (2021). *Estabilización de suelos granulares de subrasante con finos de tereftalato de polietileno (PET), polipropileno (PP) y polietileno (PE)*. Universidad Técnica de Ambato.

Das, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (J. León Cárdenas, Trad.; 4.^a). Cengage Learning Editores S.A. de C.V.

Gavilanes Bayas, E. G. (2015). *Estabilización y Mejoramiento de Sub-Rasante Mediante Cal Y Cemento Para Una Obra Vial en el Sector de Santos Pamba Barrio Colinas del Sur*. Universidad Internacional del Ecuador.

Genovez Muñoz, D. G. (2018). *Análisis de precipitaciones y elaboración de hietogramas de diseño para la ciudad de Cuenca*. Universidad del Azuay.

Gomez Huanca, C. F. (2017). *Uso y aplicaciones de las emulsiones asfálticas*. Universidad José Carlos Mariátegui.

Gomez Vallejos, S. J. (2014). *Diseño Estructural del pavimento flexible para el anillo vial del Óvalo Grau-Trujillo-La Libertad*. Universidad Privada Antenor Orrego.

Higuera Sandoval, C. H. (2011). *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras* (1era., Vol. 2). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Huanca Conde, C. J. (2018). *Guía de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos*. Universidad Mayor de San Andres.

- Instituto Nacional de Vías. (1998). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito*. Instituto Nacional de Vías.
- López Jaspe, L. A. (2020). *Interfaz de diseño de pavimento flexible según las metodologías AASHTO-93 e INVIAS para medios y altos volúmenes de tránsito*. Universidad de Pamplona.
- Malo Gutierrez, C. R. (2024). *Estudio comparativo de estructuras de pavimento convencional, pavimento sobre suelo estabilizado con cemento y pavimento reforzado con geosintéticos, del caso de estudio vía Zhidmad-Jadan*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Martínez Najar, O. V. (2014). *Estabilización de suelos con cal hidratada para uso en pavimentos rígidos en la zona oriente de la ciudad de Uruapan, Michoacán*. Universidad Don Vasco A. C.
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador. (2002). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes (MOP-001-F 2002)*. Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador.
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones del Perú (MTC). (2014). *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos (R.D. N.º 10 – 2014)*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones – Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.
- Monsalve Escobar, L. M., Giraldo Vasquez, L. C., & Maya Gaviria, J. (2012). *Diseño de pavimento flexible y rígido vía aeropuerto El Eden*. Universidad del Quindío.

- Montejo Fonseca, A., Montejo Piratova, A., & Montejo Piratova, A. (2018). *Estabilización de suelos* (Primera).
- Moreira, F. (2018). *Pavimentos*.
- National Lime Association. (2004). *Manual de estabilización de suelo tratado con cal: Estabilización y modificación con cal* (Español (traducción publicada en 2006), Trad.).
- Pacheco Rodríguez, C. M. (2018). *Coefficientes estructurales de materiales granulares utilizados en la Ciudad de Cuenca*. Universidad Católica de Cuenca.
- Pilamunga Pandi, G. P. (2023). *Plan de conservación para la estructura del pavimento de la vía que conecta la comunidad San Francisco-Santa Lucía Centro en el tramo de la abscisa 0+000 hasta 4+760 del cantón Tisaleo, provincia de Tungurahua*. Universidad Técnica de Ambato.
- Pineda Rodríguez, A., & Riaño Gaitán, F. (2019). *Estudio de una mezcla de base granular con cemento y Solid Soil para una resistencia a la compresión de 2.5 MPa*. Universidad Católica de Colombia.
- Ramírez Rojas, M. I. (2008). *La sostenibilidad de la explotación de materiales de construcción en el Valle de Aburrá*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ramos Silva, L. H. (2013). *Análisis de la estructura y del diseño geométrico de la vía Piatúa 4 de Agosto, hasta San Juan de Piatúa del Cantón Santa Clara, provincia de Pastaza para mejorar el tráfico vehicular y fomentar la producción agrícola*. Universidad Técnica de Ambato.

Tepán Vele, X. J. (2022). *Evaluación de la Capacidad Resistente (CBR) en Bases Granulares de materiales procedentes del Rio Paute*. Universidad de Cuenca.

Torres Espinoza, M. (2010). *Pavimentos de Carreteras*.

Vanegas Jáuregui, V. S., & Wilches Aguilar, S. M. (2023). *Caracterización físico-mecánica y propuestas de estabilización del material extraído de las minas la virginia y llatcón, pertenecientes a la prefectura del Azuay*. Universidad Católica de Cuenca.

ANEXOS

Anexo 1

Ensayo Granulométrico en el Laboratorio de Suelos CIITT.



Anexo 2

Ensayo Límites de Atterberg en el Laboratorio de Suelos CIITT.



Anexo 3

Ensayo de Compactación (Proctor Modificado) en el Laboratorio de Suelos CIITT.



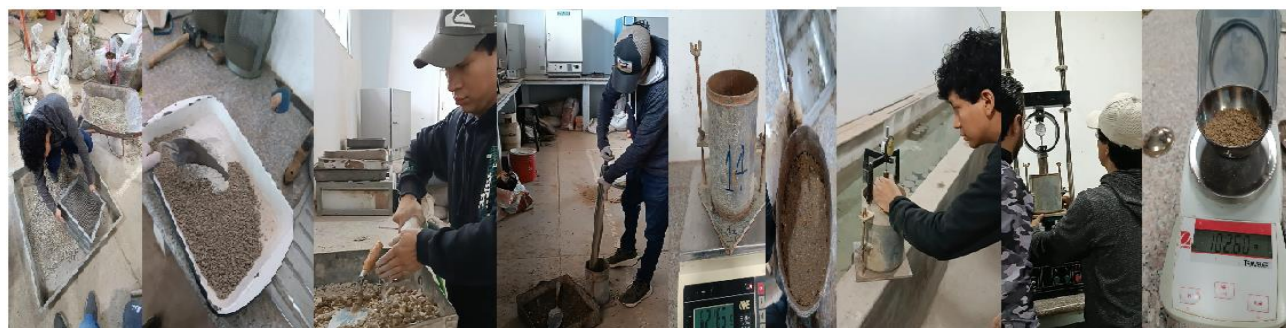
Anexo 4

Ensayo de Abrasión (Máquina de Los Ángeles) en el Laboratorio de Suelos CIITT.



Anexo 5

Ensayo CBR en el Laboratorio de Suelos CIITT.



Anexo 6

Adquisición y tendido del material granular.



Anexo 7


Datos del ensayo Granulométrico en el Laboratorio de Suelos CIITT.

| U ^o | | Universidad Católica de Cuenca | | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL | | | | LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | | |
|---------------------------------------|---------------|--------------------------------|------------------------------|---|--------|--|--|--|--|--|--|
| ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS SUELOS | | | | | | | | | | | |
| PROYECTO: | | Tesis | | | | | | | | | |
| MUESTRA: | | A.A. CUY | | | | | | | | | |
| SOLICITADO POR: | | | | | | | | | | | |
| FECHA: | | | | | | | | | | | |
| TAMIZ Nº | ABERTURA (mm) | PESO RETENIDO (gramos) | PESO RET. ACUMULADO (gramos) | % RETENIDO | % PASA | ESPECIFICACIONES NORMA LÍMITE SUPERIOR | ESPECIFICACIONES NORMA LÍMITE INFERIOR | | | | |
| 3" | 76.2 | 0 | 0 | 0 | 100 | | | | | | |
| 2 1/2" | 63.5 | 0 | 0 | 0 | 100 | | | | | | |
| 2" | 50.8 | 0 | 0 | 0 | 100 | | | | | | |
| 1 1/2" | 38.1 | 235,4 | 235,4 | 3,10 | 96,9 | | | | | | |
| 1" | 25.4 | 985 | 1260,4 | 14,18 | 85,82 | | | | | | |
| 3/4" | 19.1 | 1342,5 | 2602,9 | 29,28 | 70,72 | | | | | | |
| 1/2" | 12.7 | 1514 | 4116,9 | 46,31 | 53,69 | | | | | | |
| 3/8" | 9.52 | 830,5 | 4947,4 | 55,65 | 44,35 | | | | | | |
| Nº4 | 4.76 | 1583 | 6530 | 73,46 | 26,54 | | | | | | |
| PASA Nº4 (Fondo) | | 2330 | | | | | | | | | |
| 10 | 2 | 239,7 | 239,7 | 82,49 | 17,51 | | | | | | |
| 40 | 0.42 | 183,1 | 41280 | 89,23 | 10,77 | | | | | | |
| 200 | 0.074 | 143,6 | 610,4 | 94,26 | 5,74 | | | | | | |
| FONDO | | 1,5 | | | | | | | | | |
| TOTAL | | | | | | | | | | | |
| Peso antes del ensayo (gramos) = | | 9269 | | Peso húmedo antes del lavado (gramos) = | | 798 | | | | | |
| Peso después del ensayo (gramos) = | | 9260,4 | | Peso seco antes del lavado (gramos) = | | 778,67 | | | | | |
| % Humedad = | | 2,43 | | Peso seco después del lavado (gramos) = | | 611,90 | | | | | |


| U ^o | | Universidad Católica de Cuenca | | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL | | | | LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | | |
|---------------------------------------|---------------|--------------------------------|------------------------------|---|--------|--|--|--|--|--|--|
| ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS SUELOS | | | | | | | | | | | |
| PROYECTO: | | Tesis | | | | | | | | | |
| MUESTRA: | | RANRAN 201 | | | | | | | | | |
| SOLICITADO POR: | | | | | | | | | | | |
| FECHA: | | | | | | | | | | | |
| TAMIZ Nº | ABERTURA (mm) | PESO RETENIDO (gramos) | PESO RET. ACUMULADO (gramos) | % RETENIDO | % PASA | ESPECIFICACIONES NORMA LÍMITE SUPERIOR | ESPECIFICACIONES NORMA LÍMITE INFERIOR | | | | |
| 3" | 76.2 | 0 | 0 | 0% | 100% | | | | | | |
| 2 1/2" | 63.5 | 0 | 0 | 0% | 100% | | | | | | |
| 2" | 50.8 | 0 | 0 | 0% | 100% | | | | | | |
| 1 1/2" | 38.1 | 0 | 0 | 0% | 100% | | | | | | |
| 1" | 25.4 | 251 | 251 | 3,48 | 96,52 | | | | | | |
| 3/4" | 19.1 | 571,5 | 822,5 | 10,41 | 89,59 | | | | | | |
| 1/2" | 12.7 | 1052 | 1874,5 | 23,32 | 76,68 | | | | | | |
| 3/8" | 9.52 | 579,5 | 2434 | 31,31 | 68,69 | | | | | | |
| Nº4 | 4.76 | 2149 | 4623 | 58,50 | 41,50 | | | | | | |
| PASA Nº4 (Fondo) | | 3341 | | | | | | | | | |
| 10 | 2 | 265,2 | 265,2 | 34,39 | 65,61 | | | | | | |
| 40 | 0.42 | 193,2 | 438,4 | 85,43 | 14,57 | | | | | | |
| 200 | 0.074 | 86,10 | 524,5 | 90,12 | 9,88 | | | | | | |
| FONDO | | 0,1 | | | | | | | | | |
| TOTAL | | 8483,6 | | | | | | | | | |
| Peso antes del ensayo (gramos) = | | 7968,3 | | Peso húmedo antes del lavado (gramos) = | | 684 | | | | | |
| Peso después del ensayo (gramos) = | | 7964 | | Peso seco antes del lavado (gramos) = | | 675,61 | | | | | |
| % Humedad = | | 1,23% | | Peso seco después del lavado (gramos) = | | 524,6 | | | | | |

Anexo 8


Datos del ensayo Límites de Atterberg, con bases granulares en estado natural y estabilizadas con 2.5%, 3.5% y 5% con cal, en el Laboratorio de Suelos CIIT.


|  Universidad Católica de Cuenca FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | |
|---|-------------------------|
| LÍMITES DE ATTERBERG | |
| PROYECTO: | Tesis |
| MUESTRA: | A# 501 (Estado Natural) |
| SOLICITADO POR: | |
| FECHA: | |
| LÍMITE LÍQUIDO | |
| N° Golpes | 39 |
| Recipiente N° | # A2 |
| Recipiente + M. Húmeda | 44,9 |
| Recipiente + M. Seca | 40,29 |
| Peso Recipiente | 21,09 |
| % Humedad | 24,010 |




|  Universidad Católica de Cuenca FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | |
|---|--------------------------------|
| LÍMITES DE ATTERBERG | |
| PROYECTO: | Tesis |
| MUESTRA: | Pavimentación (Estado Natural) |
| SOLICITADO POR: | |
| FECHA: | |
| LÍMITE PLÁSTICO | |
| Recipiente N° | # 21 |
| Recipiente + M. Húmeda | 8,96 |
| Recipiente + M. Seca | 8,12 |
| Peso Recipiente | 4,1 |
| % Humedad | 20,30 |



|  Universidad Católica de Cuenca FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | |
|---|--------------------------------|
| LÍMITES DE ATTERBERG | |
| PROYECTO: | Tesis |
| MUESTRA: | Pavimentación (Estado Natural) |
| SOLICITADO POR: | |
| FECHA: | |
| LÍMITE LÍQUIDO | |
| N° Golpes | 36 |
| Recipiente N° | # B10 |
| Recipiente + M. Húmeda | 18,35 |
| Recipiente + M. Seca | 17,02 |
| Peso Recipiente | 10,33 |
| % Humedad | 19,58 |


|  Universidad Católica de Cuenca FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | |
|---|--------------------------------|
| LÍMITES DE ATTERBERG | |
| PROYECTO: | Tesis |
| MUESTRA: | Pavimentación (Estado Natural) |
| SOLICITADO POR: | |
| FECHA: | |
| LÍMITE PLÁSTICO | |
| Recipiente N° | # 92 |
| Recipiente + M. Húmeda | 8,6 |
| Recipiente + M. Seca | 7,87 |
| Peso Recipiente | 4,11 |
| % Humedad | 19,44 |

| | | |
|--|---|--|
|  Universidad Católica de Cuenca | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | |
| | LÍMITES DE ATTERBERG | |
| PROYECTO: | Tesis | |
| MUESTRA: | A.A. Sur (2,5% Cal) | |
| SOLICITADO POR: | | |
| FECHA: | | |

| LÍMITE LÍQUIDO | | | | |
|------------------------|-------|--------|--------|--------|
| N° Golpes | 40 | 32 | 26 | 20 |
| Recipiente N° | #4 | #12 | #P2 | #P110 |
| Recipiente + M. Húmeda | 44,2 | 45,26 | 36,5 | 36,45 |
| Recipiente + M. Seca | 40,01 | 40,74 | 34,95 | 34,35 |
| Peso Recipiente | 24,15 | 24,13 | 12,92 | 11,75 |
| % Humedad | 23,24 | 23,049 | 23,940 | 24,747 |




| LÍMITE PLÁSTICO | | | | |
|------------------------|-------|-------|--------|-------|
| Recipiente N° | #981 | #A3 | #5 | #6 |
| Recipiente + M. Húmeda | 12,22 | 10,59 | 13,89 | 7,66 |
| Recipiente + M. Seca | 11,23 | 9,48 | 12,620 | 7,06 |
| Peso Recipiente | 6,47 | 4,09 | 6,37 | 4,09 |
| % Humedad | 20,80 | 20,59 | 20,32 | 20,20 |

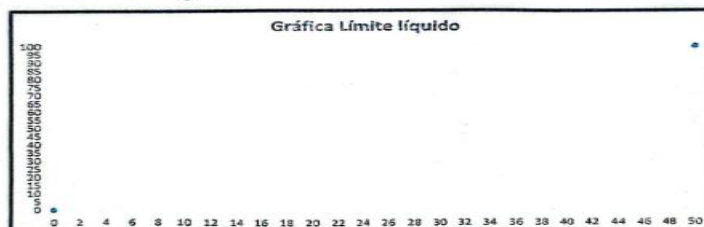
| | | |
|--|---|--|
|  Universidad Católica de Cuenca | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | |
| | LÍMITES DE ATTERBERG | |
| PROYECTO: | Tesis | |
| MUESTRA: | Rookaazul (2,5% Cal) | |
| SOLICITADO POR: | | |
| FECHA: | | |


| LÍMITE LÍQUIDO | | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| N° Golpes | 36 | 31 | 24 | 20 |
| Recipiente N° | #84 | #C8 | #D | #B2 |
| Recipiente + M. Húmeda | 42,14 | 35,55 | 30,81 | 37,84 |
| Recipiente + M. Seca | 38,77 | 33,11 | 29,08 | 34,82 |
| Peso Recipiente | 21,93 | 21,1 | 20,95 | 21,68 |
| % Humedad | 20,042 | 20,316 | 24,279 | 22,987 |




| LÍMITE PLÁSTICO | | | | |
|------------------------|-------|-------|--------|-------|
| Recipiente N° | #E6 | #P3 | #19 | #D2 |
| Recipiente + M. Húmeda | 12,4 | 13,19 | 12,44 | 15,79 |
| Recipiente + M. Seca | 12,98 | 12,78 | 12,140 | 15,37 |
| Peso Recipiente | 10,35 | 10,5 | 10,49 | 12,99 |
| % Humedad | 18,83 | 17,98 | 18,10 | 17,65 |

|  Universidad Católica de Cuenca | | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | |
|--|-------------------|--|--------|--------|
| LÍMITES DE ATTERBERG | | | | |
| PROYECTO: | Tesis | | | |
| MUESTRA: | A.A.Su (3,5% Cal) | | | |
| SOLICITADO POR: | | | | |
| FECHA: | | | | |
| LÍMITE LÍQUIDO | | | | |
| N° Golpes | 39 | 33 | 25 | 21 |
| Recipiente N° | # 89 | # 149 | # R1 | # 7 |
| Recipiente + M. Húmeda | 33,56 | 32,82 | 49,67 | 36,96 |
| Recipiente + M. Seca | 20,13 | 29,62 | 35,6 | 32,59 |
| Peso Recipiente | 14,45 | 15,31 | 14,63 | 15,17 |
| % Humedad | 51,835 | 22,362 | 24,177 | 25,086 |



|  Universidad Católica de Cuenca | | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | |
|--|----------------------|--|--------|--------|
| LÍMITES DE ATTERBERG | | | | |
| PROYECTO: | Tesis | | | |
| MUESTRA: | Rachanzul (3,5% Cal) | | | |
| SOLICITADO POR: | | | | |
| FECHA: | | | | |
| LÍMITE LÍQUIDO | | | | |
| N° Golpes | 40 | 36 | 31 | 23 |
| Recipiente N° | # 4 | # 86 | # 119 | # R1 |
| Recipiente + M. Húmeda | 27,5 | 28,97 | 26,72 | 25,25 |
| Recipiente + M. Seca | 25,35 | 26,43 | 24,71 | 23,25 |
| Peso Recipiente | 15,2 | 14,49 | 15,32 | 14,63 |
| % Humedad | 21,182 | 21,273 | 21,406 | 21,789 |



|  Universidad Católica de Cuenca | | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | |
|--|----------------------|--|--------|--------|
| LÍMITES DE ATTERBERG | | | | |
| PROYECTO: | Tesis | | | |
| MUESTRA: | Rachanzul (3,5% Cal) | | | |
| SOLICITADO POR: | | | | |
| FECHA: | | | | |
| LÍMITE LÍQUIDO | | | | |
| N° Golpes | 40 | 36 | 31 | 23 |
| Recipiente N° | # 4 | # 86 | # 119 | # R1 |
| Recipiente + M. Húmeda | 27,5 | 28,97 | 26,72 | 25,25 |
| Recipiente + M. Seca | 25,35 | 26,43 | 24,71 | 23,25 |
| Peso Recipiente | 15,2 | 14,49 | 15,32 | 14,63 |
| % Humedad | 21,182 | 21,273 | 21,406 | 21,789 |

|  Universidad Católica de Cuenca | | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | |
|--|-------|--|-------|-------|
| LÍMITE PLÁSTICO | | | | |
| Recipiente N° | # 5 | # 6 | # 44 | # 90 |
| Recipiente + M. Húmeda | 10,39 | 8,44 | 9,29 | 7,82 |
| Recipiente + M. Seca | 9,79 | 7,76 | 8,480 | 7,26 |
| Peso Recipiente | 6,54 | 4,07 | 4,01 | 4 |
| % Humedad | 18,46 | 18,13 | 18,12 | 17,18 |

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

LÍMITES DE ATTERBERG

PROYECTO: Tesis
 MUESTRA: AA Sur (5% Cal)
 SOLICITADO POR: _____
 FECHA: _____

LÍMITE LÍQUIDO

| | | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| N° Golpes | 38 | 31 | 29 | 24 |
| Recipiente N° | #84 | #D | #A | #E |
| Recipiente + M. Húmeda | 36,59 | 36,62 | 43,29 | 39,64 |
| Recipiente + M. Seca | 34,04 | 33,78 | 35,14 | 36,13 |
| Peso Recipiente | 21,93 | 20,95 | 21,08 | 21,11 |
| % Humedad | 24,051 | 22,136 | 22,939 | 23,369 |



LÍMITE PLÁSTICO

| | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Recipiente N° | #7 | #PA1 | #F7 | #2 |
| Recipiente + M. Húmeda | 13,82 | 13,45 | 14,44 | 13,66 |
| Recipiente + M. Seca | 10,51 | 11,57 | 13,72 | 13,08 |
| Peso Recipiente | 10,02 | 10 | 10,02 | 10,03 |
| % Humedad | 29,18 | 19,26 | 19,14 | 19,02 |

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

LÍMITES DE ATTERBERG

PROYECTO: Tesis
 MUESTRA: ROKAAZUL (5% Cal)
 SOLICITADO POR: _____
 FECHA: _____

LÍMITE LÍQUIDO

| | | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| N° Golpes | 36 | 32 | 27 | 23 |
| Recipiente N° | #P2 | #U | #L4 | #A |
| Recipiente + M. Húmeda | 32,11 | 24,58 | 18,46 | 25,8 |
| Recipiente + M. Seca | 28,9 | 22,47 | 17,27 | 23,41 |
| Peso Recipiente | 12,92 | 12,09 | 11,56 | 12,33 |
| % Humedad | 20,088 | 20,328 | 20,841 | 21,570 |



LÍMITE PLÁSTICO

| | | | | |
|------------------------|-------|-------|--------|-------|
| Recipiente N° | #S10 | #1 | #M3 | #12X |
| Recipiente + M. Húmeda | 66,01 | 34,7 | 55,15 | 44,81 |
| Recipiente + M. Seca | 65,81 | 34,42 | 55,020 | 44,59 |
| Peso Recipiente | 64,64 | 32,78 | 54,29 | 43,53 |
| % Humedad | 17,09 | 17,07 | 17,81 | 17,46 |

Anexo 9

Datos del ensayo de Compactación (Proctor Modificado), con bases granulares en estado natural y estabilizadas con 2.5%, 3.5% y 5% con cal, en el Laboratorio de Suelos CIIT.

| FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL | |
|--|--------------------------|
| LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | |
| ENSAYO DE COMPACTACIÓN | |
| PROYECTO: | Tesis |
| MUESTRA: | A.A.SUR (ESTADO NATURAL) |
| SOLICITADO POR: | |
| FECHA: | |


| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|------------|------------|------------|------------|---|
| HUMEDAD AÑADIDA EN % | 12 | 9 | 6 | 15 | |
| AGUA AUMENTADA EN C.C | 260 | 195 | 130 | 325 | |
| NUMERO DEL MOLDE | # 6574 | # 6574 | # 6574 | # 6574 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO + SUELO HUMEDO (P1) | 11310,5 | 11139,5 | 10898,5 | 11328,5 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO (P2) | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | |
| PESO DEL SUELO HUMEDO P1 - P2 - P3 | 4,73 | 4,56 | 4,32 | 4,74 | |
| VOLUMEN DEL MOLDE SIN EL COLLARIN | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | |
| DENSIDAD HUMEDA D1-P3/V. Kg/m ³ | 2248,65 | 2167,31 | 2052,66 | 2254,36 | |

| CONTENIDO DE HUMEDAD | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|---------|-------|---------|--------|---------|-------|--------|
| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | |
| NUMERO DEL TARRO | #103 | #2 | #1 | #17 | #55 | #30 | #113 | #PE1 |
| PESO DEL TARRO + SUELO HUMEDO | 78,14 | 88,24 | 97,92 | 124,14 | 113,61 | 118,11 | 88,61 | 105,73 |
| PESO DEL TARRO + SUELO SECO | 74,47 | 82,39 | 94,61 | 119,02 | 109,9 | 108,72 | 81,76 | 98,74 |
| PESO DEL AGUA | 3,67 | 5,85 | 3,91 | 5,12 | 3,71 | 3,39 | 6,85 | 6,99 |
| PESO DEL TARRO | 35,78 | 27,01 | 44,03 | 53 | 52,7 | 52,79 | 37,11 | 44,22 |
| PESO DEL SUELO SECO | 38,69 | 57,38 | 49,98 | 66,02 | 57,2 | 55,93 | 44,65 | 54,52 |
| CONTENIDO DE AGUA EN % | 9,49 | 10,20 | 7,82 | 7,76 | 6,49 | 6,06 | 15,34 | 12,82 |
| CONTENIDO PROMEDIO DE AGUA EN % | | 9,84 | | 7,79 | | 6,27 | | 14,08 |
| DENSIDAD SECA Kg/m ³ | | 2047,20 | | 2019,69 | | 1951,49 | | 196,10 |

| FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL | |
|--|----------------------------|
| LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | |
| ENSAYO DE COMPACTACIÓN | |
| PROYECTO: | Tesis |
| MUESTRA: | ROXICAZUL (ESTADO NATURAL) |
| SOLICITADO POR: | |
| FECHA: | |


| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|------------|------------|------------|------------|---|
| HUMEDAD AÑADIDA EN % | 12 | 9 | 15 | 6 | |
| AGUA AUMENTADA EN C.C | 300 | 225 | 375 | 150 | |
| NUMERO DEL MOLDE | # 6574 | # 6574 | # 6574 | # 6574 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO + SUELO HUMEDO (P1) | 11581,5 | 11500,5 | 11583,5 | 11311,5 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO (P2) | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | |
| PESO DEL SUELO HUMEDO P1 - P2 - P3 | 4,998 | 4,917 | 5 | 4,728 | |
| VOLUMEN DEL MOLDE SIN EL COLLARIN | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | |
| DENSIDAD HUMEDA D1-P3/V. Kg/m ³ | 2377,57 | 2339,04 | 2378,52 | 2249,13 | |

| CONTENIDO DE HUMEDAD | | | | | | | | |
|---------------------------------|--------|---------|-------|---------|--------|---------|-------|---------|
| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | |
| NUMERO DEL TARRO | #1 | #11 | #19 | #4 | #2 | #11 | #1 | #14 |
| PESO DEL TARRO + SUELO HUMEDO | 118,11 | 169,06 | 84,2 | 92,9 | 116,6 | 109,6 | 80,5 | 99,5 |
| PESO DEL TARRO + SUELO SECO | 109 | 158,1 | 73,46 | 89,17 | 109,04 | 109,5 | 77,64 | 97,27 |
| PESO DEL AGUA | 7,11 | 10,96 | 4,74 | 4,73 | 7,56 | 3,3 | 2,86 | 2,23 |
| PESO DEL TARRO | 43,22 | 64,71 | 29,44 | 28,05 | 53,25 | 38,41 | 32,02 | 57,71 |
| PESO DEL SUELO SECO | 65,78 | 93,39 | 50,02 | 53,12 | 56,79 | 61,64 | 47,62 | 39,56 |
| CONTENIDO DE AGUA EN % | 10,81 | 11,74 | 3,48 | 8 | 13,31 | 15,03 | 6,01 | 5,64 |
| CONTENIDO PROMEDIO DE AGUA EN % | | 11,27 | | 8,74 | | 14,17 | | 5,82 |
| DENSIDAD SECA Kg/m ³ | | 2136,71 | | 2151,07 | | 2083,32 | | 2125,40 |

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
|  Universidad Católica de Cuenca | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL | | | |
| | LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | | |
| ENSAYO DE COMPACTACIÓN | | | | |
| PROYECTO: | Tesis | | | |
| MUESTRA: | A.A.Su (2,5% Cal) | | | |
| SOLICITADO POR: | | | | |
| FECHA: | | | | |


| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|------------|------------|------------|------------|---|
| HUMEDAD AÑADIDA EN % | 12 | 9 | 15 | 18 | |
| AGUA AUMENTADA EN C.C | 280 | 195 | 325 | 390 | |
| NUMERO DEL MOLDE | # 6574 | # 6574 | # 6574 | # 6574 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO + SUELO HUMEDO (P2) | 11207,5 | 11050 | 11319,5 | 11335,5 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO (P2) | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | |
| PESO DEL SUELO HUMEDO P1 - P2 - P3 | 4,62 | 4,47 | 4,73 | 4,76 | |
| VOLUMEN DEL MOLDE SIN EL COLLARIN | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | |
| DENSIDAD HUMEDA D1-P3/V. Kg/m ³ | 2199,65 | 2124,73 | 2248,65 | 2261,97 | |

| CONTENIDO DE HUMEDAD | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|--------|---------|-------|---------|--------|---------|--------|---|
| MUESTRA | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 |
| NUMERO DEL TARRO | #A1 | #5 | #714 | #712 | #85 | #115 | #74 | #A2 | |
| PESO DEL TARRO + SUELO HUMEDO | 90,7 | 112,72 | 95,54 | 98,79 | 100,61 | 106,11 | 148,5 | 142,91 | |
| PESO DEL TARRO + SUELO SECO | 86,22 | 107,65 | 90,46 | 94,03 | 95,65 | 100,27 | 143,75 | 134,7 | |
| PESO DEL AGUA | 4,48 | 5,07 | 5,08 | 4,76 | 4,96 | 5,84 | 5,75 | 8,81 | |
| PESO DEL TARRO | 38,12 | 52,89 | 29,44 | 35,52 | 54,29 | 52,19 | 57,93 | 72,22 | |
| PESO DEL SUELO SECO | 48,74 | 54,76 | 61,02 | 58,51 | 41,36 | 48,08 | 45,82 | 41,88 | |
| CONTENIDO DE AGUA EN % | 9,38 | 9,26 | 8,33 | 8,14 | 11,99 | 12,15 | 13,55 | 21,04 | |
| CONTENIDO PROMEDIO DE AGUA EN % | 9,32 | | 8,23 | | 12,07 | | 14,50 | | |
| DENSIDAD SECA Kg/m ³ | 2012,10 | | 1963,16 | | 2006,48 | | 1975,52 | | |

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
|  Universidad Católica de Cuenca | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL | | | |
| | LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | | |
| ENSAYO DE COMPACTACIÓN | | | | |
| PROYECTO: | Tesis | | | |
| MUESTRA: | Poo. Nazul (2,5% Cal) | | | |
| SOLICITADO POR: | | | | |
| FECHA: | | | | |


| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|------------|------------|------------|------------|---|
| HUMEDAD AÑADIDA EN % | 12 | 9 | 15 | 18 | |
| AGUA AUMENTADA EN C.C | 300 | 225 | 375 | 450 | |
| NUMERO DEL MOLDE | # 6574 | # 6574 | # 6574 | # 6574 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO + SUELO HUMEDO (P2) | 11574 | 11361 | 11835,5 | 11251,5 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO (P2) | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | |
| PESO DEL SUELO HUMEDO P1 - P2 - P3 | 4,9905 | 4,7775 | 5,052 | 5,062 | |
| VOLUMEN DEL MOLDE SIN EL COLLARIN | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | |
| DENSIDAD HUMEDA D1-P3/V. Kg/m ³ | 2374 | 2279,67 | 2403,26 | 2408,01 | |

| CONTENIDO DE HUMEDAD | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---|
| MUESTRA | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 |
| NUMERO DEL TARRO | #74 | #110 | #A2 | #51 | #111 | #18 | #703 | #1 | |
| PESO DEL TARRO + SUELO HUMEDO | 97,83 | 114,99 | 92,22 | 105,82 | 121,99 | 100,59 | 91,6 | 109,7 | |
| PESO DEL TARRO + SUELO SECO | 93,52 | 109,95 | 88,57 | 101,85 | 114,34 | 94,23 | 82,5 | 102,57 | |
| PESO DEL AGUA | 4,41 | 5,04 | 3,65 | 3,77 | 7,65 | 5,56 | 9,1 | 7,13 | |
| PESO DEL TARRO | 43,96 | 52,82 | 35,7 | 43,25 | 43,41 | 40,22 | 35,78 | 25,01 | |
| PESO DEL SUELO SECO | 49,56 | 57,13 | 52,87 | 58,6 | 70,93 | 54,51 | 46,72 | 77,56 | |
| CONTENIDO DE AGUA EN % | 8,90 | 8,82 | 6,90 | 6,43 | 10,79 | 10,75 | 19,48 | 9,19 | |
| CONTENIDO PROMEDIO DE AGUA EN % | 8,86 | | 6,67 | | 10,77 | | 14,34 | | |
| DENSIDAD SECA Kg/m ³ | 2180,78 | | 2130,59 | | 2169,63 | | 2106,10 | | |

| | | |
|--|---|--|
|  Universidad Católica de Cuenca | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | |
| | ENSAYO DE COMPACTACIÓN | |
| PROYECTO: | Tesis | |
| MUESTRA: | A.A.Sue (3,5% cal) | |
| SOLICITADO POR: | | |
| FECHA: | | |


| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|------------|------------|------------|------------|---|
| HUMEDAD AÑADIDA EN % | 12 | 9 | 15 | 18 | |
| AGUA AUMENTADA EN C.C | 260 | 195 | 325 | 390 | |
| NUMERO DEL MOLDE | # 6574 | # 6574 | # 6574 | # 6574 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO + SUELO HUMEDO (P1) | 11227,5 | 10856,5 | 11308 | 11279,5 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO (P2) | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | |
| PESO DEL SUELO HUMEDO P1 - P2 - P3 | 4,644 | 4,273 | 4,7245 | 4,687 | |
| VOLUMEN DEL MOLDE SIN EL COLLARIN | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | |
| DENSIDAD HUMEDA D1-P3/V. Kg/m ³ | 2209,17 | 2032,68 | 2247,46 | 2229,62 | |

| CONTENIDO DE HUMEDAD | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|--------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---|
| MUESTRA | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 |
| NUMERO DEL TARRO | #7 | #11 | #17 | #11 | #11 | #24 | #16 | #1 | |
| PESO DEL TARRO + SUELO HUMEDO | 101,42 | 123,84 | 115,02 | 86,36 | 152,93 | 148 | 160,36 | 97,54 | |
| PESO DEL TARRO + SUELO SECO | 96,7 | 118,1 | 111 | 82,9 | 143,2 | 138,5 | 149,1 | 88,2 | |
| PESO DEL AGUA | 4,72 | 5,74 | 4,02 | 3,46 | 9,73 | 9,5 | 11,26 | 9,34 | |
| PESO DEL TARRO | 53,62 | 64,71 | 65,87 | 43,21 | 64,72 | 65,75 | 66,02 | 25,04 | |
| PESO DEL SUELO SECO | 43,03 | 53,39 | 45,13 | 39,69 | 78,48 | 73,75 | 83,08 | 63,16 | |
| CONTENIDO DE AGUA EN % | 10,97 | 10,75 | 8,91 | 8,72 | 12,40 | 13,06 | 13,55 | 14,79 | |
| CONTENIDO PROMEDIO DE AGUA EN % | 10,86 | | 8,81 | | 12,33 | | 14,17 | | |
| DENSIDAD SECA Kg/m ³ | 1992,75 | | 1868,06 | | 1993,70 | | 1952,89 | | |

| | | |
|--|---|--|
|  Universidad Católica de Cuenca | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | |
| | ENSAYO DE COMPACTACIÓN | |
| PROYECTO: | Tesis | |
| MUESTRA: | Rookkazul (3,5% cal) | |
| SOLICITADO POR: | | |
| FECHA: | | |


| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|------------|------------|------------|------------|---|
| HUMEDAD AÑADIDA EN % | 12 | 9 | 15 | 18 | |
| AGUA AUMENTADA EN C.C | 300 | 225 | 375 | 450 | |
| NUMERO DEL MOLDE | # 6574 | # 6574 | # 6574 | # 6574 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO + SUELO HUMEDO (P1) | 11581 | 11237 | 11619,5 | 11410,5 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO (P2) | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | |
| PESO DEL SUELO HUMEDO P1 - P2 - P3 | 4,9975 | 4,6535 | 5,027 | 4,827 | |
| VOLUMEN DEL MOLDE SIN EL COLLARIN | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | |
| DENSIDAD HUMEDA D1-P3/V. Kg/m ³ | 2377,33 | 2213,69 | 2391,36 | 2296,22 | |

| CONTENIDO DE HUMEDAD | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|--------|---------|-------|---------|--------|---------|--------|---|
| MUESTRA | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 |
| NUMERO DEL TARRO | #P | #17 | #25 | #11 | # | #02 | #1A | #A9 | |
| PESO DEL TARRO + SUELO HUMEDO | 115,29 | 117,97 | 96,97 | 98,22 | 92,11 | 122,74 | 123,09 | 105,12 | |
| PESO DEL TARRO + SUELO SECO | 103,08 | 112,36 | 93,13 | 94,11 | 86,18 | 114,72 | 115,03 | 98,96 | |
| PESO DEL AGUA | 6,21 | 5,61 | 3,84 | 3,81 | 5,93 | 7,52 | 8,06 | 6,16 | |
| PESO DEL TARRO | 43,41 | 53,66 | 43,04 | 43,77 | 30,02 | 43,33 | 44,05 | 43,67 | |
| PESO DEL SUELO SECO | 65,67 | 58,7 | 59,09 | 50,64 | 56,16 | 71,39 | 70,98 | 55,29 | |
| CONTENIDO DE AGUA EN % | 9,46 | 9,56 | 7,67 | 7,52 | 10,56 | 10,53 | 11,36 | 11,14 | |
| CONTENIDO PROMEDIO DE AGUA EN % | 9,51 | | 7,59 | | 10,55 | | 11,25 | | |
| DENSIDAD SECA Kg/m ³ | 2170,94 | | 2057,43 | | 2163,22 | | 2064,05 | | |

|  Universidad Católica de Cuenca | | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | |
|--|------------------|---|--|
| ENSAYO DE COMPACTACIÓN | | | |
| PROYECTO: | Tesis | | |
| MUESTRA: | A.A.SUR (5% CAL) | | |
| SOLICITADO POR: | | | |
| FECHA: | | | |

| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|------------|------------|------------|------------|---|
| HUMEDAD AÑADIDA EN % | 12 | 9 | 15 | 18 | |
| AGUA AUMENTADA EN C.C | 260 | 195 | 325 | 390 | |
| NUMERO DEL MOLDE | # 6574 | # 6574 | # 6574 | # 6574 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO + SUELO HUMEDO (P1) | 11165 | 11000,5 | 11309,5 | 11197,5 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO (P2) | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | |
| PESO DEL SUELO HUMEDO P1 - P2 - P3 | 458 | 4,42 | 4,72 | 4,61 | |
| VOLUMEN DEL MOLDE SIN EL COLLARIN | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | |
| DENSIDAD HUMEDA D1-P3/V. Kg/m ³ | 2173,44 | 2104,18 | 2243,89 | 2194,90 | |

| CONTENIDO DE HUMEDAD | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|-------|---------|--------|---------|--------|---------|-------|---|
| MUESTRA | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 |
| NUMERO DEL TARRO | # I4 | # I9 | # 20 | # 04 | # 8 | # 2 | # J6 | # 1 | |
| PESO DEL TARRO + SUELO HUMEDO | 103,6 | 99,33 | 152,21 | 105,67 | 122,17 | 121,13 | 160,36 | 97,59 | |
| PESO DEL TARRO + SUELO SECO | 98,94 | 95,1 | 145,9 | 99,88 | 114,53 | 113,99 | 149,1 | 88,2 | |
| PESO DEL AGUA | 4,66 | 4,23 | 6,31 | 5,79 | 7,64 | 7,14 | 11,26 | 9,34 | |
| PESO DEL TARRO | 52,72 | 53,02 | 69,98 | 29,05 | 52,83 | 52,26 | 64,02 | 25,09 | |
| PESO DEL SUELO SECO | 46,22 | 43,98 | 75,92 | 79,83 | 61,9 | 61,73 | 83,08 | 83,16 | |
| CONTENIDO DE AGUA EN % | 10,08 | 10,5 | 8,31 | 8,17 | 12,34 | 11,57 | 13,55 | 14,79 | |
| CONTENIDO PROMEDIO DE AGUA EN % | 10,07 | | 8,24 | | 11,95 | | 14,17 | | |
| DENSIDAD SECA Kg/m ³ | 1980,70 | | 1943,17 | | 2004,29 | | 1922,47 | | |

|  Universidad Católica de Cuenca | | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | |
|--|---------------------|---|--|
| ENSAYO DE COMPACTACIÓN | | | |
| PROYECTO: | TESIS | | |
| MUESTRA: | ROCKABARUL (5% CAL) | | |
| SOLICITADO POR: | | | |
| FECHA: | | | |

| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|------------|------------|------------|------------|---|
| HUMEDAD AÑADIDA EN % | 12 | 9 | 15 | 18 | |
| AGUA AUMENTADA EN C.C | 300 | 225 | 375 | 450 | |
| NUMERO DEL MOLDE | # 6574 | # 6574 | # 6574 | # 6574 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO + SUELO HUMEDO (P1) | 11527 | 11330,5 | 11581 | 11250,5 | |
| PESO DEL MOLDE CILINDRICO (P2) | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | 6583,5 | |
| PESO DEL SUELO HUMEDO P1 - P2 - P3 | 49435 | 4,747 | 4,9975 | 4,667 | |
| VOLUMEN DEL MOLDE SIN EL COLLARIN | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | 0,00210215 | |
| DENSIDAD HUMEDA D1-P3/V. Kg/m ³ | 2351,64 | 2258,17 | 2377,33 | 2220,11 | |

| CONTENIDO DE HUMEDAD | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|--------|---------|--------|---------|-------|---------|-------|---|
| MUESTRA | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 |
| NUMERO DEL TARRO | # M10 | # 5A | # A7 | # B | # K | # T01 | # A1 | # S | |
| PESO DEL TARRO + SUELO HUMEDO | 102,17 | 103,8 | 36,45 | 102,32 | 99,93 | 89,82 | 85,5 | 103,9 | |
| PESO DEL TARRO + SUELO SECO | 97,21 | 103,13 | 91,69 | 98,52 | 90,04 | 84,56 | 77,64 | 97,27 | |
| PESO DEL AGUA | 4,96 | 6,67 | 4,76 | 4 | 9,89 | 5,26 | 7,86 | 6,63 | |
| PESO DEL TARRO | 43,78 | 44,24 | 39 | 52,48 | 36,27 | 32,78 | 38,48 | 52,89 | |
| PESO DEL SUELO SECO | 53,43 | 58,79 | 52,69 | 46,04 | 53,77 | 51,78 | 33,16 | 44,38 | |
| CONTENIDO DE AGUA EN % | 9,28 | 11,35 | 9,02 | 8,69 | 18,39 | 10,16 | 20,67 | 14,94 | |
| CONTENIDO PROMEDIO DE AGUA EN % | 10,31 | | 8,86 | | 14,28 | | 17,51 | | |
| DENSIDAD SECA Kg/m ³ | 2134,76 | | 2074,36 | | 2080,34 | | 1889,37 | | |

Anexo 10

Ensayo de Abrasión (Máquina de Los Ángeles), con bases granulares en estado natural y estabilizadas con 2.5%, 3.5% y 5% con cal, en el Laboratorio de Suelos CIIT.

| ABERTURA DE LOS TAMICES EN (mm) | | Peso del material según el tipo de gradación | GRADACIÓN | | | |
|---------------------------------|----------|--|-----------|---------|---------|---------|
| Pasante | Retenido | | ✓ Tipo A | Tipo B | Tipo C | Tipo D |
| 37.5 | 25 | 1254 | 1250±25 | ----- | ----- | ----- |
| 25 | 19 | 1243,5 | 1250±25 | ----- | ----- | ----- |
| 19 | 12.5 | 1250,5 | 1250±10 | 2500±10 | ----- | ----- |
| 12.5 | 9.5 | 1249,5 | 1250±10 | 2500±10 | ----- | ----- |
| 9.5 | 6.3 | - | ----- | ----- | 2500±10 | ----- |
| 6.3 | 4.75 | - | ----- | ----- | 2500±10 | ----- |
| 4.75 | 2.36 | - | ----- | ----- | ----- | 5000±10 |
| TOTAL | | 4997,5 | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 |

| | |
|---|--------|
| A: PESO DE LA MUESTRA TAMIZADA EN EL NUMERO 12 (gramos) | 4129,5 |
| B: PESO TOTAL DE LA MUESTRA SEGÚN LA GRADACIÓN (gramos) | 4997,5 |

$$\text{ABRASIÓN \%} = \frac{B-A}{B} * 100 = 17,57$$


| ABERTURA DE LOS TAMICES EN (mm) | | Peso del material según el tipo de gradación | GRADACIÓN | | | |
|---------------------------------|----------|--|-----------|---------|---------|---------|
| Pasante | Retenido | | ✓ Tipo A | Tipo B | Tipo C | Tipo D |
| 37.5 | 25 | 1231 | 1250±25 | ----- | ----- | ----- |
| 25 | 19 | 1248 | 1250±25 | ----- | ----- | ----- |
| 19 | 12.5 | 1259,5 | 1250±10 | 2500±10 | ----- | ----- |
| 12.5 | 9.5 | 1256,5 | 1250±10 | 2500±10 | ----- | ----- |
| 9.5 | 6.3 | - | ----- | ----- | 2500±10 | ----- |
| 6.3 | 4.75 | - | ----- | ----- | 2500±10 | ----- |
| 4.75 | 2.36 | - | ----- | ----- | ----- | 5000±10 |
| TOTAL | | 4995 | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 |


| | |
|---|--------|
| A: PESO DE LA MUESTRA TAMIZADA EN EL NUMERO 12 (gramos) | 4306,5 |
| B: PESO TOTAL DE LA MUESTRA SEGÚN LA GRADACIÓN (gramos) | 4995 |

$$\text{ABRASIÓN \%} = \frac{B-A}{B} * 100 = 13,71$$

Anexo 11

Ensayo CBR, con bases granulares en estado natural y estabilizadas con 2.5%, 3.5% y 5% con cal, en el Laboratorio de Suelos CIITT.

|  | | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL | | | | | |
|---|------------------|--|--------------------------|--------------------|------------------|--------------------|--|
| | | LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | | | | |
| | | ENSAYO DE CBR | | | | | |
| PROYECTO: | TESIS | MUESTRA: | A.A.SUR (ESTADO NATURAL) | | | | |
| Molde N° | #22 | #9 | #11 | | | | |
| Número de Capas | 5 | 5 | 5 | | | | |
| Número de Golpes por Capa | 56 | 25 | 12 | | | | |
| | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo | |
| Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr) | 12058,5 | 12163 | 11275 | 11313 | 11610,5 | 11828,5 | |
| Peso del Molde (gr) | 6909 | 6909 | 6306 | 6306 | 6898 | 6898 | |
| Peso Muestra Húmeda (gr) | 5149,5 | 5254 | 4969 | 5007 | 4712,5 | 4930,5 | |
| Volumen de la Muestra (m3) | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | |
| Densidad Húmeda (kg/m3) | 2229,11 | 2274,35 | 2150,98 | 2167,43 | 2039,94 | 2134,31 | |
| Densidad Seca (kg/m3) | 2025,52 | 2037,92 | 1957,26 | 1924,00 | 1856,70 | 1842,49 | |
| CONTENIDO DE AGUA (Antes del Remojo) | | | | | | | |
| Tarro N° | A2 | T08 | P7 | M | S1 | S10 | |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 87,54 | 83,46 | 91,2 | 95,5 | 90 | 133,3 | |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 82,78 | 79,53 | 86,96 | 90,74 | 85,85 | 127,05 | |
| Peso del Agua (gr) | 4,76 | 3,93 | 4,24 | 4,76 | 4,15 | 6,25 | |
| Peso del Tarro (gr) | 35,7 | 40,2 | 43,8 | 43 | 43,2 | 64,6 | |
| Peso Muestra Seca (gr) | 47,08 | 39,33 | 43,16 | 47,74 | 42,65 | 62,45 | |
| Contenido de Humedad % | 10,11 | 9,99 | 9,82 | 9,97 | 9,73 | 10,01 | |
| Promedio Contenido de Humedad % | 10,05 | | 9,90 | | 9,87 | | |
| CONTENIDO DE AGUA (Después del Remojo) | | | | | | | |
| Tarro N° | 85 | M5 | VIII | P7 | L3 | S10 | |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 103,61 | 104,25 | 122,68 | 115,95 | 117,56 | 143,74 | |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 98,53 | 98,79 | 113,81 | 107,82 | 108,7 | 132,97 | |
| Peso del Agua (gr) | 5,08 | 5,46 | 8,87 | 8,13 | 8,86 | 10,77 | |
| Peso del Tarro (gr) | 54,3 | 52,19 | 43,42 | 43,82 | 53,03 | 64,64 | |
| Peso Muestra Seca (gr) | 44,23 | 46,6 | 70,39 | 64 | 55,67 | 68,33 | |
| Contenido de Humedad % | 11,49 | 11,72 | 12,60 | 12,70 | 15,92 | 15,76 | |
| Promedio Contenido de Humedad % | 11,60 | | 12,65 | | 15,84 | | |

|  | | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL | | | | | |
|---|------------------|--|----------------------------|--------------------|------------------|--------------------|--|
| | | LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | | | | |
| | | ENSAYO DE CBR | | | | | |
| PROYECTO: | TESIS | MUESTRA: | ROOKAAZUL (ESTADO NATURAL) | | | | |
| Molde N° | #22 | #9 | #11 | | | | |
| Número de Capas | 5 | 5 | 5 | | | | |
| Número de Golpes por Capa | 56 | 25 | 12 | | | | |
| | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo | |
| Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr) | 12300,5 | 12407,5 | 11455 | 11574,5 | 11826 | 12214,5 | |
| Peso del Molde (gr) | 6909 | 6909 | 6306 | 6306 | 6898 | 6898 | |
| Peso Muestra Húmeda (gr) | 5391,5 | 5498,5 | 5149 | 5268,5 | 4928 | 5316,5 | |
| Volumen de la Muestra (m3) | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | |
| Densidad Húmeda (kg/m3) | 2333,87 | 2380,19 | 2228,89 | 2280,62 | 2133,23 | 2301,40 | |
| Densidad Seca (kg/m3) | 2162,47 | 2213,12 | 2067,29 | 2104,88 | 1980,22 | 2100,51 | |
| CONTENIDO DE AGUA (Antes del Remojo) | | | | | | | |
| Tarro N° | A1 | # | I4 | T14 | 4 | 2 | |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 80,9 | 70,8 | 95,5 | 83,5 | 63,5 | 84,6 | |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 78 | 67,6 | 92,7 | 79,2 | 61 | 82,3 | |
| Peso del Agua (gr) | 2,9 | 3,2 | 2,8 | 4,3 | 2,5 | 2,3 | |
| Peso del Tarro (gr) | 38,5 | 30 | 52,7 | 29,4 | 29 | 52,2 | |
| Peso Muestra Seca (gr) | 39,5 | 37,6 | 40 | 49,8 | 32 | 30,1 | |
| Contenido de Humedad % | 7,34 | 8,51 | 7,00 | 8,63 | 7,81 | 7,64 | |
| Promedio Contenido de Humedad % | 7,93 | | 7,82 | | 7,73 | | |
| CONTENIDO DE AGUA (Después del Remojo) | | | | | | | |
| Tarro N° | A7 | 8 | M10 | T01 | 5N | K | |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 84,9 | 98,9 | 98,19 | 85,41 | 111,91 | 96,55 | |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 81,64 | 95,68 | 93,99 | 81,36 | 106,02 | 91,28 | |
| Peso del Agua (gr) | 3,26 | 3,22 | 4,2 | 4,05 | 5,89 | 5,27 | |
| Peso del Tarro (gr) | 39 | 52,47 | 43,77 | 32,77 | 44,33 | 36,27 | |
| Peso Muestra Seca (gr) | 42,64 | 43,21 | 50,22 | 48,59 | 61,69 | 55,01 | |
| Contenido de Humedad % | 7,65 | 7,45 | 8,36 | 8,34 | 9,55 | 9,58 | |
| Promedio Contenido de Humedad % | 7,55 | | 8,35 | | 9,56 | | |



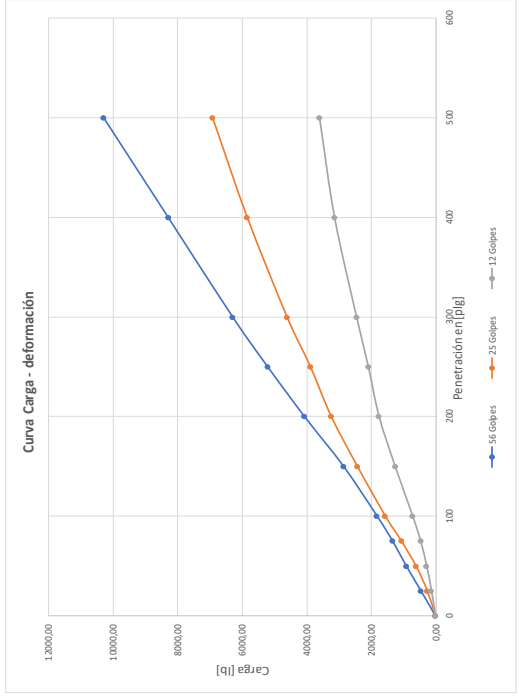
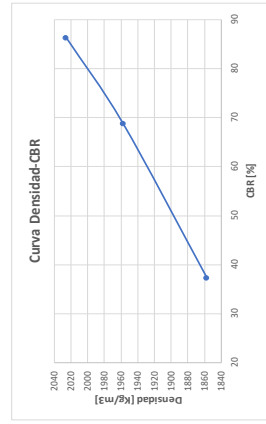
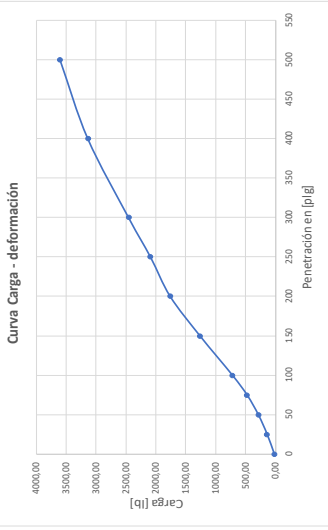
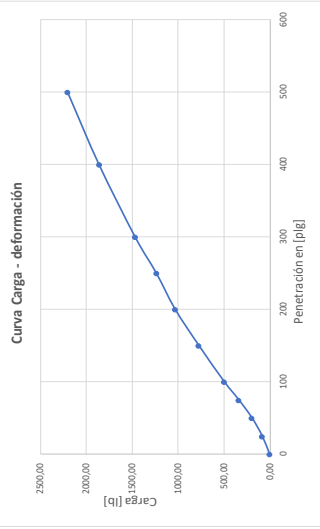
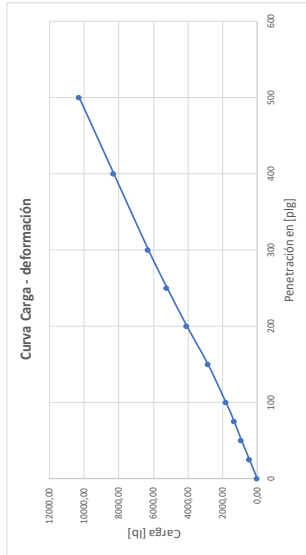
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL - LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

PROYECTO: TESIS MUESTRA: A.A.SUR (ESTADO NATURAL)

ENSAJO CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

LECTURAS DE PENETRACIÓN

| MOLDE 56 GOLPES | | | | | | | | | | MOLDE 12 GOLPES | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------------|--------------|--|--|-----|----------------------|-------------------|--------------|--|--|-----|----------------------|-------------------|--------------|--|--|-----|--|--|
| Penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Prestiones Corregidas lb/pulg ² | Prestiones Estandar lb/pulg ² | CBR | penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Prestiones Corregidas lb/pulg ² | Prestiones Estandar lb/pulg ² | CBR | penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Prestiones Corregidas lb/pulg ² | Prestiones Estandar lb/pulg ² | CBR | | |
| 0 | 0 | 20.29 | 6.46 | | | 0 | 0 | 20.29 | 6.46 | | | 0 | 0 | 20.29 | 6.46 | | | | |
| 25 | 78 | 465.43 | 148.15 | | | 25 | 44 | 271.39 | 86.39 | | | 25 | 41 | 139.79 | 44.50 | | | | |
| 50 | 158 | 921.98 | 295.48 | | | 50 | 105 | 615.51 | 197.20 | | | 50 | 47 | 287.83 | 91.62 | | | | |
| 75 | 252 | 1344.29 | 427.90 | | | 75 | 184 | 1070.36 | 340.71 | | | 75 | 80 | 475.53 | 151.37 | | | | |
| 100 | 316 | 1823.67 | 580.49 | 1000 | 58 | 100 | 271 | 1566.86 | 498.75 | 1000 | 50 | 100 | 122 | 719.27 | 228.95 | 1000 | 23 | | |
| 150 | 498 | 2862.33 | 911.11 | 1500 | 86 | 150 | 423 | 2434.31 | 774.86 | 1500 | 69 | 150 | 218 | 1262.51 | 401.87 | 1500 | 37 | | |
| 200 | 710 | 4072.19 | 1296.22 | 2000 | 106 | 200 | 565 | 3244.69 | 1032.82 | 2000 | 77 | 200 | 305 | 1759.92 | 560.20 | 2000 | 41 | | |
| 250 | 910 | 5213.57 | 1659.53 | 2500 | 106 | 250 | 678 | 3889.57 | 1238.09 | 2500 | 77 | 250 | 363 | 2089.50 | 665.11 | 2500 | 41 | | |
| 300 | 1100 | 6397.88 | 2004.68 | 3000 | 106 | 300 | 805 | 4614.34 | 1468.79 | 3000 | 77 | 300 | 427 | 2455.65 | 781.66 | 3000 | 41 | | |
| 400 | 1450 | 8298.30 | 2640.47 | 4000 | 106 | 400 | 1021 | 5847.03 | 1861.17 | 4000 | 77 | 400 | 546 | 3155.86 | 998.17 | 4000 | 41 | | |
| 500 | 1800 | 10292.71 | 3276.27 | 5000 | 106 | 500 | 1289 | 6919.93 | 2202.68 | 5000 | 77 | 500 | 627 | 3599.66 | 1145.81 | 5000 | 41 | | |



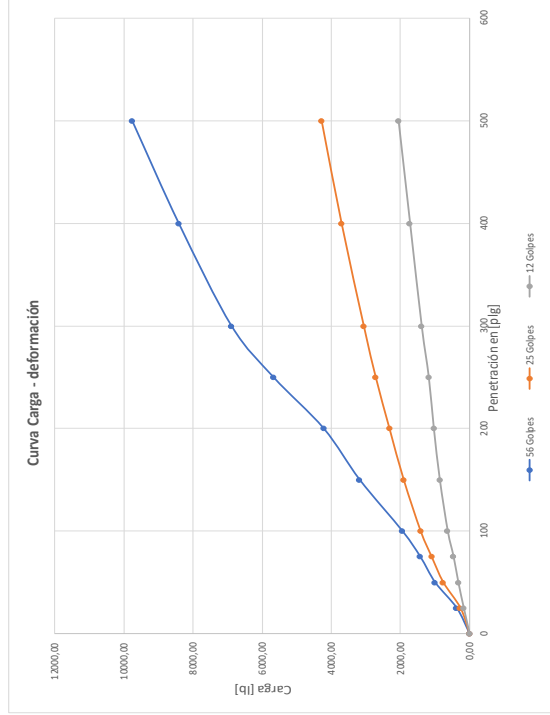
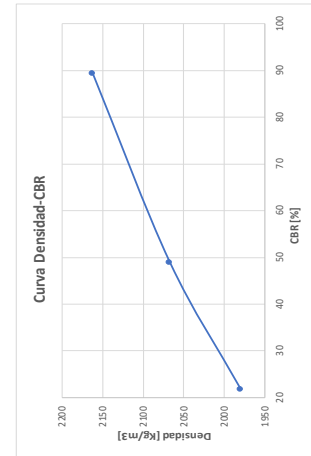
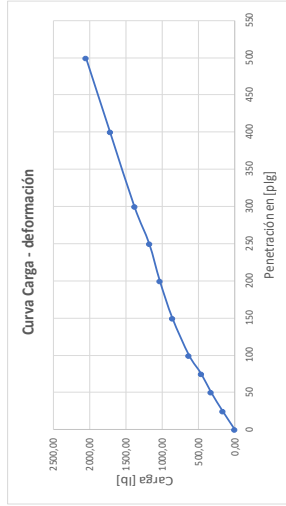
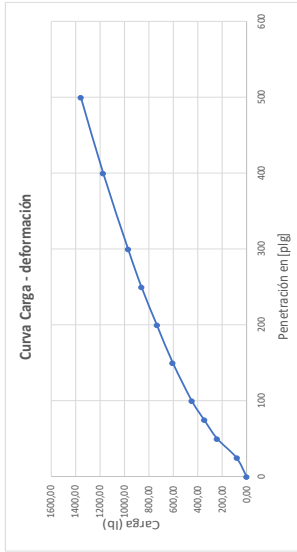
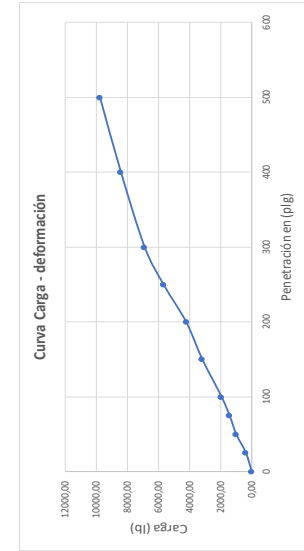
| CBR - Áridos y Agregados del Sur (Estado natural) | |
|---|---------|
| Golpes | CBR % |
| 56 | 2025.52 |
| 25 | 1957.26 |
| 12 | 1856.70 |
| Densidad Seca (kg/m ³) | |
| 2025.5 | 816 |



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL - LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
 PROYECTO: TESIS MUESTRA-ROCKAZUL (ESTADO NATURAL)
 ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)


LECTURAS DE PENETRACIÓN


| MOLDE 56 GOLPES | | | | MOLDE 25 GOLPES | | | | MOLDE 12 GOLPES | | | | | |
|----------------------|-------------------|--------------|--------------------------------|---|---|------|----------------------|-------------------|--------------|--------------------------------|---|---|-----|
| Penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Presiones lb/pulg ² | Presiones Corregidas lb/pulg ² | Presiones Estándar lb/pulg ² | CBR | penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Presiones lb/pulg ² | Presiones Corregidas lb/pulg ² | Presiones Estándar lb/pulg ² | CBR |
| 0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 25 | 1.66 | 372.28 | 118.50 | 83.87 | 83.87 | | 25 | 1.17 | 263.48 | 83.87 | 53.60 | 53.60 | |
| 50 | 4.44 | 997.25 | 317.44 | 241.30 | 241.30 | | 50 | 3.37 | 758.06 | 241.30 | 103.69 | 103.69 | |
| 75 | 6.33 | 1426.64 | 454.11 | 348.64 | 348.64 | | 75 | 4.87 | 1093.27 | 348.64 | 147.34 | 147.34 | |
| 100 | 8.65 | 1945.70 | 618.70 | 449.53 | 449.53 | 62 | 100 | 6.28 | 1412.25 | 449.53 | 201.01 | 201.01 | 20 |
| 150 | 14.15 | 3180.15 | 1012.27 | 604.82 | 604.82 | 90 | 150 | 8.45 | 1900.09 | 604.82 | 274.00 | 274.00 | |
| 200 | 18.78 | 4221.01 | 1343.59 | 735.77 | 735.77 | 90 | 200 | 10.28 | 2311.49 | 735.77 | 329.10 | 329.10 | 22 |
| 250 | 23.25 | 5675.53 | 1806.58 | 861.71 | 861.71 | 115 | 250 | 12.04 | 2707.15 | 861.71 | 375.61 | 375.61 | |
| 300 | 30.66 | 6891.74 | 2193.71 | 971.20 | 971.20 | 1900 | 300 | 13.57 | 3051.11 | 971.20 | 440.73 | 440.73 | 23 |
| 400 | 37.45 | 8418.20 | 2679.59 | 1175.14 | 1175.14 | | 400 | 16.42 | 3691.81 | 1175.14 | 547.35 | 547.35 | |
| 500 | 43.45 | 9767.05 | 3108.95 | 1358.33 | 1358.33 | | 500 | 18.98 | 4267.32 | 1358.33 | 683.26 | 683.26 | |



| CBR - Rookazul (Estado natural) | | |
|---------------------------------|-----------------------|-------|
| Golpes | Densidad Seca (kg/m³) | CBR % |
| 56 | 2162.47 | 90 |
| 25 | 2067.29 | 49 |
| 12 | 1980.22 | 22 |

| Densidad Seca (kg/m³) | |
|-----------------------|----|
| 2162.5 | 90 |
| CBR | |

|  | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL | | | | | |
|---|--|--------------------|------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| | LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | | | | |
| | ENSAYO DE CBR | | | | | |
| PROYECTO: | TESIS | | MUESTRA: | | A.A.SUR (2,5% DE CAL) | |
| Molde N° | #34 | | #15 | | #8 | |
| Número de Capas | 5 | | 5 | | 5 | |
| Número de Golpes por Capa | 56 | | 25 | | 12 | |
| | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo |
| Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr) | 11199 | 11331 | 11075 | 11368,5 | 10489,5 | 10858 |
| Peso del Molde (gr) | 6255 | 6255 | 6404 | 6404 | 6028 | 6028 |
| Peso Muestra Húmeda (gr) | 4944 | 5076 | 4671 | 4964,5 | 4461,5 | 4830 |
| Volumen de la Muestra (m3) | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 |
| Densidad Húmeda (kg/m3) | 2140,15 | 2197,29 | 2021,98 | 2149,03 | 1931,29 | 2090,81 |
| Densidad Seca (kg/m3) | 1957,44 | 1926,53 | 1839,67 | 1861,14 | 1757,10 | 1769,51 |
| CONTENIDO DE AGUA (Antes del Remojo) | | | | | | |
| Tarro N° | T13 | P6 | L3 | PE1 | SN | VIII |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 86,7 | 98,1 | 99,7 | 96,2 | 92,3 | 107,3 |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 82,54 | 93,4 | 95,49 | 91,52 | 88,68 | 101,63 |
| Peso del Agua (gr) | 4,16 | 4,7 | 4,21 | 4,68 | 3,62 | 5,67 |
| Peso del Tarro (gr) | 37,1 | 44 | 53 | 44,3 | 52,8 | 43,4 |
| Peso Muestra Seca (gr) | 45,44 | 49,4 | 42,49 | 47,22 | 35,88 | 58,23 |
| Contenido de Humedad % | 9,15 | 9,51 | 9,91 | 9,91 | 10,09 | 9,74 |
| Promedio Contenido de Humedad % | 9,33 | | 9,91 | | 9,91 | |
| CONTENIDO DE AGUA (Después del Remojo) | | | | | | |
| Tarro N° | A2 | D | 4 | T01 | 1 | 5N |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 91,39 | 91,64 | 89,75 | 85,27 | 102,29 | 110,36 |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 84,51 | 85,78 | 81,56 | 78,29 | 93,22 | 100,35 |
| Peso del Agua (gr) | 6,88 | 5,86 | 8,19 | 6,98 | 9,07 | 10,01 |
| Peso del Tarro (gr) | 35,69 | 43,97 | 29,06 | 32,78 | 44,04 | 44,34 |
| Peso Muestra Seca (gr) | 48,82 | 41,81 | 52,5 | 45,51 | 49,18 | 56,01 |
| Contenido de Humedad % | 14,09 | 14,02 | 15,60 | 15,34 | 18,44 | 17,87 |
| Promedio Contenido de Humedad % | 14,05 | | 15,47 | | 18,16 | |

|  | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL | | | | | |
|---|--|--------------------|------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| | LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | | | | |
| | ENSAYO DE CBR | | | | | |
| PROYECTO: | TESIS | | MUESTRA: | | ROOKAAZUL (2,5% CAL) | |
| Molde N° | #33 | | #10 | | #32 | |
| Número de Capas | 5 | | 5 | | 5 | |
| Número de Golpes por Capa | 56 | | 25 | | 12 | |
| | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo |
| Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr) | 12024 | 12174,5 | 10769 | 10966,5 | 12023 | 12302 |
| Peso del Molde (gr) | 6721 | 6721 | 5643,5 | 5643,5 | 7221 | 7221 |
| Peso Muestra Húmeda (gr) | 5303 | 5453,5 | 5125,5 | 5323 | 4802 | 5081 |
| Volumen de la Muestra (m3) | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 |
| Densidad Húmeda (kg/m3) | 2295,56 | 2360,71 | 2218,72 | 2304,21 | 2078,68 | 2199,46 |
| Densidad Seca (kg/m3) | 2134,16 | 2145,92 | 2065,86 | 2063,65 | 1942,12 | 1952,44 |
| CONTENIDO DE AGUA (Antes del Remojo) | | | | | | |
| Tarro N° | VIII | K | S10 | A7 | M8 | 8 |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 109,18 | 80,54 | 117,88 | 79,16 | 88,94 | 95,66 |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 104,9 | 77,2 | 114,2 | 76,4 | 86 | 92,8 |
| Peso del Agua (gr) | 4,28 | 3,34 | 3,68 | 2,76 | 2,94 | 2,86 |
| Peso del Tarro (gr) | 43,4 | 36,3 | 64,6 | 39 | 43,8 | 52,5 |
| Peso Muestra Seca (gr) | 61,5 | 40,9 | 49,6 | 37,4 | 42,2 | 40,3 |
| Contenido de Humedad % | 6,96 | 8,17 | 7,42 | 7,38 | 6,97 | 7,10 |
| Promedio Contenido de Humedad % | 7,56 | | 7,40 | | 7,03 | |
| CONTENIDO DE AGUA (Después del Remojo) | | | | | | |
| Tarro N° | T03 | 2 | 1 | 197 | M7 | D6 |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 93,26 | 86,24 | 85,87 | 94 | 88,24 | 110,96 |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 87,99 | 80,73 | 81,48 | 89,74 | 83,27 | 104,4 |
| Peso del Agua (gr) | 5,27 | 5,51 | 4,39 | 4,26 | 4,97 | 6,56 |
| Peso del Tarro (gr) | 35,89 | 25,09 | 44,03 | 52,99 | 43,91 | 52,65 |
| Peso Muestra Seca (gr) | 52,1 | 55,64 | 37,45 | 36,75 | 39,36 | 51,75 |
| Contenido de Humedad % | 10,12 | 9,90 | 11,72 | 11,59 | 12,63 | 12,68 |
| Promedio Contenido de Humedad % | 10,01 | | 11,66 | | 12,65 | |



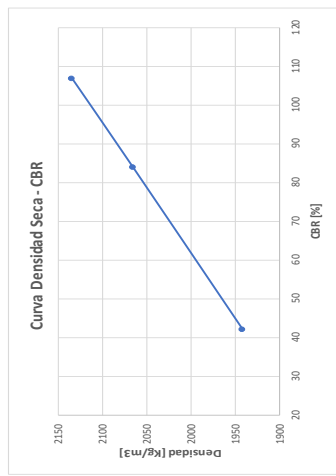
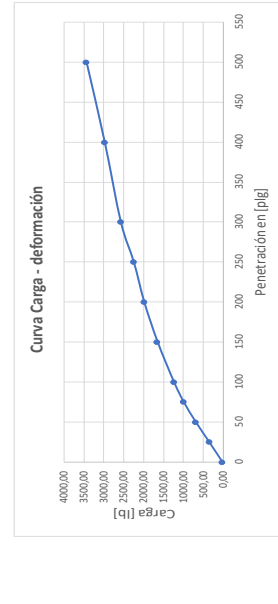
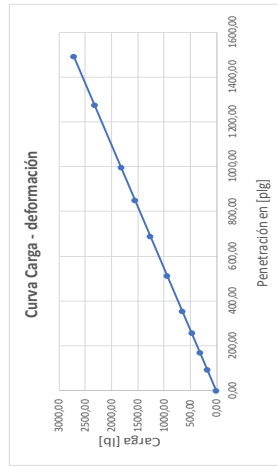
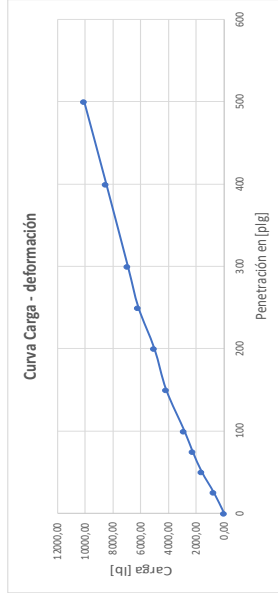
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL - LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCION

PROYECTO: TESIS MUESTRA: ROOKAZUL (2.5% DE CAL)

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

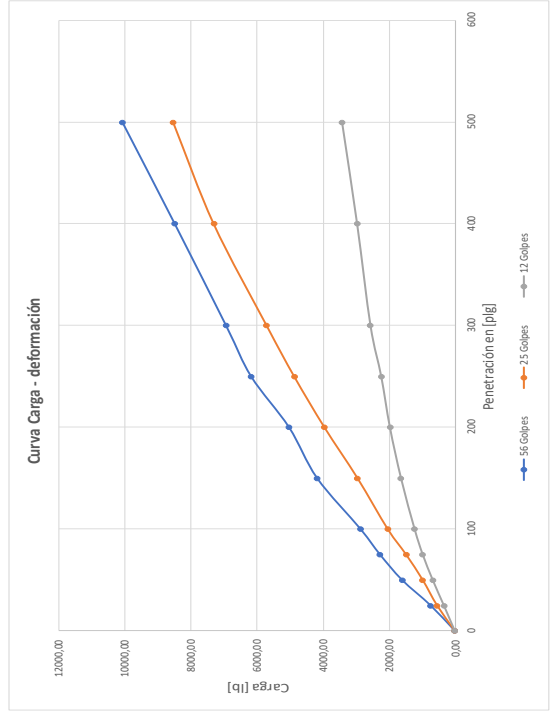
LECTURAS DE PENETRACION

| MOLDE 56 GOLPES | | | | MOLDE 25 GOLPES | | | | MOLDE 12 GOLPES | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------------|--------------|---------------------------------|---|-----|----------------------|-------------------|-----------------|---------------------------------|---|---|-----|----------------------|-------------------|--------------|---------------------------------|---|---|-----|----|
| Penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Litras | Prestiones lb/pulg ² | Presiones Estandar lb/pulg ² | CBR | Penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Litras | Prestiones lb/pulg ² | Presiones Corregidas lb/pulg ² | Presiones Estandar lb/pulg ² | CBR | Penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Litras | Prestiones lb/pulg ² | Presiones Corregidas lb/pulg ² | Presiones Estandar lb/pulg ² | CBR | |
| 0 | 0 | 20,29 | 6,46 | | | 0 | 0,00 | 20,29 | 6,46 | | | | 0 | 0,00 | 20,29 | 6,46 | | | | |
| 25 | 129 | 756,48 | 240,80 | | | 25 | 94,00 | 556,74 | 177,22 | | | | 25 | 58,00 | 351,29 | 111,82 | | | | |
| 50 | 280 | 1618,22 | 515,10 | | | 50 | 170,00 | 990,46 | 315,27 | | | | 50 | 117,00 | 688,00 | 219,00 | | | | |
| 75 | 397 | 2285,93 | 727,63 | | | 75 | 258,20 | 1493,81 | 475,49 | | | | 75 | 170,00 | 990,46 | 315,27 | | | | |
| 100 | 500 | 2873,74 | 914,74 | | 91 | 100 | 355,20 | 2047,38 | 651,70 | | 1000 | 65 | 150 | 213,00 | 1235,86 | 393,39 | 393,39 | 1000 | 39 | |
| 150 | 730,00 | 4186,33 | 1332,55 | | 107 | 150 | 515,1 | 2959,91 | 942,17 | | 1500 | 84 | 150 | 285,00 | 1646,76 | 524,18 | | | | 42 |
| 200 | 879,00 | 5036,66 | 1603,22 | | 116 | 200 | 690,5 | 3960,90 | 1260,80 | | 1500 | 96 | 200 | 344,00 | 1983,46 | 631,36 | 631,36 | 1500 | 43 | |
| 250 | 1080,00 | 6183,74 | 1968,35 | | 116 | 250 | 850,6 | 4874,58 | 1511,63 | | 1900 | 96 | 250 | 390,00 | 2245,98 | 714,92 | | | | |
| 300 | 1213,00 | 6942,76 | 2209,95 | | 116 | 300 | 996,5 | 5707,22 | 1816,66 | | 1900 | 96 | 300 | 447,00 | 2571,27 | 818,46 | 818,46 | 1900 | 43 | |
| 400 | 1485,00 | 8495,04 | 2704,05 | | 116 | 400 | 1277 | 7308,00 | 2326,21 | | 1900 | 96 | 400 | 518,00 | 2976,46 | 947,44 | | | | |
| 500 | 1763,00 | 10081,55 | 3209,06 | | 116 | 500 | 1492 | 8534,98 | 2716,77 | | 1900 | 96 | 500 | 598,00 | 3433,02 | 1092,76 | | | | |




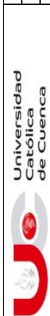
| CBR - Rookazul (2.5% de Cal) | | |
|------------------------------|------------------------------------|-------|
| Golpes | Densidad Seca (kg/m ³) | CBR % |
| 56 | 2134,16 | 107 |
| 25 | 2065,86 | 84 |
| 12 | 1942,12 | 42 |

| | |
|------------------------------------|--------|
| Densidad Seca (kg/m ³) | 2134,2 |
| CBR | 107 |



|  | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL | | | | | |
|---|--|--------------------|------------------|-----------------------|------------------|--------------------|
| | LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | | | | |
| ENSAYO DE CBR | | | | | | |
| PROYECTO: | TESIS | | MUESTRA: | A.A.SUR (3,5% DE CAL) | | |
| Molde N° | #13 | | #12 | | #14 | |
| Número de Capas | 5 | | 5 | | 5 | |
| Número de Golpes por Capa | 56 | | 25 | | 12 | |
| | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo |
| Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr) | 10955,5 | 11202,5 | 10785,5 | 11039,5 | 10830 | 11130 |
| Peso del Molde (gr) | 5979 | 5979 | 5947,5 | 5947,5 | 6218,5 | 6218,5 |
| Peso Muestra Húmeda (gr) | 4976,5 | 5223,5 | 4838 | 5092 | 4611,5 | 4911,5 |
| Volumen de la Muestra (m3) | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 |
| Densidad Húmeda (kg/m3) | 2154,22 | 2261,14 | 2094,27 | 2204,22 | 1996,22 | 2126,09 |
| Densidad Seca (kg/m3) | 1968,39 | 1984,23 | 1908,92 | 1906,08 | 1824,28 | 1794,26 |
| CONTENIDO DE AGUA (Antes del Remojo) | | | | | | |
| Tarro N° | T 112 | 8 | 5 | M9 | M5 | M3 |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 90,13 | 93,08 | 112,87 | 102,6 | 91,93 | 104,71 |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 85,44 | 89,58 | 107,66 | 98,13 | 88,53 | 100,34 |
| Peso del Agua (gr) | 4,69 | 3,5 | 5,21 | 4,47 | 3,4 | 4,37 |
| Peso del Tarro (gr) | 35,5 | 52,7 | 52,9 | 53 | 52,2 | 54,3 |
| Peso Muestra Seca (gr) | 49,94 | 36,88 | 54,76 | 45,13 | 36,33 | 46,04 |
| Contenido de Humedad % | 9,39 | 9,49 | 9,51 | 9,90 | 9,36 | 9,49 |
| Promedio Contenido de Humedad % | 9,44 | | 9,71 | | 9,43 | |
| CONTENIDO DE AGUA (Después del Remojo) | | | | | | |
| Tarro N° | A2 | T4 | 4 | 5N | T01 | 1 |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 90,97 | 99,65 | 91,42 | 103,46 | 93,07 | 99,3 |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 84,17 | 92,86 | 82,88 | 95,56 | 83,61 | 90,72 |
| Peso del Agua (gr) | 6,8 | 6,79 | 8,54 | 7,9 | 9,46 | 8,58 |
| Peso del Tarro (gr) | 35,7 | 43,95 | 29,04 | 44,33 | 32,78 | 44,03 |
| Peso Muestra Seca (gr) | 48,47 | 48,91 | 53,84 | 51,23 | 50,83 | 46,69 |
| Contenido de Humedad % | 14,03 | 13,88 | 15,86 | 15,42 | 18,61 | 18,38 |
| Promedio Contenido de Humedad % | 13,96 | | 15,64 | | 18,49 | |

|  | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL | | | | | |
|---|--|--------------------|------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| | LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | | | | |
| ENSAYO DE CBR | | | | | | |
| PROYECTO: | TESIS | | MUESTRA: | ROOKAAZUL (3,5 CAL) | | |
| Molde N° | #31 | | #5 | | #7 | |
| Número de Capas | 5 | | 5 | | 5 | |
| Número de Golpes por Capa | 56 | | 25 | | 12 | |
| | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo |
| Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr) | 12555,5 | 12518,5 | 10990,5 | 11403,5 | 11325,5 | 11880,5 |
| Peso del Molde (gr) | 7242 | 7242 | 5957,5 | 5927,5 | 6681,5 | 6681,5 |
| Peso Muestra Húmeda (gr) | 5313,5 | 5276,5 | 5033 | 5476 | 4644 | 5199 |
| Volumen de la Muestra (m3) | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 |
| Densidad Húmeda (kg/m3) | 2300,10 | 2284,09 | 2178,68 | 2370,45 | 2010,29 | 2250,54 |
| Densidad Seca (kg/m3) | 2151,63 | 2087,95 | 2040,88 | 2127,82 | 1880,24 | 1969,70 |
| CONTENIDO DE AGUA (Antes del Remojo) | | | | | | |
| Tarro N° | 5N | M | S1 | T01 | M10 | T08 |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 84,47 | 90,6 | 85 | 73,3 | 85,65 | 84,1 |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 81,9 | 87,5 | 82,4 | 70,7 | 83 | 81,2 |
| Peso del Agua (gr) | 2,57 | 3,1 | 2,6 | 2,6 | 2,65 | 2,9 |
| Peso del Tarro (gr) | 44,3 | 43 | 43,3 | 32,77 | 43,8 | 40,2 |
| Peso Muestra Seca (gr) | 37,6 | 44,5 | 39,1 | 37,93 | 39,2 | 41 |
| Contenido de Humedad % | 6,84 | 6,97 | 6,65 | 6,85 | 6,76 | 7,07 |
| Promedio Contenido de Humedad % | 6,90 | | 6,75 | | 6,92 | |
| CONTENIDO DE AGUA (Después del Remojo) | | | | | | |
| Tarro N° | S5 | 30 | P | M6 | 7 | SN |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 119,37 | 101,81 | 94,3 | 87,41 | 121,91 | 152,81 |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 113,63 | 97,61 | 89,1 | 82,86 | 113,4 | 141,92 |
| Peso del Agua (gr) | 5,74 | 4,2 | 5,2 | 4,55 | 8,51 | 10,89 |
| Peso del Tarro (gr) | 52,69 | 52,78 | 43,41 | 43,03 | 53,66 | 65,61 |
| Peso Muestra Seca (gr) | 60,94 | 44,83 | 45,69 | 39,83 | 59,74 | 76,31 |
| Contenido de Humedad % | 9,42 | 9,37 | 11,38 | 11,42 | 14,25 | 14,27 |
| Promedio Contenido de Humedad % | 9,39 | | 11,40 | | 14,26 | |



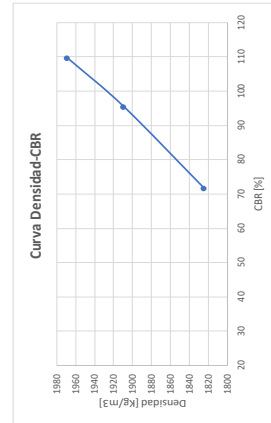
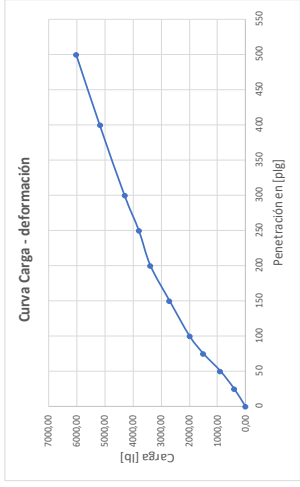
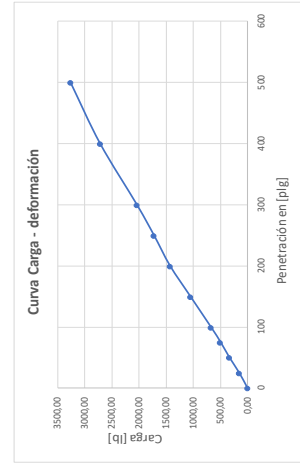
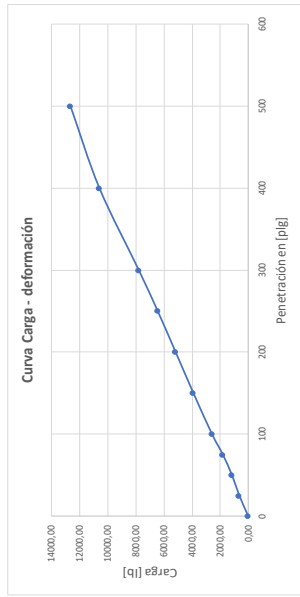
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL - LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

PROYECTO: TESIS MUESTRA: A.A.SUR (3.5% DE CAL)

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

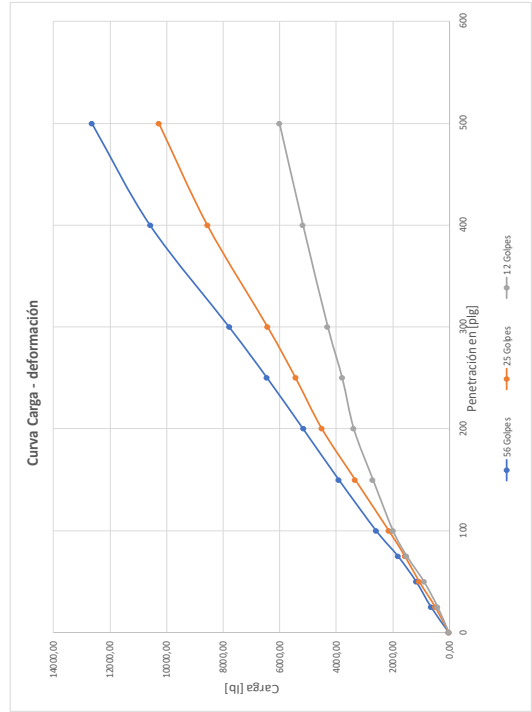
LECTURAS DE PENETRACIÓN

| MOLDE 56 GOLPES | | | | | MOLDE 25 GOLPES | | | | | MOLDE 12 GOLPES | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------------|--------------|--------------------------------|---|---|-----|----------------------|-------------------|--------------|--------------------------------|---|---|-----|----------------------|-------------------|--------------|--------------------------------|---|---|-----|
| Penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Presiones lb/pulg ² | Presiones Corregidas lb/pulg ² | Presiones Estándar lb/pulg ² | CBR | Penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Presiones lb/pulg ² | Presiones Corregidas lb/pulg ² | Presiones Estándar lb/pulg ² | CBR | Penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Presiones lb/pulg ² | Presiones Corregidas lb/pulg ² | Presiones Estándar lb/pulg ² | CBR |
| 0 | 0 | 20.29 | 6.46 | | | | 0 | 0 | 20.29 | 6.46 | | | | 0 | 0 | 20.29 | 6.46 | | | |
| 25 | 110 | 648.05 | 206.28 | | | | 25 | 84 | 499.67 | 159.05 | | | | 25 | 69 | 414.07 | 131.80 | | | |
| 50 | 202 | 1173.08 | 373.40 | | | | 50 | 183 | 1064.65 | 338.89 | | | | 50 | 154 | 899.15 | 286.21 | | | |
| 75 | 315 | 1817.96 | 578.68 | | | | 75 | 272 | 1572.57 | 500.56 | | | | 75 | 260 | 1504.08 | 478.76 | | | |
| 100 | 450 | 2588.40 | 823.91 | | 1000 | 82 | 100 | 371 | 2137.55 | 680.40 | 680.40 | 1000 | 68 | 100 | 346 | 1994.88 | 634.99 | 634.99 | 1000 | 63 |
| 150 | 681 | 3906.69 | 1243.54 | | 1500 | 110 | 150 | 579 | 3324.59 | 1038.25 | 1432.46 | 1500 | 95 | 150 | 470 | 2702.53 | 860.24 | 1076.41 | 1500 | 72 |
| 200 | 902 | 5167.91 | 1645.00 | | 1900 | 130 | 200 | 785 | 4500.21 | 1432.46 | 1738.56 | 1900 | 108 | 200 | 589 | 3381.65 | 1076.41 | 1076.41 | 1500 | 72 |
| 250 | 1125 | 6440.55 | 2050.09 | | 1900 | 130 | 250 | 948 | 5480.43 | 1738.56 | 2042.83 | 1900 | 108 | 250 | 661 | 3792.55 | 1207.21 | 1207.21 | 1500 | 72 |
| 300 | 1360 | 7781.67 | 2476.98 | | 1900 | 130 | 300 | 1121 | 6417.72 | 2042.83 | 2042.83 | 1900 | 108 | 300 | 750 | 4500.47 | 1368.88 | 1368.88 | 1900 | 72 |
| 400 | 1850 | 10578.06 | 3367.10 | | 1900 | 130 | 400 | 1494 | 8546.40 | 2720.40 | | | | 400 | 904 | 5179.33 | 1648.63 | 1648.63 | | |
| 500 | 2210 | 12632.54 | 4021.06 | | 1900 | 130 | 500 | 1794 | 10258.47 | 3365.37 | | | | 500 | 1050 | 6012.54 | 1913.85 | 1913.85 | | |



| Golpes | Densidad Seca (kg/m³) | CBR % |
|--------|-----------------------|-------|
| 56 | 1968.59 | 110 |
| 25 | 1908.92 | 95 |
| 12 | 1824.28 | 72 |

| Densidad Seca (kg/m³) | CBR |
|-----------------------|-----|
| 1968.4 | 110 |

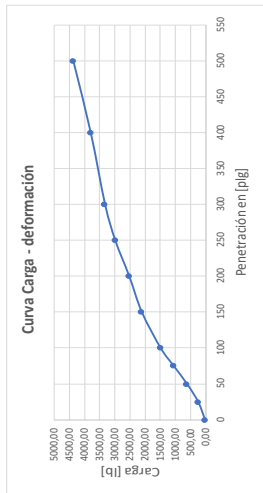
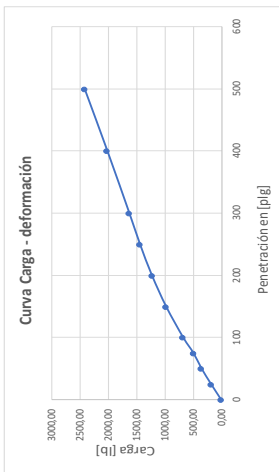
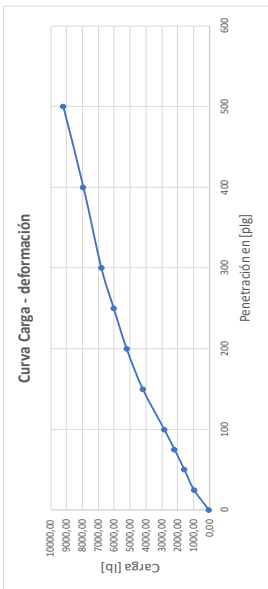




FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL - LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
 PROYECTO: TESIS MUESTRA: ROKKAZUL (3.5% DE CAL)
 ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

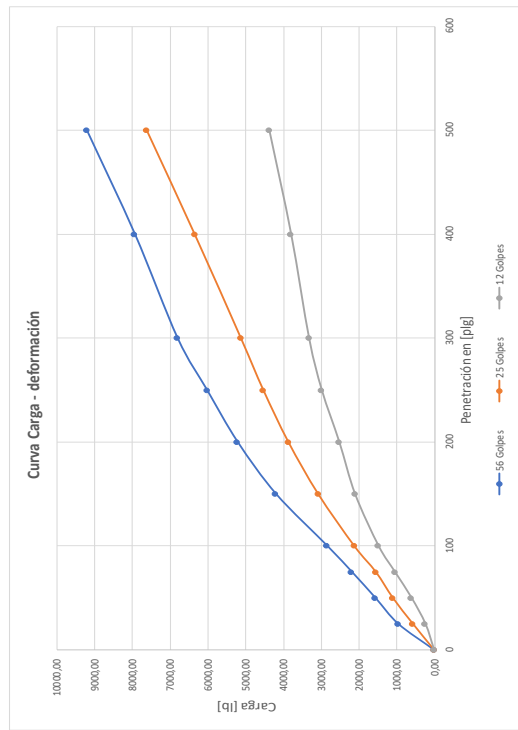
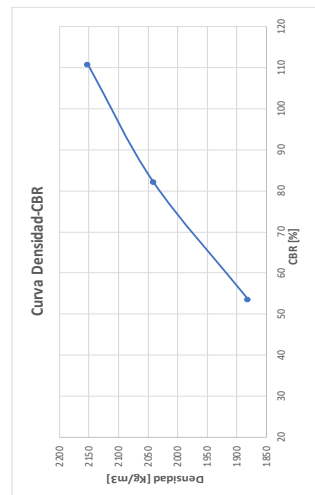
LECTURAS DE PENETRACIÓN


| MOLDE 56 GOLPES | | | | MOLDE 25 GOLPES | | | | MOLDE 12 GOLPES | | | | | |
|----------------------|-------------------|--------------|--------------------------------|---|---|-----|----------------------|-------------------|--------------|--------------------------------|---|---|-----|
| Penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Presiones lb/pulg ² | Presiones Corregidas lb/pulg ² | Presiones Estándar lb/pulg ² | CBR | Penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Presiones lb/pulg ² | Presiones Corregidas lb/pulg ² | Presiones Estándar lb/pulg ² | CBR |
| 0 | 0.00 | 20.29 | 6.46 | | | | 0 | 0.00 | 20.29 | 6.46 | | | |
| 25 | 166.00 | 967.64 | 308.01 | | | | 25 | 98.00 | 579.57 | 184.48 | | | |
| 50 | 272.00 | 1572.57 | 500.56 | | | | 50 | 191.00 | 1110.31 | 353.42 | | | |
| 75 | 381.00 | 2194.62 | 698.57 | | | | 75 | 270.00 | 1561.15 | 496.93 | | | |
| 100 | 495.00 | 2845.21 | 905.66 | | | | 100 | 370.00 | 2131.84 | 678.59 | | | |
| 150 | 735.00 | 4203.45 | 1338.00 | | | | 150 | 537.00 | 3084.90 | 981.95 | | | |
| 200 | 911.00 | 5219.28 | 1661.35 | | | | 200 | 675.00 | 3872.45 | 1232.64 | | | |
| 250 | 1053.00 | 6029.66 | 1919.30 | | | | 250 | 791.00 | 4534.36 | 1443.36 | | | |
| 300 | 1190.00 | 6811.50 | 2168.17 | | | | 300 | 895.00 | 5127.97 | 1632.28 | | | |
| 400 | 1588.00 | 7941.47 | 2527.85 | | | | 400 | 1109.00 | 6349.24 | 2021.03 | | | |
| 500 | 1611.00 | 9214.11 | 2932.94 | | | | 500 | 1331.00 | 7616.17 | 2424.30 | | | |




| CBR - Rookanzul (3.5% de Cal) | | |
|-------------------------------|------------------------------------|-------|
| Golpes | Densidad Seca (kg/m ³) | CBR % |
| 56 | 2151.63 | 111 |
| 25 | 2040.88 | 82 |
| 12 | 1880.24 | 54 |

| Densidad Seca (kg/m ³) | |
|------------------------------------|--------|
| CBR | 2151.6 |
| | 111 |



|  Universidad Católica de Cuenca | | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL | | | | | |
|--|------------------|--|------------------|---------------------|------------------|--------------------|--|
| | | LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | | | | |
| ENSAYO DE CBR | | | | | | | |
| PROYECTO: | TESIS | | MUESTRA: | A.A.SUR (5% DE CAL) | | | |
| Molde N° | #30 | | #2 | | #6 | | |
| Número de Capas | 5 | | 5 | | 5 | | |
| Número de Golpes por Capa | 56 | | 25 | | 12 | | |
| | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo | |
| Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr) | 11238 | 11450 | 11295,5 | 11396,5 | 10549 | 11078,5 | |
| Peso del Molde (gr) | 6236,5 | 6236,5 | 6380 | 6380 | 6080,5 | 6080,5 | |
| Peso Muestra Húmeda (gr) | 5001,5 | 5213,5 | 4915,5 | 5016,5 | 4468,5 | 4998 | |
| Volumen de la Muestra (m3) | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | |
| Densidad Húmeda (kg/m3) | 2165,04 | 2256,81 | 2127,82 | 2171,54 | 1934,32 | 2163,53 | |
| Densidad Seca (kg/m3) | 1973,15 | 1978,52 | 1929,09 | 1862,65 | 1769,23 | 1819,58 | |
| CONTENIDO DE AGUA (Antes del Remojo) | | | | | | | |
| Tarro N° | 4 | T14 | 2 | I4 | A1 | 20 | |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 84,81 | 83,52 | 103,52 | 118 | 80,44 | 136,26 | |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 79,96 | 78,63 | 98,84 | 111,77 | 76,87 | 130,59 | |
| Peso del Agua (gr) | 4,85 | 4,89 | 4,68 | 6,23 | 3,57 | 5,67 | |
| Peso del Tarro (gr) | 29 | 29,4 | 52,3 | 52,7 | 38,5 | 70 | |
| Peso Muestra Seca (gr) | 50,96 | 49,23 | 46,54 | 59,07 | 38,37 | 60,59 | |
| Contenido de Humedad % | 9,52 | 9,93 | 10,06 | 10,55 | 9,30 | 9,36 | |
| Promedio Contenido de Humedad % | 9,73 | | 10,30 | | 9,33 | | |
| CONTENIDO DE AGUA (Después del Remojo) | | | | | | | |
| Tarro N° | PE1 | A7 | T14 | S1 | S5 | 8 | |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 107,95 | 96,9 | 90,25 | 117,36 | 116,35 | 107,97 | |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 100 | 89,84 | 81,67 | 106,73 | 106,18 | 99,19 | |
| Peso del Agua (gr) | 7,95 | 7,06 | 8,58 | 10,63 | 10,17 | 8,78 | |
| Peso del Tarro (gr) | 44,21 | 38,98 | 29,43 | 43,24 | 52,69 | 52,47 | |
| Peso Muestra Seca (gr) | 55,79 | 50,86 | 52,24 | 63,49 | 53,49 | 46,72 | |
| Contenido de Humedad % | 14,25 | 13,88 | 16,42 | 16,74 | 19,01 | 18,79 | |
| Promedio Contenido de Humedad % | 14,07 | | 16,58 | | 18,90 | | |

|  Universidad Católica de Cuenca | | FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL | | | | | |
|--|------------------|--|------------------|--------------------|------------------|--------------------|--|
| | | LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | | | | | |
| ENSAYO DE CBR | | | | | | | |
| PROYECTO: | TESIS | | MUESTRA: | ROOKAAZUL (5% CAL) | | | |
| Molde N° | #16 | | #3 | | #29 | | |
| Número de Capas | 5 | | 5 | | 5 | | |
| Número de Golpes por Capa | 56 | | 25 | | 12 | | |
| | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo | Antes del Remojo | Despues del Remojo | |
| Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr) | 11714,5 | 11870 | 12321 | 12428,5 | 11320,5 | 11544,5 | |
| Peso del Molde (gr) | 6362,5 | 6362,5 | 7268,5 | 7268,5 | 6358,5 | 6358,5 | |
| Peso Muestra Húmeda (gr) | 5352 | 5507,5 | 5052,5 | 5160 | 4962 | 5186 | |
| Volumen de la Muestra (m3) | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | 0,002310 | |
| Densidad Húmeda (kg/m3) | 2316,77 | 2384,08 | 2187,12 | 2233,66 | 2147,95 | 2244,91 | |
| Densidad Seca (kg/m3) | 2190,92 | 2170,51 | 2062,04 | 1989,96 | 2022,06 | 1973,05 | |
| CONTENIDO DE AGUA (Antes del Remojo) | | | | | | | |
| Tarro N° | 2 | P1 | K11 | A9 | 1 | 4 | |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 85,8 | 108,9 | 94,2 | 94,9 | 132,2 | 137,9 | |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 83,67 | 106,19 | 91,17 | 92,12 | 128,58 | 133,55 | |
| Peso del Agua (gr) | 2,13 | 2,71 | 3,03 | 2,78 | 3,62 | 4,35 | |
| Peso del Tarro (gr) | 43,33 | 62,54 | 43,78 | 43,67 | 67,64 | 66,74 | |
| Peso Muestra Seca (gr) | 40,34 | 43,65 | 47,39 | 48,45 | 60,94 | 66,81 | |
| Contenido de Humedad % | 5,28 | 6,21 | 6,39 | 5,74 | 5,94 | 6,51 | |
| Promedio Contenido de Humedad % | 5,74 | | 6,07 | | 6,23 | | |
| CONTENIDO DE AGUA (Después del Remojo) | | | | | | | |
| Tarro N° | # | 1A | A9 | 2 | 4 | K11 | |
| Peso Muestra Humeda + Tarro (gr) | 92,59 | 128,49 | 92,95 | 95,81 | 161,31 | 117,7 | |
| Peso Muestra Seca + Tarro (gr) | 86,93 | 121 | 87,56 | 90,1 | 149,74 | 108,84 | |
| Peso del Agua (gr) | 5,66 | 7,49 | 5,39 | 5,71 | 11,57 | 8,86 | |
| Peso del Tarro (gr) | 30,03 | 44,04 | 43,67 | 43,34 | 66,74 | 43,78 | |
| Peso Muestra Seca (gr) | 56,9 | 76,96 | 43,89 | 46,76 | 83 | 65,06 | |
| Contenido de Humedad % | 9,95 | 9,73 | 12,28 | 12,21 | 13,94 | 13,62 | |
| Promedio Contenido de Humedad % | 9,84 | | 12,25 | | 13,78 | | |



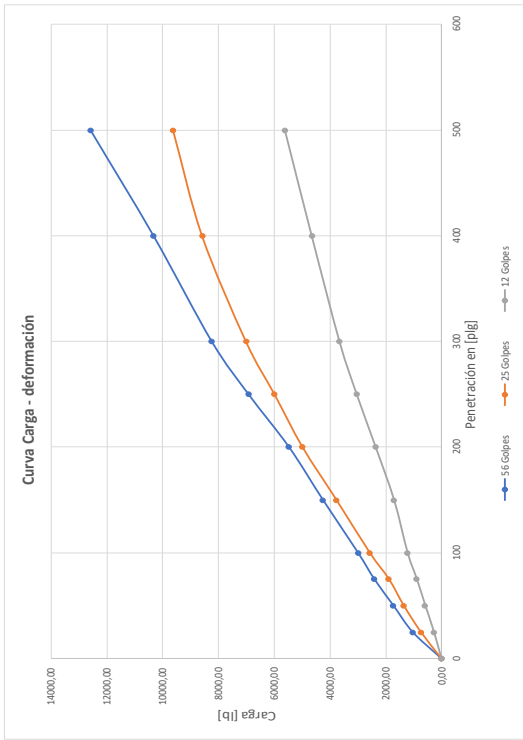
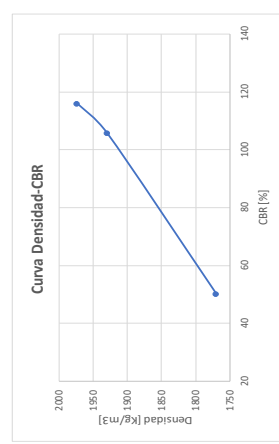
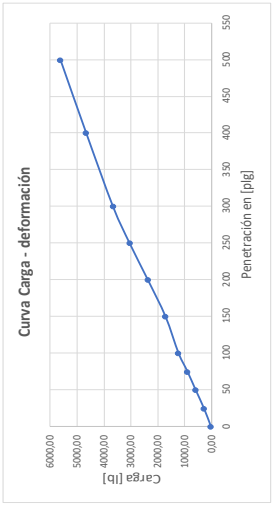
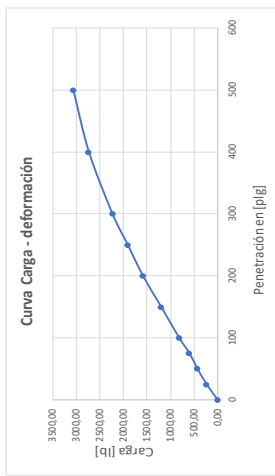
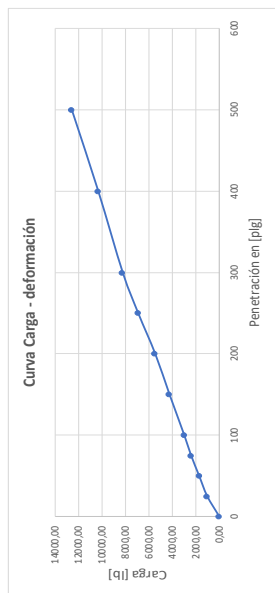
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL - LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

PROYECTO: TESIS MUESTRA: A.A.SUR (5% DE CAL)

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

LECTURAS DE PENETRACIÓN

| MOLDE 56 GOLPES | | | | | | | | | | MOLDE 25 GOLPES | | | | | | | | | | MOLDE 12 GOLPES | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------------|--------------|--------------------------------|---|---|-----|----------------------|-------------------|--------------|--------------------------------|---|---|-----|----------------------|-------------------|--------------|--------------------------------|---|---|-----------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Presiones lb/pulg ² | Presiones Corregidas lb/pulg ² | Presiones Estándar lb/pulg ² | CBR | penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Presiones lb/pulg ² | Presiones Corregidas lb/pulg ² | Presiones Estándar lb/pulg ² | CBR | penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Presiones lb/pulg ² | Presiones Corregidas lb/pulg ² | Presiones Estándar lb/pulg ² | CBR | | | | | | | | | |
| 0 | 0.00 | 20.29 | 6.46 | | | | 0 | 0.00 | 20.29 | 6.46 | | | | 0 | 0.00 | 20.29 | 6.46 | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 180.00 | 1047.53 | 333.44 | | | | 25 | 138.00 | 750.77 | 238.98 | | | | 25 | 46.00 | 282.81 | 90.02 | | | | | | | | | | | | |
| 50 | 300.00 | 1732.36 | 551.43 | | | | 50 | 235.00 | 1361.41 | 433.33 | | | | 50 | 100.00 | 590.98 | 185.11 | | | | | | | | | | | | |
| 75 | 420.00 | 2417.19 | 769.41 | | | | 75 | 328.00 | 1892.15 | 602.29 | | | | 75 | 153.00 | 893.45 | 284.39 | | | | | | | | | | | | |
| 100 | 522.00 | 2999.29 | 954.70 | 954.70 | 1000 | 95 | 448.00 | 2576.98 | 820.28 | 820.28 | 1000 | 1000 | 82 | 211.00 | 1224.45 | 389.75 | 389.75 | 1000 | 1000 | 39 | | | | | | | | | |
| 150 | 742.00 | 4254.81 | 1354.35 | | | | 150 | 657.00 | 3769.72 | 1199.94 | | | | 150 | 296.00 | 1709.53 | 544.16 | | | | | | | | | | | | |
| 200 | 955.00 | 5470.38 | 1741.28 | 1741.28 | 1500 | 116 | 200 | 870.00 | 4985.29 | 1586.87 | 1500 | 106 | 200 | 411.00 | 2365.83 | 753.07 | 753.07 | 1500 | 1500 | 50 | | | | | | | | | |
| 250 | 1209.00 | 6919.93 | 2202.68 | | | | 250 | 1046.00 | 5989.71 | 1906.58 | | | | 250 | 530.00 | 3044.95 | 969.24 | | | | | | | | | | | | |
| 300 | 1440.00 | 8238.23 | 2622.31 | 2622.31 | 1900 | 138 | 300 | 1225.00 | 7011.24 | 2231.75 | 1900 | 117 | 300 | 638.00 | 3661.29 | 1165.43 | 1165.43 | 1900 | 1900 | 61 | | | | | | | | | |
| 400 | 1805.00 | 10521.24 | 3285.35 | | | | 400 | 1506.00 | 8580.64 | 2731.30 | | | | 400 | 813.00 | 4654.39 | 1481.51 | | | | | | | | | | | | |
| 500 | 2200.00 | 12575.47 | 4002.90 | | | | 500 | 1882.00 | 9619.30 | 3061.92 | | | | 500 | 980.00 | 5613.05 | 1786.69 | | | | | | | | | | | | |

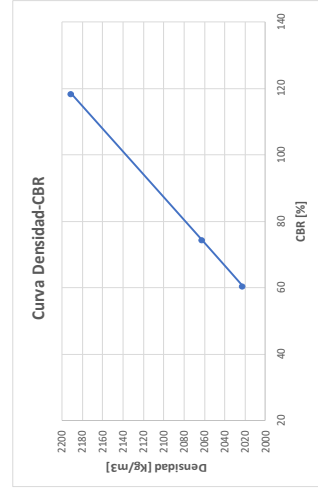
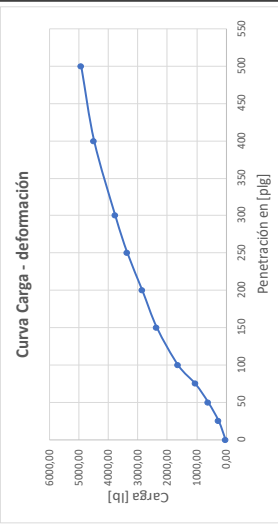
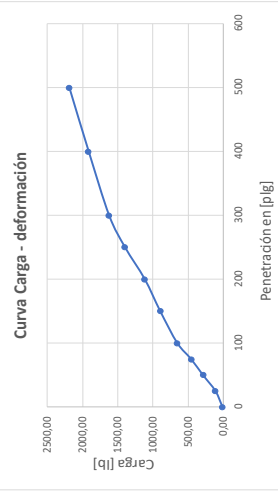
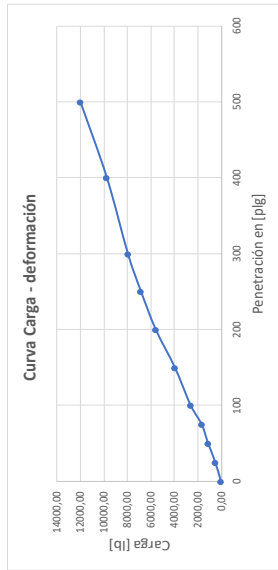


| CBR - Áridos y Agregados del Sur (5% de Cal) | | |
|--|------------------------------------|---------|
| Golpes | Densidad Seca (kg/m ³) | CBR % |
| 56 | 1973.15 | 116 |
| 25 | 1929.09 | 106 |
| 12 | 1769.23 | 50 |
| Densidad Seca (kg/m ³) | | 1973.15 |
| CBR | | 116 |



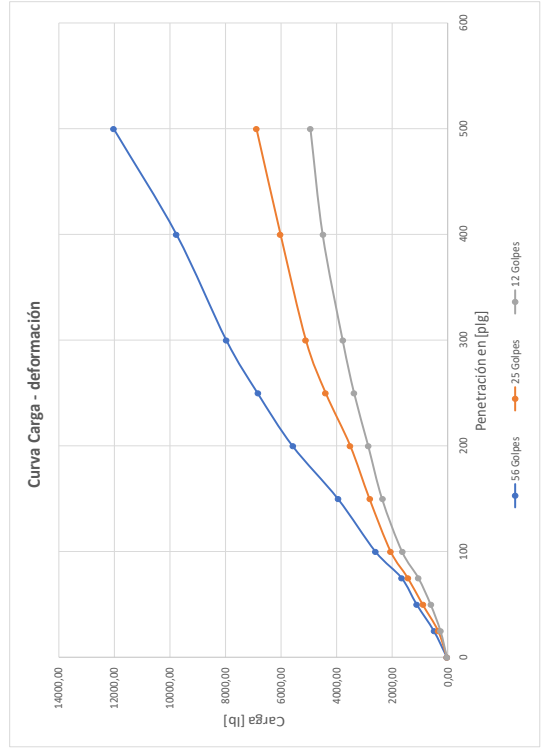
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL - LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
 PROYECTO: TESIS MUESTRA: ROCKAZUL (5% DE CAL)
 ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

| LECTURAS DE PENETRACIÓN | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------|--------------|---|---|-----------------|----------------------|-------------------|--------------|---|---|-----|----------------------|-------------------|--------------|---|---|-----|
| MOLDE 56 GOLPES | | | | | MOLDE 25 GOLPES | | | | | MOLDE 12 GOLPES | | | | | | | |
| Penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Presiones Corregidas lb/pulg ² | Presiones Estándar lb/pulg ² | CBR | penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Presiones Corregidas lb/pulg ² | Presiones Estándar lb/pulg ² | CBR | penetración Pulgadas | Lectura de Cargas | Carga Libras | Presiones Corregidas lb/pulg ² | Presiones Estándar lb/pulg ² | CBR |
| 0 | 0.00 | 20.29 | 6.46 | | | 0 | 0.00 | 20.29 | 6.46 | | | 0 | 0.00 | 20.29 | 6.46 | | |
| 25 | 83.00 | 493.96 | 157.23 | | | 25 | 56.00 | 339.88 | 108.19 | | | 25 | 41.00 | 254.27 | 80.94 | | |
| 50 | 191.00 | 1110.31 | 355.42 | | | 50 | 154.00 | 899.15 | 286.21 | | | 50 | 103.00 | 608.10 | 193.56 | | |
| 75 | 286.00 | 1652.46 | 526.00 | | | 75 | 247.00 | 1429.89 | 455.15 | | | 75 | 180.00 | 1047.53 | 333.44 | | |
| 100 | 451.00 | 2594.10 | 825.73 | 1000 | 83 | 100 | 355.00 | 2046.24 | 651.34 | 1000 | 65 | 100 | 283.00 | 1635.34 | 520.55 | 1000 | 52 |
| 150 | 688.00 | 3946.64 | 1256.25 | | | 150 | 489.00 | 2810.96 | 894.76 | | | 150 | 409.00 | 2354.41 | 749.43 | | |
| 200 | 974.00 | 5578.81 | 1775.79 | 1500 | 118 | 200 | 610.00 | 3501.50 | 1114.56 | 1500 | 74 | 200 | 496.00 | 2850.91 | 907.47 | 1500 | 60 |
| 250 | 1194.00 | 6834.33 | 2175.43 | | | 250 | 765.00 | 4386.07 | 1396.13 | | | 250 | 585.00 | 3388.83 | 1069.15 | | |
| 300 | 1391.00 | 7958.59 | 2533.30 | 1900 | 133 | 300 | 890.00 | 5099.43 | 1623.20 | 1900 | 85 | 300 | 637.00 | 3769.72 | 1199.94 | 1900 | 63 |
| 400 | 1705.00 | 9750.55 | 3103.70 | | | 400 | 1050.00 | 6012.54 | 1913.85 | | | 400 | 783.00 | 4488.79 | 1428.83 | | |
| 500 | 2101.00 | 12010.49 | 3823.06 | | | 500 | 1202.00 | 6879.98 | 2189.97 | | | 500 | 860.00 | 4928.22 | 1568.70 | | |



| Golpes | Densidad Seca (kg/m³) | CBR % |
|--------|-----------------------|-------|
| 56 | 2190.92 | 118 |
| 25 | 2062.04 | 74 |
| 12 | 2022.06 | 60 |

| Densidad Seca (kg/m³) | 2190.9 |
|-----------------------|--------|
| CBR | 118 |



Anexo 12

Diseño del pavimento flexible, para un W18 o Nt de 500000 con base granular en estado natural, mediante el método AASHTO.

| AASHTO | |
|---|--------------------------------|
| DATOS IMPUESTOS: | |
| Nt | 500000 |
| Temperatura | 15 °C |
| CBR subrasate | 6 |
| Ecuación básica de la AASHTO para determinar el número estructural de tránsito (SN) | |
| $\log(Nt) = Zr * So + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \left[\frac{\log\left(\frac{\Delta IPS}{4.2 - 1.5I}\right)}{0.40 + \left(\frac{1094}{(SN+1)^{0.19}}\right)} \right] + 2.32 * \log(MR) - 8.07$ | |
| SOLUCIÓN: | |
| R (Colectoras-Urbana) | |
| R (%) | 80% |
| | Colectora-Urbana |
| Cuadro 28. Niveles de confiabilidad sugeridos para varios tipos de carreteras | |
| TIPO DE CARRETERA | NIVEL DE CONFIABILIDAD, R(%) |
| | Urbana Interurbana |
| Autopistas y carreteras importantes | 85 - 99,9 80 - 99,9 |
| Arterias principales | 80 - 99 75 - 96 |
| Colectoras | 80 - 95 65 - 90 |
| Locales | 50 - 80 50 - 80 |
| Zr (Confiabilidad de R%) | |
| Zr | -0,841 |
| | Confiabilidad 80% |
| Cuadro 29. Desviación normal estándar, Zr | |
| Confiabilidad, % | Desviación normal estándar, Zr |
| 50 | 0.000 |
| 60 | -0.253 |
| 70 | -0.524 |
| 75 | -0.674 |
| 80 | -0.841 |
| 85 | -1.037 |
| 90 | -1.282 |
| 91 | -1.340 |
| 92 | -1.405 |
| 93 | -1.476 |
| 94 | -1.555 |
| 95 | -1.645 |
| 96 | -1.751 |
| 97 | -1.881 |
| 98 | -2.054 |
| 99 | -2.327 |
| 99.9 | -3.090 |
| 99.99 | -3.750 |
| So (contrucción nueva) | |
| So | 0,45 |
| | Contrucción nueva |
| Cuadro 30. Error normal combinado para pavimentos flexibles, So | |
| Proyecto de pavimento | Desviación estándar, So |
| Rangos para pavimentos flexibles | 0,40 - 0,50 |
| Contrucción nueva | 0,45 |
| Sobrecapas | 0,50 |
| ΔIPS | |
| Po | 4,2 |
| Pt | 2,2 |
| ΔIPS | 2 |

| | | | | |
|---------------------------|---------------------------|---|---------------------------|-------------------|
| MR (CBR de la Subrasante) | 9000 lb/pulg ² | Módulo de resiliencia en función del CBR subrasante | MR = 1500 x (CBR) | CBR < 10% |
| | | | MR = 3000 x (CBR) | 10% - CBR < 20% |
| | | | MR = 1500 x Ln(CBR) + 241 | Suelos granulares |

| | | | | |
|-------|---|-----------------------|---|------------|
| 5,699 | $\frac{5,699}{SN \text{ tránsito} = 2,637}$ | Valor del SN tránsito | $\log(Nt) = Zr + S_o + 9.36 \cdot \log(SN + 1) - 0.20 + \left[\frac{\log\left(\frac{MR}{1500}\right)}{\left(\frac{1.054}{SN+1}\right)^{0.139}} \right] + 2.32 \cdot \log(MR) - 8.07$ | Ecuación 1 |
|-------|---|-----------------------|---|------------|

| | | | | | |
|---|-----|---|----------------|-----|-------|
| Coefficiente Estructural de la Base (a2) en función del CBR de la base granular Base granular (Áridos y Agregados del Suro) | | Coefficiente Estructural de la Base (a2) en función del CBR de la base granular Base granular (Rocks/arcad) | | | |
| CBR | a2 | CBR | a2 | | |
| Estado natural | 86 | 0.133 | Estado natural | 90 | 0.135 |
| 2.5% de Cal | 100 | 0.140 | 2.5% de Cal | 107 | 0.143 |
| 3.5% de Cal | 110 | 0.144 | 3.5% de Cal | 111 | 0.144 |
| 5% de Cal | 116 | 0.146 | 5% de Cal | 118 | 0.147 |

| | | | | |
|--|--|---|--|------------|
| Coefficientes Estructurales del pavimento flexible CBR base 86.00 | | Coefficientes Estructurales (ai) (cm) a1 0.14 cm $ai = 0.032 \cdot (\%CBR \text{ de la base})^{0.32}$ | | Ecuación 5 |
| a2 0.133 in 0.0524 cm | | a3 0.040 cm | | |

| | | |
|--|---|-------------------|
| Coefficiente de capas - Diseño estructural de pavimentos flexibles - Método AASHTO 93 | | |
| CLASE DE MATERIAL | NORMAS | Coefficiente (cm) |
| CAPA DE SUPERFICIE | | |
| Concreto Asfáltico | Estabilidad Marshall 1000-1800 lbs | 0.134 - 0.173 |
| Arena Asfáltica | Estabilidad Marshall 500-800 lbs | 0.079 - 0.118 |
| Carpetas Bituminosa mezclada en el camino | Estabilidad Marshall 300-600 lbs | 0.059 - 0.098 |
| CAPA DE BASE | | |
| Agregados triturados, graduados uniformemente | PI 0-4, CBR > 100% | 0.047 - 0.055 |
| Grava graduada uniformemente | PI 0-4, CBR 30-80% | 0.028 - 0.051 |
| Concreto Asfáltico | Estabilidad de Marshall 1000-1800 lbs | 0.098 - 0.138 |
| Arena Asfáltica | Estabilidad de Marshall 500-800 lbs | 0.059 - 0.098 |
| Relleno grueso estabilizado con cemento | Resistencia a la compresión: 28-46 kg/cm ² | 0.079 - 0.136 |
| Agregado grueso estabilizado con cal | Resistencia a la compresión: 28-46 kg/cm ² | 0.059 - 0.118 |
| Suelo-cemento | Resistencia a la compresión: 18-32 kg/cm ² | 0.047 - 0.079 |
| CAPA DE SUB-BASE | | |
| Arena - Grava graduada uniformemente | PI 0-4, CBR > 30% | 0.035 - 0.043 |
| Suelo - Cemento | Resistencia a la compresión: 18-32 kg/cm ² | 0.059 - 0.071 |
| Suelo - Cal | Resistencia a la compresión: 7 kg/cm ² | 0.059 - 0.071 |
| MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE | | |
| Arena o suelo seleccionado | PI 0-10 | 0.020 - 0.035 |
| Suelo con cal | 3% mínimo de cal en peso del suelo | 0.028 - 0.039 |
| TRATAMIENTO SUPERFICIAL BITUMINOSO | | |
| Triple riego | | *0.40 |
| Doble riego | | *0.25 |
| Simple riego | | *0.15 |

*Usar estos valores para los diferentes tipos de tratamientos bituminosos, sin calcular espesores

| | | | | |
|---------------|-------------------|--|-------------------------------|--------------------------|
| En base al Nt | 50000 | Cuadro 40. Espesores mínimos recomendados por la AASHTO | | |
| | | Tránsito de diseño (Ejes equivalentes de 18,000 lb) | Concreto Asfáltico (pulgadas) | Base Granular (pulgadas) |
| d1 | 2.5 in 6.4 cm | Menor a 50,000 | 1.0 o tratamiento superficial | 4.0 |
| | | 50,001 - 150,000 | 2.0 | 4.0 |
| | | 150,001 - 500,000 | 2.5 | 4.0 |
| d2 | 6.5 in 16.5 cm | 500,001 - 2,000,000 | 3.0 | 6.0 |
| | | 2,000,001 - 7,000,000 | 3.5 | 6.0 |
| | | Mayor a 7,000,000 | 4.0 | 6.0 |
| d3 | 8.7 in 22.1 cm | | | |

| | | | | | |
|-------------------------------------|-------|---|-------------|-------------|-------------|
| Coefficiente de drenaje (mi) | | Cuadro 39. Valores de m recomendados para corregir los coeficientes estructurales de bases y subbases granulares | | | |
| Exposición a la humedad | 20% | Porcentaje de tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a grados de humedad próximos a la saturación | | | |
| Característica de drenaje | Bueno | Menos del 1% 1 - 5% 5 - 25% Más de 25% | | | |
| | | Ejecente | 1.40 - 1.35 | 1.35 - 1.30 | 1.30 - 1.20 |
| | | Bueno | 1.35 - 1.25 | 1.25 - 1.15 | 1.15 - 1.00 |
| | | Regular | 1.25 - 1.15 | 1.15 - 1.00 | 1.00 - 0.80 |
| m2 | 1 | Pobre | 1.15 - 1.05 | 1.05 - 0.80 | 0.80 - 0.60 |
| | | Muy malo | 1.05 - 0.95 | 0.95 - 0.75 | 0.75 - 0.40 |
| m3 | 1 | | | | |

| | | | | |
|-----------------|------|-------------------------|---|------------|
| SN estructura = | 2.64 | Valor del SN estructura | $SN \text{ estructura} = a1 \cdot d1 + a2 \cdot d2 + m2 + a3 \cdot d3 \cdot m3$ | Ecuación 2 |
|-----------------|------|-------------------------|---|------------|

| | | | | |
|----------------------|------|---|---------------|--|
| COMPROBACIÓN: | | | | |
| SN tránsito | 2.64 | ≤ | SN estructura | 2.64 |
| | | | SI CUMPLE | $SN \text{ tránsito} \leq SN \text{ estructura del pavimento}$ |
| | | | | Ecuación 3 |

DIMENSIONES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

| | |
|-----------------------|------|
| Capa Asfáltica (cm) | 6,4 |
| Capa Base (cm) | 16,5 |
| Capa Sub-base (cm) | 22,1 |

Anexo 13

Diseño del pavimento flexible, para un W18 o Nt de 500000 con base granular en estado natural, mediante el método INVIAS.

| INVIAS | | | | | | | | | |
|---|---|---|--|-----------------------|-----|------------------|------|----------------------|------|
| DATOS DE INPUTS: | | | | | | | | | |
| Ni | 500000 | | | | | | | | |
| Temperatura | 15 °C | | | | | | | | |
| CBR subrasante | 6 | | | | | | | | |
| Exposición a la humedad | 15% | INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología) | Ecuación básica de la AASHTO para determinar el número estructural de tránsito (SN) que usa el método INVIAS | | | | | | |
| Precipitación (mm/año) | 551.14 | | | | | | | | |
| $\log(Nt) = Zr + So + 9.36 + \log(SN + 1) - 0.20 + \left[\frac{\log\left(\frac{1000}{2.45 + (2207 + 379)Zr}\right)}{0.40 + (2207 + 379)Zr} \right] + 2.32 + \text{Log}(MR) - 0.07$ | | | | | | | | | |
| SOLUCIÓN: | | | | | | | | | |
| Zr (variabilidad de W%) | 90% | Desviación normal estándar (Zr), INVIAS | | | | | | | |
| R | -1.282 | Zr | 90% | | | | | | |
| Cuadro 29. Desviación normal estándar, Zr | | | | | | | | | |
| Confiablez, % | | Desviación normal estándar, Zr | | | | | | | |
| 50 | 0.000 | 60 | -0.253 | | | | | | |
| 60 | -0.524 | 70 | -0.524 | | | | | | |
| 70 | -0.674 | 80 | -0.844 | | | | | | |
| 80 | -1.037 | 90 | -1.282 | | | | | | |
| 90 | -1.645 | 95 | -1.645 | | | | | | |
| 95 | -1.960 | 96 | -1.751 | | | | | | |
| 96 | -2.054 | 97 | -1.881 | | | | | | |
| 97 | -2.104 | 98 | -2.054 | | | | | | |
| 98 | -2.327 | 99 | -2.327 | | | | | | |
| 99 | -3.750 | 99.99 | -3.750 | | | | | | |
| Error normal combinado para pavimentos flexibles (So), INVIAS | | | | | | | | | |
| So | 0.44 | | | | | | | | |
| Error normal combinado para pavimentos flexibles (So), INVIAS | | | | | | | | | |
| So | 0.44 | | | | | | | | |
| Método de resistencia en función del CBR subrasante, INVIAS | | | | | | | | | |
| MR (CBR de la Subrasante) | 600 kg/cm2 8533.8 lb/pulg2 | $MR \left(\frac{P_{50}}{cm^2} \right) = 100 \cdot CBR$ Ecuación 4 | | | | | | | |
| 5.699 | $\frac{6000}{SN \text{ tránsito}} = 2.88$ | Valor del SN tránsito $\log(Nt) = Zr + So + 9.36 + \log(SN + 1) - 0.20 + \left[\frac{\log\left(\frac{1000}{2.45 + (2207 + 379)Zr}\right)}{0.40 + (2207 + 379)Zr} \right] + 2.32 + \text{Log}(MR) - 0.07$ Ecuación 1 | | | | | | | |
| $SN \text{ estructura} = a1 \cdot d1 + a2 \cdot d2 \cdot m2 + a3 \cdot d3 \cdot m3$ | | | | | | | | | |
| Coeficientes Estructurales del pavimento flexible | | Valores de coeficiente estructurales, (a1/a2/a3) | | | | | | | |
| Temperatura | 15 °C | | | | | | | | |
| Coeficientes Estructurales (a1) (pulg) | | Mezcla Densa en Caliente (MDC) | | | | | | | |
| a1 | 0.47 0.146 cm | MDC a = 0.44 | TMAP = 15 °C | | | | | | |
| a2 | 0.14 0.055 cm | MDC a = 0.37 | 15 °C ≤ TMAP < 20 °C | | | | | | |
| a3 | 0.12 0.047 cm | MDC a = 0.30 | 20 °C ≤ TMAP < 30 °C | | | | | | |
| | | MDF a = 0.44 | TMAP = 15 °C | | | | | | |
| | | MDF a = 0.8 + 0.17 | 15 °C ≤ TMAP < 20 °C | | | | | | |
| | | MDF a = 0.8 + 0.33 | 20 °C ≤ TMAP < 30 °C | | | | | | |
| | | BEE-1 a = 0.20 | Agregado grueso | | | | | | |
| | | BEE-2 a = 0.20 | Agregado medio | | | | | | |
| | | BEE-3 a = 0.14 | Suelto | | | | | | |
| | | BEC-1 a = 0.16 | A-1, A, A-1-B | | | | | | |
| | | BEC-2 a = 0.14 | A-1, A-1-B, A-2-5 | | | | | | |
| | | BEC-3 a = 0.13 | A-2-6, A-2-7, A-4, A-5, A-6, A-7 | | | | | | |
| | | BEG-1, BEG-2 a = 0.14 | — | | | | | | |
| | | BEG-3 a = 0.13 | — | | | | | | |
| | | BEG-1, BEG-2 a = 0.12 | — | | | | | | |
| | | BEG-3 a = 0.13 | — | | | | | | |
| Cuadro 64. Valores del coeficiente de drenaje (m) | | | | | | | | | |
| Precipitación (mm) | | Precipitación (mm/año) | | | | | | | |
| 551.14 | | 551.14 | | | | | | | |
| m2 | | m2 | | | | | | | |
| m3 | | m3 | | | | | | | |
| Valor del SN estructura | | | | | | | | | |
| SN estructura | 2.55 | $SN \text{ estructura} = a1 \cdot d1 + a2 \cdot d2 \cdot m2 + a3 \cdot d3 \cdot m3$ Ecuación 2 | | | | | | | |
| COMPROBACIONES: | | | | | | | | | |
| SN tránsito | 2.88 | SN estructura | 2.55 | | | | | | |
| $SN \text{ tránsito} \geq SN \text{ estructura}$ SI CUMPLE | | | | | | | | | |
| $SN \text{ tránsito} \geq SN \text{ estructura del pavimento}$ Ecuación 3 | | | | | | | | | |
| <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;">Capa Asfáltica (cm)</td> <td style="width: 20%;">6,4</td> </tr> <tr> <td>Capa Base (cm)</td> <td>16,0</td> </tr> <tr> <td>Capa Sub-base (cm)</td> <td>22,1</td> </tr> </table> | | | | Capa Asfáltica (cm) | 6,4 | Capa Base (cm) | 16,0 | Capa Sub-base (cm) | 22,1 |
| Capa Asfáltica (cm) | 6,4 | | | | | | | | |
| Capa Base (cm) | 16,0 | | | | | | | | |
| Capa Sub-base (cm) | 22,1 | | | | | | | | |

Anexo 14

Diseño del pavimento flexible, para un W18 o Nt de 1'000000 con base granular en estado natural, mediante el método AASHTO.

AASHTO DATOS IMPUESTOS:

Nt 1000000
Temperatura 15 °C
CBR subrasate 6

Ecuacon básica de la AASHTO para determinar el número estructural de tránsito (SN)

$$\log(Nt) = Zr * So + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \left[\frac{\log\left(\frac{\Delta FPS}{4.2 + 1.8}\right)}{0.40 + \left(\frac{1.094}{(SN+1)^{0.19}}\right)} \right] + 2.32 * \log(MR) - 8.07$$

SOLUCIÓN:

R (Colectoras-Urbana)
R (%) 80%
Colectora-Urbana

Cuadro 28. Niveles de confiabilidad sugeridos para varios tipos de carreteras

| TIPO DE CARRETERA | NIVEL DE CONFIABILIDAD, R(%) | |
|-------------------------------------|------------------------------|-------------|
| | Urbana | Interurbana |
| Autopistas y carreteras importantes | 85 - 99,9 | 80 - 99,9 |
| Arterias principales | 80 - 99 | 75 - 96 |
| Colectoras | 80 - 95 | 65 - 90 |
| Locales | 50 - 80 | 50 - 80 |

Zr (Confiabilidad de R%)
Zr -0,841
Confiabilidad 80%

Cuadro 29. Desviación normal estándar, Zr

| Confiabilidad, % | Desviación normal estándar, Zr |
|------------------|--------------------------------|
| 50 | 0.000 |
| 60 | -0.253 |
| 70 | -0.524 |
| 75 | -0.674 |
| 80 | -0.841 |
| 85 | -1.037 |
| 90 | -1.282 |
| 91 | -1.340 |
| 92 | -1.405 |
| 93 | -1.476 |
| 94 | -1.555 |
| 95 | -1.645 |
| 96 | -1.751 |
| 97 | -1.881 |
| 98 | -2.054 |
| 99 | -3.327 |
| 99.99 | -3.750 |

So (contruccion nueva)
So 0,45
Construcción nueva

Cuadro 30. Error normal combinado para pavimentos flexibles, So

| Proyecto de pavimento | Desviación estándar, So |
|----------------------------------|-------------------------|
| Rangos para pavimentos flexibles | 0,40 - 0,50 |
| Construcción nueva | 0,45 |
| Sobrecapas | 0,50 |

ΔIPS
Po 4,2
Pt 2,2
ΔIPS 2

| | | |
|---------------------------|---------------------------|---|
| MR (CBR de la Subrasante) | 9000 lb/pulg ² | Módulo de resiliencia en función del CBR subrasante |
| MR | | MR = 1500 x (CBR) |
| | | MR = 3000 x (CBR) |
| | | MR = 1500 x Ln(CBR) + 241 |
| | | CBR < 10% |
| | | 10% < CBR < 20% |
| | | Suelos granulares |

6,000 $\frac{5,998}{SN \text{ tránsito} = 2,942}$

$$\log(Nt) = Zr * So + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \left[\frac{\log\left(\frac{\Delta FPS}{42-2.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1.984}{(SN+1)^{3.18}}\right)} \right] + 2.32 * \log(MR) - 8.07$$

Ecuación 1

| Coeficiente Estructural de la Base (a2) en función del CBR de la base granular | | | | | |
|--|-----|----------------------------|----------------|-----|--------|
| Base granular (Áridos y Agregados del Star) | | Base granular (Rookasazal) | | | |
| CBR | a2 | CBR | a2 | | |
| Estado natural | 86 | 0,133 | Estado natural | 90 | 0,135 |
| 2.5% de Cal | 100 | 0,140 | 2.5% de Cal | 107 | 0,143 |
| 3.5% de Cal | 110 | 0,1440 | 3.5% de Cal | 111 | 0,1444 |
| 5% de Cal | 116 | 0,146 | 5% de Cal | 118 | 0,147 |

$$SN \text{ estructura} = a1 * d1 + a2 * d2 + m2 + a3 * d3 + m3$$

Coefficientes Estructurales del pavimento flexible

| | |
|---------------------------------------|----|
| CBR base | 86 |
| Coefficientes Estructurales (ai) (cm) | |

a1 $0,14 \text{ cm}$
 $a1 = 0.032 * (\% \text{ CBR de la base})^{0.32}$

Ecuación 5

| | |
|----|----------|
| a2 | 0,133 in |
| | 0,052 cm |
| a3 | 0,040 cm |

Coefficiente de capas - Diseño estructural de pavimentos flexibles - Método AASHTO 93

| CLASE DE MATERIAL | NORMAS | Coefficiente (cm) |
|---|---|-------------------|
| CAPA DE SUPERFICIE | | |
| Concreto Asfáltico | Estabilidad Marshall 1000-1800 lbs | 0.134 - 0.173 |
| Arena Asfáltica | Estabilidad Marshall 500-800 lbs | 0.079 - 0.118 |
| Carpetas Bituminosa mezclada en el camino | Estabilidad Marshall 300-600 lbs | 0.059 - 0.098 |
| CAPA DE BASE | | |
| Agregados triturados, graduados uniformemente | PI 0-4, CBR > 100% | 0.047 - 0.055 |
| Grava graduada uniformemente | PI 0-4, CBR 30-100% | 0.028 - 0.051 |
| Concreto Asfáltico | Estabilidad de Marshall 1000-1800 lbs | 0.098 - 0.138 |
| Arena Asfáltica | Estabilidad de Marshall 500-800 lbs | 0.059 - 0.098 |
| Relleno grueso estabilizado con cemento | Resistencia a la compresión: 28-46 kg/cm ² | 0.079 - 0.136 |
| Agregado grueso estabilizado con cal | Resistencia a la compresión: 28-46 kg/cm ² | 0.059 - 0.118 |
| Suelo-cemento | Resistencia a la compresión: 18-32 kg/cm ² | 0.047 - 0.079 |
| CAPA DE SUB-BASE | | |
| Arena - Grava graduada uniformemente | PI 0-6, CBR > 30% | 0.035 - 0.043 |
| Suelo - Cemento | Resistencia a la compresión: 18-32 kg/cm ² | 0.059 - 0.071 |
| Suelo - Cal | Resistencia a la compresión: 7 kg/cm ² | 0.059 - 0.071 |
| MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE | | |
| Arena o suelo seleccionado | PI 0-10 | 0.020 - 0.035 |
| Suelo con cal | 3% mínimo de cal en peso del suelo | 0.028 - 0.039 |
| TRATAMIENTO SUPERFICIAL BITUMINOSO | | |
| Triple riego | | 0.40 |
| Doble riego | | 0.25 |
| Simple riego | | 0.15 |

| En base al Nt | 1000000 | Espesores de las capas |
|---------------|---------|------------------------|
| d1 | | 3 in 7,6 cm |
| d2 | | 7,5 in 19,1 cm |
| d3 | | 9,1 in 23,1 cm |

Cuadro 40. Espesores mínimos recomendados por la AASHTO

| Tránsito de diseño (Ejes equivalentes de 18,000 lb) | Concreto Asfáltico (pulgadas) | Base Granular (pulgadas) |
|---|-------------------------------|--------------------------|
| Menor a 50,000 | 1.0 o tratamiento superficial | 4.0 |
| 50,001 - 150,000 | 2.0 | 4.0 |
| 150,001 - 500,000 | 2.5 | 4.0 |
| 500,001 - 2,000,000 | 3.0 | 6.0 |
| 2,000,001 - 7,000,000 | 3.5 | 6.0 |
| Mayor a 7,000,000 | 4.0 | 6.0 |

Coefficiente de drenaje (mi)

| Exposición a la humedad | 20% |
|---------------------------|-------|
| Característica de drenaje | Bueno |
| m2 | 1 |
| m3 | 1 |

Cuadro 39. Valores de m recomendados para corregir los coeficientes estructurales de bases y subbases granulares

| Características del drenaje | Porcentaje de tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a grados de humedad próximos a la saturación | | |
|-----------------------------|---|-------------|-------------|
| | Menos del 1% | 1 - 5% | Más de 25% |
| Ejecente | 1.40 - 1.35 | 1.35 - 1.30 | 1.30 - 1.20 |
| Bueno | 1.35 - 1.25 | 1.25 - 1.15 | 1.15 - 1.00 |
| Regular | 1.25 - 1.15 | 1.15 - 1.00 | 1.00 - 0.80 |
| Pobre | 1.15 - 1.05 | 1.05 - 0.80 | 0.80 - 0.60 |
| Muy malo | 1.05 - 0.95 | 0.95 - 0.75 | 0.75 - 0.40 |

Valor del SN estructura

SN estructura = 2,99

$$SN \text{ estructura} = a1 * d1 + a2 * d2 + m2 + a3 * d3 + m3$$

Ecuación 2

COMPROBACIÓN:

SN tránsito 2,94 ≤ SN estructura 2,99 SI CUMPLE

$$SN \text{ tránsito} \leq SN \text{ estructura del pavimento}$$

Ecuación 3

DIMENSIONES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

| | |
|-----------------------|------|
| Capa Asfáltica (cm) | 7,6 |
| Capa Base (cm) | 19,1 |
| Capa Sub-base (cm) | 23,1 |

Anexo 15

Diseño del pavimento flexible, para un W18 o Nt de 1'000000 con base granular en estado natural, mediante el método INVIAS.

| INVIAS DATOS IMPUESTOS: | | | |
|---|--|---|--|
| Nt | 1000000 | | |
| Temperatura | 15 °C | | |
| CBR subrasante | 6 | | |
| Exposición a la humedad | 15% | | |
| Precipitación (mm/año) | 551,14 | INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología) | Ecuación básica de la AASHTO para determinar el número estructural de tránsito (SN) que usa el método INVIAS |
| $\log(Nr) = Zr + So + 9.36 + \log(SN + 1) - 0.20 + \left[\frac{\log\left(\frac{MR}{100}\right)}{0.40 + \frac{1}{(2.2)^{0.75} + 2.75}} \right] + 2.32 \cdot \log(MR) - 8.07$ | | | |
| SOLUCIÓN: | | | |
| Zr (Confianza de R%) | | Desviación normal estándar (Zr), INVIAS | |
| R | 90% | Zr | 90% |
| Zr | -1.282 | | |
| Cuadro 29. Desviación normal estándar, Zr | | | |
| Confianza, % | Desviación normal estándar, Zr | | |
| 50 | 0.000 | | |
| 60 | -0.253 | | |
| 70 | -0.524 | | |
| 75 | -0.674 | | |
| 80 | -0.841 | | |
| 85 | -1.037 | | |
| 90 | -1.282 | | |
| 91 | -1.340 | | |
| 92 | -1.405 | | |
| 93 | -1.476 | | |
| 94 | -1.555 | | |
| 95 | -1.645 | | |
| 96 | -1.741 | | |
| 97 | -1.841 | | |
| 98 | -1.944 | | |
| 99 | -2.327 | | |
| 99.99 | -3.750 | | |
| So (estructura nueva) | | Error normal combinado para pavimentos flexibles (So), INVIAS | |
| So | 0.44 | So | 0.44 |
| Pv | | Error normal combinado para pavimentos flexibles (So), INVIAS | |
| ΔIPS | 4.2 | Pv | 4.2 |
| Pv | 2 | PI | 2.1 |
| ΔIPS | 2.2 | | |
| MR (CBR de la Subrasante) | | Módulo de resiliencia en función del CBR subrasante, INVIAS | |
| MR | 600 kg/cm ² 8533.8 lbf/pulg ² | $MR \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = 100 \cdot CBR$ Ecuación 4 | |
| 0.000 | $\frac{6.0000}{SN \text{ tránsito} = 2.85}$ | Valor del SN tránsito | |
| $\log(Nr) = Zr + So + 9.36 + \log(SN + 1) - 0.20 + \left[\frac{\log\left(\frac{MR}{100}\right)}{0.40 + \frac{1}{(2.2)^{0.75} + 2.75}} \right] + 2.32 \cdot \log(MR) - 8.07$ Ecuación 1 | | | |
| $SN \text{ estructura} = a1 \cdot d1 + a2 \cdot d2 + a3 \cdot d3 + m3$ | | | |
| Temperatura | | Valores de coeficiente estructurales, (a1/pulg) | |
| 15 °C | | | |
| Coeficientes Estructurales del pavimento flexible | | | |
| Coeficientes Estructurales (a1) (pulg) | | | |
| a1 | 0.37 pulg 0.146 cm | Mezcla Densa en Caliente (MDC) | MDC a1 = 0.44 MDC a1 = 0.37 MDC a1 = 0.30 |
| a2 | 0.14 pulg 0.055 cm | Mezcla Densa en Frío (MDF) | MDF a1 = 0.8 - 0.44 MDF a1 = 0.8 - 0.37 MDF a1 = 0.8 - 0.33 |
| a3 | 0.12 pulg 0.047 cm | Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica (BEE) | BEE-1 a1 = 0.20 BEE-2 a1 = 0.20 BEE-3 a1 = 0.14 |
| | | Base Estabilizada con Cemento (BEC) | BEC-1 a1 = 0.16 BEC-2 a1 = 0.14 BEC-3 a1 = 0.13 |
| | | Base Granular (BG) | BG-1, BG-2 a1=0.14 |
| | | Subbase Granular (SG) | SG-1, SG-2 a1=0.12 |
| | | | TMAP < 13 °C 13 °C ≤ TMAP < 20 °C 20 °C ≤ TMAP ≤ 30 °C TMAP < 13 °C 13 °C ≤ TMAP < 30 °C 20 °C ≤ TMAP ≤ 30 °C Agregado grueso Agregado mediano Suelo A-1-a; A-1-b A-3; A-2-4; A-2-5 A-2-6; A-2-7; A-4; A-5; A-6; A-7 |
| Espesores de las capas | | | |
| En base al Nt 1000000 | | | |
| d1 | 3 in 7.6 cm | IMPONER | |
| d2 | 6 in 15.2 cm | IMPONER | |
| d3 | 9 in 23.1 cm | IMPONER | |
| Coeficiente de drenaje (m) | | | |
| Precipitación (mm/año) 551,14 | | | |
| m2 | 1 | Coeficiente de drenaje (m) | |
| m3 | 1 | Coeficiente de drenaje (m) | |
| Cuadro 64. Valores del coeficiente de drenaje (m) | | | |
| Precipitación (mm/año) | | Coeficiente de drenaje (m) | |
| < 2000 | | 1.00 | |
| 2000 - 4000 | | 0.90 | |
| 4000 | | 0.80 | |
| Valor del SN estructura | | | |
| SN estructura = | 0.04 | $SN \text{ estructura} = a1 \cdot d1 + a2 \cdot d2 + a3 \cdot d3 + m3$ Ecuación 2 | |
| COMPROBACION: | | | |
| SN tránsito | 2.85 | SN estructura | 3.04 |
| 2.85 ≤ 3.04 | | SI CUMPLE | |
| $SN \text{ tránsito} \leq SN \text{ estructura del pavimento}$ Ecuación 3 | | | |
| DIMENSIONES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE | | | |
| Capa Asfáltica (cm) | | 7.6 | |
| Capa Base (cm) | | 15.2 | |
| Capa Sub-base (cm) | | 23.1 | |

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, **Bryam Gerardo Morocho Encalada** portador de la cédula de ciudadanía N.º 0105848196. En calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación "**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CONSIDERANDO LA ESTABILIZACIÓN CON CAL EN BASES GRANULARES**" de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 07 de agosto de 2025

F:

Bryam Gerardo Morocho Encalada
0105848196